



**POLITECNICO
DI TORINO**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi globale del cambio di
processo di lavorazione e di
misura per una famiglia di alberi
per trasmissioni automobilistiche**

Relatori

Ing. Roberto Maffè

Prof. Ing. Luca Iuliano

Candidata

Hilde Galati

Ottobre 2018

Ringraziamenti

Questo lavoro è frutto anche di tutti coloro che mi hanno aiutata con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine.

Ringrazio anzitutto il mio punto di riferimento aziendale, l'Ing. Roberto Maffè, per aver compreso i miei interessi ed avermi affidato un lavoro perfettamente in linea ad essi, e accademico, il Prof. Ing. Luca Iuliano, per la disponibilità mostrata in tutto il mio percorso.

Un pensiero va necessariamente al personale che mi ha supportato: Alessandro Cedrino, che con pazienza e professionalità ha sempre trovato un po' di tempo per rispondere alle mie domande (anche le più banali), organizzare il mio lavoro sul campo e risolvere gli imprevisti; Giovanni Mancuso, che mi ha mostrato il mondo dell'analisi dei tempi, di cui non conoscevo nulla; Luca Amianto, che è sempre stato disponibile ad aiutarmi per qualsiasi cosa; lui insieme a Chiara Mangiagli hanno reso il mio percorso in azienda piacevole sin dall'inizio.

Per la mia carriera, nella sua interezza, ringrazio tutti gli amici e colleghi che, in bene o in male, sono stati parte di ciò che mi ha portato qui oggi.

Ringrazio mia madre e mio padre per il loro costante supporto, pronti sempre a darmi la grinta e la speranza all'inizio di ogni esame ed, alla fine, a gioire con me o consolarmi. Le mie sorelle Manuela e Serena che non si stancano di sopportare il mio ego e sono le mie compagne di vita da sempre, così come Giusy, che è stata seduta nel banco di fianco a me per la maggior parte del mio percorso ed ha affrontato con me ogni esame, spalleggiandoci a vicenda.

Ringrazio Dario, qui con me ogni volta che alzo lo sguardo, mio complice in tutto. Infine ringrazio chi avrei dovuto ringraziare per prima: me stessa. Per essere stata il mio principale sponsor, aver sempre creduto in quello che ho fatto con entusiasmo anche a volte ingiustificato, non essermi posta limiti, non aver dato retta a pregiudizi e non essermi privata di aspirare al massimo sempre e indipendentemente da tutto.

Indice

Elenco delle tabelle	7
Elenco delle figure	9
1 Analisi scarto interno	15
1.1 Gestione dei particolari non conformi	15
1.2 Analisi scarto con processo di Hard turning	16
2 Analisi cause di difettosità	21
3 Cenni sull'analisi di capacità di un processo	25
3.1 Carta di controllo del processo	27
3.2 Analisi di capacità del processo	30
3.3 Istogramma e Grafico di probabilità normale	32
4 Cenni sull'analisi dei sistemi di misura (MSA)	35
4.1 Risoluzione	36
4.2 Studio di tipo 1	38
4.3 Studio di linearità	44
4.4 Studio di tipo 2	44
4.4.1 Average and Range method ARM	46
4.4.2 Metodo ANOVA	49
5 Sistema di misura originario	55
5.1 Risoluzione sistema	56
5.2 Studio di tipo 2	58
5.3 Analisi indici caratteristici	63
6 Processo produttivo originario	65
6.1 Prima caratteristica analizzata: ϕ 30	67
6.2 Seconda caratteristica analizzata: ϕ 31	73
6.3 Terza caratteristica analizzata: ϕ 35	78
6.4 Tabella riassuntiva per processo produttivo originario	83

7 Nuovo sistema di misura	85
7.1 Risoluzione sistema	87
7.2 Studio di tipo 1	87
7.3 Studio di tipo 2	90
7.4 Analisi indici caratteristici	95
8 Nuovo processo produttivo	97
8.1 Da tornitura a rettifica	97
8.2 Prima caratteristica analizzata: ϕ 30	99
8.3 Seconda caratteristica analizzata: ϕ 31	104
8.4 Terza caratteristica analizzata: ϕ 35	109
8.5 Tabella riassuntiva per il nuovo processo produttivo	114
9 Analisi tempi ciclo	115
9.1 Processo originario	116
9.2 Nuovo processo	119
10 Efficienza di processo	123
10.1 Processo originario	126
10.2 Nuovo processo	130
11 Conclusioni	135
11.1 Miglioramenti futuri	138
Bibliografia	139

Elenco delle tabelle

4.1	Criteri di accettazione dell'indice di capacità del processo di misura %R&R per analisi con metodo ARM	49
4.2	Criterio di verifica indici %PV e <i>ndc</i> per metodo ARM	49
4.3	Calcolo Gradi di libertà	51
4.4	Definizione parametri per il test F	51
4.5	Criteri di accettazione dell'indice di capacità del processo di misura %R&R per analisi con metodo ANOVA	53
4.6	Criterio di verifica indici %PV e <i>ndc</i> per metodo ANOVA	53
5.1	Numero di parametri utilizzati per l'analisi	59
5.2	Valori di medie e range delle replicazioni per ciascun operatore e ciascun particolare	60
5.3	Indici percentuali caratteristici del sistema di misura originario	63
6.1	Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per il processo originario	84
7.1	Dati caratteristici del master utilizzato per lo Studio di tipo 1	89
7.2	Numero di parametri utilizzati per l'analisi	91
7.3	Valori di medie e range delle replicazioni per ciascun operatore e ciascun particolare	92
7.4	Indici percentuali caratteristici del nuovo sistema di misura	95
8.1	Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per il nuovo processo	114
9.1	Tempi normali per l'operazione di calibratura del processo originario	117
9.2	Tempi normali per la prima operazione di rettifica del processo originario	117
9.3	Tempi normali per la seconda operazione di rettifica del processo originario	118
9.4	Tempi normali per l'insieme delle tre operazioni in linea	118
9.5	Tempi normali per l'insieme delle operazioni del nuovo processo	120
10.1	Indici di Disponibilità per le due macchine coinvolte nel processo originario	126
10.2	Indici di Performance per le due macchine coinvolte nel processo originario	129
10.3	Indici di Qualità per le due macchine coinvolte nel processo originario	129
10.4	Confronto indici di efficienza	133

11.1 Risultati MSA per i due sistemi di misura	135
11.2 Risultati SPC per il vecchio e nuovo processo	137
11.3 Risultati dell'analisi dei tempi ciclo	137
11.4 Confronto indici di efficienza	138

Elenco delle figure

1.1	Istogramma dei difetti anno 2016	17
1.2	Istogramma dei difetti dimensionali	18
1.3	Andamento indici di scarto per il reparto di lavorazioni post trattamento termico	19
2.1	Diagramma di Ishikawa o a lisca di pesce	22
3.1	Posizione relativa delle Cause Comuni e delle Cause Speciali	26
3.2	Stato di controllo del processo	27
3.3	Forma generale della carta di controllo	28
3.4	Esempi di processi non capaci	30
3.5	Linearizzazione della funzione cumulativa di una distribuzione normale	34
4.1	Schema di zona di conformità e ambiguità della misura	36
4.2	Schema logico per l'esecuzione dei test di valutazione degli indici di capacità per strumenti di misura e processi di misurazione	37
4.3	Significato grafico della ripetibilità	39
4.4	Significato grafico dell'accuratezza	40
4.5	Sistemi di misurazioni ripetibili e accurati	41
4.6	Schema indice di potenzialità strumentale	43
5.1	Comparatori del sistema di misura originario	57
5.2	Tampone con sensore elettronico	57
5.3	Indice percentuale di risoluzione del sistema di misura originario	58
5.4	Disegno del particolare utilizzato per l'analisi del sistema di misura	59
5.5	Andamento delle medie delle tre replicazioni di misura per ciascun particolare e per ciascun operatore	61
5.6	Indici percentuali caratteristici del sistema di misura originario	64
6.1	Particolare-tipo della famiglia di alberi sottoposta allo studio di processo	65
6.2	Diametri torniti e rettificati nel particolare di riferimento	66
6.3	Tornio Monfort	67
6.4	Prima caratteristica analizzata, ϕ 30	68
6.5	Carta di controllo relativa al diametro ϕ 30 lavorato con processo originario	69
6.6	Istogramma relativo al diametro ϕ 30 lavorato con processo originario	71

6.7	Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 30 lavorato con processo originario	72
6.8	Seconda caratteristica analizzata, ϕ 31	74
6.9	Carta di controllo relativa al diametro ϕ 31 lavorato con processo originario	75
6.10	Istogramma relativo al diametro ϕ 31 lavorato con processo originario	76
6.11	Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 31 lavorato con processo originario	77
6.12	Terza caratteristica analizzata, ϕ 35	79
6.13	Carta di controllo relativa al diametro ϕ 35 lavorato con processo originario	80
6.14	Istogramma relativo al diametro ϕ 35 lavorato con processo originario	81
6.15	Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 35 lavorato con processo originario	82
7.1	Macchina Exameca utilizzata come nuovo sistema di misura	86
7.2	Indice percentuale di risoluzione del nuovo sistema di misura	88
7.3	Disegno del particolare utilizzato per l'analisi del sistema di misura	91
7.4	Andamento delle medie delle tre replicazioni di misura per ciascun particolare e per ciascun operatore per il nuovo sistema di misura .	93
7.5	Indici percentuali caratteristici del nuovo sistema di misura	96
8.1	Macchina Emag VTC 315 utilizzata per il nuovo processo produttivo	100
8.2	Carta di controllo relativa al diametro ϕ 30 lavorato con il nuovo processo	101
8.3	Istogramma relativo al diametro ϕ 30 lavorato con il nuovo processo	102
8.4	Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 30 lavorato con il nuovo processo	103
8.5	Carta di controllo relativa al diametro ϕ 31 lavorato con il nuovo processo	106
8.6	Istogramma relativo al diametro ϕ 31 lavorato con il nuovo processo	107
8.7	Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 31 lavorato con il nuovo processo	108
8.8	Carta di controllo relativa al diametro ϕ 35 lavorato con il nuovo processo	111
8.9	Istogramma relativo al diametro ϕ 35 lavorato con il nuovo processo	112
8.10	Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 35 lavorato con il nuovo processo	113
9.1	Tempo ciclo relativo al processo originario	119
9.2	Tempo ciclo relativo al nuovo processo	121
9.3	Confronto tempi ciclo	121
10.1	Perdite di efficienza nell'indice di Disponibilità per le operazioni del processo originario	127

10.2	Perdite di efficienza nell'indice di Performance per le operazioni del processo originario	128
10.3	Influenza dei tre contributi nel calcolo dell'OEE per il processo originario	130
10.4	Perdite di efficienza nell'indice di Disponibilità per il nuovo processo	131
10.5	Perdite di efficienza nell'indice di Performance per il nuovo processo	132
10.6	Influenza dei tre contributi nel calcolo dell'OEE per il nuovo processo	133
10.7	Grafico di confronto per gli indici di efficienza e i rispettivi contributi	134

Sommario

L'oggetto del lavoro di tesi presentato è l'analisi di un cambio di processo per alberi di trasmissioni automobilistiche, prodotti presso lo stabilimento di Cascine Vica dell'azienda Oerlikon Graziano S.p.a.

Il punto di partenza per una variazione talmente consistente è lo studio degli scarti di produzione interni allo stabilimento, conseguente ad un'accurata comprensione della politica aziendale di gestione dei prodotti non conformi, ossia dei pezzi che non rispettano le specifiche richieste dal cliente e pertanto devono essere rottamati o lavorati nuovamente. L'indagine ha, innanzitutto, evidenziato la macro tipologia di difetti maggiormente riscontrata sui pezzi per poi stratificare tale gruppo in difetti più specifici, al fine di risalire alla radice del problema. Appurato che poco meno della metà (40%) delle non conformità riguardano le dimensioni di diametri esterni ed interni, si è proceduto con l'individuazione della famiglia di componenti in cui tale problematica è più ricorrente e le cause ad essa collegate, che hanno condotto allo sviluppo del cambio di processo in questione. L'idea è quella di valutarne l'effetto con adeguata qualificazione e comparazione con il processo originario, solo su un codice prodotto, per poi estendere il processo all'intera famiglia di pezzi.

Le modifiche hanno riguardato parallelamente sia il processo produttivo di lavorazione meccanica, sia il sistema di misura. Riguardo il ciclo produttivo, la lavorazione di finitura originariamente effettuata con operazioni di *Hard Turning* è stata sostituita con una duplice operazione di tornitura di sgrossatura e rettifica, effettuate su un'unico e sofisticato centro di lavoro, al fine di garantire la precisione richiesta dal progetto. Il sistema di misura, inizialmente costituito da diversi strumenti quasi del tutto manuali, è stato rimpiazzato con una macchina di misura di precisione, più accurata e flessibile, che rende trascurabile l'intervento manuale dell'operatore. Sulle linee guida dei manuali AIAG, ANFIA, VDA, che fanno riferimento e sono richiamati dalle normative diffuse in ambito *Automotive (ISO/TS 16949)* è stata condotta un'analisi sul sistema di misura (MSA) e uno studio statistico di processo. Nell'ambito del sistema di misura sono state valutate e le caratteristiche di accuratezza, ripetibilità e riproducibilità dei due sistemi, comparate tra di loro e con i limiti previsti. Lo studio di processo, invece, è stato condotto sulla base di un adeguato numero di misurazioni per tre caratteristiche geometriche del particolare dimensionalmente diverse. Su tali dati è stato valutato l'andamento del processo

con l'utilizzo di *Carte X*, l'andamento delle misure dei pezzi prodotti con il grafico di probabilità normale ed, inoltre, la bontà del processo in termini di *Capacità* di centratura e di dispersione.

Da un punto di vista più globale, per le due condizioni di produzione e misurazione del pezzo sono stati confrontati i tempi ciclo previsti e, di conseguenza, la produttività attesa dai due processi.

Infine, la coronazione di una simile analisi è costituita dalla definizione del parametro di efficienza globale, che racchiude in sé sia l'aspetto qualitativo del prodotto, sia la performance del processo derivante da blocchi macchina, tempi persi per microfermate e ogni altro aspetto che, in qualche modo, possa negativamente influire sullo scostamento del processo reale da quello ideale.

Capitolo 1

Analisi scarto interno

1.1 Gestione dei particolari non conformi

La filosofia aziendale mira a garantire la massima qualità del prodotto attraverso un controllo ed una selezione accurata che, inevitabilmente, permette una suddivisione del prodotto conforme, che procede nel proprio ciclo di vita, e del prodotto non conforme che diviene uno scarto.

La produzione di scarti rappresenta per definizione una perdita non indifferente di risorse economiche e non è pertanto si rende necessario uno studio che permetta di ottenere delle informazioni riassuntive sulle cause del difetto, siano esse riguardanti il prodotto o il processo.

La gestione dei particolari non conformi racchiude l'insieme delle operazioni che devono essere svolte dall'operatore in presenza di un'anomalia sospettata o riscontrata sul pezzo, in base ai controlli cui il particolare deve essere sottoposto secondo quanto richiesto dalle specifiche (controlli visivi, misurazioni di quote geometriche e di forma, ecc.). Tale gestione è definita e regolamentata da apposite procedure standard aziendali, che prevedono, una volta intercettata un'anomalia, di valutare se il particolare non conforme è recuperabile tramite l'introduzione di un'opportuna lavorazione di ripassatura, oppure se il difetto è irrimediabile: in questo caso il pezzo diventa uno scarto.

In entrambe le casistiche di scarto o ripassatura, l'operatore ha il dovere di compilare un documento chiamato Rapporto di non conformità (RNC). La compilazione del rapporto è eseguita con l'ausilio di un software che dà spazio all'operatore per indicare varie informazioni, come ad esempio il part number e la macchina in questione; più interessanti per le analisi conseguenti sono i campi in cui, attraverso un menu a tendina, l'operatore identifica la macro categoria di difetto, la particolare caratteristica anomala riscontrata e la possibile causa, per quanto possa competere alla sua conoscenza. L'RNC contiene, inoltre, uno spazio libero per l'inserimento di note, utili ad organi superiori all'operatore che ricevono i rapporti e li approvano o contestano in base al loro contenuto.

In questo modo, il pezzo di scarto e il relativo rapporto seguono due strade parallele che si concludono rispettivamente con la rottamazione dello scarto e con la registrazione dei dati ad esso relativo su un database che riporta tutte le informazioni del rapporto di non conformità ad eccezione delle note. La presenza di tale database è essenziale per l'analisi a posteriori degli eventuali interventi da effettuare su errori che si ripetono in modo sistematico e che sono riconducibili ad uno dei macro gruppi di cause costituenti le cosiddette 5M (Uomo, macchina, metodo, materiale, ambiente).

Tali analisi non mirano soltanto ad individuare i difetti, poiché in tal caso sarebbero “uno spreco ed una perdita di tempo”¹, bensì, in linea con un'ottica proattiva, le ispezioni hanno l'utilità di prevenire i difetti.

1.2 Analisi scarto con processo di Hard turning

Al termine dell'anno lavorativo 2016 è stata effettuata un'analisi di Pareto al fine di evidenziare i difetti con maggior impatto. È stata dunque effettuata una stratificazione delle perdite, che è un metodo che consente di identificare nel breve termine una o più cause principali del problema analizzato, spaccettando il problema in diversi sottogruppi e reiterando l'analisi per ciascuno dei sottogruppi maggiormente rilevanti.

Si è proceduto con l'identificazione delle macro categorie di difetto, già indicate nel RNC, organizzate poi in ordine di importanza. In questa fase l'impatto degli scarti è stato valutato come frequenza di pezzi scartati e svincolato dunque dal valore monetario degli scarti, identificato come *costo della non qualità*.

Come mostrato dal grafico in figura 1.1, il principale difetto che riguarda circa la metà dei pezzi scartati è un difetto di tipo dimensionale. I pezzi scartati a causa di un difetto dimensionale sono quei pezzi che possiedono almeno una caratteristica la cui dimensione non rientra nel limite stabilito dalla tolleranza prescritta e dunque non risultano funzionali. La presenza di tali errori dimensionali può essere dovuta a molteplici fattori riguardanti il processo produttivo (ad esempio l'imprecisione delle macchine utensili o l'errato montaggio dell'attrezzatura) oppure l'imprecisione sistema di misura utilizzato per il controllo dimensionale.

Il secondo difetto più ricorrente, invece, è racchiuso sotto il nome di Danneggiamenti e fa riferimento almeno per l'80% dei pezzi alla presenza di bolli sul prodotto. Tali bolli possono essere generati in fase di lavorazione, di presa del pezzo o di trasporto. Risulta dunque un problema particolarmente difficile da risolvere poiché la causa non è univoca né facilmente rintracciabile.

Il lavoro svolto mira all'analisi e alla riduzione della prima causa di difettosità, a

¹Taichii Ohno, Lo spirito Toyota

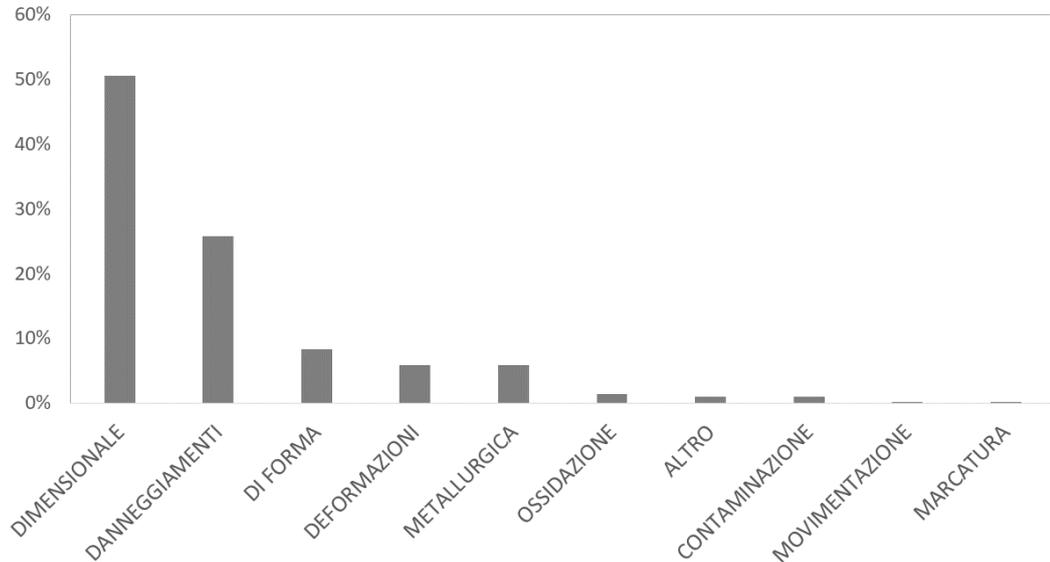


Figura 1.1: Istogramma dei difetti anno 2016

partire dalla quale è effettuata la stratificazione successiva.

Il secondo livello di stratificazione (Figura 1.2) riguarda lo specifico difetto che ricade sotto la voce di difetto dimensionale, anch'esso scelto dall'operatore da un menu a tendina e indicato nell'RNC.

Il 75% dei difetti dimensionali sono, in particolare, riferibili alle prime 4 classi. Tra queste, tre classi riguardano l'errore su una misura di diametro, ossia il diametro interno del pezzo, quello esterno oppure la quota sfere, che è una caratteristica della dentatura, misurata come distanza tra due sfere inserite nel vano di due denti in posizione diametralmente opposta. Inoltre, è possibile constatare che essendo i diametri interni ed esterni riferibili allo stesso gruppo di caratteristiche dimensionali ed alla medesima tipologia di lavorazione, le due classi possono ragionevolmente essere accorpate. L'insieme delle due classi di difettosità rappresenta circa il 40% dell'intera classe di difetti dimensionali, e risulta quindi particolarmente rilevante rispetto alle altre classi che presentano una percentuale inferiore alla metà di quest'ultima.

La dimensione dei diametri interni ed esterni è definita dalla lavorazione di tornitura interna ed esterna oppure da rettifica, in relazione a quanto richiesto dal ciclo di lavorazione dei diversi particolari. Dunque, è necessario indagare su quali siano i pezzi che presentano questa tipologia di difetti, al fine di risalire alla causa.

I numerosi part number prodotti dallo stabilimento, ad eccezione di mozzi e manicotti, possono essere ricondotti a due famiglie di pezzi, all'interno delle quali i pezzi presentano similitudini geometriche e tecnologiche e solo minime differenze

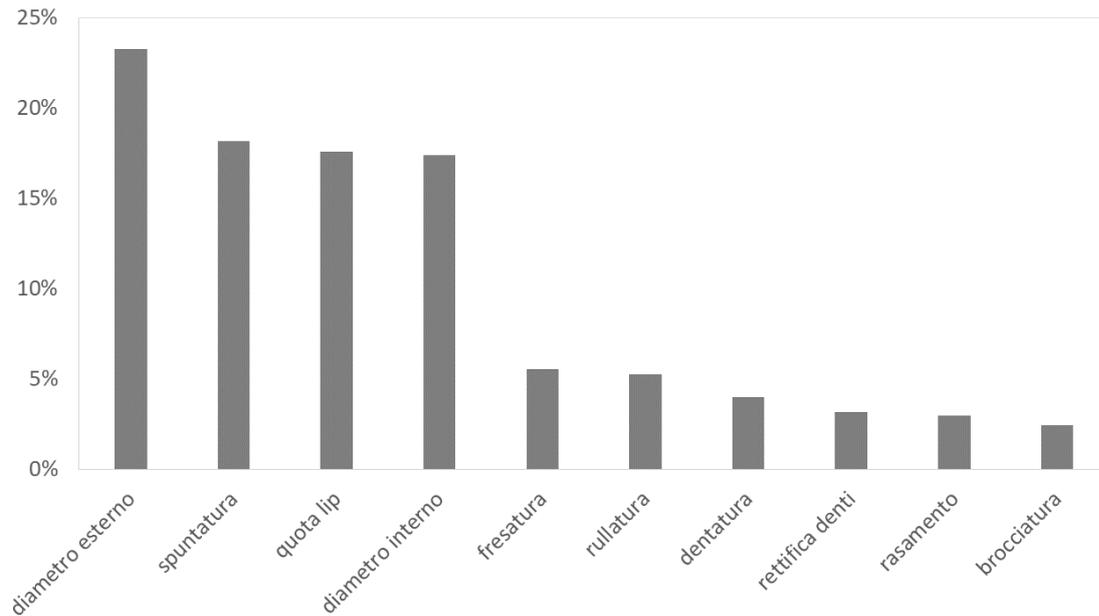


Figura 1.2: Istogramma dei difetti dimensionali

progettuali e costruttive; le famiglie in questione sono gli alberi e ingranaggi. La presenza di errori sui diametri è distribuita su entrambe le famiglie di pezzi, con particolare concentrazione sugli alberi, cui riguarda circa il 70% di tali difetti.

Appurato ciò, si è proceduto con l'individuazione dei reparti cui viene *addebitato* lo scarto, che sono per la maggior parte dei casi il reparto produttivo ed un reparto fittizio indicato quando i difetti non sono riferibili ad un particolare reparto esistente. Dunque, e sono state analizzate le possibili cause dichiarate dall'operatore che intercetta i pezzi difettosi. In particolare, le cause riportate per i difetti sui diametri attribuiti al reparto di tornitura e rettifica sono principalmente due: macchina non efficiente e capacità macchina limitata. Le due cause sono certamente connesse ad un unico fattore comune: la macchina.

Infatti, può capitare che per caratteristiche proprie della macchina, essa non riesca a garantire la tolleranza prescritta dal progetto. Per quanto riguarda invece il secondo reparto cui sono attribuibili i difetti, la causa principale del mancato rispetto della tolleranza sul diametro è riferita ad una eccessiva deformazione che il pezzo subisce durante il trattamento termico.

E' importante sottolineare che la definizione di tali cause è delegata, in questo frangente, ai singoli operatori che rilevano il difetto e abbozzano una causalità nella compilazione dell'RNC pur non avendo una visione d'insieme del processo, del sistema di misura e di tutto ciò che potrebbe eventualmente essere complice della presenza del difetto; ne deriva le indicazioni fornite potrebbero non essere del tutto

realistiche nei confronti del problema e che dunque è necessaria un'analisi più approfondita.

Per quel che riguarda la monetizzazione dello scarto, si è fatto riferimento ad un'analisi svolta periodicamente che attribuisce ai vari reparti responsabili il cosiddetto *costo della non qualità*, in riferimento al valore dei pezzi scartati o rilavorati, in termini di costo del pezzo e di ore di lavoro.

L'andamento dell'indice che descrive il valore degli scarti rapportato alle ore/ciclo perse viene confrontato con un valore target, con l'obiettivo del continuo miglioramento.

In accordo con l'analisi svolta sugli scarti, lo studio del trend per l'anno 2016 ha evidenziato delle problematiche riguardanti proprio i centri di costo dei reparti maggiormente coinvolti nell'errore dimensionale sugli alberi.

Infatti, come mostra il grafico 1.3 in diversi mesi dell'anno la retta obiettivo dell'indice di scarto è stata ampiamente oltrepassata.

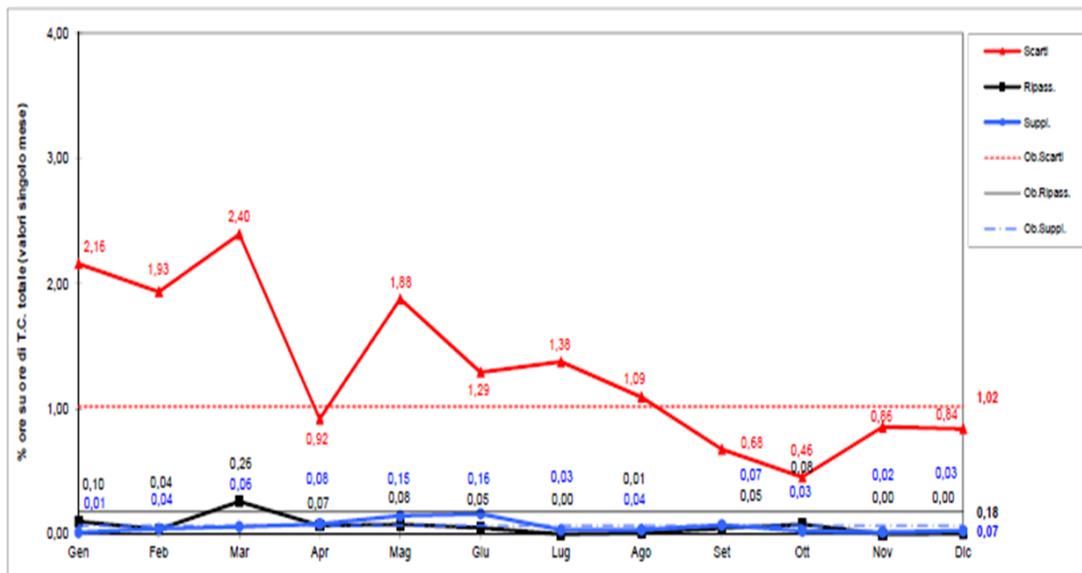


Figura 1.3: Andamento indici di scarto per il reparto di lavorazioni post trattamento termico

Capitolo 2

Analisi cause di difettosità

A fronte dei risultati ottenuti, si è proceduto con l'analisi per l'individuazione delle cause più probabili del problema.

Una prima stima delle cause era stata ottenuta tramite la stratificazione delle perdite sulla base delle informazioni ricavate dai rapporti di non conformità ma, come sottolineato, non è sufficiente per la definizione globale del problema. Per questa ragione, si è fatto ricorso ad altri strumenti per uno studio di questo tipo.

Tra le tecniche manageriali disponibili per la risoluzione di un problema del genere, che rientra nell'ambito della Qualità totale (*TQM Total Quality Management*), è molto sviluppato l'utilizzo del diagramma di Ishikawa, noto anche come diagramma a lisca di pesce o diagramma causa-effetto. Si tratta di un diagramma che mostra le relazioni tra una caratteristica e i suoi fattori scatenanti, attraverso una rappresentazione grafica. Le varie cause sono divise in macro categorie e individuano dei percorsi che consentono di raggiungere un obiettivo finale che consiste, appunto, nell'effetto. I gruppi di cause sono i quattro fattori chiave (le *4 M*) che influenzano il processo produttivo: la manodopera, le macchine, i materiali, i metodi; a queste si può, inoltre, aggiungere l'ambiente (Milieu, in francese). In sessioni di *brainstorming* vengono esaminate nel dettaglio tutte le possibili cause e raggruppate nelle corrette categorie e si procede, voce per voce, a stabilire se e quanto la causa influenzi l'effetto al fine di estrarre le cause più rilevanti.

Di seguito i risultati sulle possibili cause, nei 4 gruppi, che potenzialmente conducono a pezzi con errori dimensionali sugli alberi nelle lavorazioni post trattamento termico.

- Manodopera

Tra le cause dovute alla manodopera vi è l'errore nell'immissione del programma, o un'errata correzione dei parametri di lavorazione, sintomi relativamente ai quali si può agire rinforzando l'addestramento degli addetti. Oltre all'errore sulla lavorazione vera e propria, il fattore umano può influire anche sul

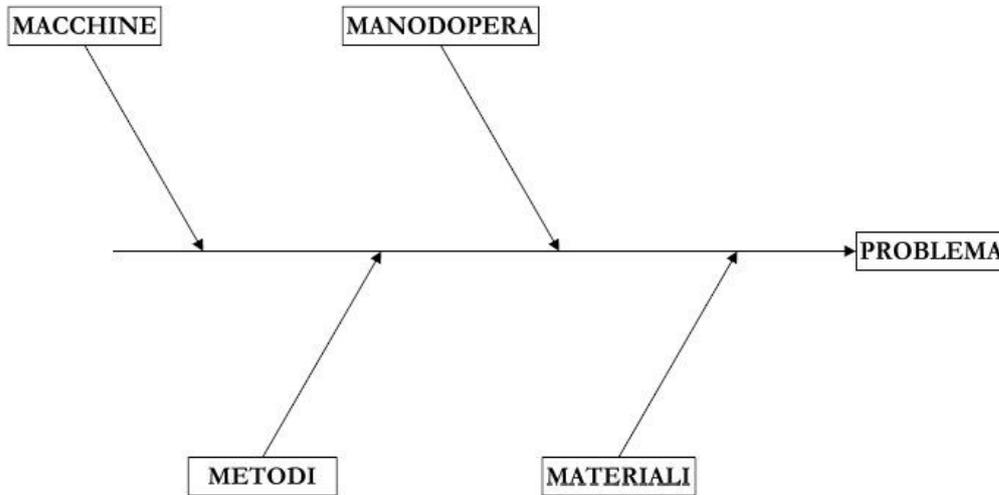


Figura 2.1: Diagramma di Ishikawa o a lisca di pesce

controllo del pezzo; l'utilizzo dei sistemi di misura, infatti, non è banale e necessita di una formazione tecnica adeguata.

Infine, sebbene sia meno influente, può influire sulla qualità del prodotto anche la carenza di capacità di auto manutenzione dell'addetto alla macchina. La presenza di tali cause è stata effettivamente verificata, per cui sono stati presi i dovuti provvedimenti.

- Materiale

In questo gruppo rientrano tutte le cause dovute alle caratteristiche del pezzo da lavorare. In questa fase del ciclo di lavorazione, il prodotto, partendo da un pezzo grezzo, ha subito delle lavorazioni “*in bianco*” ossia precedenti al trattamento termico dalle quali potrebbero derivare già dei difetti dimensionali non più recuperabili con le successive lavorazioni. Un'altra fonte di causa potrebbe essere il trattamento termico di carbo-cementazione che il pezzo subisce che, se non corretto, darebbe luogo ad un pezzo con durezza troppo elevata o troppo poco elevata e ciò causerebbe problemi nelle altre fasi del ciclo. Inoltre, va evitata anche la presenza di cricche all'interno del pezzo oppure di impurità. Tuttavia, tutte le voci che rientrano in questo gruppo sono state verificate ed il risultato è che non vi è la effettiva presenza di nessuno di questi problemi.

- Metodi

L'errore nei metodi è un errore a monte del processo e riguarda la scelta dei sistemi e delle modalità operative del processo. Ad esempio, una possibile

causa potrebbe riguardare l'inadeguatezza degli strumenti di misura utilizzati; nel caso in questione si tratta di calibri e il problema riguarda sia la scarsa ripetibilità, sia il fatto che gli azzeramenti degli stessi risultano complessi, aspetto che, per altro, si riconduce alla causa già presente nella categoria "Manodopera". Un altro fattore che è stato rivisto è il layout della postazione; il sistema di riordino e le scaffalature, infatti, rendevano l'attrezzatura non facilmente reperibile.

- **Macchine**

Il problema dell'efficienza della macchina emerso dall'analisi statistica degli RNC, così formulato, non è sufficientemente preciso in quanto tale inefficienza può essere ricondotta a vari fattori. In primo luogo, le problematiche possono riguardare la regolazione della macchina, quindi gli assi non allineati, le contropunte disallineate, problemi sulla torretta porta utensili, su mandrino porta pezzo o sulla lunetta di supporto. Tutti questi problemi possono essere ricondotti a due cause primarie: la mancanza di manutenzione programmata e la lubrificazione non idonea.

I piccoli interventi da svolgere sul processo, quali il re-layout della postazione, l'addestramento degli addetti, la stesura di un piano di manutenzione ed altri, sono stati accompagnati da modifiche più rilevanti che riguardano il sistema di misura e il ciclo di lavorazione dei pezzi.

Capitolo 3

Cenni sull'analisi di capacità di un processo

Governare un processo produttivo significa essere capaci di definirlo e pilotarlo adeguatamente per assicurare in via preventiva il soddisfacimento dei requisiti di qualità del prodotto.

Un valido strumento all'attività di ogni livello organizzativo aziendale che abbia il fine del raggiungimento della qualità totale è il Controllo Statistico di processo (SPC). Esso può essere definito come una metodologia che, in riferimento ad una determinata attività, operazione, fase o processo caratterizzato da ripetitività, fa ricorso a tecniche statistiche al fine di definire, analizzare e verificare le condizioni che determinano la variabilità dell'oggetto di analisi. In modo più sintetico, L'SPC è l'applicazione di tecniche statistiche per comprendere ed analizzare le variabilità di un processo¹. Tale sistema di controllo prevede di valutare:

- La capacità del processo, all'avvio e periodicamente.
- Il suo stato di controllo statistico, tramite l'utilizzo sistematico di carte di controllo per evidenziare ed eliminare eventuali cause che intervengono a perturbare il sistema.

Lo studio di idoneità di un processo è sempre riferito singolarmente ad una specifica operazione elementare (fase) che produce una o più caratteristiche del prodotto, finite o in uno stadio intermedio di lavorazione. In alcuni casi si può far riferimento ad una caratteristica del processo e non del prodotto e, di conseguenza, è necessario stabilire una relazione di causa-effetto tra le due.

Un processo è definito idoneo se risulta contemporaneamente sia capace sia stabile, ossia in controllo statistico.

¹Joseph M. Juran, The Juran Trilogy: Quality control

- Un processo è capace se risponde alla caratteristica di centratura rispetto alle tolleranze prescritte (*Capacità in centratura*) e se la dispersione delle misure non è elevata (*Capacità in dispersione*).
- Si dice in controllo statistico se esso evolve nel tempo in maniera casuale; in tali condizioni, anche la sua centratura e la sua dispersione evolvono secondo pura casualità e, dunque, sono facilmente prevedibili.

Le cause di variabilità possono essere comuni o cosiddette speciali (Figura 3.1). Le cause comuni (o normali) sono insite nella variabilità di un processo produttivo; insorgono casualmente durante il normale svolgimento del processo e ne determinano la fluttuazione naturale all'interno di un intervallo determinato da un limite di controllo superiore e uno inferiore (LCI o UCL e LCS o LCL). Cause comuni potrebbero essere la variazione intrinseca di materiali grezzi utilizzati nella linea produttiva, la mancanza di adeguata supervisione, la vibrazione delle macchine e i cambiamenti nelle condizioni lavorative.

Le cause speciali, invece, sono quelle che determinano variabilità indesiderata o anomala rispetto al naturale svolgimento del processo. Esse possono derivare, ad esempio, dall'uso di un utensile sbagliato, dall'errore di un operatore o da particolari condizioni ambientali, come l'illuminazione o la temperatura. Fin quando non si provvede ad una loro rimozione o correzione e non si intervenga, cioè, specificatamente su ciascuna, esse continueranno ad influire in maniera imprevedibile sul processo, portandolo fuori controllo. Quando il processo è affetto soltanto dal primo

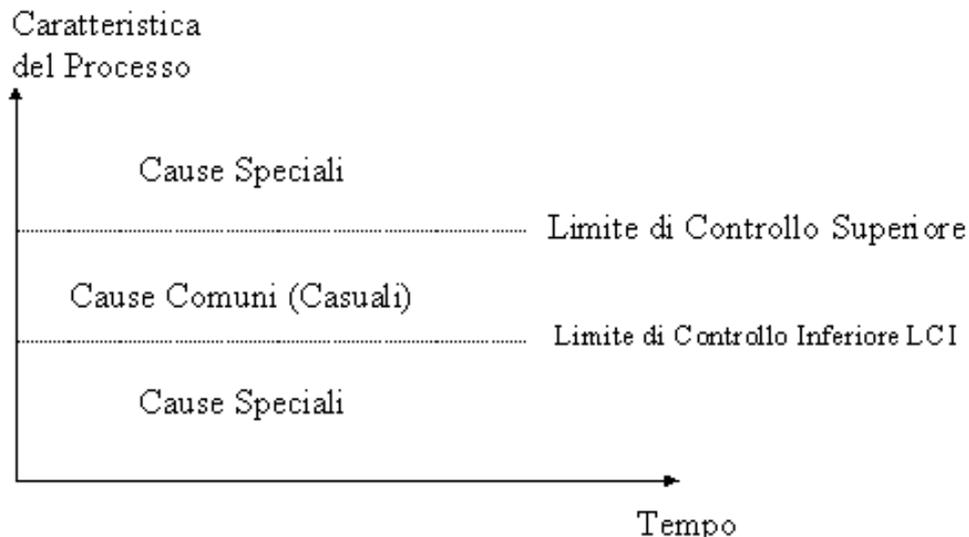


Figura 3.1: Posizione relativa delle Cause Comuni e delle Cause Speciali

tipo di cause, si dice in controllo statistico e le sue prestazioni risultano prevedibili

(Figura 3.2). Qualora esse (centratura e dispersione) risultino anche soddisfacenti in relazione alle tolleranze richieste, il processo è anche capace e globalmente idoneo.

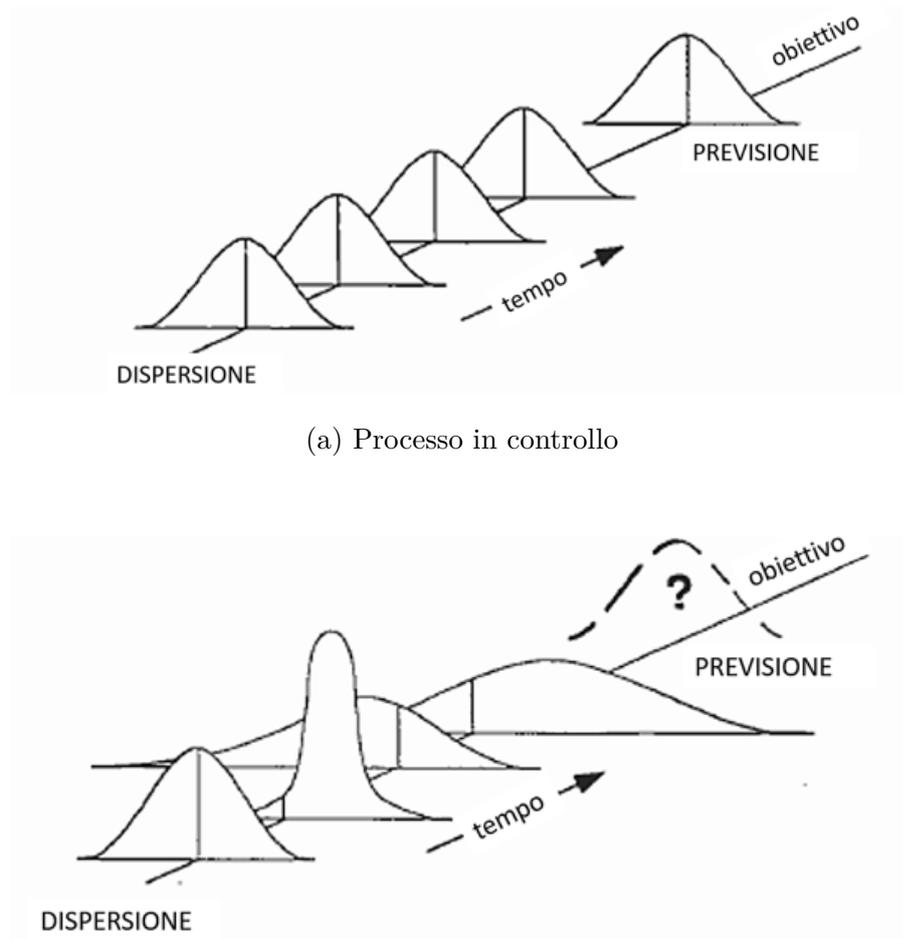


Figura 3.2: Stato di controllo del processo

Due delle tecniche statistiche impiegabili nella metodologia SPC sono le **carte di controllo** e l'**analisi della capability**.

3.1 Carta di controllo del processo

Le Carte di Controllo rappresentano un valido strumento per comprendere se un processo è statisticamente sotto controllo, e, se non lo è, danno un'ipotetica indicazione del motivo del fuori controllo. Sono essenzialmente rappresentazioni grafiche

di un processo nel tempo che, basandosi su teorie statistiche, rimangono di facile interpretazione e utilizzo anche per utenti meno esperti.

Del processo sotto esame vengono raccolti dai campioni i dati necessari e da questi sono ricavati i parametri statistici come media, deviazione standard, range. Queste operazioni vengono compiute per un certo numero di campioni, dopo di che la carta è pronta per essere letta e interpretata.

Le carte di controllo si dividono in due categorie in base al tipo di dati estrapolati dall'analisi del processo in esame e sui quali sono costruite. Si hanno le carte per variabili e le carte per attributi, ma poiché i dati analizzati in questo contesto sono misurabili e confrontabili numericamente si farà riferimento unicamente alle carte di controllo per variabili.

In letteratura esistono diversi tipi di carte di controllo, la cui forma generale è riportata in figura 3.3.

Le tre linee orizzontali continue chiamate linea centrale (CL), limite superiore

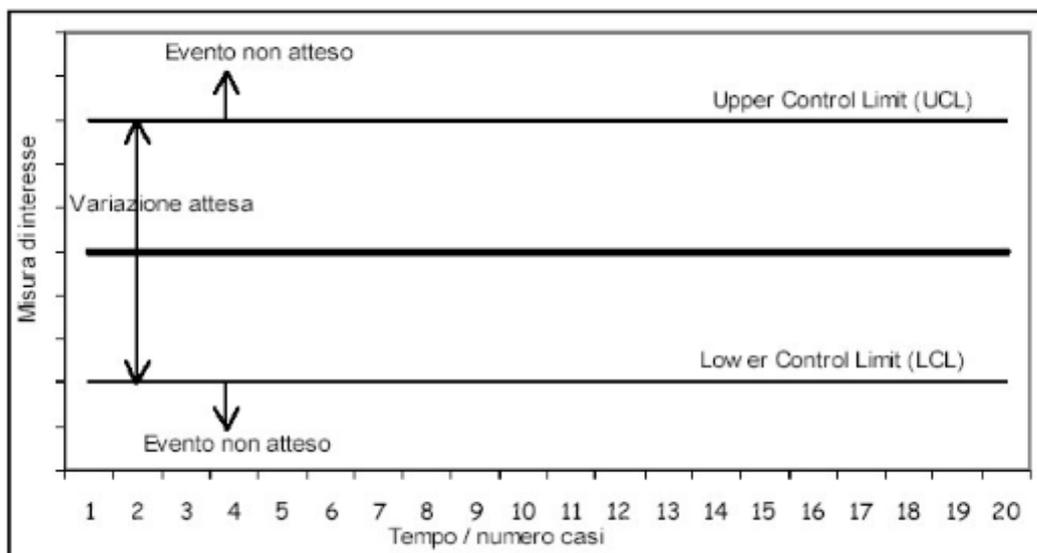


Figura 3.3: Forma generale della carta di controllo

di controllo (UCL) e limite inferiore di controllo (LCL), definiscono la tendenza centrale e un range di variazione naturale per i valori riportati sul grafico. I limiti inferiori e superiori sono calcolati in base a una distribuzione di frequenza teorica che cambia in funzione del tipo di dati che vengono analizzati (distribuzione gaussiana, di Poisson, binomiale). Tipicamente una carta di controllo stabilisce dei limiti che si collocano a ± 3 volte lo scarto quadratico medio dalla misura statistica di interesse (media, proporzione, range).

Tra i vari tipi di carta, quella utilizzata nello studio svolto è la **Carta X**, anche

detta **Carta per misure singole**.

A differenza delle altre tipologie di carte, che raggruppano e valutano campioni di dati composti da diversi individui, le Carte per misure singole, sono caratterizzate dall'analisi di quantità individuali di misure. Ogni sottogruppo è cioè composto da un unico elemento, situazione tipica di produzioni per le quali il processo per la misura di diversi dati per ciascun campione richiede tempistiche elevate.

Poiché il campione è unitario, non è possibile fornire a partire da questo alcuna stima sulla media μ e la deviazione standard del processo σ . Infatti, per una carta individuale, l'indice di dispersione viene calcolato utilizzando l'escursione mobile (*moving range*), ossia il valore assoluto della differenza tra due misure successive.

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}| \quad (3.1)$$

Quindi si stima la dispersione del processo come media dei valori di range mobile; posto k il numero di campioni, il numero di range mobili è pari a $k - 1$.

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=1}^{k+1} MR_i}{k - 1} \quad (3.2)$$

La stima campionaria della deviazione standard è data dalla 3.3, in cui il parametro d_2 è tabellato.

$$\tilde{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad \text{con } d_2 = 1,128 \quad (3.3)$$

Una volta calcolata la stima della dispersione standard, si fissano i limiti della carta di controllo al triplo della deviazione standard $\pm 3\tilde{\sigma}$. Ciò corrisponde ad assumere un rischio di prima specie α , di supporre che un processo sia fuori controllo statistico mentre in realtà è sotto controllo, pari a 0,0013. Infatti, i limiti così definiti includono il 99,73% dei campioni la cui dispersione rientra nella normale variabilità del processo e lasciano fuori quelli la cui variabilità è dovuta ad una causa particolare.

I limiti superiore (UCL) ed inferiore (LCL) risultano dunque

$$UCL = \bar{X} + 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} = \bar{X} + 2,66\overline{MR} \quad (3.4)$$

$$LCL = \bar{X} - 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} = \bar{X} - 2,66\overline{MR} \quad (3.5)$$

ed il valore centrale (LC), naturalmente

$$LC = \bar{X} \quad (3.6)$$

Una volta definiti i limiti di controllo, plottando i dati all'interno del grafico, la carta consente di individuare eventuali andamenti sistematici dei valori che rappresentano l'evoluzione del processo nel tempo. Ad esempio, potrebbe essere riscontrato un

andamento ciclico dovuto a cause ricorrenti (temperatura dell'ambiente), crescente o decrescente (deriva temporale) della caratteristica misurata, o altri tipi di andamenti che rilevano determinate condizioni da correggere, seppur quando le misure restino comunque entro i limiti.

Se uno o più punti cadono fuori dai limiti di controllo, il processo è definito fuori controllo.

3.2 Analisi di capacità del processo

Le carte di controllo sono un potente mezzo per mantenere un processo sotto controllo statistico e rilevare eventuali cause speciali di variazione. Tuttavia, esse non tengono conto delle specifiche a cui il processo deve attenersi, come ad esempio le tolleranze di lavorazione o altre specifiche di output del processo. Il loro utilizzo non è dunque sufficiente a comprendere la reale capacità di un processo, né come questo possa essere migliorato.

La capacità del processo si riferisce, appunto, alla capacità che lo stesso ha di soddisfare le specifiche richieste dal cliente o dalla funzionalità del pezzo. Essa va valutata monitorando due aspetti caratteristici del processo :

1. Dispersione del processo
2. Centratatura del processo

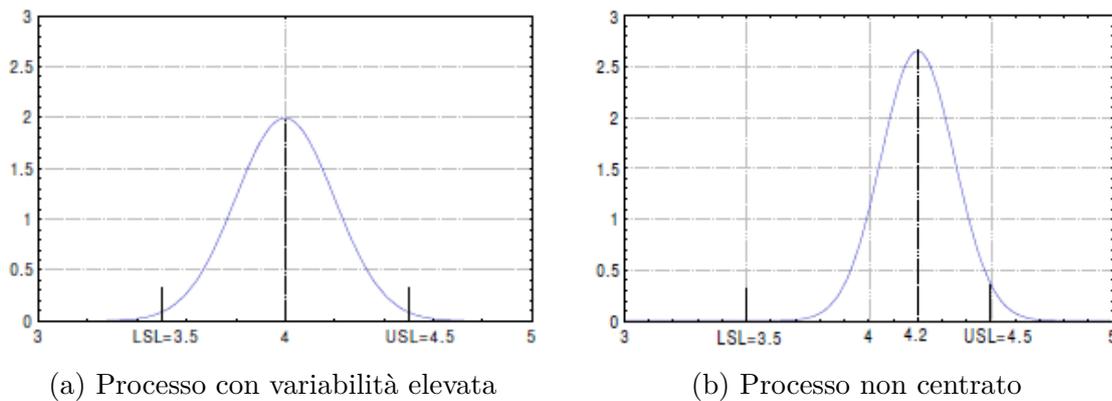


Figura 3.4: Esempi di processi non capaci

L'eccessiva variabilità (Figura 3.4.a) determina un'ampia porzione di area al di fuori dei limiti di specificazione, nelle due direzioni; anche in presenza di una variabilità non elevata è possibile rilevare un numero di dati esterni ai limiti se il processo non è centrato rispetto al valore di target (Figura 3.4.b).

La valutazione della capacità di processo è effettuata mediante il calcolo di due indici: indice di potenzialità del processo e di prestazione del processo.

- La potenzialità del processo è la capacità potenziale del processo a mantenere una determinata caratteristica in modo costante all'interno dei limiti di specifica prefissati. L'indice di potenzialità del processo C_p valuta la prestazione qualitativa sulla base del rapporto tra l'ampiezza della tolleranza prescritta e l'ampiezza della dispersione del processo. La varabilità totale è detta anche *tolleranza naturale del processo* ed è rappresentata dal valore 6σ .

$$C_p = \frac{UTL - LTL}{6\sigma} \quad (3.7)$$

In cui UTL e LTL sono i limiti di tolleranza superiore e inferiore.

Per una distribuzione normale, l'intervallo compreso fra i due estremi $\pm 3\sigma$ include il 99,73% dei valori di X e, in corrispondenza, si ha il 0,27% di valori esterni. Per cui, se l'intervallo di specificazione è maggiore di 6σ (ovvero se l'indice $C_p > 1$) significa che, mediamente, si producono meno del 2,7% di pezzi non conformi e cioè che il processo può ritenersi capace. Il valore target di C_p è fissato dai requisiti specifici dei clienti o da dedicate procedure interne. // Il processo si definisce capace quando il C_p è maggiore del target prefissato.

- L'indice di prestazione del processo C_{pk} valuta la capacità effettiva di un processo di mantenere una determinata caratteristica in modo costante all'interno dei limiti di specifica prefissati, considerando anche la centratura del processo.

Esso è calcolato come il minimo tra la distanza del valore medio del processo dal limite di tolleranza superiore rapportato al semintervallo di dispersione e la distanza tra il valore medio dal limite di tolleranza inferiore, rapportato alla stessa quantità.

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{UTL - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTL}{3\sigma}\right\} \quad (3.8)$$

Scegliendo il minore dei due valori a destra e sinistra del valore medio, si determina quanto è capace il processo sul lato peggiore, quello cioè rappresentato dalla coda della gaussiana più vicina al limite di tolleranza. Se C_{pk} è maggiore di 1, l'ampiezza 6σ dei dati cade completamente nei limiti di tolleranza ; un C_{pk} compreso tra 0 e 1 indica che una parte dei prodotti del processo cadono oltre i limiti, ed infine un C_{pk} negativo indica che la media dei dati non è nella specifica.

In genere si richiedono indici C_{pk} di 1,33. Tale valore significa che la differenza tra la media \bar{X} e il limite di tolleranza è pari a 4σ . Con un C_{pk} di 1,33, il 99,94% del prodotto è nella specifica.

Il diffuso impiego di tali indici di capacità è imputabile alla possibilità di riassumere in modo molto conciso i dati di un processo produttivo, con il vantaggio, rispetto

ad altri strumenti statistici, di essere quantità adimensionali, e quindi facilmente interpretabili e paragonabili tra loro; si prestano a confrontare, infatti, la capacità di processo rispetto a dimensioni differenti nonché a confrontare processi diversi.

3.3 Istogramma e Grafico di probabilità normale

L'istogramma è uno strumento grafico che consente di avere una visione completa e sintetica dei dati raccolti. Può essere allora utile monitorare, attraverso un istogramma, la dispersione delle variabili più importanti e critiche del processo produttivo in modo da identificare qualsiasi problematica ed eventuali contromisure per la risoluzione del problema.

L'istogramma, che non è altro che un diagramma a colonne, presenta in ordinata il numero di osservazioni in ciascuna classe e in ascissa le classi. Per classe si intende la dimensione di un intervallo di variabilità dei dati che si è preso come base per la rappresentazione dei dati stessi.

Alla base della costruzione di un istogramma vi è la valutazione dell'escursione dei dati, come differenza tra il valore massimo ed il valore minimo, e la successiva suddivisione di questa per il numero di classi, per ottenere l'intervallo di classe. La scelta del numero di classi non segue generalmente un criterio prestabilito, tuttavia la letteratura suggerisce di adoperare un numero di classi K pari a

$$K = \sqrt{N + 1} \quad (3.9)$$

Dunque si calcola l'ampiezza di classe A , gli estremi di ciascuna classe e il valore centrale, che coincide con l'ascissa indicata per ciascuna colonna.

$$A = \frac{X_{MAX} - X_{MIN}}{K} \quad (3.10)$$

Per ogni classe si determina la *Frequenza assoluta* f_a che rappresenta il numero di dati che ricadono tra gli estremi di quella classe. Dividendo questo parametro per il numero totale di dati si ottiene la *Frequenza relativa* f_r .

$$f_r = \frac{f_a}{N} \quad (3.11)$$

La frequenza relativa rappresenta l'area di ciascuna colonna dell'istogramma. Dunque, per ricavare l'ordinata che rappresenta la *Densità di frequenza* \tilde{f} , basta dividere l'area f_r per l'ampiezza di base della colonna A .

$$\tilde{f} = \frac{f_r}{A} \quad (3.12)$$

La forma del istogramma così ottenuto può essere utile a verificare se la distribuzione dei dati segue un andamento a campana o se al contrario siano presenti due

o più picchi di frequenza (distribuzione bimodale o multimodale) dovuti generalmente alla sovrapposizione di dati di origine diversa (due macchine, due operatori). L'istogramma può rilevare un'asimmetria nella distribuzione dei dati, sintomatica di qualche errore nella raccolta dati, nella misurazione o nella sovrapposizione di dati non omogenei; il processo può essere sbilanciato in senso positivo (più valori a sinistra) o negativo (più valori a destra).

Un metodo grafico alternativo all'istogramma, largamente utilizzato per verificare se si è in presenza di una distribuzione normale è quello di inserire i dati in un grafico di probabilità normale (GPN).

Se tale inserimento dà luogo ad una retta, allora si può concludere che il campione proviene da una popolazione distribuita in modo normale. In alternativa si possono rilevare distribuzioni *Iponormali*, in presenza, ad esempio, di deriva temporale o *Ipernormali*.

La costruzione del grafico GPN consiste nel riportare in forma linearizzata la funzione della distribuzione normale cumulata (Figura 3.5), che corrisponde all'integrale della curva di distribuzione normale di Gauss, calcolabile numericamente e non analiticamente. Nello stesso grafico, tale retta viene confrontata con l'andamento delle densità di frequenza di probabilità normale dei dati.

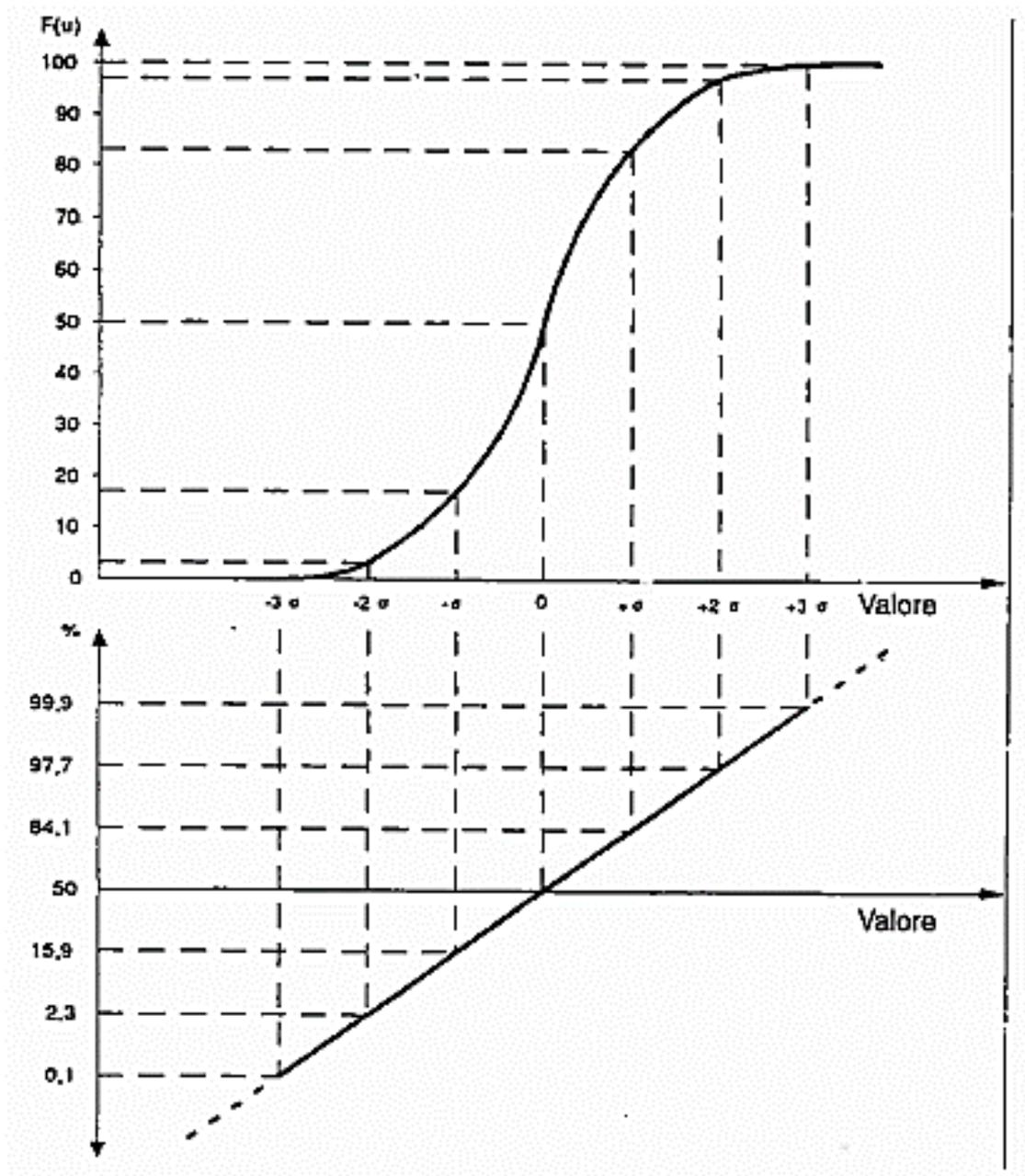


Figura 3.5: Linearizzazione della funzione cumulativa di una distribuzione normale

Capitolo 4

Cenni sull'analisi dei sistemi di misura (MSA)

L'analisi del sistema di misura è lo studio necessario a stabilire se, sotto determinate condizioni, l'accuratezza, la ripetibilità e le altre caratteristiche dello strumento di misura sono sufficienti a tenere sotto controllo un determinato processo, in condizioni reali. Tale valutazione, dunque, consente di determinare se la variabilità dei risultati di misura ottenuti è accettabile in relazione al campo di tolleranza prescritta per la caratteristica oggetto della misurazione; pertanto essa deve tenere conto di tutte le quantità che influiscono sull'incertezza di misura, che non va considerata come un errore, ma come un'informazione aggiuntiva utile al completamento del risultato.

La qualificazione di un sistema di misura è indispensabile in quanto la correttezza e l'affidabilità dei risultati di misura sono alla base di decisioni rilevanti dal punto di vista qualitativo ed economico. Tali risultati determinano se un pezzo deve essere accettato, scartato o rilavorato, oppure se il processo produttivo è stabile, centrato, ecc. Infatti, un'elevata variabilità nella misura aumenta la probabilità che le code delle distribuzioni delle misure generino scelte sbagliate, quali, ad esempio, quella di accettare un pezzo che invece andrebbe scartato oppure scartare un pezzo che andrebbe accettato. Ciò è dovuto al fatto che, sebbene la tolleranza prescritta definisca una zona di accettazione ben specificata da due limiti (o al più uno più il limite naturale), nell'ambito reale a cavallo di tali limiti vi è una zona di ambiguità dovuta all'incertezza del sistema di misura; questa ambiguità è tale per cui una misura che ricada nei pressi del limite di tolleranza prescritta ha un'elevata probabilità di essere non conforme. La zona di ambiguità è tanto maggiore quanto maggiore è la variabilità del sistema e del processo di misura e, di conseguenza, la zona di sicura conformità si restringe all'aumentare di questo parametro di variabilità.

Quello utilizzato nella raccolta dati oggetto di tesi è un sistema di misura per variabili, ossia è in grado di attribuire un valore numerico alle misurazioni effettuate. Come tale, la sua analisi segue il diagramma di flusso mostrato in figura 4.2.

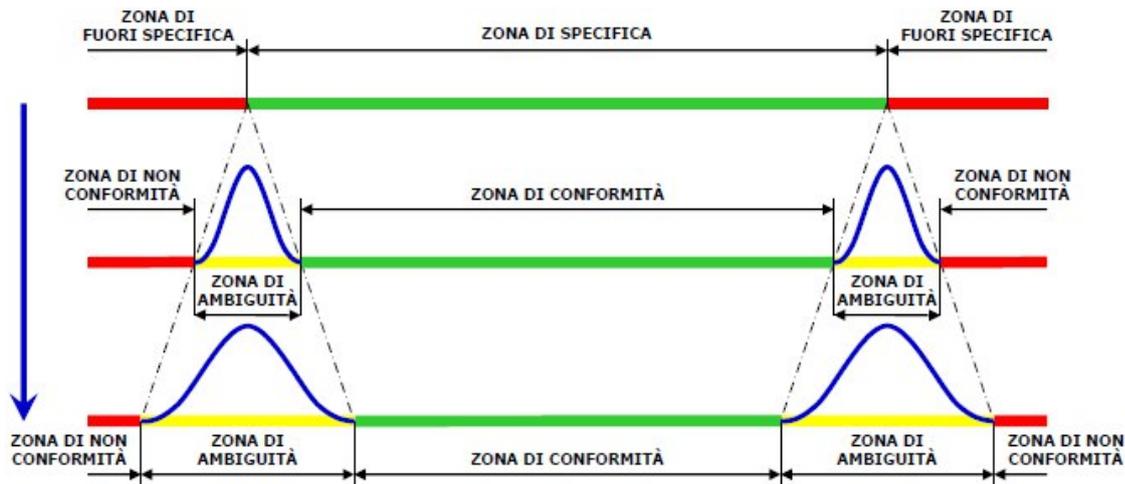


Figura 4.1: Schema di zona di conformità e ambiguità della misura

In particolare, si distinguono due gruppi di studi: il primo riguarda analisi sullo strumento di misura e include l'analisi di risoluzione, accuratezza e ripetibilità dello strumento; il secondo è di tipo più globale e coinvolge l'intero processo di misura per valutare, attraverso lo studio di ripetibilità e riproducibilità, l'eventuale influenza di fattori esterni che non riguardano lo strumento di misura ma che sono tuttavia presenti all'interno del processo. Per quest'ultimo gruppo, è necessario che i test siano eseguiti nell'ambiente nel quale il processo è usualmente eseguito, a cura del personale che ad esso è usualmente addetto.

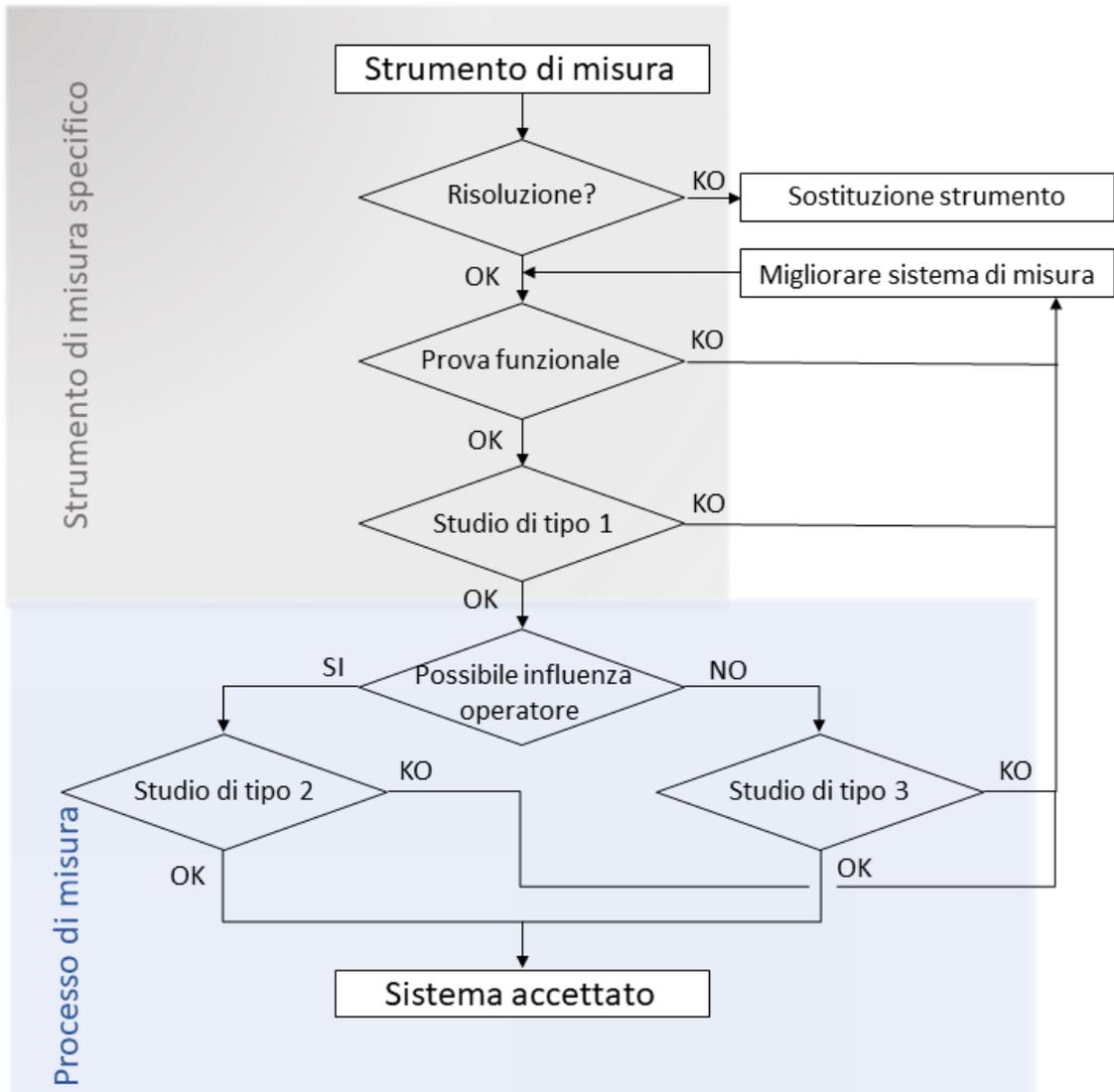
I test seguenti di ripetibilità e accuratezza (*Studio di tipo 1*) sono effettuati su un pezzo campione; tale campione, detto anche *master di controllo*, è un elemento di valore noto, ossia a cui viene assegnato un valore di riferimento e la corrispondente incertezza estesa. Esso deve essere rappresentativo della famiglia di particolari in produzione per cui si utilizza il sistema di misura analizzato.

4.1 Risoluzione

Per definizione la risoluzione è l'attitudine di uno strumento di misura a rispondere alle variazioni del segnale di ingresso. In altre parole, rappresenta la più piccola variazione apprezzabile della grandezza in esame attraverso tutto il campo di misura, ossia il valore dell'ultima cifra significativa ottenibile.

Tale caratteristica metrologica è, dunque, esplicitamente riferita al dispositivo mediante cui l'operatore acquisisce il valore numerico in uscita dallo strumento da attribuire alla caratteristica misurata. L'acquisizione avviene tramite un dispositivo di lettura analogico o digitale.

Per un dispositivo di lettura con formato digitale si considera la differenza di indicazione che corrisponde alla variazione di un'unità della cifra meno significativa,



mentre per gli strumenti analogici tale intervallo risulta essere minore o uguale dell'unità d'intervallo, potendo l'operatore eventualmente procedere ad una interpolazione in funzione della qualità delle graduazioni e della geometria dei tratti e dell'indice.

Il valore descritto rappresenta la risoluzione dello strumento indicata con Δy_{min} . A partire da questo dato, si definisce l'indice di risoluzione frazionario Ris

$$Ris = \frac{\Delta y_{min}}{T_{pre}} \quad (4.1)$$

Affinché lo strumento sia ritenuto idoneo è necessario che la sua risoluzione sia al massimo pari al 5% della tolleranza prescritta.

Tale test è eseguito una sola volta, al momento dell'accettazione dello strumento. Ammessa ragionevolmente la sua idoneità, si procede con la prova della funzionalità dello strumento di misura, tramite lo svolgimento di un ciclo operativo di misurazione.

4.2 Studio di tipo 1

In questa tipologia di studio, viene verificata l'adeguatezza dello strumento rispetto alle due caratteristiche metrologiche di accuratezza e ripetibilità strumentali, che sono combinate tramite un indice complessivo di capacità %A&R.

La ripetibilità è l'attitudine dello strumento di misura di fornire in uscita valori di lettura molto simili tra loro qualora una grandezza di interesse venga sottoposta a misurazione più volte ed ogni volta in maniera indipendente. È dunque una caratteristica metrologica legata alla dispersione dei risultati di misura, che rappresenta il grado di concordanza delle misure, ripetute in un breve intervallo di tempo, dalla stessa persona e nel medesimo ambiente (Figura 4.3) Si tratta di una caratteristica definita dal punto di vista operativo, pertanto è attribuibile a uno strumento di misura solo nell'ambito di un processo di misurazione. Tale processo di misurazione, tuttavia, non può essere quello effettivo in cui usualmente dovrà operare l'addetto, ma deve appositamente messo a punto secondo alcune regole, dette *condizioni di ripetibilità*.

Queste condizioni sono tali per cui, ad ogni replica, sia la grandezza di interesse, sia tutti i diversi elementi che costituiscono il sistema di misurazione nel suo complesso rimangano invariati quanto più possibile. Ciò consente di fare in modo che la dispersione dei risultati di lettura che lo strumento in esame fornisce ad ogni replica del processo di misurazione dipenda quasi esclusivamente dal suo comportamento, evitando così di attribuirgli un livello di ripetibilità strumentale non realistico poiché significativamente condizionato da uno o più elementi che costituiscono o influenzano il sistema di misurazione globale.

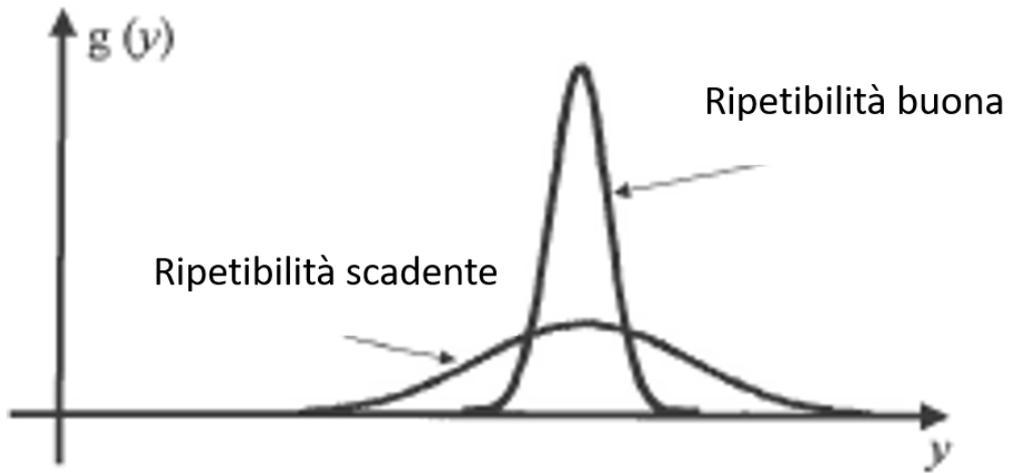


Figura 4.3: Significato grafico della ripetibilità

Se uno strumento di misura risulta capace rispetto alla caratteristica strumentale di ripetibilità vuol dire che, a fronte di un determinato valore del misurando, il valore di lettura proposto dallo strumento è una variabile che rientra in modo prevedibile in un determinato intervallo ristretto di valori, con un ragionevole livello di probabilità. Nel caso dunque di un processo con un indice di capacità di ripetibilità elevato, aumentare il numero di misurazioni per una caratteristica non apporta alcun beneficio e, al limite, è sufficiente una sola lettura per ottenere informazioni di misura affidabili e necessarie per attuare determinate scelte decisionali.

È importante sottolineare che, nel caso in cui lo strumento di misura funzioni in base al principio di comparazione, e ciò implica che l'indicazione dello strumento venga preventivamente azzerata mediante l'utilizzo di un master di azzeramento, tale master risulta parte integrante dello strumento di misura e per questa ragione deve essere un pezzo materialmente distinto dal master di controllo.

In generale la ripetibilità di uno strumento, a partire da una serie di misure relative alla stessa caratteristica da misurare, può essere valutata come lo scarto tra il massimo e il minimo valore in uscita dallo strumento di misura.

Tuttavia, in termini più statistici, la valutazione quantitativa della caratteristica metrologica in questione può essere espressa in termini di dispersione dei risultati di misura. Analizzando una caratteristica pensata per la valutazione di errori casuali è ragionevole aspettarsi una distribuzione di tipo gaussiano dei valori di misura letti; per questa ragione il contributo di ripetibilità è valutato in termini di deviazione standard della distribuzione dei valori misurati.

L'accuratezza è una caratteristica metrologica che descrive l'errore di indicazione Δy_G di uno strumento di misura, ossia lo scostamento tra il valore di lettura y_G e

il valore di riferimento y_{RIF} (Figura 4.4).

$$\Delta y_G = y_G - y_{RIF} \quad (4.2)$$

Il valore y_{RIF} è attribuito alla grandezza mediante un particolare processo di misurazione denominato taratura del master, caratterizzato da un livello prestazionale elevato e riconosciuto come riferimento per tutti i risultati in uscita dallo strumento. Tale valore deve essere contenuto all'interno dell'intervallo di tolleranza prescritto T_{PRE} per i pezzi da misurare nel reale processo di misura. Mediante opportuno procedimento di taratura, al master di riferimento va associato un valore di incertezza estesa U_{RIF} che deve essere pari o inferiore al 10% dell'intervallo di tolleranza, se la caratteristica non è particolarmente critica.

$$U_{RIF} \leq 0,10 \cdot T_{PRE} \quad (4.3)$$

Dunque, un sistema di misura si definisce accurato se i valori di lettura che propone sono affetti da un errore di indicazione piccoli e al limite nulli.

Così come la ripetibilità, anche questa caratteristica deve essere valutata con un

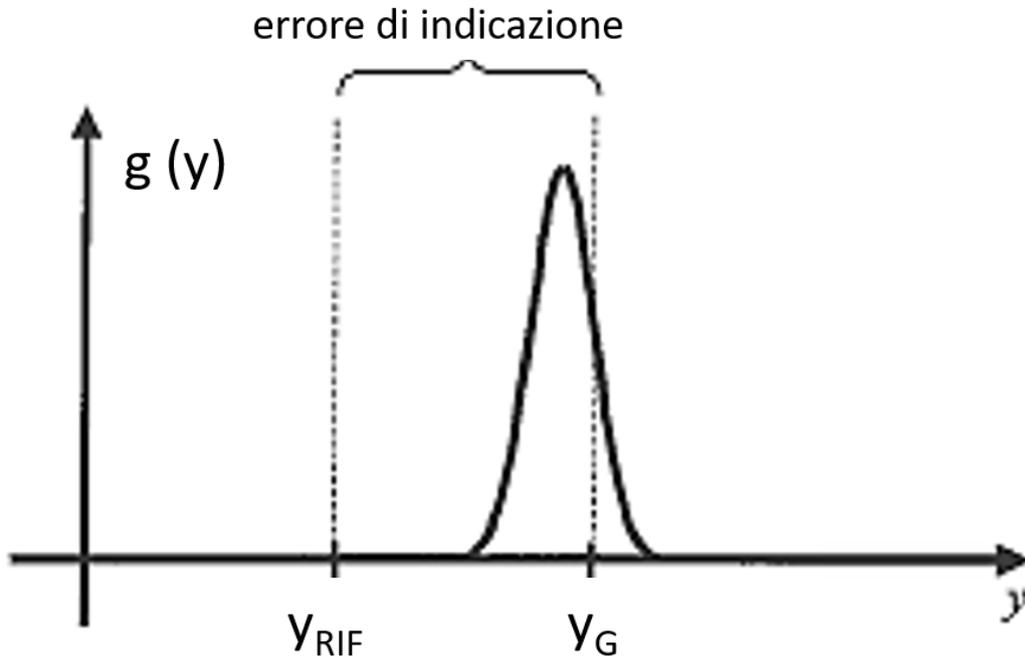


Figura 4.4: Significato grafico dell'accuratezza

processo ad hoc, che rispetti le condizioni già indicate per la ripetibilità.

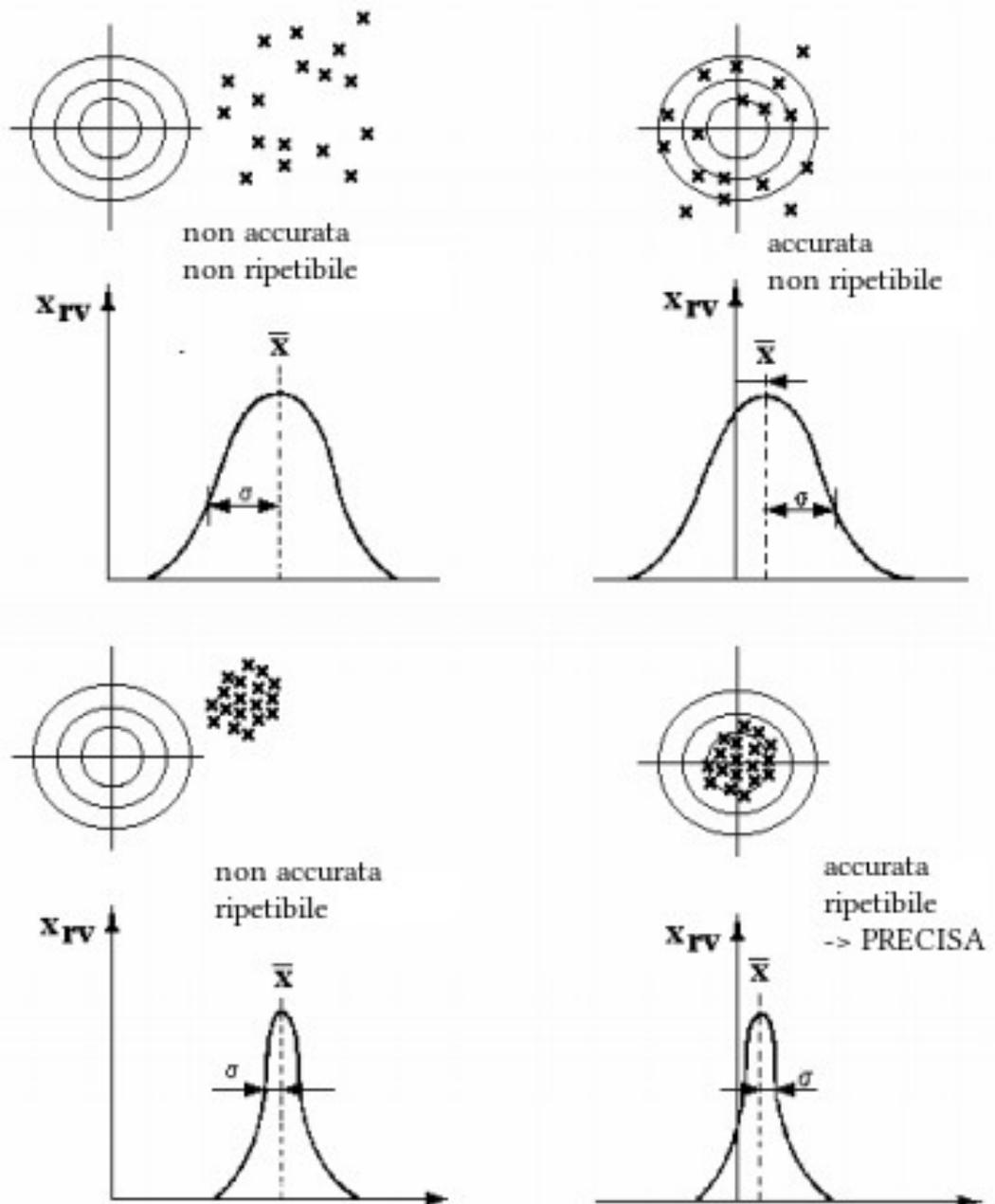


Figura 4.5: Sistemi di misurazioni ripetibili e accurati

Dal punto di vista operativo, le normative relative all'ambito automotive prescrivono che vengano eseguite dall'operatore un certo numero di misurazioni consecutive del master di controllo

$$r \geq 50$$

È importante che il pezzo campione sia portato in equilibrio con l'ambiente in termini di temperatura e che ciascuna replica di misurazione replichi lo stesso ciclo di misura, facendo in modo che lo strumento operi nelle condizioni migliori possibili e non necessariamente come andrà ad operare effettivamente in campo.

A partire dai valori letti in uscita di ciascuna misura effettuata, si calcola la media aritmetica degli r valori misurati $y_G(i)$

$$\bar{y}_G = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_G(i) \quad (4.4)$$

E lo scarto tipo sperimentale di tali valori, che caratterizza la ripetibilità dello strumento nel campo di funzionamento in cui esso lavora.

$$s_G = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (y_G(i) - \bar{y}_G)^2} \quad (4.5)$$

Con la media ricavata dalla 4.4 si calcola l'errore sistematico dello strumento nell'intorno dei valori della grandezza da misurare:

$$AC = |\bar{y}_G - y_{RIF}| \quad (4.6)$$

Il suo valore numerico deve essere il più piccolo possibile, in particolare è bene verificare

$$AC \leq 0,05 \cdot T_{PRE} \quad (4.7)$$

Lo scarto elaborato con la 4.5 consente di determinare un indice di **potenzialità strumentale** C_g :

$$C_g = \frac{0,2 T_{pre}}{4 s_g} \quad (4.8)$$

Tale indice è calcolato come rapporto tra il 20% della tolleranza prescritta e un intervallo pari a 4 volte la deviazione standard. L'ampiezza 4σ fornisce una stima dell'intervallo che contiene il 95,4% dei possibili risultati forniti dallo strumento in esame, quando esso opera in condizioni di ripetibilità in prossimità del valore nominale della grandezza di misura analizzata. (Figura 4.6)

Le normative prescrivono un valore limite pari a

$$C_g \geq 1,33 \quad (4.9)$$

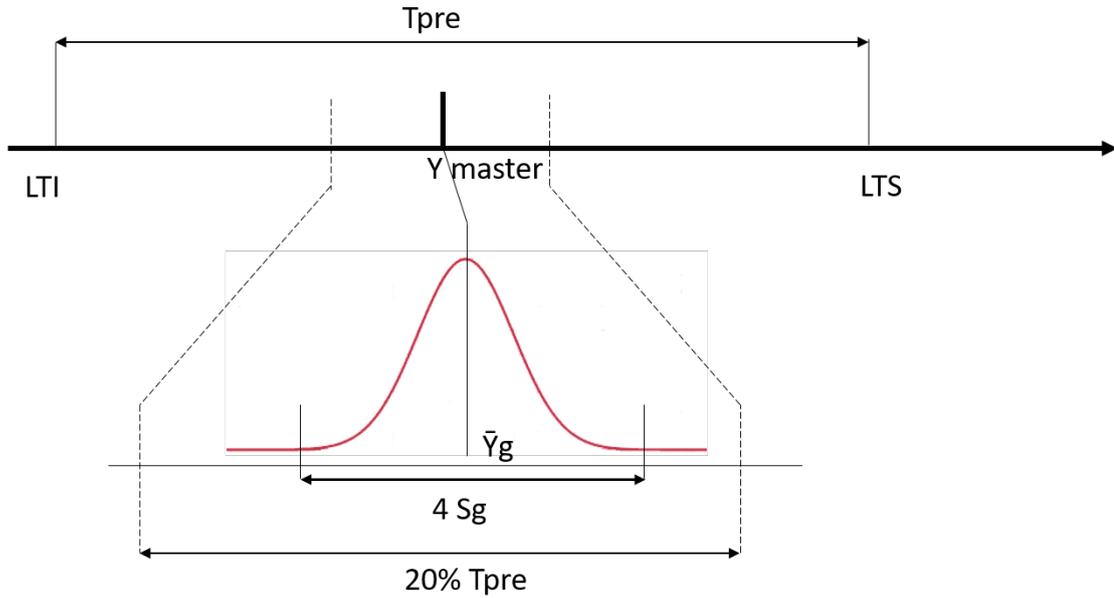


Figura 4.6: Schema indice di potenzialità strumentale

Combinando l'indice di potenzialità strumentale con l'accuratezza si ottiene un unico indice **indice di capacità strumentale** C_{GK}

$$C_{GK} = \frac{0,1 \cdot T_{PRE} - |\bar{y}_G - y_{RIF}|}{2 \cdot s_G} \quad (4.10)$$

L'indice di capacità strumentale è sempre minore dell'indice di capacità potenziale, o al più uguale se $AC = 0$.

$$C_{GK} \leq C_G \quad (4.11)$$

Al fine dell'accettazione dello strumento di misura deve sempre essere verificata la condizione

$$C_{GK} \geq 1,33 \quad (4.12)$$

In alternativa, si possono calcolare e verificare gli indici frazionari di ripetibilità R_G ed accuratezza A_G . L'indice frazionario complessivo $A\&R$

$$R_G = \frac{4 \cdot s_G}{T_{PRE}} \quad R_G \leq 0,15$$

$$A_G = \frac{|\bar{y}_G - y_{RIF}|}{T_{PRE}} \quad A_G \leq 0,05$$

$$A\&R = \frac{4 \cdot s_G + |\bar{y}_G - y_{RIF}|}{T_{PRE}} \quad A\&R \leq 0,20$$

4.3 Studio di linearità

La linearità di uno strumento di misura è la capacità dello strumento di fornire in uscita dei valori che siano legati al misurando in ingresso secondo una relazione lineare.

Generalmente, è specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita. Rappresenta un'importante proprietà metrologica in quanto la presenza di tale caratteristica equivale a dire che lo strumento è in grado di mantenere costante la sensibilità al variare del valore della grandezza in ingresso.

Nonostante la rilevanza di tale caratteristica, non è stato effettuato alcuno studio in merito alla linearità dello strumento, in accordo con quanto prescritto dalla normativa *ANFIA*.

Una delle motivazioni di questa scelta riguarda il fatto che tutti gli indici di capacità calcolati per lo svolgimento dell'analisi del sistema di misura sono finalizzati a valutare le prestazioni degli strumenti in esame all'interno dell'intervallo di tolleranza prescritta T_{PRE} per una determinata grandezza fisica dei particolari di produzione, osservata mediante lo specifico processo di misurazione nel campo in cui lo strumento è effettivamente inserito.

Da questo punto di vista, il rilievo della linearità d'indicazione al di fuori dell'intervallo T_{PRE} non può costituire un elemento vincolante a giudicare l'idoneità dello strumento.

4.4 Studio di tipo 2

La seconda tipologia di studio è volta all'analisi del processo di misurazione e non solo esclusivamente al singolo strumento di misura, diversamente dallo studio di tipo 1.

Questo si applica a quei processi di misurazione che prevedono, nel loro allestimento, la presenza di un operatore umano e possono quindi essere gestiti alternando diversi operatori. L'obiettivo del test è quello di pervenire ad una stima della dispersione di tutti i risultati forniti da un processo di misura, mediante uno studio di tipo statistico. In particolare, la dispersione dei risultati ricercata risulta essere influenzata da due componenti:

- La riproducibilità, rappresenta per un processo di misura il grado di concordanza dei risultati di successive misurazioni di uno stesso misurando al variare delle condizioni di misura. Nel caso in questione, una delle variabilità è attribuita al cambio dell'operatore.

- La ripetibilità che, come già definita, è il grado di concordanza il grado di concordanza dei risultati di successive misurazioni di uno stesso misurando effettuate mantenendo quanto più possibile costanti le condizioni del processo di misura.

Nell'ambito di tale studio, certamente le fonti di disturbo, che intervengono nel processo e che sono legate all'allestimento delle condizioni operative dell'ambiente in cui si svolge il processo, rendono la ripetibilità del processo di misurazione peggiore rispetto a quella stimata con lo studio di tipo 1 per lo strumento di misura.

Il test si propone di qualificare il processo di misurazione che si intende utilizzare realmente per stabilire se questo sia idoneo al fine di ottenere informazioni affidabili, necessarie al controllo dell'attività di lavorazione, mediante la verifica di conformità di determinate proprietà richieste per i particolari lavorati. Per questa ragione, appare chiaro che, per l'esecuzione di tale test, l'intero processo di misurazione debba operare necessariamente e rigorosamente secondo le modalità stabilite per il suo normale svolgimento in opera.

Secondo la medesima logica, anche i particolari selezionati devono essere rappresentativi della produzione e dovrebbero, dunque, materializzare un gruppo di valori della grandezza fisica che sarà controllata mediante il processo di misurazione sottoposto al test, tale da coprire una significativa escursione ammessa dalle specifiche di lavorazione.

La normativa *ANFIA*, riguardo l'*MSA* per processi di misura di particolari in ambito Automotive prescrive le seguenti regole:

- Il numero p di particolari da impiegare nell'esecuzione del test deve essere superiore o uguale a 5; $p \geq 5$
- Il numero r delle misurazioni (o prove) replicate per ciascun particolare impiegato deve essere superiore o pari a 2; $r \geq 2$
- Il numero n di livelli di differenziazione del fattore di influenza considerato deve essere maggiore o uguale a 2. Nel caso in questione il fattore d'influenza è rappresentato dall'alternanza degli operatori impiegati nella conduzione del processo di misurazione. $n \geq 2$

In ogni caso, è consigliato che il prodotto dei tre termini sia maggiore di 30

$$p \cdot r \cdot n \geq 30 \tag{4.13}$$

Le singole misurazioni r ripetute sullo stesso particolare devono essere indipendenti e per ciascuna è necessario ripetere l'intero processo di misurazione. Tale processo deve essere preliminarmente stabilito e regolarizzato, in modo tale che ciascun operatore esegua la misura in maniera chiaramente specificata e identica a quella applicata nell'uso normale.

Ciascuno degli n operatori coinvolti applica il processo di misurazioni su particolari tratti dall'insieme dei manufatti risultato del processo produttivo, replicando la misura r volte per ciascun particolare.

Alla fine del test, si ottengono, dunque un numero di risultati pari a $p \cdot r \cdot n$. Una volta raccolti i dati, lo studio può essere eseguito con tre metodi:

1. Range Method, prevede la valutazione approssimata della variabilità del sistema di misura, senza decomporla nelle due componenti di ripetibilità e riproducibilità.
2. Average and Range method *ARM*
3. Analysis of variance method *ANOVA*

4.4.1 Average and Range method *ARM*

Con l'utilizzo di questo metodo la variabilità del sistema di misura riscontrata nel corso delle $p \cdot r \cdot n$ osservazioni, viene valutata tenendo separati i contributi che possono essere dovuti a

- All'alternarsi degli operatori;
- Alla differenza tra i particolari impiegati nel test, per ciascuno dei quali la caratteristica da controllare in campo avrà un valore sicuramente differente;
- A tutti gli altri effetti che costituiscono la variabilità residua del processo.

Si definiscono i seguenti indici utilizzati per l'indicazione dei risultati

$i = 1, 2, \dots, n$ per l'indicazione dell'operatore

$j = 1, 2, \dots, p$ per l'indicazione del particolare misurato da ciascun i -esimo operatore

$k = 1, 2, \dots, r$ per l'indicazione della singola misurazione.

Per ogni operatore e per ogni particolare misurato si determinano le medie $\bar{X}_{i,j}$ e le escursioni dei range $R_{i,j}$

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{1}{r} \sum_{K=1}^r y_{i,j,k} \quad (4.14)$$

$$R_{i,j} = y_{i,j(MAX)} - y_{i,j(MIN)} \quad (4.15)$$

Quindi si calcola la media generale per l'insieme dei particolari misurati $\bar{\bar{X}}_i$ e il Range medio \bar{R}_i

$$\bar{\bar{X}}_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p y_{i,j} \quad (4.16)$$

$$\bar{R}_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p R_{i,j} \quad (4.17)$$

Tale operazione va ripetuta, naturalmente, per ciascun operatore.

Successivamente vengono calcolate le medie globali per ciascun particolare $\bar{\bar{X}}_j$, il Range delle medie globali dei particolari R_p e la media generale delle escursioni medie di ciascun operatore $\bar{\bar{R}}$

$$\bar{\bar{X}}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i,j} \quad (4.18)$$

$$R_p = \bar{\bar{X}}_{j(MAX)} - \bar{\bar{X}}_{j(MIN)} \quad (4.19)$$

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{R}_i \quad (4.20)$$

È necessario che la media dei range di misura $\bar{\bar{R}}_i$ sia inferiore al limite superiore di controllo delle escursioni UCL_R , definito mediante il coefficiente D_4 tabellato.

$$UCL_R = \bar{\bar{R}} \cdot D_4 \quad (4.21)$$

A questo punto, si può calcolare la componente di variabilità dovuta a cause riconducibili alle prestazioni dello strumento o a delle condizioni operative del processo di misurazione in esame che non sono riferite agli operatori. Tale componente di variabilità viene calcolata come **scarto tipo di ripetibilità operativa EV (Equipment Variation)**

$$EV = K_1 \cdot \bar{\bar{R}} \quad (4.22)$$

K_1 è un coefficiente di proporzionalità che è funzione del numero di range mediati per il calcolo del Range $\bar{\bar{R}}$, pari a $n \cdot p$, essendo ciascun calcolato su r repliche. I valori sono tabellati da manuale.

$$K_1 = \frac{1}{f(n \cdot p, r)} \quad (4.23)$$

Ricavata la componente di variabilità attribuibile ad altri fattori, è possibile valutare la quota dovuta all'alternanza degli operatori, stimata dallo **scarto tipo di riproducibilità AV (Appraiser Variation)**

$$AV = \sqrt{(K_2 \cdot X_{DIFF})^2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}} \quad (4.24)$$

in cui il primo termine rappresenta la naturale stima della dispersione dovuta agli operatori, definita come prodotto di un fattore di copertura K_2 , tabellato e funzione del numero di repliche, per il range delle medie di ciascun operatore X_{DIFF}

$$X_{DIFF} = \bar{\bar{X}}_{i_{MAX}} - \bar{\bar{X}}_{i_{MIN}} \quad (4.25)$$

Il contributo di riproducibilità viene, dunque, calcolato depurando quadraticamente la stima naturale della dispersione dalla componente che tiene conto della variabilità strumentale.

Gli indici EV ed AV , calcolati rispettivamente con la 4.22 e 4.24, servono a valutare il contributo di variabilità della strumentazione e dell'alternanza degli operatori separatamente.

I due indici risultanti possono essere combinati in un unico parametro di variabilità dovuta a **Ripetibilità e Riproducibilità R&R**, calcolabile come somma quadratica dei due termini:

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (4.26)$$

L'ulteriore contributo restante è quello dovuto alla differenza tra i pezzi analizzati, la cui variabilità associata è quantificata dall'**indice di variazione del particolare PV**

$$PV = K_3 \cdot R_p \quad (4.27)$$

In cui R_p è l'escursione delle medie per ciascun particolare, definito dalla 4.19; K_3 è un coefficiente moltiplicativo tabellato che dipende dal numero di valori su cui è calcolato il range.

I tre contributi EV e AV , uniti nell'indice $R\&R$, e PV concorrono al calcolo dell'**indice di variazione totale TV**, che corrisponde alla somma quadratica dei due indici.

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} \quad (4.28)$$

Tutti i contributi calcolati sono, dunque, rapportabili all'indice di variazione totale. Quindi si valuta la frazione percentuale della variabilità totale che viene occupata dal tipo di variabilità riguardante:

- Variazione dell'attrezzatura

$$\%EV = 100 \cdot \frac{EV}{TV} \quad (4.29)$$

- Variazione dell'operatore

$$\%AV = 100 \cdot \frac{AV}{TV} \quad (4.30)$$

- Variazione del particolare

$$\%PV = 100 \cdot \frac{PV}{TV} \quad (4.31)$$

Infine, è possibile valutare il fattore **Numero di componenti ndc** che quantifica il numero di categorie che il processo di misurazioni è capace di distinguere efficientemente all'interno della variabilità dei dati osservati. Questo parametro è considerato una sorta di risoluzione strumentale.

$$ndc = 1,41 \cdot \frac{PV}{R\&R} \quad (4.32)$$

Criteri di accettazione ARM

In accordo con il metodo di analisi dei risultati ARM, la cui complessità ed il cui grado di approfondimento sono minori rispetto al metodo ANOVA, sono fissati dei limiti per l'accettazione dei risultati di misura, tramite i quali è possibile discriminare processi di misura idonei o meno.

- Per quel che riguarda l'indice %R&R, che è il più significativo e quantifica la capacità del processo di misura sono stabiliti i limiti in tabella 4.1.

$\%R\&R \leq 10\%$	Processo di misura capace
$10 \leq \%R\&R \leq 30\%$	Ripetere il test con analisi dati ANOVA
$\%R\&R > 30$	Processo di misura non capace

Tabella 4.1: Criteri di accettazione dell'indice di capacità del processo di misura %R&R per analisi con metodo ARM

- È necessario verificare che l'indice percentuale di variazione del particolare %PV sia rappresentativo dell'insieme di tutte le parti in produzione e che il sistema sia in grado di discriminare un numero significativo di classi all'interno della dispersione delle parti in produzione (Tabella 4.2).

$60 \leq \%PV \leq 80\%$
$ndc \geq 5$

Tabella 4.2: Criterio di verifica indici %PV e ndc per metodo ARM

4.4.2 Metodo ANOVA

Il metodo ANOVA è un'analisi dei risultati più complessa ma più approfondita che consente di valutare separatamente i contributi alla variabilità totale dovuti, così come per il metodo ARM, ad

- All'alternarsi degli operatori;
- Alla differenza tra i particolari impiegati nel test, per ciascuno dei quali la caratteristica da controllare in campo avrà un valore sicuramente differente;

ed, in aggiunta a questi, permette di scindere dagli altri contributi di variabilità anche la quota parte dovuta all'eventuale interazione tra i due fattori di influenza sopracitati, operatore e particolare misurato.

Per l'implementazione di questo metodo si definiscono gli stessi indici i, j, k utilizzati per il metodo ARM, tali per cui la misura $Y_{i,j,k}$ è la k -esima replicazione di misura del j -esimo particolare effettuata dall' i -esimo operatore. Inoltre si indicano con il pedice Σ la somma dei dati caratterizzati da tutti i valori che l'indice sostituito da Σ può assumere. A titolo di esempio:

$y_{i,j,\Sigma}$ è la somma di tutte le misure effettuate dall'operatore i sul pezzo j

$y_{i,\Sigma,\Sigma}$ è la somma di tutte le misure effettuate dall'operatore i su tutti i pezzi

$y_{\Sigma,\Sigma,\Sigma}$ è la somma di tutte le misure effettuate da tutti gli operatori su tutti i pezzi j

Per ciascun contributo di variabilità si calcolano le somme quadratiche SQ come segue:

- Per la riproducibilità degli operatori

$$SQ_{AV} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{i,\Sigma,\Sigma}^2}{p \cdot r} - \frac{y_{\Sigma,\Sigma,\Sigma}^2}{n \cdot p \cdot r} \right) \quad (4.33)$$

- Per la variazione dei particolari

$$SQ_{PV} = \sum_{j=1}^p \left(\frac{y_{\Sigma,j,\Sigma}^2}{n \cdot r} - \frac{y_{\Sigma,\Sigma,\Sigma}^2}{n \cdot p \cdot r} \right) \quad (4.34)$$

- Per l'interazione operatore/particolare

$$SQ_{INT} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \left(\frac{y_{i,j,\Sigma}^2}{r} - \frac{y_{\Sigma,j,\Sigma}^2}{n \cdot p \cdot r} \right) - SQ_{AV} - SQ_{PV} \quad (4.35)$$

- La variabilità totale

$$TSQ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^r \left(y_{i,j,k}^2 - \frac{y_{\Sigma,\Sigma,\Sigma}^2}{n \cdot p \cdot r} \right) \quad (4.36)$$

- La variabilità strumentale

$$SQ_{EV} = TSQ - SQ_{AV} - SQ_{PV} - SQ_{INT} \quad (4.37)$$

$\nu_{AV} = n - 1$	$MQ_{AV} = \frac{SQ_{AV}}{\nu_{AV}}$
$\nu_{PV} = p - 1$	$MQ_{PV} = \frac{SQ_{PV}}{\nu_{PV}}$
$\nu_{INT} = (n - 1)(p - 1)$	$MQ_{INT} = \frac{SQ_{INT}}{\nu_{INT}}$
$\nu_{EV} = n \cdot p \cdot (r - 1)$	$MQ_{EV} = \frac{SQ_{EV}}{\nu_{EV}}$

Tabella 4.3: Calcolo Gradi di libertà

Si considerano i gradi di libertà ν pari al numero di dati considerati meno uno (tabella 4.3) e con questi si calcolano le medie quadratiche MQ per i vari contributi. Quindi si procede con il cosiddetto **Test F**. Si tratta di un test di significatività che consente di stabilire se, al livello di fiducia adottato, il contributo alla variabilità totale dovuto ai possibili fattori d'influenza evidenziati sia significativo o trascurabile. Questa considerazione è effettuata confrontando il parametro F_0 , che è il rapporto tra la media quadratica del contributo considerata e la media quadratica della variabilità strumentale, con un parametro F funzione dei gradi di libertà e del livello di fiducia α .

$F_{0,AV} = \frac{MQ_{AV}}{MQ_{EV}}$	$F_{AV} = F(1 - \alpha, \nu_{AV}, \nu_{EV})$
$F_{0,PV} = \frac{MQ_{PV}}{MQ_{EV}}$	$F_{PV} = F(1 - \alpha, \nu_{PV}, \nu_{EV})$
$F_{0,INT} = \frac{MQ_{INT}}{MQ_{EV}}$	$F_{INT} = F(1 - \alpha, \nu_{INT}, \nu_{EV})$

Tabella 4.4: Definizione parametri per il test F

Il contributo si considera trascurabile qualora

$$F_0 \leq F(1 - \alpha, \nu_1, \nu_2) \quad (4.38)$$

Il caso più frequente è che i contributi di operatore AV e di variazione del particolare PV risultino significativi, mentre il contributo della loro interazione risulti trascurabile. In questo caso si ha

$$F_0 \leq F(1 - \alpha, \nu_{INT}, \nu_{EV}) \quad (4.39)$$

e si pongono

$$SQ_{EV}^* = SQ_{EV} + SQ_{INT} \quad (4.40)$$

$$MQ_{EV}^* = \frac{SQ_{EV}^*}{n \cdot p \cdot r - p + 1} \quad (4.41)$$

Si calcolano dunque gli scarti tipo per i vari contributi di variabilità.

- Scarto tipo di riproducibilità

$$AV = \sqrt{\frac{MQ_{AV} - MQ_{EV}^*}{p \cdot r}} \quad (4.42)$$

- Scarto tipo di variazione dei particolari

$$PV = \sqrt{\frac{MQ_{PV} - MQ_{EV}^*}{p - 1}} \quad (4.43)$$

- Scarto tipo di ripetibilità strumentale

$$EV = \sqrt{MQ_{EV}^*} \quad (4.44)$$

Il contributo combinato di ripetibilità e riproducibilità risulta essere

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (4.45)$$

ed il numero di categorie distinte

$$ndc = 1,41 \frac{PV}{R\&R} \quad (4.46)$$

Se, al contrario, la 4.39 non è verificata, l'interazione tra i due contributi operatore/particolare non è trascurabile e si i nuovi valori andranno calcolati come segue:

$$AV = \sqrt{\frac{MQ_{AV} - MQ_{INT}}{p \cdot r}} \quad (4.47)$$

$$PV = \sqrt{\frac{MQ_{PV} - MQ_{INT}}{p - 1}} \quad (4.48)$$

$$INT = \sqrt{\frac{MQ_{INT} - MQ_{EV}}{p - 1}} \quad (4.49)$$

$$EV = \sqrt{MQ_{EV}} \quad (4.50)$$

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2 + INT^2} \quad (4.51)$$

$$ndc = 1,41 \frac{PV}{R\&R} \quad (4.52)$$

Criteri di accettazione ANOVA

Essendo un metodo di analisi dei dati molto più approfondito, complesso ed accurato, rispetto al metodo ARM precedentemente descritto, i limiti di accettazione variano. In particolare, aumenta la bontà del valore limite dell'indice di ripetibilità e riproducibilità per l'accettazione del processo. I valori limite sono riportati in tabella 4.5.

$\%R\&R \leq 25\%$	Processo di misura capace
$\%R\&R \geq 25\%$	Processo di misura non capace, adottare azioni correttive

Tabella 4.5: Criteri di accettazione dell'indice di capacità del processo di misura $\%R\&R$ per analisi con metodo ANOVA

Anche in questo caso è necessario verificare che l'indice percentuale di variazione del particolare $\%PV$ sia rappresentativo dell'insieme di tutte le parti in produzione e il numero di classi distinguibili all'interno della dispersione sia sufficientemente elevato. (Tabella 4.6)

$60 \leq \%PV \leq 80\%$ $ndc \geq 5$

Tabella 4.6: Criterio di verifica indici $\%PV$ e ndc per metodo ANOVA

Capitolo 5

Sistema di misura originario

L'operazione di interesse è la calibratura degli alberi, che genera eccessivi scarti di pezzi per errori dimensionali sui diametri. Tale fase di lavorazione è effettuata tramite la tecnologia di tornitura sul pezzo già trattato termicamente. Una volta terminata la lavorazione il pezzo viene controllato su un apposito banco di misura che contiene gli strumenti necessari a stabilire se il pezzo è idoneo, e in tal caso può proseguire il ciclo produttivo, oppure se il pezzo non rispetta la tolleranza richiesta e diviene, dunque, oggetto di scarto o rilavorazione.

Il banco in questione è costituito dai seguenti elementi:

- Due basi di appoggio a V sulle quali viene poggiato il pezzo da misurare e che dunque fungono da supporto alla misura.
- Un master di azzeramento, ossia un pezzo campione che viene utilizzato per l'azzeramento dello strumento di misura.
- Forcelle regolabili (Figura 5.1 *b*), sono strumenti standard e robusti che presentano una forma a C e due punte di cui una fissa e l'altra regolabile al fine di garantire il contatto col pezzo. Ciascuna forcina è collegata in modo modulare ad un comparatore e la distanza tra le punte è preimpostata in relazione al diametro da misurare; pertanto, il banco è provvisto di un numero di forcelle pari al numero dei diametri da misurare sull'albero prodotto. Tale strumentazione è utilizzata esclusivamente per la misura di diametri esterni.
- Comparatori a leva (Figura 5.1 *b*), sono strumenti analogici nei quali una lancetta si sposta sul quadrante sulla base dello spostamento di una leva caricata a molla e presente sulla forcina, a contatto in un punto con il corpo da misurare. L'utilità della molla è quella di mantenere la leva sempre a contatto con il pezzo e una piccola variazione della posizione della leva viene amplificata e mostrata sul quadrante. Si tratta di comparatori millesimali, ossia con una risoluzione pari a $1 \mu m$.

La misura fornita in uscita dal comparatore e leggibile sul quadrante ad orologio rappresenta la differenza tra la posizione del punto di contatto col pezzo e lo zero dello strumento; per tale ragione, preliminarmente rispetto alla misura, il comparatore montato sulla forcilla viene azzerato sul pezzo campione con una frequenza specificatamente studiata ed indicata nella scheda di controllo di cui è fornito il banco di misura. Nel caso in questione l'azzeramento è richiesto ogni 10 pezzi e avviene ruotando un pomello posto all'estremità del quadrante.

Essendo separato fisicamente dalla forcilla, il comparatore può agevolmente essere sostituito in caso di guasto.

- Comparatore a tampone elettronico (Figura 5.2) per la misura di diametri interni, che è uno strumento digitale con un'estremità cilindrica di diametro pari a quello della camera interna da misurare e presenta, all'estremità, dei sensori elettronici che, muovendosi fino a contatto col pezzo, rilevano la differenza del diametro rispetto al pezzo campione e la trasmettono ad una colonnina elettronica di misura. Anche in questo caso, la frequenza di azzeramento è pari a 10 pezzi.
- Comparatore con base (Figura 5.1 a), per il controllo della dimensione e la planarità dei rasamenti.

L'utilizzo del comparatore con forcilla non risulta essere un sistema di misura particolarmente moderno; infatti, la sua introduzione risale ad una data non recente. Per tale motivo l'azienda non dispone di studi di accuratezza e ripetibilità strumentale che seguono lo standard delle normative in vigore. Dunque si ritiene opportuno assumere che, sotto questo punto di vista, lo strumento venga considerato idoneo e possa essere bypassato lo studio dell'indice $A\&R$ per procedere a tutti gli altri tipi di studio previsti per l'analisi del sistema di misura.

5.1 Risoluzione sistema

L'acquisizione avviene tramite un dispositivo di lettura analogico, che nel caso in questione è il quadrante del comparatore mediante cui viene rilevato il valore dei diametri sull'albero. Il comparatore è di tipo millesimale, quindi la risoluzione, indicata come Δy_{min} , è

$$\Delta y_{min} = 0,001 \text{ mm} \quad (5.1)$$

A partire da questo dato, si definisce l'indice di risoluzione frazionario Ris , come rapporto tra la risoluzione del sistema e la tolleranza prescritta per il particolare da misurare. Poiché i particolari analizzati con frequenza elevata di scarto, che saranno oggetto di misura per l'analisi del processo nei capitoli successivi, presentano in

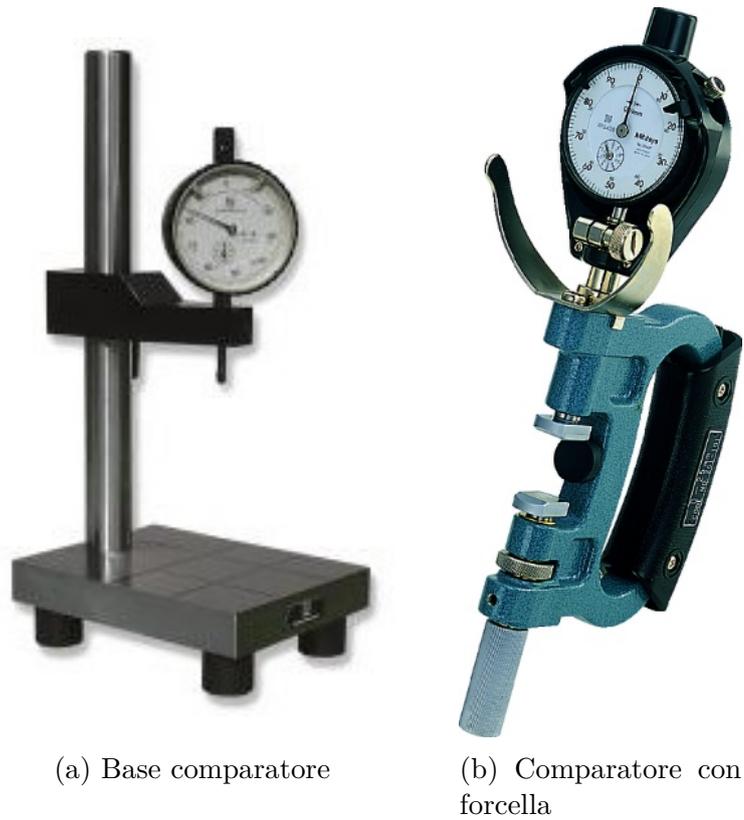


Figura 5.1: Comparatori del sistema di misura originario



Figura 5.2: Tamponi con sensore elettronico

media una tolleranza richiesta pari a $16\mu m$, si assume tale valore per il calcolo dell'indice di risoluzione.

$$Ris = \frac{\Delta y_{min}}{T_{pre}} = 0,0625 \quad \text{con } T_{pre} = 0,016 \text{ mm} \quad (5.2)$$

$$\%Ris = 6,25\%$$

Affinché lo strumento sia ritenuto idoneo è necessario che la sua risoluzione sia al massimo pari al 5% della tolleranza prescritta. Di conseguenza, la risoluzione dello strumento dovrebbe essere al minore di $0,0008 \text{ mm}$.

Tuttavia, essendo il comparatore millesimale lo strumento con risoluzione migliore nella classe dei comparatori, si accetta questo indice leggermente superiore al limite. Lo scostamento rispetto alla risoluzione richiesta è mostrato in figura 5.3 e, come è evidente, non è particolarmente significativo.

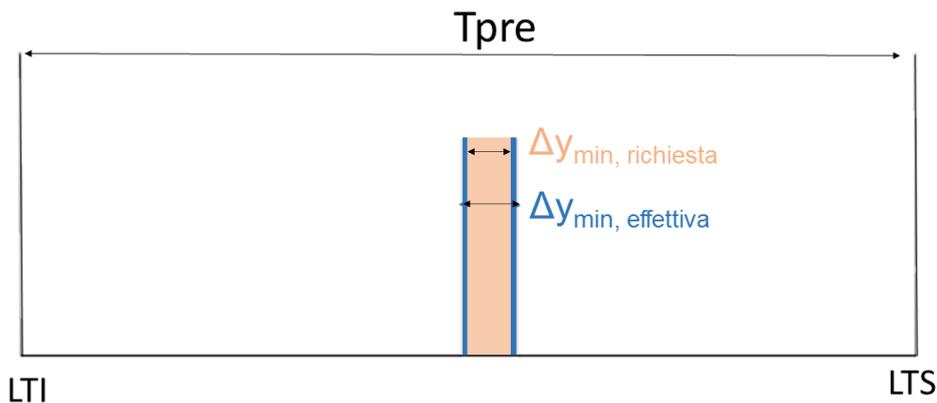


Figura 5.3: Indice percentuale di risoluzione del sistema di misura originario

5.2 Studio di tipo 2

In questa parte dell'analisi del sistema di misura, l'obiettivo è valutare non il singolo strumento di misura, bensì l'intero processo per evidenziare l'influenza dell'operatore e della variazione dei particolari misurati.

Come da normativa, il processo di misura a cui ci si riferisce per questo tipo di studio è analogo al processo reale.

Per l'analisi, sono stati misurati dieci particolari da tre operatori differenti (A, B, C), ognuno dei quali ha ripetuto su ciascun particolare tre misurazioni della caratteristica dimensionale considerata. (Tabella 5.1)

Numero operatori	$n = 3$
Numero particolari	$p = 10$
Numero repliche	$r = 3$

Tabella 5.1: Numero di parametri utilizzati per l'analisi

Dunque, in totale il numero di dati analizzati è superiore a 30 come da normativa.

$$n \cdot p \cdot r = 3 \cdot 10 \cdot 3 = 90 \text{ prove} \geq 30 \quad (5.3)$$

Dal punto di vista tecnologico, la fase d'interesse che riguarda le lavorazioni sui diametri, è quella successiva al trattamento termico di carbo cementazione che prevede, come da ciclo di lavorazione, una raddrizzatura dell'albero per recuperare eventuali deformazioni e incurvatures dovute al trattamento termico, la calibratura completa dei vari tratti attraverso tornitura di finitura e la rettifica dei due gambi laterali.

Nello specifico, è stato utilizzato il particolare mostrato in figura 7.3. Si tratta di un classico albero a più diametri, che presenta tre dentature scanalate ed è interamente cavo all'interno. La caratteristica di misura analizzata è il diametro cerchiato in

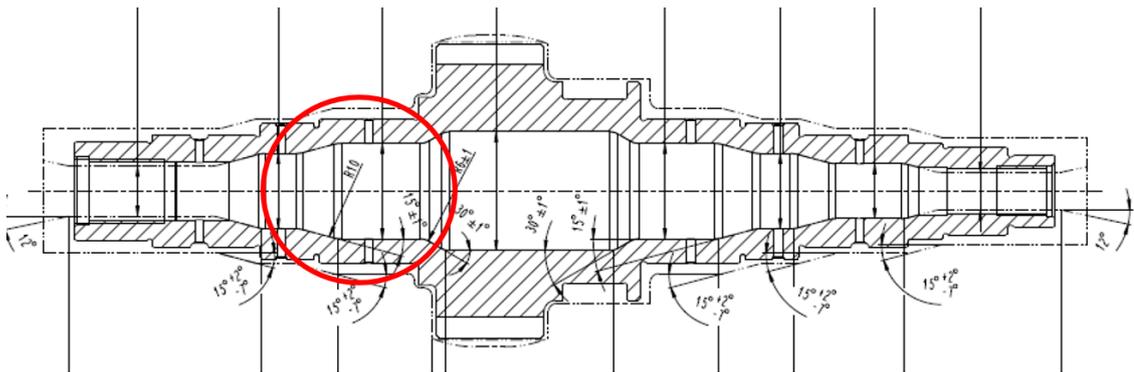


Figura 5.4: Disegno del particolare utilizzato per l'analisi del sistema di misura

rosso, dopo l'operazione di calibratura.

Per tale caratteristica, la misura nominale del diametro è di 50 mm , con una tolleranza pari a $h5$. Ciò indica che sono accettati solo scostamenti nulli o negativi

della misura e che rientrano nella classe di precisione dimensionale $IT5$, pari a $+0$ e $-0,011$. I limiti superiore (UTL) e inferiore (LTL) sono dunque

$$UTL = 50,000 \text{ mm} \quad (5.4)$$

$$LTL = 49,989 \text{ mm} \quad (5.5)$$

La tolleranza prescritta T_{pre} per la caratteristica in questione è pari alla differenza tra i due limiti:

$$T_{pre} = UTL - LTL = 0,011 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Per ciascun gruppo di misure sono calcolati i parametri di media e range.

Per ciascun operatore e per ciascun particolare le medie delle repliche effettuate e i range di misura corrispondenti sono stati calcolati secondo le formule 4.14 e 4.15 e sono riportati in tabella 5.2.

	A		B		C	
	\bar{X} [mm]	R [mm]	\bar{X} [mm]	R [mm]	\bar{X} [mm]	R [mm]
1	49,988	0,001	49,989	0,000	49,989	0,000
2	49,992	0,000	49,992	0,001	49,992	0,000
3	49,988	0,001	49,989	0,001	49,988	0,000
4	49,992	0,000	49,991	0,010	49,992	0,001
5	49,993	0,000	49,993	0,000	49,993	0,001
6	50,000	0,001	50,000	0,000	50,000	0,001
7	49,989	0,000	49,989	0,001	49,989	0,000
8	49,989	0,000	49,988	0,001	49,988	0,001
9	49,987	0,001	49,988	0,001	49,988	0,000
10	49,988	0,001	49,987	0,000	49,988	0,001

Tabella 5.2: Valori di medie e range delle repliche per ciascun operatore e ciascun particolare

La figura 5.5 mostra l'andamento delle medie delle 3 misurazioni fatte su ciascun pezzo da ciascun operatore.

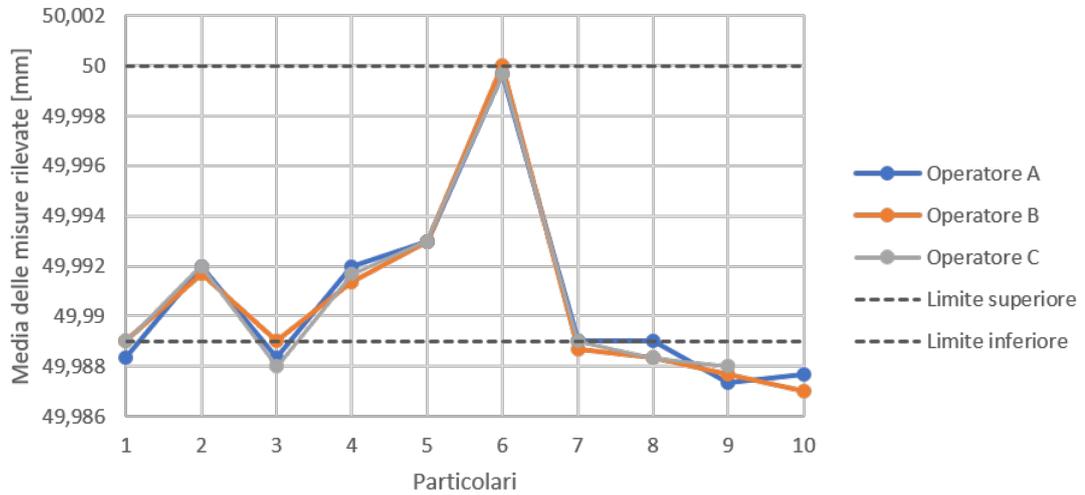


Figura 5.5: Andamento delle medie delle tre replicazioni di misura per ciascun particolare e per ciascun operatore

Quindi si calcolano le medie generali delle medie per i tre operatori A, B, C

$$\bar{\bar{X}}_A = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{A,j} = 49,9906 \text{ mm}$$

$$\bar{\bar{X}}_B = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{B,j} = 49,9905 \text{ mm}$$

$$\bar{\bar{X}}_C = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{C,j} = 49,9906 \text{ mm}$$

e le medie dei range per gli operatori

$$\bar{\bar{R}}_A = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{A,j} = 0,000 \text{ mm}$$

$$\bar{\bar{R}}_B = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{B,j} = 0,001 \text{ mm}$$

$$\bar{\bar{R}}_C = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{C,j} = 0,000 \text{ mm}$$

Dunque, la media delle medie e la media dei range risultano essere

$$\bar{\bar{X}} = 49,9906 \quad \bar{\bar{R}} = 0,0003$$

A partire dal dato $\bar{\bar{R}}$ si valuta il limite superiore di controllo delle escursioni UCL_R

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{\bar{R}} = 0,0014$$

In cui D_4 è un valore tabellato in funzione del numero di replicazioni per ciascuna misurazione.

$$\text{Per } r = 3 \text{ replicazioni } \quad D_4 = 2,58$$

Tutti i range di misura per gli operatori sono inferiori al limite superiore, dunque è possibile accettare i dati e procedere con lo studio.

A questo punto, si calcola la componente di variabilità dovuta a cause riconducibili alle prestazioni dello strumento, ossia come scarto tipo di ripetibilità operativa EV .

$$\text{Per } r = 3 \text{ replicazioni delle } p \cdot n = 30 \text{ misure } \quad K_1 = 0,5908$$

Dunque, dalla 4.22, si ha un indice di ripetibilità strumentale

$$EV = 0,00032$$

Tale indice va detratto alla naturale stima della dispersione, calcolata proporzionalmente al range delle medie di ciascun operatore x_{DIFF} . Dalla 4.25, risulta

$$x_{DIFF} = 0,0001$$

Ed effettuando lo scorporo del contributo di variabilità strumentale dalla stima della dispersione naturale, si ottiene la riproducibilità legata all'alternanza degli operatori AV

$$AV = \sqrt{(K_2 \cdot X_{DIFF})^2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}} = 0,00005$$

$$\text{Con } K_2 = 0,5231 \quad \text{per } n = 3 \text{ operatori}$$

L'indice totale $R\&R$, unione dei due contributi, risulta

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} = 0,00032$$

Il contributo di variabilità dovuto alla differenza tra i dieci particolari misurati è

$$PV = K_3 \cdot R_p = 0,0039$$

Essendo R_p l'escursione massima tra le medie dei particolari misurati, calcolata secondo la 4.19

$$R_p = 0,0123$$

e $K_3 = 0,3146$ da tabella in corrispondenza di 10 particolari misurati.

I contributi di variabilità strumentale, di riproducibilità dell'operatore e di variazione del particolare sommati quadraticamente (equazione 4.28) danno vita all'indice di variazione totale TV .

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} = 0,0039$$

E riportando i vari indici alla variazione totale si ottengono gli indici frazionari percentuali in tabella 5.3

Variazione attrezzatura	$\%EV = 8,1\%$
Variazione operatore	$\%AV = 1,34\%$
Riproducibilità e ripetibilità	$\%R\&R = 8,20\%$
Variazione particolare	$\%PV = 99,66\%$

Tabella 5.3: Indici percentuali caratteristici del sistema di misura originario

5.3 Analisi indici caratteristici

È chiaro come il contributo di variazione del particolare PV abbia un peso maggiore sulla variabilità totale rispetto al contributo di riproducibilità e ripetibilità. Ciò significa che tale indice è rappresentativo di un gran numero di parti in produzione.

Il parametro unione dei contributi di ripetibilità e riproducibilità risulta inferiore al valore limite per l'accettazione del processo di misura, pertanto è ritenuto idoneo.

$$\%R\&R = 8,20\% \leq 10\% \quad \text{Il processo di misura è idoneo}$$

In figura 5.6 sono rappresentati graficamente gli indici percentuali, con evidenza di ciascun contributo agli indici complessivi.

Il numero di categorie distinguibili all'interno della variabilità dei dati è ndc

$$ndc = 1,41 \cdot \frac{PV}{R\&R} = 17 \quad ndc \geq 5 \quad (5.7)$$

Di conseguenza, il sistema è in grado di discriminare all'interno della dispersione dei dati un numero di categorie sufficientemente elevato; anche sotto questo punto di vista risulta accettabile.

Alla luce di ciò il sistema di misura, adeguato al processo, non necessita di modifiche.

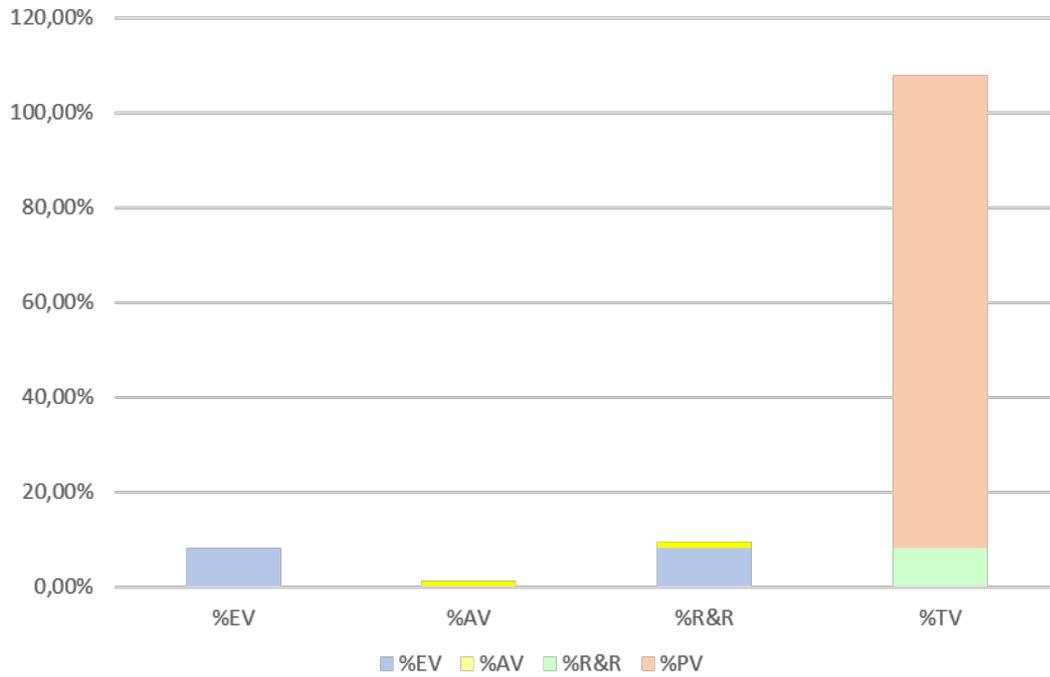


Figura 5.6: Indici percentuali caratteristici del sistema di misura originario

Tuttavia è da considerare il fatto che tale sistema sia quasi obsoleto rispetto alle tecnologie di misura attuali. Infatti, le condizioni studiate fanno riferimento al processo di misura dei soli diametri esterni, che si presentano fuori tolleranza dall'analisi effettuata nel *Capitolo 1*, mentre per tutte le altre caratteristiche dell'albero oggetto di misura è necessaria strumentazione aggiuntiva, anch'essa quasi completamente manuale.

Per tale ragione è stato introdotto un sistema di misura più moderno e tecnologico, con una flessibilità tale da consentire la misura di tutte le caratteristiche richieste con un solo macchinario semi automatico.

Capitolo 6

Processo produttivo originario

I pezzi in questione, di cui l'analisi riportata nel capitolo 1 ha rilevato particolare criticità, sono gli alberi principali e secondari che compongono i sistemi di trasmissione automobilistici. Tali alberi primari appartengono tutti alla stessa famiglia in quanto, pur variando le dimensioni e le caratteristiche delle dentature, presentano similitudini geometriche, tecnologiche e, naturalmente, funzionali (Figura 6.1).

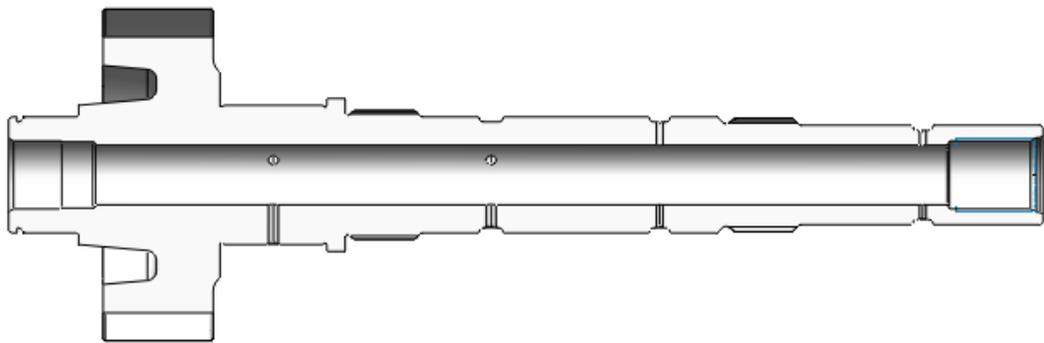


Figura 6.1: Particolare-tipo della famiglia di alberi sottoposta allo studio di processo

Dal punto di vista geometrico, in generale presentano diametri calibrati, gole, scanalati, dentature e camere interne.

Dal punto di vista tecnologico, il ciclo è simile per tutti i componenti di questa famiglia. Sostanzialmente le fasi produttive sono tre:

- Lavorazioni pre trattamento termico. Si tratta delle operazioni di forature, torniture di sgrossatura, dentatura, rullatura delle varie parti e collaudo dei pezzi.

- Trattamento termico, che avviene in un altro stabilimento. Si tratta di una duplice operazione di tempra e cementazione che conferisce all'acciaio una maggiore durezza superficiale e resistenza all'usura.
- Lavorazioni post trattamento termico. Innanzitutto viene effettuata una palinatura, in seguito, se necessaria, una raddrizzatura per recuperare le deformazioni da trattamento termico. Dopodiché vengono effettuate le operazioni di finitura.

Le problematiche sorgono proprio nelle ultime operazioni di finitura che avvengono per tornitura (*Hard turning*) o rettifica.

Con riferimento al particolare 6.1, ad esempio, in figura 6.2 sono evidenziati in rosso i diametri le cui lavorazioni di finitura sono effettuate con tornio ed in verde quelli rettificati.

In particolare, i diametri lavorati di tornio presentano ricorsivamente delle dimensioni diametrali fuori tolleranza, producendo un numero di scarti o di rilavorazioni non indifferente.

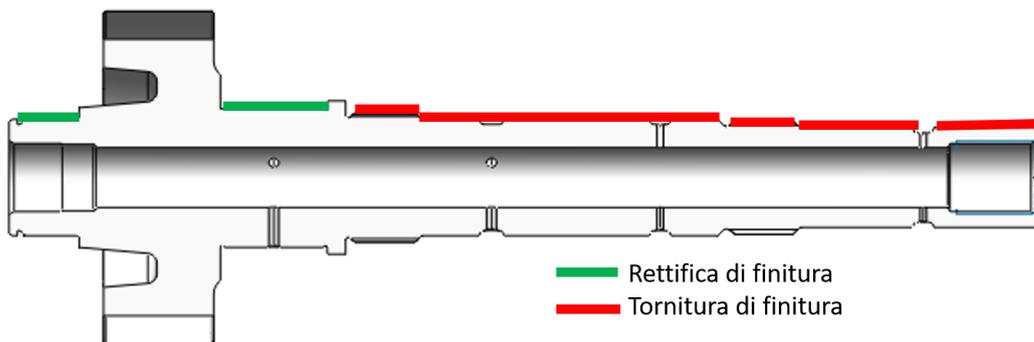


Figura 6.2: Diametri torniti e rettificati nel particolare di riferimento

Per questo motivo questa parte del processo è stata analizzata mediante un controllo statistico di processo. La porzione di ciclo di lavorazione analizzata riguarda, dunque, l'operazione di calibratura del pezzo tramite tornitura dopo trattamento termico, svolta con un classico tornio orizzontale a controllo numerico (figura 6.3). Su tale operazione effettuata attraverso la macchina citata è stato effettuato uno studio di capacità del processo (centratura e dispersione) e uno studio sull'andamento della variabilità del processo con carta X.

In particolare, lo studio è stato effettuato su tre caratteristiche geometriche differenti, risultanti problematiche dal punto di vista del rispetto delle tolleranze prescritte



Figura 6.3: Tornio Monfort

dal disegno. Le caratteristiche in questione sono tre diametri esterni, che subiscono una lavorazione di tornitura e che vengono sottoposti con controlli al 100% ad una misurazione tramite il sistema di misura analizzato nel capitolo 5, composto sostanzialmente da comparatori con forcelle, azzerati su pezzi campione. Le caratteristiche sono state prelevate da un numero di pezzi superiore a 30, al fine di avere un campione statisticamente ampio per lo studio da effettuare.

6.1 Prima caratteristica analizzata: $\phi 30$

Uno dei tre diametri su cui le lavorazioni di finitura sono effettuate con tornio è quello delle parti ad un'estremità dell'albero (cerchio rosso in figura 6.4). Tale caratteristica ha una dimensione nominale pari a 30 mm ed è richiesta una tolleranza di accoppiamento foro-albero k6, che corrisponde a scostamenti superiori e inferiori entrambi positivi, pari rispettivamente a 15 e 2 μm .

$$\phi 30 k6 \rightarrow \phi 30 \begin{matrix} +0,015 \\ +0,002 \end{matrix}$$

A partire da queste considerazioni, i limiti di tolleranza superiore UTL e inferiore LTL entro cui la misura è accettata risultano:

$$UTL = 30,015 \text{ mm}$$

$$LTL = 30,002 \text{ mm}$$

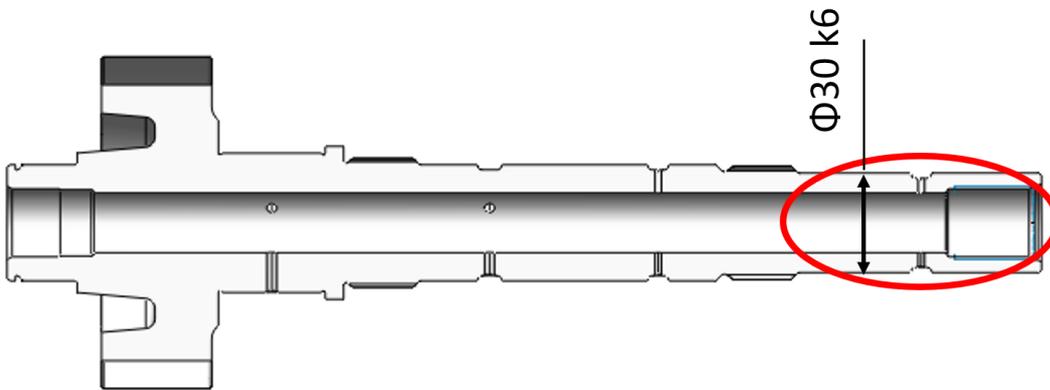


Figura 6.4: Prima caratteristica analizzata, ϕ 30

Il valore centrale rispetto ai limiti di tolleranza, utile per il calcolo degli indici di capacità è LC.

$$LC = \frac{UTL + LTL}{2} = 30,0085\ mm$$

E la tolleranza simmetrica laterale richiesta a partire dal valore centrale è dunque $\pm 0,0065\ mm$.

Per la valutazione delle prestazioni del processo rispetto a questa caratteristica è stato utilizzato un campione di pezzi con numerosità pari a 121.

Dalle misurazioni dei pezzi risultano i seguenti parametri di distribuzione:

- *Media:*

$$\bar{X} = 30,0092\ mm$$

- *Deviazione standard:*

$$\sigma = 0,0022\ mm$$

Carta X

Per verificare lo stato di processo, in controllo o non in controllo, ossia per rilevare se le cause della variabilità del processo siano comuni o speciali è stato elaborato una tipologia di studio con carta X a valori singoli, descritta nel paragrafo 3.1; la scelta è dovuta al fatto che i valori rilevati sono misurazioni singole.

Al fine della stesura di una carta di controllo è necessario il calcolo dei limiti di controllo, che risultano, naturalmente, maggiormente ristretti rispetto ai limiti di tolleranza.

Per ogni valore, dunque, è stato calcolato il *range mobile*, secondo la formula 3.1 e, conseguentemente, il *range medio mobile*, come media di questi ultimi.

$$\overline{MR} = 0,0013\ mm$$

Quindi i limiti di controllo superiore (UCL) e inferiore (LCL) risultano:

$$UCL = \bar{X} + 2,66\overline{MR} = 30,013 \text{ mm}$$

$$LCL = \bar{X} - 2,66\overline{MR} = 30,006 \text{ mm}$$

Riportando su grafico le rette che definiscono i vari limiti e i diametri misurati su ciascun pezzo, si ottiene il plot in figura 6.5.

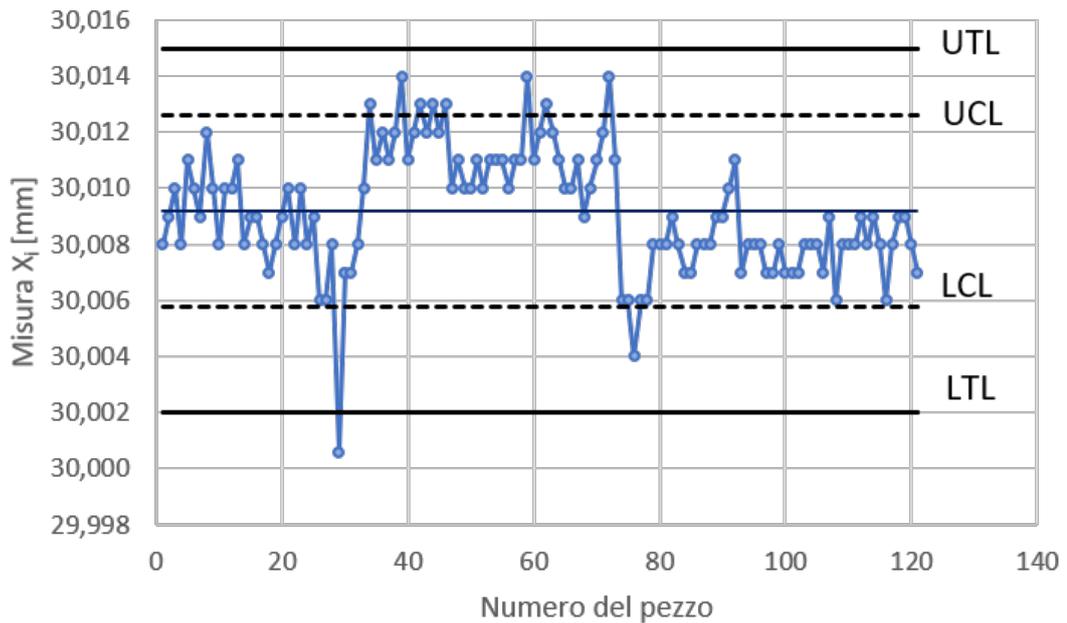


Figura 6.5: Carta di controllo relativa al diametro ϕ 30 lavorato con processo originario

Il processo risulta fuori controllo poichè diversi punti non rientrano entro i limiti di controllo. Anche volendosi basare sui soli limiti di tolleranza un punto eccede il limite inferiore. La macchina, dunque, risulta avere una variabilità legata a qualche causa non comune.

In particolare, si distinguono tre zone:

- La prima zona, riporta un andamento distribuito simmetricamente in modo casuale attorno al valore centrale. Il termine di tale zona è discriminato da un valore minore del limite inferiore, oltre il quale, secondo quanto si rileva dalle note dell'operatore, è avvenuta una regolazione della macchina. In seguito a tale regolazione i pezzi presentano diametri che si posizionano in un'altra fascia del grafico.

- La zona centrale occupa soltanto la fascia superiore del grafico, sintomo di una scorretta regolazione della macchina che produce una serie di pezzi con misure non troppo disperse, ma lontane dal valore medio. Anche l'estremo destro di questa fascia è evidenziato da un brusco abbassamento della dimensione del diametro e anche stavolta è riportata la stessa nota relativa ad una seconda regolazione macchina.
- La terza zona, invece, presenta valori tutti inferiori al limite centrale.

La carta di controllo mostra chiaramente la necessità di effettuare un controllo sulla regolazione della macchina, ogni 30-40 pezzi.

Eccetto la regolazione della macchina, non si rilevano particolari andamenti della caratteristica controllata.

Istogramma dati e grafico di probabilità normale

I dati sono stati raggruppati in classi e, per ciascuna classe, è stata calcolata la densità di frequenza in modo tale da poter costruire un istogramma la cui forma sia confrontabile con una curva a campana di distribuzione normale.

Utilizzando la formula 3.9, avendo a disposizione un numero di dati pari a 121, essi sono stati raggruppati in undici classi.

$$K = \sqrt{N + 1} \approx 11$$

Si ottiene l'istogramma in figura 6.6.

Confrontando il grafico relativo alla densità di frequenza dei dati in ciascuna classe con la curva di distribuzione normale si nota una discordanza. In particolare, l'istogramma presenta due massimi relativi, sintomo di una distribuzione bimodale, con medie di distribuzione leggermente diverse.

Questo risultato è in linea con quanto rilevato dalla carta X, ed è presumibilmente dovuto alle diverse fasi di regolazione della macchina.

Tale peculiarità non è rilevata dal grafico di probabilità costruito sui dati prelevati. Infatti, come mostrato in figura 6.7, sebbene con variabilità ampia, i dati non presentano un andamento particolare rispetto alla curva cumulativa normale linearizzata, se si considera l'intervallo tra due rette parallele alla retta normale e distanti tra loro in relazione alla variabilità delle misure.

Capacità di processo

Si vuole valutare la potenzialità e la capacità effettiva del processo, sebbene questo sia risultato fuori controllo, per valutarne il comportamento in relazione alle specifiche tecniche richieste per la caratteristica del particolare analizzata.

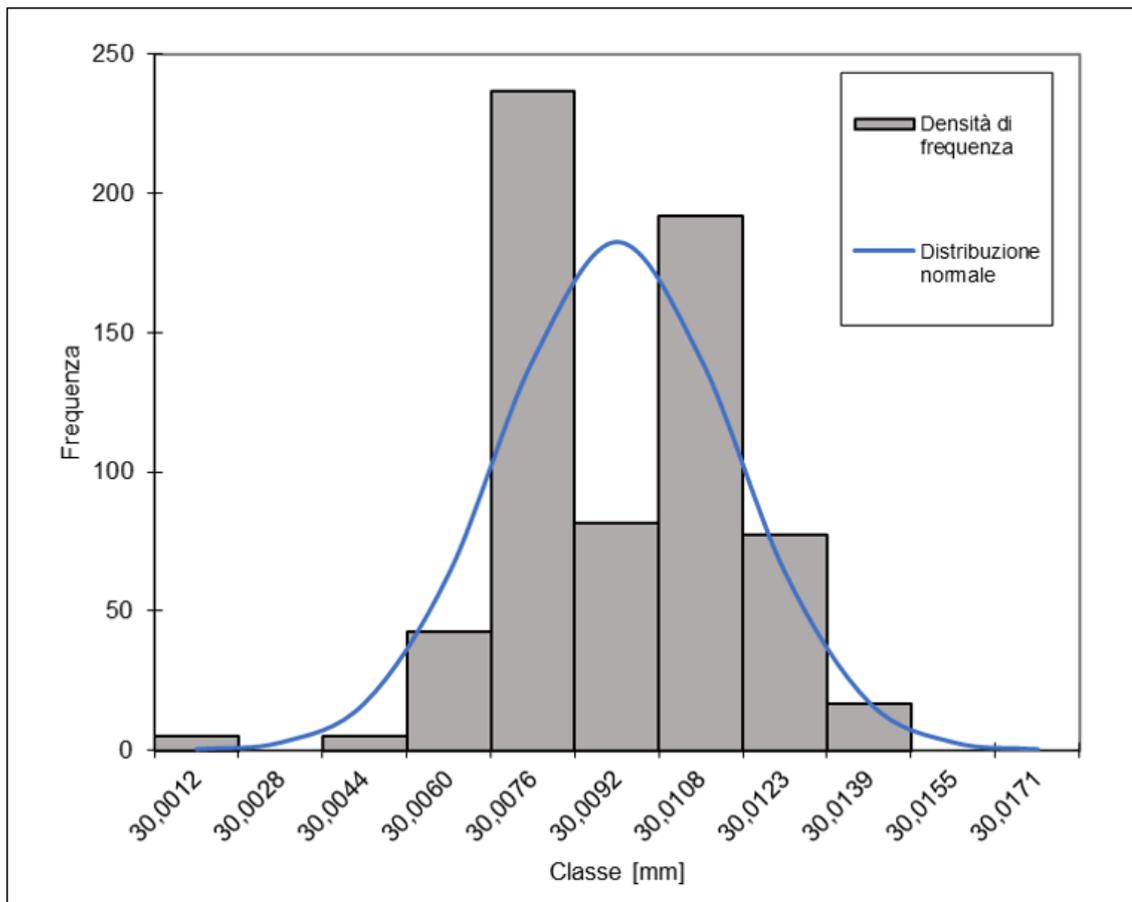


Figura 6.6: Istogramma relativo al diametro ϕ 30 lavorato con processo originario

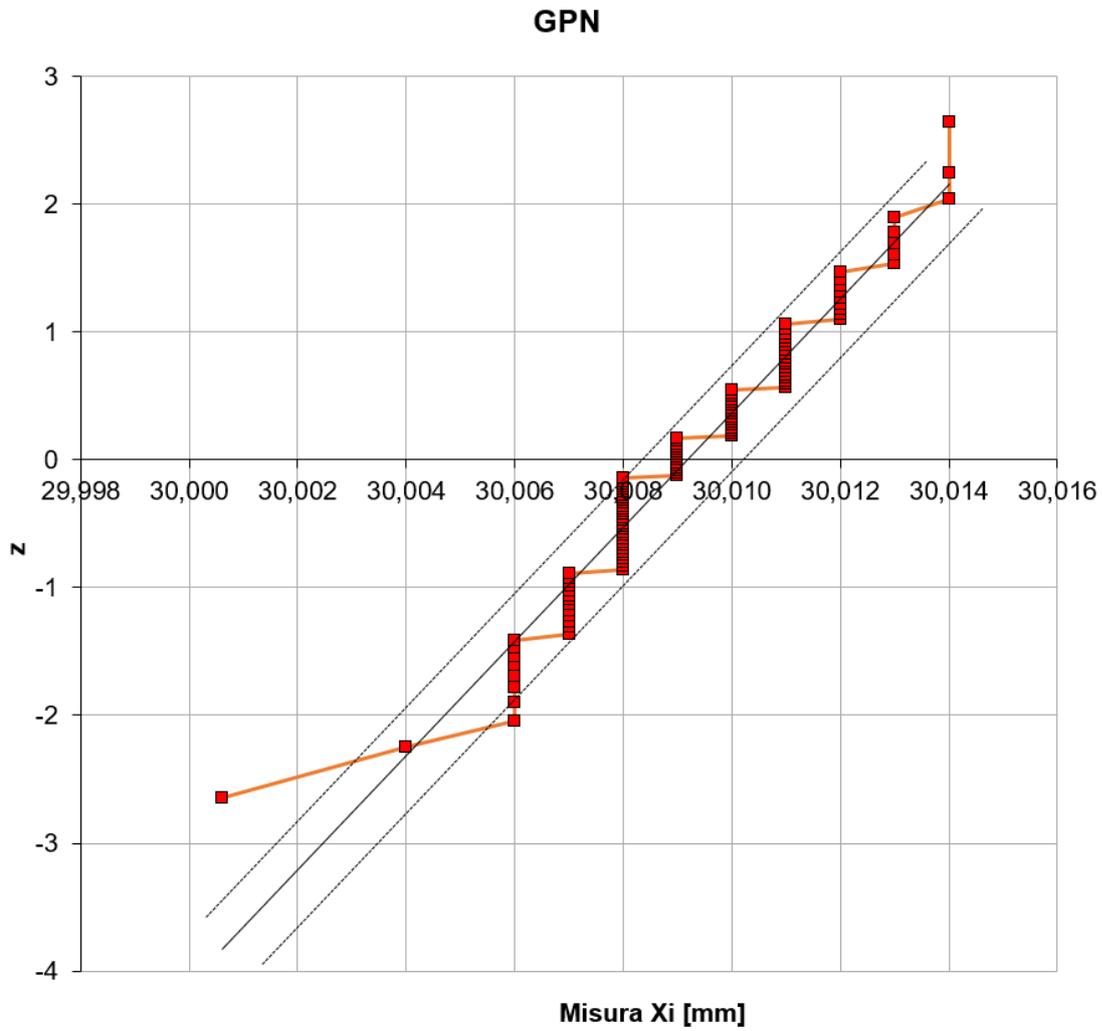


Figura 6.7: Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 30 lavorato con processo originario

L'intervallo di tolleranza T_{PRE} richiesto a disegno è

$$T_{PRE} = UTL - LTL = 0,013 \text{ mm}$$

Tale valore va confrontato con la *Tolleranza naturale del sistema*, che può essere stimata pari all'ampiezza di dispersione dell'intervallo entro cui sono compresi il 99,73% delle misurazioni rilevate. A partire, quindi, dalla deviazione standard del campione di dati misurati e considerando un intervallo di $\pm 3\sigma$, si calcola

$$Toll_{NAT} = 6\sigma = 0,0131 \text{ mm}$$

Si può procedere al calcolo della potenzialità di processo C_p , rapportando le due ampiezze di tolleranza.

$$C_p = \frac{T_{pre}}{Toll_{nat}} = 0,993$$

Un valore di questo genere certifica che la tolleranza prescritta è leggermente minore (o approssimativamente uguale) alla tolleranza naturale, il che rende il processo praticamente al limite di accettabilità.

Infine, si vuole valutare l'indice di centratura del processo C_{pk} , che quantifica quanto le misure si distacchino dal valore centrale di misura richiesto.

In riferimento alla 3.8

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}\right\} = \min\{0,89; 1,10\} = 0,89$$

Il fatto che questo indice risulti minore di uno, indica che il processo non è capace perchè non centrato, ossia la media delle misure è lontana dal valore medio teorico e vicina al limite superiore.

6.2 Seconda caratteristica analizzata: ϕ 31

La seconda caratteristica analizzata, su cui le lavorazioni di finitura sono effettuate con tornio è il diametro esterno di una delle due parti scanalate dell'albero (cerchio rosso in figura 6.8). Tale caratteristica ha una dimensione nominale pari a 31 mm con scostamenti superiori e inferiori ammissibili entrambi positivi, pari rispettivamente a 18 e 2 μm .

I limiti di tolleranza superiore UTL e inferiore LTL entro cui la misura è accettata risultano dunque:

$$UTL = 31,018 \text{ mm}$$

$$LTL = 31,002 \text{ mm}$$

Il valore centrale rispetto ai limiti di tolleranza, utile per il calcolo degli indici di capacità è LC.

$$LC = \frac{UTL + LTL}{2} = 31,010 \text{ mm}$$

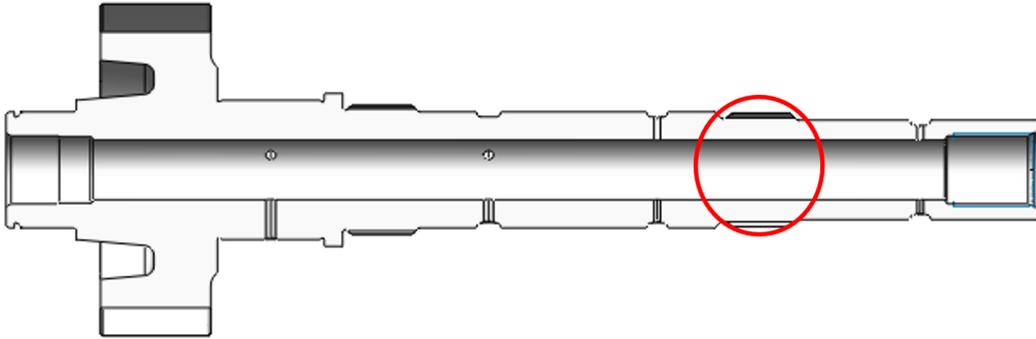


Figura 6.8: Seconda caratteristica analizzata, ϕ 31

La tolleranza simmetrica laterale richiesta a partire dal valore centrale è dunque $\pm 0,008$ mm.

Per la valutazione delle prestazioni del processo rispetto a questa caratteristica è stato utilizzato un campione di pezzi con numerosità pari a 100.

Dalle misurazioni del campione di pezzi risultano i seguenti parametri di distribuzione:

- *Media:*

$$\bar{X} = 30,011 \text{ mm}$$

- *Deviazione standard:*

$$\sigma = 0,0030 \text{ mm}$$

Carta X

Come nel caso precedente, al fine della stesura della carta X è necessario definire i limiti di controllo superiore UCL e inferiore LCL. Per ogni valore, dunque, è stato calcolato il *range mobile*, secondo la formula 3.1 e, conseguentemente, il *range medio mobile*, come media di questi ultimi.

$$\overline{MR} = 0,0024 \text{ mm}$$

Quindi i limiti di controllo risultano:

$$UCL = \bar{X} + 2,66\overline{MR} = 31,017 \text{ mm}$$

$$LCL = \bar{X} - 2,66\overline{MR} = 31,004 \text{ mm}$$

Riportando su grafico le rette che definiscono i vari limiti e i diametri misurati su ciascun pezzo, si ottiene il plot in figura 6.9.

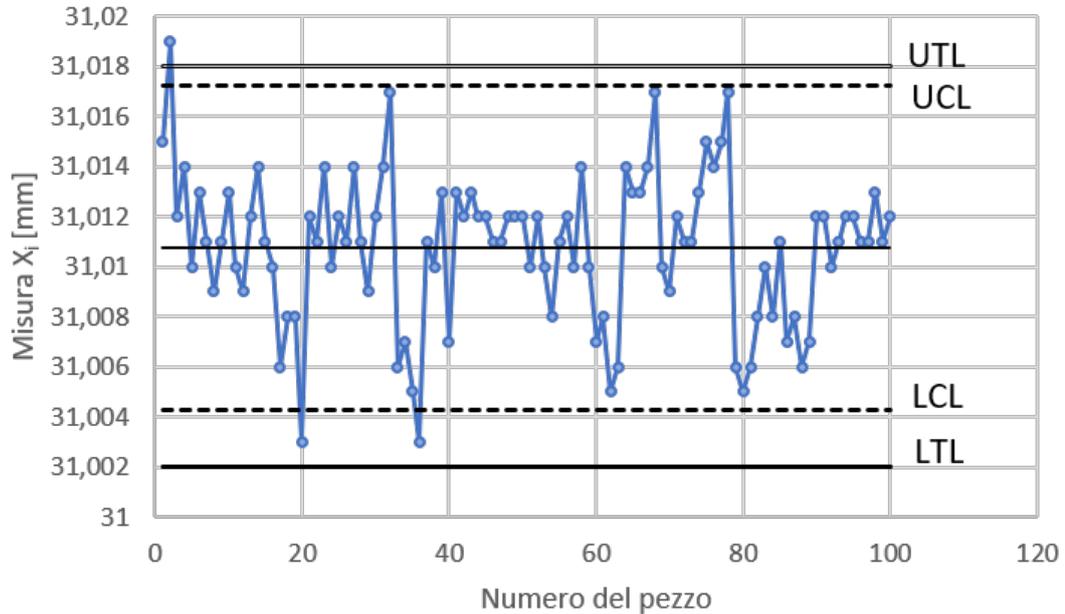


Figura 6.9: Carta di controllo relativa al diametro $\phi 31$ lavorato con processo originario

Anche in questo caso il processo risulta fuori controllo poichè tre punti non rientrano entro i limiti di controllo e diversi punti si trovano sulla retta del limite di controllo superiore.

Tuttavia, a differenza di quanto rilevato per la prima caratteristica, l'andamento delle misure non presenta alcuna peculiarità in quanto i dati sono distribuiti casualmente sopra e sotto il valore medio, seppur con una variabilità tale da poter ritenere, anche in questo caso, il processo fuori controllo.

Istogramma dati e grafico di probabilità normale

I dati sono stati raggruppati in classi e, per ciascuna classe, è stata calcolata la densità di frequenza in modo tale da poter costruire un istogramma la cui forma sia confrontabile con una curva a campana di distribuzione normale.

Con una numerosità del campione pari a cento, in riferimento alla 3.9, i dati sono stati raggruppati in dieci classi.

$$K = \sqrt{N + 1} \approx 10$$

Si ottiene l'istogramma in figura 6.10. In questo caso si rileva una distribuzione normale, a differenza della bimodale precedente, leggermente asimmetrica con valori con probabilità maggiore a sinistra.

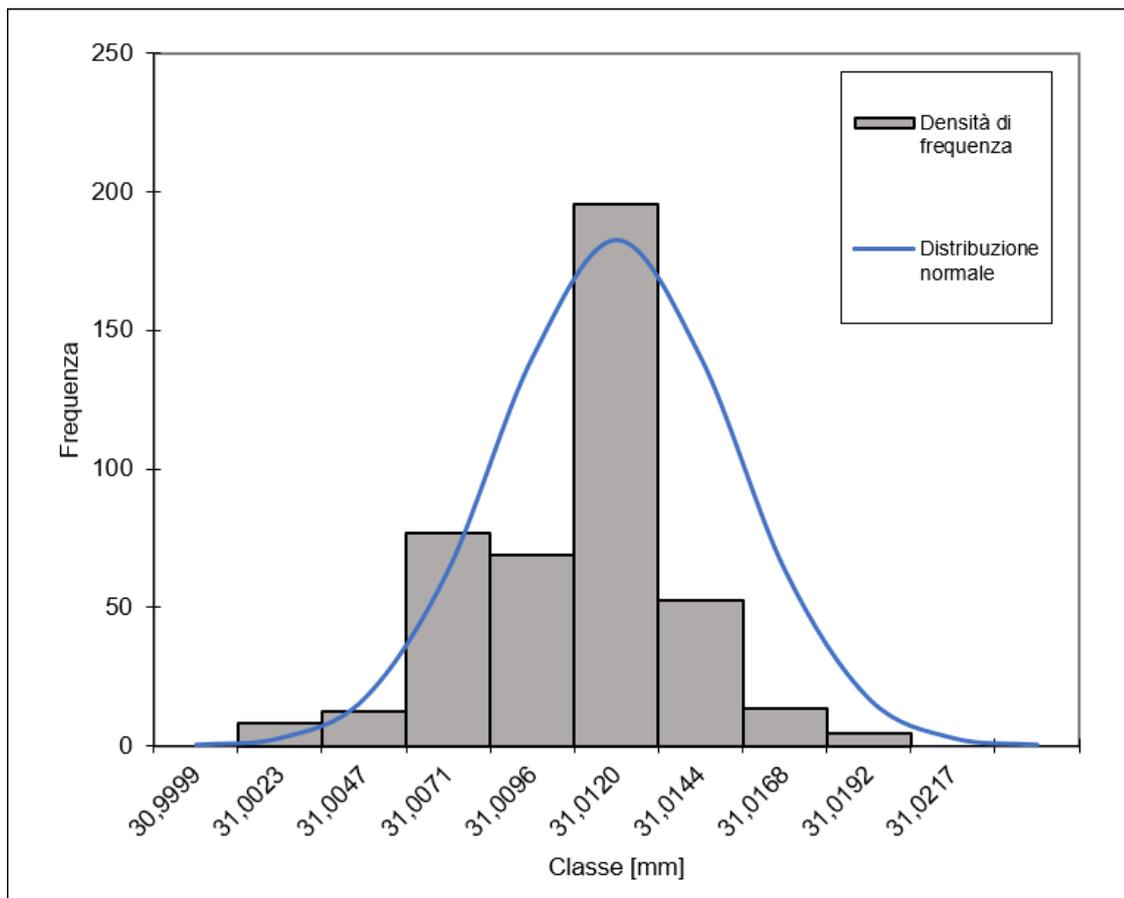


Figura 6.10: Istogramma relativo al diametro ϕ 31 lavorato con processo originario

La tendenza di asimmetria verso sinistra è evidenziata dal grafico di probabilità costruito sui dati prelevati. Infatti, come mostrato in figura 6.11, i dati presentano l'andamento classico per una curva asimmetrica, con le due code giacenti per lo più al di sopra della retta normale.

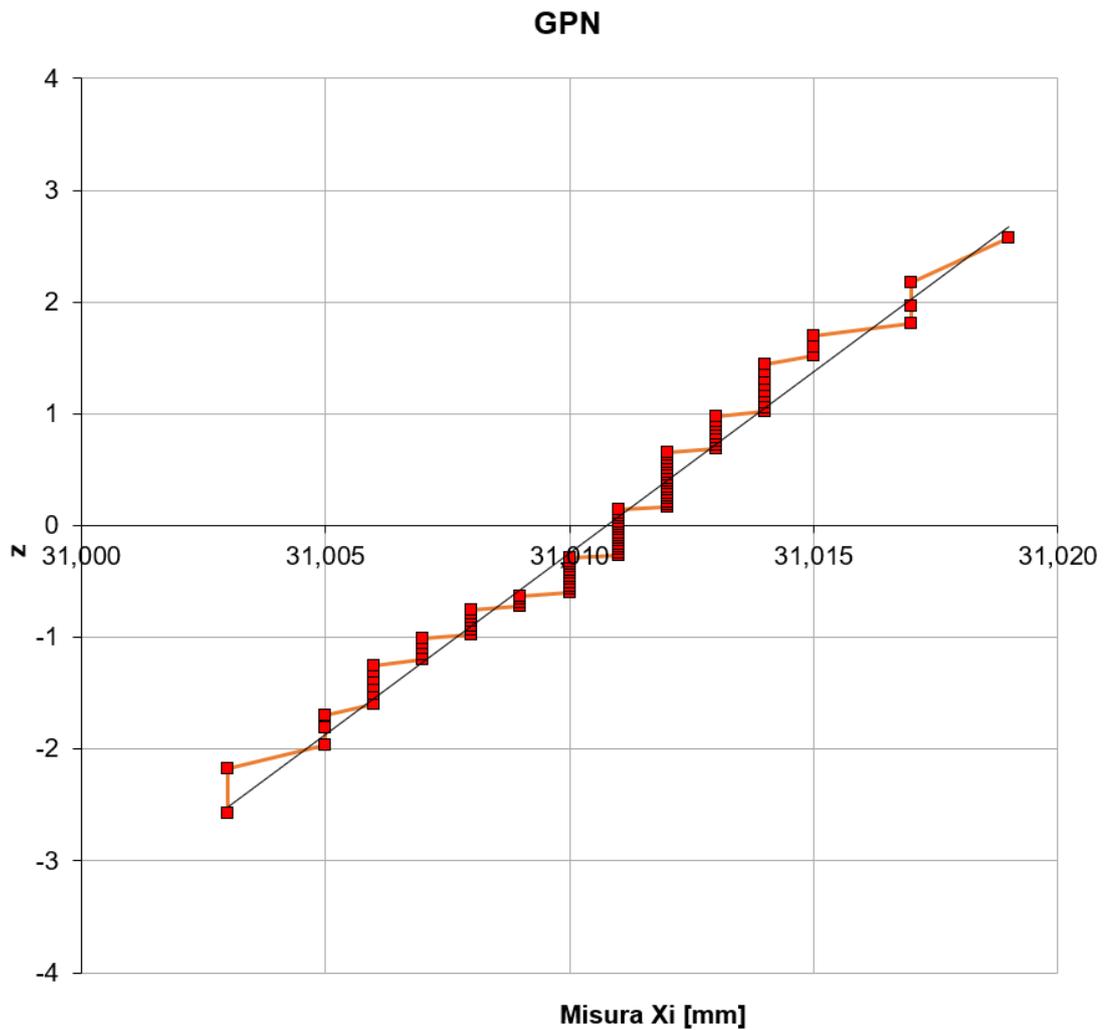


Figura 6.11: Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 31 lavorato con processo originario

Capacità di processo

Per la caratteristica in questione, l'intervallo di tolleranza T_{PRE} richiesto a disegno è maggiore rispetto alla caratteristica precedente e pari a

$$T_{PRE} = UTL - LTL = 0,016 \text{ mm}$$

Tale valore va confrontato con la *Tolleranza naturale del sistema*, che, come detto, può essere stimata pari all'ampiezza di dispersione dell'intervallo entro cui sono compresi il 99,73% delle misurazioni rilevate. A partire, quindi, dalla deviazione standard del campione di dati misurati e considerando un intervallo di $\pm 3\sigma$, si calcola

$$Toll_{NAT} = 6\sigma = 0,0181 \text{ mm}$$

Si può procedere al calcolo della potenzialità di processo C_p , rapportando le due ampiezze di tolleranza.

$$C_p = \frac{T_{pre}}{Toll_{nat}} = 0,89$$

Anche per questa caratteristica, nonostante la tolleranza richiesta sia maggiore, il processo presenta una variabilità tale per cui l'indice di capacità risulta inferiore all'unità.

Ciò implica che il processo può essere definito, anche in questo caso, non capace. Si calcola l'indice di centratura del processo C_{pk} , per valutare il grado di centratura del processo.

In riferimento alla 3.8

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}\right\} = \min\{0,80; 0,97\} = 0,80$$

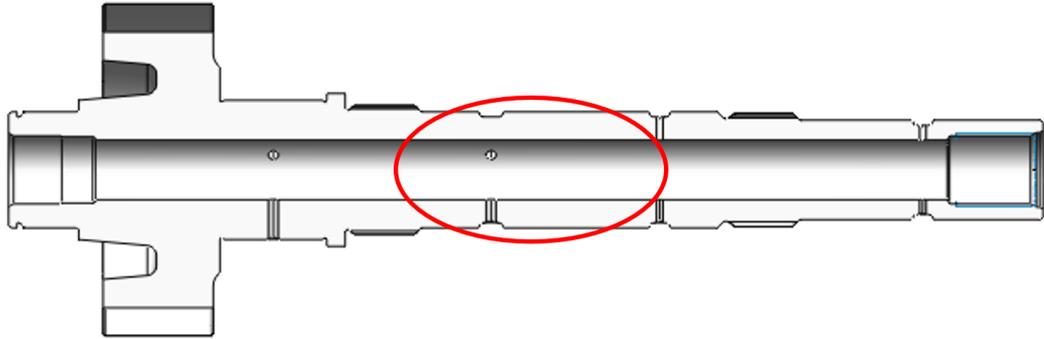
Anche in questo caso l'indice risulta minore di uno, il che significa che il processo non è capace perchè non centrato, ossia la media delle misure è lontana dal valore medio teorico e, in questo caso, vicina al limite superiore.

6.3 Terza caratteristica analizzata: ϕ 35

La terza e ultima caratteristica analizzata è il diametro maggiore tra quelli che subiscono una lavorazione di finitura con tornio (cerchio rosso in figura 6.12).

Tale caratteristica ha una dimensione nominale pari a 35 mm ed è richiesta una tolleranza di accoppiamento foro-albero k6, che corrisponde a scostamenti superiori e inferiori entrambi positivi, pari rispettivamente a 18 e 2 μm .

$$\phi 35 \text{ k6} \rightarrow \phi 35 \begin{matrix} +0,018 \\ +0,002 \end{matrix}$$

Figura 6.12: Terza caratteristica analizzata, $\phi 35$

A partire da queste considerazioni, i limiti di tolleranza superiore UTL e inferiore LTL entro cui la misura è accettata risultano:

$$UTL = 35,018 \text{ mm}$$

$$LTL = 35,002 \text{ mm}$$

Il valore centrale rispetto ai limiti di tolleranza, utile per il calcolo degli indici di capacità è LC.

$$LC = \frac{UTL + LTL}{2} = 35,010 \text{ mm}$$

E la tolleranza simmetrica laterale richiesta a partire dal valore centrale è dunque $\pm 0,008 \text{ mm}$.

Per la valutazione delle prestazioni del processo rispetto a questa caratteristica è stato utilizzato un campione di pezzi con numerosità pari a 83.

Dalle misurazioni dei pezzi risultano i seguenti parametri di distribuzione:

- *Media:*

$$\bar{X} = 35,011 \text{ mm}$$

- *Deviazione standard:*

$$\sigma = 0,0024 \text{ mm}$$

Carta X

Anche in relazione a questa caratteristica è stato effettuato uno studio con carta X a valori singoli per valutare lo stato di controllo del processo.

Al fine della stesura di una carta di controllo è necessario il calcolo dei limiti di controllo.

Per ogni valore, dunque, è stato calcolato il *range mobile*, secondo la formula 3.1 e, conseguentemente, il *range medio mobile*, come media di questi ultimi.

$$\overline{MR} = 0,0020 \text{ mm}$$

Quindi i limiti di controllo superiore (UCL) e inferiore (LCL) risultano:

$$UCL = \bar{X} + 2,66\overline{MR} = 35,016 \text{ mm}$$

$$LCL = \bar{X} - 2,66\overline{MR} = 35,005 \text{ mm}$$

Riportando su grafico le rette che definiscono i vari limiti e i diametri misurati su ciascun pezzo, si ottiene il plot in figura 6.13.

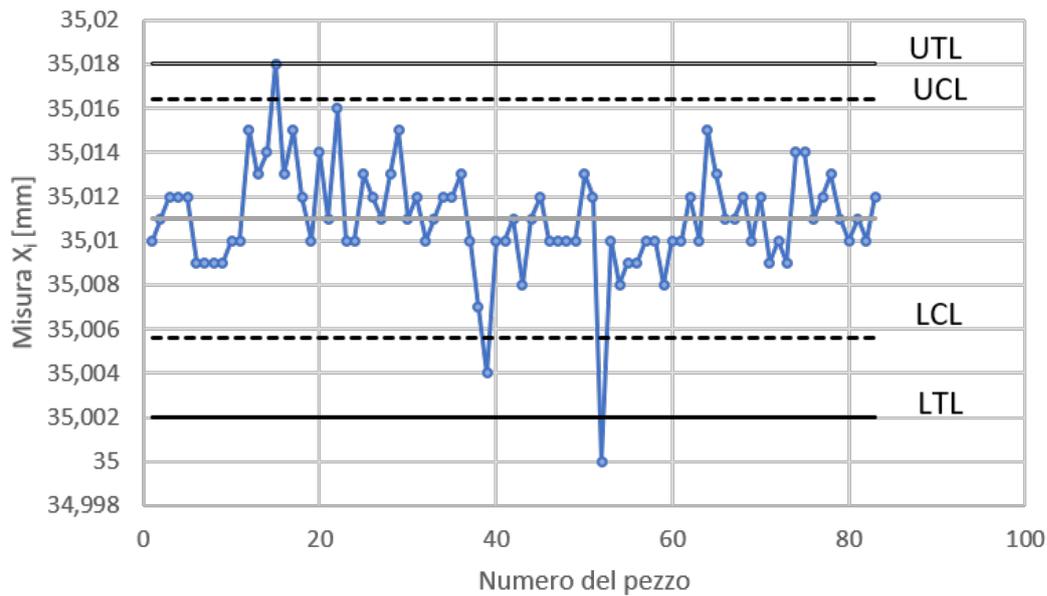


Figura 6.13: Carta di controllo relativa al diametro $\phi 35$ lavorato con processo originario

Si rilevano tre valori che eccedono i limiti di controllo, uno dei quali risulta persino minore del limite di tolleranza inferiore LTL e, pertanto, il pezzo corrispondente rappresenta uno scarto di produzione.

Nonostante la carta di controllo 6.13 presenti ancora una volta un processo fuori controllo, è da notare che il numero di punti rilevati oltre i limiti è nettamente inferiore rispetto a quello riscontrato per le altre caratteristiche.

Istogramma dati e grafico di probabilità normale

Con una numerosità del campione pari a 83, in riferimento alla 3.9, i dati sono stati raggruppati in dieci classi.

$$K = \sqrt{N + 1} \cong 10$$

Si ottiene l'istogramma in figura 6.14.

Come per la seconda caratteristica analizzata, l'istogramma mostra che i dati si

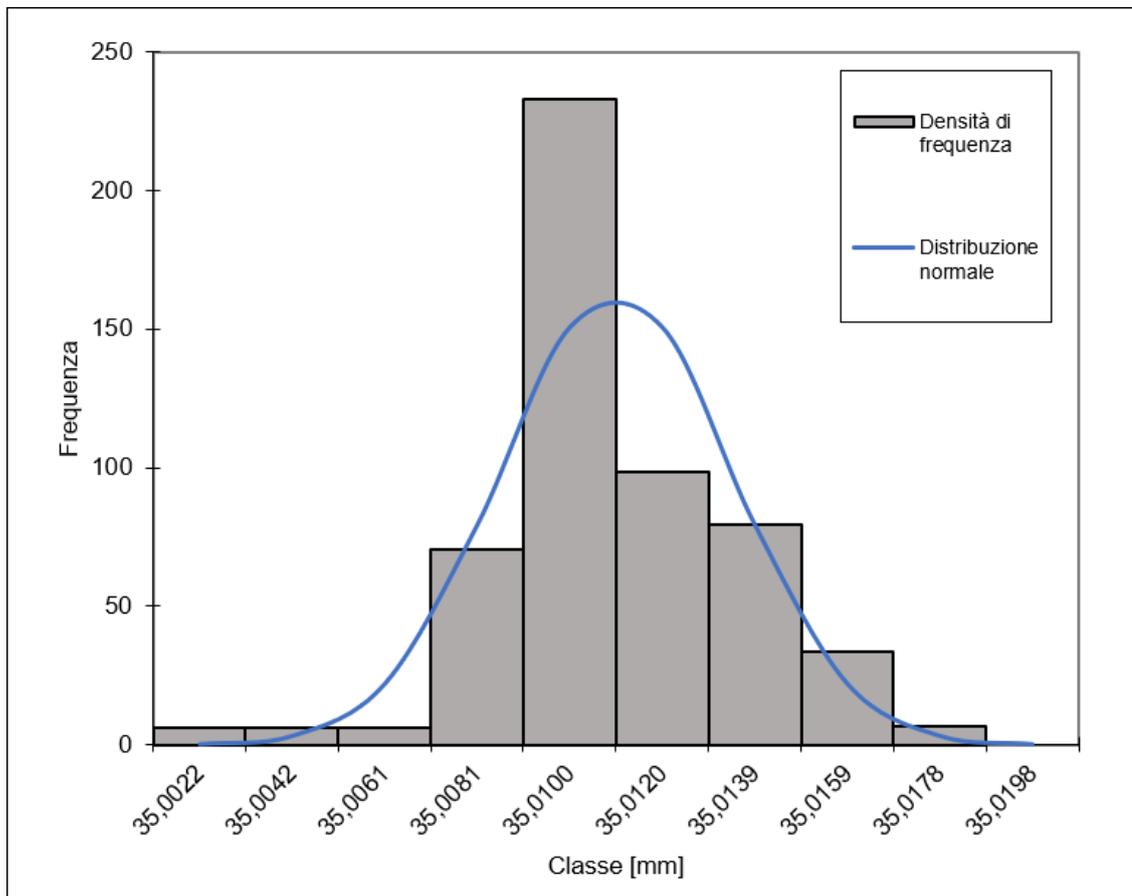


Figura 6.14: Istogramma relativo al diametro ϕ 35 lavorato con processo originario

distribuiscono perlopiù con forma a campana asimmetrica, ma stavolta l'asimmetria è a destra.

Anche in questo caso, la tendenza di asimmetria è evidenziata dal grafico di probabilità costruito sui dati prelevati. Infatti, come mostrato in figura 6.15, i dati presentano l'andamento classico per una curva asimmetrica.

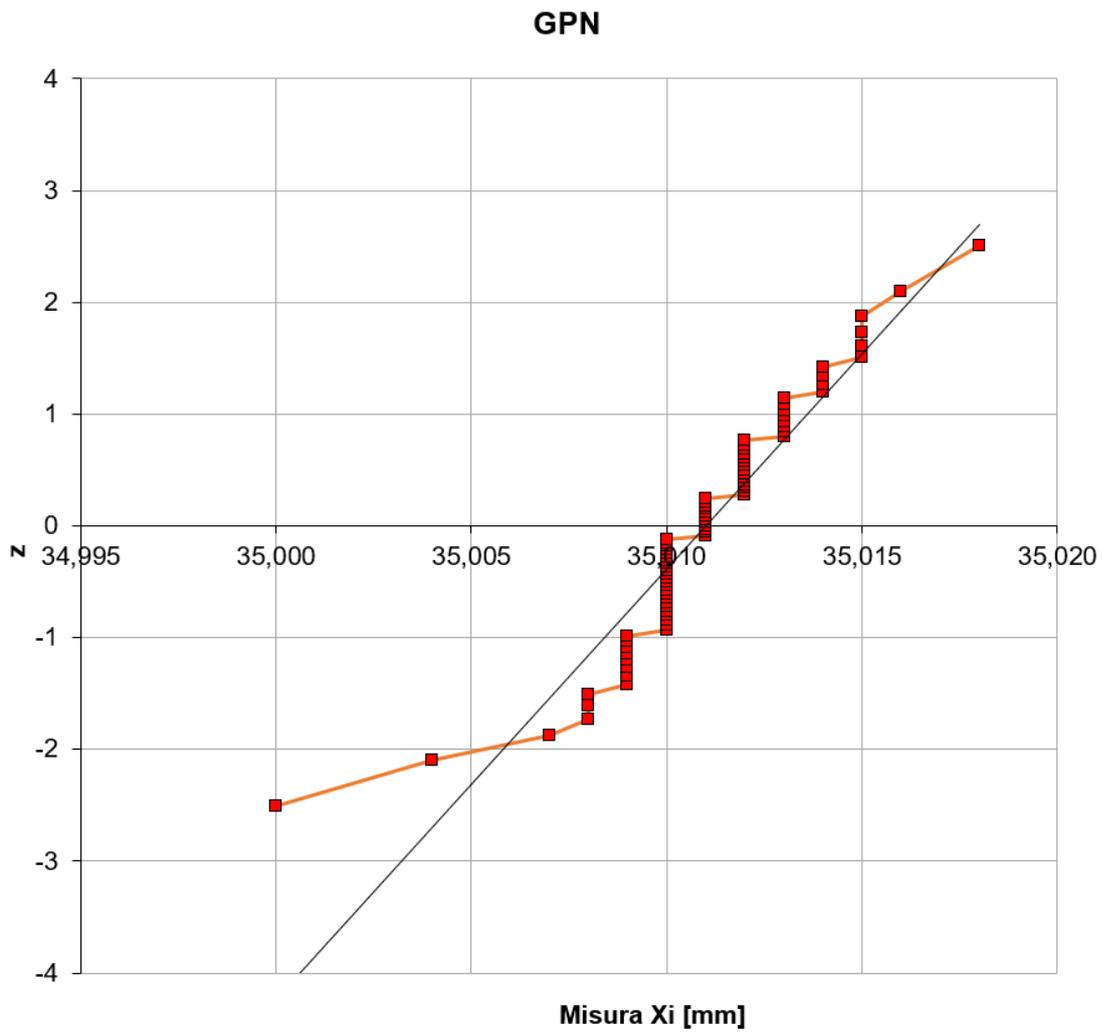


Figura 6.15: Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 35 lavorato con processo originario

Capacità di processo

Per valutare il comportamento del processo in relazione alle specifiche tecniche richieste per la caratteristica del particolare analizzata, si valuta la capacità di processo.

L'intervallo di tolleranza T_{PRE} richiesto a disegno è

$$T_{PRE} = UTL - LTL = 0,016 \text{ mm}$$

Tale valore va confrontato con la *Tolleranza naturale del sistema*, che può essere stimata pari all'ampiezza di dispersione dell'intervallo entro cui sono compresi il 99,73% delle misurazioni rilevate. A partire, quindi, dalla deviazione standard del campione di dati misurati e considerando un intervallo di $\pm 3\sigma$, si calcola

$$Toll_{NAT} = 6\sigma = 0,015 \text{ mm}$$

Si può procedere al calcolo della potenzialità di processo C_p , rapportando le due ampiezze di tolleranza.

$$C_p = \frac{T_{pre}}{Toll_{nat}} = 1,1$$

Un valore di C_p superiore all'unità identifica un processo capace, in cui più del 99,73% (intervallo 6σ) dei pezzi risulta conforme.

Per concludere, l'indice di centratura del processo C_{pk} , in riferimento alla 3.8

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}\right\} = \min\{0,96; 1,23\} = 0,96$$

L'indice è sintomo di una lieve non centratura del processo, essendo molto prossimo all'unità.

Pertanto in relazione a questa caratteristica, il processo si ritiene al limite minimo di accettabilità in relazione alla sua variabilità, ma leggermente non centrato.

6.4 Tabella riassuntiva per processo produttivo originario

In tabella 6.1 sono riassunti i risultati principali ottenuti dallo studio del processo mediante l'analisi delle tre caratteristiche descritte.

Risulta per tutte e tre le caratteristiche che il processo è fuori controllo; vale a dire che per tutti i casi la carta di controllo presenta almeno un punto oltre i limiti di controllo superiori o inferiori.

Dall'analisi di capacità del processo, invece, emerge che esso ha un comportamento accettabile in termini di dispersione e centratura per la terza caratteristica, che

$\%R\&R$	6,1%		
	Prima caratteristica	Seconda caratteristica	Terza caratteristica
Carta X	Processo fuori controllo	Processo fuori controllo	Processo fuori controllo
Distribuzione	Bimodale	Normale asimmetrica	Normale asimmetrica
C_p	0,99	0,89	1,1
C_{pk}	0,89	0,80	0,96

Tabella 6.1: Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per il processo originario

corrisponde al diametro maggiore dei tre $\phi 35$, seppur presentando una non perfetta centratura.

Al contrario, per le altre due caratteristiche il processo risulta non accettabile in quanto non capace e non centrato, caratteristiche evidenti soprattutto per il diametro intermedio $\phi 31$.

Capitolo 7

Nuovo sistema di misura

Seppur accettabile, il vecchio sistema di misura è stato sostituito con una macchina di misura con tecnologie di ultima generazione che presenta caratteristiche e prestazioni nettamente superiori rispetto al sistema di comparatore con forcina analizzato in precedenza. La macchina in questione è l'EXAMECA Combodim (Figura 7.1).

Nella parte bassa della macchina sono alloggiati le unità di controllo, di potenza e di condizionamento termico della cabina, che riceve anche un feedback di controllo da un sensore di temperatura, che rileva lo stato dell'ambiente in prossimità del pezzo misurato.

La parte superiore è separata dalla parte inferiore da uno strato di materiale viscoelastico (gomma) e da un blocco di granito, con lo scopo di assorbire le vibrazioni provenienti dall'esterno e che potrebbero essere causa di disturbo della misura. Il pezzo è sostenuto da due contropunte ed è attraversato da un dispositivo multifunzionale di misura di forma toroidale che presenta tutti gli strumenti per le misure. In particolare la macchina è in grado di rilevare misure per contatto o con sistema ottico a laser, relative a diametri, lunghezze, quota sfere, inclinazioni e profili di ogni genere. Sono, inoltre, rilevabili tutte le caratteristiche di forma del pezzo, come planarità, circolarità, oscillazione della superficie, ecc. Tutti i risultati di misura sono elaborati secondo un programma stabilito e mostrati a video in relazione alle misure nominali delle varie features del componente.

La macchina è automatica in tutta la fase di misurazione, eccetto che per il posizionamento del pezzo; anche la calibrazione della macchina avviene automaticamente.

Per il sistema di misura in questione è stato possibile eseguire tutte le tipologie di analisi previste dal manuale MSA. Tale possibilità è dovuta al fatto che il sistema è stato appositamente introdotto in azienda, per cui in termini di accettazione della macchina la procedura si è attenuta alle normative attuali.



Figura 7.1: Macchina Exameca utilizzata come nuovo sistema di misura

7.1 Risoluzione sistema

Il sistema di misura riporta a video tutte le informazioni relative alle misurazioni rilevato, dunque il sistema di acquisizione dati è naturalmente digitale.

La risoluzione Δy_{min} dichiarata dal costruttore per misurazioni effettuate ad una temperatura ambiente pari a $20^{\circ}C$ e garantita con l'utilizzo del sistema a contatto raggiunge il quarto del millesimo di millimetro.

$$\Delta y_{min} = 0,25 \mu m = 0,00025 mm \quad (7.1)$$

A partire da questo dato, si definisce l'indice di risoluzione frazionario Ris . Si utilizza come tolleranza prescritta T_{pre} , il medesimo valore utilizzato per il calcolo dell'indice relativo al sistema di misura originario, al fine di poter effettuare un confronto tra i due.

$$Ris = \frac{\Delta y_{min}}{T_{pre}} = 0,016 \quad \text{con } T_{pre} = 0,016 \quad (7.2)$$

$$\%Ris = 1,6\%$$

Affinché lo strumento sia ritenuto idoneo è necessario che la sua risoluzione sia al massimo pari al 5% della tolleranza prescritta. La macchina di misura in questione risulta perfettamente conforme alla richiesta, per cui è adeguata alla misurazione dei pezzi in questione. La figura 7.2 mostra graficamente quanto minore sia l'indice rispetto al limite massimo accettabile.

Si noti come l'indice in questione sia ben inferiore rispetto a quello calcolato per il sistema di misura originario, con un rapporto di 1:4. Questo primo parametro evidenzia già la superiorità prestazionale del nuovo sistema in relazione ai pezzi su cui andrà ad operare.

7.2 Studio di tipo 1

Come mostrato nel capitolo 4.2, normalmente il secondo step da effettuare per l'analisi del sistema di misura, dopo aver verificato la risoluzione dello stesso, è quello di valutare l'adeguatezza dello strumento rispetto alle due caratteristiche metrologiche di accuratezza e ripetibilità strumentali, che sono combinate tramite un indice complessivo di capacità %A&R.

Per questa tipologia di studio è stata necessaria la presenza di un pezzo campione (*master*), ossia un elemento di valore noto, a cui viene assegnato un valore di riferimento e la corrispondente incertezza estesa.

Per l'analisi generale dello strumento sono state rilevate misure a diversi diametri per testare l'accuratezza e la ripetibilità in tutto il campo di funzionamento. Tuttavia, in seguito verranno riportate le analisi riguardanti il diametro che si avvicina

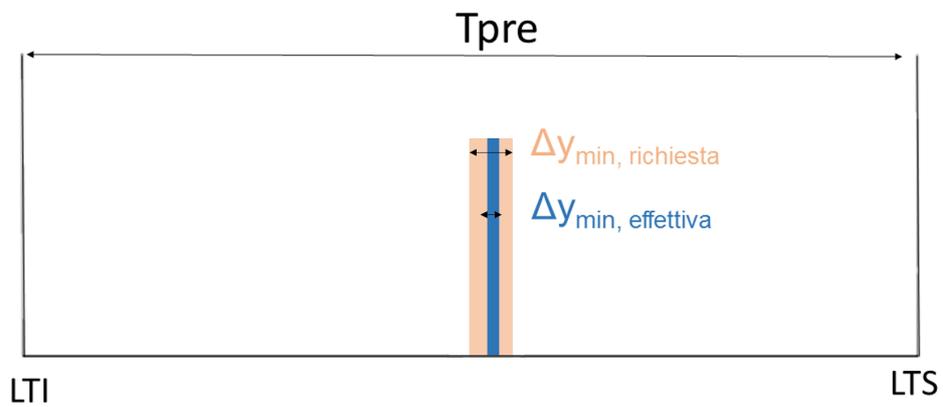


Figura 7.2: Indice percentuale di risoluzione del nuovo sistema di misura

alle caratteristiche dimensionali oggetto dell'intero studio, in quanto è l'unico di rilevante interesse per l'analisi globale di processo svolta.

Nel rispetto della normative sono state effettuate sul master un numero di misurazioni pari a r .

$$r = 50$$

La caratteristica misurata è un diametro con valore nominale pari a 30 mm con tolleranza prescritta T_{pre} pari a $0,011 \text{ mm}$. Come detto, è necessario attribuire al master un valore di riferimento noto, in questo caso tale valore è stato dichiarato pari a $30,0017 \text{ mm}$ con un'incertezza estesa di $0,0009 \text{ mm}$. I dati sono riassunti in Tabella 7.1

Dimensione nominale	$D = 30 \text{ mm}$
Tolleranza prescritta	$T_{pre} = 0,011 \text{ mm}$
Valore di riferimento	$y_{RIF} = 30,0017 \text{ mm}$
Incertezza estesa	$U_m = 0,0009 \text{ mm}$

Tabella 7.1: Dati caratteristici del master utilizzato per lo Studio di tipo 1

È necessario verificare che l'incertezza estesa del master si inferiore al 10% della tolleranza richiesta per quella caratteristica.

$$\frac{U_m}{T_{pre}} = 0,08 < 0,10$$

Appurata questa condizione, è possibile procedere con l'analisi delle r replicazioni di misura, effettuate nel rispetto delle condizioni suggerite dalle normative. Si calcolano, dunque, la media aritmetica e lo scarto tipo dei valori misurati $y_G(i)$.

$$\bar{y}_G = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_G(i) = 30,00203 \text{ mm}$$

$$s_G = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (y_G(i) - \bar{y}_G)^2} = 0,000175 \text{ mm}$$

Quindi l'errore sistematico dello strumento, definito come accuratezza, è pari a

$$AC = |\bar{y}_G - y_{RIF}| = 0,00033 \text{ mm}$$

Che risulta inferiore al 5% della tolleranza prescritta.

$$\frac{AC}{T_{PRE}} = 3\%$$

Si può così calcolare l'indice di potenzialità strumentale C_g e verificare che sia minore di 1,33, che vuol dire che il 20% dell'intervallo di tolleranza deve essere al minimo un terzo dell'intervallo 4σ , che comprende il 95,4% dei valori.

$$C_g = \frac{0,2 T_{pre}}{4 s_g} = 3,14 \geq 1,33$$

Combinando l'indice di potenzialità strumentale con l'accuratezza si ottiene un unico indice di capacità strumentale C_{GK}

$$C_{GK} = \frac{0,1 \cdot T_{PRE} - |\bar{y}_G - y_{RIF}|}{2 \cdot s_G} = 2,20$$

È verificata anche in questo caso la condizione

$$C_{GK} \geq 1,33$$

In termini frazionari, si calcolano l'indice percentuale di ripetibilità R_G e di accuratezza A_G , entrambi verificati. Infine, l'indice frazionario complessivo $A\&R$

$$R_G = \frac{4 \cdot s_G}{T_{PRE}} = 6,37\% \leq 15\%$$

$$A_G = \frac{|\bar{y}_G - y_{RIF}|}{T_{PRE}} = 3\% \leq 5\%$$

$$A\&R = \frac{4 \cdot s_G + |\bar{y}_G - y_{RIF}|}{T_{PRE}} = 9,10\%$$

Tale parametro è inferiore a 20%, come richiesto.

Poichè tutti gli indici sono contenuti nei limiti richiesti, il sistema di misura, come era prevedibile, si ritiene adeguato per quel che concerne l'accuratezza e la ripetibilità strumentale.

7.3 Studio di tipo 2

Validata l'idoneità del singolo strumento di misura, è necessaria un'analisi per l'intero processo di misura, per evidenziare l'influenza dell'operatore e della variazione dei particolari misurati.

Come da normativa, il processo di misura a cui ci si riferisce per questo tipo di studio è analogo al processo reale.

Come per lo studio del sistema precedente, sono stati misurati dieci particolari da tre operatori differenti (A , B , C), ognuno dei quali ha ripetuto su ciascun particolare tre misurazioni della caratteristica dimensionale considerata. (Tabella 7.2)

Numero operatori	$n = 3$
Numero particolari	$p = 10$
Numero repliche	$r = 3$

Tabella 7.2: Numero di parametri utilizzati per l'analisi

Per un totale di dati analizzati superiore a 30 come da normativa.

$$n \cdot p \cdot r = 3 \cdot 10 \cdot 3 = 90 \text{ prove} \geq 30 \quad (7.3)$$

Nello specifico, è stato utilizzato il particolare mostrato in figura 7.3, che è lo stesso pezzo utilizzato per l'MSA del vecchio processo. Anche la caratteristica analizzata (cerchiata in rosso), è la medesima analizzata nello studio del vecchio sistema di misura, sebbene non sia necessario ai fini del confronto.

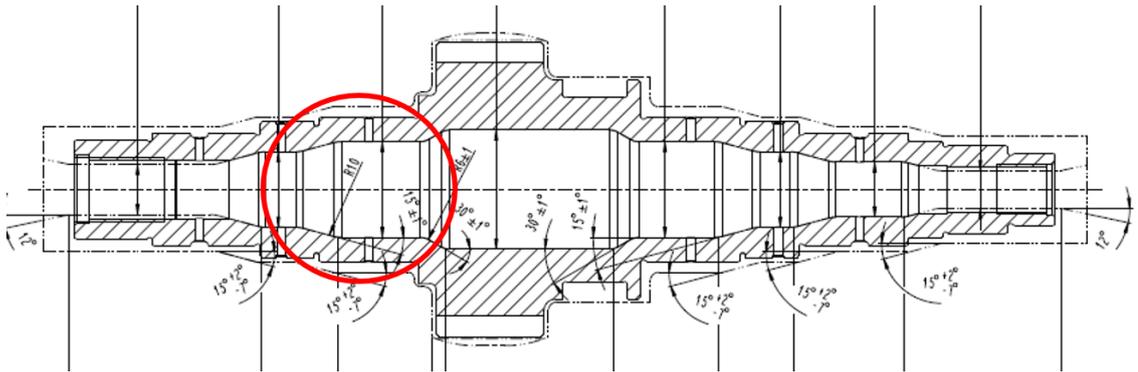


Figura 7.3: Disegno del particolare utilizzato per l'analisi del sistema di misura

La misura nominale del diametro è di 50 mm , con una tolleranza pari a $h5$. Dunque, i limiti superiore (UTL) e inferiore (LTL) sono dunque

$$UTL = 50 \text{ mm} \quad (7.4)$$

$$LTL = 49,989 \text{ mm} \quad (7.5)$$

La tolleranza prescritta T_{pre} per la caratteristica in questione risulta pari alla differenza tra i due limiti:

$$T_{pre} = UTL - LTL = 0,011 \text{ mm} \quad (7.6)$$

Per ciascun gruppo di misure sono calcolati i parametri di media e range.

	A		B		C	
	\bar{X} [mm]	R [mm]	\bar{X} [mm]	R [mm]	\bar{X} [mm]	R [mm]
1	49,9959	0,0008	49,9924	0,0006	49,9965	0,0004
2	50,0019	0,0001	50,0019	0,0004	50,0020	0,0004
3	49,9892	0,0006	49,9893	0,0004	49,9893	0,0008
4	49,9958	0,0008	49,9957	0,0006	49,9960	0,0005
5	49,9961	0,0008	49,9960	0,0007	49,9961	0,0008
6	49,9940	0,001	49,9938	0,0004	49,9938	0,0006
7	49,9951	0,0007	49,9949	0,0006	49,9951	0,0011
8	49,9947	0,0004	49,9947	0,0007	49,9948	0,0009
9	49,9960	0,0007	49,9956	0,0007	49,9957	0,0006
10	49,9967	0,0006	49,9966	0,0007	49,9966	0,001

Tabella 7.3: Valori di medie e range delle replicazioni per ciascun operatore e ciascun particolare

Per ciascun operatore e per ciascun particolare le medie delle replicazioni effettuate e i range di misura corrispondenti sono stati calcolati secondo le formule 4.14 e 4.15 e sono riportati in tabella 7.3.

La figura 7.4 mostra l'andamento delle medie delle 3 misurazioni fatte su ciascun pezzo da ciascun operatore. Si nota che la variazione tra i tre operatori è quasi nulla, comunque impercettibile. Ciò è dovuto al fatto che l'addetto è chiamato in causa soltanto nella fase di posizionamento del pezzo e non interviene in altro modo nella misura, che avviene in automatico.

Si calcolano poi le medie generali delle medie per i tre operatori A, B, C

$$\bar{\bar{X}}_A = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{A,j} = 49,9955 \text{ mm}$$

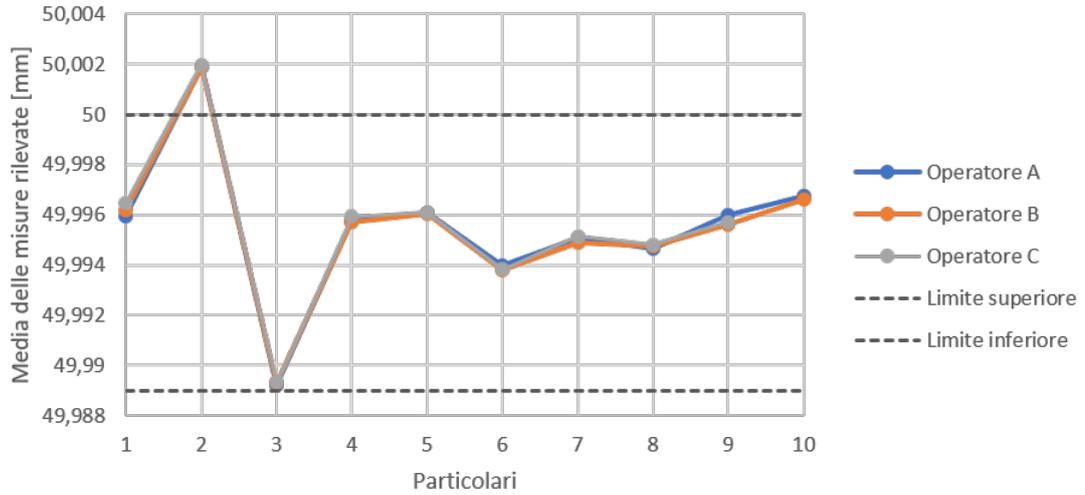


Figura 7.4: Andamento delle medie delle tre replicazioni di misura per ciascun particolare e per ciascun operatore per il nuovo sistema di misura

$$\bar{X}_B = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{B,j} = 49,9955 \text{ mm}$$

$$\bar{X}_C = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{C,j} = 49,9956 \text{ mm}$$

e le medie dei range per gli operatori

$$\bar{R}_A = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{A,j} = 0,00065 \text{ mm}$$

$$\bar{R}_B = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{B,j} = 0,00058 \text{ mm}$$

$$\bar{R}_C = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{C,j} = 0,00071 \text{ mm}$$

Dunque, la media delle medie e la media dei range risultano essere

$$\bar{\bar{X}} = 49,9955 \quad \bar{\bar{R}} = 0,0006$$

A partire dal dato $\bar{\bar{R}}$ si valuta il limite superiore di controllo delle escursioni UCL_R

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{\bar{R}} = 0,0017 \text{ mm}$$

In cui D_4 è un valore tabellato in funzione del numero di replicazioni per ciascuna misurazione.

$$\text{Per } r = 3 \text{ replicazioni } D_4 = 2,58$$

Anche in questo caso, tutti i range di misura per gli operatori sono inferiori al limite superiore, dunque è possibile accettare i dati e procedere con lo studio.

Si calcola la componente di variabilità dovuta a cause riconducibili alle prestazioni dello strumento, ossia come scarto tipo di ripetibilità operativa EV .

$$\text{Per } r = 3 \text{ replicazioni delle } p \cdot n = 30 \text{ misure } K_1 = 0,5908$$

Dunque, dalla 4.22, si ha un indice di ripetibilità strumentale

$$EV = 0,00038 \quad (7.7)$$

La naturale stima della dispersione è calcolata proporzionalmente al range delle medie di ciascun operatore x_{DIFF} . Dalla 4.25, risulta

$$x_{DIFF} = 0,0001$$

Ed effettuando lo scorporo del contributo di variabilità strumentale dalla stima della dispersione naturale, si ottiene la riproducibilità legata all'alternanza degli operatori AV

$$AV = \sqrt{(K_2 \cdot X_{DIFF})^2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}} = 0,0000$$

$$\text{Con } K_2 = 0,5231 \quad \text{per } n = 3 \text{ operatori}$$

Come era già stato evidenziato non si evidenzia alcun contributo di variabilità legato all'operatore, infatti l'indice risulta nullo fino alla quinta cifra decimale.

L'indice totale $R\&R$, unione dei due contributi, risulta a questo punto uguale alla ripetibilità strumentale.

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} = EV = 0,00038$$

Il contributo di variabilità dovuto alla differenza tra i dieci particolari misurati è

$$PV = K_3 \cdot R_p = 0,0040$$

Essendo R_p l'escursione massima tra le medie dei particolari misurati, calcolato secondo la 4.19

$$R_p = 0,0126$$

e $K_3 = 0,3146$ da tabella in corrispondenza di 10 particolari misurati.

I contributi di variabilità strumentale, di riproducibilità dell'operatore e di variazione del particolare sommati quadraticamente (equazione 4.28) compongono l'indice di variazione totale TV

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} = 0,0040$$

Anche in questo caso il contributo di variabilità dovuto alla variazione dei dieci particolari è nettamente più rilevante rispetto al contributo di riproducibilità. Rapportando i vari indici alla variazione totale si ottengono gli indici frazionari percentuali in tabella 7.4

Variazione attrezzatura	$\%EV = 9,56\%$
Variazione operatore	$\%AV = 0\%$
Riproducibilità e ripetibilità	$\%R\&R = \%EV = 9,56\%$
Variazione particolare	$\%PV = 99,54\%$

Tabella 7.4: Indici percentuali caratteristici del nuovo sistema di misura

7.4 Analisi indici caratteristici

In questo caso, diversamente dal vecchio sistema di misura, il contributo di variabilità di ripetibilità e riproducibilità è maggiore in termini percentuali rispetto alla variazione totale ed è dovuto esclusivamente alla variabilità strumentale EV . Ciò, come detto, è attribuibile al fatto che lo strumento è quasi completamente automatico, il che rende il contributo di variabilità dell'operatore non apprezzabile. In termini assoluti, i valori degli indici per il vecchio e nuovo sistema di misura sono molto vicini, dunque dal punto di vista della ripetibilità e riproducibilità sono comparabili sullo stesso livello.

Anche in questo caso, il parametro $\%R\&R$, attribuibile alla sola variabilità strumentale, risulta inferiore al valore limite per l'accettazione del processo di misura, che pertanto è ritenuto idoneo.

$$\%R\&R = 9,56\% \leq 10\% \quad \text{Il processo di misura è idoneo}$$

In figura 7.5 sono rappresentati graficamente gli indici percentuali, con evidenza di ciascun contributo agli indici complessivi.

Infine, il numero di categorie distinguibili all'interno della variabilità dei dati è ndc

$$ndc = 1,41 \cdot \frac{PV}{R\&R} = 14 \quad ndc \geq 5 \quad (7.8)$$

Di conseguenza, il sistema è in grado di discriminare all'interno della dispersione dei dati un numero di categorie sufficientemente elevato; anche sotto questo punto di vista risulta accettabile.

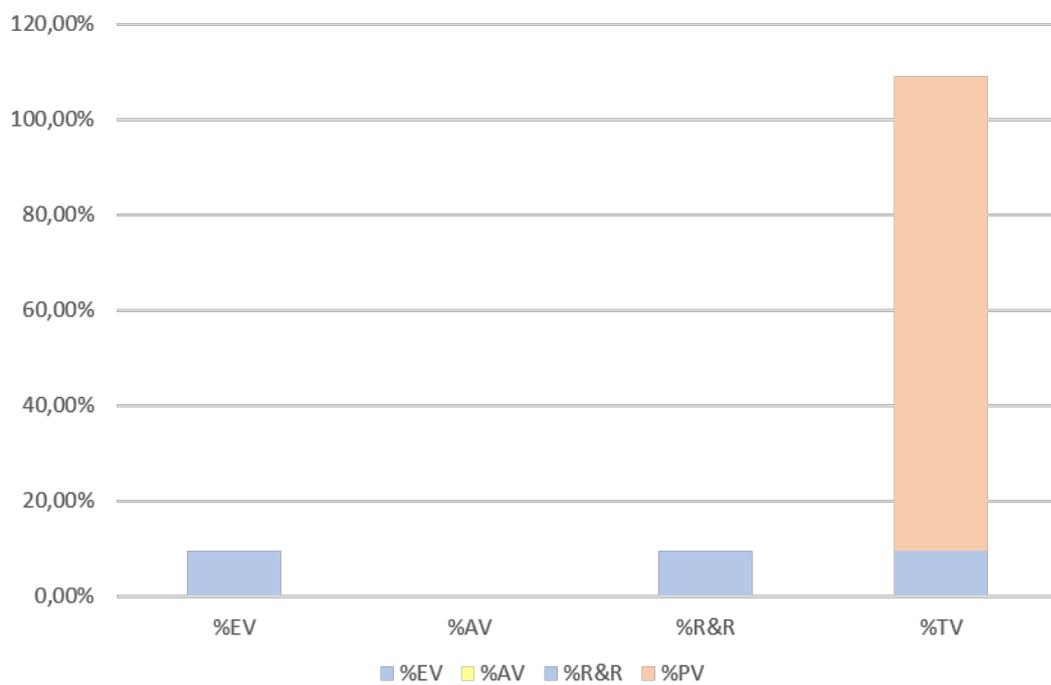


Figura 7.5: Indici percentuali caratteristici del nuovo sistema di misura

Capitolo 8

Nuovo processo produttivo

La porzione di processo produttivo per i prodotti della stessa famiglia di quello mostrato in Figura 6.1(*Capitolo 6*) che ha subito variazioni è quella riguardante la finitura dei pezzi. Ciò è dovuto al fatto che il mancato rispetto delle tolleranze dei pezzi prodotti è attribuibile a tale operazione.

Le cause, già analizzate nel capitolo 2, sono state confermate dallo studio di capacità del processo. Dall'analisi, infatti, è emerso che il processo in questione risulta non capace, dunque non idoneo in relazione alle tolleranze richieste a disegno, sia per l'elevata variabilità, sia perchè esso non è centrato sul valore medio nominale corretto.

Per questa ragione, oltre all'introduzione di un sistema di misura più sofisticato, è stata effettuata una radicale modifica alle operazioni di finitura effettuate sul pezzo.

La scelta è ricaduta sulla variazione del tipo di lavorazione: è stato deciso di utilizzare la tornitura "sul duro" solo per le operazioni di sgrossatura dei diametri del particolare analizzato, mentre per la finitura sono state introdotte operazioni di rettifica.

8.1 Da tornitura a rettifica

Le lavorazioni in questione utilizzano entrambi la tecnologia di lavorazione per asportazione di truciolo, ma con utensile di asportazione differente.

Per quanto riguarda la tornitura, si tratta di *Hard Turning* (letteralmente *Tornitura dura*) poichè la lavorazione è effettuata su pezzi già trattati termicamente, che presentano una durezza più elevata rispetto ai grezzi di partenza classici per le lavorazioni di tornitura.

Le caratteristiche tecnologiche sono quelle di una tornitura classica, con differenze nei parametri di taglio e nel materiale degli utensili, cui è richiesta una maggiore durezza (si utilizzano inserti di nitruro boro cubico CBN). Questa operazione, infatti, è considerata un processo di finitura o semifinitura con elevati requisiti di precisione

dimensionale e qualità superficiale, paragonabili a quello ottenuti da operazioni di rettifica.

In effetti la tornitura di pezzi temprati è ampiamente considerata come un'alternativa efficiente ed economica per la finitura dei pezzi, in quanto la produttività è maggiore rispetto all'utilizzo delle due lavorazioni congiunte di tornitura e rettifica, che avvengono generalmente in macchine diverse.

Tuttavia, in questo caso, questa tecnologia non è sufficiente a raggiungere le caratteristiche richieste per il particolare in questione. Per questa ragione è necessario far ricorso a operazioni di rettifica.

La rettifica è un'operazione che consente di ottenere un altissimo grado di finitura, che lavora per abrasione per mezzo di un utensile tagliente chiamato *mola*. Le mole sono costituiti da taglienti multipli formati da grani abrasivi agglomerati tra loro di tipologia di materiale, durezza e forma diversa in relazione al materiale da lavorare. L'operazione di rettifica è aggiuntiva ad un'operazione preliminare di sgrossatura, in quanto la quantità di materiale asportato è minima la fine di ottenere una buona finitura superficiale.

In generale ciò implicherebbe l'utilizzo di una seconda macchina, oltre al tornio per la sgrossatura, e di conseguenza un consistente aumento dei tempi ciclo; inoltre il riposizionamento del pezzo potrebbe generare errori di eccentricità. In definitiva, quindi la produttività risentirebbe dell'introduzione della nuova operazione.

In realtà, per lo sviluppo del nuovo processo produttivo la strategia aziendale ha previsto l'acquisto di un'unica macchina che consente di effettuare sia le operazioni di tornitura, sia quelle di rettifica. Così facendo, senza rinunciare alla precisione garantita dalla rettifica, è minimizzato il tempo ciclo e, poiché le lavorazioni avvengono sulla stessa macchina, non è necessario il riposizionamento del pezzo.

La macchina in questione è la EMAG VTC 315 (Figura 8.1), e dispone di 3 canali di controllo:

- Uno per il nastro trasportatore e la pinza, atti al carico e lo scarico dei pezzi, che avviene automaticamente.
- La parte sinistra all'interno della macchina che è attrezzata con torretta portautensili, per le lavorazioni di tornitura e fresatura.
- La parte destra della macchina presenta una mola a disco intercambiabile come tipologia e dimensioni, per le operazioni di rettifica.

Il pezzo è posizionato verticalmente tra mandrino e contropunta e prima di iniziare la lavorazione di un particolare si effettua la tastatura del piano $z = 0$ di riferimento sul pezzo, e la calibrazione della pinza con tastatori di diametri.

La presenza di questo accessorio consente il controllo direttamente in macchina dei diametri lavorati; sulla base di questa informazione, l'unità di governo, in relazione

alle dimensioni richieste per il pezzo, è in grado di elaborare una correzione automatica sulla lavorazione per il pezzo successivo.

Sono state analizzate, anche per la qualifica del nuovo processo, le tre caratteristiche dimensionali considerate nel capitolo 6.

8.2 Prima caratteristica analizzata: ϕ 30

La prima caratteristica (Figura 6.4) è quella con dimensione nominale pari a 30 *mm*. Per il diametro in questione la tornitura di finitura è stata sostituita con una tornitura di grossatura più una rettifica finale.

La tolleranza di accoppiamento foro-albero richiesta è k6.

$$\phi 30 \text{ k6} \rightarrow \phi 30 \begin{matrix} +0,015 \\ +0,002 \end{matrix}$$

I limiti di tolleranza superiore UTL e inferiore LTL entro cui la misura è accettata, come detto, risultano:

$$UTL = 30,015 \text{ mm}$$

$$LTL = 30,002 \text{ mm}$$

Ed il valore centrale LC

$$LC = \frac{UTL + LTL}{2} = 30,0085 \text{ mm}$$

La tolleranza simmetrica laterale richiesta a partire dal valore centrale è dunque $\pm 0,0065 \text{ mm}$.

Per la valutazione delle prestazioni del processo rispetto a questa caratteristica è stato utilizzato un campione di pezzi con numerosità pari a 30; infatti, le tempistiche e l'organizzazione della produzione non hanno consentito di avere un maggiore numero di pezzi prodotti da misurare. Dalle misurazioni dei pezzi risultano i seguenti parametri di distribuzione:

- *Media:*

$$\bar{X} = 30,0087 \text{ mm}$$

- *Deviazione standard:*

$$\sigma = 0,0012 \text{ mm}$$

Carta X

Anche in questo caso, naturalmente, è stata effettuato uno studio con carta X a valori singoli (Paragrafo 3.1).

Si è proceduto con la definizione dei limiti di controllo, partendo dal calcolo del



Figura 8.1: Macchina Emag VTC 315 utilizzata per il nuovo processo produttivo

range mobile per ogni valore secondo la formula 3.1 e, conseguentemente, del *range medio mobile*, come media di questi ultimi.

$$\overline{MR} = 0,0011 \text{ mm}$$

Quindi i limiti di controllo superiore (UCL) e inferiore (LCL) risultano:

$$UCL = \bar{X} + 2,66\overline{MR} = 30,012 \text{ mm}$$

$$LCL = \bar{X} - 2,66\overline{MR} = 30,006 \text{ mm}$$

Riportando su grafico le rette che definiscono i vari limiti e i diametri misurati su ciascun pezzo, si ottiene il plot in figura 8.2.

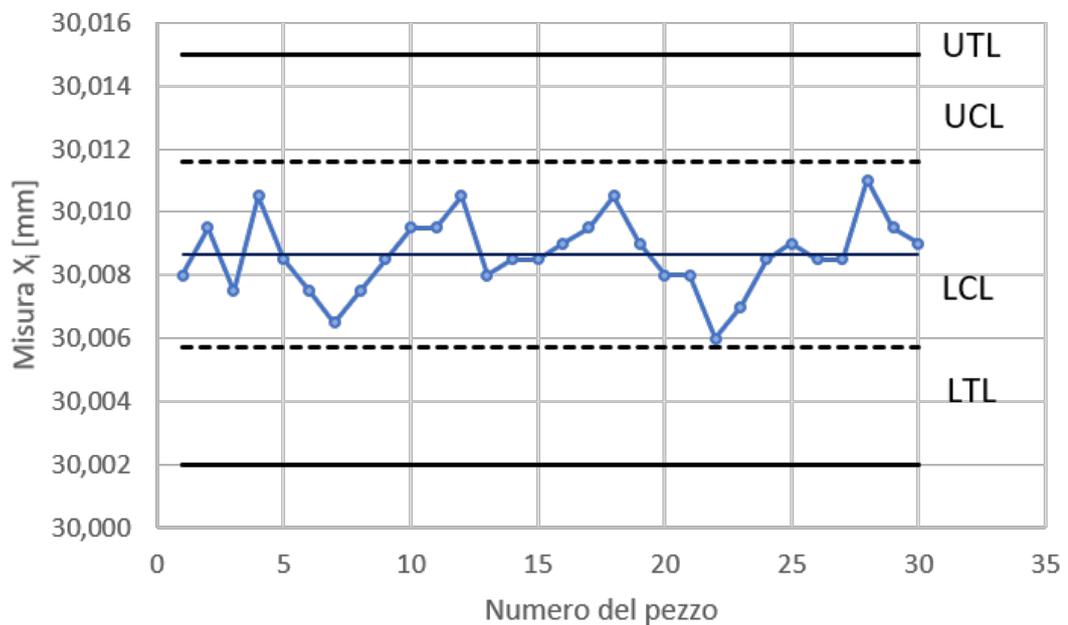


Figura 8.2: Carta di controllo relativa al diametro ϕ 30 lavorato con il nuovo processo

Tutti i valori rientrano entro i limiti di controllo e, conseguentemente, anche entro i limiti di tolleranza. Complice di questo è certamente l'autocontrollo di quote che la macchina effettua alla fine di ogni pezzo per apportare eventuali correzioni in maniera adattativa.

Il processo risulta in controllo per questa caratteristica e non si rilevano particolari andamenti riconducibili a cause speciali.

Istogramma dati e grafico di probabilità normale

Per confrontare la distribuzione dei dati in relazione ad una curva a campana, i dati sono stati suddivisi in classi e, per ciascuna classe, è stata calcolata la densità

di frequenza.

Utilizzando la formula 3.9, avendo a disposizione un numero di dati pari a 30, essi sono stati raggruppati in 6 classi.

$$K = \sqrt{N + 1} \approx 6$$

Si ottiene l'istogramma in figura 8.3.

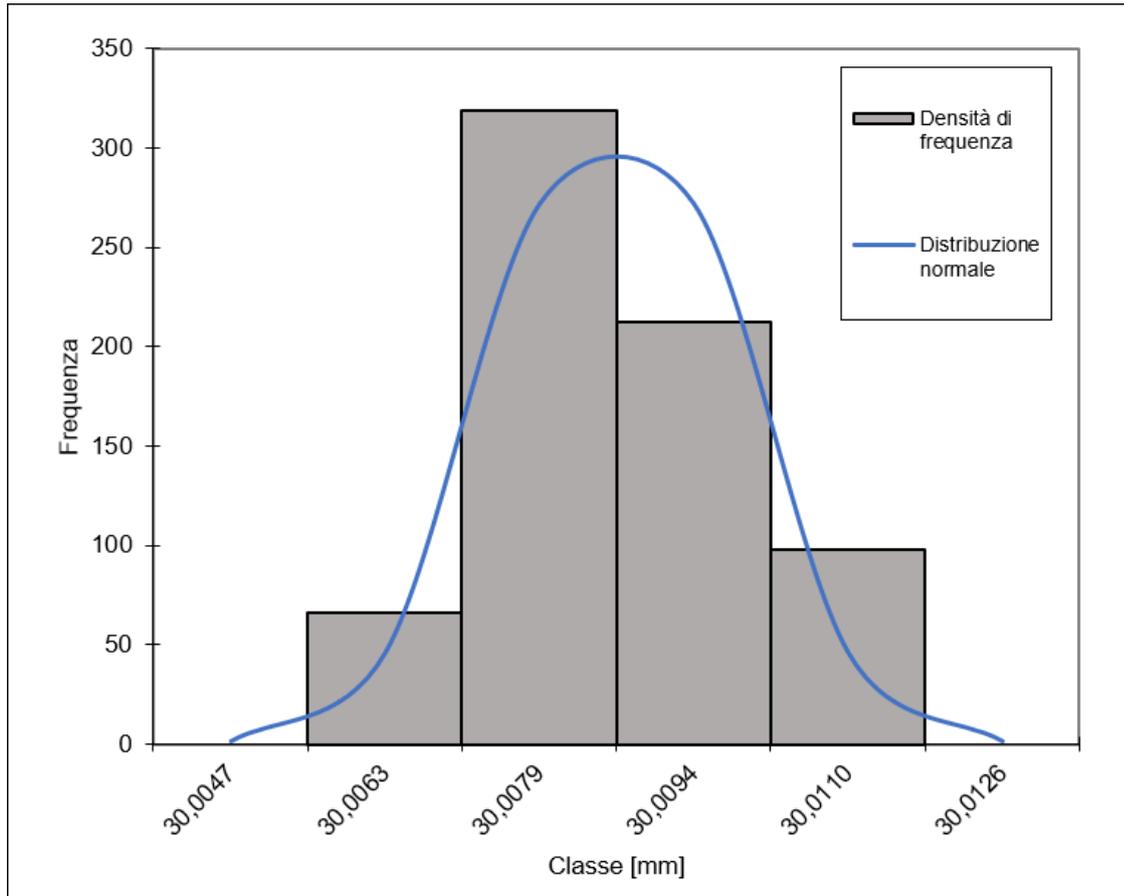


Figura 8.3: Istogramma relativo al diametro ϕ 30 lavorato con il nuovo processo

Confrontando il grafico relativo alla densità di frequenza dei dati in ciascuna classe con la curva di distribuzione normale, non si rileva una forma particolarmente diversa dalla campana di riferimento. I dati, dunque, risultano essere distribuiti casualmente intorno al valore centrale.

Bisogna comunque sottolineare che un numero di dati pari a 30 è il minimo per effettuare un qualsiasi tipo di studio statistico, motivo per cui l'analisi non è pronta per essere estesa effettivamente a tutta la famiglia di pezzi prodotti dalla macchina, ma resta circoscritta a quelli del campione misurato.

Per quanto riguarda in grafico di probabilità normale, mostrato in figura 8.4, anch'esso rileva quanto già emerso: sebbene con variabilità non trascurabile, i dati non presentano un andamento particolare rispetto alla curva cumulativa normale linearizzata, se si considera l'intervallo tra due rette parallele alla retta normale distanti tra loro in relazione alla variabilità delle misure.

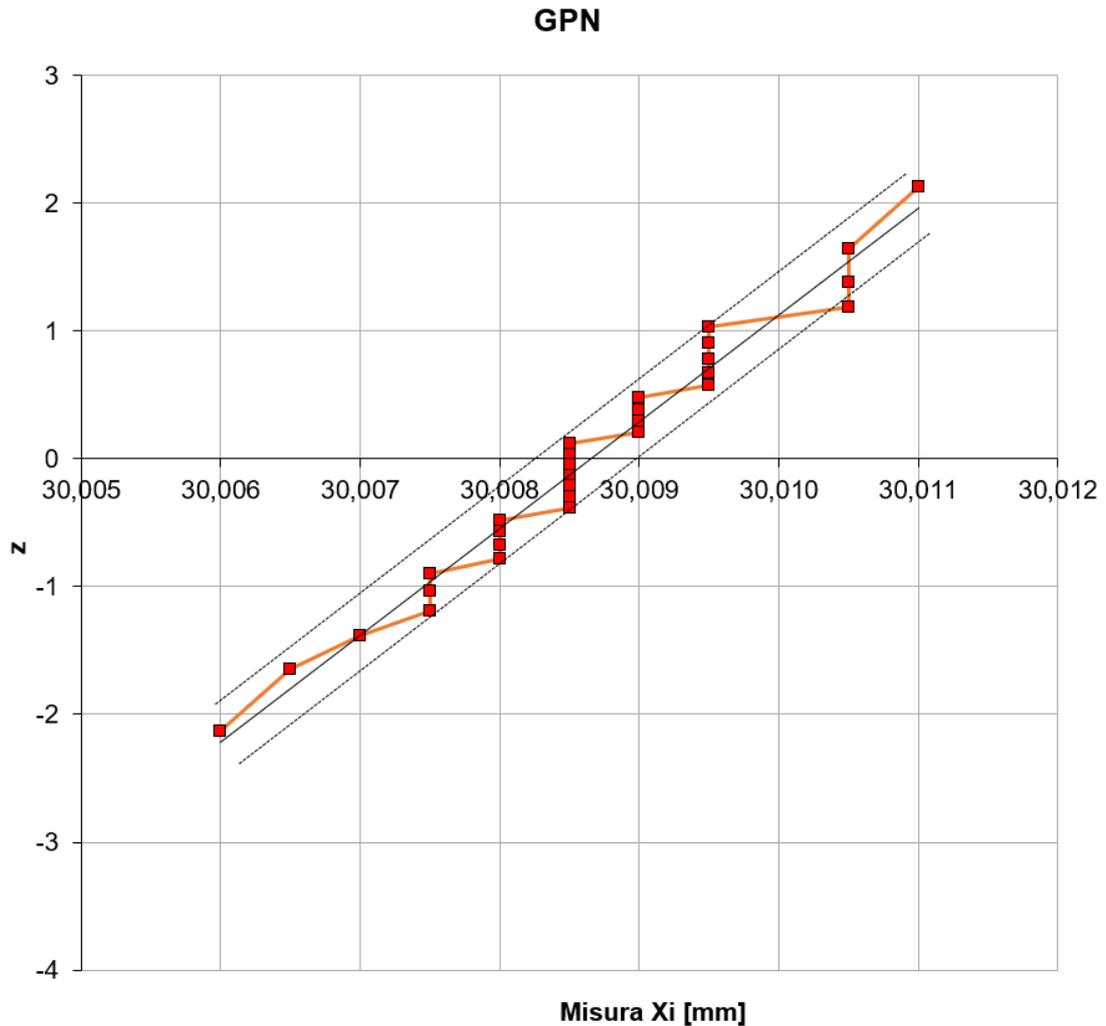


Figura 8.4: Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 30 lavorato con il nuovo processo

Capacità di processo

Si valuta adesso il comportamento del processo in relazione alle specifiche tecniche richieste per la caratteristica del particolare analizzata.

L'intervallo di tolleranza T_{PRE} richiesto a disegno è

$$T_{PRE} = UTL - LTL = 0,013 \text{ mm}$$

Tale valore va confrontato con la *Tolleranza naturale del sistema*, che può essere stimata pari all'ampiezza di dispersione dell'intervallo entro cui sono compresi il 99,73% delle misurazioni rilevate. A partire, quindi, dalla deviazione standard del campione di dati misurati e considerando un intervallo di $\pm 3\sigma$, si calcola

$$Toll_{NAT} = 6\sigma = 0,0070 \text{ mm}$$

Si può procedere al calcolo della potenzialità di processo C_p , rapportando le due ampiezze di tolleranza.

$$C_p = \frac{T_{pre}}{Toll_{nat}} = 1,87$$

Un valore di questo genere certifica che la tolleranza prescritta è molto maggiore (quasi del 90%) della tolleranza naturale, il che rende il processo capace ed implica il 100% dei dati rientrano all'interno dei limiti di tolleranza, come già mostrato con la carta X.

Infine, si vuole valutare l'indice di centratura del processo C_{pk} , che quantifica quanto le misure si distacchino dal valore centrale di misura richiesto.

In riferimento alla 3.8

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}\right\} = \min\{1,83; 1,92\} = 1,83$$

Un valore di tale indice maggiore di uno è segno che il processo è centrato sul valore nominale, oltre ad avere una dispersione molto bassa rispetto alla tolleranza prescritta, in relazione al valore ricavato per l'indice di *Capacità di dispersione*.

8.3 Seconda caratteristica analizzata: ϕ 31

La seconda caratteristica analizzata, su cui le lavorazioni di finitura previste dal nuovo processo sono effettuate tramite rettifica è il diametro esterno di una delle due parti scanalate dell'albero (cerchio rosso in figura 6.8).

Tale caratteristica ha una dimensione nominale pari a 31 mm con scostamenti superiori e inferiori ammissibili entrambi positivi, pari rispettivamente a 18 e 2 μm .

I limiti di tolleranza superiore UTL e inferiore LTL entro cui la misura è accettata risultano dunque:

$$UTL = 31,018 \text{ mm}$$

$$LTL = 31,002 \text{ mm}$$

Il valore centrale rispetto ai limiti di tolleranza, utile per il calcolo degli indici di capacità è LC.

$$LC = \frac{UTL + LTL}{2} = 31,010 \text{ mm}$$

E la tolleranza simmetrica laterale richiesta a partire dal valore centrale è dunque $\pm 0,008 \text{ mm}$.

Anche per la valutazione delle prestazioni del processo rispetto a questa caratteristica è stato utilizzato un campione di pezzi con numerosità pari a 30, per le stesse motivazioni esplicitate in precedenza.

Dalle misurazioni del campione di pezzi risultano i seguenti parametri di distribuzione:

- *Media:*

$$\bar{X} = 31,0108 \text{ mm}$$

- *Deviazione standard:*

$$\sigma = 0,0015 \text{ mm}$$

Carta X

Al fine della stesura della carta X, si definiscono i limiti di controllo superiore UCL e inferiore LCL.

Il *range medio mobile*, media dei *range mobili* di ciascuna misura e calcolati secondo la formula 3.1, risulta:

$$\overline{MR} = 0,0013 \text{ mm}$$

Quindi i limiti di controllo:

$$UCL = \bar{X} + 2,66\overline{MR} = 31,014 \text{ mm}$$

$$LCL = \bar{X} - 2,66\overline{MR} = 31,007 \text{ mm}$$

Riportando su grafico le rette che definiscono i vari limiti e i diametri misurati su ciascun pezzo, si ottiene il plot in figura 8.5.

Anche in questo caso il processo risulta completamente in controllo poichè tutti i punti rientrano entro i limiti di controllo. L'andamento delle misure non presenta alcuna peculiarità in quanto i dati sono distribuiti casualmente sopra e sotto il valore medio, con una variabilità non elevata.

Istogramma dati e grafico di probabilità normale

I dati sono stati raggruppati in classi e, per ciascuna classe, è stata calcolata la densità di frequenza in modo tale da poter costruire un istogramma la cui forma sia confrontabile con una curva a campana di distribuzione normale.

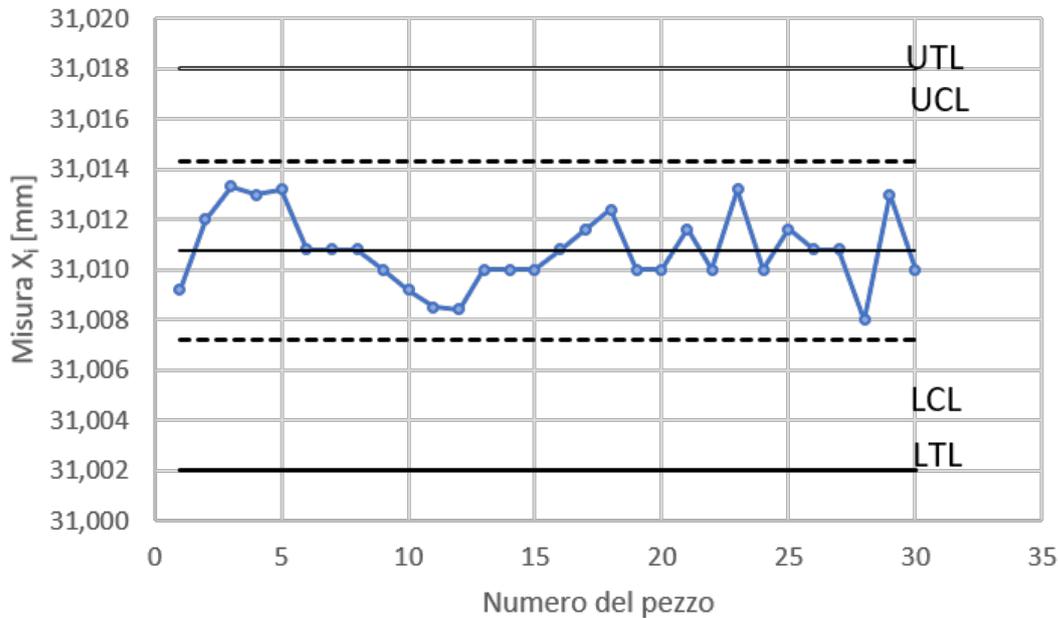


Figura 8.5: Carta di controllo relativa al diametro $\phi 31$ lavorata con il nuovo processo

Con una numerosità del campione pari a 30, in riferimento alla 3.9, i dati sono stati raggruppati in 6 classi.

$$K = \sqrt{N + 1} \simeq 6$$

Si ottiene l'istogramma in figura 8.6.

In questo caso si rileva nuovamente una distribuzione normale, perfettamente simmetrica.

La tipologia di distribuzione è confermata dal grafico di probabilità normale costruito sui dati prelevati, mostrato in figura 8.7.

Capacità di processo

Per la caratteristica in questione, l'intervallo di tolleranza T_{PRE} richiesto a disegno è maggiore rispetto alla caratteristica precedente e pari a

$$T_{PRE} = UTL - LTL = 0,016 \text{ mm}$$

Tale valore va confrontato con la *Tolleranza naturale del sistema*, che, come detto, può essere stimata pari all'ampiezza di dispersione dell'intervallo entro cui sono compresi il 99,73% delle misurazioni rilevate. A partire, quindi, dalla deviazione standard del campione di dati misurati e considerando un intervallo di $\pm 3\sigma$, si

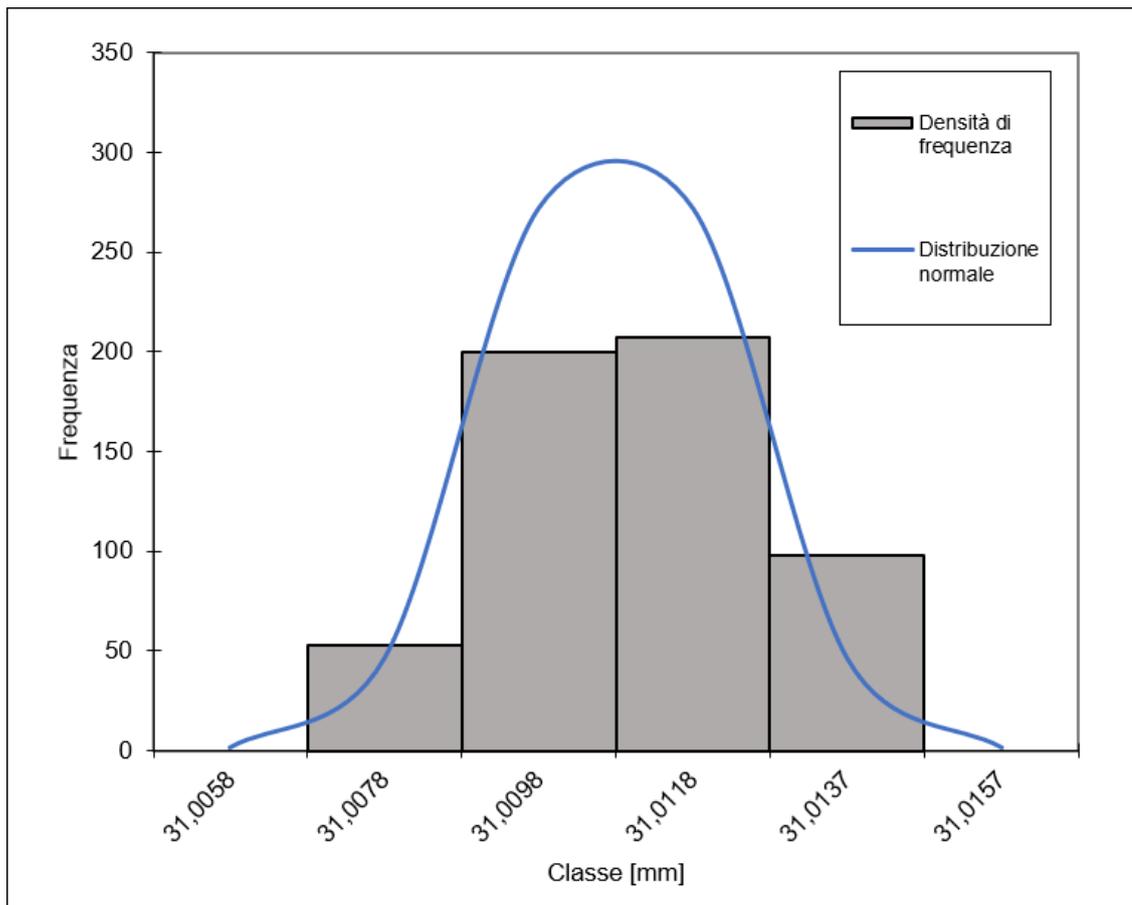


Figura 8.6: Istogramma relativo al diametro ϕ 31 lavorato con il nuovo processo

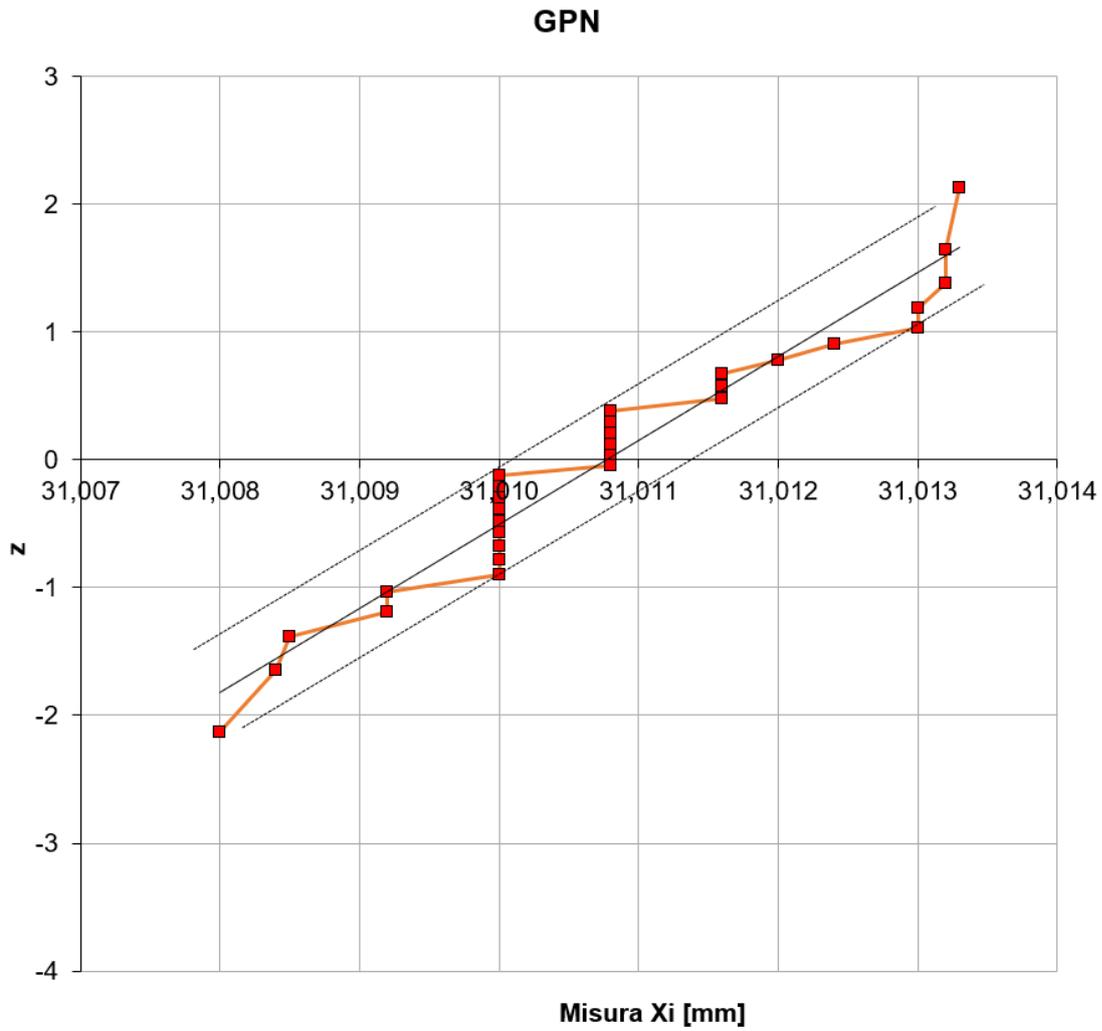


Figura 8.7: Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 31 lavorato con il nuovo processo

calcola

$$Toll_{NAT} = 6\sigma = 0,0088 \text{ mm}$$

Si può procedere al calcolo della potenzialità di processo C_p , rapportando le due ampiezze di tolleranza.

$$C_p = \frac{T_{pre}}{Toll_{nat}} = 1,84$$

Anche per questa caratteristica, il processo presenta una variabilità tale per cui l'indice di capacità risulta superiore all'unità.

Ciò implica che il processo può essere definito, anche in questo caso, capace.

Si calcola l'indice di centratura del processo C_{pk} , per valutare il grado di centratura del processo.

In riferimento alla 3.8

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}\right\} = \min\{1,66; 2,01\} = 1,66$$

È evidente che anche per questa caratteristica il processo è centrato sul valore nominale e presenta una dispersione molto minore della tolleranza richiesta.

8.4 Terza caratteristica analizzata: ϕ 35

La terza e ultima caratteristica analizzata è il diametro maggiore tra quelli analizzati, su cui si è passati alla lavorazione di rettifica (cerchio rosso in figura 6.12).

Tale caratteristica ha una dimensione nominale pari a 35 mm ed è richiesta una tolleranza di accoppiamento foro-albero k6, che corrisponde a scostamenti superiori e inferiori entrambi positivi, pari rispettivamente a 18 e 2 μm .

$$\phi 35 \text{ k6} \rightarrow \phi 35 \begin{matrix} +0,018 \\ +0,002 \end{matrix}$$

A partire da queste considerazioni, i limiti di tolleranza superiore UTL e inferiore LTL entro cui la misura è accettata risultano:

$$UTL = 35,018 \text{ mm}$$

$$LTL = 35,002 \text{ mm}$$

Il valore centrale rispetto ai limiti di tolleranza, utile per il calcolo degli indici di capacità è LC.

$$LC = \frac{UTL + LTL}{2} = 35,010 \text{ mm}$$

E la tolleranza simmetrica laterale richiesta a partire dal valore centrale è dunque $\pm 0,008 \text{ mm}$.

Anche in questo caso, per la valutazione delle prestazioni del processo rispetto a questa caratteristica è stato utilizzato un campione di pezzi con numerosità pari a 30. Dalle misurazioni dei pezzi risultano i seguenti parametri di distribuzione:

- *Media:*

$$\bar{X} = 35,0102 \text{ mm}$$

- *Deviazione standard:*

$$\sigma = 0,0015 \text{ mm}$$

Carta X

Anche in relazione a questa caratteristica è stato effettuato uno studio con carta X a valori singoli per valutare lo stato di controllo del processo.

Per ogni valore, dunque, è stato calcolato il *range mobile*, secondo la formula 3.1 e, conseguentemente, il *range medio mobile*, come media di questi ultimi, al fine di valutare i limiti di controllo.

$$\overline{MR} = 0,0014 \text{ mm}$$

Quindi i limiti di controllo superiore (UCL) e inferiore (LCL) risultano:

$$UCL = \bar{X} + 2,66\overline{MR} = 35,014 \text{ mm}$$

$$LCL = \bar{X} - 2,66\overline{MR} = 35,006 \text{ mm}$$

Riportando su grafico le rette che definiscono i vari limiti e i diametri misurati su ciascun pezzo, si ottiene il plot in figura 8.8.

Si rileva un andamento crescente all'inizio, segno che la macchina mano a mano va autocalibrandosi, dopodiché si ha un essestamento nell'intorno simmetrico del valore medio.

In ogni caso, nessun valore eccede i limiti di controllo. Il processo, dunque, è capace anche per quanto riguarda questa caratteristica.

Istogramma dati e grafico di probabilità normale

Con una numerosità del campione pari a 30, in riferimento alla 3.9, i dati sono stati raggruppati in 6 classi.

$$K = \sqrt{N + 1} \cong 6$$

Si ottiene l'istogramma in figura 8.9.

L'istogramma mostra che i dati si distribuiscono perlopiù con forma a campana con leggerissima asimmetria e picco spostato poiù a sinistra.

Tale tendenza non è evidenziata dal grafico di probabilità costruito sui dati prelevati. Infatti, come mostrato in figura 8.10, i dati presentano l'andamento classico per una curva normale.

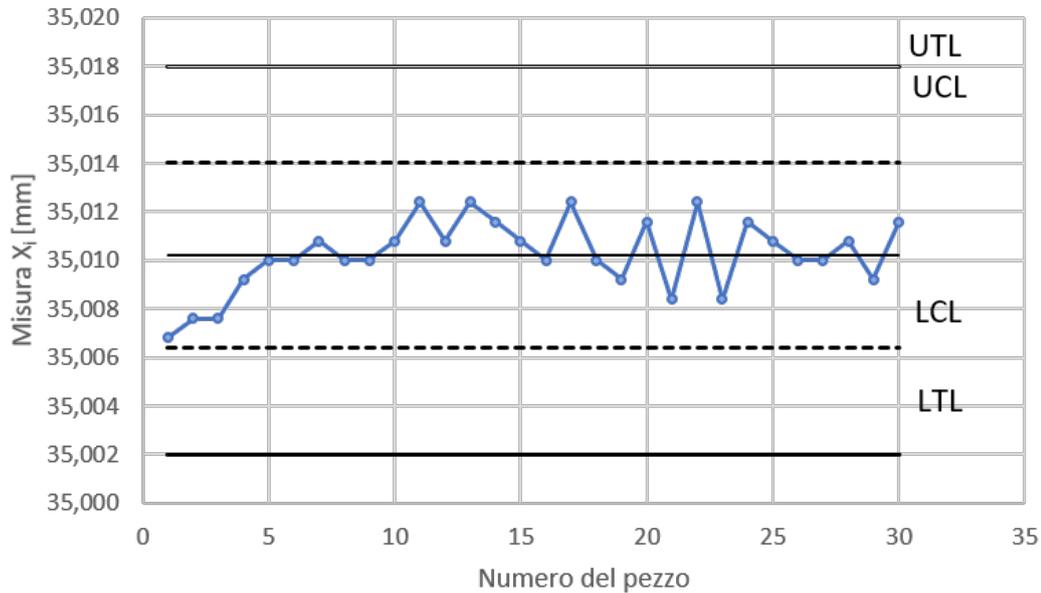


Figura 8.8: Carta di controllo relativa al diametro ϕ 35 lavorata con il nuovo processo

Capacità di processo

Per valutare il comportamento del processo in relazione alle specifiche tecniche richieste per la caratteristica del particolare analizzata, si valuta la capacità di processo.

L'intervallo di tolleranza T_{PRE} richiesto a disegno è

$$T_{PRE} = UTL - LTL = 0,016 \text{ mm}$$

Tale valore va confrontato con la *Tolleranza naturale del sistema*, che può essere stimata pari all'ampiezza di dispersione dell'intervallo entro cui sono compresi il 99,73% delle misurazioni rilevate. A partire, quindi, dalla deviazione standard del campione di dati misurati e considerando un intervallo di $\pm 3\sigma$, si calcola

$$Toll_{NAT} = 6\sigma = 0,0089 \text{ mm}$$

Si può procedere al calcolo della potenzialità di processo C_p , rapportando le due ampiezze di tolleranza.

$$C_p = \frac{T_{pre}}{Toll_{nat}} = 1,82$$

Un valore di C_p superiore all'unità identifica un processo capace, in cui più del 99,73% (intervallo 6σ) dei pezzi risulta conforme.

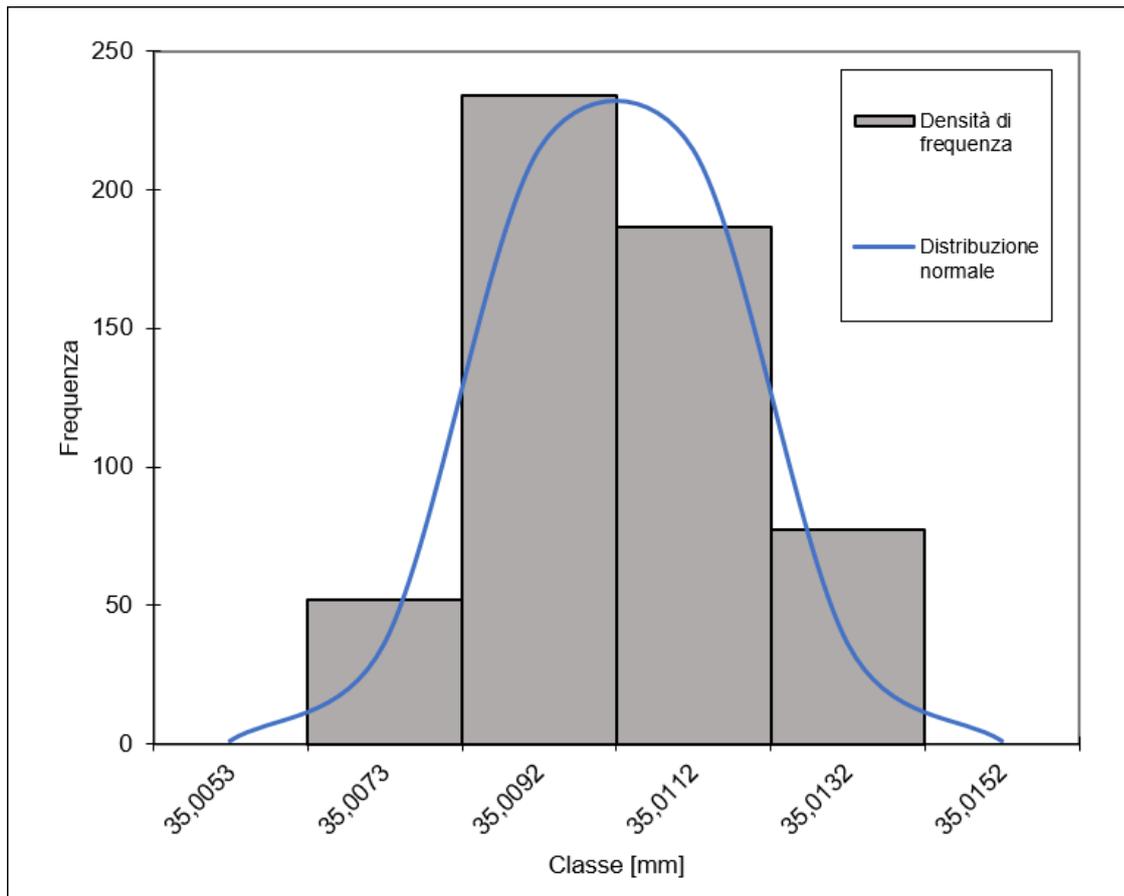


Figura 8.9: Istogramma relativo al diametro ϕ 35 lavorato con il nuovo processo

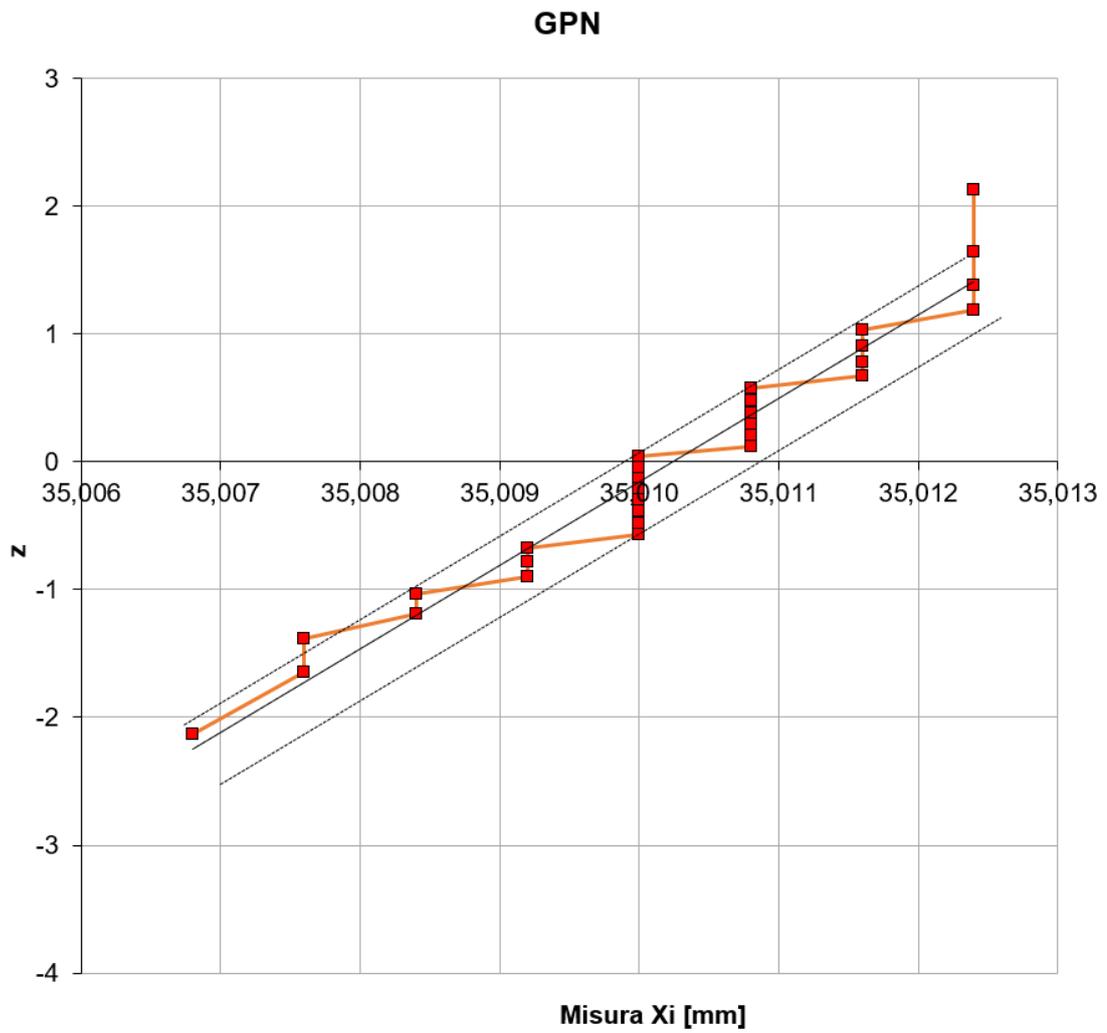


Figura 8.10: Grafico di probabilità normale relativo al diametro ϕ 35 lavorato con il nuovo processo

Per concludere, l'indice di centratura del processo C_{pk} , in riferimento alla 3.8

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}\right\} = \min\{1,77; 1,88\} = 1,77$$

Il processo risulta centrato.

8.5 Tabella riassuntiva per il nuovo processo produttivo

In tabella 8.1 sono riassunti i risultati principali ottenuti dallo studio del processo mediante l'analisi delle tre caratteristiche descritte. Risulta per tutte e tre le ca-

%R&R	9,56%		
	Prima caratteristica	Seconda caratteristica	Terza caratteristica
Carta X	Processo in controllo	Processo in controllo	Processo in controllo
Distribuzione	Normale	Normale	Normale asimmetrica
C_p	1,87	1,84	1,82
C_{pk}	1,83	1,66	1,77

Tabella 8.1: Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per il nuovo processo

ratteristiche che il processo è in controllo; vale a dire che per tutti i casi la carta di controllo non presenta alcun punto oltre i limiti di controllo superiori o inferiori.

Il processo risulta adeguato anche in termini di conformità del prodotto. Per tutte e tre le caratteristiche entrambi gli indici di capacità di dispersione e centratura risultano superiori all'unità e superiori anche al valore obiettivo 1,33; si ha, dunque, una percentuale di pezzi rientranti nelle specifiche maggiore del 99,94%.

Pertanto si può ragionevolmente affermare che, nelle condizioni di lavoro normali della macchina, nelle quali sono stati prodotti i 30 pezzi che compongono il campione analizzato, essa produce potenzialmente un numero di scarti di produzione nullo.

Capitolo 9

Analisi tempi ciclo

L'obiettivo del processo analitico di studio dei tempi ciclo è la determinazione del tempo necessario ad un dato lavoro, da parte di un operaio di media abilità, che lavori con un impegno medio, in condizioni normali di lavoro.

Questi presupposti sono necessari al fine di vincolare strettamente il tempo ricavato all'operazione e non all'operatore, poichè egli rappresenta un soggetto variabile.

Per ricavare il tempo legato ad un processo, esso viene suddiviso in micro fasi, dette *Elementi di operazione*, compiute dall'operaio, dalla macchina o da entrambi. La sequenza delle operazioni ed il modo in cui svolgere costituiscono uno standard e sono appositamente studiate per ottenere la massima produttività e per garantire il confort dell'operatore.

Nel complesso, ogni operazione può essere suddivisa in due fasi:

- Fase di preparazione, è quella parte di lavoro svolta per mettere la macchina in condizioni tali da poter avviare la lavorazione e comprende gli elementi di operazione eseguiti una sola volta per ogni serie di pezzi lavorati. Di tale fase fanno parte gli elementi di operazione di **Macchina ferma** eseguiti manualmente dall'operaio, come ad esempio prelievo e deposito utensili, montaggio e smontaggio dell'attrezzatura, regolazione della macchina, ecc.
- Fase di lavorazione, eseguita con carattere periodico per ogni pezzo prodotto, riguarda le lavorazioni sul pezzo stabilite dal ciclo di lavorazione e le operazioni strettamente legate ad esse. Gli elementi di operazioni di queste fasi sono le operazioni di:
 - **Macchina ferma**, eseguiti dall'operaio o dalla macchina, con carattere continuativo a differenza di quelle svolte nella fase di lavorazioni. Tra queste vi sono il carisco e scarico del pezzo, il montaggio, la calibratura del pezzo, ecc.
 - **Tempo macchina**, sono elementi di operazione eseguiti esclusivamente dalla macchina in automatico.

- **Macchina lavora**, rappresentano sostanzialmente tutti quegli elementi di macchina ferma che, però, vengono eseguiti mentre la macchina sta lavorando in autonomia, ossia durante il tempo macchina. Sono dunque operazioni in tempo mascherato.

La somma di tutte le operazioni di macchina lavora (ML) deve essere minore del tempo macchina (TM), altrimenti diverrebbero appartenenti al gruppo di operazioni a macchina ferma (MF). L'assegnazione dei tempi a ciascuna operazione elementare viene effettuata attraverso rilevazioni cronometriche, dalle quali viene estrapolato il valore di tempo con maggiore frequenza di rilievo ed attribuito alla micro fase. Tale tempo, se riferito ad azioni che prevedono l'intervento umano, viene normalizzato sulla base di un indice di velocità attribuito all'operatore in relazione alla sua abilità, al suo impegno ed alle condizioni di lavoro, quanto più oggettivamente sia possibile. Il valore ottenuto è considerato come il tempo minimo necessario all'operazione, dunque viene maggiorato di $1/3$, poichè si assume che la velocità "normale" di un operatore sia pari al 75% della velocità massima. Infine è inserita un'ulteriore maggiorazione del 10% (Fattore di riposo) per le sole operazioni svolte dall'uomo, al fine di considerare che il rendimento dell'operatore per questioni fisiologiche è variabile all'interno della giornata e richiede del tempo extra per eventuali bisogni.

Il tempo ciclo è definito come il tempo minimo teorico in cui può essere eseguita un'operazione. A partire da queste considerazioni, si può calcolare il tempo ciclo (TC) come

$$TC = \frac{3}{4}MF + TM \quad (9.1)$$

Non è considerato il tempo per gli elementi (ML) di operazioni svolte mentre la macchina lavora, perchè, naturalmente, sono effettuate in contemporanea alle operazioni di tempo macchina. Inoltre, essendo il tempo ciclo per definizione il tempo minimo richiesto, la quota parte influenzata dall'operatore deve essere scalata del 25% (ossia di $3/4$) per riportarsi in condizioni di velocità massima.

Infine, volendo calcolare il periodo di lavoro vero e proprio dell'operatore durante un'operazione, si definisce il tempo attivo (TA), secondo la 9.2.

$$TA = MF + ML \quad (9.2)$$

9.1 Processo originario

Il processo originario, descritto nel capitolo 6, prevedeva nella porzione di interesse tre fasi:

1. Operazione di calibratura
Tornitura di cinque diametri dell'albero, di cui due scanalati e la finitura

delle facciate dei rasamenti dell'albero. Oltre la lavorazione vera e propria, l'operazione prevede tutti i controlli con calibro a forcilla con frequenza pari ad uno, il relativo azzeramento dello strumento ogni dieci pezzi ed un controllo a campione ogni 30 pezzi con calibro ottico per il particolare completo.

Per questa operazione di lavorazione e controllo si rilevano i tempi riportati in tabella 9.1.

MF_1	0,83 min	50 s
ML_1	2,29 min	137 s
TM_1	3,5 min	210 s

Tabella 9.1: Tempi normali per l'operazione di calibratura del processo originario

Quindi, dalla 9.1, il tempo ciclo per l'operazione 1 risulta TC_1

$$TC_1 = \frac{3}{4}MF_1 + TM_1 = 4,12 \text{ min} \quad (9.3)$$

2. Rettifica diametro sottotesta

In riferimento alla figura 6.2, si tratta del diametro verde centrale, rettificato su una macchina rettificatrice. Di conseguenza è previsto un cambio macchina tra un'operazione e l'altra.

Anche in questo caso, oltre la lavorazione in sè, è previsto un controllo al 100% del diametro con forcilla e comparatore, azzerato ogni 10 pezzi e un controllo mediante calibro ottico di cilindricità e circolarità del diametro lavorato, con frequenza pari a 30 pezzi.

MF_2	0,83 min	50 s
ML_2	1,14 min	68 s
TM_2	5,5 min	330 s

Tabella 9.2: Tempi normali per la prima operazione di rettifica del processo originario

Il tempo ciclo per l'operazione 2 risulta TC_2

$$TC_2 = \frac{3}{4}MF_2 + TM_2 = 6,31 \text{ min} \quad (9.4)$$

3. Rettifica diametro all'estremità

In questo caso, l'operazione avviene sulla medesima macchina dell'operazione precedente; ne consegue un tempo di preparazione macchina (MF) minore. I tempi, inclusivi dei tempi di controllo del pezzo simili al caso precedente, sono riportati in tabella 9.3.

MF_3	0,78 min	46,8 s
ML_3	0,69 min	41,4 s
TM_3	1,7 min	102 s

Tabella 9.3: Tempi normali per la seconda operazione di rettifica del processo originario

Per quest'ultima operazione, il tempo ciclo TC_3 è pari a

$$TC_3 = \frac{3}{4}MF_3 + TM_3 = 2,34 \text{ min} \quad (9.5)$$

Sommando i tempi per le tre operazioni si ottengono i tempi per gli elementi dell'operazione a macchina ferma, a macchina lavora ed il tempo macchina in tabella 9.4. A partire da questi valori si ottiene un parametro di tempo ciclo TC_{OLD} da

MF_{tot}	2,44 min	146 s
ML_{tot}	4,12 min	247 s
TM_{tot}	10,7 min	642 s

Tabella 9.4: Tempi normali per l'insieme delle tre operazioni in linea

comparare il nuovo processo, ottenibile anche semplicemente dalla somma dei tre tempi ciclo delle singole operazioni.

$$TC_{OLD} = TC_1 + TC_2 + TC_3 = 12,7 \text{ min} \quad (9.6)$$

In figura 9.1 sono mostrati i contributi di tempo di macchina ferma, macchina lavora e tempo macchina. La produttività è pari a circa 5 pezzi/ora.

Il tempo attivo dell'operatore, frazione del tempo ciclo totale, è pari a

$$TA_{OLD} = \sum_{i=1}^3 (MF_i + ML_i) = 6,6 \text{ min} \quad (9.7)$$

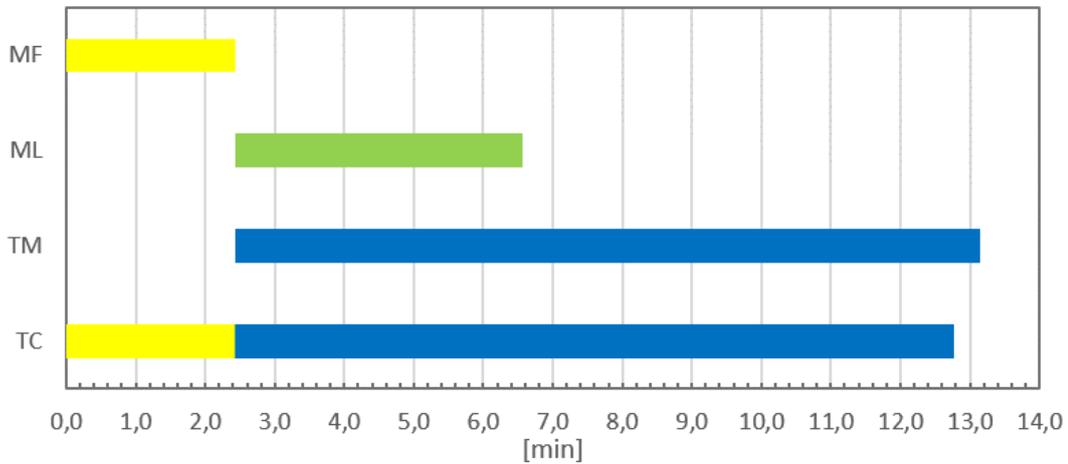


Figura 9.1: Tempo ciclo relativo al processo originario

mentre il tempo impiegato per il controllo dimensionale e di forma T_{misura} del pezzo è ottenuto sommando tutti i tempi dei controlli relativi alle operazioni, attribuendo al singolo pezzo la quota parte di tempo impiegata per il controllo a campione.

$$T_{misura,OLD} = \sum_{i=1}^3 (T_{misura,i}) = 2,54 \text{ min} \quad (9.8)$$

9.2 Nuovo processo

Per quanto riguarda il nuovo processo, le operazioni avvengono tutte e tre in un'unica macchina l'una dopo l'altra. Ciò implica che non vi sono tempi di riattrezzaggio macchina tra le varie fasi, con una consistente diminuzione del tempo di macchina ferma.

A diminuire notevolmente questo contributo vi è anche l'assenza della fase di carico e scarico. Per meglio dire, tale operazione da parte dell'addetto consiste nel riempire e svuotare i pallet posti sul nastro di carico della macchina e questo può certamente avvenire in fase di lavorazione della macchina, come operazione mascherata.

Inoltre, poiché l'operazione è unica, il pezzo viene controllato soltanto alla fine delle lavorazioni e viene controllato a campione mediante il sofisticato sistema di misura descritto nel capitolo 7. Dall'unità di analisi di tempi e metodi dell'azienda, a seguito dell'analisi di capacità macchina svolta (Cap. 8), è stata stabilita una frequenza di misura per l'intero pezzo pari a 10. Dunque, ogni dieci pezzi vengono controllate con sistema automatico tutte le caratteristiche dimensionali e di forma previste anche dal vecchio ciclo di controllo.

Per questioni di sicurezza e verifica, in questa fase di introduttiva, ogni 30 pezzi si effettua anche una misurazione manuale di tutti i diametri con sistema forcilla

e comparatore, in modo tale da avere un riscontro sulle misurazioni fornite dalla macchina di misura EXAMECA.

Il tempo impiegato per il controllo dimensionale e di forma $T_{misura,NEW}$ del pezzo per il nuovo processo è, dunque, diminuito.

$$T_{misura,NEW} = T_{misura,i} = 0,74 \text{ min} \quad (9.9)$$

Tutte queste considerazioni giustificano i nuovi valori ricavati per il nuovo processo e riportati in tabella 9.5. Il tempo di macchina lavora è diminuito in relazione alla

MF	0 min	0 s
ML	$1,053 \text{ min}$	63 s
TM	$6,11 \text{ min}$	367 s

Tabella 9.5: Tempi normali per l'insieme delle operazioni del nuovo processo

diminuzione del tempo di controllo che è diventato poco più di un terzo del tempo originario di controllo per via della minore frequenza di controllo e per la maggiore celerità del sistema di misura. All'interno di questo tempo sono state inserite le operazioni di carico e scarico che prima rientravano nella classe di macchina ferma. Il tempo ciclo risulta pari al tempo macchina, essendo il tempo di macchina ferma nullo.

$$TC_{NEW} = TM = 6,11 \text{ min} \quad (9.10)$$

In figura 9.2 sono mostrati i contributi di tempo di macchina ferma, macchina lavora e tempo macchina.

Grazie alla presenza di una macchina capace ed automatica e grazie al sistema di misura affidabile e veloce, il tempo ciclo è praticamente stato dimezzato, di conseguenza la produttività è raddoppiata, per un totale di circa 10 pezzi ora.

Il tempo attivo dell'operatore è diminuito di oltre l'80%, il che implica una maggiore presenza di risorse di manodopera libera da poter collocare su altre linee di produzione.

$$TA_{NEW} = MF + ML = ML \cong 1 \text{ min} \quad (9.11)$$

In figura 9.3 è graficamente notevole la riduzione del tempo ciclo totale, all'interno del quale è incluso il tempo attivo dell'operatore che comprende le attività di misura e non. Si nota anche che nel nuovo processo il tempo attivo dell'operatore è dedicato ad attività di misura, che in realtà avvengono anch'esse in automatico, poiché l'intervento umano nella macchina tornio/rettificatrice è trascurabile.

In questa trattazione sono stati omessi per entrambe analisi di vecchio e nuovo processo i tempi di set up delle macchine. Tale scelta è dovuta al fatto che la

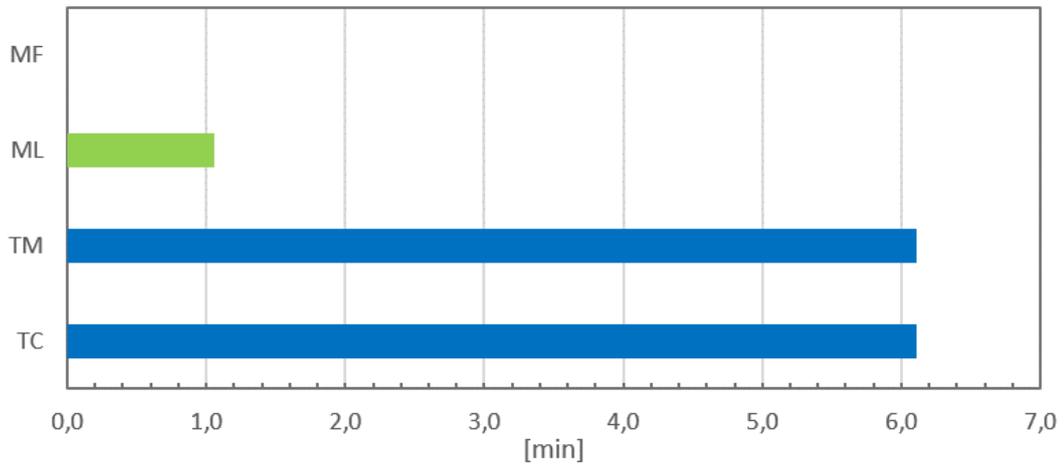


Figura 9.2: Tempo ciclo relativo al nuovo processo

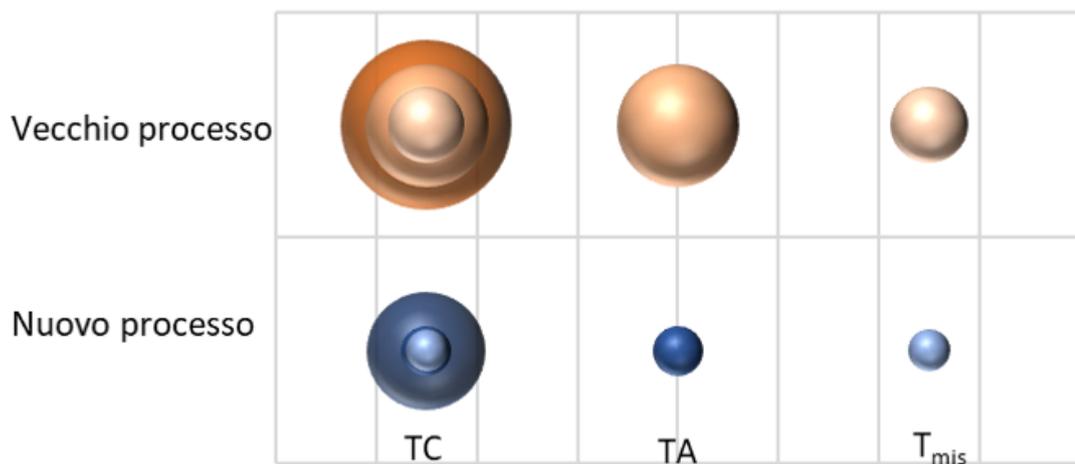


Figura 9.3: Confronto tempi ciclo

nuova macchina di produzione è recentemente stata installata e lo standard delle operazioni di set up deve ancora essere definito nello specifico. Di conseguenza i tempi rilevati in questo momento potrebbero non rispecchiare le reali condizioni di funzionamento del processo a regime.

Inoltre, dall'unità di Tempi e Metodi è stato stimato un tempo di set up per la nuova macchina elevato in relazione alla complessità della macchina stessa, ma quantomento comparabile con la somma tempi relativi alle due macchine utilizzate nel vecchio processo.

Capitolo 10

Efficienza di processo

Per la valutazione di un processo, di una linea o di un impianto in generale, limitarsi a qualificarlo in relazione al rispetto delle tolleranze o all'andamento delle misure dei pezzi in uscita risulta alquanto riduttivo. Ciò è dovuto al fatto che è necessario tenere in considerazione un'altra moltitudine di fattori che impattano sull'efficienza del processo.

L'efficienza di un processo, infatti, è un concetto globale che prende in considerazione non la capacità della singola macchina, nè soltanto l'accettabilità del prodotto in uscita, nè si limita al parametro di produttività; al contrario, la valutazione di efficienza deve tenere conto dell'unione tutti questi aspetti, con il giusto peso. La macchina ideale ha un rendimento del 100%, producendo solo pezzi accettabili, ossia nel rispetto delle tolleranze specifiche richieste, il più velocemente possibile e senza alcun tipo di fermata, che sia essa programmata o meno. Il grado di efficienza di un processo è ben riassunto dal fattore percentuale OEE (letteralmente *Overall Equipment Effectiveness: Efficienza Generale dell'Impianto*), che rappresenta il rendimento globale di una risorsa produttiva o di un insieme di risorse, siano esse umane o tecniche, durante il tempo nel quale queste sono disponibili a produrre.

L'OEE è considerato l'indicatore dinamico più esigente ed omnicomprensivo che esista, in quanto sconta tutte le tipologie di inefficienze che portano ad una minore produttività, riassumendo in sé tre diversi concetti molto importanti dal punto di vista del controllo di produzione:

- Disponibilità (*Availability*), è la percentuale dell'effettivo tempo di attività rispetto a quello disponibile;
- Efficienza (*Performance*), prende in considerazione la velocità con cui il processo lavora, rapportata alla velocità nominale di progetto;
- Qualità (*Quality*), è la percentuale di parti conformi rispetto al totale delle parti prodotte.

L'indice è calcolato su un intervallo di tempo definito, ad esempio un turno, una settimana o un mese.

Disponibilità L'indice di disponibilità indica quanto tempo la macchina ha effettivamente lavorato in rapporto al tempo in cui è stata disponibile.

Tale indice tiene conto delle macro fermate che avvengono durante il processo e possono essere di due tipi:

- Fermate programmate, riguardano tutta l'attività dello scheduling di manutenzione programmata periodica e, inoltre, di tutti i fermi che avvengono per operazioni di pulizia, ispezioni di vario tipo, lubrificazione, ecc.
- Fermate non programmate, che sostanzialmente possono essere riconducibili a tre fattori: i guasti macchina, che richiedono l'intervento della manutenzione non programmata; la mancanza di un'organizzazione efficiente riguardo il personale o lo spostamento del materiale; i tempi di set up della macchina, compresa l'attesa del benessere da parte del collaudo, l'attesa per il cambio attrezzatura, ecc.

La disponibilità potenziale teorica della macchina è legata alle ore totali di lavoro dello stabilimento, dunque considerando l'inattività domenicale, la disponibilità è di $22,5h/gg$ nei giorni infrasettimanali e di $12h/gg$ il sabato.

L'indice di diponibilità A è, dunque, calcolato come segue.

$$\%A = \frac{\text{Ore di lavoro}}{\text{Ore di Carico pianificate}} \cdot 100 \quad (10.1)$$

Le ore di lavoro effettive sono prelevate da una banca di dati aggiornata di volta in volta dall'operatore, il quale inserisce le informazioni dei tempi di produzione relative ad un processo, specificando tutti i fermi macchina e le relative motivazioni.

Le ore di carico pianificate, invece, sono ricavate sottraendo da tutte le ore lavorative le perdite di tempo schedulate dall'ente di pianificazione della produzione. Sono dunque tutte le ore di funzionamento generale della macchina o della linea.

Un indice di disponibilità pari al 100% implica che il processo è in esecuzione durante tutto il tempo di produzione previsto.

Performance Il parametro di efficienza o performance, racchiude tutte le perdite per velocità e per micro fermate che riguardano il processo analizzato.

Le perdite per velocità sono dovute al fatto che il ciclo di lavorazione è più lento di quanto dovrebbe esserlo in teoria; ciò può essere dovuto all'obsolescenza delle macchine, ad una movimentazione non ottimale del materiale o dell'operatore all'interno postazione o microfermate. Le micro fermate, invece, sono dei rallentamenti relazionati a brevi stop del processo. Esse riguardano, ad esempio, delle anomalie

dei sensori delle macchine o nella presa del pezzo, le attese dei pezzi dall'operazione precedente, le rilavorazioni, ecc.

Questi fattori sono difficilmente rilevabili dall'operatore e quindi è molto difficile che vengano dichiarati nella banca dati sopra citata. Per questo motivo, si preferisce seguire un'altra via e calcolare il parametro di efficienza come rapporto tra i pezzi lavorati e i pezzi lavorabili teoricamente.

$$\%P = \frac{\text{N}^\circ \text{ pezzi lavorati}}{\text{N}^\circ \text{ pezzi teorici}} \cdot 100 \quad (10.2)$$

Il numero di pezzi teorici è riferito alle ore di lavoro effettivo della macchina, già scorporato delle fermate considerate nell'indice di disponibilità.

$$\text{N}^\circ \text{ pezzi teorici} = \frac{\text{Ore di lavoro} \cdot 60}{T_{CICLO} [\text{min}]} \quad (10.3)$$

Qualità È il parametro legato all'adeguatezza del prodotto, in relazione alle tolleranze ed alle specifiche richieste. Dunque tiene in conto sia dei pezzi scartati, sia di quelli rilavorati poichè conteggia tutti i particolari in cui non sono rilevati difetti in rapporto al numero totale di pezzi prodotti.

$$\%Q = \frac{\text{N}^\circ \text{ pezzi conformi}}{\text{N}^\circ \text{ pezzi realizzati}} \quad (10.4)$$

L'obiettivo del Total Quality Management (TQM) è quello di raggiungere una condizione di difettosità nulla, che corrisponde ad un indice di qualità pari al 100%.

OEE Essendo l'indice di efficienza totale comprensivo di tutti i fattori sopraelencati, esso si calcola come prodotto dei tre parametri di Disponibilità (A), Performance (P) e Qualità (Q).

$$OEE = A \cdot P \cdot Q \quad (10.5)$$

Tale parametro consente valutare globalmente e confrontare diversi processi; inoltre cosituisce un potente mezzo per le aziende, per monitorare tre diverse variabili, sulle quali è possibile focalizzarsi di volta in volta, concentrando maggiormente gli sforzi su quello che, tra i tre indici considerati, risulta il più basso.

Un valore elevato di OEE da porsi, in generale, come obiettivo si aggira attorno all'85%.

Per ottenere un confronto equo tra i due processi, l'intervallo di tempo considerato per l'analisi seguente è pari ad una settimana lavorativa. Tale periodo è stato preso come riferimento in quanto per il nuovo processo, appena avviato, non è attualmente possibile, secondo le tempistiche materiali di rilievo dei dati, estendere l'analisi ad un periodo temporale maggiore, mensile o annuale.

10.1 Processo originario

La porzione di processo che è stata sostituita con l'introduzione della nuova macchina che combina lavorazioni di tornitura e rettifica comprende, appunto, le due macchine sulle quali venivano svolte separatamente le due operazioni in precedenza. Se per la valutazione della capacità di processo è stata analizzata la macchina che produceva il numero maggiore di scarti di produzione, ossia il tornio, in questa trattazione non è possibile limitarsi a considerazioni circoscritte alla non conformità dei pezzi. Ciò perché, come ampiamente spiegato, la qualità dei pezzi è solo uno dei tre fattori racchiusi nell'indice di efficienza globale del processo.

Per tale ragione è stata valutata l'efficienza del processo delle due operazioni congiunte come il minimo valore tra l'OEE dell'operazione di tornitura e quello di rettifica separati.

$$OEE_{OLD} = \min\{OEE_{tornio}; OEE_{rettificatrice}\} \quad (10.6)$$

In questo modo, le due operazioni restano scisse tra loro e non c'è il rischio che, mescolando i dati relativi alle due macchine vi siano elementi tra loro non omogenei; inoltre, assumere come efficienza globale l'efficienza minima tra le due macchine significa definire che l'operazione che governa il processo è ragionevolmente la meno ottimale.

Dunque sulla base di quanto dichiarato dagli operatori, risultano i seguenti indici.

- **Disponibilità (A)**

Le ore totali di carico macchina disponibile, essendo entrambe le macchine occupate per il processo in questione tutti i giorni a tempo pieno, sono 22,5 h per i giorni infrasettimanali e il sabato 12 h.

$$\text{Ore totali disponibili} = 22,5 \cdot 5 + 12 = 121,5 \text{ h}$$

$$\text{Fermate totali}_{tornio} = 28,7 \text{ h}$$

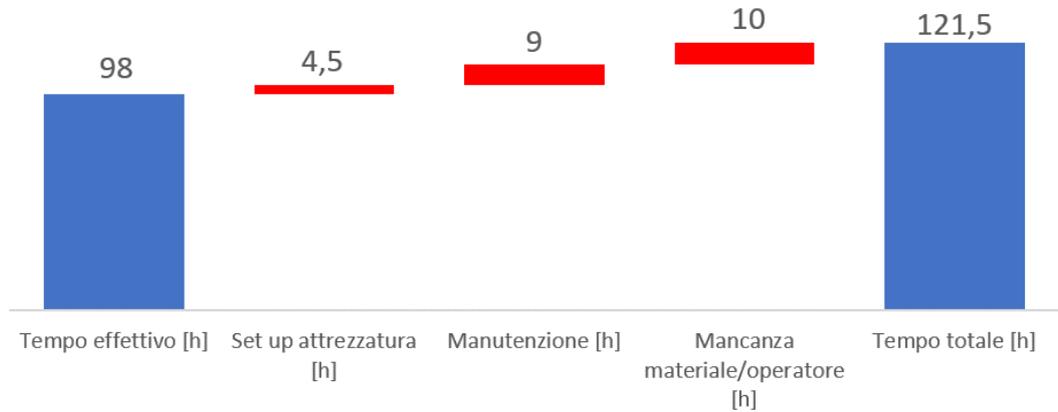
$$\text{Fermate totali}_{rettificatrice} = 24,3 \text{ h}$$

Ne derivano gli indici di disponibilità riportati in tabella 10.1

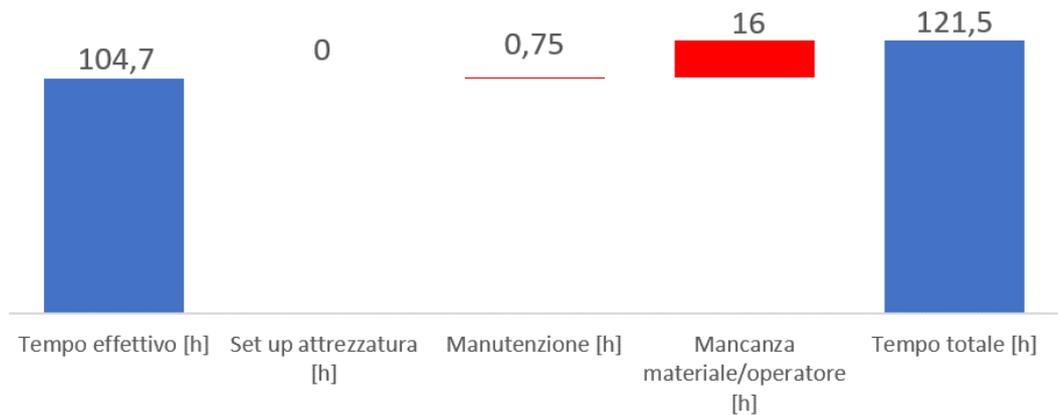
A_{tornio}	76,4%
$A_{rettificatrice}$	80%

Tabella 10.1: Indici di Disponibilità per le due macchine coinvolte nel processo originario

I contributi specifici che concorrono a diminuire le ore di lavoro effettivo nell'ambito dell'indice di disponibilità sono mostrati in figura 10.1 per le due operazioni.



(a) Operazione di tornitura



(b) Operazione di rettifica

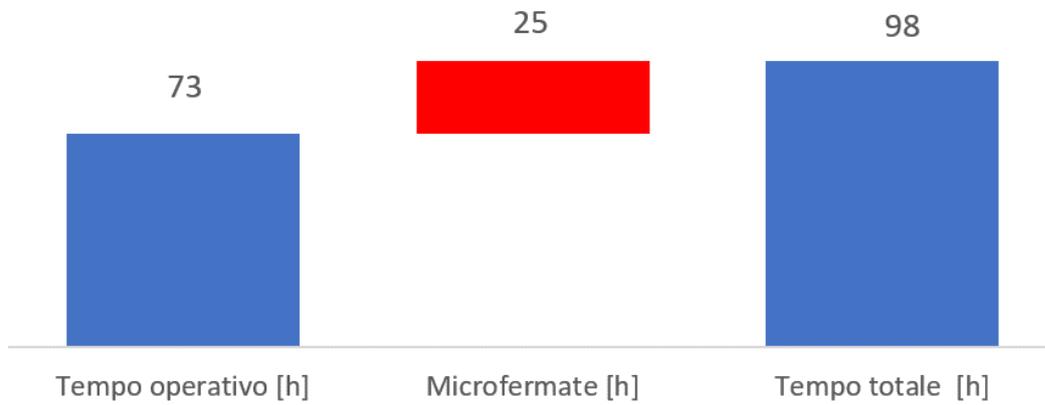
Figura 10.1: Perdite di efficienza nell'indice di Disponibilità per le operazioni del processo originario

- **Performance (P)**

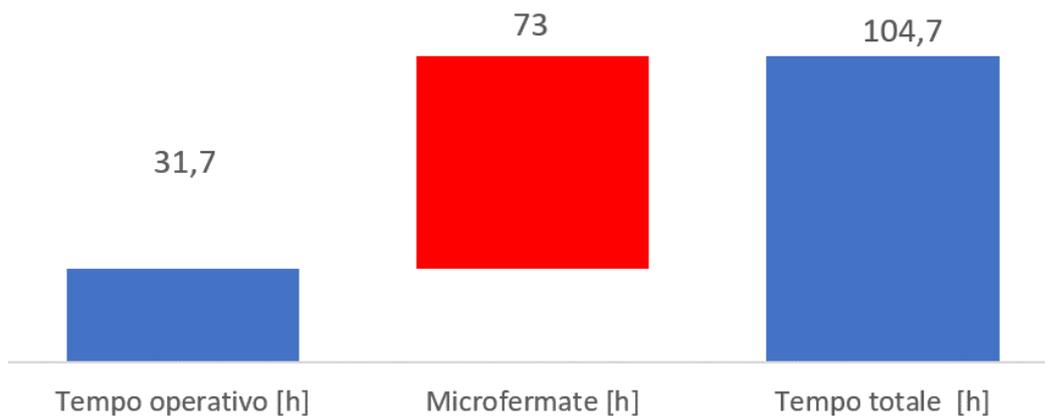
Tale parametro dovrebbe comprendere tutti i rallentamenti delle macchine per velocità di lavorazione ridotta o per microfermate. Tuttavia, come esplicitato, poichè questi dati sono difficili da rilevare, si preferisce far riferimento al rapporto tra il numero di pezzi previsti ed il numero di pezzi effettivamente realizzati nel lasso di tempo considerato.

I contributi delle micro fermate sono mostrati quantitativamente in termini di ore perse in figura 10.2, per le due operazioni.

Si calcolano gli indici di performance per i due processi, riportati in tabella 10.2.



(a) Operazione di tornitura



(b) Operazione di rettifica

Figura 10.2: Perdite di efficienza nell'indice di Performance per le operazioni del processo originario

A differenza dell'indice di disponibilità che era simile per le due operazioni, l'indice di performance risulta nettamente minore per l'operazione di rettifica, segnale dell'obsolescenza della macchina o comunque di elementi di inefficienza in questa parte di processo.

- **Qualità (Q)**

Per il calcolo di questi indici si fa riferimento ai rapporti di non conformità,

P_{tornio}	74,7%
$P_{rettificatrice}$	30,6%

Tabella 10.2: Indici di Performance per le due macchine coinvolte nel processo originario

citati nel capitolo 1, in cui vengono dichiarati tutti i pezzi che hanno presentato delle caratteristiche non adeguate alle specifiche richieste. Sulla base di questo dato e del numero totale dei pezzi prodotti, è calcolato l'indice di qualità, secondo la 10.4. Questo risultato era prevedibile, poiché è già stato

Q_{tornio}	97%
$Q_{rettificatrice}$	100%

Tabella 10.3: Indici di Qualità per le due macchine coinvolte nel processo originario

analizzato il fatto che la maggior parte degli scarti di produzione degli alberi in questione sia prodotto durante l'operazione di tornitura con la quale non si riesce a rispettare le tolleranze previste.

Naturalmente è da sottolineare che il parametro è riferito all'intervallo di tempo stabilito e quindi non è rappresentativo della macchina in maniera assoluta.

Si procede quindi all'unione dei tre fattori di inefficienza per il calcolo dell'indice globale OEE, ciascun fattore in misura diversa (Figura 10.3).

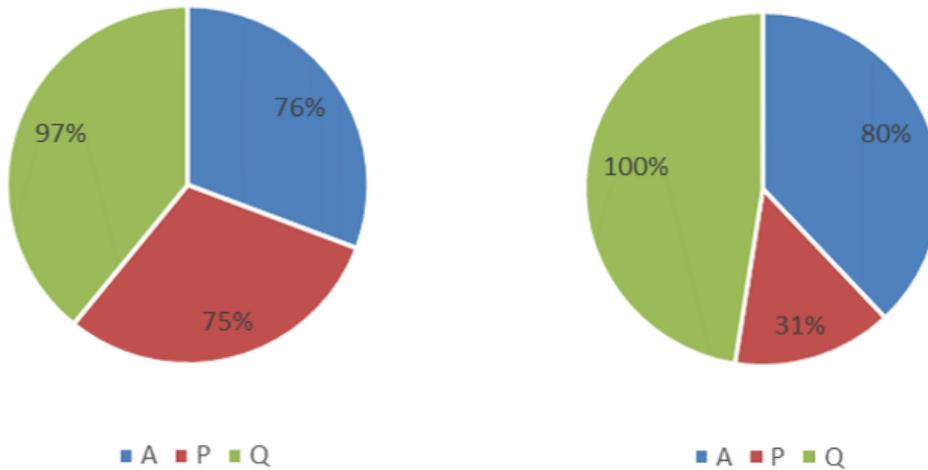
In particolare, si nota che per entrambi l'indice di Qualità è meno problematico rispetto agli altri due; questo implica che la non efficienza del processo non riguarda prevalentemente la conformità dei pezzi prodotti, sebbene per il processo di tornitura l'indice Q sia inferiore al 100%.

Per quel che riguarda gli altri due indici, invece hanno pari peso nell'operazione di tornitura mentre, nell'operazione di rettifica, risulta problematico l'indice di Performance, che è quello che maggiormente abbassa l'efficienza globale di processo. Per i due processi risultano:

$$OEE_{tornio} = A_{tornio} \cdot P_{tornio} \cdot Q_{tornio} = 55,5\%$$

$$OEE_{rettif} = A_{rettif} \cdot P_{rettif} \cdot Q_{rettif} = 24,5\%$$

Come detto, si assume che il processo sia governato dall'operazione meno efficiente, per cui si può attribuire al processo globale il valore minimo delle efficienze delle



(a) Operazione di tornitura

(b) Operazione di rettifica

Figura 10.3: Influenza dei tre contributi nel calcolo dell'OEE per il processo originario

singole operazioni.

$$OEE = \min\{OEE_{tornio}; OEE_{rettificatrice}\} = 24,5\%$$

Risulta dunque che il processo lavora effettivamente con efficienza pari ad un quarto della condizione ideale, dunque in condizioni non ottimali.

10.2 Nuovo processo

Per la valutazione dell'efficienza del nuovo processo, sono state analizzati i tempi e le caratteristiche relative alle lavorazioni sulla macchina EMAG che, come detto, unisce le lavorazioni di tornitura e rettifica.

Sulla base di quanto dichiarato dagli operatori, risultano i seguenti indici.

- **Disponibilità (A)**

Le ore totali di carico macchina disponibile, essendo anche questa macchina, come le precedenti, occupata tutti i giorni a tempo pieno per 22,5 h e il sabato per sole 12 h.

$$\text{Ore totali disponibili} = 22,5 \cdot 5 + 12 = 121,5 \text{ h}$$

$$\text{Fermate totali} = 17 \text{ h}$$

Ne deriva l'indice di disponibilità A_{new}

$$A_{new} = 86,3\%$$

I contributi specifici che concorrono a diminuire le ore di lavoro effettivo nell'ambito dell'indice di disponibilità sono mostrati in figura 10.4.

Si nota che sono notevolmente diminuite le perdite relative alla mancanza dell'operatore o del materiale e alla manutenzioni. Ciò è riconducibile al fatto che, essendo la macchina quasi completamente automatica, essa può lavorare anche senza la presenza costante dell'operatore; inoltre si tratta di una macchina nuova, di conseguenza è ragionevole che i guasti siano minimi. Se da una parte i due contributi citati sono diminuiti, dall'altra è leggermente aumentato il tempo di set up, in quanto la macchina risulta un po' più complessa.

In definitiva, l'indice di disponibilità è molto maggiore rispetto alla rettificatrice del vecchio processo (circa 10 punti percentuali in più) ed è aumentato anche rispetto al tornio.

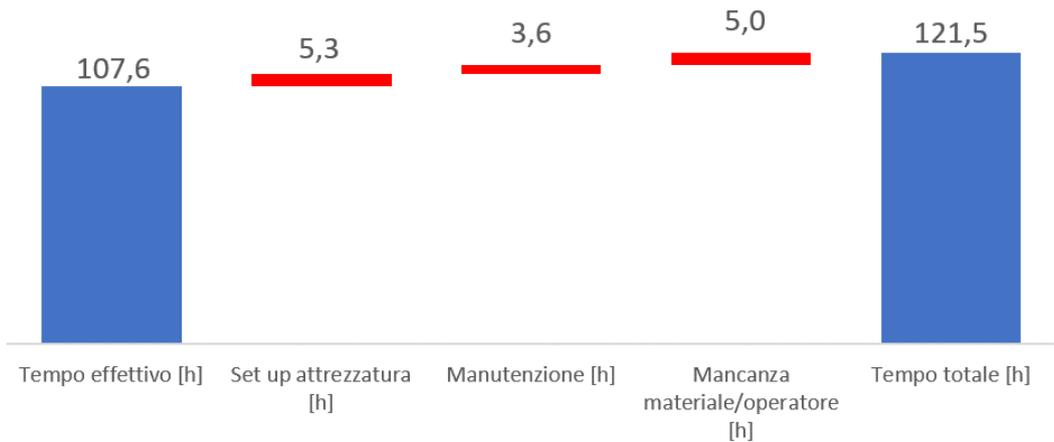


Figura 10.4: Perdite di efficienza nell'indice di Disponibilità per il nuovo processo

- **Performance (P)**

Tale parametro dovrebbe comprendere tutti i rallentamenti delle macchine per velocità di lavorazione ridotta o per microfermate. Tuttavia, come esplicitato, poichè questi dati sono difficili da rilevare, si preferisce far riferimento al rapporto tra il numero di pezzi previsti ed il numero di pezzi effettivamente realizzati nel lasso di tempo considerato.

I contributi delle micro fermate sono mostrati quantitativamente in termini di ore perse in figura 10.5.

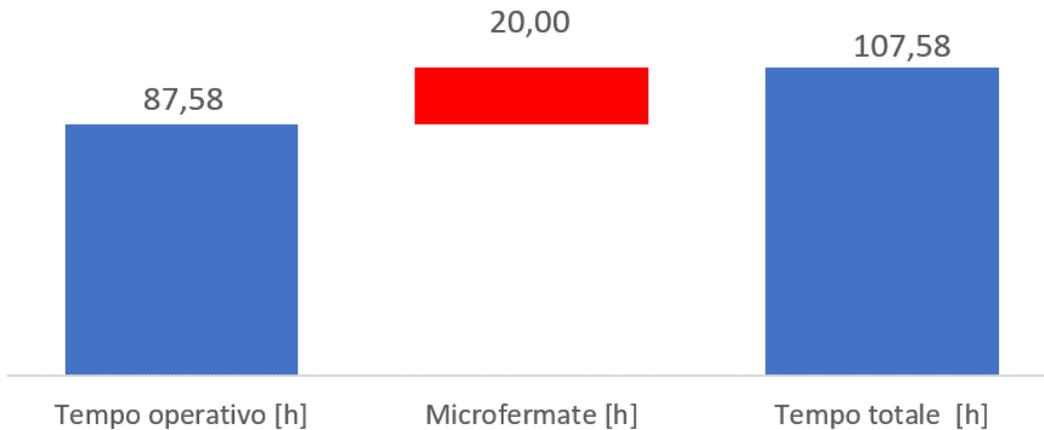


Figura 10.5: Perdite di efficienza nell'indice di Performance per il nuovo processo

Si calcola l'indice di performance per il processo

$$P_{new} = 82,1\%$$

Tale indice risulta nettamente superiore rispetto a quello calcolato per il vecchio processo e indica che sono il 20% del numero di pezzi previsti non sono stati realizzati effettivamente a causa delle micro fermate.

- **Qualità (Q)**

Per il calcolo di questi indici si fa riferimento ai rapporti di non conformità, citati nel capitolo 1, in cui vengono dichiarati tutti i pezzi che hanno presentato delle caratteristiche non adeguate alle specifiche richieste. Sulla base di questo dato e del numero totale dei pezzi prodotti, è calcolato l'indice di qualità, secondo la 10.4.

$$Q_{new} = 99,1\%$$

L'indice è prossimo al 100%, ciò vuol dire che quasi tutti i pezzi prodotti sono conformi alle tolleranze richieste.

Si procede quindi all'unione dei tre fattori di inefficienza per il calcolo dell'indice globale OEE, ciascun fattore in misura diversa (Figura 10.6).

Risulta un indice di efficienza globale:

$$OEE_{new} = A_{new} \cdot P_{new} \cdot Q_{new} = 70,2\%$$

Il processo è notevolmente più efficiente rispetto all'originario.

La tabella 11.4 riassume gli indici ricavati, rappresentati nel grafico in figura 10.7.

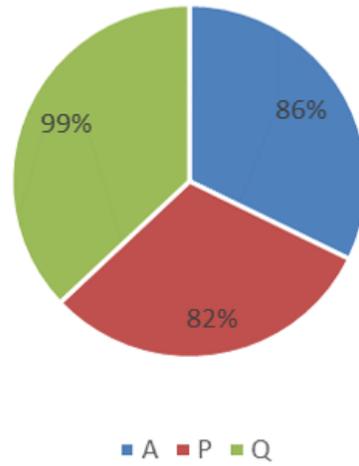


Figura 10.6: Influenza dei tre contributi nel calcolo dell'OEE per il nuovo processo

Indice	Vecchio processo		Nuovo processo
	Tornitura	Rettifica	
A	76,4%	80%	86,3%
P	74,7%	30,6%	82,1%
Q	97%	100%	99,1%
OEE	55,5%	24,5%	70,2%

Tabella 10.4: Confronto indici di efficienza

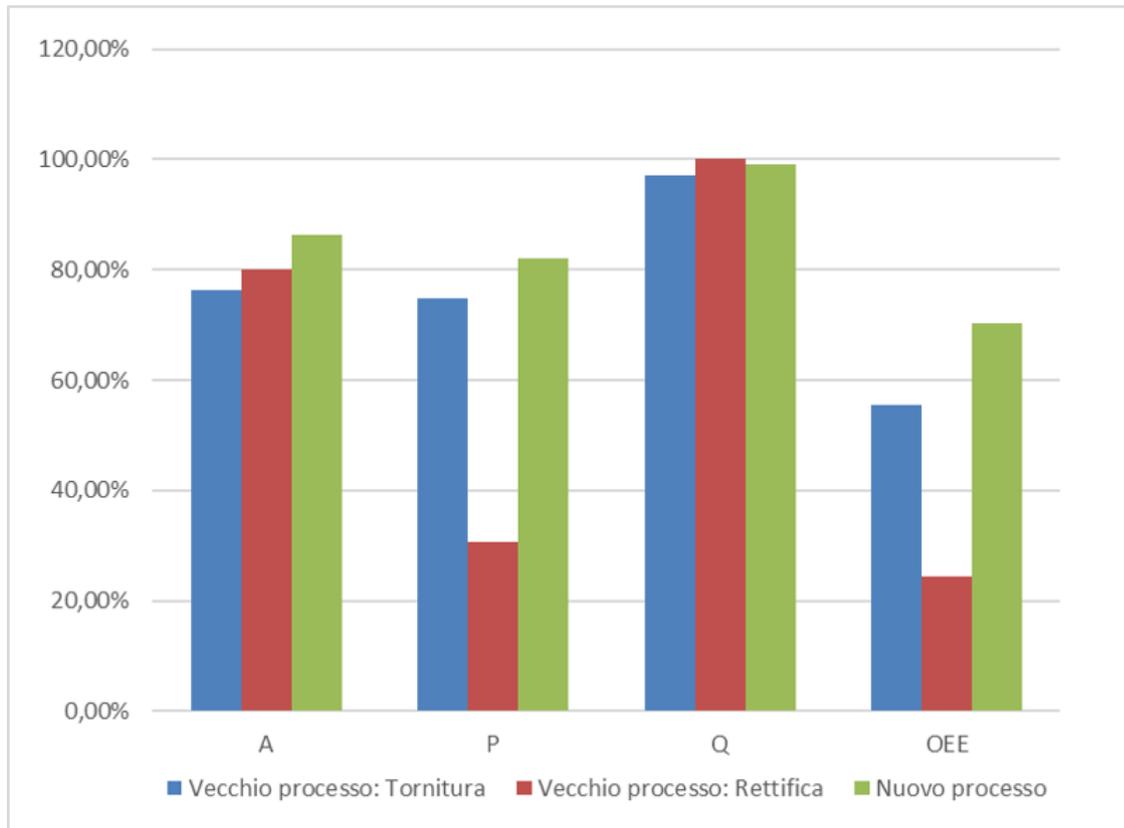


Figura 10.7: Grafico di confronto per gli indici di efficienza e i rispettivi contributi

Capitolo 11

Conclusioni

Lo studio presentato ha cercato di mettere a confronto due modalità differenti di produzione e controllo di un componente per trasmissione automobilistica. Poichè gli aspetti da tenere in considerazione sono molteplici, il confronto assoluto si rifà a paragoni segmentati in più parti, che danno poi luogo ad una valutazione globale del cambio di processo completo.

Per quel che riguarda il sistema di misura i dati confrontati in tabella 11.1 mostrano un notevole miglioramento soltanto per il parametro di risoluzione della macchina, che risulta adeguato nel nuovo sistema di misura, mentre era al di sopra dei limiti per il vecchio. Inoltre, rispetto alla situazione originaria, non è significativo il contributo di variabilità dovuto all'operatore.

Aldilà dei risultati numerici ricavati grazie all'analisi dei sistemi di misura, è ne-

Sistema di misura	Vecchio sistema	Nuovo sistema	Limiti
Risoluzione	6,25%	1,6%	< 5%
Variazione totale	0,0039	0,0040	—
Ripetibilità strumentale	8,1%	9,56%	—
Riproducibilità operatori	1,34%	0%	—
Ripetibilità e riproducibilità	8,20%	9,56%	< 10%
Variazione del particolare	99,66%	99,54%	> 60%

Tabella 11.1: Risultati MSA per i due sistemi di misura

cessario ampliare la visione dell’impatto dei vantaggi apportati dall’introduzione di una macchina di misura sofisticata e completamente automatizzata anche trasversalmente, considerando il sostanziale risparmio sui tempi di misura e la minore richiesta di manodopera che il nuovo sistema richiede rispetto al precedente.

Parallelamente all’analisi di misura, altrettanto significativa è la comparazione tra il processo originario, in cui la gran parte dei diametri subiva operazioni di tornitura di finitura e non rientrava nelle specifiche richieste, e il processo di nuovo inserimento, comprendente la duplice operazione di tornitura e retifica sulla medesima macchina di lavoro a controllo numerico.

In questo caso i risultati, confrontati in tabella 11.2, non lasciano alcun dubbio nell’interpretazione: è chiaro il distacco qualitativo dei due processi.

- **Il processo originario** presenta valori oltre i limiti di controllo statistici per tutte e tre le caratteristiche analizzate. Inoltre, la dispersione mostrata è elevata rispetto alla tolleranza richiesta dal progetto e, oltretutto, il processo risulta non centrato sul valore nominale richiesto.
- **Il nuovo processo**, invece, è vantaggioso sia in termini di stabilità e controllo ed anche rispetto alla dispersione e la centratura dei dati rilevati.

Tuttavia, come detto, è necessario sottolineare che il campione utilizzato per lo studio SPC di controllo e valutazione del processo è composto da un numero di pezzi pari a 30, che rappresenta la numerosità minima affinché l’analisi possa essere ritenuta statisticamente robusta. Ciò, non è frutto di una scelta, ma è stato dettato dai tempi e dalla schedulazione della produzione all’interno dello stabilimento, che non ha previsto un numero di pezzi maggiore entro la data utile per il termine del lavoro.

L’utilizzo di soltanto 30 pezzi, certamente, non vanifica l’analisi, la quale è da considerarsi come una stima preliminare dell’adeguatezza del processo.

Anche l’analisi dei tempi (Capitolo 9), ha mostrato un significativo miglioramento con il cambio di processo che, potenzialmente, sarebbe in grado di far fronte ad una produttività doppia, con una diminuzione di risorse di manodopera (Tabella 11.3).

Naturalmente, tutti questi risultati non possono che tradursi in un aumento dell’efficienza globale del processo. In particolare l’aumento è notevole se confrontato con la parte processo originario di rettifica delle estremità del particolare, che aveva una grossa perdita di efficienza dovuta alla performance della macchina, ossia alle frequenti microfermate che rallentavano il processo. In ogni caso anche limitandosi a confrontare il nuovo processo con la sola operazione originaria di tornitura, si ha un miglioramento dell’indice OEE (Tabella 11.4).

	Caratteristica	Vecchio processo	Nuovo processo
Carta X	$\phi 30$	Fuori controllo	In controllo
	$\phi 31$	Fuori controllo	In controllo
	$\phi 35$	Fuori controllo	In controllo
Distribuzione	$\phi 30$	Bimodale	Normale
	$\phi 31$	Normale asimmetrica	Normale
	$\phi 35$	Normale asimmetrica	Normale asimmetrica
Indice di Capacità	$\phi 30$	0,99	1,87
	$\phi 31$	0,89	1,84
	$\phi 35$	1,1	1,82
Indice di Centratuta	$\phi 30$	0,89	1,83
	$\phi 31$	0,80	1,66
	$\phi 35$	0,96	1,77

Tabella 11.2: Risultati SPC per il vecchio e nuovo processo

	Vecchio processo	Nuovo processo
Tempo ciclo [<i>min</i>]	12,7	6,6
Tempo attivo [<i>min</i>]	6,11	1
Produttività [<i>pezzi/h</i>]	$\cong 5$	$\cong 10$

Tabella 11.3: Risultati dell'analisi dei tempi ciclo

Indice	Vecchio processo		Nuovo processo
	Tornitura	Rettifica	
A	76,4%	80%	86,3%
P	74,7%	30,6%	82,1%
Q	97%	100%	99,1%
OEE	55,5%	24,5%	70,2%

Tabella 11.4: Confronto indici di efficienza

11.1 Miglioramenti futuri

Nell’ottica di estensione del processo a tutti i codici appartenenti alla medesima famiglia, bisognerebbe aumentare la robustezza dell’analisi statistica relativa al nuovo processo, in modo da avere maggiore affidabilità dei risultati e da poter effettuare un confronto più significativo con il processo originario.

Appurata tale adeguatezza, già attribuibile al processo con l’analisi svolta sui 30 pezzi, è necessario effettuare uno studio di controllo del processo a regime e una conseguente analisi degli scarti.

L’obiettivo principale, infatti, analizzato nel capitolo 1, mira alla riduzione dei pezzi non conformi prodotti internamente, nell’ottica di raggiungere asintoticamente la condizione ideale di *Zero scarti*. Dunque, dopo aver effettuato una raccolta dati per un lasso temporale sufficientemente ampio e confrontabile con quello utilizzato per l’analisi citata, si procede con la verifica dell’effettivo riscontro del cambio di processo e con la quantificazione monetaria dell’influenza di tale cambiamento.

Monetizzando gli scarti di produzione del nuovo processo è possibile avere una stima economica del beneficio apportato dalla strada seguita e analizzata.

Ne consegue, naturalmente, una possibile analisi *Costi/Benefici*, sulla base delle spese affrontate dall’azienda per l’installazione dei nuovi macchinati, che certamente non sono trascurabili.

Bibliografia

- [1] Automotive Industry Action Group AIAG (2005). Statistical Process Control (SPS) - Reference Manual *Second Edition*
- [2] ANFIA Service (1998). Controllo statistico del processo. *Anfia Qualità 011-Edizione N.1 Luglio 1998*
- [3] Verband der Automobilindustrie e.V. VDA (2011). Capability of measurement processes, Vol 5. *Quality Management in the Automotive Industry*
- [4] ANFIA Service (2012). Analisi dei Sistemi di Misurazione nell'ambito dell'industria automobilistica e dei suoi fornitori *Anfia Qualità AQ-024- Edizione N.1*
- [5] Hoyle, D. (2000). *Automotive quality systems handbook*. Elviesier
- [6] ISO, E. (2000). 9001: 2000. *Quality management systems-Requirements* (ISO 9001: 2000)
- [7] International Automotive Task Force (IATF), (2016). *Requisiti per il sistema di gestione per la qualità per la produzione di serie e di ricambio nell'automotive* (IATF 16949:2016)
- [8] Oerlikon Graziano, Direzione di stabilimento (2017). *Manuale di base-Addestramento tecnico*
- [9] Oerlikon Graziano, Direzione di stabilimento (2017). *Manuale di gestione qualità - Stabilimento di Cascine Vica*
- [10] Oerlikon Graziano, Sviluppo, Formazione e Selezione (2005). *Studio dei tempi*
- [11] Ishikawa, K. (1982). *Guide to quality control* (Vol. 2). Tokyo: Asian Productivity Organization
- [12] Ohno, T., Revelli, M., & Polo, G. (1993). *Lo spirito toyota*. Einaudi
- [13] Juran, J. M. (1986). *The quality trilogy*. *Quality progress*, 19.8, 19-24.
- [14] Mor, G. (2009). *Gage R&R con dati continui - Analisi sistema di misura (MSA)*. http://www.sixsigmaperformance.it/approfondimenti/Gage_RR.aspx
- [15] Vorne (2018) *What is Overall Equipment Effectiveness?*. <https://www.oeo.com>
- [16] Chiarini & Associati. *OEE: Overall Equipment Effectiveness* <https://www.leanmanufacturing.it/strumenti/oeo.html>
- [17] Di Nardo, E. *Il controllo statistico di qualità*. <http://oldwww.unibas.it>