



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE
TESI DI LAUREA

**CONTROLLO QUALITA': UN'APPLICAZIONE NEL SETTORE
DELL'ASSEMBLAGGIO AUTOMATICO DI CUSCINETTI PER
APPLICAZIONI AERONAUTICHE**

Studente: Bolognesi Federica

Relatore: Franceschini Fiorenzo

Sommario

INTRODUZIONE - IL MIGLIORAMENTO CONTINUO E L'INDUSTRY 4.0	5
CAPITOLO 1	7
1.1 SKF AVIO – STABILIMENTO DI VILLAR PEROSA (TO)	7
1.2 IL PRODOTTO – CUSCINETTO PER APPLICAZIONI AERONAUTICHE CIVILI E MILITARI	9
1.3 IL PROCESSO PRODUTTIVO.....	11
1.4 PRINCIPALI DIFETTI VISIVI RISCONTRABILI IN UN CUSCINETTO	18
1.4.1 DIFETTI DIMENSIONALI	18
1.4.2 DIFETTI DI MATERIALE	19
1.4.3 DIFETTI ESTETICI	20
1.4.4 DIFETTI FUNZIONALI	22
CAPITOLO 2	24
2.1 QUALITY MANAGEMENT SYSTEM - SIX SIGMA	24
2.2 PRINCIPI DEL SEI SIGMA	25
2.3 IL CICLO PLAN-DO-CHECK-ACT	26
2.4 ALTRI PROGRAMMI FORMALI PER IL CONTROLLO DELLA QUALITA' E DEL PROCESSO	28
2.5 METODO DMAIC.....	29
CAPITOLO 3	32
3.1 ASSEMBLAGGIO AUTOMATICO CUSCINETTI – LA LINEA	32
3.1.1 SCHEMA SIPOC	37
3.2 MISURAZIONE – IL PROCESSO DI ASSEMBLAGGIO	39
3.2.1 PASSO A – PROCESSO DI ASSEMBLAGGIO	39
3.3 ANALISI – IL PROCESSO DI ASSEMBLAGGIO	43
3.3.2 CAPABILITIES DELLE MACCHINE DI MISURAZIONE.....	44
3.3.4 DETERMINAZIONE BIAS E LINEARITA'	50
3.3.6 DIFFERENZE TRA I PROCESSI DI MISURAZIONE MANUALE E AUTOMATICO	56
3.3.7 TEMPI DI PROCESSO	57
3.4.1 REQUISITI NORMATIVI IN AMBITO AEROSPAZIALE - RISK-BASED THINKING	62
3.4.2 FMEA	63
3.4.3 CONCLUSIONI DELLA FMEA E MIGLIORAMENTO	70
3.5 CONTROLLO – STRATEGIE DI CONTROLLO	78
CAPITOLO 4	81
4.1 GIOCO RADIALE.....	81
4.2 PARAMETRI DI RIFERIMENTO E ANALISI PER L' APPAIATURA	82

4.3	STIMA DELLE DISTRIBUZIONI DI RIFERIMENTO.....	83
	84
4.5	STUDIO DELLA DERIVA DEL PROCESSO NEL TEMPO	88
4.6	DISTRIBUZIONE IN USCITA DEL GIOCO RADIALE.....	91
4.3	GIOCO RADIALE IN USCITA CON L'APPAIATURA SOFTWARE	94
	CONCLUSIONI.....	97
	BIBLIOGRAFIA.....	98

Indice delle figure

<i>Figura 1 - Applicazioni cuscinetti</i>	8
<i>Figura 2 - Componenti cuscinetto per applicazioni aeronautiche</i>	10
<i>Figura 3 Processo produttivo cuscinetti – la fase di assemblaggio è approfondita in seguito</i> ...	12
<i>Figura 4 - Anello esterno dopo trattamento termico</i>	13
<i>Figura 6 - Anello interno rettificato</i>	13
<i>Figura 5 - Rettifica</i>	13
<i>Figura 7 - Anello interno rifinito</i>	14
<i>Figura 8 - Lappatura</i>	14
<i>Figura 9 - Anello esterno lappato</i>	14
<i>Figura 10 - Tornio per il taglio delle barre</i>	15
<i>Figura 11 - Barre di acciaio</i>	15
<i>Figura 12 - Gabbia forata</i>	16
<i>Figura 13- Gabbia con alveoli</i>	16
<i>Figura 14- Gabbia dopo la tornitura</i>	16
<i>Figura 15 -Controllo visivo con lente</i>	17
<i>Figura 16 - Controllo visivo</i>	17
<i>Figura 17 - Cuscinetto finito</i>	17
<i>Figura 18 - Esempio di inclusione</i>	19
<i>Figura 19 - Esempio di corrosione</i>	20
<i>Figura 20 -Esempio di macchie</i>	20
<i>Figura 21 -Esempio di ammaccatura</i>	21
<i>Figura 22 - Esempio di colorazione alterata</i>	21
<i>Figura 23 - Esempio di pitting</i>	21
<i>Figura 24 - Esempio di graffi</i>	22
<i>Figura 25 - Esempio di rivettatura non conforme</i>	22
<i>Figura 26 -Esempio di rivettatura non conforme</i>	22
<i>Figura 27 -Percentuale di difettosità in base alla dispersione</i>	25
<i>Figura 28 - Strumenti per applicazione del metodo DMAIC – SKF Business Excellence</i>	30
<i>Figura 29 - Linea di assemblaggio automatico e relativa legenda</i>	33
<i>Figura 30 - Ingresso dei componenti in linea</i>	34
<i>Figura 31 - Ingresso dei componenti in linea</i>	34
<i>Figura 32 - Misurazione automatica anello interno</i>	34
<i>Figura 33 - Misurazione automatica laser anello interno</i>	34
<i>Figura 34 - Misurazione automatica gabbia</i>	35
<i>Figura 35 - Stoccaggio magazzino intermedio</i>	35
<i>Figura 36 - Creazione set di rulli</i>	35
<i>Figura 37 - Assemblaggio automatico - inserimento dei rulli</i>	36
<i>Figura 38 - Assemblaggio automatico</i>	36
<i>Figura 39 - Appaiatura anelli per l'assemblaggio finale manuale</i>	36
<i>Figura 40 - Schema SIPOC</i>	38
<i>Figura 41- Definizione del problema - Work Package Definition</i>	38
<i>Figura 42 - Assemblaggio - processi a confronto</i>	40
<i>Figura 43 - Matrice causa - effetto</i>	42
<i>Figura 44 - Variabilità strumento di misurazione vs variabilità processo</i>	45
<i>Figura 45- Numero di difettosi al milione in base al Cp</i>	46
<i>Figura 45 – Gage Study for Diametro centrale foro</i>	47

<i>Figura 46 - Gage Study for Ovalità diametro pista.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 48 - Gage Study for Diametro esterno inferiore</i>	<i>53</i>
<i>Figura 49 - Gage Study for Larghezza pista.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 50 - Gage Study for Parallelismo facce.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 51 - T -Test misurazioni manuali vs automatiche.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 52 - R&R Report for Tempi di processo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 53 - Risultati numerici R&R Report for Tempi di processo.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 54- AS13004 requirements, scope and relationships</i>	<i>63</i>
<i>Figura 55 - Schema FMEA.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 56 - Esempio FMEA per l'identificazione dei componenti.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 57 - Criteri di assegnazione Severity [AS 13004 from SAE International].....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 58 - Criteri di assegnazione Occurrence[AS 13004 from SAE International]</i>	<i>69</i>
<i>Figura 59 - Criteri di assegnazione Detection[AS 13004 from SAE International].....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 60 - Azioni in atti per i controlli dimensionali - assemblaggio manuale.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 61 - Azioni in atto controllo dimensionale - assemblaggio automatico</i>	<i>71</i>
<i>Figura 62 - Appaiatura anelli - assemblaggio manuale.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 63 - Azioni in atto per l'appaiatura anelli - assemblaggio manuale.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 64- Appaiatura software – distribuzioni diametro pista anelli interni ed esterni.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 65 - Appaiatura software – Esempio parametri misurati anelli interni ed esterni</i>	<i>74</i>
<i>Figura 66 - Azioni in atto per il magazzino intermedio - assemblaggio automatico</i>	<i>74</i>
<i>Figura 67 - Azioni in atto per la creazione del set di rulli - assemblaggio automatico</i>	<i>75</i>
<i>Figura 68 - Assemblaggio manuale cuscinetto.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 69 - Azioni in atto assemblaggio manuale cuscinetto.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 70 - Azioni in atto assemblaggio automatico cuscinetto</i>	<i>77</i>
<i>Figura 71 - Carta di controllo per tempi di processo ai differenti step - assemblaggio automatico</i>	<i>80</i>
<i>Figura 72 - Parametri considerati e tolleranze</i>	<i>82</i>
<i>Figura 73 - Numerosità campioni considerati</i>	<i>82</i>
<i>Figura 74 - Istogramma per Diametro interno anello esterno</i>	<i>83</i>
<i>Figura 75 - Diagramma di distribuzione Normale</i>	<i>83</i>
<i>Figura 76 - Diagramma di distribuzione per Largest Extreme Value.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 77- Approssimazione con distribuzione Normale</i>	<i>84</i>
<i>Figura 78 - Istogramma per Diametro interno anello esterno</i>	<i>85</i>
<i>Figura 79 - Diagramma di distribuzione Normale</i>	<i>85</i>
<i>Figura 80 - Diagramma di distribuzione per Largest Extreme Value.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 81 - Approssimazione con distribuzione Normale</i>	<i>86</i>
<i>Figura 82- Approssimazione con distribuzione Normale</i>	<i>86</i>
<i>Figura 83- Andamento lotti diametro esterno di anelli interni nel tempo.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 84- Andamento lotti diametro interno di anelli esterni nel tempo.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 85 - Distribuzione in uscita dalla composizione.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 86 - Probabilità giochi in tolleranza</i>	<i>93</i>
<i>Figura 87 - Istogramma gioco radiale effettivo.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 88- Istogramma Gioco radiale dopo la trasformazione</i>	<i>95</i>
<i>Figura 89 - Stima parametri esponenziali.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 90 - Approssimazione distribuzione dati</i>	<i>96</i>
<i>Figura 91 - Probabilità gioco radiale in tolleranza con appaiatura software.....</i>	<i>96</i>

INTRODUZIONE - IL MIGLIORAMENTO CONTINUO E L'INDUSTRY 4.0

In un'economia globalizzata e digitalizzata, le aziende manifatturiere si trovano ad affrontare una crescente concorrenza. Le imprese che hanno maggiore successo in un simile contesto sono quelle che producono e forniscono i prodotti richiesti dal cliente con la qualità attesa, in modo più veloce e più economico rispetto alla concorrenza. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario aumentare costantemente l'efficienza della produzione. Nella ricerca e nella pratica, un approccio consolidato alla pianificazione di processi produttivi e logistici efficienti è la progettazione di catene di valore snelle e prive di scarti in accordo ai concetti della **Lean Production**.

Un principio centrale è il processo di miglioramento continuo. Con piccoli miglioramenti quotidiani, i dipartimenti ed i dipendenti che vi lavorano a tutti i livelli organizzativi eliminano sistematicamente le attività che nel loro ambiente di lavoro immediato vincolano le risorse dal punto di vista del cliente e non aggiungono valore al prodotto. Lavorare in ottica di Lean Production significa lavorare seguendo il flusso reale di valore, concentrare le risorse sulle attività a valore aggiunto ed eliminare e/ o contenere le attività che non hanno un valore aggiunto. Linea guida in tale approccio è fornire al cliente ciò che richiede e per il quale è disposto a pagare il prezzo concordato eliminando gli sprechi.

Gli sprechi da individuare ed eliminare sono generalmente ricondotti ai seguenti:

- eccesso di attività: in riferimento alle attività che non producono valore;
- movimento: spostarsi per raggiungere materiali, strumenti lontani dal punto di utilizzo;
- difetti: ossia scarti e/o rilavorazioni;
- scorte: acquistare o produrre materiali o semilavorati in eccesso rispetto al fabbisogno del processo successivo;
- eccesso di produzione: ossia produrre quantità superiori a quanto richiesto dai clienti o dal processo successivo;
- attesa: impiegare il tempo in maniera non produttiva;
- trasporto: spostare il materiale e/o prodotto senza necessità connesse alla creazione del valore.

La produzione snella mira dunque a definire il valore dal punto di vista del cliente, identificando per che cosa il cliente è veramente disposto a pagare e quale è il flusso di valore che conduce alla realizzazione del prodotto. Le azioni che nel loro complesso consentono di realizzare il prodotto devono essere identificate ed organizzate in processi senza soste o interruzioni, impostando le attività secondo la logica del “pull” e non del “push”, ossia realizzare l’attività solo quando il processo a valle lo richieda perseguendo dei continui miglioramenti.

Nel corso della mia esperienza di tirocinio in SKF Industrie Spa – SKF Avio Villar Perosa ho potuto sperimentare tale approccio e studiare una sua realizzazione pratica nella realizzazione dell’area dell’Automatic Assembly, della quale tratterò in dettaglio nei prossimi paragrafi.

Contestualmente ho inoltre potuto valutare un altro approccio per aumentare l'efficienza dei processi produttivi e logistici che consiste nell'implementazione delle soluzioni Industry 4.0, che il Gruppo SKF ha iniziato a concretizzare attraverso alcuni progetti dedicati.

Industry 4.0, o la quarta rivoluzione industriale, è un termine collettivo che congloba diverse tecnologie contemporanee di automazione, scambio di dati e produzione. In breve, si concentra sulla connettività tra persone e "cose", raccogliendo e facendo un uso consapevole e direttivo delle informazioni digitalizzate, in modo da poter prendere decisioni migliori dettate da dati oggettivi e creando una migliore interazione macchina-macchina. Con l'implementazione e l'interconnessione delle tecnologie, i flussi di informazioni ai dipendenti e tra processi e i sistemi di un'organizzazione possono essere sistematicamente progettati ed automatizzati.

La creazione dell’area Automatic Assembly, ha risposto ed è stata il frutto dell’applicazione di questi due approcci che il Gruppo SKF ha deciso di adottare e, mentre il focus Lean è su un'interazione ottimale tra uomo e organizzazione, l’Industry 4.0 struttura le interrelazioni tra uomo e tecnologia, nonché tra organizzazione e tecnologia, nel miglior modo possibile per creare valore ed evitare gli sprechi in perfetta coerenza con gli obiettivi aziendali.

CAPITOLO 1

1.1 SKF AVIO – STABILIMENTO DI VILLAR PEROSA (TO)

Lo stabilimento nasce a Villar Perosa nel 1906 con il nome RIV (Roberto Incerti Villar Perosa) ed inizia a produrre cuscinetti volventi per il settore automobilistico dopo che Giovanni Agnelli entra in contatto con l'imprenditore italiano Roberto Incerti, all'epoca proprietario di due piccole aziende familiari.

Nel 1911 la RIV comincia ad accrescere il numero di dipendenti e ad acquisire un'autonomia produttiva con l'entrata in funzione di un primo reparto per la fabbricazione interna delle sfere. Lo stabilimento iniziale cresce e diventa con altre realtà industriali locali uno dei poli manifatturieri della Val Chisone.

Una politica di attenzione al territorio ed ai dipendenti porta anche alla creazione del villaggio operaio e degli impiegati nelle immediate vicinanze dello stabilimento a Villar Perosa giungendo ad impiegare fino a 5000 dipendenti provenienti dalla valle stessa, dalla pianura e delle valli limitrofe con un approccio autarchico che vedeva all'interno dello stabilimento anche la stazione dei pompieri, l'infermeria, la falegnameria che producevano ed erogavano i servizi sia per le necessità interne sia per la collettività.

Dopo i primi otto anni di attività, la società si rende autonoma dalla FIAT e gradualmente comincia ad aprire diversi stabilimenti in Italia fino a quando, nel 1965, entra a far parte del Gruppo SKF assumendo la denominazione di "RIV-SKF Officine di Villar Perosa S.p.A", per poi fondersi per incorporazione con SKF Industrie S.p.A nel 2014.

Ad oggi lo stabilimento di Villar, ancora di proprietà del gruppo SKF si divide in tre unità produttive, in relazione all'applicazione dei cuscinetti prodotti:

- Aerospace: per la produzione di cuscinetti per applicazioni aeronautiche destinati ad equipaggiare i più diffusi motori per aeroplani ed elicotteri, applicazioni in cui quindi è richiesta precisione, forme e geometrie particolari e l'utilizzo di acciai speciali che consentono di operare in condizioni di funzionamento particolarmente critiche.

- Super Precision Bearings: per la produzione di cuscinetti di alta precisione utilizzati con successo in svariati campi ma con settore di maggior diffusione l'industria della macchina utensile, tanto per il taglio dei metalli quanto per la lavorazione del legno.
- TBU: per la produzione di cuscinetti per applicazioni ferroviarie, la cui funzione è la riduzione dell'attrito di marcia di treni passeggeri e per trasporto merci, tram e metropolitane.

Lo stabilimento di Villar Perosa per la parte Aerospace costruisce cuscinetti per le seguenti principali applicazioni:

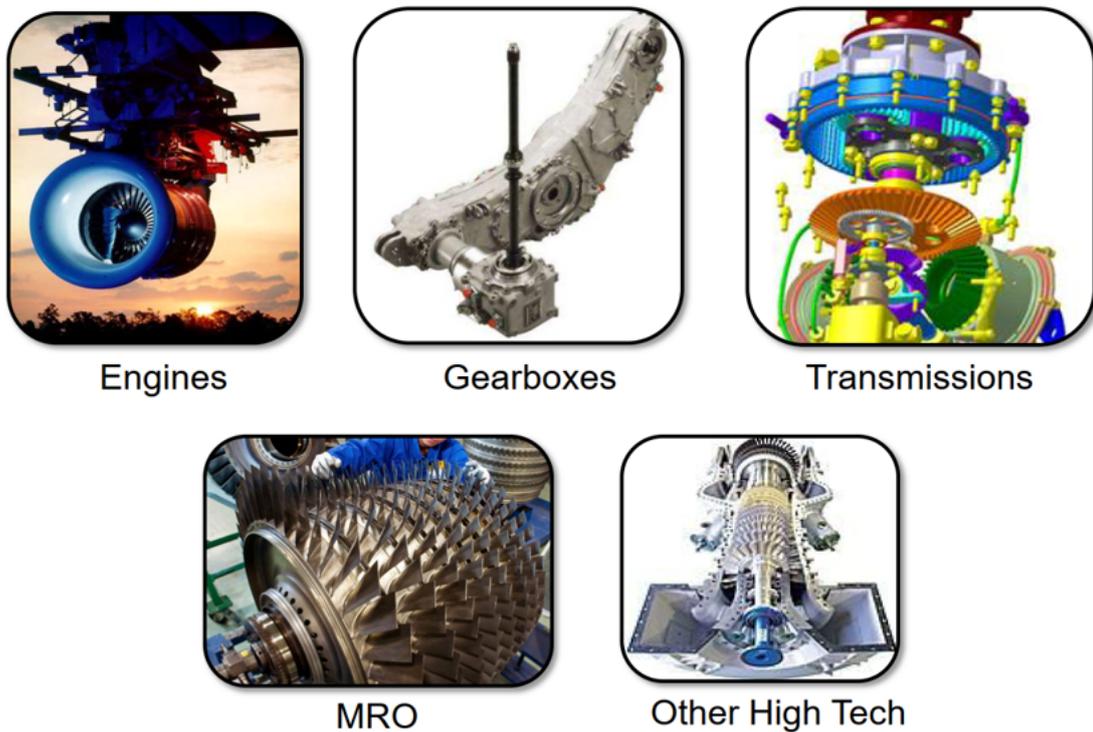


Figura 1 - Applicazioni cuscinetti

Come anticipato precedentemente, la tesi da me elaborata è frutto di un tirocinio effettuato nell'unità produttiva Aerospace dello stabilimento SKF di Villar Perosa (TO), nell'area di Gestione assicurazione qualità e Continuous Improvement.

Un settore particolare sia per il mercato di riferimento, ossia quello aeronautico con regole e requisiti assai peculiari, sia per il tipo di prodotti che per in alcuni casi hanno caratteri al limite della artigianalità realizzata però con tecnologie decisamente moderne.

Il tirocinio mi ha consentito di poter comprendere meglio come un'azienda si organizza per perseguire i propri obiettivi produttivi e come i processi che adotta e sviluppa siano e debbano necessariamente essere allineati alle linee strategiche che devono guidare l'azienda con un'ottica di medio lungo periodo. Le scelte non sono e non possono essere casuali, l'organizzazione in quanto tale ha lo scopo di gestire le risorse e gli investimenti in accordo alle linee strategiche definite dal Gruppo.

1.2 IL PRODOTTO – CUSCINETTO PER APPLICAZIONI AERONAUTICHE CIVILI E MILITARI

Per meglio comprendere l'esperienza che ho maturato ecco di seguito una breve descrizione dei cuscinetti, ossia il core business del Gruppo SKF e di SKF Avio Villar Perosa.

I cuscinetti sono dispositivi meccanici utilizzati per ridurre l'attrito tra due oggetti in movimento rotatorio. Non a caso fra gli slogan utilizzati dal Gruppo SKF ne era stato creato uno specifico che identificava l'SKF come il fornitore capace di far girare il mondo.

Sono costituiti da due anelli di diverso diametro, tra i quali sono posizionati gli elementi principali ai quali è affidata la funzione di supportare gli elementi rotanti, ridurre l'attrito di rotazione, preservare la sede di rotazione e ridurre l'intrusione di polvere o detriti nelle aree di lavoro delle sfere.

Sono composti dai seguenti componenti:

- Anello esterno: ossia un elemento circolare più grande
- Anello interno: elemento circolare più piccolo
- Componenti di rotolamento: nel caso di cuscinetti meccanici possono essere rulli o sfere
- Gabbie: le sfere ed i rulli qualora non siano disposti su tutto il volume sono mantenuti equidistanti tra di loro mediante una struttura chiamata "gabbia", la quale può essere semplice o massiccia o in due parti distinti poi composte tramite rivetti e realizzata in

acciaio, bronzo, ottone o materiale plastico. Il compito essenziale della “gabbia” consiste nel mantenere distanziati i corpi volventi ed impedire qualsiasi contatto fra questi ultimi, al fine di ridurre al minimo l’attrito. Quando i cuscinetti sono scomponibili, la gabbia serve anche per trattenere i corpi volventi. Le gabbie dei cuscinetti volventi sono sollecitate meccanicamente da forze di attrito, di deformazione e d’inerzia, per questi motivi la forma costruttiva delle gabbie e della scelta del relativo materiale sono di fondamentale importanza per le prestazioni di tale elemento.

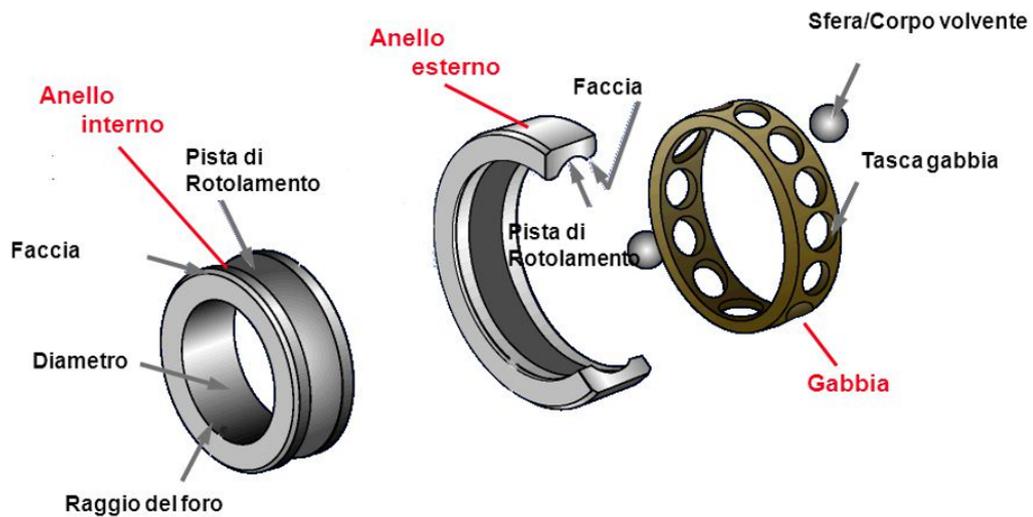


Figura 2 - Componenti cuscinetto per applicazioni aeronautiche

Queste caratteristiche di base sono poi sviluppate e “modificate” dai costruttori in modo da esaltare certe caratteristiche tecniche e funzionali rispetto ad altre in relazione all’applicazione finale per la quale il cuscinetto è stato studiato e disegnato.

I cuscinetti per poter funzionare devono avere un determinato giuoco, in modo che andando in temperatura d’esercizio la loro dilatazione termica non porti a un serraggio del cuscinetto, compromettendone sia la scorrevolezza, sia la durata e la resistenza.

Il giuoco in questione è di due tipi:

- Radiale: giuoco che determina lo spostamento radiale dell’anello interno del cuscinetto, caratterizzato dallo spazio vuoto che si ha tra le sfere/rulli e i due anelli
- Assiale: giuoco che determina lo spostamento assiale (lungo l’asse) dell’anello interno del cuscinetto.

I cuscinetti presentano un limite di velocità al quale possono funzionare, ed è la temperatura di lavoro che è influenzata anche dal lubrificante utilizzato e/o al materiale con cui i componenti dei cuscinetti stessi sono costruiti.

La velocità dipende dal calore che si genera per attrito all'interno del cuscinetto e dalla quantità di tale calore che può essere asportata dal cuscinetto stesso. Il tipo e le dimensioni del cuscinetto, la sua forma costruttiva interna, il carico, le condizioni di lubrificazione e di raffreddamento, nonché l'esecuzione della gabbia, la precisione e il gioco interno hanno tutti un proprio ruolo nella determinazione della velocità ammissibile.

La lubrificazione di un cuscinetto a sfere o a rulli è fondamentale, in quanto in assenza di lubrificante viene danneggiato in breve tempo. La lubrificazione assolve determinate funzioni, ovvero:

- il cuscinetto dalla corrosione degli agenti esterni e dalle impurità
- agevola lo scorrimento delle sfere, o dei rulli, riducendo sensibilmente gli attriti e il consumo delle parti in movimento
- protegge dissipa il calore che si crea a causa dello scorrimento e degli attriti.

La lubrificazione può essere realizzata sia tramite grasso sia tramite olio. Solitamente viene usata la lubrificazione a grasso, ma in alcuni casi specifici è preferibile quella ad olio.

1.3 IL PROCESSO PRODUTTIVO

Il processo produttivo delle gabbie relativo a SKF Avio-Aerospace è l'unico tra quelli presenti nel sito produttivo di Villar Perosa, che viene effettuato a partire dalla materia prima a barre o tubi di acciaio. Gli elementi volventi sono acquistati dall'esterno e subiscono quindi solo il controllo controllo accettazione. Gli anelli arrivano allo stabilimento come semi-lavorati dopo aver subito il trattamento termico.

Per quanto concerne la produzione di cuscinetti per applicazioni aeronautiche civili e militari, si hanno quindi le seguenti fasi produttive descritte nello schema.

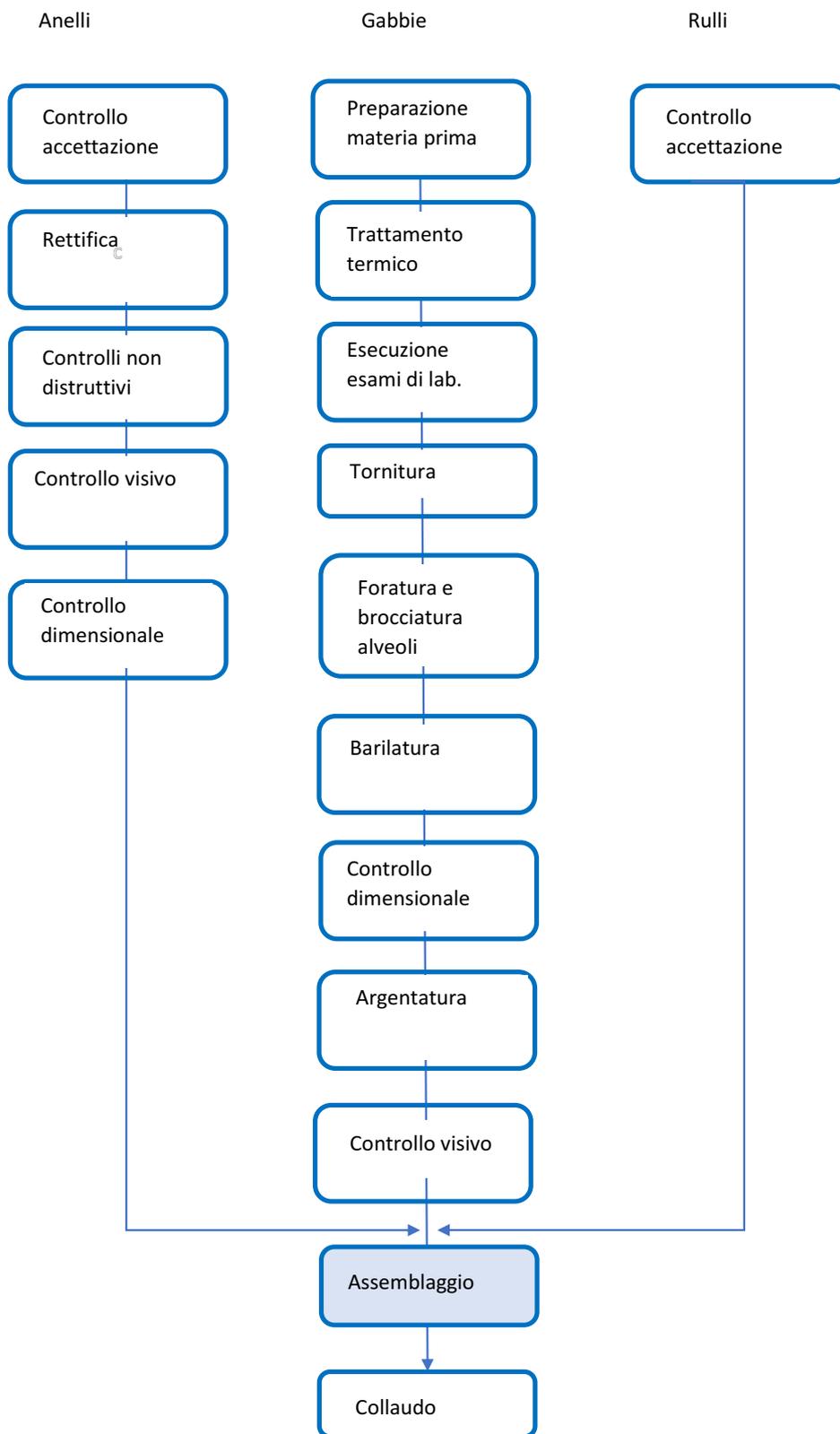


Figura 3 Processo produttivo cuscinetti – la fase di assemblaggio è approfondita in seguito

Anelli:

- **Controllo accettazione:** gli anelli sono forniti dal fornitore come semilavorati dopo aver subito il trattamento termico.



Figura 4 - Anello esterno dopo trattamento termico

- **Rettifica:** è un'operazione di asportazione di materiale realizzata generalmente tramite mole di rettifica con asporti di entità inferiore rispetto a quelli realizzati tramite tornitura poiché le caratteristiche del materiale in termini di lavorabilità sono cambiate dopo il trattamento termico e sono critiche per alcune superfici come la pista/gola di rotolamento dei corpi volenti. Le caratteristiche di alcune operazioni di rettifica per il loro impatto potenzialmente alto in termini di rischio per la funzionalità finale del cuscinetto sono fissate come parametri macchina significativi con i clienti per i quali sono realizzati i cuscinetti.



Figura 6 - Rettifica



Figura 5 - Anello interno rettificato

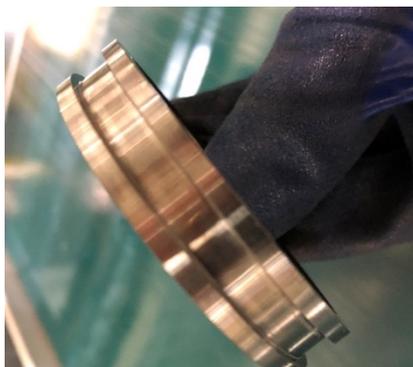


Figura 7 - Anello interno rifinito

- **Lappatura:** rifinitura della pista/gola degli anelli interni ed esterni con macchine che utilizzano pietre di materiale abrasivo che levigano la superficie dell'area lavorata. serve a conferire alle superfici determinate caratteristiche in termini di aspetto e rugosità superficiali.



Figura 8 - Lappatura



Figura 9 - Anello esterno lappato

- **Controlli non distruttivi:** sono operazioni di controllo che consentono di identificare eventuali problemi di bruciature e/o rotture sul materiale. Per gli anelli i controlli effettuati sono solitamente il controllo MPI e il controllo con attacco Nital. Il controllo MPI (Magnetic Particle Inspection) è utilizzato per la ricerca di indicazioni superficiali e subsuperficiali in pezzi metallici e si basa sull'attrazione di particelle ferromagnetiche e disperse in liquido attratte dal campo magnetico disperso in prossimità delle eventuali cricche. Consiste nella magnetizzazione del pezzo: in corrispondenza di indicazioni si manifesta una deviazione delle linee di forza magnetiche verso l'esterno formando così un flusso disperso. Cospargendo il pezzo con polveri magnetiche, sia a secco che in sospensione liquida, queste vengono attratte dall'indicazione. L'accumulo di tali polveri consente la rilevazione di essa. Per quanto riguarda l'attacco Nital invece, esso è un controllo non distruttivo che serve a

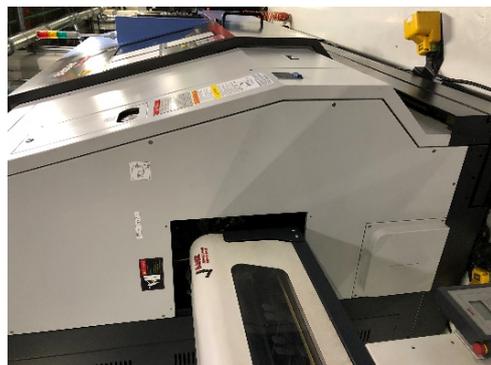
verificare che le operazioni rettifica non abbiano provocato locali variazioni della struttura (surriscaldamenti) o difetti. Il materiale immerso nell'acido nitrico assume una colorazione più scura e mette in evidenza eventuali difetti non visibili prima del trattamento.

Gabbie:

- **Preparazione materia prima:** consiste generalmente nel taglio delle barre di acciaio. La materia prima e la sua preparazione sono definite dalla configurazione del cuscinetto e dipendono dall'applicazione finale del cuscinetto.
- **Trattamento termico:** le gabbie subiscono diversi trattamenti termici che dopo la tornitura mirano a modificare le caratteristiche del materiale iniziale conferendo maggiore durezza. Tali processi definiti processi speciali in quanto critici sia per le caratteristiche finali delle gabbie, sia per il fatto che sono difficilmente controllabili, possono essere processi di cementazione, di tempra, rinvenimento e/o ulteriori processi speciali quali la nitrurazione in modo che gli anelli possano avere le caratteristiche di durezza richieste
- **Esecuzione esami di laboratorio:** sulla materia prima sono effettuate prove di durezza.
- **Tornitura:** tale lavorazione si basa sull'asportazione di materiale tramite macchine di tornitura che utilizzano tagliano le barre d'acciaio che, per asporti successivi, creano la forma delle semi-gabbie. In questa fase vengono impiegati macchine utensili quali torni automatici, foratrici, ecc...



Figura 11 - Barre di acciaio



- **Foratura e brocciatura alveoli:** in

questa fase sono creati gli alveoli.

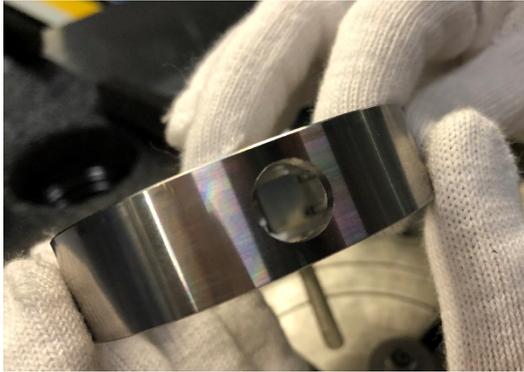


Figura 12 - Gabbia forata

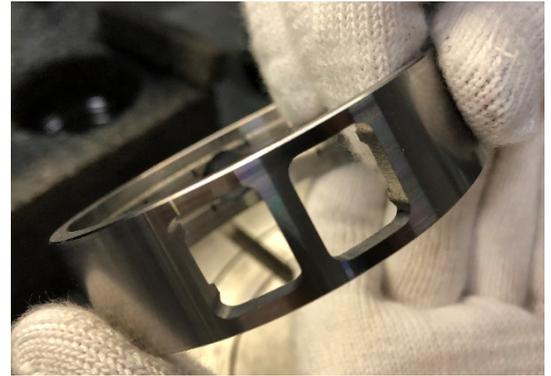


Figura 13- Gabbia con alveoli



Figura 14- Gabbia dopo la tornitura

- **Barilatura:** serve a conferire alle superfici determinate caratteristiche in termini di aspetto e rugosità superficiali. In questa fase sono inseriti le gabbie in buratti con materiale abrasivo e lucidante che agiscono in modo diffuso su tutte le superfici degli anelli interni ed esterni.
- **Controlli non distruttivi:** in questo caso i controlli non distruttivi corrispondono all' FPI (Fluorescent Particle Inspection). L'ispezione con penetrante fluorescente è un tipo di ispezione con penetrante in cui un colorante fluorescente viene applicato sulla superficie di un materiale non poroso al fine di rilevare difetti che possono compromettere l'integrità o la qualità della parte in questione.
- **Argentatura:** il trattamento superficiale della gabbia serve a conferire alle gabbie una migliore capacità di lubrificazione all'interno del cuscinetto.

- **Controllo visivo (e dimensionale):** L'ispezione visiva è realizzata da personale esperto e formato con lo scopo di individuare difetti visivi che in relazione alle esigenze cliente sono ritenuti inaccettabili ed in alcuni casi possono anche avere conseguenze non solo cosmetiche, bensì funzionali sui cuscinetti. Gli anelli che hanno superato con successo l'ispezione visiva sono controllati dimensionalmente con strumenti di misura atti a determinarne le reali dimensioni in condizioni controllate di temperatura ed umidità e sempre da personale formato ed esperto.



Figura 16 - Controllo visivo

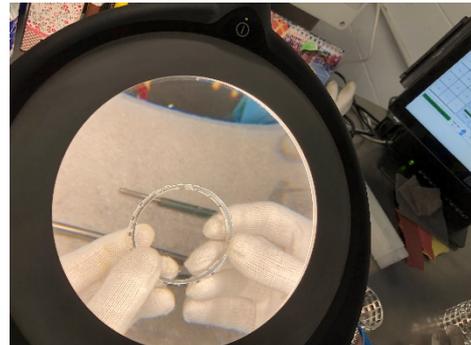


Figura 15 -Controllo visivo con lente

Cuscinetto:

- **Assemblaggio e collaudo:** gli anelli conformi sempre nell'area del collaudo finale passano alla fase dell'assemblaggio e con i corpi volventi e le gabbie saranno composti a creare il cuscinetto. Lavaggio finale, protezione e confezionatura. Sono le ultime operazioni realizzate sul cuscinetto assemblato e ne devono garantire le caratteristiche di pulizia, di preservazione e poi di conformità durante il trasporto al cliente finale



Figura 17 - Cuscinetto finito

1.4 PRINCIPALI DIFETTI VISIVI RICONTRABILI IN UN CUSCINETTO

I difetti riscontrabili in un cuscinetto per l'applicazione aerospaziale sono di seguito classificati e analizzati in base al potenziale danno che possono creare. Una visione di insieme delle problematiche che si possono presentare ai diversi step del processo produttivo consente di comprendere meglio il processo e quindi agire consapevolmente per migliorarlo.

1.4.1 DIFETTI DIMENSIONALI

I parametri dimensionali controllati sono molteplici. Sono stati analizzati tuttavia gli ultimi scarti significativi che si sono presentati in numerosità abbastanza elevate.

Diametro interno gabbie/anelli: può capitare che il tampone utilizzato in fase di fresatura sia troppo grande o troppo piccolo rispetto al diametro foro del componente e deformi il componente stesso. Nel caso sia troppo grande lo smontaggio dallo stampo richiede una leggera pressione che lo ovalizza e porta le misure del diametro fuori tolleranza. Potrebbero verificarsi scarti per un valore fuori tolleranza di diametro anche nel caso in cui il componente, ancora ad alta temperatura, consente una deformazione durante la lavorazione.

Diametro esterno gabbie: il difetto si può presentare in fase di sgrossatura a causa del segno dell'utensile sullo smusso oppure alle barre di acciaio provenienti dal fornitore non perfettamente dritte e che quindi non consentono la lavorazione corretta. Quest'ultimo problema potrebbe causare anche scarti dopo il controllo del parallelismo.

Diametro esterno anelli: nel caso degli anelli, il problema dimensionale sul diametro esterno si presenta spesso perché sono al limite di tolleranza ancora prima di subire il trattamento di attacco Nital e barilatura, che asportano ancora ulteriore sovrametallo.

Planarità: nelle gabbie problemi di planarità si possono verificare prima dell'argentatura a causa di uno scorretto taglio delle barre di acciaio oppure dopo l'argentatura per uno strato di argento non uniforme. Per ovviare a questo problema, dopo l'argentatura la gabbia è carteggiata manualmente dall'operatore su carta vetro.

Nel caso in cui il componente sia di bronzo oppure ottone, la difficoltà nella carteggiatura manuale è maggiore perché un'eccessiva forza durante l'operazione può aumentare la rugosità della superficie e alterarne la planarità.

1.4.2 DIFETTI DI MATERIALE

Difetti di materia prima: potrebbero verificarsi scarti a causa della composizione della materia prima o della sua porosità. In quest'ultimo caso il materiale presenta dei buchi che sono percepiti durante il Fluorescent Penetrant Inspection e il Magnetic Particle Inspection.

Difetti di trattamento termico: il trattamento termico può causare scarti nel caso in cui non è impostato il ciclo corretto per la temperatura del forno.

Rivestimento di argento gabbie: Si possono verificare scarti nel caso in cui il rivestimento di argento non aderisce bene sul materiale del componente e, di conseguenza, si toglie. Per anticipare il problema, è effettuato un test di aderenza su un lamierino di prova che è argentato nello stesso trattamento delle gabbie.

Se il test di aderenza non ha i risultati attesi, i componenti devono essere disargentati e riargentati. In questo caso è necessario che siano lasciate nell'acido per il tempo prestabilito perché non sia rovinato l'acciaio.

Inclusioni: si verificano quando avviene l'imprigionamento di una particella di materia estranea nel materiale di una parte o del suo rivestimento.



Figura 18- Esempio di inclusione

Nel caso analizzato il problema potrebbe essere dovuto anche alla materia prima. Questo particolare difetto potrebbe diventare anche funzionale se il materiale utilizzato non ha tutte le caratteristiche richieste dal cliente.

Corrosione: cavità sulla superficie circondate da un'area scolorita (ossidazione). La semplice presenza di un gruppo di cavità, non accompagnate da scolorimento, non è necessariamente un'indicazione di un precedente stato di ossidazione o di corrosione. Tali difetti non sono mai accettabili, poiché danneggiano la struttura del materiale indebolendola.



Figura 19- Esempio di corrosione

Cricche: sono distaccamenti, crepe o rotture caratterizzata da angoli vivi o da bruschi cambiamenti di direzione. L'eventuale presenza di cricche sul materiale è motivo di scarto. Il materiale è infatti controllato tramite processo FPI, con il quale i liquidi fluorescenti, penetrando nelle eventuali cricche, riescono ad evidenziarne la presenza.

1.4.3 DIFETTI ESTETICI

Macchie: sono segni di colore diverso sul componente che tuttavia non ne alterano l'uniformità della superficie e non sono percepibili con la scriber. Nel caso analizzato lo scarto si è creato durante la deidrogenazione perché il forno non era stato correttamente ripulito dopo i

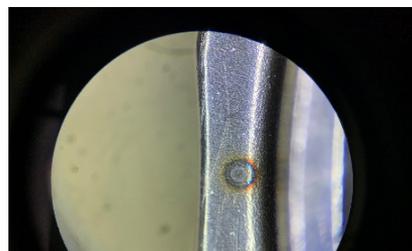


Figura 20-Esempio di macchie

trattamenti precedenti. Le polveri sono così entrate in circolo per poi depositarsi lasciando il segno sul componente.

Ammaccature: Segni incassati o in rilievo sulla superficie causati dall'impatto meccanico contro del materiale come per urto o pressione da oggetti duri che entrano in contatto con la superficie finita.



Figura 21-Esempio di ammaccatura

Colorazione alterata: la superficie presenta una variazione di colorazione derivante da calore o riscaldamento di superfici metalliche generate durante il trattamento termico:

- Giallo paglierino: temperatura media
- Violaacea: alta temperatura.

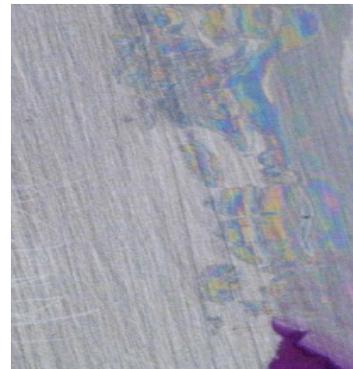


Figura 22- Esempio di colorazione alterata

Scolarazione: Variazioni di tonalità di colore sulle superfici di rivestimento (Es: cadmio, zinco-nichel) generate durante le operazioni di deidrogenazione.

Pitting (Cavità): Piccole cavità superficiali solitamente di forma circolare, senza scolorimento intorno al perimetro che di solito è di colore scuro



Figura 23- Esempio di pitting

Graffi: alterazioni dello strato superficiale degli anelli e/o degli elementi volventi e/o delle gabbie dovute a strofinamento fra superfici con diversa durezza



Figura 24- Esempio di graffi

Tutti i difetti descritti possono essere generati durante il processo di manipolazione dei componenti da parte dei robot per cui ad esempio tutte le “prese” sono state costruite con materiale “tenero” rispetto agli acciai degli anelli, agli acciai, ottone o bronzo per le gabbie, o acciai per i rulli/ sfere. Inoltre, anche il tempo di permanenza dei componenti nel magazzino temporaneo è stato stabilito in modo da evitare il generarsi di corrosione e pitting.

I componenti provenienti nell’area dell’Automatic Assembly sono infatti già stati ispezionati visivamente e valutati conformi per cui qualsiasi danneggiamento deve essere evitato.

1.4.4 DIFETTI FUNZIONALI

Difetti di chiodatura gabbie: possono verificarsi scarti dopo la fase di chiodatura delle gabbie perché i rivetti non coprono perfettamente il foro chiodo. Nel caso in cui il chiodo abbia gioco per muoversi, la gabbia potrebbe potenzialmente torcersi e di conseguenza rompersi. Il difetto è causato da una foratura scorretta o perché i chiodi utilizzati sono conici o deformati. La presenza di residui di argento nei fori potrebbe avere lo stesso effetto.

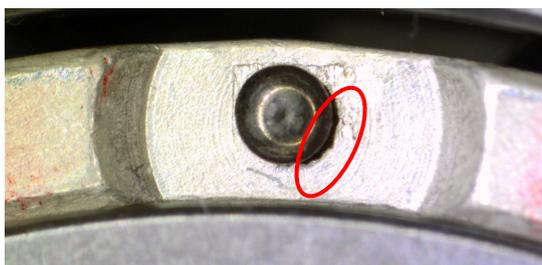


Figura 26-Esempio di rivettatura non conforme



Figura 25- Esempio di rivettatura non conforme

Per i chiodi sono contati negli scarti anche i seguenti difetti:

- Chiodi mancanti, allentati o privi della testa.
- Tutte le teste dei chiodi sullo stesso lato della gabbia non generalmente uniformi.
- Fori dei chiodi sulla gabbia non completamente coperti dalle teste dei chiodi.
- Bavature residue o metallo sulle teste dei chiodi.
- Teste dei chiodi screpolate o spaccate

Irregolarità dei raccordi rulli: rigature di lavorazione di macchina, ammaccature, intaccature ed impronte o strappi sulle superfici dei raccordi che si prolungano sulla superficie cilindrica del rullo o sulle testate

Bavatura: Materiale presente all'intersezione di due diverse lavorazioni, che crea particelle di metallo che possono staccarsi. Tali particelle sono particolarmente insidiose poiché possono generare del FOD, ossia del materiale estraneo nel cuscinetto che può comprometterne la funzionalità (esempio riduzione della scorrevolezza del cuscinetto).

Brucciature di rettifica: alterazione della superficie generata da un'azione meccanica eccessiva sulla superficie da parte della mola che può alterare visivamente la superficie e che è evidenziata tramite controlli non distruttivi come l'attacco Nital e che non solo cambia visivamente la superficie interessata, ma soprattutto altera le caratteristiche meccaniche del materiale fragilizzandolo.

Giochi assiale e radiale: nel caso in cui i giochi non siano corretti, il fluente movimento di rotazione del cuscinetto è ostacolato. Uno scarto si può in questo caso verificare se non sono stati correttamente abbinati gli anelli esterno ed interno. Entrambi i diametri di essi infatti hanno una tolleranza e quindi l'appaiatura deve essere scelta in base alle misure degli anelli.

Implementare una linea automatica per la misurazione e poi l'assemblaggio di una particolare tipologia di cuscinetti ha significato studiare delle modalità di manipolazione dei componenti dedicate in grado di evitare il prodursi di potenziali danni ai componenti durante le fasi prima ricordate.

CAPITOLO 2

2.1 QUALITY MANAGEMENT SYSTEM - SIX SIGMA

Obbiettivo dell'ente Qualità SKF è l'applicazione della strategia di gestione del metodo Six Sigma, una metodologia adatta nell'ambito qualità che mira all'eliminazione dei difetti e degli sprechi attraverso la stabilizzazione dei processi piuttosto che il semplice miglioramento della prestazione media. La metodologia Six Sigma ha come obbiettivo quello di migliorare la qualità dell'output identificando e rimuovendo le cause di variabilità che possono generare dei difetti e minimizzando la stessa variabilità dei processi di produzione. Dal punto di vista operativo non è altro che un'applicazione rigorosa, fortemente orientata all'obbiettivo e altamente efficiente, di tecniche statistiche per l'analisi di vari fattori per il raggiungimento e soprattutto il mantenimento nel tempo di un miglioramento.

Applicando il Sei Sigma, i team delle organizzazioni implementano strategie basate su dati di misurazione e metriche. Storicamente le decisioni erano prese sulla base dell'intuizione e dell'esperienza. Al contrario di come si potrebbe credere, il metodo Sei Sigma non rimuove la necessità di fare affidamento su una leadership esperta e non nega l'importanza dell'intuizione, ma lavora su competenze e conoscenze per creare un fondamento matematico e statistico utile a prendere le decisioni in maniera consapevole.

La metodologia consente inoltre di identificare i problemi, fare assunzioni valide, proporre quindi soluzioni tramite il brainstorming, pianificare le azioni per evitare conseguenze inattese. Applicando strumenti quali analisi statistica, process mapping a problemi e soluzioni, il team può visualizzare e prevedere cosa accadrà con un alto grado di accuratezza, facendo sì che le decisioni siano prese con il minimo rischio finanziario.

La teoria afferma che l'obbiettivo da raggiungere è quello di avere 6 deviazioni standard tra il limite superiore di specifica e il centro della produzione e altrettanto tra questo e il limite inferiore. In altre parole, la produzione deve avere come obbiettivo una deviazione standard non superiore a un dodicesimo dell'intervallo di specifica. In questo ambito i limiti di specifica

superiore ed inferiore sono i requisiti che il “cliente” richiede per i parametri a disegno o a specifica.

Tecnicamente in un processo Sei Sigma ci sono solo 3.4 difetti per ogni milione. In percentuale questo significa che il 99.9997% della produzione proveniente da questo processo non presenta difetti. Il processo può essere definito “perfetto”.

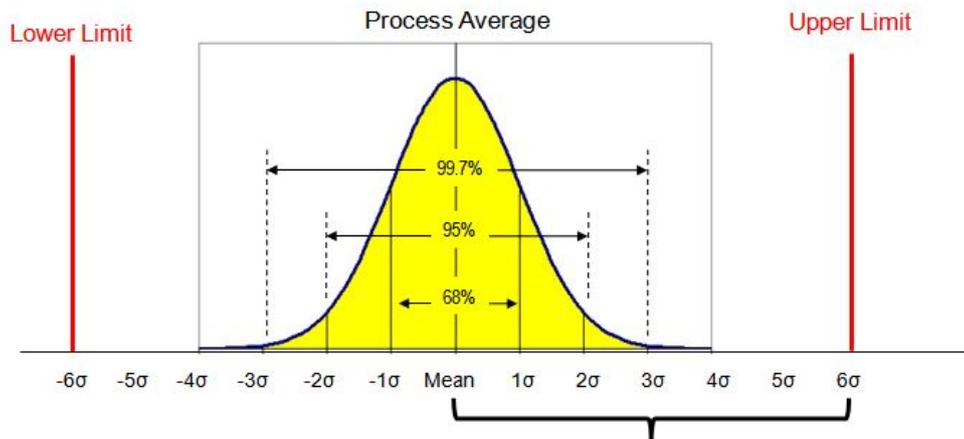


Figura 27-Percentuale di difettosità in base alla dispersione

La metodologia 6 Sigma sopra descritta è implementata all'interno del gruppo SKF attraverso la formazione di figure professionali specifiche definite Black Belts, Green Belts e White Belts la cui identificazione è correlata al grado di approfondimento raggiunto nella metodologia stessa nell'ambito di un quadro formativo specifico. Dal Black Belt al White Belt i contenuti statistici correlati all'approccio DMAIC sono di livello decrescente: nel primo caso la formazione prevede 4 settimane di corso e l'esame con la chiusura di due progetti, mentre nel caso dei White la formazione è di 2 giornate con la chiusura di due progetti attraverso l'utilizzo del form A3.

2.2 PRINCIPI DEL SEI SIGMA

Le organizzazioni possono impattare sul livello di Sei Sigma integrando alcuni principi nel sistema di gestione della qualità e dei processi. Tali punti fondamentali sono descritti di seguito:

- Miglioramento focalizzato sul cliente: un principio primario della metodologia è il focus sul cliente. Sono importanti i metodi per stabilire cosa il cliente si aspetta dal prodotto

o dal processo. Combinando questa conoscenza con misure statistiche e metodi di miglioramento del processo, le organizzazioni possono aumentare la soddisfazione del cliente e quindi aumentare i profitti, mantenere il cliente stesso nel tempo e creare con questo un rapporto di fiducia.

- Miglioramento continuo del processo: inerente al metodo Sei Sigma è il miglioramento continuo del processo. Un'organizzazione che adotta completamente la metodologia non smette mai di migliorarsi, identifica e prioritizza le aree in cui vi è opportunità di farlo su base continua. L'obiettivo è avvicinarsi sempre di più alla "perfezione" in tutti i processi pur mantenendo gli altri obiettivi e requisiti.
- Variabilità: uno dei modi per il miglioramento è la riduzione della variabilità
- Riduzione degli sprechi: riducendo gli sprechi (prodotti, azioni, persone che non sono necessari al raggiungimento del risultato), si riducono il tempo di processo, le opportunità di errore e i costi in eccesso. Il concetto di scarto deriva da una metodologia conosciuta come Lean Process Management.
- Controllo del processo: spesso il miglioramento è applicato a processi fuori controllo, che quindi seguono specifici requisiti statistici. L'obiettivo è riportare il processo in uno stato di controllo statistico. Dopo che il miglioramento è implementato, gli strumenti del Sei Sigma sono utilizzati per assicurarsi che il processo rimanga in controllo. Parte del processo di miglioramento continuo è valutare che i controlli siano messi in atto e che le persone addette ad essi abbiano tutte le conoscenze necessarie a farli.

2.3 IL CICLO PLAN-DO-CHECK-ACT

Sebbene il Continuous Improvement sia spesso associato al sistema di produzione Toyota, ha le sue origini nel ciclo Plan-Do-Check-Act ("Ciclo PDCA") pubblicato da W. Edwards Deming. In quattro fasi, descrive un approccio sistematico per la soluzione creativa dei problemi. Tale

processo è anche richiamato all'interno dello standard di riferimento dell'Aerospace: l'AS9100 rev.D.

Il ciclo di miglioramento inizia con la fase del Piano, in cui si descrive un problema che si verifica. Nel secondo passaggio, vengono analizzati i fattori che influenzano il problema.

In questo processo, un problema per lo più complesso viene suddiviso passo dopo passo fino a quando la causa non può essere individuata e quindi rimossa o ridotta. Una volta che si è definito il problema ed identificata la causa principale, sono sviluppate soluzioni comuni per una soluzione sostenibile al problema e vengono pianificate misure appropriate. Il Continuous Improvement si basa su una cultura di problem solving collaborativo. Attraverso miglioramenti quotidiani, si sviluppa una profonda comprensione dei processi e si esaminano i sintomi dei processi inefficienti si identificano le cause alla radice nascoste per poi eliminarle.

Nella seconda fase, la fase Do, vengono implementate le misure inizialmente definite. Questi miglioramenti vengono fatti in molti piccoli passi invece di salti radicali ma che richiedono tempo. Sperimentando in brevi cicli, si è in grado di osservare gli effetti diretti dei cambiamenti. La fase di controllo (Check) mira a rivedere i progressi nell'attuazione. A tal fine, il successo delle misure attuate viene confrontato con la condizione target definita nella fase del Plan. La trasparenza delle condizioni di un processo e dei suoi progressi nell'attuazione è possibile solo misurando e visualizzando apertamente obiettivi e risultati. Una volta implementata una soluzione, inizia la fase di Act e quindi la riflessione sui risultati raggiunti. Vengono stabiliti nuovi standard di processo organizzativo e le conoscenze acquisite sono il punto di partenza per un nuovo ciclo di miglioramento a un livello superiore.

Ripetendo costantemente il ciclo PDCA, tutti i processi all'interno di un'organizzazione diventano sempre più efficienti e si possono mantenere gli standard raggiunti. Attraverso il miglioramento continuo, si è sempre in una fase di revisione e apprendimento che porta a uno sviluppo continuo e agile dell'intera organizzazione.

Dopo la seconda guerra mondiale, Deming lavorò in Giappone a nome del governo degli Stati Uniti con diverse mansioni. Durante questo periodo divenne un valido insegnante e consulente di compagnie giapponesi radicando le idee e i concetti che presto sarebbero diventate parte del Toyota Production System o Lean Six Sigma.

2.4 ALTRI PROGRAMMI FORMALI PER IL CONTROLLO DELLA QUALITA' E DEL PROCESSO

La metodologia Sei Sigma è solo una delle numerose iniziative orientate alla qualità che sono state messe in atto nel secolo passato. In realtà tutte sono state comunque orientate a fare più profitto possibile con la massima attenzione verso il cliente.

I programmi descritti di seguito possono fornire un valore aggiunto al Sei Sigma.

- **Lean Process Management:** I principi del Lean vanno spesso di pari passo con quelli del Sei Sigma. Sebbene il Lean si sviluppò originariamente come concetto di riduzione degli sprechi in un ambiente di produzione, le idee di Lean Process Management possono essere applicate ad ogni processo che coinvolge la creazione di beni e servizi.

Una delle similarità tra Lean e Sei Sigma riguarda il miglioramento continuo. Uno degli strumenti utilizzati in questo caso è chiamato Kaizen, una parola giapponese che può essere tradotta come “cambiamento in meglio”. Lo scopo è eliminare gli sprechi e/o creare sempre maggiore valore per il cliente.

- **Total Quality Management (TQM):** L’approccio formale TQM alla qualità è uno dei primi messi in atto negli Stati Uniti. Originariamente sviluppato nel 1950, non divenne popolare prima del 1980. Ad un certo punto il metodo acquistò importanza tra i leader, anche se non credevano che le spese e gli sforzi destinati alla qualità, non avrebbero portato ad un uguale beneficio. I risultati diretti di questo programma furono poco brillanti ma questo fu un passaggio importante per lo sviluppo di altri sistemi di gestione della qualità successivi come, ad esempio, il Sei Sigma. I risultati del TQM dipesero comunque molto dal tipo di organizzazione. Il metodo è applicato ancora oggi in molte industrie.

Alcuni requisiti per un programma TQM che abbia successo sono i seguenti;

- Un rigoroso impegno per la qualità a tutti i livelli dell’organizzazione, specialmente tra i leader.
- Lavoratori autorizzati a prendere decisioni di qualità durante il loro lavoro senza avere necessariamente l’approvazione della direzione
- Una struttura che riconosca e ricompensi i lavoratori in modo che siano incentivati a prendere decisioni nell’ottica della qualità

- Programma strategico che tenga conto degli obiettivi della qualità nelle decisioni a lungo termine.

- Sistema che consenta il miglioramento e monitori costantemente la qualità

Uno dei più grandi vantaggi della mentalità TQM è che essa costringe le organizzazioni a vedersi come un'unica entità invece che tanti settori separati. Prima dei metodi di qualità sviluppatosi nella seconda metà del ventesimo secolo, le organizzazioni erano divise in dipartimenti che comunicavano poco gli uni con gli altri e questo causava un maggior numero di rilavorazioni e di sprechi.

Con il TQM, i leader cominciarono a vedere la Compagnia come una serie di processi collegati operanti con un unico obiettivo comune.

- Business Process reengineering: la riorganizzazione tecnica del processo non si focalizza particolarmente sull'incremento della qualità ma si concentra invece su un cambiamento radicale all'interno dell'organizzazione o nell'architettura del processo. L'automazione dei processi introdotti dopo il BPR, ha fatto sì che le organizzazioni necessitassero di un numero sempre maggiore di risorse tecniche sia interne per la programmazione che esterne, come ad esempio sviluppatori di nuovi software.

2.5 METODO DMAIC

Al fine di poter meglio contestualizzare l'attività di sviluppo che è stata seguita internamente all'SKF Avio è di seguito presentata una breve descrizione della metodologia seguita per supportare l'attività di creazione della nuova linea automatica.

La metodologia applicata al miglioramento dei processi esistenti è definita DMAIC, e si svolge in accordo ai seguenti passi:

- Definire (Define): In questa fase il gruppo di lavoro deve identificare il processo o prodotto da migliorare, traducendo i bisogni del cliente in requisiti misurabili, stabilendo la base di partenza e il punto di arrivo.
- Misurare (Measure): la fase di misura serve a valutare se i dati disponibili sono utili a determinare una situazione di partenza e a verificare che si possa fare affidamento su di essi.

Con la fase di misura i dati disponibili creano la “baseline” individuandone la metrica e definendo più in dettaglio le esigenze di raccolta e le modalità.

- Analizzare (Analyze): la fase di analisi ha lo scopo di identificare la causa radice della deviazione che usualmente è identificata come un problema. La fase di analisi prevede l'utilizzo di strumenti statistici che possono convalidare le ipotesi iniziali e dunque identificare la causa e non i sintomi del problema.
- Migliorare (Improve): in questa fase, in base alla causa radice identificata, si definiscono una o più azioni correttive che riducono la variabilità del processo. Le azioni correttive devono essere implementate e standardizzate, ossia rese stabili nel tempo.
- Controllare: è la fase in cui è necessario controllare che i nuovi standard siano mantenuti attraverso il monitoraggio di parametri che si sono identificati nella fase del Define. In tale fase si deve valutare l'estensione delle azioni implementate ai processi simili al fine di mantenere i miglioramenti ottenuti.

Il lavoro eseguito ha visto l'implementazione di tutte le fasi precedentemente descritte.

Metodologia del DMAIC:

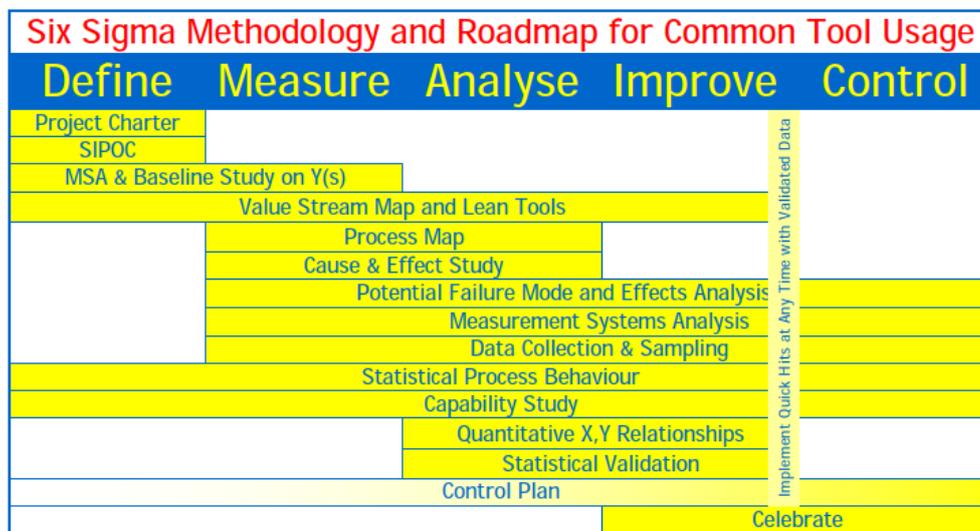


Figura 28- Strumenti per applicazione del metodo DMAIC – SKF Business Excellence

I progetti prevedono inoltre che le Belts utilizzino degli strumenti specifici e definiti per ciascuna fase in modo tale da garantire che le analisi, le conclusioni e le azioni implementate

siano necessariamente basate su dati oggettivi. Lo scopo è quello di evitare le cosiddette “decisioni di pancia”, ossia curare i sintomi e non la malattia reale, sfruttando un’analogia con le scienze mediche.

CAPITOLO 3

3.1 ASSEMBLAGGIO AUTOMATICO CUSCINETTI – LA LINEA

Nel corso degli ultimi anni SKF Avio, seguito dall'evoluzione dell'Industria 4.0, ha avvertito la necessità di sfruttare al meglio le nuove tecnologie disponibili, come la robotica, e la possibilità di utilizzare macchine intelligenti programmate per azioni/attività ripetitive capaci di rispondere alle esigenze di riduzione del cosiddetto HF (Human Factor) ed al contestuale aumento dei volumi di produzione. In questo contesto, l'organizzazione ha ottenuto gli investimenti per creare una linea di assemblaggio automatico.

Al crescere dei volumi del settore aerospace all'interno dell'azienda, la nuova linea di assemblaggio automatico mira a sostituire parte dell'assemblaggio manuale previsto nel processo di produzione originario, in modo da consentire l'impiego degli operatori in operazioni di assemblaggio più complesse e a maggiore valore aggiunto.

L'installazione di una linea automatica risponde alla necessità di ridurre i tempi delle operazioni di appaiatura di anelli interni ed esterni e relative misure per migliorare l'indicatore delle On Time Delivery (consegne nel tempo previsto).

In accordo con la metodologia Six Sigma ed alle esigenze dei clienti di gestione del cambiamento, si è aperto un progetto dedicato che potesse condurre ad un effettivo miglioramento del processo.

La linea gestisce come input gli anelli interni ed esterni provenienti dalla rettifica, gabbie finite e rulli finiti. Durante il processo, la linea controlla i principali parametri dimensionali degli anelli e l'ovalità per le gabbie. L'appaiatura degli anelli avviene tenendo in considerazione le dimensioni della pista degli stessi. Un sistema di calcolo ed il software della linea, sulla base dei dati dimensionali, calcola l'appaiatura teorica dei componenti e quindi li assembla. Ciò è reso possibile dalla serializzazione degli anelli e della gabbia.

Le macchine di misurazione installate sono tre, ognuna delle quali misura parametri diversi:

- CMM
- Visual machine A
- Visual machine B

All'interno della linea c'è un magazzino intermedio in cui sono stoccati gli anelli interni e le gabbie risultati conformi al controllo dimensionale prima dell'assemblaggio. Di seguito illustrato il ciclo della linea di assemblaggio con la relativa legenda:

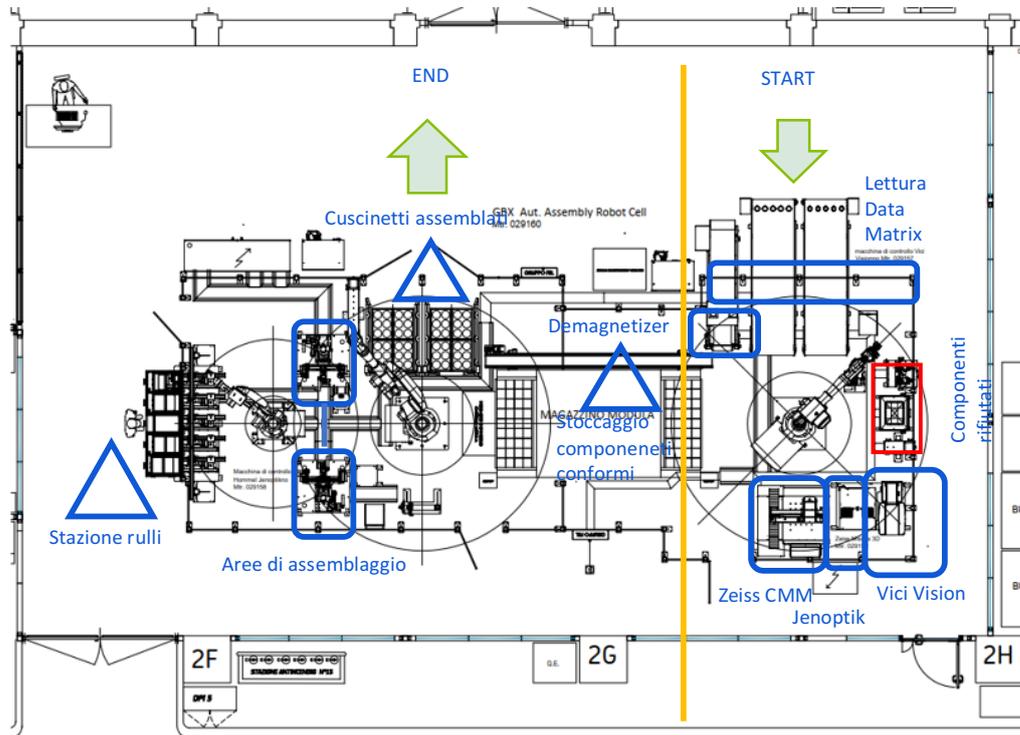


Figura 29 - Linea di assemblaggio automatico e relativa legenda

-  = Posizionamento macchine
-  = Componenti non conformi
-  = magazzino e /o WIP
-  = appaiatura teorica

Il processo di assemblaggio comincia con l'ingresso in linea degli anelli provenienti dalla rettifica dopo il lavaggio e delle gabbie finite e comprende i seguenti step:

- Controllo dimensionale automatico per anelli interni, anelli esterni e gabbie
- Stoccaggio magazzino intermedio
- Appaiatura teorica
- Creazione set di rulli
- Assemblaggio cuscinetto

Controllo dimensionale automatico per anelli interni e gabbie: i componenti entrano nella linea per i controlli dimensionali automatici. La lettura del data matrix permette di associare i valori misurati al componente nel sistema.



Figura 31 - Ingresso dei componenti in linea



Figura 30 - Ingresso dei componenti in linea

I controlli dimensionali sono effettuati dalle tre macchine sopra citate e i componenti non conformi sono scartati.

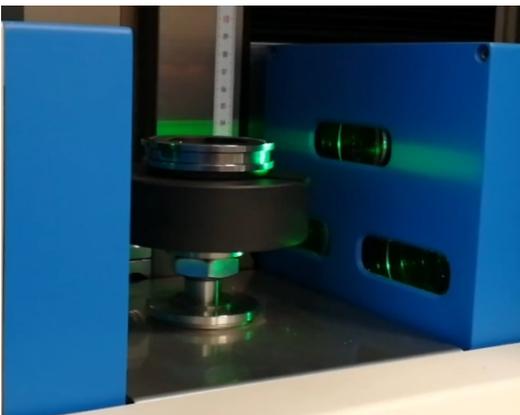


Figura 33 - Misurazione automatica laser anello interno



Figura 32 - Misurazione automatica anello interno



Figura 34 - Misurazione automatica gabbia

Stoccaggio magazzino intermedio e appaiatura teorica: dopo esser stati misurati, i componenti sono stoccati nel magazzino automatico intermedio, in attesa di essere appaiati.



Figura 35 - Stoccaggio magazzino intermedio

Creazione set di rulli: Una volta che l'appaiatura teorica è avvenuta, la linea procede all'assemblaggio.



Figura 36 - Creazione set di rulli

Assemblaggio cuscinetto: Una volta che l'appaiatura teorica è avvenuta, la linea procede all'assemblaggio.



Figura 38 - Assemblaggio automatico

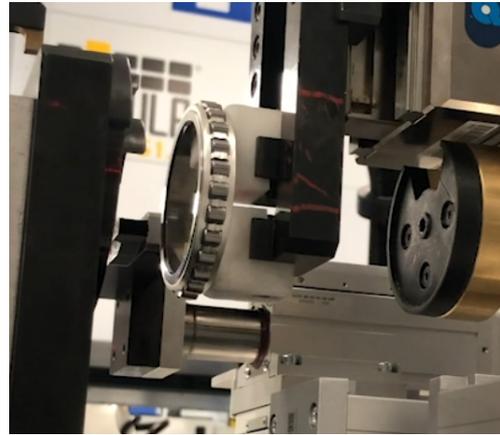


Figura 37 - Assemblaggio automatico - inserimento dei rulli

In alcuni casi la linea è utilizzata solo per l'appaiatura teorica, l'assemblaggio vero e proprio è effettuato manualmente dall'operatore a fine processo. In questo caso si hanno in uscita dal processo i componenti appaiati già nelle scatole, come illustrato in figura.



Figura 39 - Appaiatura anelli per l'assemblaggio finale manuale

La linea è stata sviluppata per cuscinetti di piccole dimensioni e prodotti in grande quantità perché il processo è più standard e sono quelli per i quali l'assemblaggio occupa un numero di risorse per un maggior lasso temporale. Il personale del collaudo finale può così focalizzarsi sulle attività per i cuscinetti più complessi e con lotti di minore quantità.

Come spiegato precedentemente l'assemblaggio del cuscinetto è guidato da alcuni parametri chiave come i giochi radiali ed assiali e che devono consentire nel rispetto di tali parametri di avere il minor numero possibile di anelli non appaiati.

Al fine di garantire che il software abbia correttamente eseguito l'”accoppiamento degli anelli” stanti le dimensioni dei rulli, il controllo finale del parametro di gioco radiale e/o assiale è invece svolto manualmente all'esterno della linea.

Punto fondamentale della fase di definizione è stata la creazione di un team multidisciplinare in grado di garantire una conoscenza opportuna sia per considerare i potenziali difetti tecnici, sia quelli qualitativi e sia quelli commerciali.

Ciascuna fase come già detto ha previsto l'utilizzo di strumenti definiti.

Di seguito la descrizione di quanto ho potuto sperimentare in termini di strumenti standard.

3.1.1 SCHEMA SIPOC

Il primo strumento utilizzato è stato il SIPOC.

Lo schema SIPOC è stato introdotto alla fine degli anni '80 nel Total Quality Management (TQM). È uno strumento consente a un team di visualizzare il proprio processo rispetto a input, output e fornitori. Fornisce l'ambito del e mostra i limiti del processo. Inoltre, aiuta a identificare la relazione tra fornitore, input e processo; e dà visibilità dei clienti e delle loro esigenze.

Il modello è il seguente:

- Fornitori (Suppliers): gli input e le risorse utilizzati nel processo sarebbero forniti internamente o da fornitori esterni.
- Input: sono le risorse richieste dal processo e i requisiti numerici in ingresso.
- Processo: descrizione delle attività a livello alto.
- Output: I risultati sono i prodotti finali o i risultati finali che vengono dopo la lavorazione. Comprendono anche i requisiti numerici in uscita dal processo. Se l'elaborazione e gli input non sono all'altezza, l'output avrà esito negativo.

- Clienti: i clienti sono coloro che fissano i requisiti dei prodotti del processo e possono essere interni o esterni. I clienti interni sono le parti interessate e i clienti esterni sono i clienti finali che utilizzano il prodotto finale.

Potrebbe esserci la possibilità di ricevere input errati. È possibile che gli output non siano soddisfacenti a causa di errori di comunicazione o dell'incapacità di interpretare correttamente i requisiti del cliente.

Lo schema SIPOC fornisce quindi un'introduzione agli input ed agli output previsti del processo.

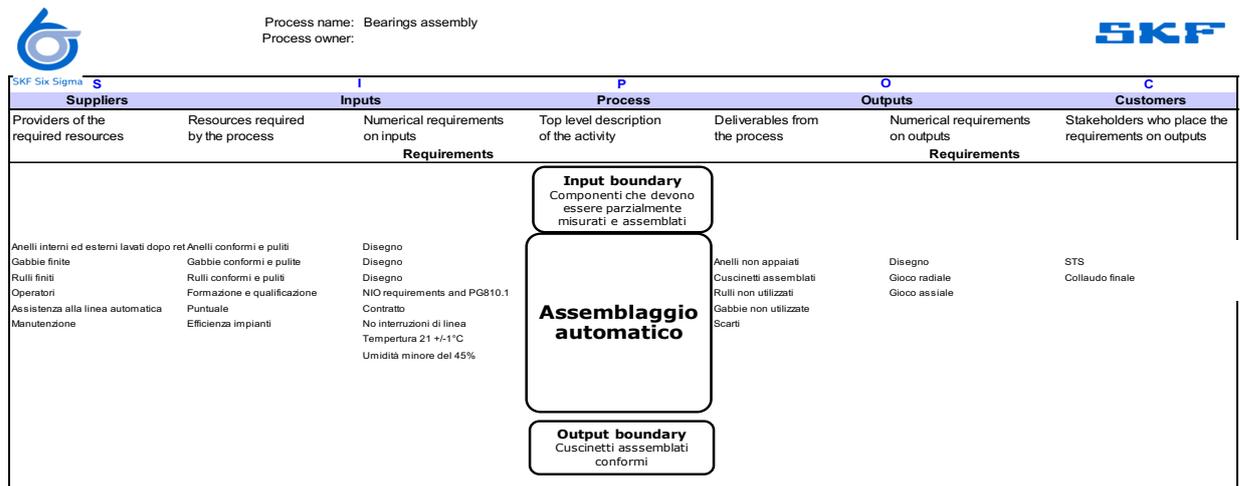


Figura 40 - Schema SIPOC

Un altro strumento utilizzato è lo strumento della definizione del problema.

Se ne può vedere un esempio sotto.

Work Package Definition - what is the problem and how is it quantified	
Key Process Output (KPO)	L' output chiave di processo (Key Process Output) è rappresentato dal cuscinetto assemblato conforme.
Customer	Safran Transmission System: lavoro per la validazione da parte del cliente
KPO Requirement	Cuscinetti assemblati correttamente: con component conformi e giochi finali (assiale e radiale) in tolleranza.
Defect Definition	Cuscinetti non conformi: Gioco assiale e radiale fuori tolleranza.
Business Benefits	Miglioramento dell'efficienza del collaudo finale che può così focalizzarsi sulle attività per il processo di cuscinetti più complessi e prodotti in minore numerosità.

Figura 41- Definizione del problema - Work Package Definition

3.2 MISURAZIONE – IL PROCESSO DI ASSEMBLAGGIO

Dopo che il team interdisciplinare ha chiarito la definizione del problema da analizzare ed i termini del processo per INPUT e OUTPUT con dati oggettivi, è passato alla fase successiva della misurazione.

L'analisi per la fase di misurazione ha previsto la valutazione del processo di assemblaggio per comprendere quali fossero i punti in comune col processo manuale esistente ed i cambiamenti. Ciò ha comportato la raccolta dati relativi alle tipologie impattate, ai volumi coinvolti ed ai clienti interessati. Sulla base dei volumi dei cuscinetti potenzialmente coinvolti e del cliente con il maggior numero di componenti coinvolti, è stata scelta la tipologia con la quale procedere.

L'output della fase di misurazione è stato il seguente:

- Cuscinetti ad alta numerosità
- Cuscinetti inizialmente a rulli e poi a sfere
- Cliente per il quale la produzione è in quantità maggiore nell'arco dell'anno solare
- Parametri da monitorare per valutare il processo: gioco radiale finale per cuscinetti a rulli

Questo ha consentito di iniziare a definire il layout della linea automatica ed i parametri da misurare durante il processo in relazione agli anelli interni ed esterni e alle gabbie. Per quanto concerne il corpo volvente, in questo caso per i rulli si sono considerati i dati dimensionali garantiti dal fornitore.

3.2.1 PASSO A – PROCESSO DI ASSEMBLAGGIO

Primo passo per l'analisi del processo di assemblaggio automatico, sono state individuate le differenze con il processo manuale.

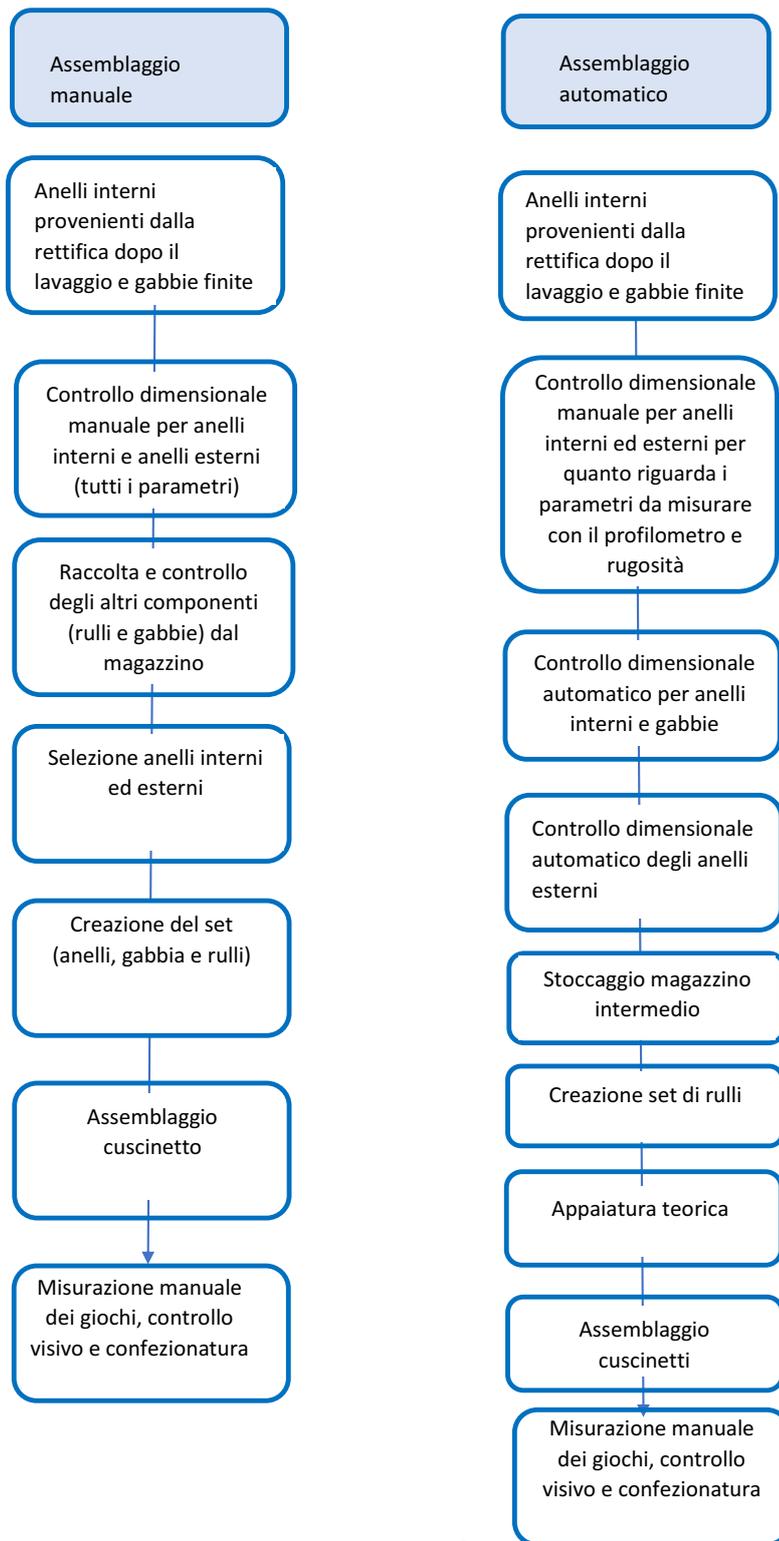


Figura 42 - Assemblaggio - processi a confronto

Prima di procedere al montaggio, tutti i componenti con protezione temporanea contro la corrosione devono essere preventivamente lavati. Fino al lavaggio dei componenti dopo la rettifica non ci sono variazioni tra il processo manuale e il processo automatico. Dopo questa fase, prima il controllo dimensionale avveniva per tutti i parametri manualmente, dopo tali misurazioni sono effettuate con macchine automatiche. Nel caso delle misurazioni effettuate

con il profilometro e quelle riguardanti la rugosità, queste continuano ad essere eseguite manualmente dall'operatore.

La costituzione del set di rulli è considerato un passo critico del processo e subito prima dell'assemblaggio con gli anelli già appaiati.

In entrambi i casi i cuscinetti, prima di arrivare alla fine del processo, passano al controllo finale dove subiscono il controllo dimensionale di tutti i giochi e il controllo visivo per l'eventuale scarto di elementi difettosi.

3.2.2 PASSO B – MATRICE CAUSA-EFFETTO

Dopo che sono stati analizzati in questo modo tutti i passi del processo, sono stati identificati cinque output chiave che il processo avrebbe dovuto avere e ad ognuno di questi è stato assegnato un grado di importanza per il cliente:

- Conformità dei componenti
- Conformità dei giochi assiale e radiale
- Approvazione del cliente
- Impatto sull'efficienza
- Consegne nel tempo previsto (On Time Delivery)

Per quanto riguarda gli input, ad ognuno di essi è stato assegnato un punteggio in base al grado della relazione intercorrente tra l'input stesso e gli output individuati. È stata cioè creata una matrice causa-effetto, strumento della metodologia Six Sigma che chiarisce le relazioni tra gli input e gli output ed aiuta a identificare le variabili che necessitano di uno studio più approfondito, in quanto hanno influenza su output più importanti per il cliente.

Dopo che sono individuati gli output chiave anche in termini di esigenze del cliente e gli output che si vogliono raggiungere, devono essere determinate le operazioni del processo che influiscono su di essi.

Di seguito un estratto della tabella elaborata.

 Six Sigma Cause & Effect Matrix								
			1	2	3	4	5	
		Rating of Importance to Customer	9	8	10	7	10	
		Key Process Outputs	Conformità dei componenti	Conformità dei giochi	Approvazione del cliente	Impatto sull'efficienza	OTD (On Time Delivery)	
	Process Input	Process Step						Total
1	Anelli interni dopo il lavaggio	Controllo dimensionale per anelli interni e gabbie	9	3	3	9	9	288
2	Gabbie	Controllo dimensionale per anelli interni e gabbie	9	3	3	9	9	288
3	Anelli esterni	Controllo dimensionale per anelli esterni	9	3	3	9	9	288
4	Scatole di rulli	Creazione set di rulli	9	3	3	9	9	288
5	Software di appaiatura	Appaiatura teorica	0	9	3	9	9	255
6	Zeiss CMM	Controllo dimensionale per anelli interni, esterni e gabbie	3	9	9	3	3	240
7	Vision machine Jenoptik	Controllo dimensionale per anelli interni, esterni e gabbie	3	9	9	3	3	240
8	Vision machine Vici Vision	Controllo dimensionale per anelli interni, esterni e gabbie	3	9	9	3	3	240
9	Componenti (anelli gabbie e rulli)	Assemblaggio del cuscinetto	0	9	3	3	9	213
10	Lettore data martix	Controllo dimensionale per anelli interni, esterni e gabbie	9	0	1	3	9	202
11	Software per la gestione dei cuscinetti	Confezionatura	9	9	3	1	1	200
12	Robot di movimentazione	Controllo dimensionale per anelli interni, esterni e gabbie	3	0	1	9	9	190
13	Robot di movimentazione	Assemblaggio del cuscinetto	3	0	1	9	9	190

Figura 43 - Matrice causa - effetto

La scala utilizzata per il grado di importanza di ogni obiettivo è compresa in un intervallo da 1 a 10 mentre per le relazioni è generalmente utilizzata la scala 1-3-9, con un intervallo significativo tra i tre valori in modo da evidenziare più facilmente le differenze di impatto. I punteggi assegnati a ad ogni input sono stati moltiplicati per il relativo grado di importanza dell'obiettivo corrispondente e sono stati tra loro sommati, come previsto dalla metodologia. Sono stati quindi evidenziati poi quelli con un punteggio superiore al 190, perché ritenuti quelli su cui si sarebbe dovuto agire con maggiore priorità.

Come si può vedere dalla matrice, nell'ordine sono evidenziati come i più importanti i componenti stessi, le macchine con cui si effettuano le misurazioni, col software di appaiamento dei cuscinetti, passo critico del processo, e i robot di movimentazione.

La creazione della matrice è efficace e ha notevoli benefici in quanto assicura che non ci sia disattenzione verso la voce del cliente, che non sia persa l'informazione durante il processo e siano considerate le diverse interpretazioni possibili per le specifiche. Uno dei benefici principali è la sua abilità a generare e sostenere un coinvolgimento di gruppo durante l'intero ciclo di sviluppo del progetto. Inoltre consente:

- Minor numero di modifiche al progetto

- Minori problemi di avviamento
- Qualità ed affidabilità del prodotto migliorate

Le difficoltà che si possono incontrare sono di tipo organizzativo nella creazione del team multidisciplinare o nell'individuazione delle richieste del cliente, che però in questo caso sono riconducibili per lo più alle specifiche dettate dai clienti stessi per quanto riguarda le esigenze qualitative. Anche il punteggio attribuito ai requisiti clienti è di difficile attribuzione.

3.3 ANALISI – IL PROCESSO DI ASSEMBLAGGIO

3.3.1 MEASUREMENT SYSTEM ANALYSIS

Durante la fase di analisi del metodo DMAIC, sono stati elaborati gli MSA delle tre macchine di misurazione coinvolte nel processo di assemblaggio. Con l'acronimo MSA si indica lo studio del sistema di misura: Measurement System Analysis.

Un MSA ha l'obiettivo di ottenere informazioni relative ai valori e i tipi di variazione del sistema di misura ed è strutturato in due passaggi: il primo step serve a testare se il sistema è accettabile. Se quest'ultimo passaggio indica una variazione inaccettabile, è richiesto un normal study per un'analisi dettagliata. Nel nostro caso è stato applicato un normal study come criterio di accettazione dei nuovi strumenti di misurazione e anche per una comparazione con il controllo dimensionale manuale precedente.

Misurazioni eseguite su materiali presumibilmente identici e in condizioni apparentemente identiche non danno gli stessi risultati. Questo a causa di un errore casuale presente in qualsiasi sistema di misura e dovuto al fatto che non tutti i fattori che influenzano la misurazione possono essere controllati. Tra i fattori che contribuiscono alla variabilità ci sono l'operatore, gli strumenti e i metodi di misurazione, la calibrazione degli strumenti, le condizioni dell'ambiente esterno e i componenti che devono essere misurati.

La variabilità nel sistema di misurazione può essere classificata in cinque categorie:

- Bias: è la differenza tra il valore di riferimento e la media dei valori osservati per la stessa caratteristica sullo stesso componente.
- Ripetibilità: è la variabilità tra la stessa misura effettuata più volte per la stessa caratteristica sullo stesso componente in condizioni, per quanto è possibile, uguali, ovvero da uno stesso operatore con la stessa strumentazione durante un intervallo di tempo breve e in un ambiente definito.
- Riproducibilità: è la variabilità nella media dei valori delle misurazioni eseguite da diversi operatori utilizzando gli stessi strumenti di misura per la stessa caratteristica sullo stesso componente.
- Stabilità: è la variabilità totale nelle misurazioni ottenute con un sistema di misurazione sullo stesso componente quando è misurata una singola caratteristica in un periodo esteso di tempo.
- Linearità: è la differenza tra i bias nel range operativo dell'apparecchiatura.

[AIAG, Measurement Systems Analysis – Reference Manual, June 2010, 4th Edition International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms – JCGM 200:2012]

3.3.2 CAPABILITIES DELLE MACCHINE DI MISURAZIONE

In generale, in qualunque operazione che coinvolga misurazioni, parte della variabilità sarà imputabile al prodotto, parte deriverà invece dal sistema di misurazione che si è utilizzato. Sia nel caso di attrezzatura automatica che nel caso di attrezzatura manuale, è possibile determinare la variabilità dello strumento stesso, il quale può essere utilizzato in diverse condizioni operative.

Gli obiettivi principali degli studi delle capabilities degli strumenti di misurazione sono quindi i seguenti:

- Determinare quanta variabilità è dovuta al mezzo o strumento
- Isolare le componenti di variabilità nel sistema di misurazione. In ogni problema legato a procedure di misura vale la relazione seguente:

$$\sigma_{totale}^2 = \sigma_{prodotto}^2 + \sigma_{strumento}^2$$

La strategia è quella di eseguire le misurazioni sullo stesso componente nella stessa posizione più volte.

- Valutare se il mezzo è capace ovvero adatto all'applicazione per cui è utilizzato.

Gli indici utilizzati per la capability degli strumenti sono Cg e Cgk

$$Cg = \frac{0,2 \times \text{tolleranza}}{6\sigma_{strumento}} \quad (1)$$

- (1) La formula è utilizzata per la valutazione delle capabilities degli strumenti di misurazione. Mette in rapporto il 20% del range di tolleranza del processo (che può essere sostituita da $6 \times \sigma_{processo}$) con $6 \times \sigma_{strumento}$. La percentuale di tolleranza 0.2 è stabilita per convenzione dalla metodologia di Bosch per la valutazione delle capabilities degli strumenti e utilizzata di norma in SKF.

L'indice esprime perciò quanto la variabilità dello strumento influisce sulle misurazioni effettuate. $\sigma_{strumento}$ è la deviazione standard dello strumento che, essendo generalmente ignota, deve essere sostituita con una stima. La minima ripetibilità dello strumento è comparata con il 20 % della tolleranza.

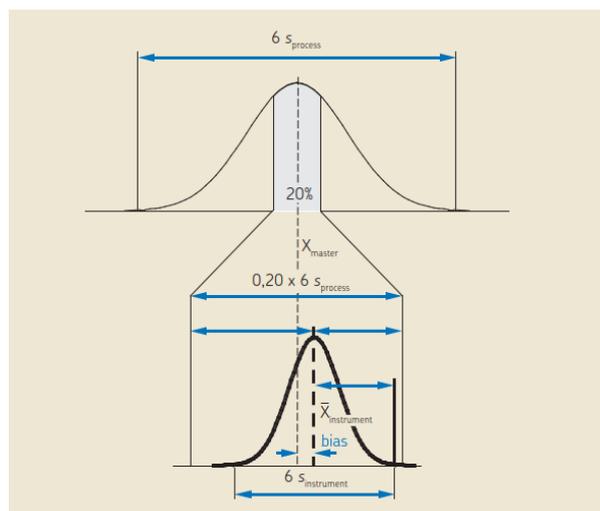


Figura 44 - Variabilità strumento di misurazione vs variabilità processo

L'altro indice, che invece tiene conto della centratura del processo è quindi il seguente:

$$Cgk = \min \left(\frac{0.1 \times \text{tolleranza} - \text{bias}}{3\sigma_{\text{strumento}}}; \frac{\text{bias} - 0.1 \times \text{tolleranza}}{3\sigma_{\text{strumento}}} \right) \quad (2)$$

(2) Anche in questo caso la percentuale di tolleranza è stabilita per convenzione.

Il criterio per l'accettabilità è che Cg e Cgk siano almeno uguali a 1,33.

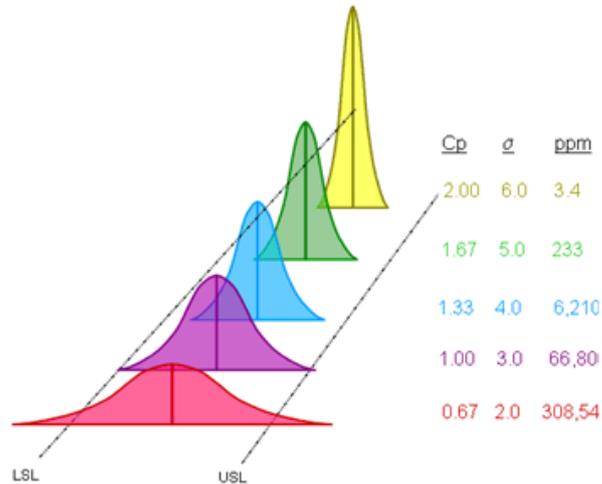


Figura 45- Numero di difettosi al milione in base al C_p

C_g è l'acronimo di C_p quando la capability è effettuata sugli strumenti di misura.

Al posto della tolleranza nelle formule è possibile utilizzare la deviazione standard del processo, la quale però è difficile da determinare alle prime misurazioni, come nel caso di capability effettuate per testare uno strumento di misurazione prima che sia utilizzato.

Poiché il progetto ha previsto l'inserimento di macchine automatiche, l'analisi ha previsto l'esecuzione di capabilities. A tal fine sono state effettuate 50 misurazioni per ogni parametro sullo stesso elemento di riferimento (master) certificato dalla sala metrologica. Le 50 misurazioni ripetute hanno determinato C_g e Cgk che sono stati confrontati con la soglia di accettabilità di 1.33.

Ciascuna delle misure di questi parametri è stata confrontata con il rispettivo valore di riferimento del master in modo che la differenza tra i due limiti fosse 0,2 x tolleranza.

Per valutare la capacità delle tre macchine di misurare i parametri a disegno dei componenti, sono state effettuate le capabilities a partire dai valori ottenuti effettuando 50 misurazioni ripetute su un componente scelto a priori.

I parametri principali sono stati i seguenti (tabella 1).

Tabella 1-Parametri misurati per capabilities

CMM Anello interno	Visual machine A Anelli interno	Visual machine B Anello esterno
<ul style="list-style-type: none"> Diametro superiore foro Diametro centrale foro Diametro inferiore foro Diametro pista Ovalità diametro foro Ovalità diametro pista Conicità diametro foro Eccentricità diametro foro lato pista 	<ul style="list-style-type: none"> Diametro pista Larghezza pista Spessore totale anello Parallelismo facce Diametro esterno superiore Diametro esterno inferiore Ovalità diametro esterno Conicità diametro esterno Perpendicolarità diametro esterno 	<ul style="list-style-type: none"> Diametro interno (diametro alesatura) Diametro foro lato flangia Diametro foro lato opposto flangia Posizione diametro foro lato flangia Posizione diametro foro lato opposto flangia Profilo flangia

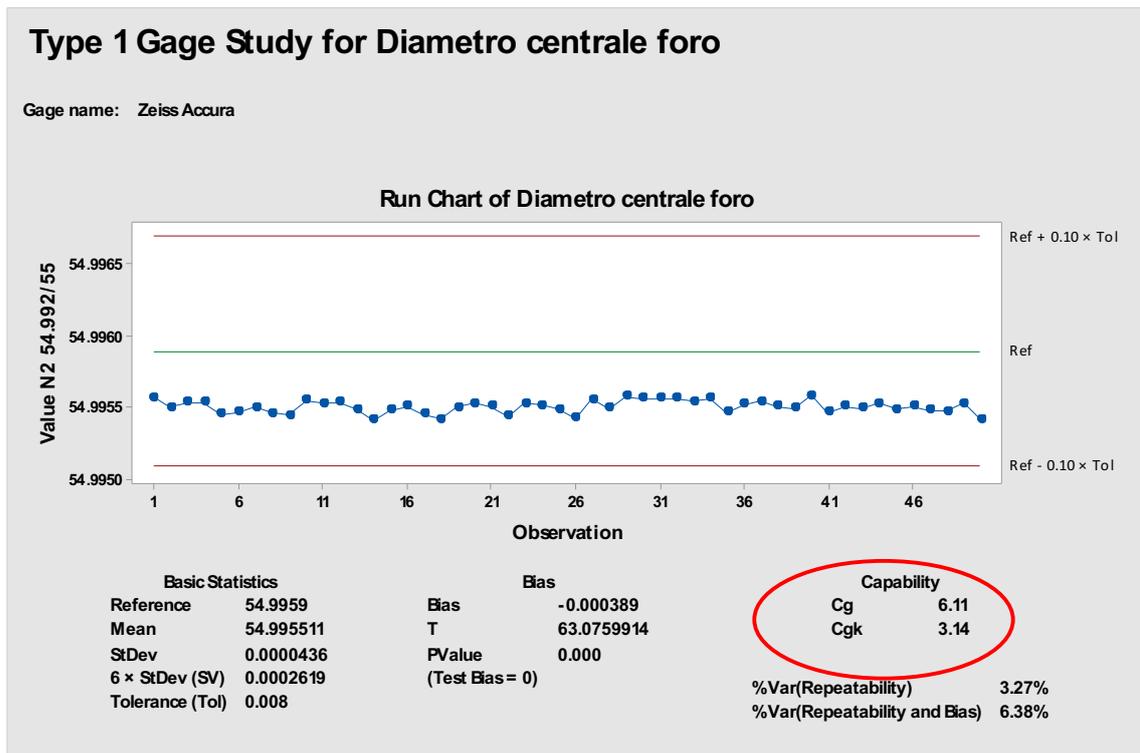


Figura 46 – Gage Study for Diametro centrale foro

$$Cg = \frac{0,2 \times 0,008}{6 \times 0,0000436} = 6.11$$

$$Cgk = \min \left(\frac{0,1 \times 0,008 - (54,9959 - 54,995511)}{3 \times 0,0000436}; \frac{(54,9959 - 54,995511) - 0,1 \times 0,008}{3 \times 0,0000436} \right) = 3.14$$

3.3.3 DETERMINAZIONE DI RIPETIBILITA' E RIPRODUCIBILITA'

La ripetibilità del sistema di misurazione implica che le variazioni tra i risultati ottenuti durante il processo siano stabili, ovvero siano dentro i limiti calcolati per la carta di controllo. Se alcuni punti risultano oltre i limiti, il processo non è in controllo statistico e di conseguenza il sistema di misurazione non è adeguato.

L'errore casuale di tutte le singole misurazioni è compreso nella deviazione standard totale, la quale ci si aspetta che abbia diversi valori in differenti condizioni. Il valore medio delle deviazioni standard è definito deviazione standard della ripetibilità ed è l'unica variabile da cui dipende il valore della ripetibilità (r).

La riproducibilità invece dipende dalla deviazione standard tra gli operatori e dalla ripetibilità. La variabilità del sistema di misurazione dovuta a ripetibilità e riproducibilità insieme è ottenuta con la seguente formula:

$$r \& R = \sqrt{r^2 + R^2} \quad (3)$$

(3) $r = s_r$ variabilità tra le misure ripetute

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n-1}}$$

Dove:

x_i = misura singola

X = valore medio misure

n = numero di ripetizioni

$R = s_R$ variabilità tra le misure ripetute e tra gli operatori

[*Measurement System Analysis – Reference Manual (June 2010, 4th edition)*]

Per l'attrezzatura automatica di misurazione non c'è l'influenza dell'operatore quindi la deviazione standard dovuta alla riproducibilità è pari a zero.

La linea guida per l'accettazione delle macchine utilizzate per la misurazione si basa sul parametro %r&R, il quale è in grado di mostrare se l'attrezzatura è in grado di garantire una ripetibilità adeguata (nel caso analizzato le misure sono effettuate manualmente e quindi non si tiene in considerazione la riproducibilità che le macchine sono sicuramente in grado di garantire).

La %r&R può essere determinato in base alla tolleranza o alla deviazione standard del processo, con la formula:

$$\%r\&R = \frac{r\&R}{\text{tolleranza}} \times 100\% \quad (4)$$

Se %r&R è minore di 10% il sistema di misurazione è generalmente considerato accettabile, se è compresa tra il 10% e il 30%, il sistema può essere accettabile per alcune applicazioni e può necessitare di miglioramenti se è maggiore di 30%, il sistema di misurazione è da considerarsi inaccettabile.

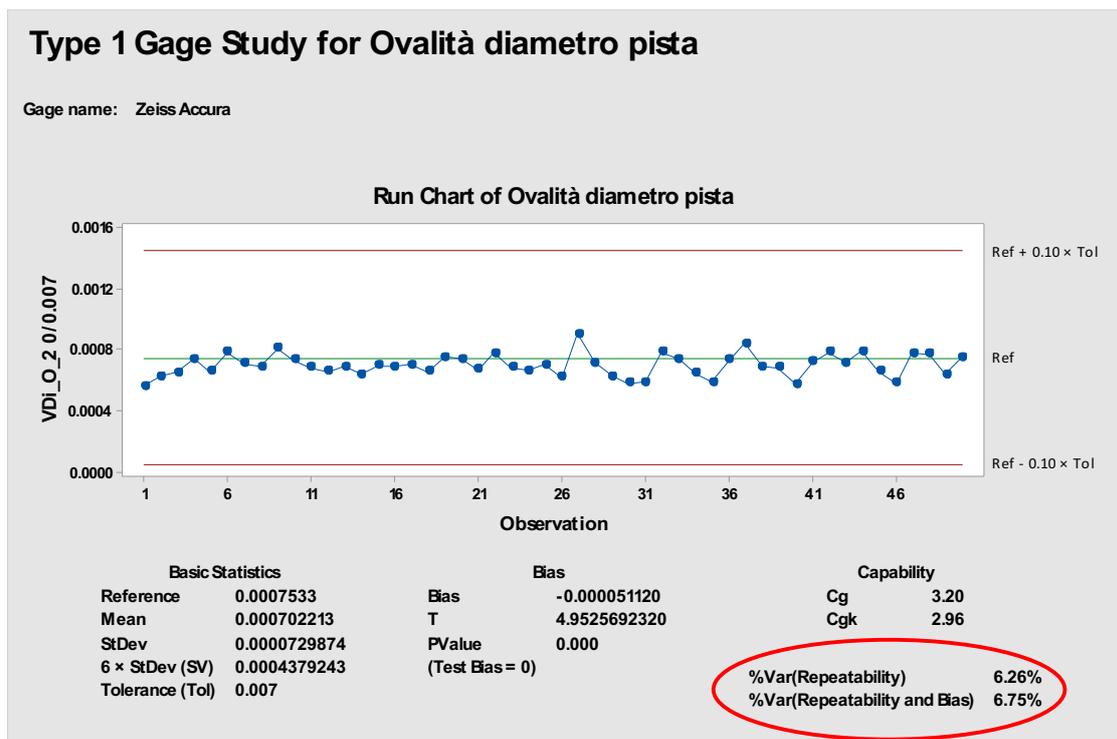


Figura 47 - Gage Study for Ovalità diametro pista

Sono stati inoltre calcolate le stime di media e deviazione standard del campione ed è stata effettuata un'analisi della varianza per valutare quale percentuale di errore fosse imputabile alla ripetibilità dello strumento e al bias. Non è stata considerata la riproducibilità perché, essendola misurazione effettuata automaticamente, non vi poteva essere variabilità imputabile all'operatore.

3.3.4 DETERMINAZIONE BIAS E LINEARITA'

Per determinare il bias, è necessario determinare una misura di riferimento dagli elementi del campione con lo studio di r&R. Questo può essere fatto in sala metrologica o con l'attrezzatura della sala di misurazione e deriva dalla media dei valori ottenuti con esse che è comparata con la media dei valori osservati dallo studio.

Nel caso specifico il master è stato verificato dalla sala metrologica rispetto ai diversi parametri, calcolandoli come media delle misurazioni eseguite.

Il bias è quindi la differenza media tra il valore di riferimento e la media osservata:

$$bias = x_{master} - X \quad (5)$$

(4) X = media delle misurazioni effettuate per lo studio MSA

x_{master} (anche indicato con Ref. in fig.) = valore di riferimento stabilito effettuando 50 misurazioni ripetute su Zeiss Micura e 10 su Prismo. Il valore di riferimento è ottenuto confrontando le medie delle misurazioni effettuate su queste due macchine in sala metrologica. Di seguito sono riportati i dati con cui è stato determinato il master per il confronto con le misurazioni delle macchine automatiche della linea.

Tabella 2 - Dati per la determinazione del Master

Numero di misurazione	Caratteristica	Valore misurato Micura	Valore misurato Prismo
50	Diam. Est. Inf.	54.9971	54.9977
49	Diam. Est. Inf.	54.9971	54.9975
48	Diam. Est. Inf.	54.9971	54.9974
47	Diam. Est. Inf.	54.9970	54.9974

Numero di misurazione	Caratteristica	Valore misurato Micura	Valore misurato Prismo
46	Diam. Est. Inf.	54.9970	54.9972
45	Diam. Est. Inf.	54.9971	54.9959
44	Diam. Est. Inf.	54.9970	54.9965
43	Diam. Est. Inf.	54.9970	54.9963
42	Diam. Est. Inf.	54.9970	54.9963
41	Diam. Est. Inf.	54.9970	54.9961
40	Diam. Est. Inf.	54.9970	
39	Diam. Est. Inf.	54.9970	
38	Diam. Est. Inf.	54.9970	
37	Diam. Est. Inf.	54.9970	
36	Diam. Est. Inf.	54.9970	
35	Diam. Est. Inf.	54.9970	
34	Diam. Est. Inf.	54.9971	
33	Diam. Est. Inf.	54.9970	
32	Diam. Est. Inf.	54.9970	
31	Diam. Est. Inf.	54.9970	
30	Diam. Est. Inf.	54.9970	
29	Diam. Est. Inf.	54.9970	
28	Diam. Est. Inf.	54.9970	
27	Diam. Est. Inf.	54.9970	
26	Diam. Est. Inf.	54.9970	
25	Diam. Est. Inf.	54.9970	
24	Diam. Est. Inf.	54.9970	
23	Diam. Est. Inf.	54.9970	
22	Diam. Est. Inf.	54.9970	
21	Diam. Est. Inf.	54.9970	
20	Diam. Est. Inf.	54.9970	
19	Diam. Est. Inf.	54.9970	
18	Diam. Est. Inf.	54.9970	
17	Diam. Est. Inf.	54.9970	
16	Diam. Est. Inf.	54.9970	
15	Diam. Est. Inf.	54.9970	
14	Diam. Est. Inf.	54.9970	
13	Diam. Est. Inf.	54.9970	
12	Diam. Est. Inf.	54.9970	
11	Diam. Est. Inf.	54.9970	

Numero di misurazione	Caratteristica	Valore misurato Micura	Valore misurato Prismo
10	Diam. Est. Inf.	54.9970	
9	Diam. Est. Inf.	54.9971	
8	Diam. Est. Inf.	54.9970	
7	Diam. Est. Inf.	54.9970	
6	Diam. Est. Inf.	54.9970	
5	Diam. Est. Inf.	54.9970	
4	Diam. Est. Inf.	54.9970	
3	Diam. Est. Inf.	54.9970	
2	Diam. Est. Inf.	54.9970	
1	Diam. Est. Inf.	54.9970	

Per convertire il bias in una percentuale di tolleranza, questo va diviso per la tolleranza stessa e moltiplicato per 100%

$$\%bias = \frac{|bias|}{tolleranza} \times 100\% \quad (6)$$

E' stato effettuato anche un t-test per valutare l'ipotesi nulla che il bias fosse statisticamente uguale a 0 nel caso di errore del primo tipo α al 95%. Per effettuare il test di ipotesi è calcolata la statistica test ed è confrontata con il punto percentile superiore al livello $\frac{\alpha}{2}$ della distribuzione T di Student con gradi di libertà pari ad n-1.

La formula con la quale è calcolata la statistica t è la seguente:

$$t_0 = \frac{bias-0}{\frac{\sigma_{strumento}}{\sqrt{n}}} \quad (7)$$

Dove $\sigma_{strumento}$ è in realtà una stima in quanto si ha a disposizione solo un campione per determinarla. Il rifiuto dell'ipotesi nulla avviene se $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}}$ con n-1 gradi di libertà.

In accordo allo standard AS 13003 e ai Quality Techniques sviluppati da SKF per la gestione delle analisi statistiche, il software utilizzato per l'elaborazione è Minitab.

Type 1 Gage Study for Diametro esterno inferiore

Gage name: Zeiss Accura

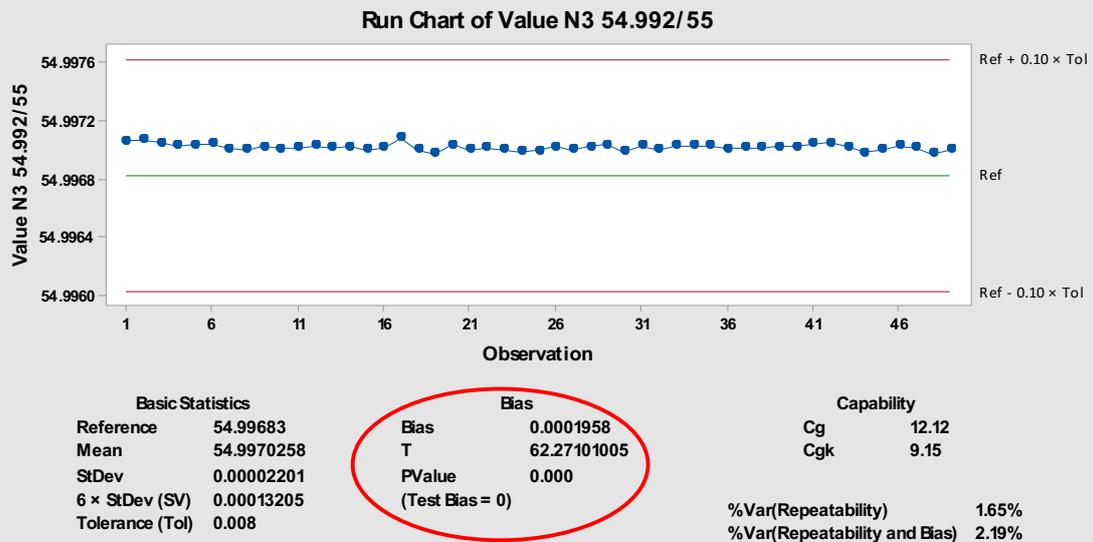


Figura 48 - Gage Study for Diametro esterno inferiore

Se il bias è diverso da zero, vi possono essere possibili cause diverse:

- un errore nel valore di riferimento
- uno strumento obsoleto
- uno strumento fatto per dimensioni diverse
- uno strumento non settato correttamente
- uno strumento che non misura la caratteristica corretta
- un'errata procedura di calibrazione
- un uso improprio dello strumento da parte dell'operatore
- uno strumento non settato correttamente sullo zero.

Queste sono le cause che devono essere analizzate al fine di poter migliorare il sistema di misura e poterlo rendere robusto e stabile nel tempo. Possibili azioni possono essere le seguenti:

- rivalutazione del master di riferimento, ad esempio con misura in sala metrologica
- test di affidabilità dello strumento in caso di obsolescenza, ad esempio con l'esecuzione di un breve studio di Range Method

- studio di linearità dello strumento se utilizzabile per diversi campi dimensionali o verifica delle sue caratteristiche di base come ad esempio la planarità della superficie di appoggio nella sua interezza
- verifica del corretto montaggio dello strumento e predisposizione di adeguate istruzioni di lavoro atte a supportare gli operatori in tale attività
- verifica della modalità di settaggio dello strumento attraverso la comparazione della stessa attività svolta da operatori diversi e in turni di lavoro diversi con definizione dello standard di riferimento se mancante e con l'erogazione di formazione dedicata se necessaria
- analisi critica e coinvolgimento del Process Engineering al fine di confermare la corretta scelta dello strumento di misura in relazione alle caratteristiche da misurare
- revisione della procedura di calibrazione sia in merito all'esecuzione, sia in merito alla periodicità richiesta per confermare o cambiare l'intervallo di controllo
- mancanza di competenza da parte dell'operatore in merito al corretto utilizzo dello strumento di misura e dunque formazione dello stesso e comprensione delle cause per le quali non aveva le competenze necessarie.

Per quanto riguarda la linearità, essa può essere determinata scegliendo parti nel range operativo dello strumento di misurazione. La pendenza della linea di regressione che meglio rappresenta il verso medio bias moltiplicata per la tolleranza (o la variabilità del processo) delle parti, è un indice che rappresenta la linearità dello studio. Per determinarla è necessario mettere i bias ottenuti rispetto al valore di riferimento in un grafico lineare, disegnare la retta che meglio li approssima e il suo intervallo di confidenza. Se l'analisi grafica mostra che la linearità del sistema di misurazione è accettabile, allora la pendenza non dovrebbe essere significativamente diversa da zero.

Se un sistema di misurazione ha un problema di linearità, lo strumento deve essere ricalibrato perché sia raggiunto lo zero attraverso la modifica di hardware, software o entrambi. Modifiche di hardware possono essere rappresentate dalla sostituzione di particolari dello strumento ad operazioni eseguite sullo stesso per ripristinare, ad esempio, le superfici di appoggio.

Di seguito illustrati i grafici esempio di altre analisi fatte su tutti i parametri sopra citati.

Type 1 Gage Study for Larghezza pista

Gage name: Hommel JENOPTIK

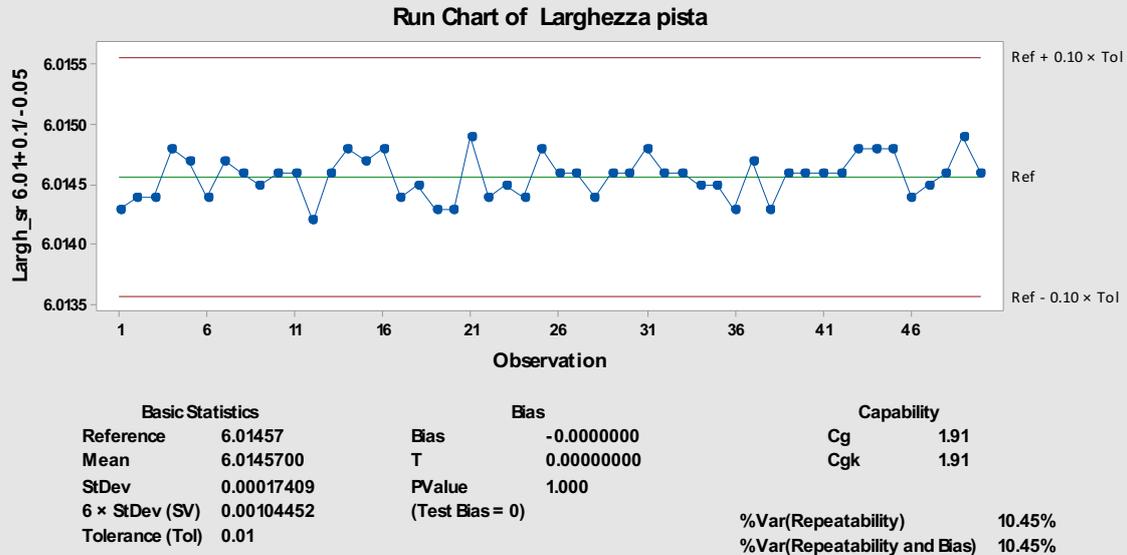


Figura 49 - Gage Study for Larghezza pista

Type 1 Gage Study for Parallelismo facce

Gage name: Hommel JENOPTIK

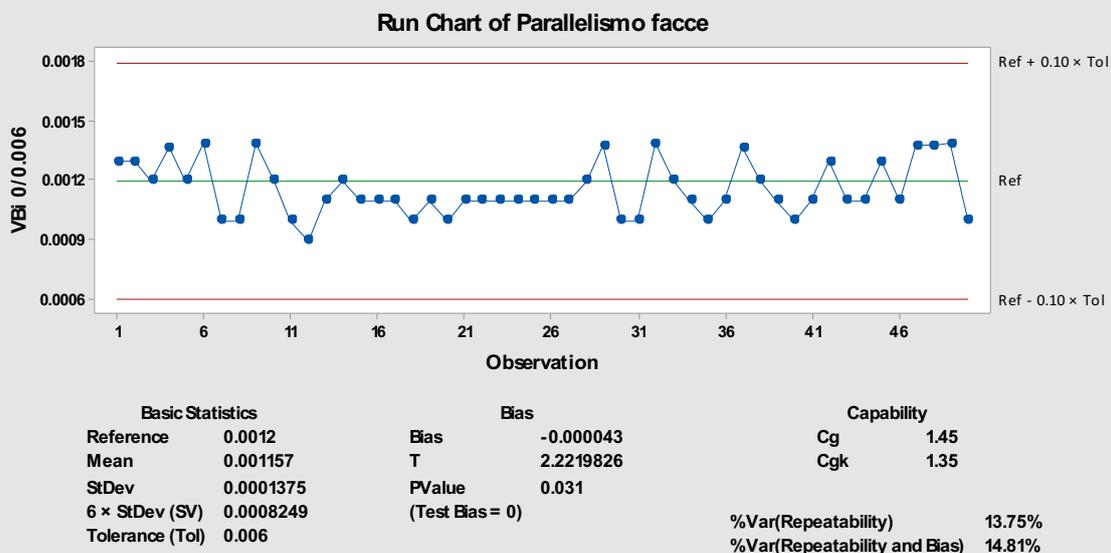


Figura 50 - Gage Study for Parallelismo facce

Gli indici di capacità del processo sono risultati sempre uguali o superiori a 1.33 e la percentuale di variabilità spiegata dalla ripetibilità è risultata sempre minore del 10 % dimostrando che gli strumenti potessero essere utilizzati per la misura di questi parametri. Lo studio statistico ha dimostrato che le macchine sono quindi capaci ovvero possono essere utilizzate per il processo di misurazione in quanto sono in grado di garantire la ripetibilità, stabilità e linearità.

3.3.6 DIFFERENZE TRA I PROCESSI DI MISURAZIONE MANUALE E AUTOMATICO

Per la successiva analisi è stato utilizzato il test di ipotesi che prevede l'esecuzione di misure e comparazione delle stesse al fine di determinare quale delle due ipotesi istituzionali fosse statisticamente accettabile:

H_0 =ipotesi nulla

H_a = ipotesi alternativa

Inoltre, si è tenuto conto dell'errore statistico:

α : errore che consiste nell'accettare una ipotesi nulla, essendo questa falsa. La probabilità α è la probabilità di commettere un errore di tipo I.

β : errore che si commette quando non si rifiuta una ipotesi nulla essendo questa falsa. La probabilità β è la probabilità di commettere un errore di tipo II.

Per la comparazione dei due processi di misurazione, sono stati scelti otto parametri e sono stati misurati sia manualmente che automaticamente al fine di poter valutare se statisticamente i valori ottenuti potessero essere considerati uguali. Le macchine per il controllo dimensionale naturalmente mostrano valori più precisi e con più cifre decimali ma i valori devono essere comparabili in quanto il processo di assemblaggio automatico è utilizzato solo per alcuni tipi di cuscinetti. I parametri scelti sono stati misurati su diversi componenti ed è stato effettuato un "Paired T-test", che è di solito utilizzato per comparare le medie di due popolazioni quando si hanno a disposizione due campioni nei quali le osservazioni in un campione possono essere appaiate con quelle dell'altro campione. È stata quindi testata l'ipotesi nulla che la media delle differenze tra i valori presi a coppie fosse uguale a zero. Il test t, è stato utilizzato sempre perché si aveva a disposizione solo un unico campione e non la media della popolazione, grazie alla quale si sarebbe potuto effettuare un test di ipotesi Z. Il P-value è sempre stato superiore

all'errore di prima specie e si è potuto quindi dedurre che non ci fossero differenze statisticamente significative tra i valori ottenuti con i due differenti processi di misurazione.

Paired T-Test and CI: Diametro pista M, Diametro pista A_1

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Diametro pista M	15	-0.000867	0.001356	0.000350
Diametro pista A_1	15	-0.000666	0.001450	0.000374

Estimation for Paired Difference

Mean	StDev	SE Mean	95% CI for $\mu_{\text{difference}}$
-0.000201	0.001121	0.000289	(-0.000822, 0.000420)

$\mu_{\text{difference}}$: mean of (Diametro pista M - Diametro pista A_1)

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$

T-Value	P-Value
-0.69	0.500

Figura 51 - T-Test misurazioni manuali vs automatiche

I valori considerati per l'analisi sono stati considerati come differenza dal nominale.

Per i valori misurati sono state calcolate le medie ed è stato applicato un test di ipotesi sulla differenza delle due medie. Nell'intervallo di confidenza al 95% è compreso lo zero quindi l'ipotesi nulla può essere accettata. Anche il p-value è infatti superiore allo 5% (α), che è l'errore che è accettato con il rischio di considerare l'ipotesi nulla vera, essendo questa invece falsa.

3.3.7 TEMPI DI PROCESSO

Poiché qualsiasi variazione di processo deve essere valutata anche in termini di efficienza e poiché uno degli indicatori per la valutazione del cambiamento di processo è il miglioramento dei tempi di passaggio dei componenti lungo il processo produttivo (in questo caso il tempo dedicato all'appaiatura e ed al successivo assemblaggio del cuscinetto) è stata verificata da un

punto di vista di variazione del sistema di misura, la modalità di esecuzione di rilevamento dei tempi. Per tale scopo è stato eseguito un MSA sui 2 operatori che si occupano dell'esecuzione dei rilievi prendendo in considerazione sia la ripetibilità che la riproducibilità. Sono stati presi i tempi ripetuti per tre volte per due operatori per valutare le caratteristiche del processo.

L'analisi della varianza ANOVA è una tecnica statistica standard che può essere utilizzata per analizzare l'errore e altre fonti di variabilità nello studio di r&R. Nell'analisi della varianza, essa può essere scomposta in quattro categorie: operatori, parti, interazione tra operatori e parti ed errore di replicazione.

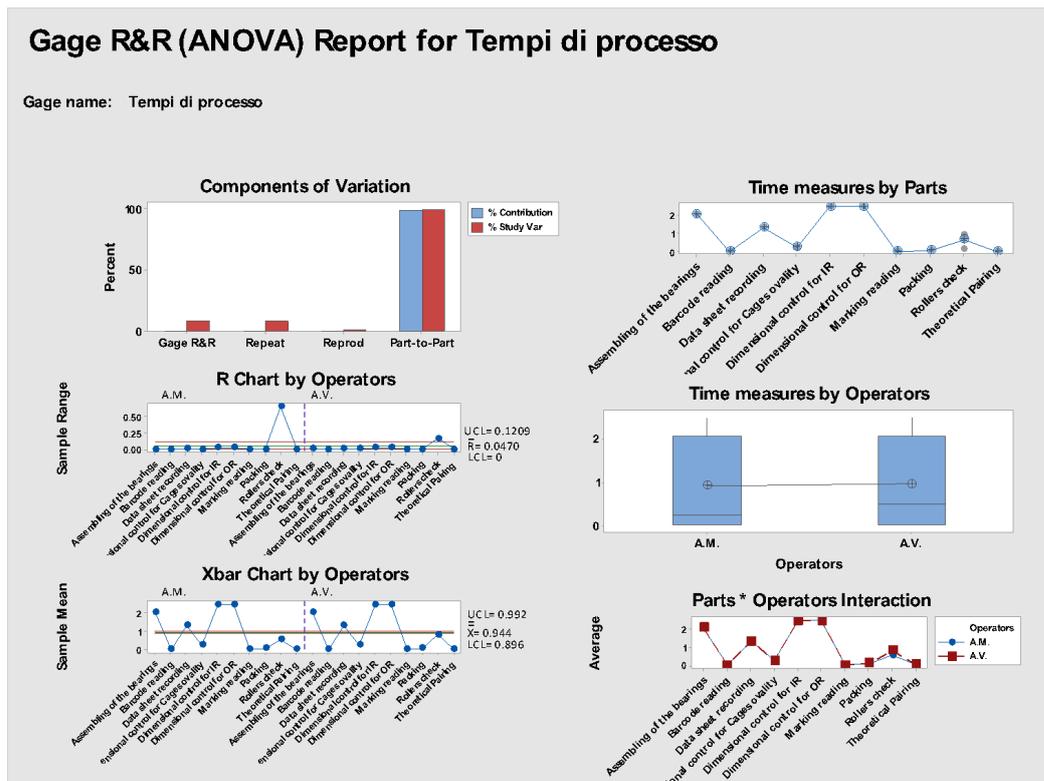


Figura 52 - R&R Report for Tempi di processo

II

grafico "Components of Variation" mostra la composizione della variabilità tra le misure. Le componenti di ripetibilità e riproducibilità sono molto piccole, in particolare la riproducibilità, non influisce molto sui tempi di esecuzione dell'attività il fatto che questa sia eseguita da un operatore piuttosto che dall'altro. La maggiore variabilità è tra le diverse misure effettuate ovvero tra i diversi step del processo. "R Chart by Operators" mostra le variazioni tra i tempi impiegati da ogni operatore in modo che sia possibile comparare gli operatori e dalla carta di controllo "X-bar Chart by Operator" si possono valutare i diversi tempi in relazione alla loro media. "By Part" mostra l'effetto principale della differenza dei tempi ai diversi passaggi del processo di assemblaggio. "Time measures by Operators" è un boxplot per il confronto di

media e varianza. Importante infine risulta comprendere come cambia la relazione tra operatore e tempi dipenda dall'operatore stesso.

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	9	61.4720	6.83022	609.638	0.000
Operators	1	0.0104	0.01036	0.924	0.361
Parts * Operators	9	0.1008	0.01120	1.718	0.117
Repeatability	40	0.2608	0.00652		
Total	59	61.8440			

α to remove interaction term = 0.05

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	9	61.4720	6.83022	925.381	0.000
Operators	1	0.0104	0.01036	1.403	0.242
Repeatability	49	0.3617	0.00738		
Total	59	61.8440			

Gage R&R

Variance Components

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.00748	0.65
Repeatability	0.00738	0.64
Reproducibility	0.00010	0.01
Operators	0.00010	0.01
Part-To-Part	1.13714	99.35
Total Variation	1.14462	100.00

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.08649	0.51893	8.08
Repeatability	0.08591	0.51548	8.03
Reproducibility	0.00996	0.05975	0.93
Operators	0.00996	0.05975	0.93
Part-To-Part	1.06637	6.39821	99.67
Total Variation	1.06987	6.41922	100.00

Number of Distinct Categories = 17

Figura 53 - Risultati numerici R&R Report for Tempi di processo

Tabella 3 – Dati utilizzati per il Report R&R

Step	Operatore	Ripetizione	Tempo misurato
Controllo dimensionale anelli interni	A.M.	1	2,5
Controllo dimensionale anelli interni	A.M.	2	2,516666667
Controllo dimensionale anelli interni	A.M.	3	2,493333333
Controllo dimensionale anelli interni	A.V.	1	2,5002
Controllo dimensionale anelli interni	A.V.	2	2,5118
Controllo dimensionale anelli interni	A.V.	3	2,488999
Controllo dimensionale ovalità gabbie	A.M.	1	0,241111
Controllo dimensionale ovalità gabbie	A.M.	2	0,239
Controllo dimensionale ovalità gabbie	A.M.	3	0,2397
Controllo dimensionale ovalità gabbie	A.V.	1	0,241
Controllo dimensionale ovalità gabbie	A.V.	2	0,238
Controllo dimensionale ovalità gabbie	A.V.	3	0,24
Controllo dimensionale anelli esterni	A.M.	1	2,5
Controllo dimensionale anelli esterni	A.M.	2	2,516666667
Controllo dimensionale anelli esterni	A.M.	3	2,493333333
Controllo dimensionale anelli esterni	A.V.	1	2,5011
Controllo dimensionale anelli esterni	A.V.	2	2,5118
Controllo dimensionale anelli esterni	A.V.	3	2,488999
Creazione set di rulli	A.M.	1	0,15
Creazione set di rulli	A.M.	2	0,8
Creazione set di rulli	A.M.	3	0,7
Creazione set di rulli	A.V.	1	0,75
Creazione set di rulli	A.V.	2	0,8
Creazione set di rulli	A.V.	3	0,916666667
Appaiatura teorica	A.M.	1	0,0139
Appaiatura teorica	A.M.	2	0,01389
Appaiatura teorica	A.M.	3	0,01391
Appaiatura teorica	A.V.	1	0,0139
Appaiatura teorica	A.V.	2	0,01389
Appaiatura teorica	A.V.	3	0,01391
Assemblaggio del cuscinetto	A.M.	1	2,08
Assemblaggio del cuscinetto	A.M.	2	2,079
Assemblaggio del cuscinetto	A.M.	3	2,081
Assemblaggio del cuscinetto	A.V.	1	2,081
Assemblaggio del cuscinetto	A.V.	2	2,078

Step	Operatore	Ripetizione	Tempo misurato
Assemblaggio del cuscinetto	A.V.	3	2,079
Confezionatura	A.M.	1	0,083
Confezionatura	A.M.	2	0,084
Confezionatura	A.M.	3	0,082
Confezionatura	A.V.	1	0,0833
Confezionatura	A.V.	2	0,081
Confezionatura	A.V.	3	0,082
Lettura marcatura	A.M.	1	0,00029
Lettura marcatura	A.M.	2	0,000277778
Lettura marcatura	A.M.	3	0,00027
Lettura marcatura	A.V.	1	0,000277778
Lettura marcatura	A.V.	2	0,000281
Lettura marcatura	A.V.	3	0,00029
Lettura data matrix	A.M.	1	0,00035
Lettura data matrix	A.M.	2	0,000354
Lettura data matrix	A.M.	3	0,000349
Lettura data matrix	A.V.	1	0,000348
Lettura data matrix	A.V.	2	0,00035
Lettura data matrix	A.V.	3	0,00034999

3.4 MIGLIORAMENTO – L'ANALISI DEL RISCHIO

3.4.1 REQUISITI NORMATIVI IN AMBITO AEROSPAZIALE - RISK-BASED THINKING

Per garantire la soddisfazione del cliente, le organizzazioni aeronautiche, spaziali e di difesa devono fornire e continuamente migliorare, prodotti sicuri e affidabili e servizi che soddisfano o superano il cliente e le leggi applicabili e requisiti normativi. Lo standard di riferimento è l'AS 9100 rev. D - Quality Management Systems - Requirements for Aviation, Space and Defense Organisation, il quale standardizza i requisiti del sistema di gestione della qualità nella massima misura possibile.

Il suo utilizzo dovrebbe garantire la capacità di fornire costantemente prodotti e servizi che soddisfino il cliente e le leggi e le normative applicabili ed i requisiti, un miglioramento della soddisfazione del cliente e una corretta valutazione di rischi e opportunità associati al processo. Questa norma include i requisiti del sistema di gestione della qualità ISO 9001 e utilizza l'approccio di processo, che incorpora il ciclo Plan-Do-Check-Act (PDCA) e il pensiero basato sul rischio. Nell'industria aeronautica, spaziale e della difesa, il rischio è generalmente espresso in termini di probabilità di occorrenza e gravità delle conseguenze.

Il pensiero basato sul rischio consente a un'organizzazione di determinare i fattori che potrebbero minare i suoi processi e la sua qualità e di sfruttare al massimo le opportunità che si presentano. Esso si estrinseca in due componenti principali:

- 1. il rischio legato al contesto nel quale opera l'azienda**
- 2. il rischio legato ai processi definiti e regolati all'interno dell'azienda**

Poiché questa tesi si concentra sullo sviluppo di un nuovo processo interno volto a robotizzare le attività prima svolte totalmente in modo manuale, l'analisi che segue si concentra sul punto numero 2 e conseguentemente permette di mettere in atto controlli preventivi atti a minimizzare gli effetti negativi delle non conformità.

Lo standard di riferimento per l'analisi del rischio di processo detta anche P-FMEA è l'AS13004. L'analisi del rischio, in questo caso per un cambio di processo, avviene attraverso l'utilizzo del diagramma di flusso del processo, che includendo tutte le operazioni con una rappresentazione sequenziale degli step, è alla base della creazione della PFMEA (Process Failure Mode and Effect Analysis). Una volta identificati i rischi, le azioni possibili sono la prevenzione del rischio I

l'assunzione dello stesso con gestione delle possibili conseguenze o l'eliminazione nel caso in cui si riesca a fare.

L'immagine illustra i campi di azione dello standard AS 13004 che definisce come creare la PFMEA partendo dai diagrammi di processo e il conseguente piano di controllo per mantenere nel tempo il miglioramento apportato.

Il diagramma di processo deve avere alla base un progetto dell'analisi del rischio e le caratteristiche chiave del prodotto o del processo, le stesse su cui è necessario concentrarsi per la creazione del Control Plan. Nella creazione di quest'ultimo deve essere stabilito un controllo MSA periodico e le istruzioni di lavoro per evitare o limitare i rischi individuati con la PFMEA.

Nel caso della linea di assemblaggio, i controlli sono stati fatti a priori per la validazione della stessa, il piano di controllo è in fase di definizione.

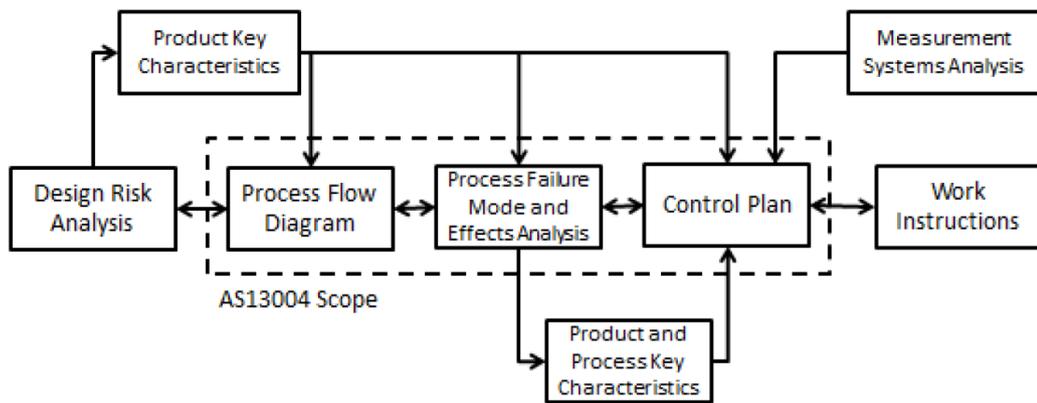


Figura 54- AS13004 requirements, scope and relationships

Operativamente il rischio deve essere gestito con una definizione dei criteri di valutazione del rischio (ad es. probabilità, conseguenze, accettazione del rischio), un'identificazione dei rischi durante le operazioni e una gestione di azioni per mitigare i rischi che superano il livello di rischio definito critico.

3.4.2 FMEA

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) è un'attività che mira ad identificare potenziali modalità di fallimento, basandosi su precedenti esperienze correlate. Il fine è minimizzare gli effetti di quei fallimenti, nel caso in cui dovessero verificarsi. L'analisi consente di identificare i

rischi associati ai potenziali difetti che potrebbero essere generati dal processo associandoli all'impatto all'interno dell'azienda e/o sul cliente finale.

La valutazione dell'effetto del "fallimento/difetto" prevede l'assegnazione di un livello di gravità, probabilità che si verifichi e rilevabilità che genererà un RPN (Risk Priority Number). Tale sistema consente di assegnare una priorità e, di conseguenza, agire con azioni immediate sui fallimenti che ottengono un RPN maggiore.

La tecnica FMEA per lo studio sistematico dei possibili fallimenti del processo fu sviluppata nel 1940 ed inizialmente utilizzato dalle Forze Armate statunitensi in campo militare. Fu infatti considerato più vantaggioso determinare quali fallimenti sarebbero potuti accadere e provare a pianificare una reazione piuttosto che fallire direttamente sul campo di battaglia, che sarebbe significato perdere la battaglia stessa, oltre che armi e strumenti. Durante gli anni '50 - '60 la tecnica fu utilizzata nel settore aerospaziale nei programmi di sviluppo dei razzi e contribuì a un numero estremamente basso di errori nella missione aerospaziale Apollo che portò sulla Luna i primi uomini nel 1969.

Gli anni '70 videro l'applicazione dell'FMEA nell'industria alimentare per i miglioramenti applicabili a salute e igiene, prima di essere adottata da Ford Motor Company, alla fine degli stessi anni, nella produzione interna per considerare i fallimenti causati dalle variazioni nel processo di produzione (Process Failure Mode and Effects Analysis) preventivamente al lancio di piattaforme per nuovi veicoli. Negli anni '80 altre aziende del settore automobilistico utilizzarono la tecnica FMEA come strumento di prevenzione al fallimento e al rischio prima che lo standard QS-9000 di AIAG rese formalmente necessario l'uso dell'analisi FMEA nel 1994.

Nel caso analizzato, la metodologia FMEA è utilizzata per identificare e ridurre i rischi dopo la modifica del processo ed è pertanto un P-FMEA. È stato coinvolto un team multifunzionale perché tutte le considerazioni fatte fossero corrette e portassero a conclusioni e, di conseguenza, a decisioni adeguate.

Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA)																
 																
Item or Process: Automatic Assembly		Process Responsibility: D.Bruno - M.Tomatis		FMEA Number: 044.000												
Product/Service Family: AVIO CH1 Gearbox Bearings		Customer Key Date: 15/08/2019		Prepared by: G. Camusso												
Core Team: P.Pertusio, F.Ribet, S.Allasia, F.Bouchard, D.Bruno, M.Tomatis		Customer: STS		PFMEA Date (Orig): 28/05/2019 (Latest Revision Date): 28/08/2019												
Last 4 revision Dates:																
Process Step	Characteristics	Process Inputs	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S e v e r i t y	C i t a	Potential Cause(s)/Mechanisms of Failure	O c c u r r e n c e	Current Process Controls Prevention	Current Process Controls Detection	D e t e c t i o n	R P N	Recommended Action(s)	Person Responsible	Responsibility	Target Completion Date

Figura 55 - Schema FMEA

Lo schema che sintetizza la tecnica FMEA contiene le seguenti informazioni:

- Step del processo: l'analisi è stata effettuata per ogni step del processo.
- Caratteristica: ossia la caratteristica indicata a disegno che può essere impattata dal fallimento/difetto e che il cliente già a disegno può identificare come KC (Key Characteristic)
- Modalità di potenziale fallimento: è definita come il modo in cui uno step del processo può fallire, ovvero non incontrare le aspettative e gli accordi previsti. Tali deviazioni non necessariamente sono percepite dal cliente finale e possono essere descritte in termini tecnici, nel caso di approccio standard, ma possono essere descritte anche in termini logistici nel caso di termini di garanzia, termini e condizioni, requisiti di confezionatura e condizioni di trasporto. Ogni passaggio del processo può avere più possibili modalità di fallimento ma se queste ultime sono molteplici, potrebbe significare che lo step del processo non è ben definito. Potenziali modalità di errore che potrebbero verificarsi solo in determinate condizioni operative (es: quando è caldo, freddo, asciutto, polveroso, ecc.) o sotto determinate condizioni d'uso (es. sotto estrema vibrazione, nel vuoto, ecc.) sono state anch'esse considerate. La causa di un potenziale fallimento potrebbe essere un problema che si è verificato nel passato o ad uno step precedente del processo. Allo stesso modo un potenziale fallimento avrà effetto allo step successivo.
- Identificazione delle operazioni critiche (Class): le operazioni critiche devono essere eseguite con particolare attenzione in quanto possono impattare sulla sicurezza e funzione del componente. Queste caratteristiche sono contraddistinte da simboli o segni speciali, in base alle specifiche del cliente e devono essere identificate nella fase iniziale dell'analisi FMEA. Un passaggio che impatta sulla sicurezza del prodotto è normalmente definito critico e contraddistinto dalla sigla CC. Altre operazioni sono significative e tipicamente indicate con SC. Le caratteristiche critiche hanno sempre la priorità rispetto alle caratteristiche significative quando si considerano le azioni da implementare.
- Potenziali effetti per ogni possibile fallimento: sono gli effetti del fallimento sullo step del processo, così come sono percepiti dal cliente. Devono essere descritti in termini di possibili problemi che il cliente stesso può notare o sperimentare ricordando che può essere un cliente intermedio ma anche un utente finale. Deve essere indicato chiaramente se la modalità di errore potrebbe impattare sulla sicurezza, non conformità con le specifiche o se il rischio sul business aziendale. Gli effetti devono essere descritti in termini di performance

dello specifico progetto, sistema o processo analizzato e tenendo in considerazione la presenza della relazione che c'è tra componenti e assemblato.

- **Livello di gravità:** è definito in base a quanto è grave l'effetto del fallimento nel caso in cui si verifici. In alcuni casi è molto facile da determinare in base ad esperienze precedenti, in altri è necessaria la conoscenza ed esperienza del team multifunzionale. È importante tenere conto che ogni modalità di errore può avere più di un effetto e ogni effetto può, a sua volta, avere un diverso livello di gravità. È l'effetto ad essere valutato e non il fallimento, quindi ogni effetto dovrebbe essere assegnato il proprio grado di gravità. È solitamente utilizzata una scala da 1 a 10.
- **Potenziati cause per ogni possibile fallimento:** la potenziale causa di errore indica come il processo di progettazione potrebbe consentire il verificarsi dell'errore. Una causa è la circostanza che induce o attiva un meccanismo di fallimento e la sua identificazione permette di correggerlo o almeno controllarlo. Le cause di fallimento possono essere raggruppate in cinque classi:
 - Degrado nel tempo
 - Ambiente
 - Uso ed abuso da parte del cliente
 - Interazione di sistema
 - Variazione da pezzo a pezzo

In genere, ci possono essere diverse cause che comportano la stessa modalità di errore. Ciò si traduce in più righe per lo stesso possibile fallimento. Le cause dovrebbero essere elencate nel modo più conciso e completo possibile perché la loro precisa separazione si tradurrà in un'analisi focalizzata per ognuna di esse e quindi diversi controlli, misurazioni e piani d'azione.

- **Probabilità di verifica:** è la probabilità che si assegna al verificarsi di una modalità di fallimento dello step del processo. Il numero di classificazione della probabilità di occorrenza ha un significato relativo piuttosto che un valore assoluto. I criteri di valutazione devono essere concordati, come il sistema di classificazione, e applicati coerentemente. L'evento è solitamente valutato utilizzando una scala da 1 a 10, come nel caso della gravità, in cui 1 è utilizzato per indicare un fallimento che ha bassissima di accadere e 10 rappresentano un fallimento che si verifica estremamente regolarmente. È necessario per questa fase

comprendere se lo step del processo è completamente nuovo o simile ad uno del processo precedente, se ci sono stati dei cambiamenti rispetto al contesto in cui si è agito precedentemente.

- **Attuali controlli preventivi:** gli attuali controlli sono attività condotte nell'ambito del processo che sono stati completati o messi in atto per assicurare i requisiti funzionali e di affidabilità del progetto. In particolare, i controlli preventivi mirano ad eliminare (o prevenire) la causa del meccanismo di fallimento o semplicemente ridurre la probabilità di accadimento. L'approccio migliore è attuare controlli preventivi, se è possibile, perché essi rendono il processo più robusto e influenzano le probabilità nel caso in cui sono integrati come parte dell'intento progettuale. La prevenzione basa la sua performance sia su conoscenze scientifiche che su esperienze storiche. È preferibile creare un FMEA che ha due colonne separate per i controlli di prevenzione e individuazione per distinguere chiaramente tra questi due tipi di controlli. Questo consente una rapida determinazione visiva che entrambi i tipi di controlli di progettazione sono stati considerati. Prevenire le cause di un potenziale fallimento attraverso un cambio nella progettazione del processo è l'unico modo per ridurre il livello di probabilità di accadimento.
- **Attuali controlli di individuazione:** un controllo di rilevamento mira a identificare (rilevare) l'esistenza di una causa che si traduce nella creazione di un meccanismo di fallimento mediante metodi analitici o fisici. I controlli di individuazione dovrebbero includere l'identificazione di quelle attività che rilevano le modalità di errore e le relative cause. L'approccio è presupporre l'errore si è verificato, quindi organizzare le capabilities che consentirebbero di individuare il fallimento in esame. La scala associata è, anche in questo caso, da 1 a 10 con 10 assegnato agli effetti per i quali non esistono controlli, 1 è utilizzato per i controlli preventivi. È importante tenere conto che non necessariamente il livello è basso perché la probabilità che si verifichi il fallimento è bassa.
- **Livello di rischio:** è necessario a determinare su quali passi focalizzarsi con priorità, non essendo possibile, per limiti di risorse, tempo, tecnologie ed altri fattori, agire su tutto contemporaneamente. Il focus iniziale dovrebbe essere sulle modalità di fallimento con il livello di gravità più alto. Quando quest'ultimo è 9 o 10 si deve intervenire in tempi brevi con controlli e azioni consigliate. Per le modalità di errore con gravità 8 o inferiore, il team dovrebbe considerare le cause con probabilità e individuazione più elevate. L'approccio più semplice per l'assegnazione delle priorità consiste nell'utilizzare il numero di priorità di

rischio o RPN (Risk Priority Number). Questo viene calcolato moltiplicando i tre livelli assegnati per le scale di gravità, probabilità e individuazione, come indicato di seguito:

$$RPN = \text{Gravità (Severity)} \times \text{Probabilità (Occurrence)} \times \text{Individuazione (Detection)}$$

Non esiste un valore RPN specifico che richiede un'azione obbligatoria. E' necessario piuttosto affrontare il vero problema alla base della causa della modalità di errore.

Process Step	Characteristics	Process Inputs	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Criticality	Potential Cause(s)/Mechanisms of Failure	Occurrence	Current Process Controls Prevention	Current Process Controls Detection	Detection	RPN
Identificazione dei componenti	NA	Componenti	Mix di componenti non corretto	Rilavorazione, possibile consegna ritardata al cliente	8	KC	Scorretta gestione del magazzino	2	IT system che guida gli operatori nella scelta dei componenti.	Controllo della tracciabilità e misurazione manuale dei giochi in collaudo finale	3	48

Figura 56 - Esempio FMEA per l'identificazione dei componenti

Il livello di RPN dà un ordine di priorità ai rischi che possono verificarsi ma in maniera approssimativa, in base ai tre livelli assegnati a Severity, Occurrence e Individuazione. La norma AS 13004 from SAE International, definisce uno standard per l'assegnazione (fig. 56-57-58)

Effect	Severity of Effect on Product (Customer Effect)	Ranking	Effect	Severity of Effect on Process (Manufacturing / Assembly Effect)
Failure to meet safety and/or regulatory requirements	Potential failure mode affects safe operation and/or involves noncompliance with regulations without warning	10	Failure to meet safety and/or regulatory requirements	May endanger operator, machine or assembly without warning.
	Potential failure mode affects safe operation and/or involves noncompliance with regulations with warning	9		May endanger operator, machine or assembly with warning.
Loss or degradation of primary function	Loss of primary function (product inoperable, does not affect safe operation)	8	Major disruption	100% of product may have to be scrapped. Line shutdown or stop ship
	Degradation of primary function (product operable, but at a reduced level of performance)	7	Significant disruption	A portion of the production run may have to be scrapped. Deviation from primary process; decreased line speed or added manpower.
Loss or degradation of secondary function	Loss of secondary function (product operable but service life greatly reduced, convenience item(s) inoperable, customer dissatisfied)	6	Moderate disruption	100% of production run may have to be reworked off line and accepted
	Degradation of secondary function (product operable but appearance affected, convenience item(s) operable at a reduced level, customer dissatisfied)	5		A proportion of the production run may have to be reworked off line and accepted
Annoyance	Appearance, fit and finish type items do not conform, defect noticed by most of the customers (> 75%)	4	Moderate disruption	100% of production run may have to be re-worked in station before it is processed
	Appearance, fit and finish type items do not conform, defect noticed by about half of the customers (50%)	3		A proportion of the production run may have to be reworked in-station before it is processed
	Appearance, fit and finish type items do not conform, defect noticed by discriminating customers (<25%)	2	Minor disruption	Slight inconvenience to process, operation or operator
No effect	No discernable effect	1	No effect	No discernable effect

Figura 57 - Criteri di assegnazione Severity [AS 13004 from SAE International]

La tabella determina la gravità degli effetti sul prodotto o su processo (in base all'analisi che si sta effettuando) e gli effetti stessi.

Ranking	Description	Process PPM	Likelihood of Cause (AIAG Reference)	Time-Based Example	Likelihood of Cause	Time-Based Example
					Low volume production	
10	Very High: Persistent Failure (Failure is almost inevitable)	500,000 PPM	1 in 2	≥ 1 per occurrence per shift	100% of production	≥ 1 per occurrence per shift
9	Very High: Persistent Failure (Failure occur almost as often as not)	50,000 PPM	1 in 20	≥ 1 per occurrence per day	50% of production	≥ 1 per occurrence per day
8	High: Frequent failures (Repeated failures)	20,000 PPM	1 in 50	≥ 1 per 2-3 days	20% of production	≥ 1 per 2-3 days
7	High: Frequent failures (Failures occur often)	10,000 PPM	1 in 100	≥ 1 per Week	10% of production	≥ 1 per Week
6	High Moderate: Occasional failures	5,000 PPM	1 in 200	≥ 1 per 2 weeks	5% of production	1 per month
5	Moderate: Occasional failures (minor proportions)	1,000 PPM	1 in 1,000	≥ 1 per quarter	0.5% of production	2 per year
4	Moderate Low: Infrequent failures	100 PPM	1 in 10,000	≥ 1 per half-year	0.1% of production	1 per year
3	Low: Relatively few failures.	10 PPM	1 in 100,000	≥ 1 per year	0.05% of production	1 per 5 years
2	Low: Failures are few and far between (isolated incidents)	1 PPM	1 in 1,000,000	< 1 per year	0.01% of production	1 per 10 years
1	Remote: Failure is eliminated thru Preventive Control	Zero	Zero	Never	Less than 0.01% of production	< 1 per 10 years

Figura 58 - Criteri di assegnazione Occurrence [AS 13004 from SAE International]

Il ranking di probabilità è assegnato in base al numero di volte in cui il difetto si potrebbe verificare sia in termini di prodotti difettati che in termini di tempo tra un difetto e l'altro.

Ranking	Likelihood of Detection by Process Control - Category	Likelihood of Detection by Process Control - Criteria
10	Absolute Uncertainty	No current process control; Cannot detect or compliance analysis not performed
9	Difficult to Detect	Defect (Failure Mode) and/or Error (Cause) is not easily detected (e.g. Random audits)
8	Defect Detection Post Processing	Defect (Failure Mode) detection post-processing by operator through visual/tactile/auditable means with no boundary samples
7	Defect Detection at Source	Defect (failure Mode) detection in-station by operator through visual/tactile/audible means or post-processing through use of attribute gauging (go/no-go, manual torque check/clicker wrench, etc.) with no boundary samples
6	Defect Detection Post Processing	Defect (failure Mode) detection post-processing by operator through use of variable gauging or in-station by operator through use of attribute gauging (go/no-go, manual torque check/clicker wrench, etc.) with boundary samples
5	Defect Detection at Source	Defect (Failure Mode) or Error (Cause) detection in-station by operator through use of variable gauging or by automated controls that will detect discrepant part and notify operator (light, buzzer, etc.). Gauging performed on setup and first-piece check (for set-up causes only)
4	Defect Detection Post Processing	Defect (Failure Mode) detection post-processing by automated controls that will detect discrepant part and lock part to prevent further processing
3	Defect Detection at Source	Defect (Failure Mode) detection in-station by automated controls that will detect discrepant part and automatically lock part in station to prevent further processing
2	Error Detection and/or Defect Prevention	Error (Cause) detection in-station by automated controls that will detect error and prevent discrepant part from being made
1	Detection not applicable	Error (Cause) prevention as a result of fixture design, machine design or part design
1	Detection not applicable	Error (Cause) prevention as a result of fixture design, machine design or part design

Figura 59 -- Criteri di assegnazione Detection [AS 13004 from SAE International]

La facilità di individuazione è invece assegnata invece in base al momento in cui è possibile individuare il rischio durante il processo. Sono inoltre riportati esempi di come i vari difetti sono individuati con il conseguente livello da assegnare.

- Azioni consigliate: L'identificazione delle azioni preventive o correttivi da intraprendere consente di ridurre il livello di gravità, probabilità e individuazione. Devono essere assegnate le responsabilità per l'attuazione delle azioni e la data di azione programmata.

- Livello di rischio residuo dopo le azioni: dopo che le azioni sono state intraprese, è necessario fornire una breve descrizione per ognuna e valutare nuovamente i livelli di gravità, probabilità e individuazione. Le azioni da sole non garantiscono che il problema sia stato risolto, quindi sarebbe utile un test appropriato di verifica. Se si ritengono necessarie ulteriori azioni, l'analisi si ripete al fine del miglioramento continuo.

3.4.3 CONCLUSIONI DELLA FMEA E MIGLIORAMENTO

Il punto di partenza è stata l'analisi P-FMEA già elaborata per il processo di assemblaggio manuale: per i controlli dimensionali dei componenti sono già in atto delle azioni per evitare che i valori ottenuti con le misure siano diversi da quelli reali a causa delle condizioni ambientali di misurazione non appropriate o a causa degli strumenti utilizzati non capaci.

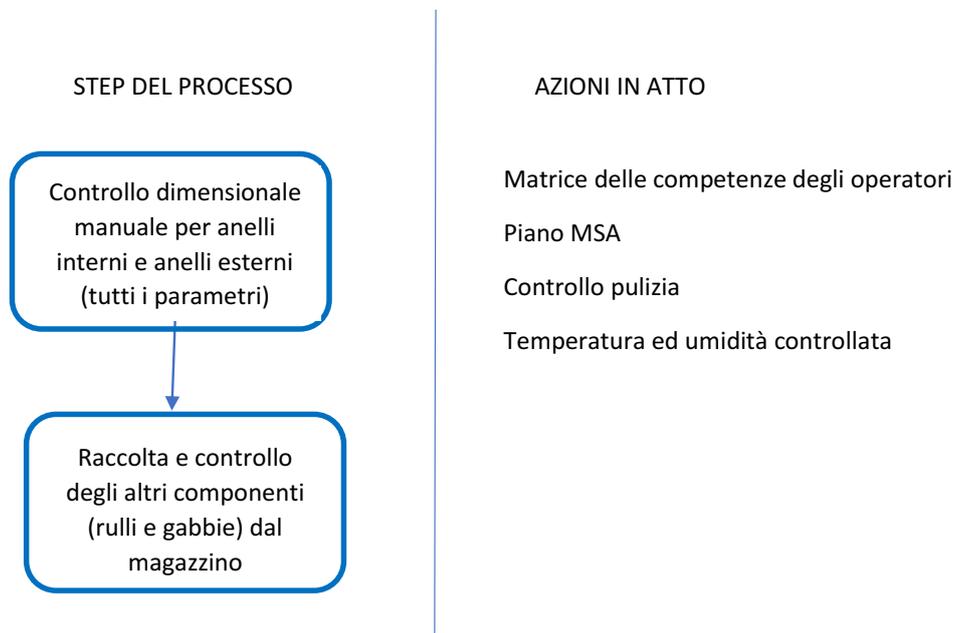


Figura 60 - Azioni in atti per i controlli dimensionali - assemblaggio manuale

Le misure devono essere eseguite in un ambiente in cui sia garantita una temperatura e una pulizia adeguata. L'aria condizionata fa sì che il materiale non si dilati o si restringa a causa del variare della temperatura, alterando il valore di misura.

È implementata inoltre una matrice delle competenze degli operatori per il tipo di attività che devono svolgere e dunque per l'area dell'assemblaggio automatico devono sapere utilizzare gli strumenti di misura e agire per la conduzione della linea stessa. Per quanto riguarda la pratica

degli MSA, come richiesto dalla normativa e dai clienti, essa è gestita attraverso la redazione di un piano annuale con verifiche periodiche della strumentazione e valutazione degli operatori per capirne la variabilità inserita nel sistema di misura. Nel caso si rilevino anomalie o derive si attuano o attività di formazione mirata al personale o la revisione / sostituzione di parti degli strumenti di misura. Le azioni in atto descritte sono illustrate in fig. 57.

Per i controlli dimensionali automatici sono state identificate le ulteriori azioni preventive seguenti.

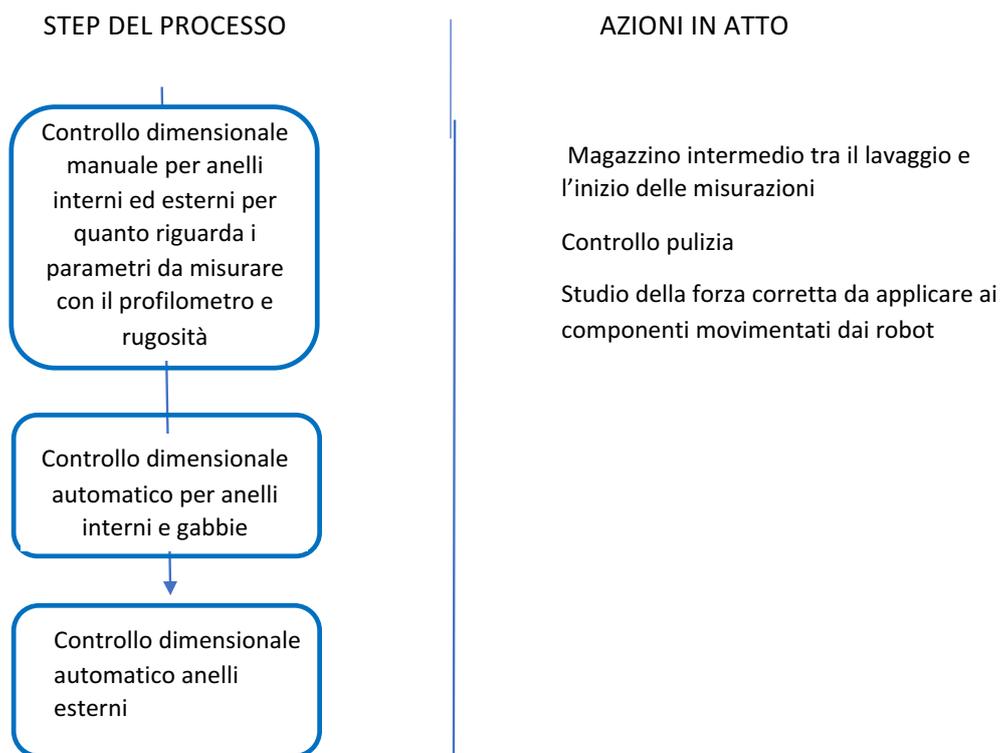


Figura 61 - Azioni in atto controllo dimensionale - assemblaggio automatico

Per evitare valori di misura diversi da quelli reali a causa del breve tempo tra il lavaggio ad alta temperatura e l'inizio delle misurazioni, è stato creato un apposito buffer per il raffreddamento dei componenti. Un valore sbagliato può infatti causare uno scarto di un componente conforme. È stato previsto l'utilizzo di una washing machine dedicata per il lavaggio dei componenti della linea, in un'area prossima in modo da poter controllare meglio la pulizia dei pezzi prima dell'assemblaggio. La pulizia deve essere assicurata anche per i nastri trasportatori e per le parti principali della linea a contatto con i componenti. Al rischio di FOD (Foreign Object Debris) è assegnata una gravità molto alta. La presenza di un corpo esterno in un componente che sarà

montato su un velivolo può infatti provocare gravi danni al velivolo stesso nel caso in cui la sua posizione ostacoli il movimento del cuscinetto.

Durante la movimentazione si è considerato il rischio che fallissero i controlli dimensionali a causa della forza applicata ad essa per gli spostamenti da un passaggio all'altro (Fig 58).

Dopo i controlli dimensionali, nell'assemblaggio manuale avvengono le operazioni di selezione e appaiatura degli anelli.

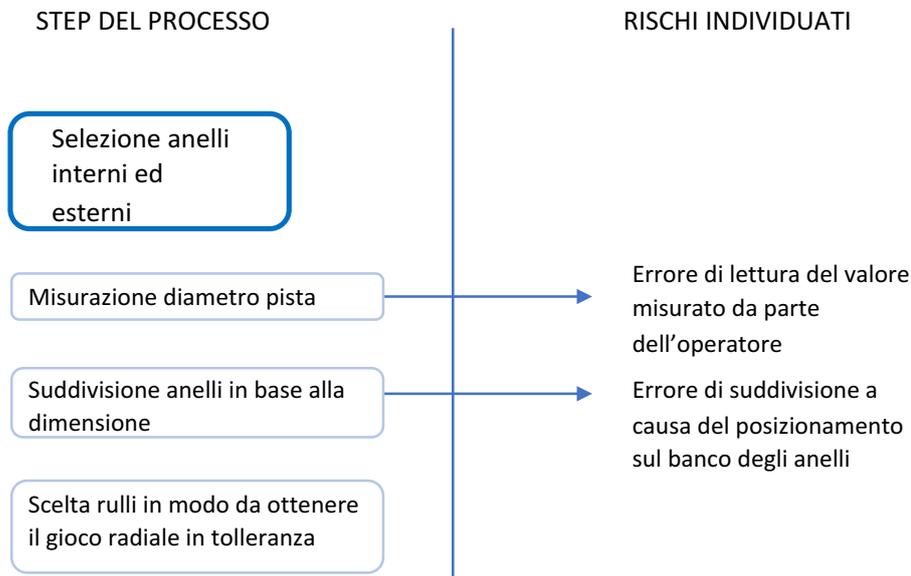


Figura 62 - Appaiatura anelli - assemblaggio manuale

L'operazione di selezionatura ha lo scopo di suddividere gli anelli in gruppi d'uguale dimensioni ed è eseguita per rendere possibile la successiva operazione d'appaiatura. La variabile che determina l'appartenenza ad un gruppo di selezione è il diametro pista, misurato rispetto ad un campione appaiatura precedentemente preparato.

L'operazione di appaiatura ha lo scopo di abbinare fra loro i componenti di un cuscinetto, in modo da poter soddisfare i requisiti tecnici e funzionali espressi dal disegno. L'operatore, tenendo conto delle dimensioni dei gruppi di anelli precedentemente formati durante la selezionatura, deve procedere alla determinazione della sfumatura dei corpi di rotolamento necessaria per abbinare fra loro i vari componenti e poter ottenere il gioco radiale richiesto dal disegno. L'operatore dispone sul banco gli anelli misurati divisi in base al valore ottenuto del diametro pista. I componenti "appaiati" devono essere disposti sul banco di montaggio in modo da rendere ben visibile il loro abbinamento del diametro. Un numero maggiore di anelli misurati dovrebbe consentire una più vasta scelta e di conseguenza una migliore associazione di anello interno ed esterno. L'operatore potrebbe sbagliare a leggere il valore ottenuto oppure sbagliare

ad appaiare gli anelli a causa della loro posizione sul banco. Nel caso di errore di appaiatura, è il controllo dimensionale sul cuscinetto assemblato a rilevarlo (fig. 59).

STEP DEL PROCESSO

Selezione anelli
interni ed
esterni

AZIONI IN ATTO

Matrice delle competenze degli
operatori

Controllo dei giochi assiale e
radiale sul cuscinetto assemblato

Figura 63 - Azioni in atto per l'appaiatura anelli - assemblaggio manuale

Con l'assemblaggio automatico, il magazzino intermedio in cui sono stoccati i componenti conformi consente al software di raccogliere un numero sufficiente di valori di misura per anelli interni ed esterni, crearne la distribuzione e appaiare con più precisione gli anelli, affinché i giochi siano conformi ai requisiti del disegno.

Di seguito illustrato un esempio di distribuzioni create dal software per l'appaiatura degli anelli in base ai parametri misurati precedentemente al controllo dimensionale.

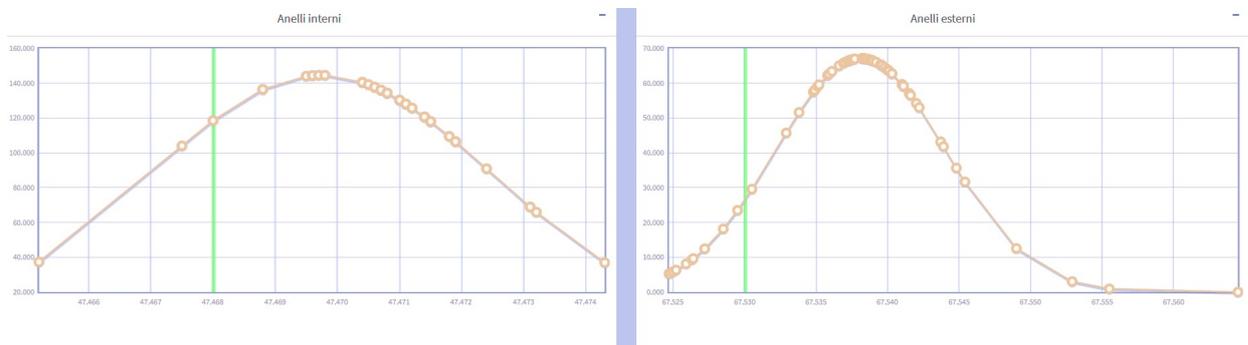


Figura 64- Appaiatura software – distribuzioni diametro pista anelli interni ed esterni

Device	Valore	Valore
HMAC2 (Jenoptik)	47.474300	10.031700
HMAC3 (Zeiss)	39.994200	
HMAC2 (Jenoptik)	47.471100	10.035600
HMAC3 (Zeiss)	39.992700	

Device	Valore	Valore
HMAC3 (Zeiss)	67.537600	74.997800
HMAC3 (Zeiss)	67.537200	74.997700
HMAC3 (Zeiss)	67.552900	74.997000
HMAC3 (Zeiss)	67.555500	74.996900

Figura 65 - Appaiatura software – Esempio parametri misurati anelli interni ed esterni

Per quanto riguarda l'appaiatura teorica potrebbe verificarsi che il programma di appaiatura non sia correttamente definito. Per questo motivo è stata eseguita una comparazione tra i valori dei giochi ottenuti appaiando gli anelli manualmente e quelli ottenuti con l'appaiatura teorica. È stata comunque mantenuto il controllo finale dei giochi manualmente come ultimo passaggio prima della fine del processo.

In tutti i passaggi del processo, è importante che gli operatori utilizzino i guanti affinché sia evitata la corrosione dei materiali con conseguenti necessarie rilavorazioni ma questo in tutti i passaggi del processo. Il training degli operatori e i controlli visivi finali consentono di non spedire al cliente cuscinetti con difetti causati da un'inadeguata manipolazione.

L'assemblaggio automatico evita i problemi di corrosione che potrebbero però verificarsi se il magazzino verticale automatico intermedio non è sottoposto a manutenzione adeguata. Le azioni preventive individuate per questo passaggio del processo sono le seguenti.

STEP DEL PROCESSO

Stoccaggio magazzino intermedio

AZIONI IN ATTO

Piano di manutenzione del magazzino

Sviluppo del software per il collegamento dei PN (Part Number) dei componenti dopo l'appaiatura

Figura 66 - Azioni in atto per il magazzino intermedio - assemblaggio automatico

La creazione del set di rulli è considerata, nel processo di assemblaggio automatico un passaggio critico a causa di una serie di fattori: i rulli provengono direttamente dal fornitore. Prima di entrare nella linea di assemblaggio passano nella washing machine. All'ingresso della linea, il lettore del codice a barre legge l'etichetta della scatola di rulli e associa e traccia i rulli agli anelli e alla gabbia. Tre alimentatori permettono ai rulli di entrare nella linea per essere assemblati nel

cuscinetto. L'alimentatore si apre facendo passare rulli provenienti tutti dalla stessa scatola per evitare che siano mescolati rulli provenienti da lotti diversi. Una volta dentro la linea, uno alla volta sono posizionati negli alveoli. In una prima di funzionamento della linea, il fornitore non aveva ancora mandato le etichette con il codice a barre e quindi l'operatore manualmente controllava l'alimentazione dei rulli e che non ci fossero mescolanze.

Le azioni preventivate per il controllo e l'assemblaggio dei rulli sono state:

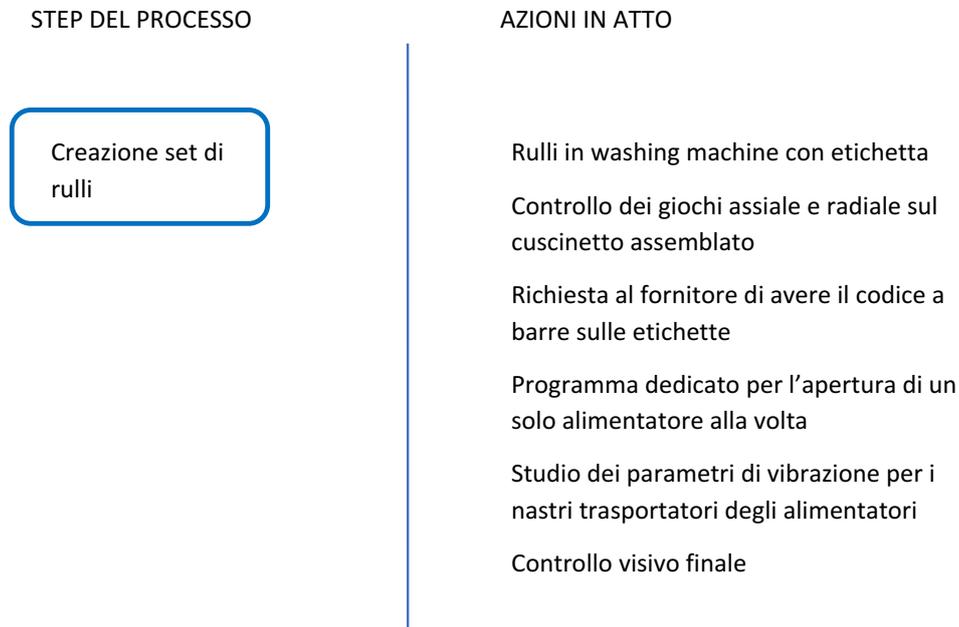


Figura 67 - Azioni in atto per la creazione del set di rulli - assemblaggio automatico

Perché i rulli non siano mescolati durante il lavaggio, sono introdotti nella washing machine in scatole etichettate ed è stato richiesto al fornitore di mettere una doppia etichetta, sia all'interno che all'esterno della scatola. Se i rulli provengono da lotti diversi, e quindi plausibilmente di dimensioni diverse, e sono montati sullo stesso cuscinetto l'errore può essere intercettato anche in questo caso grazie al controllo dei giochi assiale e radiale finali.

L'etichetta senza il codice a barre ha aumentato i tempi del processo in quanto l'operazione manuale richiede più tempo, creando una leggera inefficienza. Per questo motivo è stato richiesto al fornitore di creare le etichette con il codice a barre che sono state fornite in un secondo momento.

È stato considerato il caso in cui due alimentatori fossero aperti nello stesso momento con conseguente mescolamento ed è stato creato quindi un programma dedicato che non permettesse che fossero aperti due alimentatori contemporaneamente. Un altro possibile motivo di scarto sono bolli sui rulli a causa degli urti sulla linea di alimentazione. Per evitare questo problema, tutti i piani di appoggio sono stati eseguiti in teflon ed è stato controllato che

Le vibrazioni non fossero troppo elevate. Il controllo visivo finale è in grado di intercettare eventuali scarti a fine linea.

L'operazione di assemblaggio vero e proprio del cuscinetto è quella in cui c'è più possibilità che sia commesso un errore umano se è commessa manualmente.

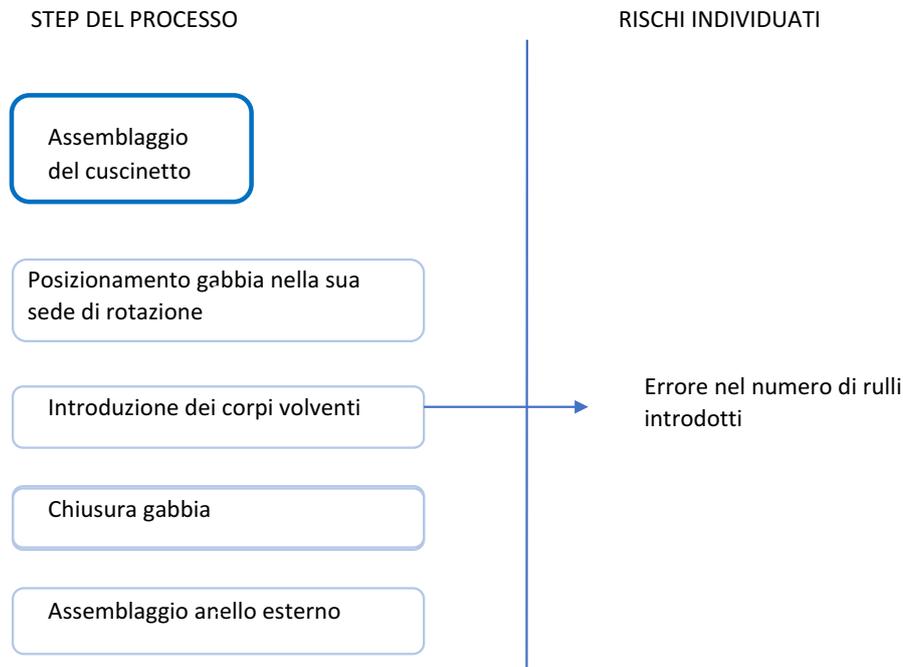


Figura 68 - Assemblaggio manuale cuscinetto

Le fasi d'assemblaggio sono sostanzialmente le seguenti: posizionamento della gabbia nella sua sede di rotazione, introduzione dei corpi volventi all'interno degli alveoli, chiusura della gabbia. L'introduzione della gabbia nella sua sede di rotazione è un'operazione puramente manuale. Nella fase successiva l'operatore, con l'ausilio di una pressa manuale, inserisce singolarmente i corpi volventi all'interno degli alveoli. È possibile che sia compiuto un errore nel numero di rulli (o sfere) e la gabbia potrebbe inoltre ruotare a causa del peso dei rulli già introdotti. Per evitare un non corretto posizionamento del set completo dei corpi volventi, occorre iniziare con l'introduzione di tre corpi volventi a 120° tra di loro in modo da centrare correttamente la gabbia ed evitare quindi di danneggiare sia la tenuta dei corpi volventi sia la gabbia stessa. Dopo di ciò verifica che non ci siano alveoli vuoti e procede assemblando l'anello esterno (fig. 65). Il controllo del peso dei cuscinetti serve per intercettare sia l'eventuale mancanza di corpi volventi, sia anomalie di montaggio degli stessi.

I potenziali rischi individuati in questo caso sono stati la potenziale corrosione del materiale a causa della cattiva manipolazione e la mancanza di alcuni elementi volventi. Relativamente a questi rischi le azioni attuate sono soprattutto rivolte alla formazione degli operatori.



Figura 69 - Azioni in atto assemblaggio manuale cuscinetto

Il fattore umano è notevolmente ridotto nella linea di assemblaggio automatico in cui i rischi sono soprattutto legati alla movimentazione dei componenti da parte del robot e al posizionamento della gabbia durante l’inserimento dei rulli. Una causa possibile di errore è un’eccessiva forza applicata dalla pressa idraulica che potrebbe influire su alcuni valori dimensionali della gabbia. Per quanto riguarda il robot di movimentazione, è possibile che causi bollature sui componenti con conseguenti difficoltà nelle misurazioni finali.

Considerati questi possibili fallimenti, le azioni implementate specificatamente per l’assemblaggio automatico sono state quindi le seguenti (fig. 67):

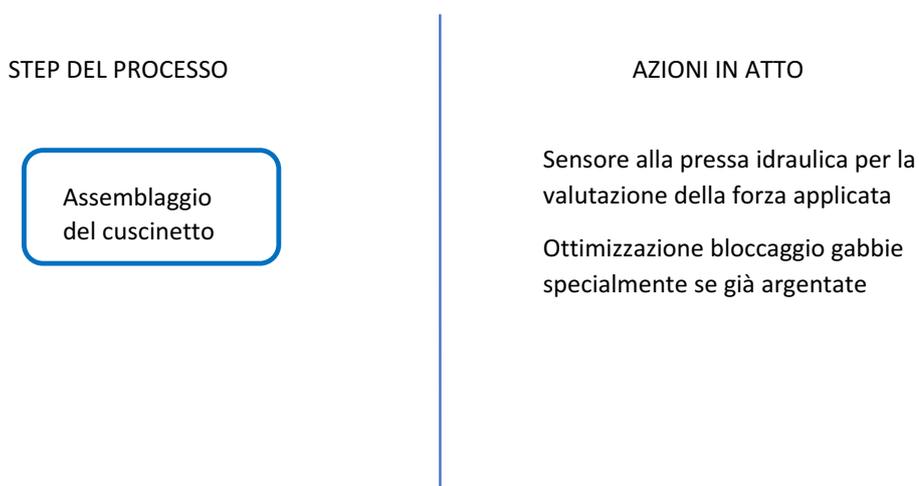


Figura 70 - Azioni in atto assemblaggio automatico cuscinetto

La linea assembla anelli interno gabbia e rulli e mette in un apposito contenitore il cuscinetto vicino all'anello esterno corrispondente in base all'appaiatura teorica effettuata. Fuori dalla linea un operatore assembla manualmente l'anello esterno prima delle misurazioni. Il sistema informativo mostra tutti i PN dei componenti associati e i relativi lotti. Nel caso in cui manchino le informazioni di qualche componente, l'operatore le aggiunge manualmente prima delle misurazioni dei giochi.

Dopo l'assemblaggio la marcatura del cuscinetto è effettuata manualmente.

3.5 CONTROLLO – STRATEGIE DI CONTROLLO

Un piano di controllo è un riepilogo scritto che descrive ciò che è necessario per mantenere un processo migliorato al suo livello attuale. Ciò include le risorse umane e i requisiti di formazione, le azioni da intraprendere se le misure non rientrano nell'intervallo specificato e le reazioni necessarie per garantire che i proprietari dei processi sostengano i guadagni dei miglioramenti del processo.

Lo scopo del piano di controllo è garantire che i miglioramenti delle prestazioni apportati dal team di progetto siano sostenuti nel tempo. Man mano che il processo cambia o aumenta la conoscenza del processo e quando i sistemi di misurazione e i metodi di implementazione vengono valutati e migliorati, il piano dovrebbe essere aggiornato.

È possibile attuare differenti metodi di controllo a seconda del processo. Per la linea di assemblaggio automatico sono stati considerati i seguenti possibili metodi:

- **POKA YOKE (Contromisure):** Poka Yoke è un termine giapponese che identifica uno strumento o procedura a prova di errore, che previene la creazione di difetti nel processo di gestione degli ordini o in quello produttivo, rendendo difficile l'errore da parte di personale non particolarmente accorto. Un esempio possono essere un insieme di fotocellule posti nei contenitori delle parti situati alla fine della linea di assemblaggio per evitare che uno di essi esca dalla linea senza qualche pezzo. Questi metodi di controllo consistono quindi nell'implementare alcuni cambi di processo in modo da assicurare che una particolare

condizione di errore non si verifichi e sono i più efficaci e dovrebbero essere applicati ovunque sia possibile.

- **FLAGS:** i flags permettono di rilevare quando le condizioni di errore si sono verificate. Non prevengono cioè l'errore ma bloccano il processo nel caso si verifichino. Questo è il secondo metodo di controllo disponibile migliore e si implementa solitamente nel caso in cui non sia possibile applicare un Poka Yoke.
- **SPC (Statistical Process Control):** Il controllo statistico di processo (SPC) è una tecnica per applicare l'analisi statistica per monitorare e controllare i processi. Il componente principale di SPC è l'uso di metodi di creazione di carte di controllo. L'ipotesi di base fatta in SPC è che tutti i processi sono soggetti a variazioni. I vantaggi del controllo statistico dei processi comprendono la capacità di monitorare un processo stabile e determinare se si verificano cambiamenti dovuti a fattori diversi dalla variazione casuale. Quando si verifica una variazione di causa assegnabile, l'analisi statistica facilita l'identificazione della fonte, in modo che possa essere eliminata. Il controllo statistico del processo offre inoltre la possibilità di identificare se il processo continua a funzionare come previsto o se il processo è cambiato e sono necessarie azioni correttive. Le informazioni sulla carta di controllo possono essere utilizzate per determinare l'intervallo naturale del processo e confrontarlo con l'intervallo di tolleranza specificato. Se la gamma naturale è più ampia, allora dovrebbe essere ampliata la gamma delle specifiche o saranno necessari miglioramenti per restringere la gamma naturale. In questo caso applicare il controllo statistico, ovvero creare le carte di controllo con i dati ottenuti dalle caratteristiche in output, significherebbe controllare il prodotto in uscita dal processo più che il processo stesso. Il modo corretto per applicare questo metodo è quindi controllare le caratteristiche in input.

L'immagine (fig. 68), mostra come, con gli accorgimenti presi, i tempi necessari a compiere le varie operazioni siano diminuiti e di conseguenza come si siano ristretti i limiti di controllo del processo dopo i miglioramenti apportati. Questi hanno riguardato dalla facilitazione della lettura del data matrix o della marcatura per i componenti in ingresso, al miglioramento del software di appaiatura, alla creazione più efficiente del set di rulli.

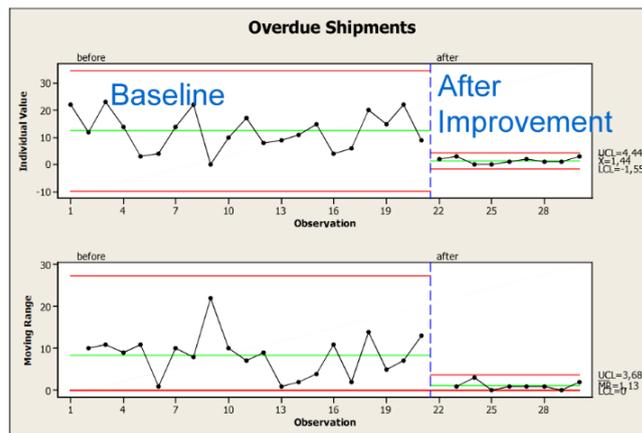


Figura 71 - Carta di controllo per tempi di processo ai differenti step - assemblaggio automatico

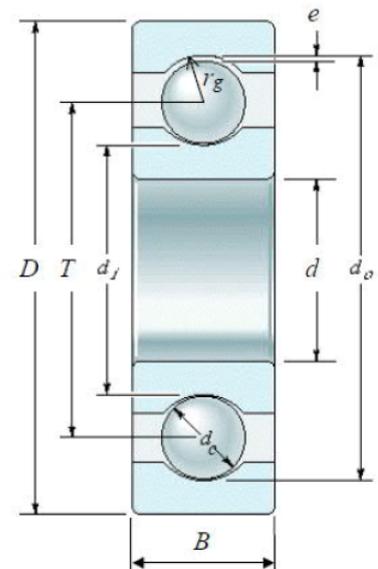
- Ispezione finale: non è un metodo molto accurato. I diversi operatori hanno sempre standard differenti e diversi criteri con i quali distinguono i prodotti conformi da quelli da scartare anche se si è cercato di uniformarli il più possibile con procedure specifiche. Inoltre, sarebbe più opportuno utilizzare l'ispezione per prevenire i difetti invece che alla fine del processo.
- SPO (Standard Operating Process): le procedure sono importanti nell'ambiente lavorativo hanno come obiettivo quello prevenire o rilevare il difetto attraverso l'esecuzione corretta dell'attività documentata in essa. Per quanto riguarda la linea di assemblaggio, le procedure sono in fase di creazione in particolare per dare le istruzioni pratiche agli operatori su come eseguire le attività e gli accorgimenti per evitare errori.

CAPITOLO 4

4.1 GIOCO RADIALE

I principali parametri geometrici di un cuscinetto radiale sono osservabili in figura:

- D = diametro esterno
- d = diametro interno
- d_j = diametro pista esterno anello interno
- d_o = diametro pista interno anello esterno
- B = ingombro assiale
- $T = \frac{D+d}{2}$
- d_c, r_c = diametro e raggio del corpo volvente
- r_g = raggio di curvatura della gola
- e = gioco radiale. Per gioco interno del cuscinetto s'intende lo spostamento totale possibile di un anello rispetto all'altro in senso radiale.



Ad essi va aggiunto:

- z = numero di corpi volventi

Tipicamente nei cuscinetti con corpi volventi e gole a profilo curvo, il raggio di curvatura della gola è leggermente maggiore di quello del corpo volvente. Si definisce *osculazione* il rapporto

$$k = \frac{(r_g - r_c)}{r_g}.$$

Gli elementi volventi possono essere sfere o rulli. Nel caso in cui siano sfere, esse potrebbero essere totalmente a contatto con la pista, oppure la sfera potrebbe avere solo 3 o 4 punti di contatto con la pista punti. I casi presi in considerazione sono due cuscinetti a rulli, in cui

quindi anche il calcolo teorico del gioco radiale è facilmente applicabile. Nei cuscinetti a rulli il gioco radiale è infatti influenzato dai seguenti parametri:

- Diametro pista esterno anello interno (d_j)
- Diametro pista interno anello esterno (d_0)
- Diametro rulli (d_c)

Essendo a conoscenza di tutti e tre i fattori, la formula teorica per il calcolo del gioco radiale è:

$$e = (d_0 - d_j) - r_c - r_c$$

4.2 PARAMETRI DI RIFERIMENTO E ANALISI PER L' APPAIATURA

I cuscinetti presi in considerazione per l'analisi sono stati il BC1-9857 e il BC1-9871.

BC1-9857	
Anello esterno: OR-BC1-9857	Diametro pista: tolleranza 72.288 - 72.788 mm
Anello interno: IR-BC1-9814	Diametro pista: tolleranza 60.213 - 60.713 mm
Rulli: RO H3 DVM 6x6	Diametro: tolleranza 5.998 - 6.002 mm

Figura 72 - Parametri considerati e tolleranze

I dati sono estrapolati automaticamente dal software della linea di assemblaggio che tiene in memoria i valori misurati per il diametro pista dell'anello interno e diametro pista dell'anello esterno. Per l'analisi si sono considerati i dati disponibili dalla produzione dei mesi di ottobre e novembre, in particolare 2463 diametri anelli esterni e 2521 diametri anelli interni.

I rulli sono forniti esternamente e, all'interno della stessa scatola, hanno un diametro che rientra in un intervallo di 0.001 mm. Sull'etichetta è esplicitato l'intervallo specifico per ognuna delle scatole.

Anelli appaiati	2338
Anelli interni non appaiati	183
Anelli esterni non appaiati	125

Figura 73 - Numerosità campioni considerati

Gli anelli interni considerati sono in numero maggiore rispetto agli anelli esterni quindi ovviamente i non appaiati interni sono di più rispetto agli esterni ma sono state analizzate le altre cause per cui l'appaiatura non è stata eseguita per la totalità degli anelli. In particolare, sono stati analizzati i parametri degli anelli che non sono stati appaiati per valutare se essi avessero dimensioni troppo diverse dagli altri e se avessero potuto essere appaiati se le altre combinazioni fossero state diverse. E' risultato quindi utile stabilire, a livello di processo, cosa cambiare per ottenere l'appaiatura ottima.

4.3 STIMA DELLE DISTRIBUZIONI DI RIFERIMENTO

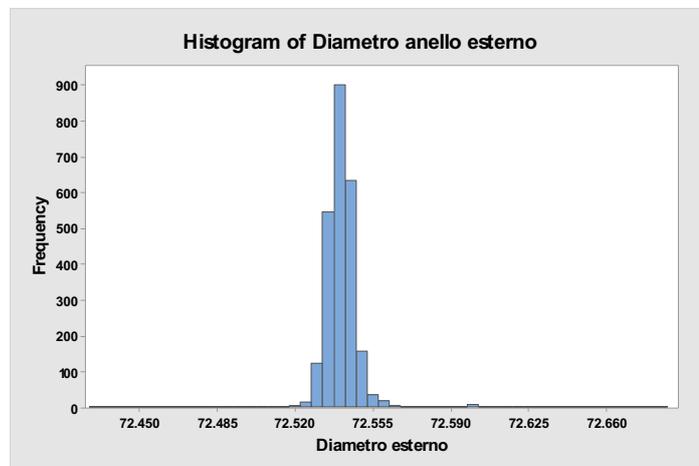


Figura 74 - Istogramma per Diametro interno anello esterno

Distribution	AD	P
Normal	103.664	<0.005
Box-Cox Transformation	103.296	<0.005
Lognormal	103.598	<0.005
Exponential	1129.524	<0.003
Weibull	565.253	<0.010
Smallest Extreme Value	565.574	<0.010

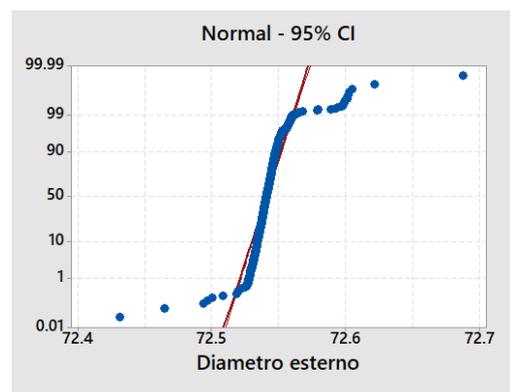


Figura 75 - Diagramma di distribuzione Normale

Largest Extreme Value	472.215	<0.010
Gamma	103.540	<0.005
Logistic	7.974	<0.005
Loglogistic	7.952	<0.005

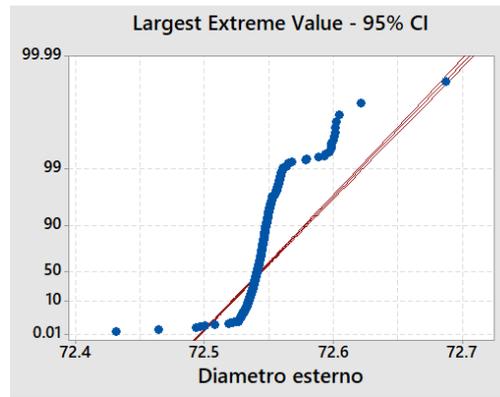


Figura 76 - Diagramma di distribuzione per Largest Extreme Value

AD (Anderson-Darling goodness-of-fit statistic) è una misura delle deviazioni tra la linea adattata (basata sulla distribuzione selezionata) e la funzione di passo non parametrica (basata sui punti dati). La statistica Anderson-Darling è una distanza quadrata che viene pesata più pesantemente nelle code della distribuzione.

P è il p value è la probabilità oltre il quantile calcolato per il test di ipotesi. Se è maggiore di alfa (in questo caso 5%), è accettata l'ipotesi che i dati seguano la distribuzione considerata.

In tutti i casi il P-value risulta basso. Utilizzando i probability plot risulta però che la normale approssimi discretamente i dati nella parte centrale anche se si discosta molto nelle code.

L'istogramma con il fitting della distribuzione normale è rappresentato in Fig. 61.

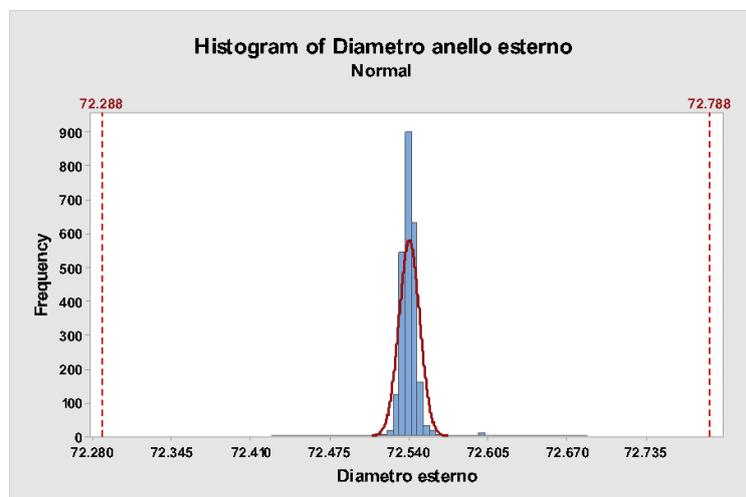


Figura 77- Approssimazione con distribuzione Normale

$$\mu_x = 72.54 \text{ mm}$$

$$\sigma_x = 0.008 \text{ mm}$$

Anche per il diametro anello interno è stata individuata la distribuzione che meglio approssimasse i dati.

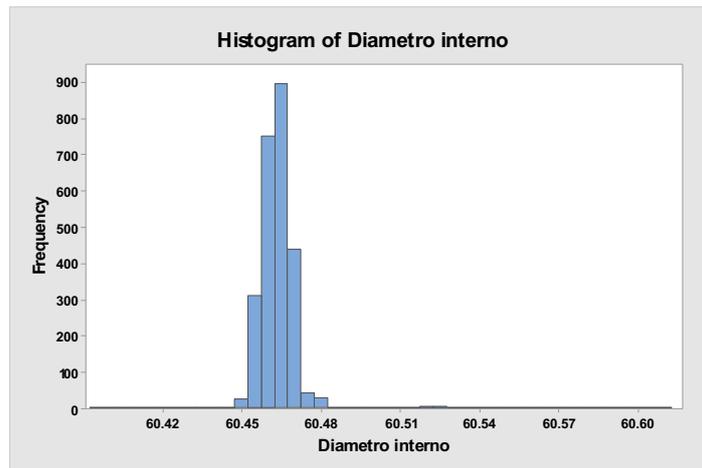


Figura 78 - Istogramma per Diametro interno anello esterno

Distribution	AD	P
Normal	99.544	<0.005
Box-Cox Transformation	98.923	<0.005
Lognormal	99.420	<0.005
Exponential	1156.097	<0.003
Weibull	603.006	<0.010
Smallest Extreme Value	603.395	<0.010
Largest Extreme Value	302.184	<0.010
Gamma	99.383	<0.005
Logistic	7.068	<0.005
Loglogistic	7.057	<0.005

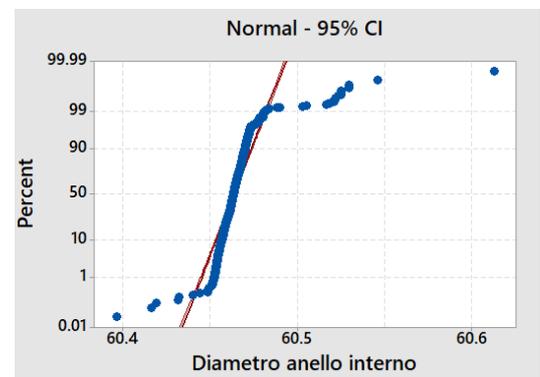


Figura 79 - Diagramma di distribuzione Normale

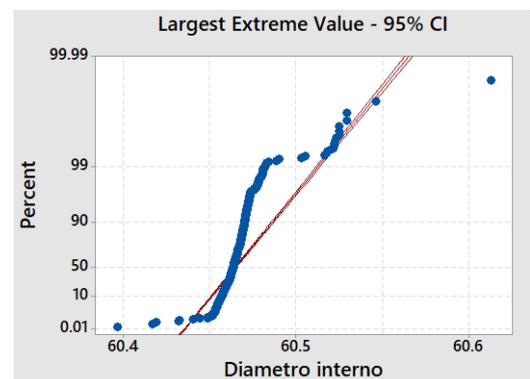


Figura 80 - Diagramma di distribuzione per Largest Extreme Value

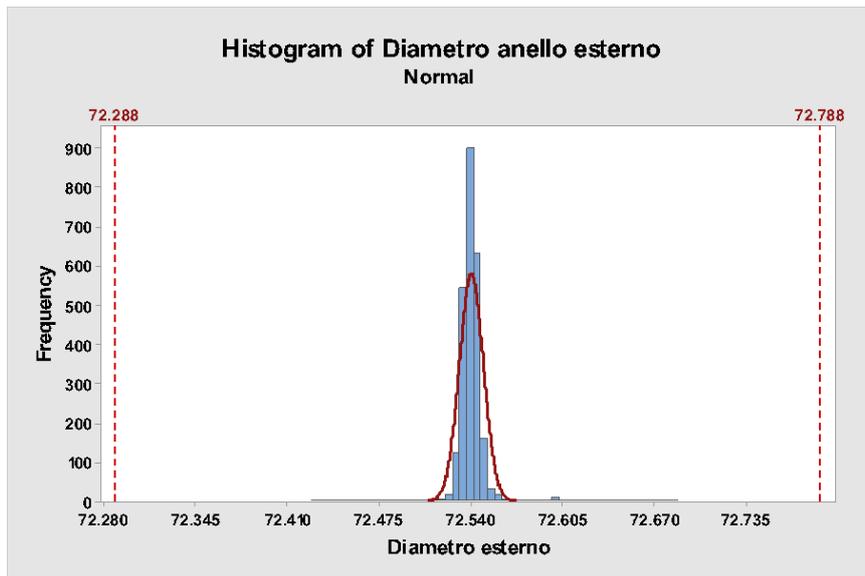


Figura 81 - Approssimazione con distribuzione Normale

$$\mu_y = 60.464 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = 0.008 \text{ mm}$$

E' stata creata la distribuzione anche per i rulli.

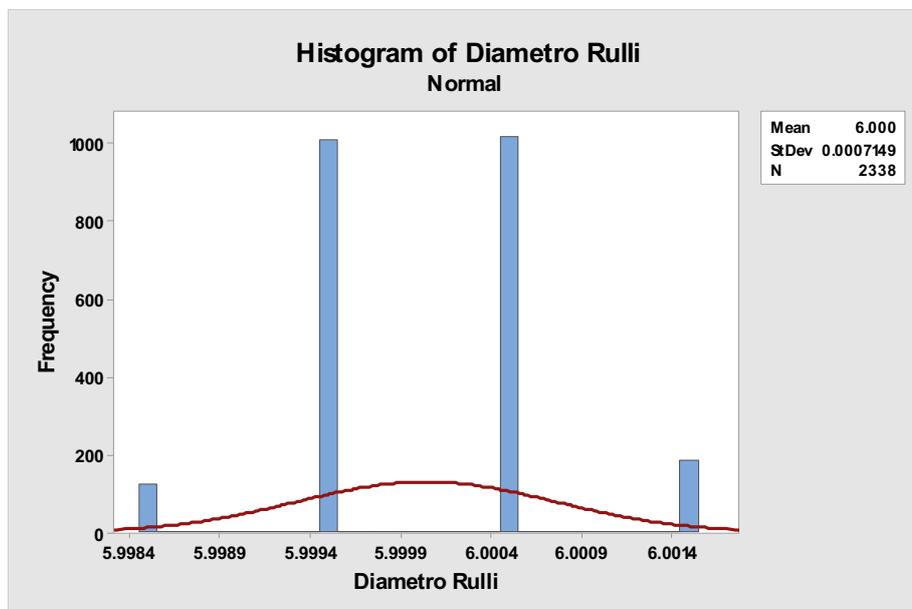


Figura 82- Approssimazione con distribuzione Normale

4.4 COMBINAZIONE LINEARE DI VARIABILI CASUALI GAUSSIANE

Data una coppia di variabili casuali (X e Y), una combinazione lineare è una particolare funzione di X e Y data da $aX + bY$.

Nel caso in cui:

$$X \sim N(\mu_x, \sigma_x)$$

$$Y \sim N(\mu_y, \sigma_y)$$

Il valore atteso di una combinazione lineare è dato dalla combinazione lineare del valore atteso.

$$E[aX + bY] = a\mu_x + b\mu_y \quad (8)$$

La varianza di una combinazione lineare è invece data da:

$$Var[aX + bY] = a^2\sigma_x^2 + b^2\sigma_y^2 + 2abCov(x, y) \quad (9)$$

$$(9) Cov(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1}$$

Se X e Y sono indipendenti la formula si semplifica come segue:

$$Var[aX + bY] = a^2\sigma^2 + b^2\sigma^2 \quad (10)$$

Le formule per il valore atteso e la varianza di combinazioni lineari possono essere generalizzate al caso di n variabili casuali $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$.

Considerata quindi la combinazione lineare:

$$\sum_{i=1}^n a_i X_i = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (11)$$

Il valore atteso è dato da:

$$E[\sum_{i=1}^n a_i X_i] = \sum_{i=1}^n a_i E[X_i] \quad (12)$$

La varianza è invece ottenuta:

$$Var(\sum_{i=1}^n a_i X_i) = \sum_{i=1}^n a_i^2 Var(X_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} a_i a_j Cov(X_i, X_j) \quad (13)$$

4.5 STUDIO DELLA DERIVA DEL PROCESSO NEL TEMPO

Al fine di valutare se la distribuzione normale descrivesse effettivamente il comportamento dei dati e che non ci fossero state derive nel processo collegate al tempo, per i diametri degli anelli interni ed esterni sono state fittate anche le distribuzioni per i dati suddivisi in lotti. I lotti considerati sono stati quelli con numerosità sufficiente per ottenere un'approssimazione significativa e sono stati 10. Le distribuzioni ottenute sono anche in questo caso normali.

Lotti Anelli Interni	Numerosità (N)	Media (mm)	Deviazione standard (mm)
Lotto 1	33	60.468	0.006
Lotto 2	21	60.469	0.013
Lotto 3	52	60.46	0.008
Lotto 4	387	60.464	0.007
Lotto 5	380	60.466	0.004
Lotto 6	349	60.462	0.005
Lotto 7	394	60.462	0.007
Lotto 8	279	60.462	0.01
Lotto 9	394	60.466	0.006
Lotto 10	155	60.465	0.008

Le variabili ottenute per i vari lotti sono indipendenti.

$$E \left[\frac{\sum_{i=1}^{10} N_i Y_i}{2444} \right] = \frac{\sum_{i=1}^{10} N_i E[Y_i]}{2444} = 60.463 \quad (14)$$

$$\sqrt{\text{Var} \left(\frac{\sum_{i=1}^{10} N_i Y_i}{2444} \right)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} \frac{N_i^2 \text{Var}(Y_i)}{2444^2}} = 0.002 \quad (15)$$

Lotti anelli esterni	Numerosità	Media	Deviazione standard
Lotto 1	198	72.542	0.007
Lotto 2	211	72.541	0.004
Lotto 3	212	72.538	0.004
Lotto 4	208	72.538	0.004
Lotto 5	184	72.536	0.005
Lotto 6	183	72.544	0.008
Lotto 7	116	72.537	0.013
Lotto 8	71	72.538	0.003
Lotto 9	145	72.54	0.006
Lotto 10	179	72.544	0.004

$$E \left[\frac{\sum_{i=1}^{10} N_i Y_i}{1707} \right] = \frac{\sum_{i=1}^{10} N_i E[Y_i]}{1707} = 72.54 \quad (16)$$

$$\sqrt{\text{Var} \left(\frac{\sum_{i=1}^{10} N_i Y_i}{1707} \right)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} \frac{N_i^2 \text{Var}(Y_i)}{1707^2}} = 0.002 \quad (17)$$

Dall'analisi dei lotti è emerso che la media delle distribuzioni nel tempo è oscillante non crescente e non decrescente. Il processo è dunque stabile.

Tra le deviazioni standard le differenze sono dovute al fatto che per ogni lotto la macchina è settata su un valore leggermente diverso e la distribuzione dei dati considerati tutti insieme tiene conto anche di queste differenze.

ù

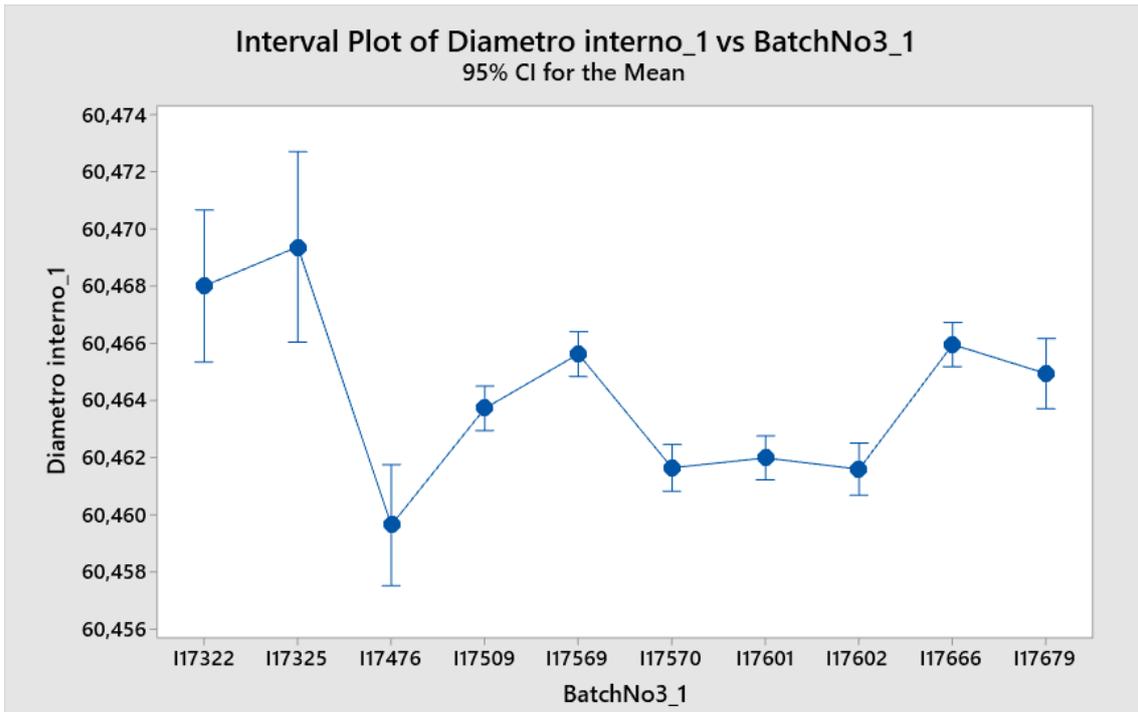


Figura 83- Andamento lotti diametro esterno di anelli interni nel tempo

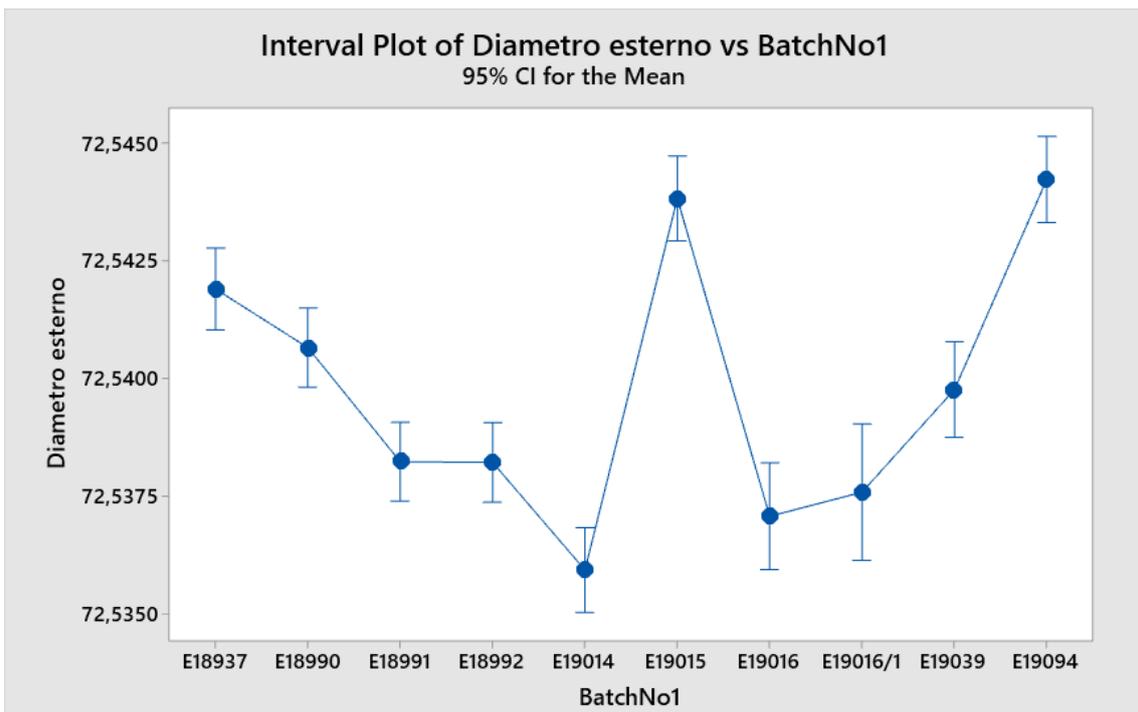


Figura 84- Andamento lotti diametro interno di anelli esterni nel tempo

E' stato ritenuto opportuno utilizzare le distribuzioni ottenute facendo la media tra i vari lotti, in quanto nella realtà non sono disponibili tutti gli anelli insieme al momento dell'appaiatura ma solo quelli del lotto in corso di appaiatura. La variabilità reale è dunque solo quella all'interno dello stesso lotto.

Per i rulli la distribuzione utilizzata è quella iniziale ottenuta considerandoli tutti insieme perché i lotti di rulli sono più numerosi dei lotti di anelli e nei dati considerati non c'erano abbastanza lotti per avere un confronto significativo tra di essi.

4.6 DISTRIBUZIONE IN USCITA DEL GIOCO RADIALE

Le variabili casuali considerate per il gioco radiale sono:

$X \sim N(72.54, 0.002)$	Diametro interno anello esterno
$Y \sim N(60.463, 0.002)$	Diametro esterno anello interno
$Z_1 \sim N(6,000, 0.0001)$	Diametro rullo 1
$Z_2 \sim N(6,000, 0.0001)$	Diametro rullo 2

$$e = (X - Y) - Z_1 - Z_2 \quad (18)$$

$$E [X - Y - Z_1 - Z_2] = \mu_x + \mu_y - \mu_{z1} - \mu_{z2} = 0.077 \quad (19)$$

$$\sqrt{\text{Var} [X + Y - Z_1 - Z_2]} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2} = 0.003 \quad (20)$$

La distribuzione teorica così ottenuta è la seguente.

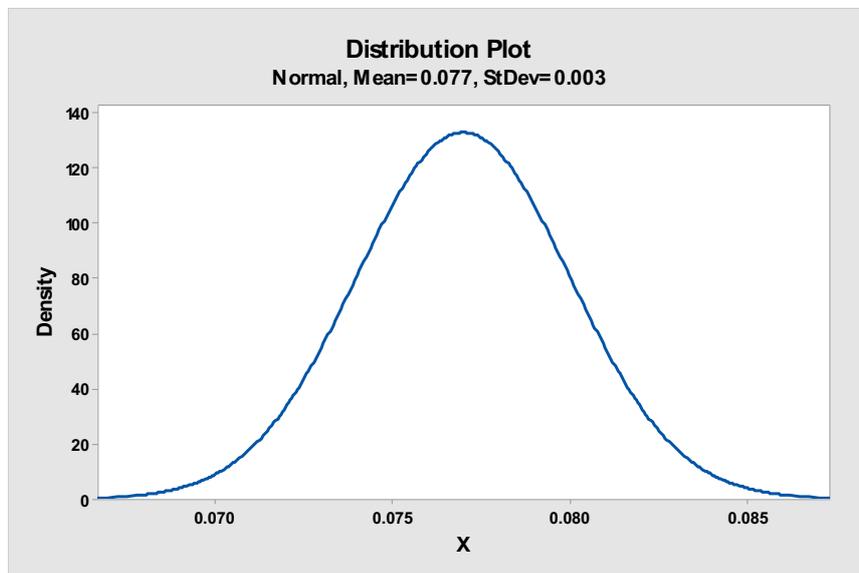


Figura 85 - Distribuzione in uscita dalla composizione

E' stata quindi calcolata la probabilità di ottenere un gioco in tolleranza dalla distribuzione ottenuta.

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f_x(x) \quad (21)$$

Dove a= 0.07mm e b=0.08 mm e:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (22)$$

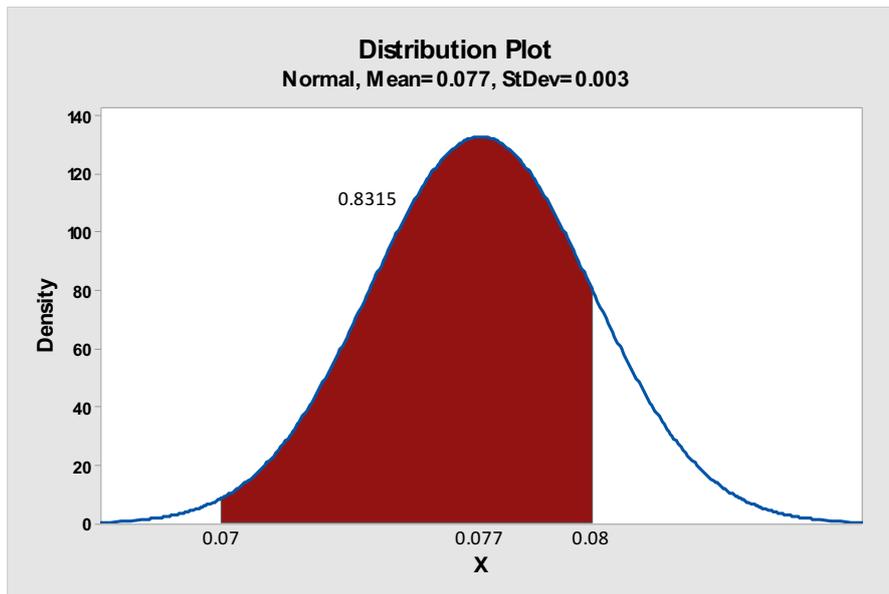


Figura 86 - Probabilità giochi in tolleranza

Ovviamente deve essere poi considerato che vi è un diverso comportamento dei dati reali rispetto all'approssimazione effettuata con la distribuzione normale, in particolare nelle code. La distribuzione così ottenuta determina la probabilità di ottenere un gioco in tolleranza appaiando gli anelli casualmente. Nella realtà è appunto il software ad appaiare gli anelli punto a punto tra le distribuzioni in modo che restino esclusi solo quelli agli estremi di ognuna di esse. La probabilità così ottenuta è pari all'83.15%. Inizialmente il software appaiava gli anelli appena ne aveva disponibili due compatibili e infatti il numero di anelli spaiati era più elevato come in questo caso.

Nel caso in cui si considerino le distribuzioni ottenute inizialmente con tutti i dati insieme:

$$E [X - Y - Z_1 - Z_2] = \mu_x + \mu_y - 2\mu_y = 0.076 \quad (23)$$

$$\sqrt{\text{Var} [X - Y - Z_1 - Z_2]} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2} = 0.011 \quad (24)$$

In questo caso la deviazione standard risulta più elevata perché tra i diversi lotti ci sono centrature diverse e la distribuzione totale tiene conto anche delle differenze tra i lotti. Le centrature sono diverse perché è difficile ripetere la centratura al micron all'inizio di ogni lotto.

E' in ogni caso ritenuto più opportuni tenere conto solo della dispersione all'interno dello stesso lotto per il calcolo della distribuzione teorica perché la realtà è riprodotta meglio da questo caso. Non è stato ritenuto possibile ridurre la dispersione delle distribuzioni di partenza dei diametri degli anelli esterni e di quelli degli anelli interni in quanto, se si osservano gli istogrammi (fig. 63 e 67) si vede che i dati sono ampiamente dentro i limiti di tolleranza, a dimostrazione del fatto che il processo è ampiamente controllato.

Le deviazioni standard risultanti sono l'unione di variabilità dei componenti che possono quindi essere attribuite unicamente al caso. Non essendoci altre variabili controllabili a determinare i risultati finali, l'unica opzione possibile è considerare i casi singoli di errore per prevenirne il ripetersi.

4.3 GIOCO RADIALE IN USCITA CON L'APPAIATURA SOFTWARE

Per la valutazione della distribuzione del gioco radiale in uscita dall'appaiatura software sono stati considerati i dati ottenuti appaiando gli anelli analizzati in precedenza. L'istogramma (fig.70) mostra come sono distribuiti i valori.

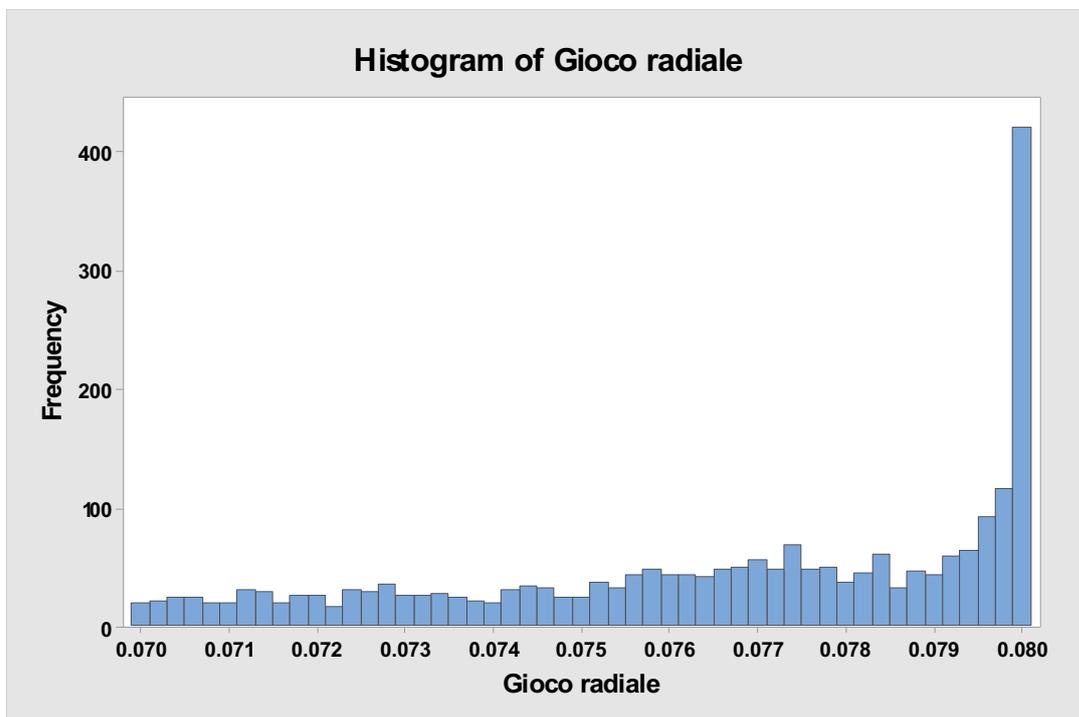


Figura 87 - Istantogramma gioco radiale effettivo

Per approssimare i dati con la distribuzione esponenziale è stata effettuata una trasformazione dei dati. Tutti i dati sono stati trasformati utilizzando la formula (25):

$$e_t = 1 - e \quad (25)$$

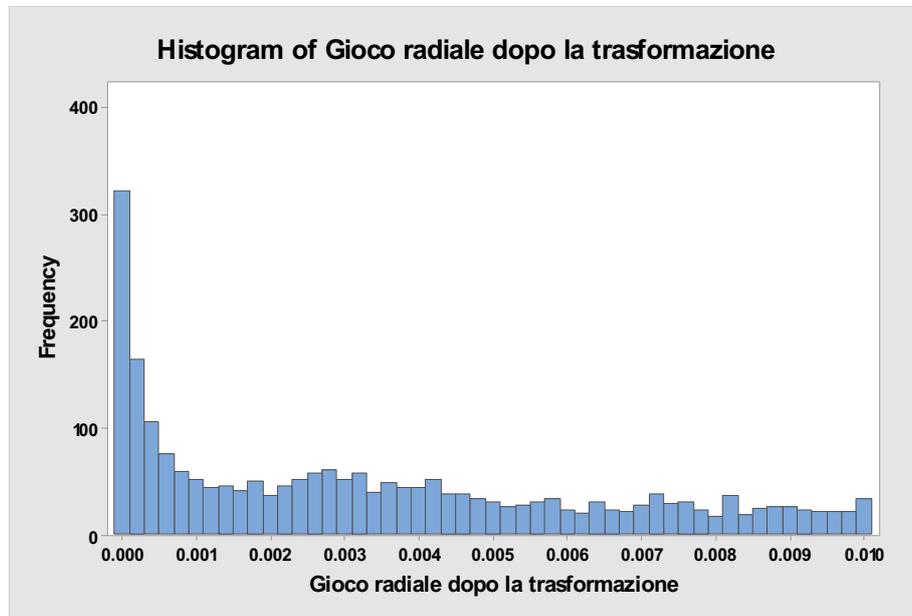


Figura 88- Istogramma Gioco radiale dopo la trasformazione

Distribution	Location	Shape	Scale	Threshold
Exponential			0.00333	

Figura 89 - Stima parametri esponenziali

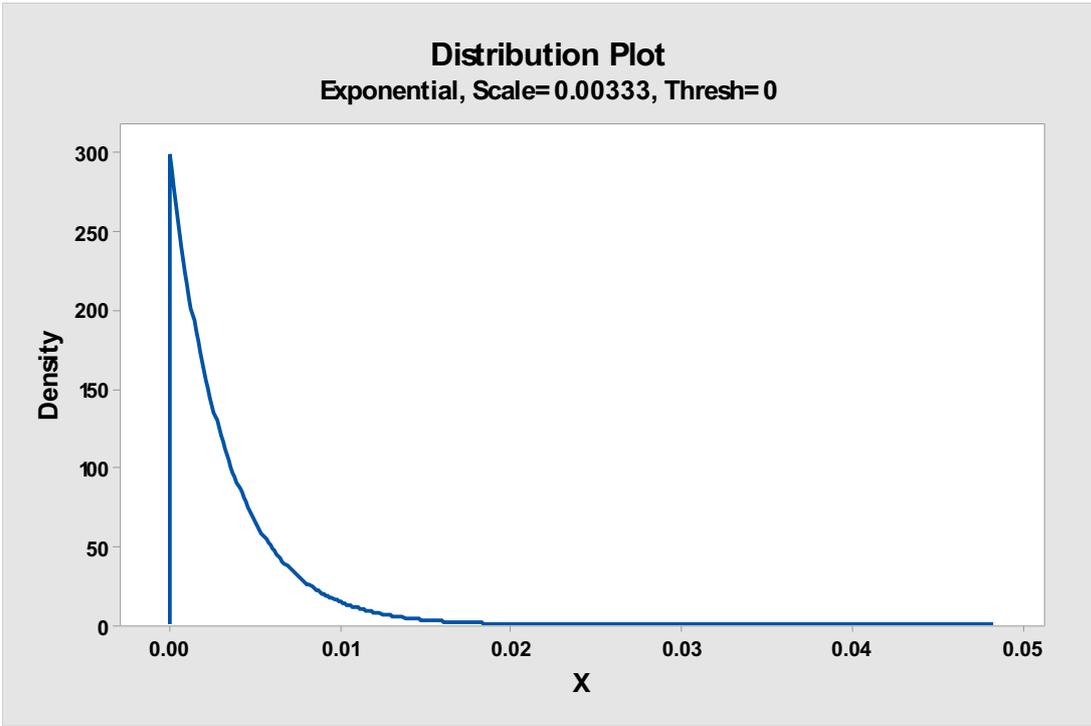


Figura 90 - Approssimazione distribuzione dati

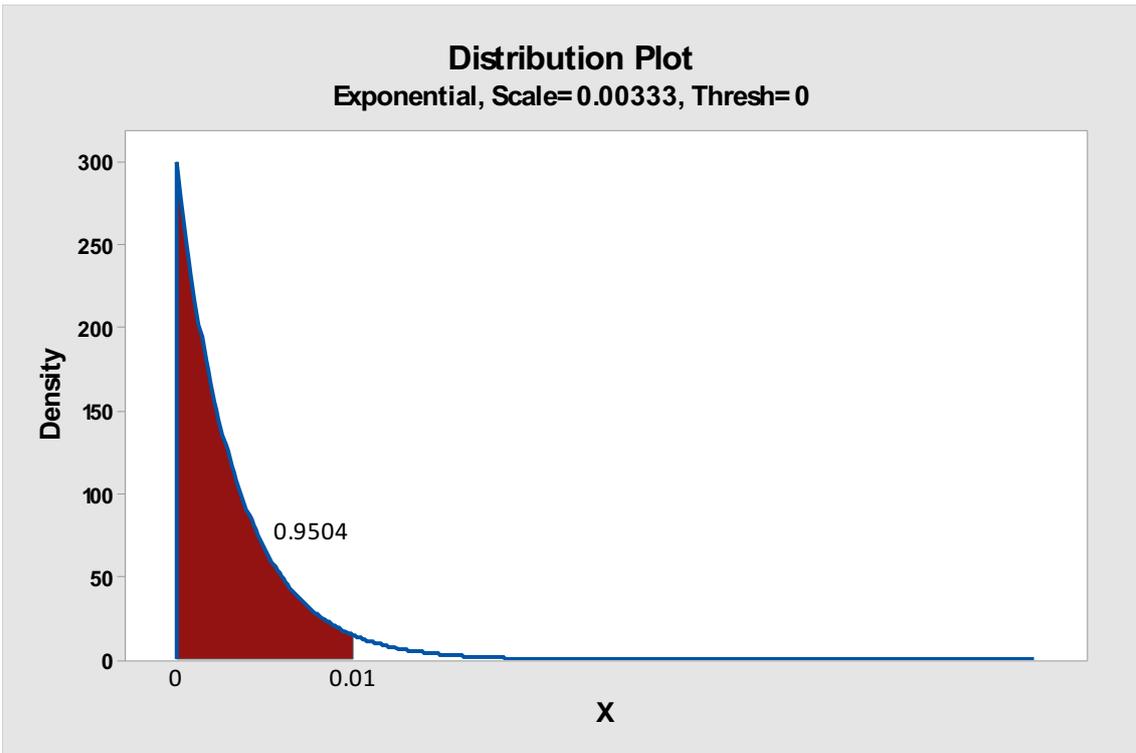


Figura 91 - Probabilità gioco radiale in tolleranza con appaiatura software

La probabilità diventa così 95.04%. La probabilità che i giochi siano fuori tolleranza è nella pratica la probabilità che gli anelli non siano appaiati.

CONCLUSIONI

Con l'utilizzo del metodo DMAIC, è stato indirizzato il cambiamento, ovvero l'introduzione dell'industry 4.0, all'interno dell'azienda al fine di continuare a portare avanti l'obiettivo zero difetti che è alla base del Quality management del settore aeronautico. Quest'ultimo è infatti un settore nel quale non sono ammessi in nessun caso difetti che potrebbero compromettere il funzionamento dei componenti prodotti e di conseguenza dei motori sui quali sono montati.

La maggior parte dei parametri sono controllati al 100% come requisito da parte dei clienti. L'azienda non si assume quindi il rischio di controllare parametri a campione a meno che non sia dimostrato al cliente la stabilità del processo e comunque che non si deve trattare di parametri definiti critici dal cliente. Anche la stabilità del processo lascia spazio comunque a possibili errori casuali che necessitano di un monitoraggio continuo.

La difettosità in uscita dai processi produttivi aziendali è quindi minima ed è effettuata un'analisi specifica per ogni caso scoperto difettoso con le cause principali e le azioni correttive e preventive affinché non siano commessi gli stessi errori.

Per la linea di assemblaggio, le analisi sono state effettuate prima della produzione effettiva per il cliente, in modo che gran parte degli errori che si sarebbero potuti commettere e dei rischi che si potessero correre fossero chiari a priori e di conseguenza le azioni da intraprendere. L'analisi iniziale ha permesso di dimostrare che con l'assemblaggio automatico non venissero meno i controlli effettuati nel processo di assemblaggio manuale. Le macchine utilizzate per il controllo dimensionale garantiscono che tutti i valori ottenuti nelle misurazioni siano memorizzati e di conseguenza, che siano subito individuati eventuali problemi e possano essere analizzati anche tutti i dati storicamente ottenuti.

La fase di controllo è in atto ed è stata facilitata dai dati disponibili ottenuti con l'assemblaggio dei primi lotti di cuscinetti. Anche le problematiche che si sono verificate durante la prima fase di implementazione, hanno indirizzato l'ente Qualità nelle azioni da intraprendere e nella formazione agli operatori.

La linea è utilizzata ora anche per un'altra tipologia di cuscinetti. L'analisi iniziale ha permesso che per le successive analisi ci fosse una base comune da cui partire per ortare ad un ulteriore miglioramento.

BIBLIOGRAFIA

SKF Quality Techniques, QT 5 – Measurement systems analysis

International Organization for Standardization, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results, ISO 5725-1:1994*

AIAG, *Measurement Systems Analysis – Reference Manual*, June 2010, 4th Edition

Churchill Eisenhart (1963), *Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems*

International Organization for Standardization, *Measurement Management Systems – Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment, ISO 10012:2003 (E)*

International Organization for Standardization ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*

Wheeler, D .J . and Lyday, R .W . (1989), *Evaluating the Measurement Process*

Ford, *Measurement System and Equipment Capability – Guidelines*, December 1989

Opel/Vauxhall/General Motors, *Acceptance of Measurement Systems* May 1996

Bosch, *Qualitätssicherung in der Bosch Gruppe Nr. 10, Technische Statistik, Fähigkeit von Messeinrichtungen*, May 1990

E. Dietrich and A. Schulze (1998), *Guidelines for the Evaluation of Measurement Systems and Processes, Acceptance of Production Facilities – Original Guidelines from Ford, General Motors and Daimler-Benz*, Carl Hanser ,Verlag, Munich

Wheeler D .J, , (Manuscript No . 189 – January 2009), *An Honest Gauge R&R Study*, SPC Press, Inc., Knoxville, Tennessee

SKF Quality Techniques, QT 1 – Process Capability Studies

A .J . Duncan, *Quality Control and Industrial Statistics* (1986)

AIAG *Statistical Process Control – Reference Manual*, July 2005, 2nd Edition

A .J . Duncan, *Quality Control and Industrial Statistics*, Richard D . Irwin, 1986

SKF Quality Techniques, QT 5 – Measurement System Analysis

Sitografia

<https://www.minitab.com/en-us/Press-Releases/Department-of-Defense-Saves-Billions-with-Lean-Six-Sigma-and-Minitab/>

<https://www.isixsigma.com/industries/government-non-profit/six-sigma-government-focusing-customer/>

<http://performance.houstontx.gov/sites/default/files/Industrial%20Engineer%20-%20Case%20Study%20-%202015-02.pdf>

<https://asq.org/quality-resources/dmaic>

Normative di riferimento

AS91000_D_Quality Mgmt Systems - req. for Aviation, Space and Defense Org

AS13003_022015 Measurements System Ananlysis Req- for Aero Engine Supply Chain

AS13004_082017_Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA) and Control Plans

AS13006_2018_Process Control Methods