



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Scuola di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

STUDIO DELL'INFLUENZA DELLA TOPOGRAFIA SUPERFICIALE NEL PROCESSO DI VERNICIATURA

Relatore: Ch.mo Prof. ENRICO SAVIO

Laureando: FABIO BERTOLDO

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

“Accettiamo le sfide con uno spirito creativo e il coraggio di realizzare i nostri sogni senza perdere l’intraprendenza o l’energia. Affrontiamo il lavoro con vigore, ottimismo e una sincera convinzione del valore del nostro contributo”

Spirito della sfida, The Toyota Way

Sommario

INTRODUZIONE.....	1
RINGRAZIAMENTI.....	2
1. NORMATIVE E COSTI LEGATI ALLA QUALITÀ	3
1.1. Normativa ISO 9000-2015.....	3
1.1.1. Definizioni e terminologia	3
1.2. Normativa ISO 9001	4
1.2.1. Miglioramento continuo nella ISO 9001.....	6
1.2.2. Sistema di Gestione per la Qualità	7
1.3. Normativa ISO 9004	7
1.4. Costi legati alla qualità.....	9
1.4.1. Costi di prevenzione.....	9
1.4.2. Costi di validazione.....	9
1.4.3. Costi di malfunzionamento interno.....	10
1.4.4. Costo di malfunzionamento esterno	10
1.4.5. Gestione e analisi dei costi della qualità	11
2. IL MIGLIORAMENTO NELLA LEAN	13
2.1. La casa del TPS.....	13
2.2. Le sette tipologie di sprechi	14
2.3. Il miglioramento continuo.....	15
2.3.1. I 5 perché.....	15
2.3.2. Ciclo PDCA	15
2.3.3. Ciclo DMAIC.....	16
2.4. Il six sigma	16
2.4.1. Teoria del six sigma	17
2.4.2. Concezione moderna del Six Sigma.....	17
3. PROCESSO DI MISURAZIONE.....	19

3.1.	Strumento di misura	19
3.1.1.	Campo di misura	20
3.1.2.	Ripetibilità.....	20
3.1.3.	Stabilità.....	21
3.1.4.	Isteresi	22
3.1.5.	Risoluzione.....	22
3.1.6.	Parametri qualitativi dello strumento	23
3.1.7.	Massimo errore permesso.....	24
3.2.	Processo di taratura e conferma metrologica.....	25
3.3.	Processo di misurazione	27
3.4.	Incertezza di misura.....	29
3.4.1.	Tipologie di errori che influenzano l'incertezza.....	29
3.4.2.	Metodo GUM	31
3.4.3.	Metodo PUMA.....	33
3.5.	Verifica della conformità.....	35
3.5.1.	Regola per la prova della conformità	36
3.5.2.	Regola per la prova della non conformità	36
3.6.	Valutazione economica del processo di controllo	37
4.	GEOMETRIA E STATO SUPERFICIALE	43
4.1.	Tipologie di profili superficiali	44
4.2.	Parametri del profilo superficiale	46
4.2.1.	Parametri di ampiezza picco-valle.....	47
4.2.2.	Parametri di ampiezza come media delle ordinate	50
4.2.3.	Parametri di spaziatura	52
4.2.4.	Parametri ibridi.....	53
4.2.5.	Parametri relativi a curve.....	53
4.3.	Strumenti di misura superficiali	56
4.3.1.	Rugosimetro	57

4.3.2.	Strumenti ottici per la misura della rugosità	60
4.3.3.	Microscopio a scansione di sonda	61
4.3.4.	Altri strumenti di misura	62
4.4.	Errori che influenzano la misurazione	63
4.5.	Incertezza nella misurazione dei parametri del profilo superficiale.....	64
4.6.	Verifica della conformità	65
4.6.1.	Regola del 16%	65
4.6.2.	Regola del valore massimo	66
5.	TRATTAMENTI SUPERFICIALI.....	67
5.1.	Il processo di sabbiatura.....	67
5.1.1.	Componenti e struttura	68
5.1.2.	Soluzioni commerciali	69
5.1.3.	Tipologia di graniglia.....	70
5.2.	Il processo di verniciatura	73
5.2.1.	Composizione delle vernici industriali.....	73
5.3.	Tipologie di prodotti	75
5.3.1.	Tecnologie di verniciatura.....	76
5.4.	Difetti di verniciatura	79
5.5.	Controllo della qualità dei trattamenti superficiali.....	82
5.5.1.	Controllo dei parametri del profilo superficiale.....	82
5.5.2.	Controllo dei residui superficiali.....	83
5.5.3.	Controllo dello spessore del film secco.....	84
5.5.4.	Cross cut test	87
6.	EFFETTO DEI PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE SULLE PERFORMANCE DEL RIVESTIMENTO	91
6.1.	Tipologie di mancanza di adesione del prodotto verniciante	91
6.2.	Parametri del profilo superficiale da considerare.....	93
6.3.	Esposizione ambientale.....	94
6.4.	Test per verificare l'adesione	96

6.5.	Correlazione tra numero di picchi e performance del prodotto verniciante	96
6.5.1.	Tipologie di prodotti vernicianti.....	97
6.5.2.	Tipologie di esposizione.....	97
6.5.3.	Test ed analisi eseguiti	98
6.5.4.	Analisi dei risultati	98
6.6.	Correlazione tra Rt e le performance del prodotto verniciante.....	100
6.6.1.	Preparazione dei provini.....	100
6.6.2.	Test ed analisi eseguiti	100
6.6.3.	Analisi dei risultati	100
7.	CASO STUDIO PIETRO FIORENTINI	103
7.1.	Azienda.....	103
7.2.	Analisi del problema	103
7.3.	Analisi tecnica	105
7.3.1.	Morfologia e realizzazione dei provini.....	106
7.3.2.	Materiale dei provini	106
7.3.3.	Preparazione superficiale.....	106
7.3.4.	Processo di verniciatura.....	107
7.3.5.	Test non distruttivi eseguiti	108
7.3.6.	Test distruttivi eseguiti	110
7.3.7.	Esposizione dei provini	111
7.3.8.	Analisi della superficie	112
7.3.9.	Report dei provini.....	113
7.3.10.	Analisi dei risultati	126
7.4.	Analisi economica costi – benefici.....	128
7.4.1.	Controllo della qualità e controllo del processo	129
7.4.2.	Analisi dei costi associati alle non conformità	131
7.4.3.	Costi associati al controllo di processo e controllo qualità	133
7.4.4.	Analisi costi-benefici.....	134

8.	MIGLIORAMENTI FUTURI.....	143
8.1.	Rilevazione e registrazione dei dati	143
8.2.	Cataforesi	143
	BIBLIOGRAFIA E NORMATIVE DI RIFERIMENTO	145

INTRODUZIONE

Nella realtà industriale attuale, caratterizzata da un costante aumento dei competitors stranieri, generare un prodotto di qualità risulta essere oramai un prerequisito fondamentale per centrare gli obiettivi di breve e lungo periodo di un'azienda, quindi garantirne sviluppo e prosperità. In questo contesto tuttavia, molte aziende preferiscono implementare modelli e metodi per la gestione della qualità basati esclusivamente sull'esperienza, ottenendo quindi risultati incerti. L'implementazione di modelli basati esclusivamente sull'esperienza, può generare sfiducia verso le metodologie di Quality Control, in quanto essendo queste mal organizzate e/o gestite, possono generare costi eccessivi o peggio non essere funzionali al loro scopo, ovvero assicurare la qualità dell'output. Fortunatamente, negli ultimi decenni, la realtà industriale italiana è venuta a contatto con un modo di pensare radicalmente diverso rispetto alla visione produttiva tradizionale, ovvero la Lean Production o meglio ancora il Lean Thinking. Sebbene a prima vista, il controllo qualità e la visione produttiva giapponese possano sembrare lontani, alcuni dei 14 principi fondamentali del Toyota Production System, segnano la giusta direzione da seguire per ottenere un prodotto di qualità.

Il seguente lavoro, è frutto di un'esperienza durata quattro mesi presso Pietro Fiorentini S.p.a, definiti come “gruppo leader nella realizzazione di prodotti e servizi tecnologicamente avanzati per la distribuzione e l'utilizzo del gas naturale”, e ha consentito di strutturare un processo di controllo qualità della verniciatura, caratterizzato da efficacia ma soprattutto efficienza. Il lavoro è suddiviso in due filoni principali: l'analisi tecnica dei difetti di verniciatura in funzione dei parametri dimensionali superficiali e l'analisi economica del controllo qualità posto in essere.

I capitoli 1 e 2, forniscono una visione d'insieme sui temi della qualità e della necessità di eliminare gli sprechi attraverso una politica “difetti zero”.

I capitoli 3 e 4 forniscono una trattazione teorica delle definizioni metrologiche e dei parametri dimensionali da prendere in considerazione nella valutazione dello stato superficiale.

Il capitolo 5 permette di comprendere a fondo le caratteristiche del processo e le tecniche prese in considerazione per la strutturazione di un processo che assicuri la qualità.

Il capitolo 6 fornisce una panoramica di alcuni studi aventi alcuni punti di similarità con il lavoro svolto in Pietro Fiorentini.

Nel capitolo 7 trovano posto le rilevazioni tecniche effettuate al fine di risolvere le problematiche individuate e un'analisi economica che permette di stimare costi e benefici del processo di controllo qualità implementato.

Trovano infine spazio, nell'ultimo capitolo, due possibili spunti di miglioramento da implementare in futuro, al fine di rispecchiare in pieno la filosofia Kaizen.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine, anche se a me spetta la responsabilità per ogni errore contenuto in questa tesi.

Ringrazio anzitutto il professor Enrico Savio, Relatore, il quale senza il suo supporto e la sua guida sapiente questa tesi non esisterebbe.

Ringrazio il mio Tutor Ing. Simone Bastianello, capace di indirizzare direttamente alla fonte delle problematiche affrontate nel seguente lavoro.

Proseguo con il tutto il personale dell'ufficio tecnico della divisione MAXIREG in Pietro Fiorentini, in particolare il dottor Enrico Bazzan, il signor Nicola Barlaffa e il signor Alberto Arsego, che hanno saputo ascoltare ed interpretare le mie esigenze, facilitando le mie ricerche.

Vorrei infine ringraziare le persone a me più care: i miei amici, la mia famiglia ed infine la mia fidanzata, a cui questo lavoro è dedicato

1. NORMATIVE E COSTI LEGATI ALLA QUALITÀ

Una delle domande che ci si pone di fronte ai temi della qualità e del controllo di quest'ultima è: la gestione della qualità genera sempre miglioramenti? Al fine di rispondere a questa domanda, è essenziale fare una distinzione tra tecniche e procedure di qualità isolate e sistemi di qualità. Nel caso in cui, la gestione della qualità venga implementata mediante azioni “una tantum”, si osserva che quasi la metà di questi programmi, generano solo miglioramenti deludenti e temporanei [1]. Al fine di garantire un concreto miglioramento dalle attività di gestione della qualità, risulta necessario che ci siano sistemi e procedure in grado di supportare le nuove attività, e che quindi permettano di incorporare quest'ultime alla routine quotidiana, rendendole quindi standard.

1.1. Normativa ISO 9000-2015

La normativa ISO 9000 nasce nel 1987 allo scopo di assicurare la qualità dei prodotti, mediante l'assicurazione della conformità del prodotto e del processo. Sebbene sia stata aggiornata periodicamente, la normativa in oggetto, nel 2000 subisce un cambio radicale di prospettiva, focalizzandosi sui sistemi di gestione della qualità mediante la gestione dei processi, il miglioramento continuo e sui requisiti del cliente. Attualmente, la ISO 9000 costituisce una famiglia di norme, le quali possono essere così sintetizzate:

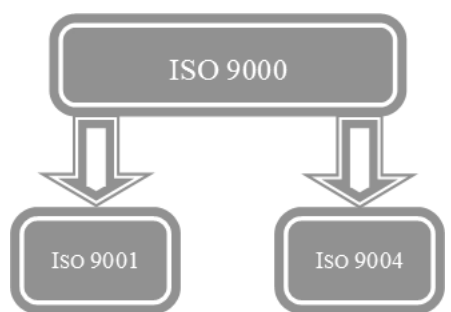


Immagine 1: Famiglia normative ISO 9000

ISO 9000: Stabilisce i concetti e principi fondamentali della gestione della qualità.

ISO 9001: Stabilisce i requisiti, necessari e sufficienti per lo sviluppo di un SGQ, atti ad essere utilizzati sia in ambito interno alle organizzazioni, sia per la certificazione, sia nell'ambito di rapporti contrattuali.

ISO 9004: Fornisce gli orientamenti per una gamma più ampia di obiettivi del SGQ, in particolare per il miglioramento delle prestazioni complessive e dell'efficienza dell'organizzazione, oltre che dell'efficacia.

1.1.1. Definizioni e terminologia

Come ogni normativa ISO, nella prima parte vengono elencate le definizioni utili al fine di comprendere appieno la normativa stessa. Per la famiglia di normative ISO 9000, risulta essenziale definire

Qualità: “È il grado in cui un insieme di caratteristiche intrinseche soddisfa i requisiti”

Definizione 3.6.2 UNI EN ISO 9000-2015 [2]

Questa definizione molto concisa, permette di identificare univocamente il significato del termine qualità, in quanto ogni singolo termine utilizzato, viene attentamente illustrato nei paragrafi successivi della normativa, ovvero le caratteristiche “rappresentano l’elemento distintivo” [2] e per requisiti si intende “l’esigenza o aspettativa che può essere espressa, generalmente implicita o cogente” [2]. Questa definizione inoltre, permette di coniugare i due significati del termine qualità, in quanto include sia il concetto di conformità che quello di soddisfazione delle aspettative del cliente.

Sistema di Gestione per la Qualità: “Insieme di elementi per stabilire politica ed obiettivi per guidare e per tenere sotto controllo un’organizzazione con riferimento alla qualità.”

Definizione 3.5.4 UNI EN ISO 9000-2015 [2]

La qualità quindi, non è ottenibile mediante azioni o pratiche disarmoniche tra loro, ma necessita al fine di essere raggiunta, di una struttura definita che implementi azioni in modo quanto più possibile standardizzato, in modo tale da raggiungere gli obiettivi qualitativi prefissati.

Capacità: “Abilità di un’organizzazione, di un sistema o di un processo nel realizzare un output che rispetti pienamente i requisiti per quest’ultimo.”

Definizione 3.6.12 UNI EN ISO 9000-2015 [2]

Ulteriori definizioni, sempre riportate nella normativa finora citata che forniscono maggiore chiarezza sulla terminologia sono:

- **Azione preventiva:** “azione atta ad eliminare un potenziale causa di non conformità o di un’altra potenziale situazione non desiderabile.”
- **Azione correttiva:** “azione atta ad eliminare la causa di una non conformità rilevata o di un’altra potenziale situazione non desiderabile.”
- **Correzione:** “azione atta a correggere una non conformità”

1.2. Normativa ISO 9001

Lo scopo della normativa ISO 9001 è quello di definire i requisiti di un sistema per la gestione della qualità, dove l’organizzazione:

- Necessita di dimostrare la sua abilità nel fornire costantemente un prodotto che soddisfi i requisiti

- Si propone di migliorare la soddisfazione dei clienti attraverso l'effettiva applicazione del sistema, includendo processi per il miglioramento continuo, e la garanzia di conformità al cliente.

Al fine di essere definito come tale, un sistema di gestione della qualità deve rispettare 8 principi:

- **Orientamento al cliente:** il top management deve dimostrare autorevolezza e impegno nel rispetto dell'orientamento al cliente, assicurando la conoscenza di quest'ultimo e dei suoi requisiti, considerando i rischi che possono affliggere i prodotti venduti e focalizzandosi sulla soddisfazione del cliente.
- **Leadership:** il top management deve dimostrare autorevolezza e impegno nel sistema per la gestione della qualità in molti modi diversi, utilizzando sistemi di accounting per rendere aggettivo il SGM¹, promuovere l'approccio per processi e il pensiero orientato alla gestione del rischio, ingaggiare e seguire/supportare le persone che contribuiscono al funzionamento del SGM, promuovendo il miglioramento.
- **Approccio per processi:** il quale permette di fornire un collegamento tra i singoli processi all'intero dell'intero processo aziendale, evidenziandone combinazioni e interazioni
- **Coinvolgimento del personale:** effettuare investimenti nella crescita dei singoli individui, in modo tale da fornire a quest'ultimi gli strumenti per essere partecipi e dare tutto il loro impegno.
- **Visione sistemica della gestione aziendale:** la quale permette di Identificare, capire e gestire (come fossero un sistema) processi tra loro correlati contribuisce all' efficacia e all'efficienza dell'organizzazione nel conseguire i propri obiettivi.
- **Decisioni basate su dati concreti:** ovvero le decisioni devono essere prese in modo imparziale, valutando attentamente tutti gli aspetti, ma soprattutto eseguendo misurazioni allo scopo di valutare l'efficacia e l'efficienza del SGM e del miglioramento continuo.
- **Rapporto di reciproca utilità con i fornitori:** il rapporto con i fornitori deve essere sviluppato in assenza di comportamenti opportunistici e deve avere come obiettivo finale la crescita di ambedue le parti.
- **Miglioramento continuo:** miglioramento continuo delle pratiche dell'azienda, eseguito considerando sempre la condizione *as is* e la condizione *to be*, eseguendo misurazioni della variazione di performance derivante dal miglioramento stesso, e considerando come obiettivo ultimo il *zero defects*.

¹ SGM: abbreviazione per Sistema per la Gestione della Qualità.

1.2.1. Miglioramento continuo nella ISO 9001

La normativa ISO 9001 fornisce uno schema che rende maggiormente immediata la comprensione di come il miglioramento continuo sia la vera essenza del SGM e di come questo permetta l'accrescimento delle performance dell'organizzazione.

Miglioramento Continuo: “Attività ricorrente eseguita al fine di accrescere le performance”

Definizione 3.3.2 UNI EN ISO 9000-2015 [2]

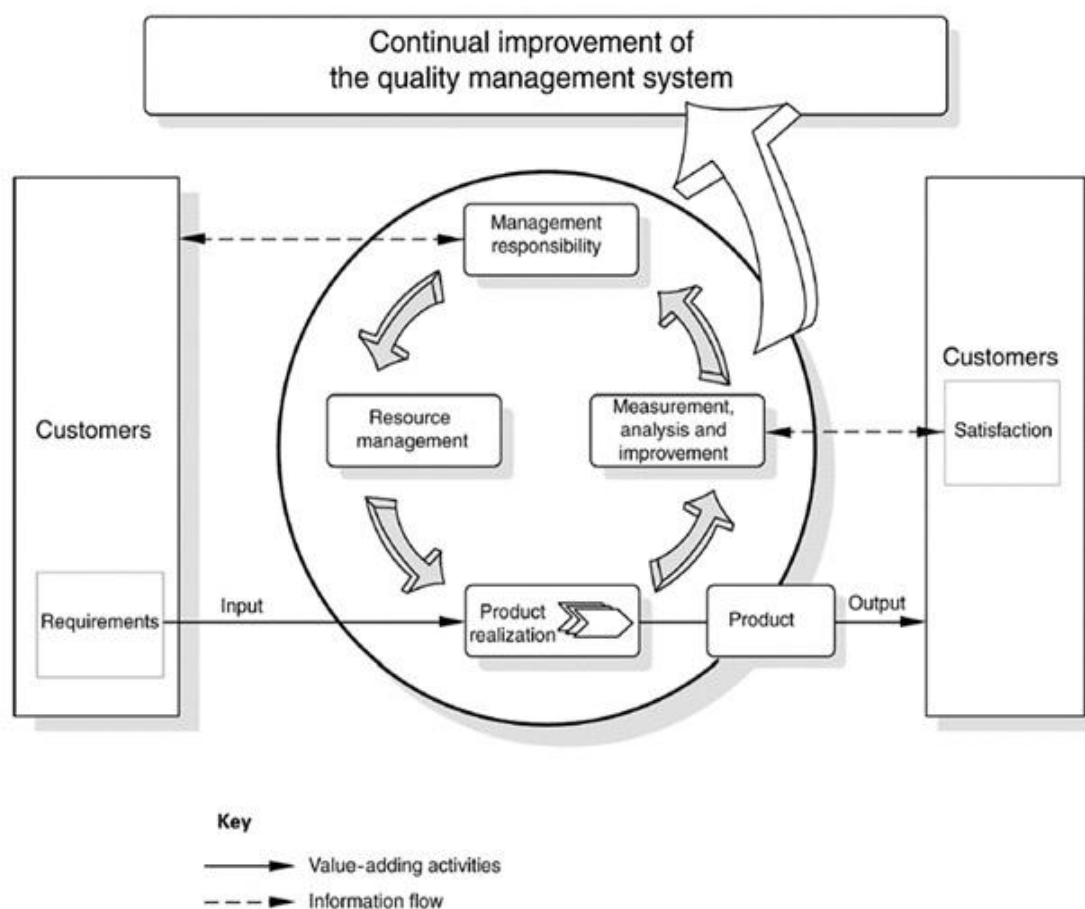


Immagine 2: logica di funzionamento della ISO 9001 [3]

Il diagramma, mostra con estrema efficacia come i requisiti del cliente siano l'inizio del ciclo di miglioramento, dato che sulla base di questi si effettuano gli aggiustamenti ai prodotti esistenti e/o se ne realizzano di nuovi. Queste modifiche, le quali implicano modifiche al processo preesistente e/o generano un nuovo processo, vengono misurate e analizzate, in modo tale da coglierne le lacune e fornire nuovi spunti di miglioramento. L'analisi e le misurazioni del processo, permettono oltre all'accrescimento dell'organizzazione in termini qualitativi, di migliorare la soddisfazione del cliente.

1.2.2. Sistema di Gestione per la Qualità

Il sistema per la gestione della qualità, viene descritto nel quarto capitolo, e come già riportato nella terminologia, viene definito come un “Insieme di elementi per stabilire politica ed obiettivi per guidare e per tenere sotto controllo un’organizzazione con riferimento alla qualità”. L’organizzazione deve stabilire, documentare, implementare e mantenere il sistema per la gestione della qualità al fine di continuare ad aumentare la sua efficacia. Per fare questo è necessario:

Determinare gli input richiesti e gli output attesi per da ogni processo, dove gli input generalmente derivano da un altro processo (informazioni, materiali, servizi...) mentre gli output possono costituire un input per un processo a vale.

Determinare l’interazione e la sequenza dei processi, ordinando quest’ultimi secondo un ordine logico.

Determinare criteri e metodi per assicurare un’efficacie operatività e uno stretto controllo dei processi, verificando che quest’ultimi forniscano un output conforme a quello progettato.

Determinare la disponibilità di risorse e l’assicurazione della presenza di queste, dove per risorse si intendono materie prime, fornitori, personale, servizi, ecc.

Determinare la responsabilità e l’autorità per ogni processo, implementando quindi il concetto di delega e responsabilità.

Determinare i rischi e le opportunità correlati ai singoli processi, valorizzando i risultati attesi e cercando di prevenire o quantomeno ridurre gli effetti inattesi.

Determinare le azioni da implementare al fine di gestire i rischi e le opportunità precedentemente descritti.

Occuparsi del mantenimento e della conservazione delle informazioni documentate per supportare il funzionamento dei processi.

1.3. Normativa ISO 9004

La normativa ISO 9004, come già brevemente riportato nel paragrafo 1.1, fornisce gli orientamenti per una gamma più ampia di obiettivi del SGQ, in particolare per il miglioramento delle prestazioni complessive e dell’efficienza dell’organizzazione, oltre che dell’efficacia.

L’immagine alla pagina seguente mostra con chiarezza il funzionamento e lo scopo della normativa in oggetto. Il raggiungimento di una maggiore efficienza senza compromettere l’efficacia dell’organizzazione, risulta essere ottenibile applicando i seguenti 5 principi:

- **Gestione per il successo di lungo periodo:** ottenibile mediante l’efficiente utilizzo delle risorse, concentrandosi sui requisiti del cliente e prendendo decisioni basandosi esclusivamente su dati concreti.
- **Strategia e politica:** definizione, rispetto e mantenimento della *vision/mission*

aziendale e dei valori dell'organizzazione. Questo risulta essere attuabile effettuando controlli periodici sullo stato dell'organizzazione stessa, analizzando gli stakeholder ed il loro "benessere".

- **Gestione delle risorse:** identificazione delle risorse interne ed esterne necessarie al raggiungimento degli obiettivi di breve e lungo periodo. Oltre ad identificare queste risorse, è necessario assicurare che queste vengano gestite con efficienza, condizione realizzabile monitorandole, allocandole e ottimizzandole.
- **Gestione dei processi:** definizione dei processi e delle funzioni necessari/e alla prosecuzione della fornitura di prodotti/servizi ai clienti. Come per la normativa ISO 9000, la ISO 9004 prevede l'assegnazione ad ogni processo di un responsabile e la definizione dell'autorità di quest'ultimo.
- **Misurazioni, analisi e resoconti:** eseguire quindi misurazioni e analisi sulle performance dell'organizzazione e dei suoi processi. Le misurazioni devono essere utili alla definizione del rischio del processo, eseguire attività di benchmarking, monitorare il miglioramento o il peggioramento delle performance mediante il confronto con i dati storici, definizione dei KPI, ecc.

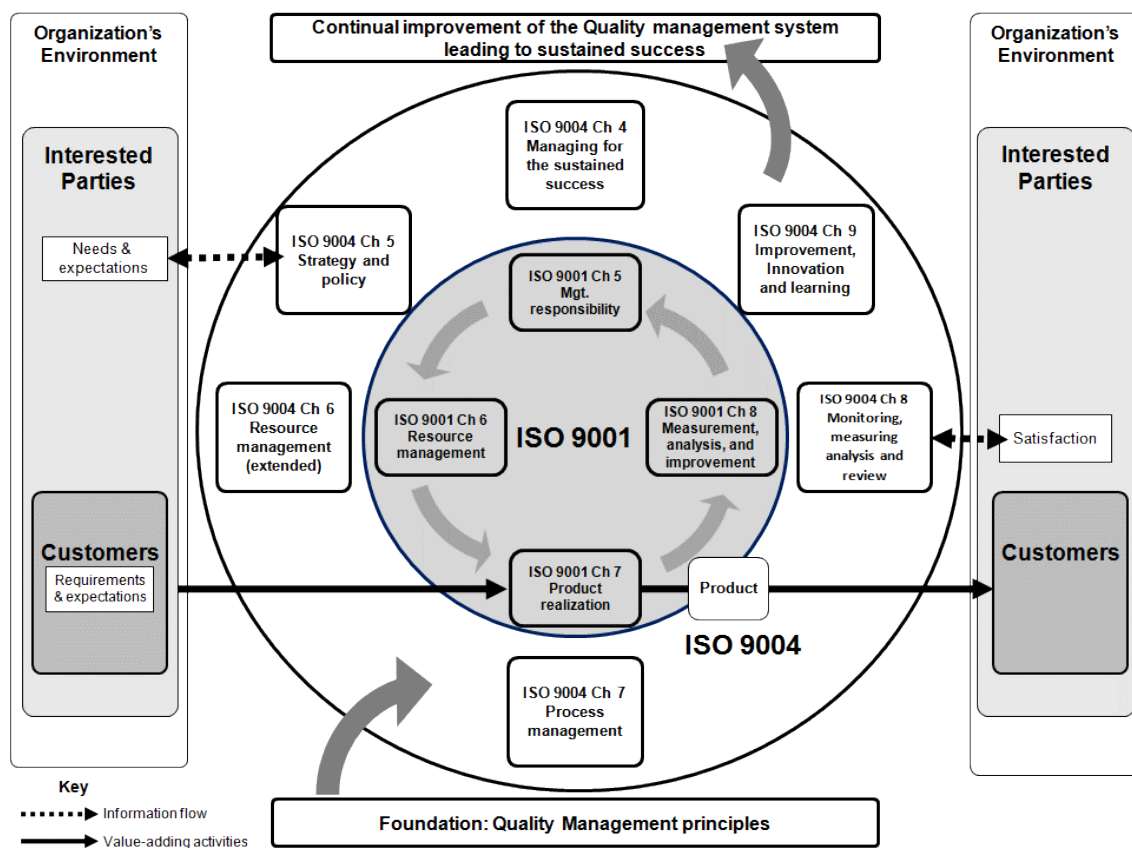


Immagine 3: logica di funzionamento della ISO 9004 [4]

1.4. Costi legati alla qualità

I costi legati alla qualità, appartengono alla categoria di costi associati alla produzione, identificazioni e riparazione dei prodotti che non soddisfano i requisiti. Con lo svilupparsi degli strumenti di controllo di gestione, questi costi hanno assunto sempre con maggiore frequenza uno strumento di controllo finanziario, avente lo scopo di identificare le opportunità di riduzione e miglioramento. Douglas C. Montgomery [5] individua quattro diverse tipologie di costi legati alla qualità:

- Costi di prevenzione
- Costi di validazione
- Costi di malfunzionamento interno
- Costi di malfunzionamento esterno

1.4.1. Costi di prevenzione

Definibili come costi associati agli sforzi che l'organizzazione sostiene al fine di sostenere le azioni preventive. Questi costi si possono manifestare in fase di progettazione e produzione, e vengono sostenuti allo scopo di prevenire le non conformità. Si individuano le seguenti sottocategorie:

- **Pianificazione e ingegnerizzazione della qualità:** ovvero i costi associati alla progettazione ed alla realizzazione del piano globale per la qualità, del piano di ispezione, di affidabilità, del sistema di elaborazione dei dati.
- **Revisione nuovi prodotti:** costi legati alla preparazione delle proposte e valutazione di nuovi progetti dal punto di vista della qualità.
- **Progetto di prodotto/processo:** costi affrontati durante la progettazione del prodotto o la determinazione e selezione dei processi produttivi destinati a migliorare la qualità.
- **Controllo di processo:** costi derivanti dall'implementazione ed utilizzo delle tecniche di controllo, come le carte di controllo.
- **Acquisizione e analisi dei dati di qualità:** costi legati alla gestione, archiviazione e trattamento dei dati che concernono la qualità.

1.4.2. Costi di validazione

Definiti come costi associati alla misurazione, valutazione e controllo interno dei prodotti, ovvero i costi associati a tutte le "pratiche" che vengono effettuate per assicurare la conformità agli standard qualitativi fissati. Le principali sottocategorie sono:

- Ispezione e valutazione dei materiali in input
- Ispezione e valutazione di prodotto

- Materiali e servizi consumati
- Manutenzione dell'accuratezza delle attrezzature di prova

1.4.3. Costi di malfunzionamento interno

Vengono così definiti i costi derivanti da scoperti internamente, ovvero quando i prodotti, materiali e i servizi non soddisfano il livello di qualità richiesto e il difetto viene intercettato prima che il prodotto venga inviato alla clientela. Le principali sottocategorie sono:

- **Scarto:** perdita completa del lavoro fino a quel punto eseguito e del materiale dovuta alla presenza di prodotti difettosi che non risultano essere economicamente e/o fisicamente riparabili, quindi da considerare inutilizzabili.
- **Rilavorazione:** costo derivante dalla correzione delle non conformità, che può essere generato dalla necessità di lavorazioni aggiuntive oppure dalla necessità di effettuare nuovamente lavorazioni svolte in precedenza.
- **Re-test:** costi associati alla re ispezione di prodotti che hanno subito una rilavorazione.
- **Analisi di malfunzionamento:** costi derivanti dalle analisi delle cause che hanno prodotto i malfunzionamenti.
- **Fermo macchina:** costo del fermo della linea/cella di produzione a causa del verificarsi di non conformità nei prodotti. Queste non conformità possono anche essere generate da difetti presenti nelle materie prime e non intercettati in fase di controllo di accettazione.
- **Perdite di produzione:** costi dovuti alla flessione dell'output produttivo rispetto a quanto ottenibile in condizioni di controllo maggiormente efficiente.
- **Declassamento:** differenza presente nel prezzo di vendita tra il normale prezzo di listino riferito ad un prodotto conforme, e il prezzo che si è costretti ad applicare nel caso in cui il prodotto non sia conforme.

1.4.4. Costo di malfunzionamento esterno

Costi che insorgono quando un prodotto che non rispetta pienamente gli standard qualitativi imposti, viene inviato al cliente. Le principali sottocategorie individuabili sono:

- **Gestione dei reclami:** costi necessari alla verifica e alla risoluzione delle lamentele (giustificate) da parte dell'utilizzatore, derivanti da un prodotto non conforme.
- **Prodotto o materiale respinto:** costi legati alla gestione ed alla sostituzione del materiale non conforme respinto dalla clientela.
- **Costi di assicurazione:** costi derivanti dai servizi offerti in caso di prodotti coperti da contratti di assicurazione.
- **Costi per responsabilità di prodotto:** premi o indennizzi che l'azienda deve pagare, derivanti da controversie sulle responsabilità del prodotto.

- **Costi indiretti:** costi legati alla insoddisfazione della clientela, derivante da partite di scarsa qualità. In questi costi, occorre considerare la perdita di reputazione e il danno all'immagine dell'azienda.

1.4.5. Gestione e analisi dei costi della qualità

La qualità, dal punto di vista economico, viene vista frequentemente esclusivamente come un costo, senza considerarne quindi i benefici che questa è in grado di portare. Questo è uno degli errori più frequenti nelle organizzazioni che si affacciano al miglioramento qualitativo dei propri prodotti e processi. Un altro errore che con troppa frequenza viene commesso, è quello di ignorare il fatto che la prevenzione è maggiormente conveniente rispetto all'azione correttiva necessaria a difetto intercettato. Il non eseguire attività preventive, ma solamente attività di validazione della qualità, permette di assicurare al cliente un prodotto esente da difetti, assicurando quindi l'efficacia, ma non l'efficienza. Per questo motivo, al fine di inseguire l'obiettivo zero difetti, è necessario concentrarsi sulle attività preventive, le quali oltre a ridurre fortemente la necessità di attività di validazione, consente una riduzione dei costi globali legati alla qualità.

Il contributo nel risparmio totale dovuto alle attività di gestione della qualità, è fortemente legato alla situazione qualitativa attuale in cui versa l'organizzazione. Nel caso in cui i processi e/o i prodotti non siano mai stati soggetti alle analisi in oggetto, il risparmio ottenibile può arrivare al 50/60 % in breve tempo, per poi attestarsi su questi valori (rispetto alla condizione di assenza di un controllo qualità). Il contributo in termini di costi e benefici, può essere visto nel diagramma sottostante, detto Economic Conformance Model:

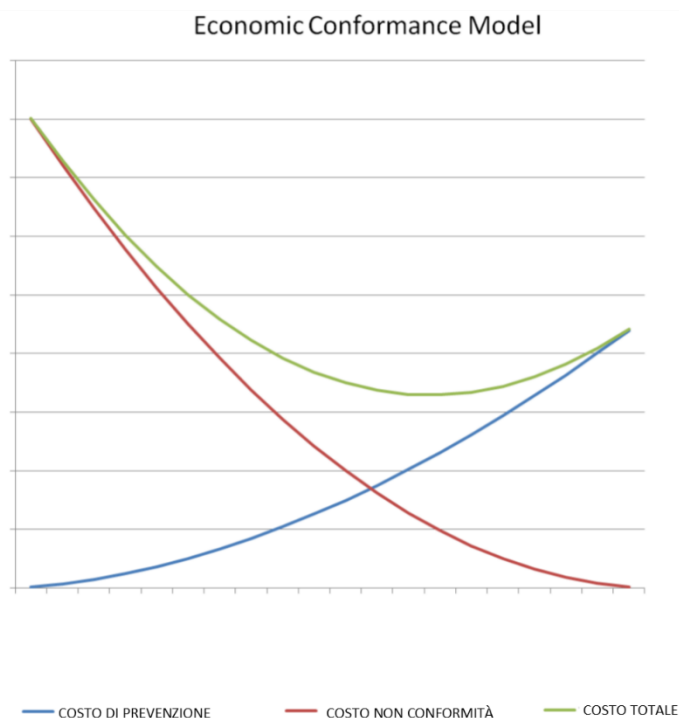


Immagine 4: Economic Conformance Level

2.IL MIGLIORAMENTO NELLA LEAN

Il Toyota Production System, d'ora in poi chiamato semplicemente TPS, oltre ad essere un insieme di tecniche di gestione e pianificazione della produzione, è una vera e propria filosofia aziendale e delle persone, la quale al fine di essere implementata correttamente, deve essere colta e applicata nella sua totalità. Il TPS nasce circa a metà del secolo scorso in Giappone, con il fine ultimo di incrementare la produttività ai livelli di Ford, tuttavia differenziandosi da quest'ultimo garantendosi un rientro rapido di liquidità, ovvero riducendo il tempo che intercorre tra la ricezione dell'ordine e l'incasso del pagamento. Nei paragrafi successivi, ci si concentrerà sugli aspetti della riduzione degli sprechi derivanti dalla qualità, sul concetto di qualità intrinseca (*Jidoka*) e sul miglioramento continuo, tralasciando quindi gli aspetti relativi alla gestione della produzione (*JIT*, *kanban*, ecc).

2.1. La casa del TPS



Immagine 5: casa del TPS [6]

L'immagine 4, ovvero la casa del TPS è uno dei simboli maggiormente diffusi della teoria produttiva moderna. Il simbolo della casa, non è scelto a caso, in quanto come in una casa vera e propria gli elementi superiori sono sorretti da quelli inferiori, ottenendo così un vero e proprio sistema strutturale. La parte superiore elenca con estrema concisione gli obiettivi, ovvero ottenere

una migliore qualità, minori costi, minori lead time, maggiore sicurezza e un morale elevato. Costituiscono i due pilastri esterni il *Just in Time* (JIT) il quale consiste in un insieme di tecniche per la pianificazione e la gestione della produzione ed il *Jidoka* il quale in essenza significa “non lasciare mai che un difetto passi alla fase successiva” [6]. Al centro si collocano le persone, gli sprechi e il **miglioramento continuo**. Tutti questi elementi sono sorretti dalle fondamenta del TPS, ovvero il livellamento della produzione (necessario ad evitare i picchi e le valli di produttività), l’esigenza di processi standardizzati che si caratterizzino per stabilità e affidabilità.

2.2. Le sette tipologie di sprechi

Lo spreco, definito come *Muda* in giapponese, indica qualsiasi attività che non determina un valore aggiunto nel prodotto. Il TPS individua sette diverse tipologie di sprechi, che vengono di seguito riportati come nel Toyota Way [6]

- **Sovraproduzione:** produrre pezzi che non sono stati ordinati genera sprechi, come l’eccesso di organico e i costi di magazzino.
- **Attesa:** tempo in cui l’operatore non compie nessuna attività a valore aggiunto, derivante da ritardi nella lavorazione di un lotto, di un periodo di inattività dei macchinari, ecc.
- **Trasporti o trasferimenti superflui:** trasportare per lunghi tratti il *work in progress* (WIP), creare sistemi di trasporto inefficienti o spostare materiali e/o componenti tra un processo e l’altro.
- **Processi ridondanti o lavorazione errata:** compiere azioni inutili per lavorare i componenti, lavorarli in modo inefficiente a causa di un’errata progettazione degli strumenti e del prodotto. Deve essere considerato uno spreco anche l’eccesso di qualità, ovvero produrre componenti caratterizzati da caratteristiche qualitative superiori a quelle richieste dal cliente.
- Scorte in eccesso
- **Movimenti superflui:** qualsiasi movimento in più imposto ai dipendenti durante il lavoro.
- **Difetti:** Per difetto si intende la produzione di componenti difettosi o correzione dei difetti. Quindi qualsiasi prodotto che richiede una rilavorazione oppure debba essere scartato perché giudicato non conforme costituisce uno spreco di energia e tempo

Al fine di minimizzare o meglio azzerare i difetti, risulta necessaria l’applicazione del principio del *Jidoka*, il quale viene definito da Toyota come: “Imposizione dei controlli di qualità in ogni fase del processo produttivo.” [7]. Il *Jidoka* quindi prevede che al termine di ogni fase del processo produttivo, siano posti dei controlli qualitativi appropriati e nel caso in cui questi controlli rilevassero una non conformità, quest’ultimo deve essere immediatamente affrontato e risolto alla radice, a costo di determinare uno stop momentaneo dell’attività produttiva.

2.3. Il miglioramento continuo

Il miglioramento, è definibile come l'attività che deve essere svolta al fine di colmare il gap tra la situazione attuale di un'organizzazione e/o di un processo e quella che si desidera ottenere.

Il miglioramento continuo, o *Kaizen* in giapponese prevede di promuovere una cultura che si basa su piccoli miglioramenti, i quali possono essere assorbiti in modo quasi indolore dall'organizzazione e dalle persone che la compongono. È importante osservare che nella filosofia del TPS, come scritto anche da N. Slack et al [1]: «Ciò che conta non è il tasso di miglioramento, ma lo slancio del processo di miglioramento. Non importa se i miglioramenti successivi sono di entità limitata: la cosa importante è che tutti i mesi, settimane ci sia stato effettivamente qualche miglioramento».

Il miglioramento tuttavia deve essere supportato da strumenti idonei, che possano effettivamente tracciare il suo percorso e indirizzare le attività nella strada giusta. Esistono quindi due diversi cicli che permettono di fare questo: il ciclo PDCA e il ciclo DMAIC.

2.3.1. I 5 perché

La metodologia dei 5 perché, sebbene si caratterizzi per una semplicità unica, è uno degli strumenti più forti e immediati nella *Lean Production*. L'inventore di questa tipologia, Taiichi Ohno descrisse questo strumento come: «... è la base dell'approccio scientifico di Toyota...ripetendosi le domande cinque volte la natura del problema e la sua soluzione diventano improvvisamente chiare. ».

In pratica, la metodologia dei 5 perché prevede di scavare a fondo nel problema, fino ad arrivare alla causa radice di quest'ultimo.

2.3.2. Ciclo PDCA

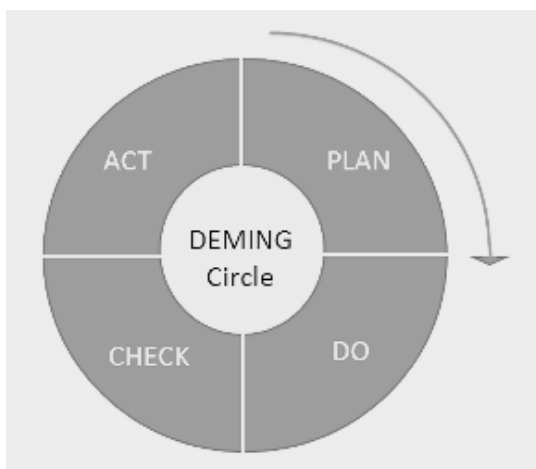


Immagine 6: ciclo PDCA o ciclo di Deming

Il ciclo PDCA o ciclo di Deming, è uno degli strumenti più conosciuti del miglioramento continuo, il quale permette di formalizzare in 4 diverse categorie le attività che devono essere svolte al fine di eseguire il *Kaizen*.

L'abbreviazione del nome, indica:

- **Plan** (pianificare): ovvero raccogliere e analizzare i dati in modo tale da formulare un *action plan* con lo scopo di migliorare le performance.

- **Do** (fare, realizzare): consiste nella fase di implementazione di quanto proposto durante la fase precedente. Essendo la fase di natura pratica, è possibile che si scelga di introdurre un mini ciclo PDCA annidato, al fine di risolvere le problematiche di implementazione.
- **Check** (verificare): fase in cui la nuova soluzione, viene valutata e verificata al fine di comprendere se ha effettivamente prodotto un aumento delle performance.
- **Act** (agire): fase nella quale il cambiamento viene consolidato, o nel caso in cui la fase del check fornisca risultati negativi, vengono formalizzate le lezioni apprese dalla sperimentazione.

2.3.3. Ciclo DMAIC

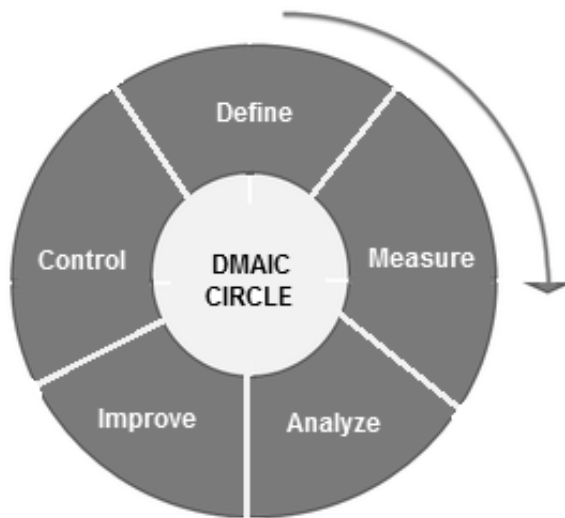


Immagine 7: ciclo DMAIC

Il ciclo DMAIC si caratterizza per una maggiore intuitività rispetto al ciclo PDCA. Come si evince dal nome, il ciclo si divide in 5 diverse fasi:

- **Define** (definire): definizione del problema, al fine di comprendere i requisiti dell'azione di miglioramento da innescare e fissare un target prestazionale di miglioramento.
- **Measure** (misurare): validazione del problema, mediante l'utilizzo di dati analitici che consentono oltremodo di caratterizzare al meglio i termini del problema stesso.
- **Analyze** (analizzare): sviluppo e analisi delle cause profonde del problema.
- **Improve** (miglioramento): inizio del lavoro di miglioramento del processo, implementando quanto proposto nelle fasi precedenti.
- **Control** (controllo): fase di analisi dei risultati a valle del miglioramento, con la conseguente validazione dei risultati o formalizzazione della lezione appresa nel caso in cui le soluzioni proposte non portino al miglioramento ipotizzato.

2.4. Il six sigma

L'approccio six sigma viene per la prima volta sviluppato e introdotto da Motorola negli anni 80, come ponendosi come obiettivo la soddisfazione totale dei clienti, mediante una consegna alle scadenze promesse, in assenza di difetti, senza guasti nel post vendita e senza problemi eccessivi nel servizio.

2.4.1. Teoria del six sigma

Quanto pianificato da Motorola come necessario per raggiungere l'obiettivo prefissato in termini di standard qualitativo, deriva dal controllo statistico di processo (SPC) e prevede di porre i limiti di specifica ad una distanza pari a 3 volte lo scarto quadratico medio su entrambi i lati della media. Dalla figura sottostante (immagine 7) e dalla tabella a fianco di quest'ultima, è possibile evincere che applicando questa metodologia di controllo statistico, risulta essere altamente improbabile il verificarsi di una non conformità.

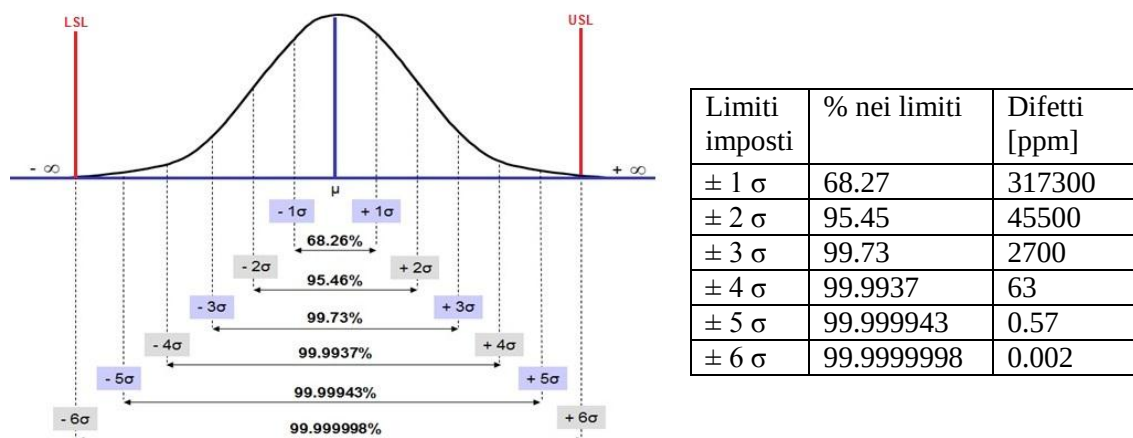


Immagine 8: distribuzione Gaussiana e Six Sigma

La metodologia in questione, presenta tuttavia un'inconsistenza logica, in quanto le previsioni sulle performance di un processo, possono essere fatte esclusivamente quando quest'ultimo manifesta un comportamento stabile e nessun sistema o processo presenta un andamento simile, in quanto anche nella migliore delle ipotesi, si verificano disturbi alla stabilità.

2.4.2. Concezione moderna del Six Sigma

Per le motivazioni elencate nel paragrafo precedente, il Six Sigma non deve essere considerato come una tecnica effettivamente realizzabile nel breve periodo, ma come per Motorola, deve essere considerato un obiettivo strategico, che guidi gli sforzi di miglioramento. Per questo motivo, la definizione attuale di Six Sigma, si allontana dalla definizione statistica vista precedentemente, assumendo così connotati maggiormente strategici. Secondo Pande et [8] al, il Six Sigma, può essere definito come: «Un sistema completo e flessibile per ottenere, mantenere nel tempo e massimizzare il successo commerciale. Il Six Sigma è ispirato in particolare da una profonda conoscenza dei clienti, dall'uso disciplinato dei fatti, dei dati e dell'analisi statistica, e da una diligente attenzione alla gestione, al miglioramento e al ripensamento dei processi di business.».

3.PROCESSO DI MISURAZIONE

Il processo di misurazione, come qualsiasi altro processo, a partire da un input a monte, mediante una serie di attività, fornisce un output che presenta un valore aggiunto. Con maggiore formalità, il processo di misurazione, viene definito dal Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM) come:

“Processo volto a ottenere sperimentalmente uno o più valori che possono essere ragionevolmente attribuiti a una grandezza” [9]

Approfondendo maggiormente la definizione, il VIM definisce l’output del processo di misurazione come uno o più valori, ovvero numeri che accompagnati da un apposito riferimento, costituiscono l’espressione quantitativa di una grandezza.

Al fine di eseguire il processo appena descritto, risulta necessario conoscere il misurando ovvero la grandezza che si intende misurare, e sulla base di queste informazioni scegliere lo strumento le cui caratteristiche si addicono al meglio alle caratteristiche del misurando.

3.1. Strumento di misura

Viene definito dal VIM come “dispositivo impiegato per eseguire misurazioni, solo o in associazione con altri dispositivi di supporto” [9], esso può essere:

- **Strumento indicatore**, il quale fornisce un segnale di uscita che contiene informazione sul valore della grandezza sottoposta a misurazione.
- **Campione materiale**, il quale riproduce o fornisce, in modo permanente durante il suo impiego, grandezze di una o più specie, ciascuna con un valore assegnato.

Occorre tuttavia, evidenziare un’altra suddivisione principale degli strumenti di misura, ovvero la natura dell’output, il quale può essere presentato:

- In forma visiva: nel caso in cui si utilizzi uno strumento di misura visualizzatore.
- Sottoforma di valore della grandezza sottoposta a misurazione, nel caso in cui si utilizzi uno strumento indicatore

Ulteriori classificazioni e diversificazione, devono essere fatte in base alle caratteristiche dello strumento di misura, le quali vengono riassunte dalla normativa ISO 10012 [10] in:

- Campo di misura
- Ripetibilità
- Stabilità
- Isteresi
- Risoluzione
- Accuratezza, esattezza e precisione

- MPE

3.1.1. Campo di misura

Viene definito come “valore assoluto della differenza tra i valori di una grandezza che delimitano un intervallo di indicazioni nominale”, ovvero il range di valori misurabili dallo strumento che si considera.

Questa caratteristica è fondamentale, in quanto la taratura dello strumento e quindi tutte le successive caratteristiche dal punto di vista dell'affidabilità, sono riferite e quindi valide solo per il range di valori dichiarato. Si osserva quindi che erronee considerazioni sul campo di misura, possono portare a risultati di misura non attendibili, o peggio al danneggiamento dello strumento.

3.1.2. Ripetibilità

La ripetibilità di misura viene definita come la precisione di misura che si è in grado ottenere, in condizioni di ripetibilità, ovvero il grado di concordanza tra i valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni sullo stesso oggetto, nelle medesime condizioni di misura. La valutazione di questa proprietà dello strumento di misura, richiede che siano presenti le medesime condizioni di misura durante l'esecuzione delle procedure di misurazione poste a confronto. Questo significa, che le misurazioni in oggetto, devono essere svolte nel più breve arco di tempo possibile, sullo stesso componente, dalla stessa persona e alle medesime condizioni ambientali.

La valutazione della ripetibilità, non fornisce un dato qualitativo ma quantitativo, il quale deve essere calcolato secondo le prescrizioni della normativa ISO 5725-2 [11]. Prendendo in considerazione le direttive di Accredia [12] per il calcolo della ripetibilità, questo deve svolto dopo avere definito il numero di prove da eseguire, aver controllato l'attendibilità dei risultati ottenuti (scartando quindi i possibili risultati anomali). Il calcolo procede calcolando la varianza della ripetibilità (s_r) e considerando la varianza normata o in alternativa, la varianza posta come obiettivo (σ_r).

Considerando $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ come i valori degli n risultati validi di misurazione, e considerando $\bar{x}$ come la media di questi n valori, la ripetibilità può essere calcolata come:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.1)$$

La valutazione della ripetibilità si effettua quindi calcolando il rapporto tra s_r e σ_r , e confrontando il risultato con i valori indicati dai limiti di fiducia minimi e massimi, espressi in base alla $p_{\min}$, $p_{\max}$, e al numero di osservazioni n . La ripetibilità è considerata conforme se il risultato del rapporto tra s_r e σ_r cade all'interno dell'intervallo indicato da $p_{\min}$ e $p_{\max}$.

Di seguito una tabella di esempio:

	Valore minimo	Valore massimo
$V=n-1$	Pmin	Pmax
1	0,0316	2,241
2	0,16	1,921
3	0,268	1,765
4	0,348	1,669
5	0,408	1,602
6	0,454	1,551
7	0,491	1,512
8	0,522	1,48
9	0,548	1,454
10	0,57	1,431

Tabella 1: range di conformità della ripetibilità

3.1.3. Stabilità

Viene definita dal VIM [9] come: “attitudine di uno strumento di misura a mantenere le proprie caratteristiche metrologiche costanti nel tempo”. Questa proprietà, viene espressa in valore assoluto, alle medesime condizioni operative e considerando uno specifico arco temporale, definendo la variazione limite che lo strumento può fornire in output. Il valore caratterizzante di questa proprietà, può essere facilmente individuato ponendo a confronto due o più curve di taratura dello strumento, effettuate in momenti temporalmente diversi e calcolata come la differenza tra queste due.

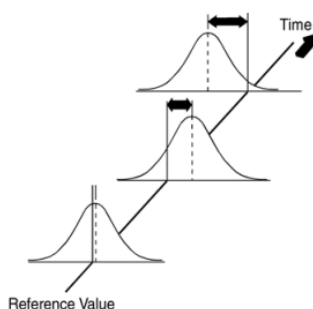


Immagine 9: Stabilità nel tempo dello strumento

3.1.4. Isteresi

La definizione fornita dal VIM [9] riguardante l'isteresi, è: “proprietà di uno strumento per misurazione la cui risposta ad un segnale d'ingresso dipende dalla sequenza dei segnali di ingresso precedenti”. Questa proprietà nell'utilizzo corrente, calcolata la massima differenza dei valori di lettura ottenuti in corrispondenza dello stesso misurando quando questo viene raggiunto in una successione di valori crescenti ed in una successione di valori decrescenti, considerando tutti i possibili valori nel campo di misura.

Questa proprietà risulta essere particolarmente importante per gli strumenti di misura in grado di effettuare misurazioni per valori crescenti o decrescenti del misurando e si osserva che risente sempre anche dell'effetto dovuto alla risoluzione ed alla ripetibilità pur essendo quest'ultimi considerati separatamente; quindi il valori di isteresi non è significativo se lo scarto tipo ad esso associato risulta della stessa entità di quello associato a ripetibilità e risoluzione.

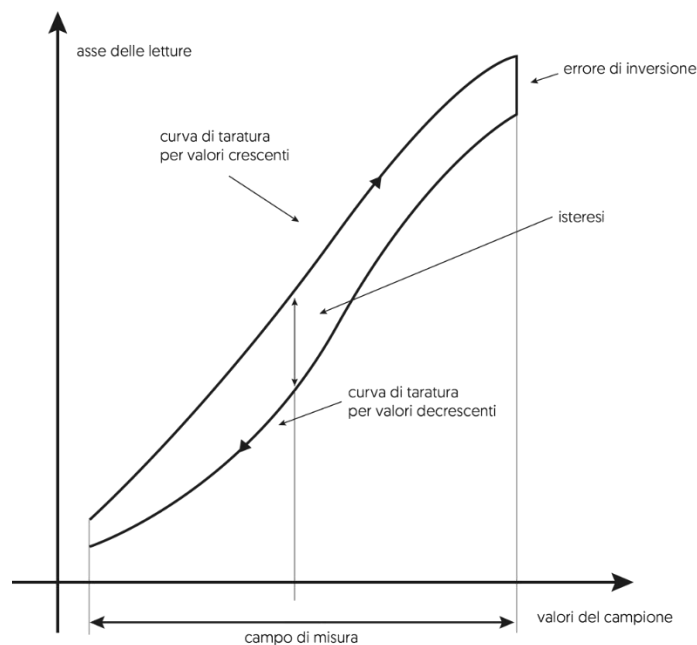


Immagine 10: Isteresi dello strumento

3.1.5. Risoluzione

Viene definita come la più piccola differenza tra indicazioni visualizzate che può essere percepita in modo significativo. In pratica, la risoluzione è la proprietà dello strumento che descrive più piccola variazione apprezzabile dallo strumento, durante la misura, a cui è possibile attribuire un valore definito. Sebbene la risoluzione influenzi l'incertezza di misura, è importante non confondere le due nozioni, in quanto la prima rappresenta una proprietà dello strumento di misura, mentre la seconda indica una caratteristica del processo di misura.

La risoluzione dello strumento, risulta essere individuabile:

- Negli strumenti digitali, osservando l'incremento numerico dell'ultima cifra presente sul display.

Negli strumenti analogici dipendentemente dalla modalità di lettura dello strumento stesso, la quale può essere eseguita in assenza o in presenza di interpolazione di frazioni di unità di formato.

3.1.6. Parametri qualitativi dello strumento

Di seguito vengono riportati tre parametri che permettono di descrivere il valore misurato dallo strumento, dal punto di vista qualitativo. L'approccio qualitativo, implica l'assenza di modelli matematici e/o analitici per elaborare i dati. Le seguenti definizioni, vengono fornite dal VIM [9]:

- **Accuratezza:** grado di concordanza tra un valore misurato e un valor vero di un misurando. L'accuratezza quindi non è una misura, ma ci fornisce un'indicazione sulla qualità della misurazione stessa, prendendo in considerazione gli errori che caratterizzano quest'ultima.
- **Esattezza:** definita come il grado di concordanza della media dei valori misurati, al valore vero di un misurando.
- **Precisione:** grado di concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto o di oggetti simili, eseguite in condizioni specificate. La precisione quindi, ci fornisce un'indicazione sul grado di ripetibilità della misurazione, la quale può essere valutata in modo esclusivamente qualitativo, o in alternativa utilizzando un metodo statistico/quantitativo, come esposto nel capitolo 3.1.2.

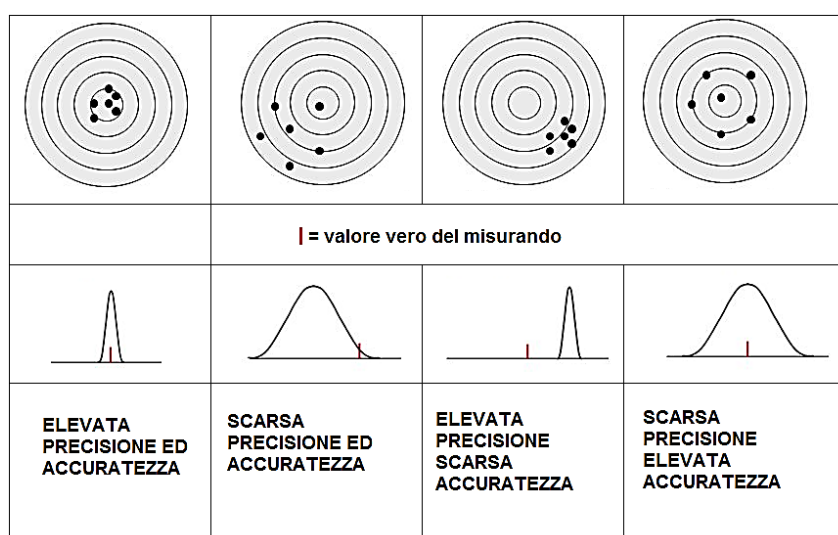


Immagine 11: Accuratezza e Precisione della misura

3.1.7. Massimo errore permesso

Viene definito dal VIM come il “valore estremo dell'errore di misura, rispetto a un valore di riferimento noto, consentito da specifiche tecniche o da regolamenti fissati per una misurazione, uno strumento di misura o un sistema di misura”.

Questo valore viene dichiarato dal costruttore, e congloba tutte le caratteristiche metrologiche dello strumento (linearità, ripetibilità, risoluzione, isteresi, ecc), che contribuiscono all'incertezza strumentale e quindi all'incertezza di misura.

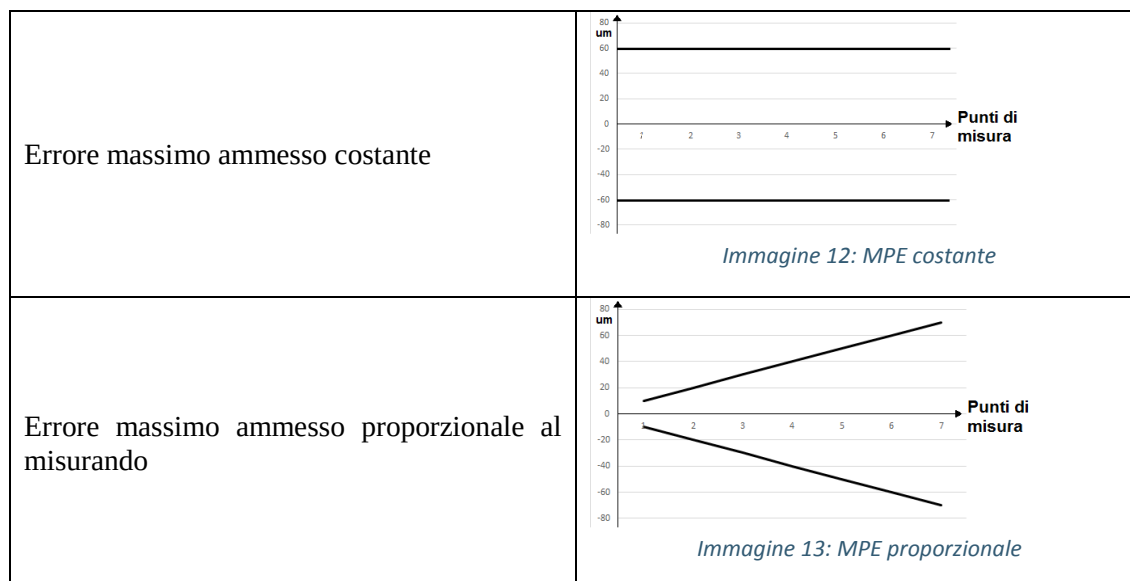
La conformità dello strumento all'MPE definito dal costruttore è verificata se l'errore di indicazione dello strumento, rilevabile dalla curva di taratura e tenendo conto dell'incertezza di taratura, è compreso entro tali limiti con un margine di rischio accettabile. Modalità per esprimere il valore dell'errore massimo ammesso possono essere le seguenti:

$MPE = \pm a$	Errore massimo ammesso costante
$MPE = \pm(a + b \cdot L)$	Errore massimo ammesso proporzionale al misurando
$MPE = \pm(a + b \cdot L)$	Errore massimo ammesso proporzionale al misurando, con limite inferiore e superiore

Un modo diverso di esprimere il MPE, è quello di indicare l'escursione tra il massimo e il minimo dei valori dell'errore. L'errore così definito non risulta essere dipendente dalla posizione dello zero e può essere considerato in valore assoluto.

Queste due modalità di definire il MPE sono generalmente applicate in base alle modalità di azzeramento dello strumento e cioè:

- Strumenti a zero fisso: si applica il concetto di errore massimo come limiti simmetrici dell'errore rispetto allo zero;
- Strumenti a zero mobile: si applica il concetto di errore massimo come ampiezza di una fascia non riferita allo zero.



3.2. Processo di taratura e conferma metrologica

La normativa ISO 10012 [10], definisce il processo di **conferma metrologica** come “un insieme di attività richieste per assicurare che gli strumenti di misura, siano conformi ai requisiti per l'utilizzazione prevista”. Questo insieme di attività, include la calibrazione, la taratura dello strumento e se necessario, la riparazione dello strumento al fine di ripristinare il suo corretto funzionamento e quindi assicurare il soddisfacimento dei requisiti per cui è utilizzato.

Sebbene all'interno della realtà industriale i termini calibrazione e taratura vengano spesso equiparati in modo improprio, esiste una sostanziale differenza tra i due. Riportando le definizioni fornite dal VIM [9]

- **Taratura:** Operazione eseguita in condizioni specificate, che in una prima fase stabilisce una relazione tra i valori di una grandezza, con le rispettive incertezze di misura, forniti da campioni di misura, e le corrispondenti indicazioni, comprensive delle incertezze di misura associate, e in una seconda fase usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione.
- **Calibrazione:** Insieme di operazioni svolte su un sistema di misura, affinché esso fornisca indicazioni prescritte in corrispondenza di determinati valori di grandezze da sottoporre a misurazione.

Oltre a sancire le attività necessarie all'esecuzione della conferma metrologica, la normativa ISO 10012, definisce l'**intervallo di conferma**, ovvero il tempo massimo accettabile tra due conferme metrologiche successive. Questo parametro temporale viene spesso definito costante, ma in alcuni casi, esso può essere ottimizzato seguendo diverse metodologie. Risulta comunque essere essenziale, che questo intervallo di conferma venga stabilito operando un *trade off* tra i due seguenti obiettivi:

- Minimizzare il rischio che lo strumento cessi di essere conforme;
- Minimizzare il costo delle conferme.

Essendo di vitale importanza la definizione del comportamento della strumentazione di misura nel tempo, risulta essere essenziale la registrazione dei dati delle conferme e tarature precedenti. La tendenza delle aziende con elevato parco strumenti è di mantenere intervalli costanti per tipologie e classi di strumenti.

Al fine di agevolare la comprensione della procedura di conferma metrologica la normativa ISO 10012 mette a disposizione un diagramma di flusso, che riassume le attività ed il loro ordine:

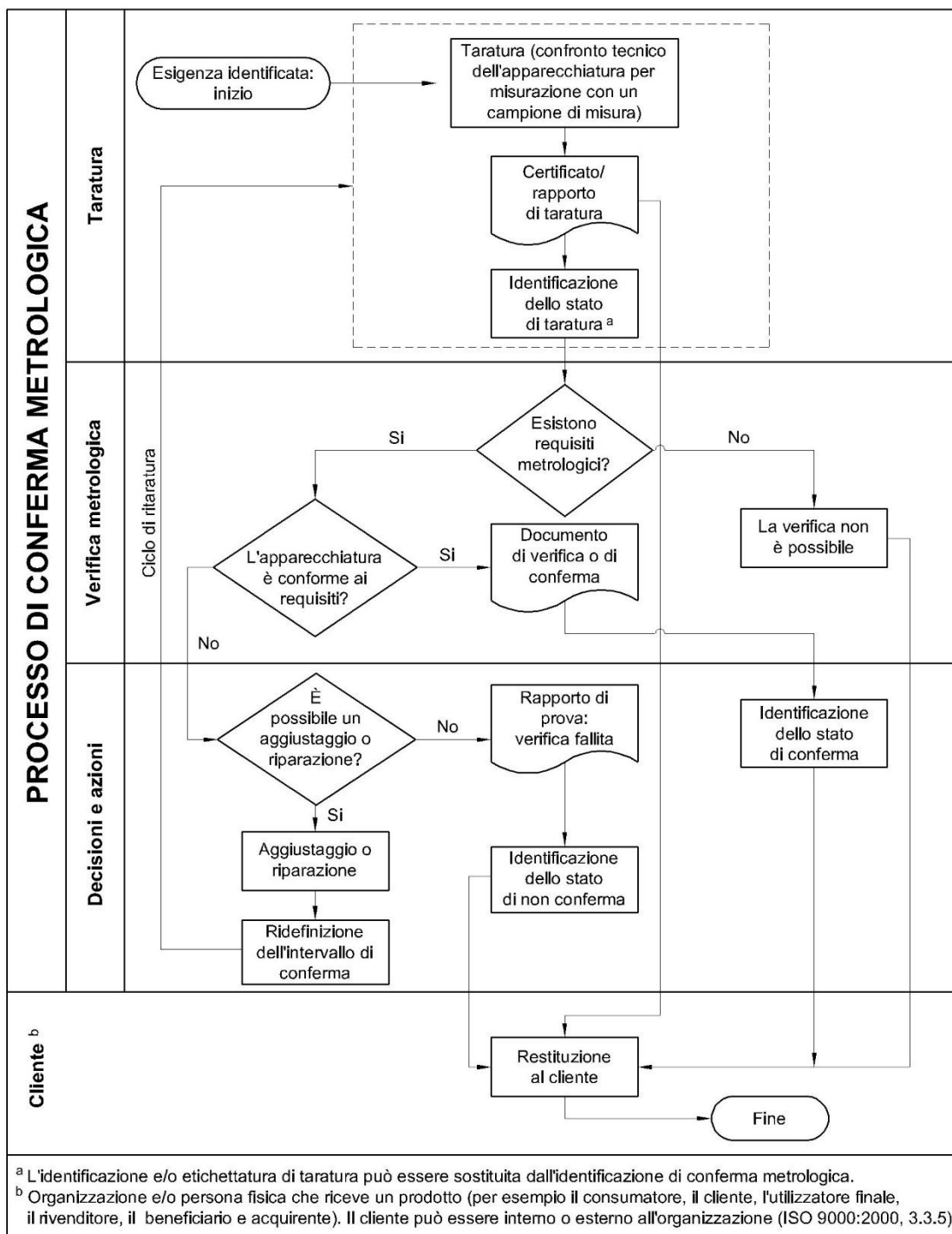


Immagine 14: processo di conferma metrologica secondo normativa UNI EN ISO 10012

3.3. Processo di misurazione

Il processo di misurazione, mira a fornire come output uno o più valori di misura, i quali costituiscono l'input per il processo decisionale. Oltre a dover garantire la qualità delle proprietà dello strumento, e quindi il rispetto di queste delle caratteristiche necessarie al processo di misura, risulta essenziale garantire la qualità del processo di misurazione stesso. La qualità del processo di misura, si misura in termini di incertezza, la quale deve essere confrontata con l'incertezza obiettivo o target. I dati provenienti dal processo di misurazione devono essere presi in considerazione come input decisionale soltanto se la qualità del processo è sufficiente, quindi è caratterizzata da un'incertezza inferiore o uguale a quella target. Minore risulta essere questa incertezza e maggiore risulta essere la qualità del processo, tuttavia questa manifesta un valore decrescente al crescere dei costi. Il seguente andamento viene dal grafico visibile nell'immagine 15, dove è possibile comprendere come i profitti oltre ad un valore di ottimo, tendano a diminuire al crescere della qualità dell'informazione.

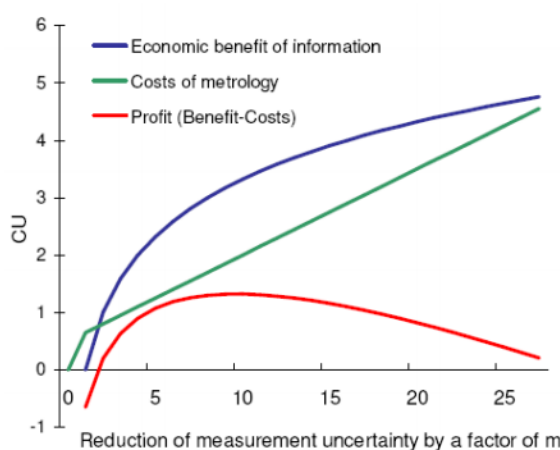


Immagine 15: benefici e costi della qualità dell'informazione

Al fine di progettare correttamente un processo di misura, in primis, ancora prima di definire lo strumento da utilizzare, devono essere ben chiare e definite le finalità della misurazione, dato che sulla base di queste dovranno essere presi in considerazione i parametri dimensionali maggiormente opportuni. Uno schema maggiormente intuitivo su come deve essere strutturato il processo di misurazione è quello riportato nell'immagine 16.

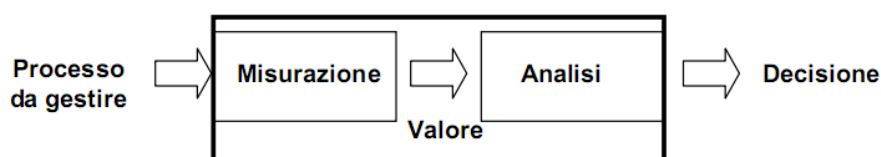


Immagine 16: Struttura del processo di misurazione

La progettazione del processo di misurazione quindi deve essere basata principalmente sui requisiti funzionali da raggiungere, i quali possono essere specifiche necessarie al soddisfare i requisiti qualitativi del cliente, oppure possono essere cogenti. Sulla base di questi requisiti sarà quindi necessario definire un'incertezza target, la quale costituirà un controllo qualità del processo progettato.

Oltre a dover progettare le caratteristiche del processo di misura, è necessario definire anche dove esso deve essere collocato all'interno del processo produttivo. Nella normalità si individuano tre diverse macro collocazioni:

CONTROLLI	Presso il fornitore
	In ingresso
	Tra una fase e l'altra ²
	Finale
PROVE E COLLAUDI	In ingresso
	Intermedi
	Finali
	Presso il fornitore
	Sul campo
TARATURE	Interne
	Esterne

Tabella 2: collocazione delle misurazioni all'interno del processo produttivo

La normativa ISO 10012 [10] oltre a definire come deve essere svolto il processo di conferma metrologica (vedi capitolo 3.2) descrive anche come deve essere strutturato e controllato il processo di misura. È importante sottolineare come la normativa descriva la registrazione ed il mantenimento dei dati provenienti dalle misurazioni al fine di provarne l'effettiva conformità ai requisiti di misurazione, mediante:

- Una completa descrizione dei processi di misurazione attuati, inclusi tutti gli elementi del processo (quali gli operatori, le apparecchiature per misurazione e i campioni per controllo), utilizzati e le relative condizioni d'impiego.
- Registrazione dei dati pertinenti ottenuti dal controllo dei processi di misurazione, incluse tutte le informazioni relative all'incertezza di misura.
- Registrazione di ogni azione adottata in conseguenza di dati forniti dal controllo del processo di misurazione
- Registrazione della in cui ciascuna attività di controllo del processo di misurazione è stata eseguita.

² Il controllo tra una fase e l'altra del processo deve essere applicato soltanto se questa modifica le caratteristiche chimico-fisiche del prodotto.

3.4. Incertezza di misura

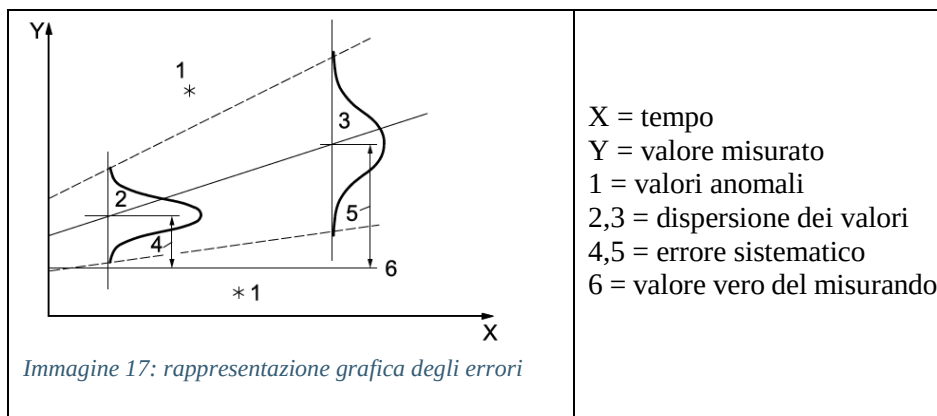
Prendendo sempre come riferimento la definizione fornita dal VIM [9], l'incertezza di misura risulta essere definita come un "parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate".

L'incertezza quindi, permette di quantificare la mancanza di conoscenza del valore vero del misurando, associando a questo un intervallo di fiducia all'interno del quale quest'ultimo risulta essere compreso (con un livello di probabilità variabile dalla tipologia di incertezza).

3.4.1. Tipologie di errori che influenzano l'incertezza

La normativa UNI EN ISO 14253-2-2011 [13], nel capitolo 7 elenca le tipologie di errori che influenzano l'incertezza di misura, ovvero:

- **Errori sistematici:** ovvero un componente dell'errore di misura che in presenza di misurazioni ripetute rimane costante o varia in maniera prevedibile. Avendo quest'errore una natura prevedibile, è necessario provvedere al suo azzeramento durante l'elaborazione della misura. Negli strumenti di misura maggiormente complessi, come ad esempio le CMM (Coordinate Measuring Machine, Sistemi di Misura a Coordinate), la correzione viene eseguita in modo automatico dal software che elabora i dati provenienti dal tastatore. Nel caso di strumenti maggiormente semplici, la correzione deve essere eseguita manualmente.
- **Errori random:** ovvero un componente dell'errore di misura che in presenza di misurazioni ripetute varia in maniera non prevedibile
- **Deriva:** ovvero l'influenza sistematica di componenti la cui influenza non risulta essere controllata o controllabile. Questa deriva risulta essere spesso la conseguenza dell'usura dello strumento di misura, e difatti può essere caratterizzata in termini di tempo di utilizzo o in termini di numero di misurazioni eseguite dal medesimo strumento.
- **Valori anomali:** definito come un'osservazione o un insieme di osservazioni caratterizzate da valori anomali, ovvero distanti dalle altre osservazioni disponibili.



Per maggiore comodità, la normativa riassume in categorie i parametri che influenzano la misurazione generando in questa l'incertezza. La seguente categorizzazione, è visibile nell'immagine sottostante:

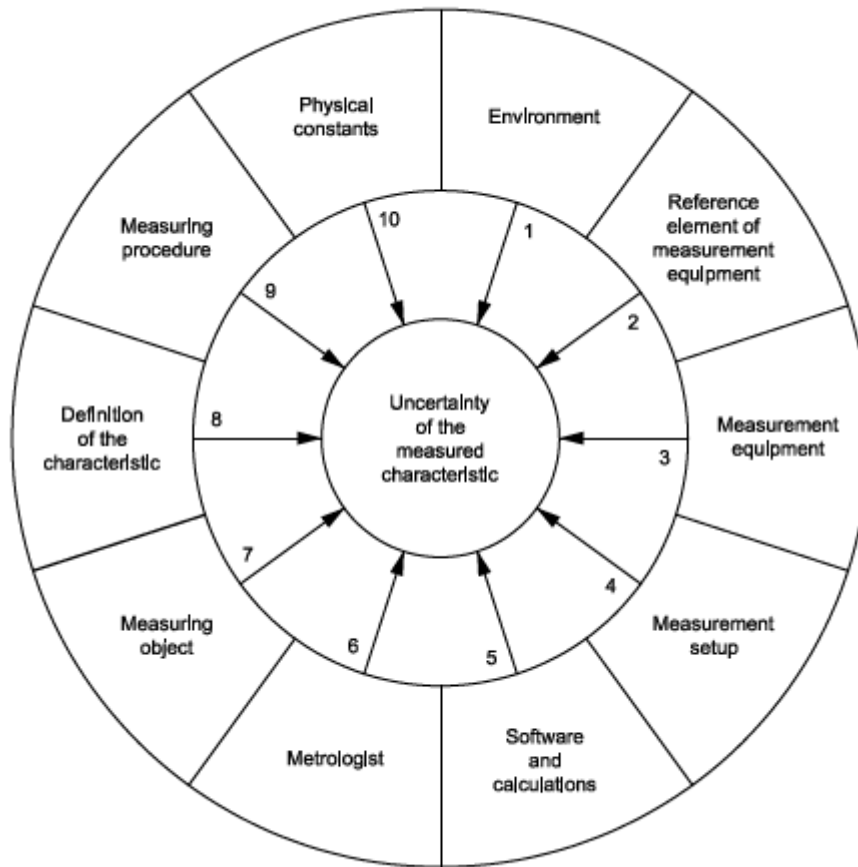


Immagine 18: contributi nell'incertezza di misura

3.4.2. Metodo GUM

Il metodo GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) permette di calcolare l'incertezza di misura. Si fonda sulle ipotesi viste nel capitolo precedente (vedi capitolo 3.4.1) e prevede di interpretare il processo di misurazione come stima della grandezza da misurare, basandosi sull'osservazione dei valori assunti da un certo numero N di altre grandezze $X_1, X_1, X_1, \dots, X_N$, alle quali il misurando è legato da una relazione di tipo:

$$Y = f(X_1, X_1, X_1, \dots, X_N) \quad (3.2)$$

L'incertezza totale del misurando quindi, diventa funzione dell'incertezza che caratterizza ogni variabile d'ingresso. Tutte le incertezze vengono espresse come scarto tipo e quindi composte. Il metodo GUM, prevede che ogni grandezza in ingresso sia descrivibile utilizzando una distribuzione di probabilità e che ognuna di queste sia caratterizzata da uno scarto tipo. La statistica afferma che gli scarti tipo si combinano con legge quadratica e che il risultato è ancora uno scarto tipo.

Per calcolare lo scarto tipo del processo di misurazione (l'incertezza) apparirebbe quindi necessario ripetere il processo di misura infinite volte, in modo tale da includere l'effetto di tutte le diverse influenze, ciascuna di queste caratterizzata da una dispersione e da dei limiti di variabilità.

Essendo questo praticamente impossibile, si preferisce stimare la dispersione dei risultati della misurazione introdotta da ogni singola grandezza d'influenza, associando a tale dispersione uno scarto tipo per poi combinare gli scarti individuati.

I contributi che determinano l'incertezza di misura vengono suddivisi in:

- **Contributi di categoria A:** la cui valutazione viene condotta mediante elaborazione statistica di risultati ottenuti da misurazioni ripetute nelle stesse condizioni;
- **Contributi di categoria B:** la cui valutazione viene condotta con metodi diversi dalla elaborazione statistica di risultati ottenuti da misurazioni ripetute nelle stesse condizioni.

La suddivisione tra A e B viene proposta in modo tale da differenziare il trattamento dei diversi contenuti, e non per differenziare la loro natura. In altre parole, la stima per le incertezze di categoria A è una stima a priori, mentre quella per la categoria B è a posteriori. E' evidente quindi che un contributo all'incertezza di misura può essere di categoria A o B in funzione di come viene valutato.

Per tenere conto di tutte le grandezze d'influenza che non sono variate durante le ripetizioni delle misurazioni bisogna valutare i loro contributi di incertezza come incertezze di categoria B.

Mediante la conoscenza dell'intervallo di valori che una determinata grandezza di influenza può assumere e la tipologia di distribuzione di probabilità di quest'ultima nell'intervallo suddetto, è possibile determinare lo scarto tipo e quindi il contributo di incertezza di categoria B associato:

$$u = a \cdot b \quad (3.3)$$

Dove a è il valore limite della distribuzione e b è il parametro per la specifica distribuzione.

La valutazione può essere eseguita sulla base:

- Dell'esperienza
- Dei rapporti di taratura
- Della documentazione dello strumento utilizzato per la misurazione
- Di manuali

Le distribuzioni di probabilità maggiormente ricorrenti sono:

- Gaussiana ($b \approx 0,5$)
- Rettangolare ($b \approx 0,6$)
- U-shaped ($b \approx 0,7$)
- Triangolare ($b \approx 0,4$).

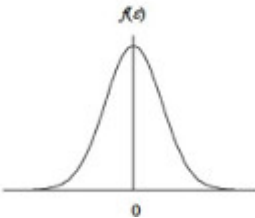
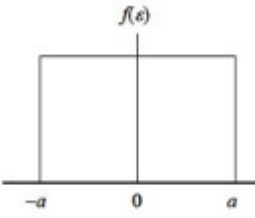
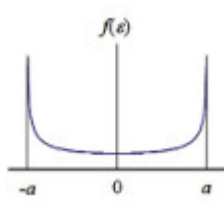
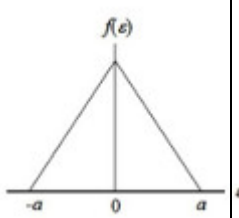
Distribuzione Gaussiana	Distribuzione Rettangolare	Distribuzione U-Shaped	Distribuzione Triangolare
			

Tabella 3: Principali tipologie di distribuzione di probabilità

Il caso maggiormente semplice per il calcolo dell'incertezza composta, utilizza la formula sottostante:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_k^2} \quad (3.4)$$

Una volta calcolata l'incertezza composta, risulta essere necessario calcolare l'incertezza estesa, mediante il prodotto tra l'incertezza composta e k , ovvero il fattore di copertura tipico della distribuzione utilizzata (nel caso della distribuzione Gaussiana, $k=2$).

3.4.3. Metodo PUMA

Il metodo PUMA (Procedure for Uncertainty Management) diversamente dalla metodologia GUM, è un metodo per stimare e gestire l'incertezza, in modo tale da garantire il rispetto dell'incertezza target fissata a monte e permettere il contenimento dei costi legati alla qualità dell'informazione metrologica. La metodologia iterativa in oggetto, visibile nell'immagine 19 permette di costruire un primo bilancio delle incertezze mediante un'analisi semplificata e utilizzando il criterio della stima per eccesso. L'incertezza così calcolata viene confrontata con quella target: in caso di esito negativo il processo di misura non è adeguato e sarà quindi necessario analizzare con maggiore precisione i diversi contributi dell'incertezza totale, e se necessario operare azioni di miglioramento volte a ridurre i diversi contributi dell'incertezza totale, partendo da quelli che manifestano un peso e quindi un'influenza maggiore. La procedura termina trovata un'incertezza soddisfacente (minore di quella attesa).

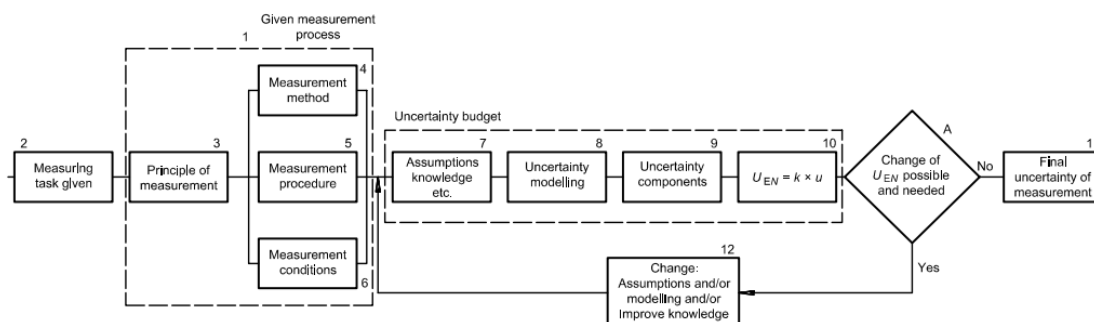


Immagine 19: metodologia iterativa del metodo PUMA

Le azioni volte alla riduzione dell'incertezza sono molteplici e implicano spesso oneri economici. Di seguito sono riportati i principali, tratti da Malagola e Ponterio [12].

CAUSA	AZIONI PER RIDURRE L'INCERTEZZA DI MISURA	ONERI ECONOMICI PRINCIPALI
Misurando	Migliorare, attraverso dettagli nella specifica di misura, la definizione del misurando (esempio: definizione punti di contatto nelle misure dimensionali)	Maggiore costo dell'attività in termini di tempo impiegato
Ambiente	Riduzione dei limiti di escursione termica dell'ambiente di misura	Costo di costruzione e gestione del laboratorio
	Misurazione della temperatura ambiente e correzione dei valori proposti dallo strumento	Acquisto dei termometri e loro taratura Maggiore costo dell'attività in termini di tempo
Continua a pagina successiva		

Tabella 4: Azioni volte alla riduzione dell'incertezza [14]

CAUSA	AZIONI PER RIDURRE L'INCERTEZZA DI MISURA	ONERI ECONOMICI PRINCIPALI
Metodo di misura	Metodo di misura che prevede di assumere come valore proposto dallo strumento la media aritmetica di più misure ripetute e consecutive	Maggiore costo dell'attività in termini di tempo impiegato
	Eseguire, invece che una misura e lettura diretta, una misura per confronto dopo l'azzeramento su un campione di pari valore nominale	Acquisto dei campioni per l'azzeramento dello strumento Taratura dei campioni Maggiore costo dell'attività in termini di tempo
Operatore	Formazione/addestramento dell'operatore/i che esegue la misura (contributo di riproducibilità)	Costo di formazione/addestramento
Strumento	Sostituzione dello strumento con uno più accurato	Costo di acquisto dello strumento
	Taratura dello strumento nei punti di utilizzo e correzione del valore di lettura in base ai risultati di misura	Maggiore costo di taratura Maggiore costo dell'attività in termini di tempo

Tabella 5: Azioni volte alla riduzione dell'incertezza [14]

Le opportunità di azione per la riduzione dell'incertezza di misura, si distinguono sia per l'oggetto del miglioramento che per la fase del processo produttivo in cui vanno ad impattare.

Si osserva tuttavia che la scomposizione dei fattori che influenza l'incertezza di misura riportata nella Tabella 4, non tiene conto delle interdipendenze tra i fattori stessi, ovvero non tiene conto della possibilità che questi tendano ad influenzarsi a vicenda. Risulta quindi essere essenziale tenere conto di queste interdipendenze in fase di ridefinizione del processo di misura.

3.5. Verifica della conformità

La verifica della conformità o della non conformità di un componente soggetto a misurazione, deve avvenire secondo le prescrizioni riportate dalla normativa UNI EN ISO 14253-1-1999 [15]. L'utilizzo di tale normativa per verifica la conformità o la non conformità, è prassi diffusa da tempo, soprattutto perché tiene conto dell'incertezza di misura nella verifica e perché individua gli attori e le loro responsabilità nel processo di misurazione, in modo tale da poter garantire una gestione delle controversie.

La normativa prevede che il risultato di una misurazione sia espresso nella seguente forma:

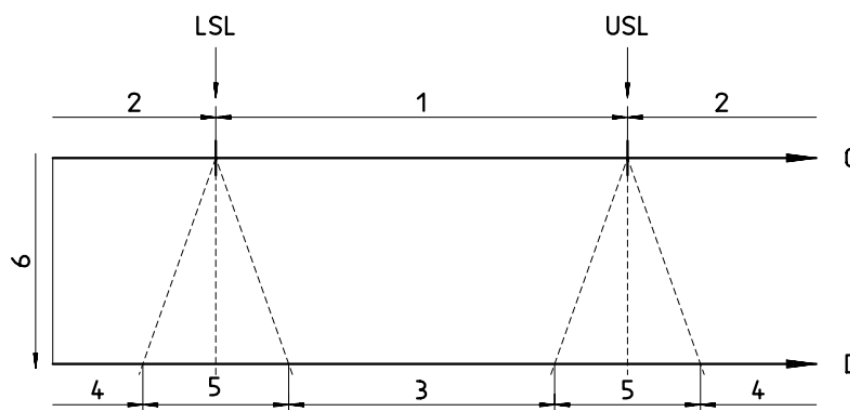
$$Y = y \pm U \quad (3.5)$$

Dove:

- Y = risultato della misurazione
- y = valore misurato
- U = incertezza estesa

La zona di specifica è compresa tra il limite di specifica inferiore (LSL) ed il limite di specifica superiore (USL) indicati in fase di progetto. Per alcune grandezze, o per scopi particolari, è possibile definire soltanto un limite di specifica, definendo quindi una specifica monolaterale.

La normativa UNI EN ISO 14253-1 quindi, propone il sottostante schema per permettere una comprensione maggiormente agevole:



Key

- C Design/specification phase
- D Verification phase
- 1 Specification zone (in specification)
- 2 Out of specification
- 3 Conformance zone
- 4 Non-conformance zone
- 5 Uncertainty range
- 6 Increasing measurement uncertainty, U

Immagine 20: UNI EN ISO 14253-1-1998, riduzione della zona di conformità dettata dall'incertezza

3.5.1. Regola per la prova della conformità

La normativa ISO 14253-1-1999 [15] prevede di giudicare conforme un componente il cui misurando sottoposto a verifica, fornisce un valore compreso nella zona di tolleranza, al netto dell'incertezza di misura. Quindi un componente risulta essere conforme se:

$$LSL + U < y < USL - U \quad (3.6)$$

Dove y è il valore misurato, USL è il limite inferiore di specifica, LSL il limite superiore di specifica e U l'incertezza di misura.

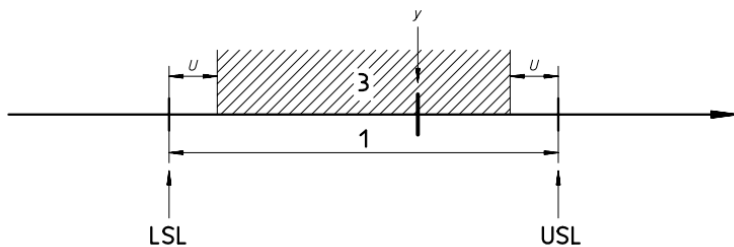


Immagine 21: Componente conforme secondo UNI EN ISO 14253-2-1999

3.5.2. Regola per la prova della non conformità

La normativa ISO 14253-1-1999 (15) prevede di giudicare non conforme un componente il cui misurando sottoposto a verifica, fornisce un valore esterno alla zona di tolleranza, al netto dell'incertezza di misura. Quindi un componente risulta essere conforme se:

$$y < LSL - U \text{ oppure } y > USL + U \quad (3.7)$$

Dove y è il valore misurato, USL è il limite inferiore di specifica, LSL il limite superiore di specifica e U l'incertezza di misura.

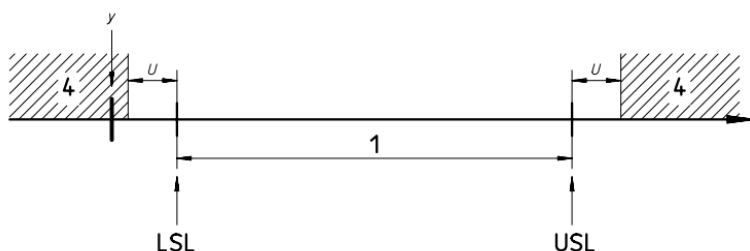


Immagine 22: componente non conforme secondo UNI EN ISO 14253-2-1999

3.6. Valutazione economica del processo di controllo

La valutazione economica di un processo di controllo può essere realizzata secondo il modello sviluppato proposto nella pubblicazione “A Methodology for the quantification of value-adding by manufacturing metrology” [16], la quale prevede di prendere in considerazione sia i costi associati al controllo stesso sia i costi del relativo processo produttivo.

Il punto di partenza è costituito dal principio secondo il quale le decisioni relative al processo di misurazione sono legate alla minimizzazione di tutti i costi legati al processo, che includono sia i costi legati al processo produttivo, sia quelli legati al processo di ispezione, che vengono sommati all'interno della funzione utilizzata per quantificare il costo totale:

$$C_t = C_{mp} + C_{ip} \quad (3.8)$$

dove C_{mp} risulta essere il costo del processo produttivo mentre C_{ip} il costo del processo di controllo. Nella definizione del processo di controllo, occorre tenere in considerazione l'incertezza del processo di misurazione, in quanto, la scelta di un processo di controllo inadeguato caratterizzato da incertezze di misura inadeguate, può comportare una crescita dei costi imputabili apparentemente al processo produttivo a causa degli errori di valutazione (definizione di non conformità di parti conformi e mancata identificazione di parti non conformi).

Una prima possibilità al fine di risolvere questa problematica è quella di investire maggiormente nei processi produttivi, al fine di aumentare la qualità dei prodotti minimizzando i costi da sostenere nelle attività di ispezione. Tuttavia la valutazione spesso ha inizio da un processo produttivo già presente in azienda, sul quale risultano essere limitate le opzioni di miglioramento introducibili a posteriori.

Il costo del processo di controllo può essere scomposto come:

$$C_{ip} = C_{is} + C_{\alpha} + C_{\beta} \quad (3.9)$$

dove:

C_{is} comprende sia i costi fissi che variabili del sistema di controllo;

C_{α} è il costo sostenuto per errori di tipo I (scarto di una parte conforme);

C_{β} è il costo sostenuto per errori di tipo II (accettazione di una parte non conforme).

Delle ultime due voci di costo la prima risulta di più semplice valutazione, potendo essere considerata proporzionale al valore del pezzo al momento dell'ispezione mentre la seconda

presenta maggiori difficoltà nella quantificazione, essendo legata ad inefficienze nei successivi step di lavorazione e problematiche nell'utilizzo finale del prodotto.

L' autore sottolinea come la valutazione degli investimenti tramite la funzione di costo totale presenta risulta essere caratterizzata dalla importante limitazione di non mettere in evidenza il valore aggiunto generato dall' attività di ispezione. Tale valore aggiunto è legato ai benefici economici della metrologia e include:

- i risparmi per la riduzione di attività che non apportano valore aggiunto a causa di parti difettose in produzione (ad esempio lavorazioni di parti arrivate difettose dal fornitore, difficoltà di assemblaggio e fermo linee, guasti per parti difettose identificati in fase di collaudo, ecc.);
- risparmi per la riduzione dei costi di garanzia commerciale dovuti a malfunzionamenti del prodotto sul mercato;
- risparmi derivanti da una maggior conoscenza delle caratteristiche e delle funzionalità del prodotto, degli impatti delle tolleranze e della fabbricazione;
- risparmi per la corretta gestione delle attività preventive ai fini di assicurare che il prodotto rispetti le norme vigenti e riduzione di rientri massivi dall'utenza con conseguente perdita reputazionale..

Il modello esposto da E. Savio [16] prevede di calcolare i benefici ottenibili lungo le prime due direttrici, non toccando gli ulteriori due punti i quali risultano essere caratterizzati da una notevole difficoltà di formulazione analitica. L' autore ricorda come una volta noti i benefici l'analisi economica degli investimenti può essere condotta tramite il calcolo di comuni indicatori manageriali, come il valore attuale netto (NPV - Net Present Value), il tasso interno di rendimento (IRR – Internal Return Rate) e il periodo di rimborso (Payback Period). In particolare il valore annuo netto, nella situazione specifica, viene calcolato come:

$$NPV = CF_0 + \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+i)^j} \quad (3.10)$$

dove CF_0 è l'investimento iniziale, CF_j il flusso di cassa annuale e i il tasso di interesse. CF_j è la somma di costi e benefici del processo di controllo su base annuale, includendo l'eventuale effetto di tasse e imposte. Altri indicatori utili sono il tasso interno di rendimento (*Internal Return Rate* – *IRR*) e il tempo di recupero (Payback Period).

I benefici potenziali vengono valutati mediante la quantificazione della riduzione dei costi generati da parti non conformi, partendo dalla situazione in cui non siano presenti processi di

ispezione. Per quanto riguarda i benefici legati alla riduzione di lavorazioni inefficienti i risparmi totali possono essere quantificati tramite la formula:

$$N_p \cdot P_{nc} \cdot \sum_{m=1}^M \left[\prod_{m'=1}^m (1 - P_{id,m'-1}) \cdot P_{id,m} \cdot c_{nc,m} \right] \quad (3.11)$$

Dove:

N_p : numero di parti prodotte in un dato periodo

P_c : frazione di parti conformi

P_{nc} : frazione di parti non conformi

M : numero delle fasi del processo produttivo

$P_{id,m}$: probabilità di identificazione allo step

$c_{nc,m}$: costo della non conformità quando individuata allo step tenendo presente che

Occorre tuttavia tenere in considerazione che:

- la probabilità di identificazione e il costo si riferiscono al WIP (work in progress) e che quindi bisogna tener conto di tutte le parti non conformi prodotte fino al momento di identificazione del problema
- il costo aumenta con il progredire delle fasi di lavorazione.

Per quel che concerne invece i benefici derivanti da una riduzione dei costi di garanzia, la quantità di parti non conformi immesse sul mercato corrisponde a:

$$N_{nc,w} = N_p \cdot p_{nc} \cdot \prod_{m=1}^M (1 - p_{id,m}) \quad (3.12)$$

L'autore identifica poi:

- $P_{nc,f}$: frazione di non conformità che da origine ad un guasto
- c_f : costo legato al guasto

Sulla base di quanto appena visto, è possibile definire il risparmio totale generato dalla riduzione dei costi di garanzia, tramite la formula:

$$N_{cnc,w} \cdot P_{nc,f} \cdot c_f \quad (3.13)$$

Si osserva quindi che il i benefici potenzialmente ottenibili, è calcolabile mediante la somma delle quantità ottenute dalle equazioni 3.11, 3.12 e 3.13 ed è pari a:

$$PB_{ip} = N_p \cdot P_{nc} \cdot c_\beta \quad (3.14)$$

Dove:

$$c_\beta = \sum_{m=1}^M \left[\prod_{m'=1}^m (1 - P_{id,m'-1}) \cdot P_{id,m} \cdot c_{nc,m} \right] + \prod_{m=1}^m (1 - P_{id,m}) \cdot P_{nc,f} \cdot c_f \quad (3.15)$$

Risulta essere pari al costo medio causato da una non conformità.

Per quanto riguarda i costi legati al processo di ispezione C_{is} , questi risultano essere calcolabili basandosi sulle informazioni riguardanti il tempo necessario alle operazioni di ispezione, mentre i costi relativi agli errori di misura dovuti all'incertezza sono quantificabili mediante le due seguenti formulazioni:

$$C_\alpha = N_p \cdot P_c \cdot c_\alpha \cdot \alpha c_\beta \quad (3.16)$$

$$C_\beta = N_p \cdot P_{nc} \cdot c_\beta \cdot \beta c_\beta \quad (3.17)$$

Dove:

- c_α : valore del pezzo al momento dell'ispezione (che nel caso di parti rilavorabili è il costo di rilavorazione, comprensivo di costi logistici e di gestione)
- α : probabilità di errori di tipo I
- β : probabilità di errori di tipo II

La stima delle probabilità di errori di primo e secondo tipo può essere effettuata tenendo conto che il valore misurato Y viene espresso come:

$$Y = X + E \quad (3.18)$$

Dove:

- X = valore vero
- E = errore di misura

Sono considerato variabili casuali indipendenti e normali, con medie μ e 0 e deviazioni standard pari a σ_p e σ_m , le quali equivalgono rispettivamente a la deviazione standard del processo produttivo e la deviazione standard del processo di ispezione.

Ricordando quindi che una caratteristica risulta essere conforme se:

$$LSL \leq X \leq USL \quad (3.19)$$

E viene definita non conforme dal processo di ispezione se:

$$LSL \leq Y \leq USL \quad (3.20)$$

È possibile esprimere la probabilità di errore del primo tipo quando la 3.19 risulta essere vera e la 3.20 falsa, attraverso l'espressione:

$$\begin{aligned} \alpha &= P(Y \notin [LSL, USL] \mid X \in [LSL, USL]) = \frac{P(Y \notin [LSL, USL] \cap X \in [LSL, USL])}{P(X \in [LSL, USL])} \\ &= \frac{\int_{LSL}^{USL} \int_{-\infty}^{LSL} f(x, y) dy dx + \int_{LSL}^{USL} \int_{USL}^{\infty} f(x, y) dy dx}{\int_{LSL}^{USL} f(x) dx} \end{aligned} \quad (3.21)$$

È possibile esprimere la probabilità di errore del secondo tipo quando la 3.19 risulta essere falsa e la 3.20 vera, attraverso l'espressione:

$$\begin{aligned} \beta &= P(Y \in [LSL, USL] \mid X \notin [LSL, USL]) = \frac{P(Y \in [LSL, USL] \cap X \notin [LSL, USL])}{P(X \notin [LSL, USL])} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{LSL} \int_{LSL}^{USL} f(x, y) dy dx + \int_{USL}^{\infty} \int_{LSL}^{USL} f(x, y) dy dx}{1 - \int_{LSL}^{USL} f(x) dx} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Considerando quindi un prodotto con molteplici caratteristiche (indicate nel numero nell'espressione sottostante con il termine K), risulta possibile definire il vettore:

Data una parte con K caratteristiche, può essere definito il vettore S :

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ \dots \\ S_K \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad s_k = \begin{cases} 1 & \text{se la caratteristica è conforme} \\ 0 & \text{se la caratteristica non è conforme} \end{cases}$$

Risultano quindi essere possibili 2^K stati, e S_0 rappresenta lo stato di conformità dove tutti gli $s_k = 1$. Sulla base di quanto appena descritto, è possibile calcolare la probabilità di avere un determinato vettore S a partire dalla probabilità di avere ciascuna della k -esime caratteristiche conformi o non conformi. Si osserva quindi che le probabilità che uno stato di conformità muti in uno di non conformità o viceversa, risulta essere funzione delle probabilità delle singola

caratteristiche α_k e β_k . Si osserva quindi che la probabilità che lo stato di conformità di tutte le k -esime caratteristiche, muti in uno dei qualsiasi stati di non conformità, risulta essere pari alla probabilità globale di un errore di primo tipo, ovvero:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{2^K-1} P(S_0) P(S_0 \rightarrow S_i)}{P(S_0)} \quad (3.23)$$

Mentre la probabilità che uno stato di non conformità muti nello stato di conformità risulta essere pari a:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{2^K-1} p(S_i) p(S_i \rightarrow S_0)}{1 - p(S_0)} \quad (3.24)$$

4.GEOMETRIA E STATO SUPERFICIALE

Per quanto riguarda la definizione del termine superficie, G. Malagola et al, nel suo libro “La metrologia dimensionale per l’industria meccanica” [17] identifica tra diverse tipologie di superfici:

- **Superficie reale:** ovvero la superficie che delimita un corpo e o separa dall’ambiente circostante.
- **Superficie geometrica (nominale):** superficie ideale, la cui forma nominale è definita dal disegno e/o da ogni altro documento tecnico.
- **Superficie di riferimento:** superficie rispetto alla quale vengono determinati i parametri del profilo superficiale.

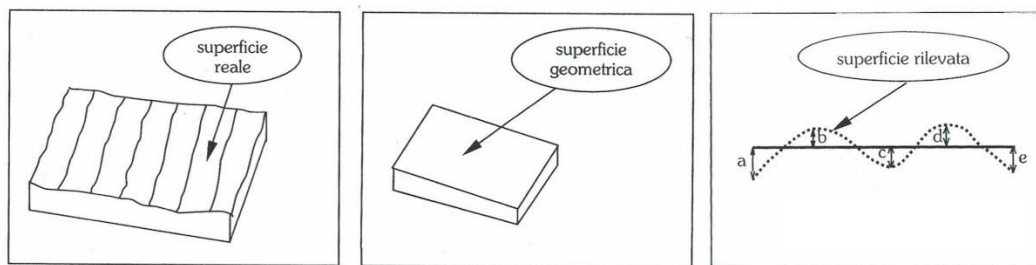


Immagine 23: diverse tipologie di superfici

Considerando di sezionare la superficie, possiamo definire il **profilo della superficie** come la linea di intersezione della superficie con un piano. La classificazione delle diverse tipologie di profili è la seguente:

- **Profilo reale:** profilo che risulta dall’intersezione della superficie reali con un piano.
- **Profilo geometrico:** profilo che risulta dall’intersezione della superficie geometrica con un piano.
- **Profilo trasversale:** profilo che risulta dall’intersezione di una superficie con un piano normale alle direzione delle irregolarità.

In termini maggiormente ingegneristici, la definizione di superficie deve tenere conto di tre aspetti principali di quest’ultima:

- Generazione della superficie: ovvero di che lavorazione o trattamento rappresenta il risultato
- Finalità della superficie: ovvero qual è il suo scopo.
- Caratterizzazione della superficie: ovvero come poterla caratterizzare oggettivamente.

Quanto appena detto, viene perfettamente riassunto da uno schema pubblicato da L. De Chiffre et Al [18]:

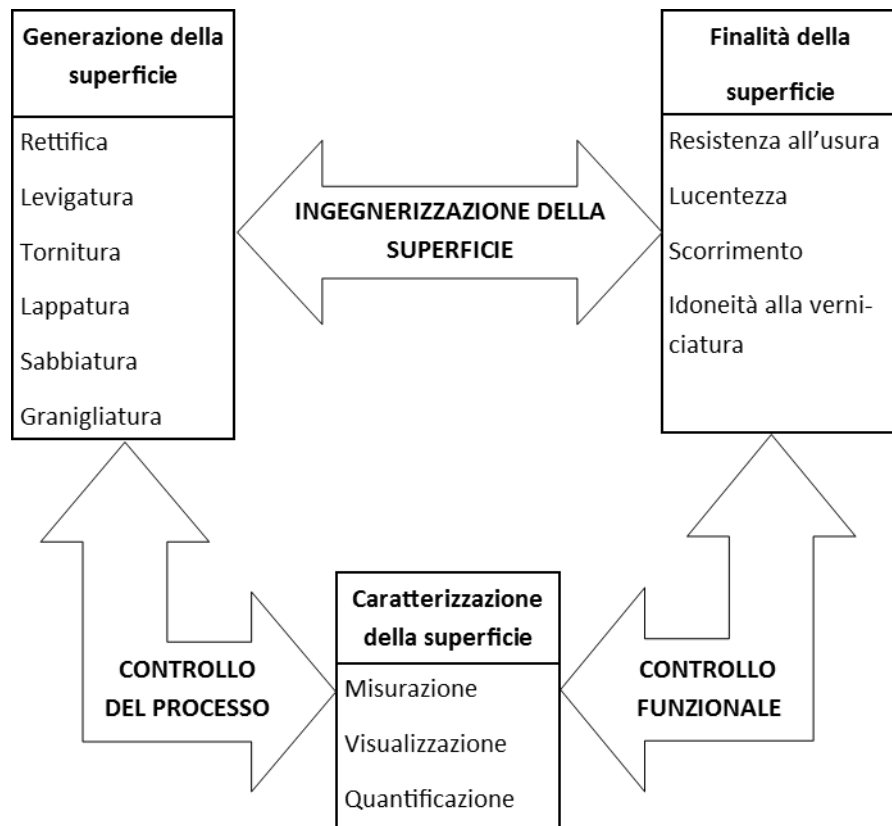


Immagine 24: Concetto di superficie e relazioni tra caratterizzazione, generazione e finalità

4.1. Tipologie di profili superficiali

La normativa ISO 4287-1998 [19], identifica tre diversi profili di cui si può pensare essere composta una superficie generica:

- **Profilo primario:** profilo misurato ottenuto applicando il filtro λ_s a meno del profilo nominale. Il filtro in questione permette di sopprimere le bassissime lunghezze d'onda e quindi le alte frequenze che rappresentano la componente di rumore. La lunghezza d'onda λ_s rappresenta quindi la lunghezza d'onda di separazione tra le componenti di rugosità e le componenti a più piccola lunghezza d'onda presenti sulla superficie.
- **Profilo di rugosità:** profilo derivato dal profilo primario mediante la sottrazione delle componenti a lunghezza d'onda maggiori di λ_c . L'applicazione di questo filtro, elimina le componenti a lunghezza d'onda più grande di λ_c , dette componenti di ondulazione. Questo filtraggio prevede quindi di applicare al profilo primario un filtro con banda

passante limitata alle lunghezze d'onda λ_s e λ_c , dove λ_c rappresenta la lunghezza d'onda di separazione fra le componenti di rugosità e le componenti di ondulazione presenti sulla superficie.

- **Profilo di ondulazione:** profilo derivato dal profilo primario mediante la sottrazione delle componenti a lunghezza d'onda maggiori di λ_c e minori di λ_f . Questo profilo quindi equivale all'applicazione di un filtro con banda passante limitata dalle lunghezze d'onda λ_c e λ_f , dove λ_f rappresenta la lunghezza d'onda di separazione fra le componenti di ondulazione e le componenti a maggiore lunghezza d'onda.
- **Profilo geometrico (forma):** profilo derivato dal profilo primario mediante l'applicazione di un'ulteriore filtro che trasmette le componenti d'onda a più alta lunghezza d'onda rispetto alla lunghezza d'onda di taglio λ_f . L'applicazione di questo filtro quindi, permette l'eliminazione delle componenti di rugosità e di ondulazione.

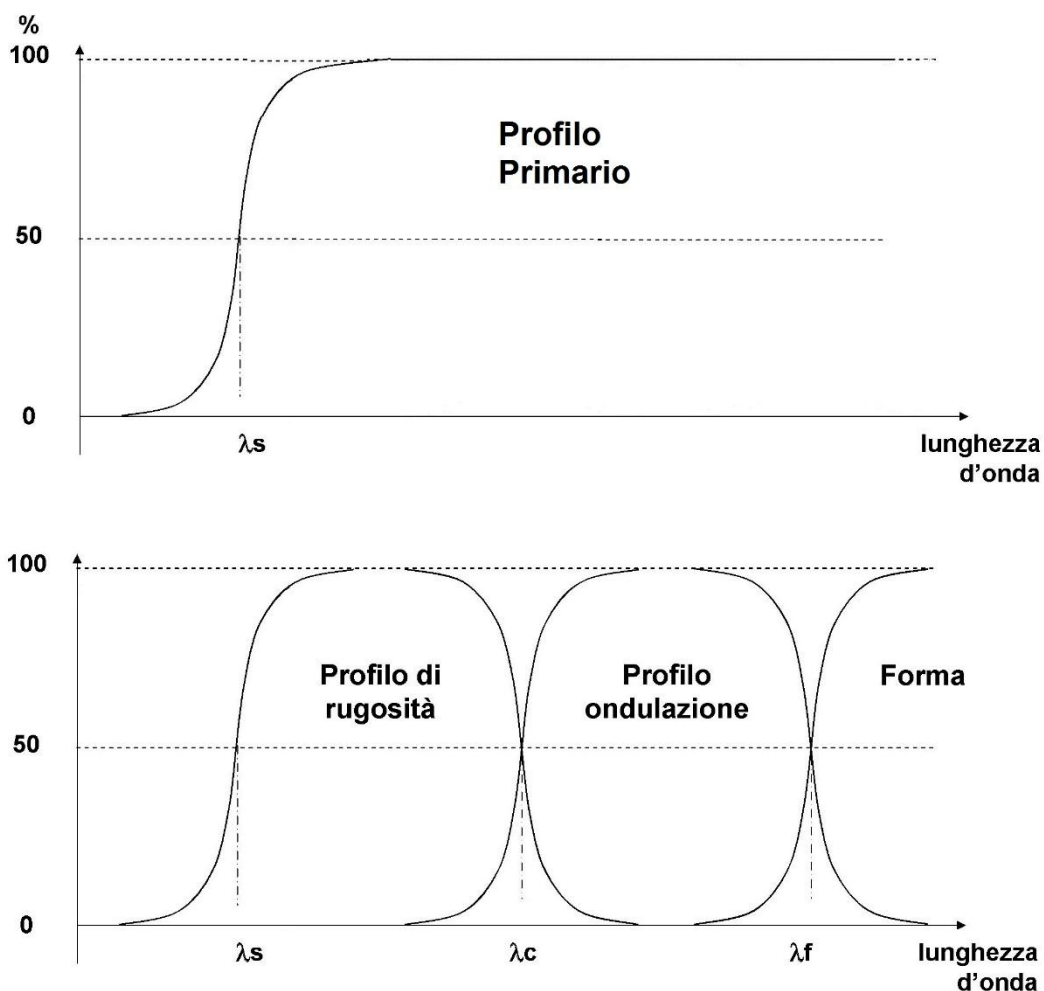


Immagine 25: tipologie di profili

4.2. Parametri del profilo superficiale

Escludendo il profilo geometrico (o di forma), la normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20] stabilisce per ogni profilo 14 diversi parametri, differenziati di profilo in profilo da una diversa lettera iniziale, ovvero:

- **P:** lettera indicante i parametri dedicati alla descrizione del profilo primario.
- **R:** lettera indicante i parametri dedicati alla descrizione del profilo di rugosità.
- **W:** lettera indicante i parametri dedicati alla descrizione del profilo di ondulazione.

I 14 diversi parametri per ogni tipologia di profilo presentati dalla normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20] risultano essere suddivisi a loro volta in 5 diverse famiglie. Si riporta di seguito una breve descrizione:

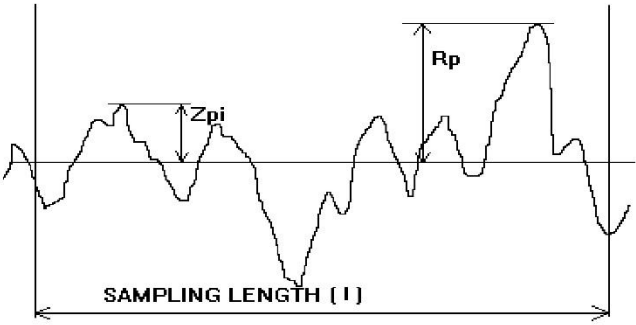
FAMIGLIA NUMERO	NUMERO DI PARAMETRI DELLA FAMIGLIA	DESCRIZIONE
1	5	I 5 diversi parametri hanno lo scopo di descrivere determinati estremi del profilo rilevato e filtrato dal punto di vista dell'ampiezza tra picco e valle. I valori in output di questi tre parametri, risultano essere particolarmente soggetti a variazioni, a seconda delle condizioni di campionamento utilizzate nella misurazione.
2	4	Parametri che coinvolgono le altezze di tutti i punti rilevati nel campionamento, e che risulta essere utile a descrivere l'ampiezza espressa come media delle ordinate. Nonostante siano anch'essi soggetti a variazioni dovute alle condizioni di sampling, la loro variabilità risulta essere comunque minore rispetto ai parametri del primo gruppo.
3	1	Famiglia composta da un unico parametro, utilizzato per descrivere la lunghezza d'onda rilevata nel campionamento del profilo.
4	1	Famiglia composta da un unico parametro, classificabile come ibrido dato che quest'ultimo risulta essere in grado di mixare le caratteristiche delle famiglie che descrivono l'ampiezza e di quella che descrive la lunghezza d'onda. Il parametro in questione, fa riferimento alla pendenza del profilo in ogni suo punto.
5	3	Famiglia contenente tre diversi parametri, derivati direttamente dalla curva di Abbot – Fireston, meglio nota come bearing area curve (BAC), i quali coinvolgono le altezze di tutti i punti campionati e non dipendono dalla lunghezza di campionamento.

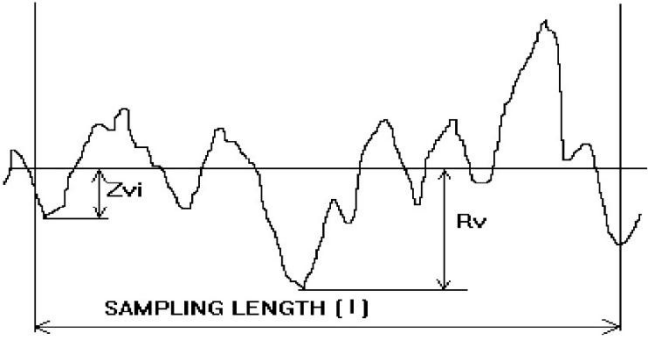
Tabella 6: famiglie di parametri del profilo superficiale

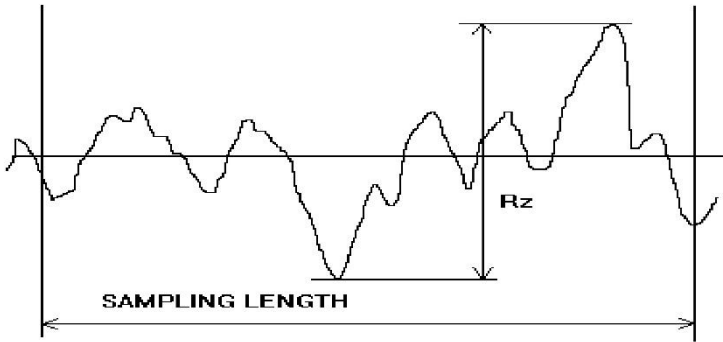
Nelle pagine seguenti descritti con maggiore dettaglio i 14 parametri che caratterizzano il profilo di rugosità. Per le altre due tipologie di tessiture superficiali, valgono le medesime considerazioni dal punto di vista geometrico ed analitico.

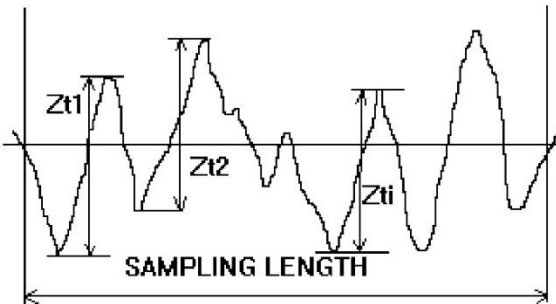
4.2.1. Parametri di ampiezza picco-valle

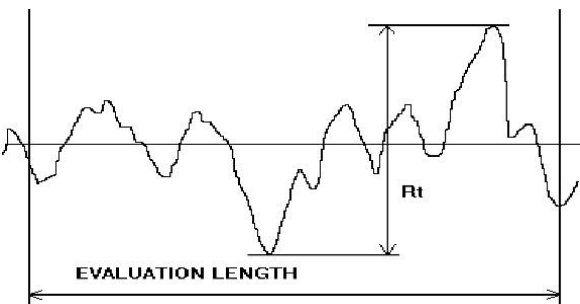
Come descritto nella tabella 6, si identificano 5 diversi parametri, di seguito descritti con riferimento alla normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20].

Parametro	Rp	Altezza massima del picco del profilo
Formulazione analitica	$R_p = \max(Z_{pi})$ (4.1)	
Descrizione	Massima altezza del picco del profilo Z_p interno alla lunghezza di base (sampling length)	
Descrizione grafica		

Parametro	Rv	Profondità massima della valle del profilo
Formulazione analitica	$Rv = \max(Zvi)$ (4.2)	
Descrizione	Massima profondità (quota negativa) di valle del profilo Zv interno alla lunghezza di base (sampling length)	
Descrizione grafica		

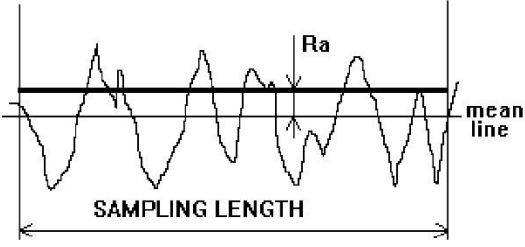
Parametro	Rz	Altezza massima del profilo
Formulazione analitica	-----	
Descrizione	La somma delle altezze del picco più alto (quota maggiore) del profilo Zp e della valle più profonda (quota minore) Zv all'interno della lunghezza di base.	
Descrizione grafica		

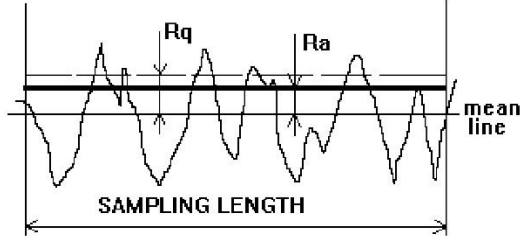
Parametro	Rc	Altezza media degli elementi di profilo
Formulazione analitica	$Rc = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (4.3)$	
Descrizione	Valore medio delle altezze del profilo Z_p all'interno della lunghezza di base. Il parametro Rc (lo stesso vale per Pc e Wc) richiede la discriminazione dell'altezza e della spaziatura. Se queste non risultano essere definite in fase di misurazione, viene utilizzato un valore di default pari al 10% di Rz per l'altezza e un valore pari al 1% della lunghezza di campionamento per la spaziatura.	
Descrizione grafica		

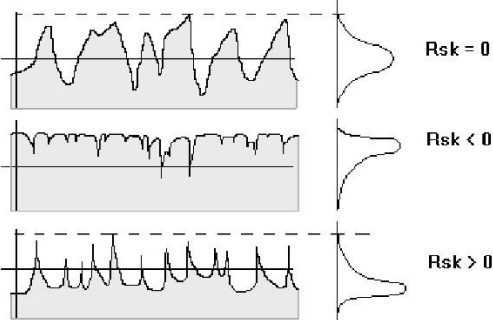
Parametro	Rt	Altezza totale del profilo
Formulazione analitica	-----	
Descrizione	La somma delle altezze del picco più alto del profilo Z_p e della valle più profonda del profilo Z_v all'interno della lunghezza del tratto di misura (evaluation length). In condizioni di default $Rt = Rz$, altrimenti vale la generica $Rt \geq Rz$	
Descrizione grafica		

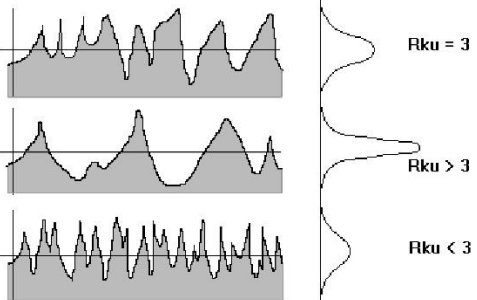
4.2.2. Parametri di ampiezza come media delle ordinate

Come descritto nella tabella --, si identificano 4 diversi parametri, di seguito descritti con riferimento alla normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20].

Parametro	Ra	Scostamento medio aritmetico del profilo valutato
Formulazione analitica	$Ra = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l Z(x) dx \quad (4.4)$	
Descrizione	Media aritmetica dei valori assoluti delle deviazioni dalla linea media Z(x) all'interno della lunghezza di base. Sebbene sia uno dei parametri maggiormente utilizzati in quanto risulta essere poco sensibile a graffiature e pori, da solo non è assolutamente sufficiente a caratterizzare una superficie.	
Descrizione grafica		

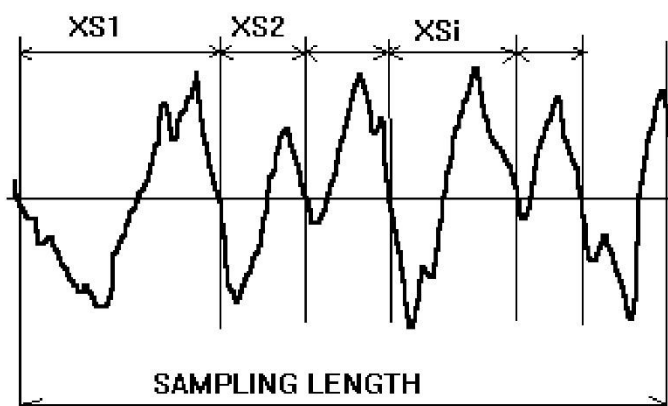
Parametro	Rq	Scostamento medio quadratico del profilo valutato
Formulazione analitica	$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (4.5)$	
Descrizione	Radice quadrata della media dei quadrati delle deviazioni dalla linea media Z(x) all'interno della lunghezza di base.	
Descrizione grafica		

Parametro	Rsk	Asimmetria del profilo valutato
Formulazione analitica	$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (4.6)$	
Descrizione	Rapporto tra la media dei cubi dei valori delle ordinate Z(x) e il cubo di Rq all'interno della lunghezza di base. Rsk misura la asimmetria della funzione di densità di probabilità dei valori delle ordinate. Risulta fortemente influenzata da picchi e valli isolate. Viene utilizzato per esprimere giudizi sulle superfici, a parità di altre parametri del profilo superficiale quali Ra, Rt, ecc.	
Descrizione grafica		

Parametro	Rku	Fattore di appiattimento del profilo valutato
Formulazione analitica	$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[\frac{1}{lv} \int_0^{lv} Z^4(x) dx \right] \quad (4.7)$	
Descrizione	Rapporto tra la media delle quarte potenze(quartica) dei valori delle ordinate Z(x) e la quarta potenza di Rq all'interno della lunghezza di base. Rku misura la acutezza della funzione di densità della probabilità dei valori delle ordinate. È fortemente influenzato da picchi e valli isolati.	
Descrizione grafica		

4.2.3. Parametri di spaziatura

Come descritto nella tabella --, si identifica un solo parametro, di seguito descritto con riferimento alla normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20].

Parametro	RSm	Larghezza media degli elementi del profilo
Formulazione analitica	$RSm = \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (4.8)$	
Descrizione	Valore medio delle larghezze degli elementi di profilo Xs all'interno della lunghezza base. Come per il parametro Rc, il parametro Rsm richiede la discriminazione dell'altezza e della spaziatura. Se queste non risultano essere definite in fase di misurazione, viene utilizzato un valore di default pari al 10% di Rz per l'altezza e un valore pari al 1% della lunghezza di campionamento per la spaziatura. Il parametro in oggetto, permette di fornire informazioni sulla superficie in termini di funzionalità e lavorabilità del prodotto.	
Descrizione grafica	 Il diagramma illustra un profilo di superficie irregolare. Una linea orizzontale rappresenta l'asse di riferimento. La lunghezza totale del campione è indicata da una freccia in basso con l'etichetta "SAMPLING LENGTH". Sopra il profilo, tre intervalli orizzontali sono marcati con frecce e etichettati come "XS1", "XS2" e "XS_i", rappresentando le larghezze dei singoli elementi del profilo.	

4.2.4. Parametri ibridi

Come descritto nella tabella --, si identifica un solo parametro, di seguito descritto con riferimento alla normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20].

Parametro	RSm	Pendenza quadratica media del profilo valutato
Formulazione analitica		$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx} \quad (4.8)$
Descrizione		Radice quadrata della media dei quadrati delle pendenze locali del profilo dz/dx all'interno della lunghezza base. Parametro particolarmente utile per valutare usura da attrito e proprietà ottiche. Si osserva inoltre il suo utilizzo per segnalare mutamenti nella geometria del profilo a monte e valle di un trattamento o un impiego particolare.

4.2.5. Parametri relativi a curve

La curva di Abbot – Firestone, meglio conosciuta come Bearing Area Curve (BAC), è uno strumento grafico che permette di identificare la quantità percentuale di materiale ad una specifica quota, basandosi sulla rilevazione del profilo eseguita dallo strumento di misura. In termini matematici, essa rappresenta la funzione di densità cumulata di probabilità dei picchi e delle valli identificate dallo strumento, le quali possono essere calcolate mediante l'integrazione.

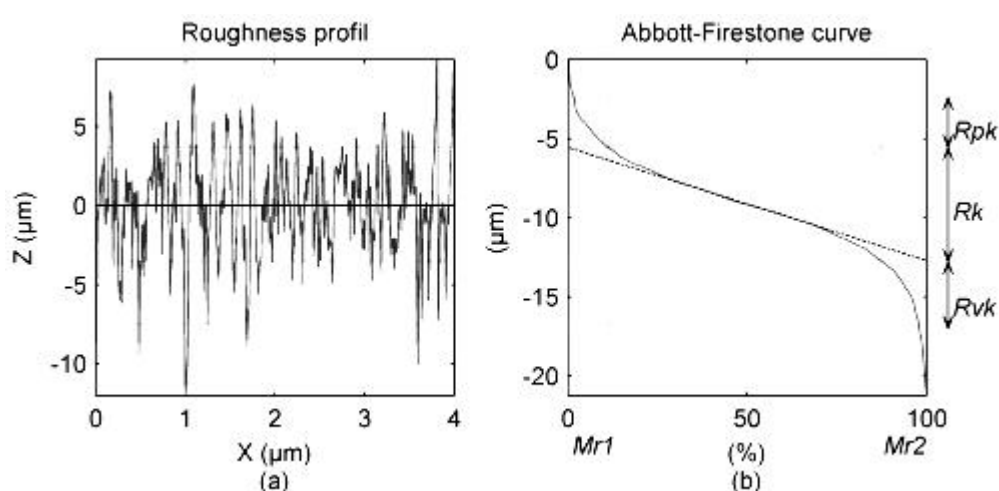
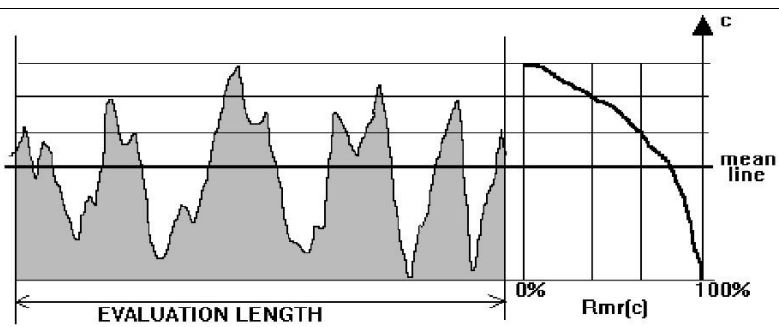
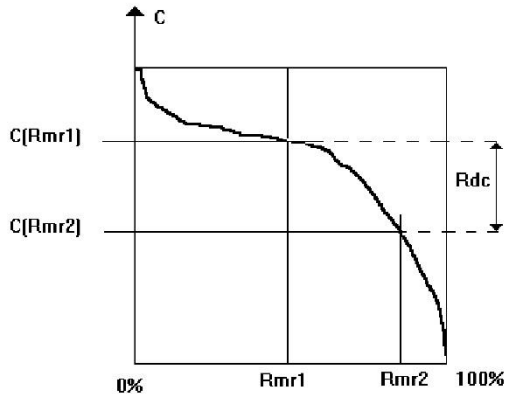


Immagine 26: Bearing Area Curve (BAC)

Come descritto nella tabella --, si identificano 3 diversi parametri, di seguito descritti con riferimento alla normativa UNI EN ISO 4287-1998 [20].

Parametro	Rmr(c)	Percentuale della lunghezza portante
Formulazione analitica	$Rsk = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^m MLi(c) \quad (4.9)$	
Descrizione	Porzione della lunghezza di materiale degli elementi del profilo ML(c) ad un dato livello c rispetto al tratto di misura.	
Descrizione grafica		

Parametro	Rδc	Differenza di altezza della sezione del profilo
Formulazione analitica	$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2) \quad \{Rmr1 \leq Rmr2\} \quad (4.10)$	
Descrizione	Distanza verticale tra i livelli di due sezioni date della proporzione del materiale.	
Descrizione grafica		

Parametro	Rmr	Percentuale della lunghezza portante relativa
Formulazione analitica	$Rmr = Rmr(C1)$ dove $C1 = C0 - R\delta c$ dove $C0 = C(Rmr0)$ (4.11)	
Descrizione	Rapporto di materiale determinata al livello $R\delta c$ di una sezione del profilo relativa ad un riferimento $C0$	
Descrizione grafica		

Un set di ulteriori 5 parametri relativi alla curva di Abbot – Firestone, sono identificabili nella normativa UNI EN ISO 13565-2-1998 [21]. Di seguito la descrizione di quest'ultimi:

Parametro	Descrizione
Rk	Profondità della rugosità del nucleo del profilo.
Mr1	Livello in percentuale determinato dalla linea di intersezione che separa i picchi sporgenti dalla rugosità del nucleo del profilo.
Mr2	Livello in percentuale determinato dalla linea di intersezione che separa la profondità delle valli dalla rugosità del nucleo del profilo.
Rpk	Profondità media dei picchi del profilo non considerate dalla rugosità del nucleo.
Rvk	Profondità media delle valli del profilo non considerate dalla rugosità del nucleo.

4.3. Strumenti di misura superficiali

Per la scelta dello strumento da utilizzare nella misurazione superficiale, risulta innanzitutto essenziale chiarire la misurazione di quale tipologia di profilo costituisce l'obiettivo conoscitivo. Oltre alla tipologia di profilo, risulta essere essenziale determinare la qualità e l'estensione della misurazione, in modo tale da comprendere se sono necessari strumenti che permettano un'analisi completa della totalità della superficie oppure se sono sufficienti strumenti idonei alla misurazione a punti. Si individuano tre famiglie di strumenti per la misura superficiale:

- Strumenti a stilo
- Strumenti ottici
- Microscopi a scansione di sonda

Oltre alla caratterizzazione tecnologica delle tipologie di strumenti, è essenziale suddividere quest'ultimi in due macro categorie, sulla base della tecnica di misurazione che utilizzano e quindi sulla natura della misura che forniscono in output:

- Strumenti 2D
- Strumenti 3D

L'immagine sottostante, permette di esprimere sottoforma di grafico le potenzialità delle diverse tipologie di strumenti, in termini di campo di misura:

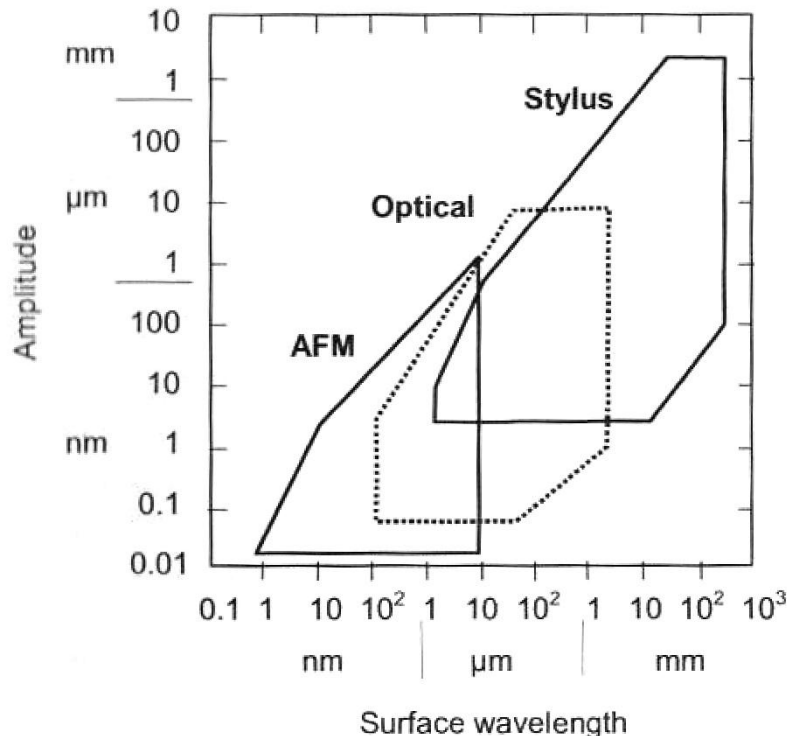


Immagine 27: Tipologie di strumenti per la misurazione della rugosità

4.3.1. Rugosimetro

Il rugosimetro è uno strumento di misura a contatto che permette di eseguire misurazioni bidimensionali. Lo strumento in oggetto consente di misurare gli spostamenti lungo l'asse verticale (asse Z) di una punta tastatrice a contatto con la superficie in esame. La punta tastatrice appena annoverata risulta essere movimentata con velocità costante da un'unità di traslazione orizzontale. Nella maggior parte dei modelli presenti sul mercato, gli spostamenti lungo l'asse verticale della puntina tastatrice, sono rilevati da un trasduttore di posizione di tipo induttivo, il cui segnale viene condizionato ed amplificato da un'unità di elaborazione e registrazione, che consente di valutare lo stato di finitura superficiale. La normativa UNI EN ISO 3274-1998 definisce lo schema di funzionamento del rugosimetro:

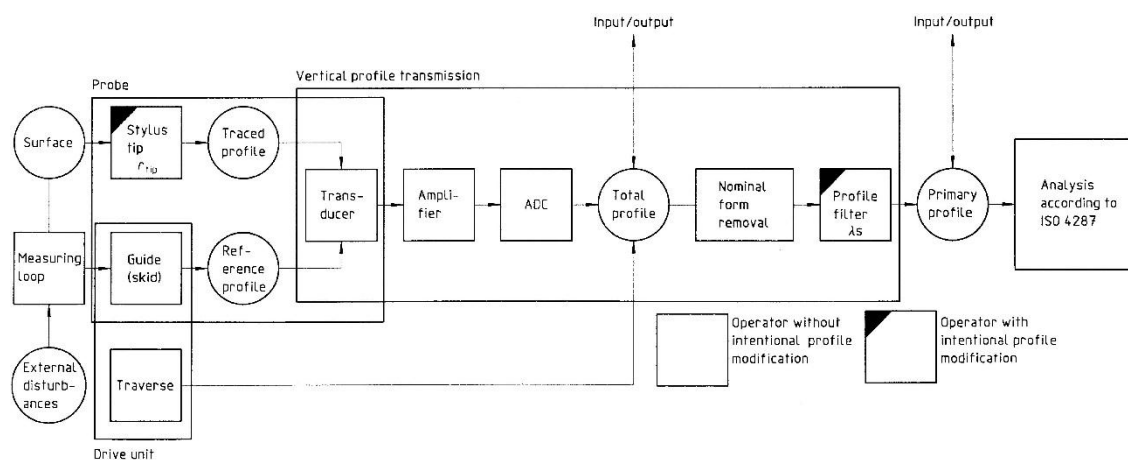


Immagine 28: logica di funzionamento del rugosimetro

Il rugosimetro, risulta essere tipicamente composto dalle seguenti parti:

- Punta tastatrice solidale al trasduttore di spostamento.
- Unità di avanzamento, in grado di eseguire una traslazione orizzontale della punta tastatrice a velocità costante.
- Registratore grafico in grado di rappresentare graficamente il profilo rilevato.
- Indicatore numerico del parametro calcolato.
- Unità di elaborazione che consente di applicare filtri diversi al profilo rilevato e permette di calcolare i parametri di rugosità.

Dal punto di vista funzionale, si identificano due tipologie di rugosimetri:

- Rugosimetro con pattino di appoggio
- Rugosimetro con testina tastatrice guidata senza pattino di appoggio.

Per quanto riguarda la prima tipologia di rugosimetro, ovvero quella **fornita del pattino di appoggio** si osserva che si caratterizza per una logica di funzionamento utilizzata quando si eseguono controlli superficiali esterni al laboratorio (in officina) o nel caso in cui si desideri escludere il fenomeno dell'ondulazione. Queste caratteristiche costruttive sono quindi tipiche dei rugosimetri portatili e prevedono di utilizzare come riferimento orizzontale la superficie del pattino stesso, che appoggia sulla superficie del pezzo in esame e media quindi i fenomeni di ondulazione, mentre la punta tastatrice rileva direttamente il profilo di rugosità. Si osserva tuttavia, che il sistema di funzionamento in oggetto non permette un perfetto allineamento tra pezzo e movimento orizzontale della testina e spesso utilizza un supporto che serve per meglio allineare l'unità di avanzamento con la superficie del pezzo.

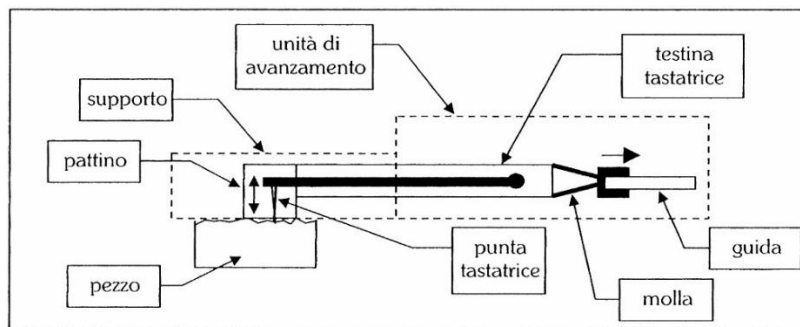


Immagine 29: rugosimetro con pattino di appoggio

Per quanto riguarda invece la seconda tipologia di rugosimetro, ovvero quella con **testina tastatrice guidata senza pattino di appoggio**, si osserva che quest'ultimo sfrutta l'elevata rettilineità di una guida di riferimento interna all'unità di avanzamento per guidare il movimento della testina tastatrice. Questo sistema, permette di rilevare, a valle di un opportuno filtraggio, anche i parametri del profilo di ondulazione. Il rugosimetro senza pattino di appoggio si caratterizza quindi per un piano di appoggio del pezzo, il quale risulta essere parallelo al piano di guida e che consente la rilevazione di tutte le deformazioni superficiali nella direzione di scansione purché queste siano comprese nel campo di misura dell'asse verticale.

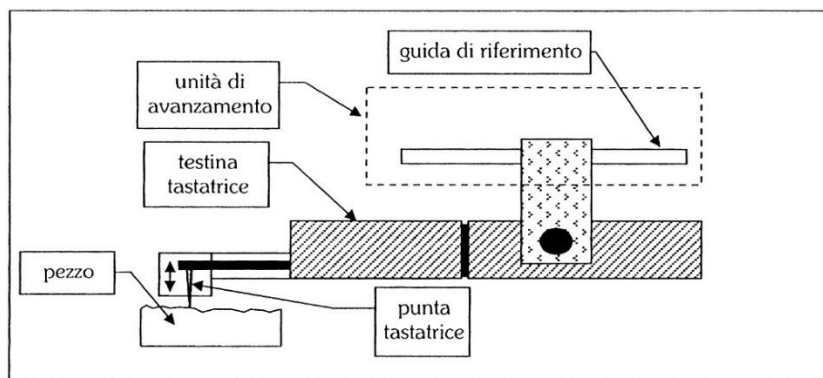


Immagine 30: rugosimetro con testina tastatrice guidata senza pattino di appoggio

Un'ulteriore classificazione dei rugosimetri, può essere eseguita distinguendo i modelli portatili e i modelli da laboratorio, dove quest'ultimi richiedono l'installazione dello strumento. Si osserva che:

Rugosimetro portatile	Rugosimetro da laboratorio
Si caratterizza per: • Presenza costante in tutti i modelli del pattino di appoggio. Quindi questa caratteristica permette la misurazione esclusiva del profilo di rugosità, filtrando automaticamente il profilo di ondulazione. • Sono utilizzati soprattutto per le superfici piane. • Offrono prestazioni solitamente inferiori relativamente al campo di misura, al numero dei parametri e all'accuratezza di misura. • Non consentono la rilevazione di valori di R_a inferiori a $0.01 \mu m$ e quindi non risultano essere adatti alla misurazione di superfici con ottimo grado di finitura (lappatura, lucidatura)	Si caratterizza per • Consentono la misurazione della rugosità di alberi e della direzione di taglio dell'utensile (ovvero perpendicolare all'asse del cilindro). • Alcuni di questi, sono dotati di cilindri rotanti, gestiti dall'unità di controllo che fanno da supporto ai pezzi da misurare. Questi cilindri mettono in rotazione il pezzo da misurare, e consentono di verificare l'intera sezione circolare di alberi o sfere. • I modelli caratterizzati da elevate prestazioni, hanno il motore dell'unità di avanzamento posto fuori dal piano di misura, in modo tale da minimizzare la trasmissione delle vibrazioni e quindi minimizzare eventuali disturbi durante la misura
 <i>Immagine 31: rugosimetro portatile³</i>	 <i>Immagine 32: rugosimetro da laboratorio</i>

³ Le immagini utilizzate nella descrizione dei rugosimetri portatili e da laboratorio sono puramente indicative. Non sussiste alcuna volontà di pubblicizzare l'azienda produttrice.

4.3.2. Strumenti ottici per la misura della rugosità

Per quanto riguarda gli strumenti ottici per la misura della rugosità, si individuano tre diverse tipologie di strumenti: il profilometro ottico, il microscopio confocale e il microscopio ad interferometria.

Il **profilometro ottico**, basa il suo funzionamento sull'autofocus di un segnale laser, emesso da un apposito emettitore che viene proiettato sulla superficie da misurare. Lo spot laser viene proiettato sulla superficie attraverso una lente caratterizzata da un'elevata apertura numerica (NA) ed è manifesta un diametro pari a circa $1\ \mu\text{m}$. La luce riflessa in tutte le direzioni dal punto, viene captata dalla medesima lente e mediante l'apposito rilevatore della messa a fuoco dell'immagine viene effettuato il sistema di controllo. Quando l'emettitore si muove orizzontalmente, data la irregolarità della superficie, si modifica la distanza tra quest'ultima e la lente. Di conseguenza, la lente effettuerà un movimento mediante un sistema piezoelettrico per mantenere questa distanza costante, e la sua traiettoria sarà quindi uguale al profilo superficiale.

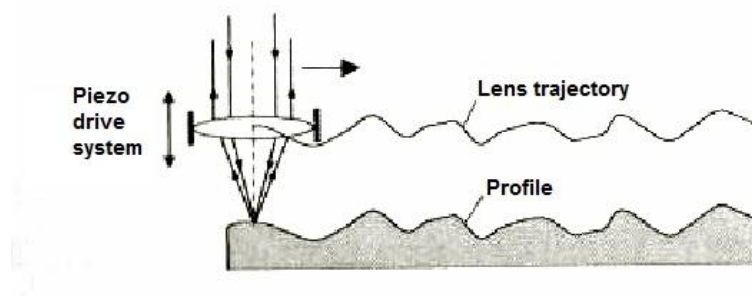


Immagine 33: profilometro ottico

Il **microscopio confocale** è la seconda tipologia di strumento ottico per la misurazione dei parametri del profilo superficiale preso in esame. Il microscopio confocale risulta essere caratterizzato da un sistema di lenti e specchi dicroici i quali focleggiano la luce laser e consentono la scansione della regione di interesse del componente posto in misurazione. La luce emessa o riflessa dal campione viene messa a fuoco dall'obiettivo del microscopio e captata da due fotomoltiplicatori. Lungo il cammino ottico di questo fascio luminoso è interposta una piccola apertura circolare che scherma la luce proveniente dai piani fuori fuoco. La luce proveniente dal piano a fuoco non viene schermata e viene raccolta dai fotomoltiplicatori, contribuendo a formare l'immagine finale osservata. Il risultato è che l'immagine finale è prodotta principalmente dalla luce proveniente da una sezione ristretta del campione, ovvero da quella prossima al piano a fuoco, e solo in minima percentuale da quella proveniente dai piani fuori fuoco. L'immagine finale rappresenta più nitidamente una sezione del campione sotto osservazione e variando il piano a fuoco risulta essere possibile ottenere immagini di altre sezioni del componente sottoposto a misura. L'insieme di tutte le sezioni consente di ottenere ricostruzioni tridimensionali del campione. Garantisce una risoluzione di circa $100\ \text{nm}$.

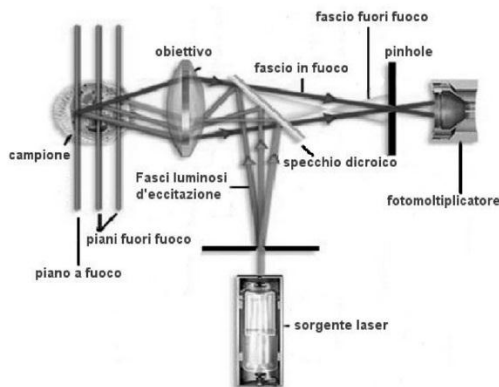


Immagine 34: microscopio confocale (23)

Il **microscopio ad interferometria**, è l'ultimo strumento ottico preso in esame per l'analisi superficiale. Questo strumento permette di combinare un microscopio ottico con una misurazione interferometrica. Il pregio di questa strumentazione è quello di ottenere una risoluzione verticale inferiore al nanometro e quindi il poter essere utilizzato per la misurazione di superfici con rugosità particolarmente basse. Sostanzialmente, vengono utilizzate due diverse tecniche di interferometria per la misurazione superficiale:

- PSI: Phase Shift Interferometry
- SWLI: Scanning White Light Interferometry

4.3.3. Microscopio a scansione di sonda

Questa tipologia di strumenti, includono due diverse modalità di scansione microscopica, ovvero la AFM (Microscopio a forza atomica) e la STM (Microscopio a scansione ad effetto tunnel), e si caratterizza per essere particolarmente adatta all'acquisizione dei dati topografici di superfici particolarmente fini dal punto di vista dei parametri del profilo superficiale. In questo strumento, l'analisi della microstruttura superficiale e delle sue proprietà locali avviene utilizzando speciali sonde appuntite a forma di ago, la cui dimensione all'apice è di circa 10 nm. La distanza tipica tra punta e componente (campione) da misurare è di circa 0.1-10 nm. L'interazione tra punta e superficie del componente, differisce sulla base della modalità di scansione microscopica utilizzata.

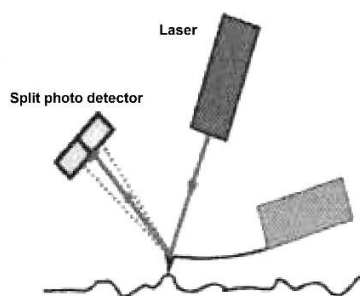


Immagine 35: posizione dei componenti nella scansione AFM

4.3.4. Altri strumenti di misura

Sebbene non siano stati indicati nella descrizione degli strumenti di misura utilizzabili nel capitolo 4.3, risulta comunque importante osservare che in passato, data l'assenza di strumenti avanzati a basso costo, la verifica dei parametri del profilo superficiale avveniva mediante l'analisi visiva o mediante la comparazione.

L'analisi visiva risulta essere particolarmente limitata, in quanto non permette di identificare un valore (o meglio un range di valori) di appartenenza dei parametri del profilo superficiale, ma permette solamente di verificare la presenza di strisci o zone palesemente non conformi, dovute ad esempio ad una mancata lavorazione.

L'analisi tattile invece, sebbene sia ugualmente limitata dal punto di vista della accuratezza di misura e sia estremamente soggettiva, permette di identificare i parametri del profilo superficiale includendoli in dei range di valori. L'analisi in oggetto, viene effettuata mediante la comparazione tattile (utilizzando l'unghia) tra la superficie del componente soggetto ad analisi e dei blocchetti di riscontro, suddivisi per lavorazione e caratterizzati da parametri del profilo superficiale noti. I blocchetti di riscontro, in inglese detti surface roughness gauge, sono posti in un apposito raccoglitore. Un esempio di questo strumento è visibile nell'immagine sottostante:

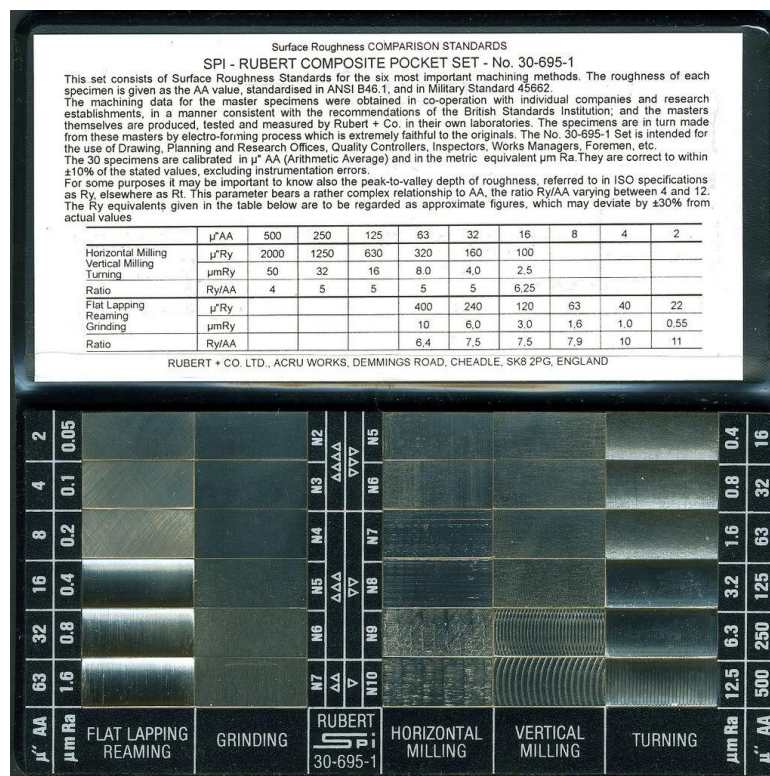


Immagine 36: Surface roughness gauge

4.4. Errori che influenzano la misurazione

Nel seguente capitolo, vengono elencate e descritte le principali grandezze di influenza nella misurazione dei parametri del profilo superficiale utilizzando come strumento di misurazione il rugosimetro. Gli errori che influenzano le misurazioni svolte con altri strumenti di misura, come ad esempio quelli ottici, non sono ritenuti importanti al fine del seguente lavoro.

Le principali grandezza d'influenza secondo G.Malagola [17] sono:

- **Errore massimo di misura della coordinata X:** dovuto essenzialmente all'efficienza del sistema di traslazione orizzontale ed alle prestazioni del trasduttore di spostamento lungo l'asse X.
- **Errore massimo di misura della coordinata Z:** dipendente dalla linearità del trasduttore di spostamento verticale e dalla elettronica di condizionamento del segnale di uscita del trasduttore. L'errore in oggetto può essere minimizzato eseguendo una frequente messa in punto dello strumento, utilizzando campioni di rugosità aventi forma e dimensioni note nell'ambito dell'incertezza di taratura.
- **Non perfetto allineamento del pezzo:** l'operazione di allineamento del pezzo prima di eseguire la misurazione risulta essere essenziale, in quanto il disallineamento del pezzo provoca un errore proporzionale al quadrato dell'angolo di disallineamento per quanto riguarda la coordinata X e quindi genera un effetto particolarmente evidente nei parametri di spaziatura, come RSm.
- **Errore di forma della punta tastatrice:** una deformazione della punta tastatrice, causata dall'eccessiva usura o dal danneggiamento di quest'ultima, può causare un'insensibilità nella rilevazione di irregolarità molto piccole e comunque l'errore sia nella coordinata X che nelle coordinata Z non può superare l'errore di forma della punta stessa.
- **Parametri del filtro errati:** dipendono dall'esperienza e dalla conoscenza del profilo da misurare e non sono modellizzabili o quantificabili in via generale.

Si osserva che la normativa DIN 4772 [22] definisce l'incertezza strumentale dei rugosimetri identificando 5 diverse classi in funzione dell'errore massimo dello strumento di misura nella misurazione dei parametri di rugosità:

Classe di precisione	Errore massimo ammesso
1	5 %
2	10 %
3	15 %
4	20 %
5	25 %

Tabella 7: classi di precisione dei rugosimetri secondo DIN 4772

4.5. Incertezza nella misurazione dei parametri del profilo superficiale

Il seguente capitolo si concentra essenzialmente sulla determinazione dell'incertezza di misura dei parametri del profilo superficiale nel caso in cui questi vengano rilevati con un rugosimetro. Le incertezze relative agli altri strumenti di misura precedentemente descritti non sono ritenuti importanti al fine del seguente lavoro.

La seguente procedura per il calcolo dell'incertezza di misura è espressa in accordo con la normativa UNI EN ISO 12179-2000 [23], la quale prevede che l'incertezza di misura sia pari a:

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_r^2} \quad (4.12)$$

Dove:

- u_{cal} è pari all'incertezza tipo composta dichiarata nel certificato di taratura del campione. Nel caso in cui quest'ultimo riporti l'incertezza estesa $U(\%)$ espressa in percentuale del valore nominale R del parametro misurato, utilizzando un fattore di copertura k pari a 2 u_{cal} risulta essere pari a:

$$u_{cal} = \frac{U(\%) \cdot R}{200} \quad (4.13)$$

- u_c è pari allo scarto tipo calcolato su 25 misurazioni consecutive, ripetute nelle medesime condizioni di misura e nella stessa posizione del campione, valutato per ogni parametro. Lo scarto delle 25 misurazioni deve essere calcolato con la seguente formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n - 1}} \quad (4.14)$$

Una volta calcolata l'incertezza standard u_c , risulta essere necessario calcolare l'incertezza estesa per ogni parametro valutato. Quest'ultima risulta essere ottenibile mediante il prodotto tra l'incertezza standard appena calcolata e il fattore di copertura associato alla distribuzione gaussiana ($k = 2$), ovvero:

$$U(\%) = u_c \cdot k \quad (4.15)$$

4.6. Verifica della conformità

La verifica della conformità di una superficie sulla base dei valori relativi ai parametri misurati su questa, deve essere svolta secondo le indicazioni fornite dalla normativa UNI EN ISO 4288-1998 [24], la quale permette l'utilizzo di due diversi metodi:

- Regola del 16%
- Regola del valore massimo

4.6.1. Regola del 16%

La regola del 16% prescrive che un componente manifesta una finitura superficiale che rispetta le tolleranze definite, nel caso in cui non più del 16% dei valori misurati sia superiore al valore pari al limite superiore di tolleranza indicato. Analogamente, nel caso in cui la tolleranza si esprima soltanto su un valore minimo di rugosità, un componente risulta essere conforme se non più del 16% dei valori misurati sia inferiore al valore pari al limite inferiore di tolleranza indicato. Al fine di non esagerare con le misurazioni pur di considerare un componente conforme, la normativa definisce la seguente guida indicante il numero di misurazioni da eseguire:

- Una sola misurazione può essere sufficiente, a patto che il valore risultante dalla misurazione sia pari o inferiore al 70% del valore di specifica.
- Tre misurazioni, e nessuna delle tre deve manifestare valori fuori tolleranza.
- Sei misurazioni, delle quali una soltanto può eccedere il limite di specifica.
- Dodici misurazioni, delle quali soltanto due possono eccedere il limite di specifica.

Risulta importante osservare che il 16% non è un numero casuale, ma deriva dalla distribuzione gaussiana. Difatti se si considera la media (μ) di una distribuzione gaussiana, ed a questa si applica una deviazione standard (1σ) soltanto su un lato, è possibile osservare che risulta essere coinvolta circa l'84% della popolazione, lasciando quindi una coda avente una valenza pari a circa il 16%. L'indicazione dell'utilizzo della regola del 16% come criterio di accettazione o rifiuto del componente, viene segnalata nel disegno tecnico dai parametri del profilo superficiale, i quali a valle di questi non riportano la sigla "max".

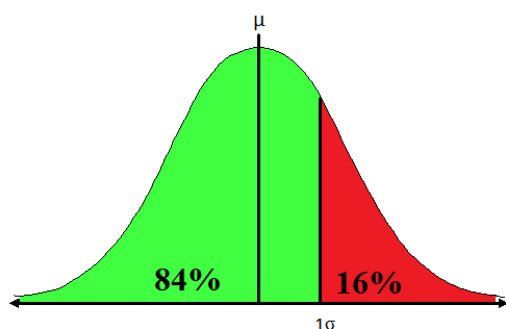


Immagine 38: Distribuzione gaussiana

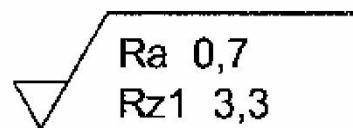


Immagine 39: notazione tecnica regola del 16%

4.6.2. Regola del valore massimo

Nel caso in cui un componente manifesti requisiti superficiali particolarmente severi, è consigliabile l'applicazione della regola del valore massimo, la quale prevede che un componente per essere dichiarato conforme alle specifiche dal punto di vista superficiale, durante l'ispezione non deve presentare nessun parametro eccedente le specifiche.

Al fine di indicare questa regola di accettazione, sul disegno tecnico rappresentante il componente, le specifiche dimensionali riferite ai parametri del profilo superficiale, devono essere contrassegnate con la sigla "max" a valle del parametro, ovvero:

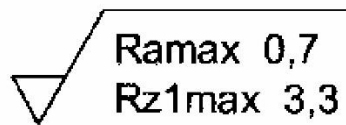


Immagine 40: notazione tecnica regola del valore massimo

5. TRATTAMENTI SUPERFICIALI

Il seguente capitolo presenta una panoramica sui trattamenti superficiali coinvolti nel lavoro in oggetto, ovvero il processo di sabbiatura o granigliatura e il processo di verniciatura. Oltre alla descrizione dei singoli processi e delle loro varianti, nella parte finale del capitolo verranno descritti gli standard internazionali per effettuare un controllo qualitativo dei processi appena descritti.

5.1. Il processo di sabbiatura

La sabbiatura consiste in un processo intermedio al ciclo di lavorazione del prodotto, avente lo scopo di erodere la parte più superficiale di un materiale mediante l'abrasione dovuta ad un getto di sabbia ed aria. Lo scopo del processo di sabbiatura risulta quindi essere quello di preparare la superficie alle successive lavorazioni, operando quindi una rimozione degli ossidi, film di vernice e calcificazioni.

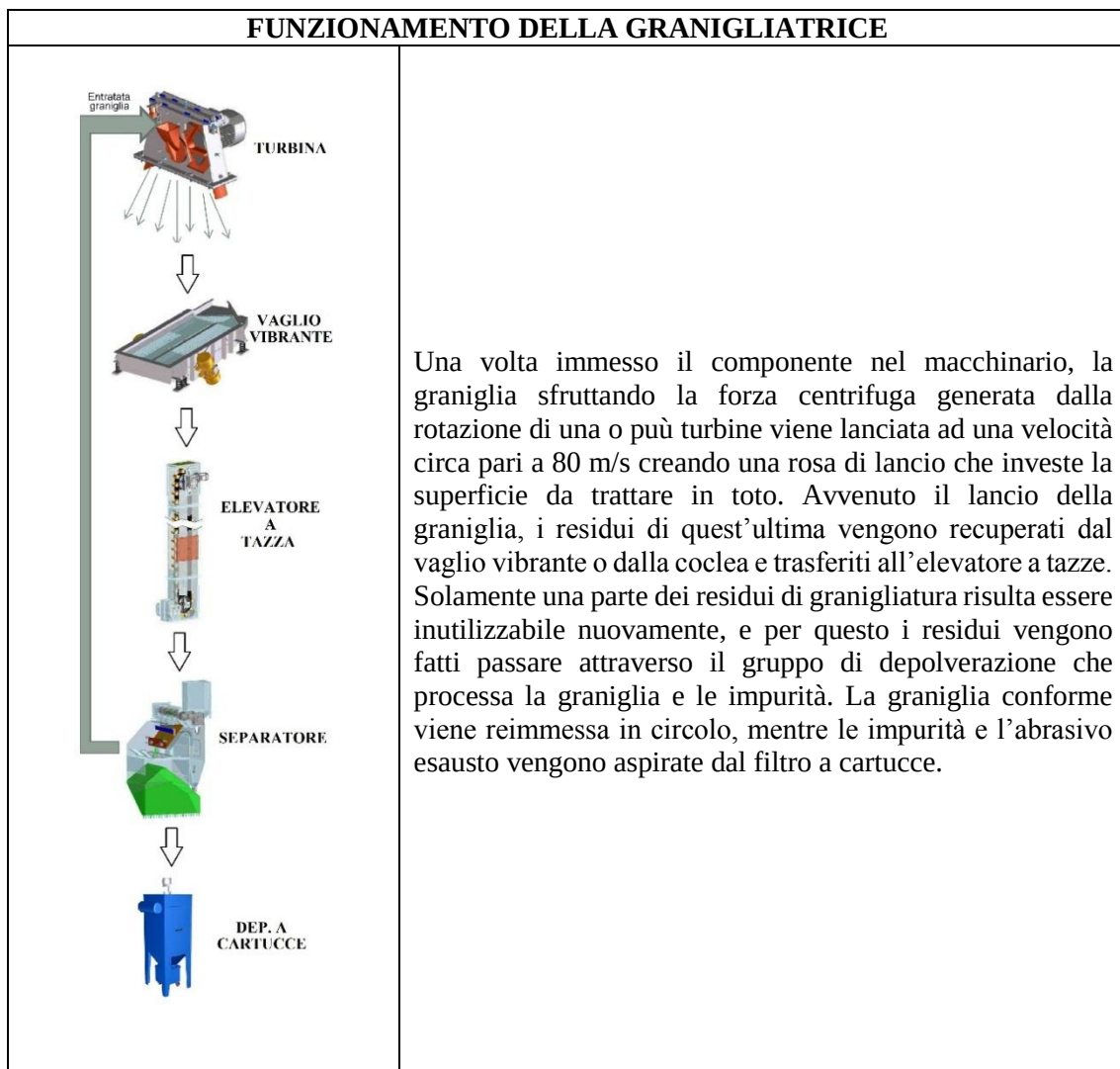
Con maggiore precisione, gli scopi del processo in oggetto sono molteplici e si differenziano in base al prodotto e in base alla finalità di quest'ultimo. In riferimento ai diversi processi, si possono identificare le seguenti finalità:

- Per il settore della fonderia dei metalli ferrosi e non ferrosi, si effettua un processo di sterro-granigliatura, il quale ha lo scopo di operare un'eliminazione delle scorie tipiche dei processi di fonderia, come le resine e la terra da fonderia.
- Per il settore dello stampaggio a caldo si effettua un processo di decalaminazione, il quale ha lo scopo di operare una rimozione degli ossidi e della calamina formatasi sullo strato superficiale.
- Per il settore dei profilati, lamiere e componenti soggetti a lavorazioni di tornitura, fresatura e foratura, il processo in oggetto permette di operare un sensibile aumento dei valori di rugosità superficiale, permettendo un migliore risultato nel successivo processo di verniciatura grazie all'aumento del grip tra superficie e film di vernice.
- Per i processi di metallizzazione e gommatura, permette di operare una sverniciatura del componente.
- Per i componenti soggetti a sollecitazioni di compressione, la sabbiatura effettuata mediante pallini (pallinatura o shotpeening) permette di aumentare notevolmente la resistenza a fatica, e di generare una superficie forte che possiede caratteristiche meccaniche superiore rispetto a prima.
- Per il settore dei termoisolanti viene effettuata la cosiddetta sbavatura, la quale ha lo scopo di operare un arrotondamento degli spigoli vivi e una pulizia superficiale.

5.1.1. Componenti e struttura

Occorre innanzitutto operare una distinzione tra sabbiatrice e granigliatrice, in quanto sebbene lo scopo delle due sia il medesimo, strutturalmente questi due macchinari risultano essere totalmente diversi.

- La sabbiatrice prevede l'utilizzo di un propellente il quale trasporta l'abrasivo verso l'ugello di lancio, dove quest'ultimo viene movimentato manualmente da un operatore o in modo oscillatorio da un meccanismo di movimento. In questa configurazione risulta essere possibile l'utilizzo di diverse tipologie di abrasivo sia metallico che inerte.
- La granigliatrice al fine di inviare l'abrasivo verso il componente sfrutta la forza centrifuga generata dalla rotazione di una o più turbine a palette. In questi sistemi si possono solamente utilizzare graniglie di tipo metallico di forma sferica, angolosa, o a cilindretti o miscele di questi, in quanto essendo di natura metallica sono in grado di resistere alla forza di impatto con le palette delle centrifughe e possono pertanto essere riutilizzati.



5.1.2. Soluzioni commerciali

Come evidenziato nel capitolo 5.1, gli scopi del processo di sabbiatura/granigliatura sono molteplici e di conseguenza molteplici sono anche le configurazioni commerciali del macchinario presenti sul mercato. Sebbene il principio base della lavorazione nelle diverse configurazioni non cambi, ognuna di queste risulta essere maggiormente adatta a specifiche famiglie di prodotti differenziandosi per produttività, potenza, dimensioni e costo. Di seguito verranno riportate le principali configurazioni tecnologiche presenti sul mercato:

	La configurazione a tappeto, prevede l'utilizzo di un tappeto rotante su appositi rulli che permette la movimentazione del componente durante il processo. Solitamente questa configurazione si caratterizza per la presenza di una sola turbina, per il limitato carico su cui può operare e per l'alto grado di pulizia nell'ambiente circostante la macchina.
	La configurazione a gancio prevede la presenza di una trave provvista di un gancio sul quale il componente viene ancorato. Una volta iniziato il processo, il componente viene fatto ruotare intorno al proprio asse e viene movimentato all'interno della macchina. Generalmente questa configurazione prevede l'utilizzo di due o più turbine. Si caratterizza per la possibilità di processare componenti di grandi dimensioni e per un più alto grado di sporcizia nell'ambiente circostante alla macchina.
	La configurazione a tavola rotante prevede la presenza di una tavola che effettua una rotazione attorno al proprio asse verticale. I componenti vengono posizionati sulla tavola, la quale girando li sottopone singolarmente al processo di granigliatura. Risulta importante osservare che il lato su cui poggia il componente sulla tavola non viene coinvolto nel processo.

Risulta importante osservare che le configurazioni commerciali appena descritte, rappresentano una parte molto limitata delle configurazioni in commercio o comunque realizzabili in modalità *engineering to order*. In particolare, si osserva che soprattutto nella configurazione a gancio, le possibilità di personalizzazione sono molteplici e comprendono il carico/scarico automatizzato dei componenti, la configurazione a doppia porta o tunnel, la possibilità di autoalimentare ed autoprogrammare il macchinario. Solitamente la scelta della configurazione maggiormente adatta a soddisfare un'esigenza produttiva deve svolgersi interfacciandosi con il personale commerciale delle aziende produttrici, in modo tale da identificare la tipologia di processo che permette in base alle diverse geometrie dei componenti ed alle esigenze, il raggiungimento di risultati ottimali in termini di omogeneità e produttività.

5.1.3. Tipologia di graniglia

La graniglia consiste nell'utensile dell'impianto di sabbiatura, di conseguenza la scelta di questa impatta direttamente sul risultato finale del processo. I parametri di scelta della graniglia sono:

- Forma
- Dimensione
- Materiale
- Peso specifico
- Durezza

Per quanto riguarda la composizione chimica, la graniglia risulta essere classificabile in 5 diverse macro categorie:

Categoria del materiale	Tipologie
Vegetale frantumato	• Noce, noce di cocco • Pesca e albicocca noccioli • Tutolo di Mais • Legnetto e segatura
Plastico	• Nylon poliammide • Polietilene
Minerale	• Corindone, corindone sintetico • Vetro in microsfere • Carburo di silicio • Garnet • Olivina • Carburo di silicio
Metallico	• Acciaio fuso • Acciaio trafilato • Acciaio Inox • Ghisa
Non ferroso	• Alluminio e leghe leggere • Leghe di rame • Leghe di zinco

Tabella 8: classificazione della graniglia per materiale

Per quanto riguarda la composizione metallica, la normativa UNI EN ISO 11124-1997 [25] descrive la classificazione della graniglia metallica utilizzata nei processi di granigliatura come preparazione superficiale al processo di verniciatura. La normativa in oggetto, prevede di utilizzare 3 diversi parametri per la descrizione:

- **Tipologia di abrasivo:** nella quale si trovano le graniglie in ghisa proveniente da fusione (M/CI), in acciaio ad alto tenore di carbonio proveniente da fusione (M/HCS), in acciaio a basso tenore di carbonio proveniente da fusione (M/LCS), in acciaio trafilato (M/CW).
- **Forma iniziale della graniglia:** la quale può essere cilindrica (S), angolosa (G) o cilindrica (C).
- **Range dimensionale:** considerando l'irregolarità del processo produttivo della graniglia, la sua dimensione viene espressa in range dimensionali. Il valore dimensionale viene espresso in 3 *digit* ed indica il valore medio della dimensione nominale, espresso in mm e moltiplicato per 100.
- **Durezza:** durezza riscontrata dalla graniglia durante la prova di durezza Vickers. Essa risulta essere espressa dalla dicitura HV accompagnata da un valore indicante la durezza espressa nella scala di durezza di Vickers. Il valore espresso risulta essere riferito al 90% della graniglia sottoposta a test.

La dicitura della graniglia metallica risulta quindi essere riassumibile in un codice. Un esempio di questo è visibile nell'immagine sottostante:

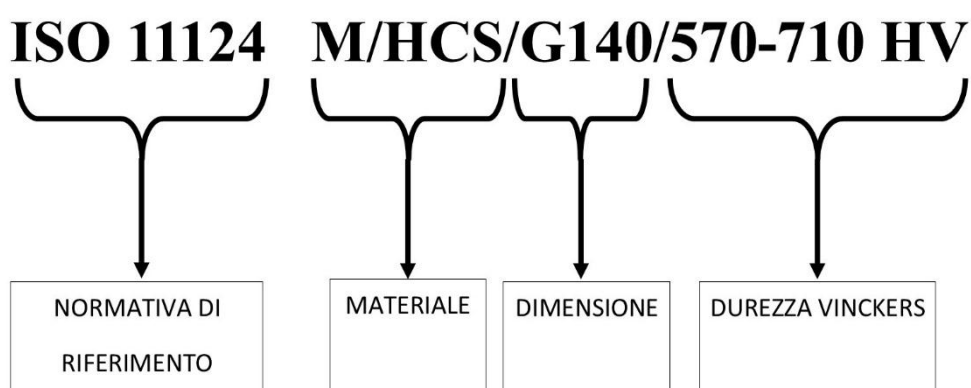


Immagine 41: esempio di identificazione della graniglia metallica secondo ISO 11124

Per quanto riguarda la scelta della tipologia di graniglia metallica, occorre considerare che non esiste una metodologia analitica o comunque ben determinata per la scelta delle caratteristiche che quest'ultima deve avere. Esistono tuttavia delle linee guida, che possono aiutare in prima analisi ad orientarsi.

Si osserva quindi che la scelta della graniglia deve essere effettuata considerando:

- Il tipo di impianto utilizzato (aria compressa o turbina) e la tipologia di residuo da eliminare, considerando la durezza e lo spessore di quest'ultimo.
- La graniglia sferica riutilizzata tenderà a diminuire il suo diametro, pur mantenendo le sue caratteristiche di rotondità e di massa. Questa forma risulta quindi essere particolarmente adatta alla lavorazione di residui con maggiore durezza.
- La graniglia angolosa, inizialmente attaccherà il sub-strato consentendo l'ottenimento di un profilo seghettato, tuttavia con i successivi utilizzi tenderà a smussarsi generando quindi risultati superficiali più modesti.
- La graniglia cilindrica rappresenta un compromesso tra le due precedenti tipologie, in quanto mantiene la spigolosità e il mantenimento della massa.
- Per gli impianti funzionanti ad aria compressa nel caso l'obiettivo superficiale sia una sabbiatura leggera è consigliabile l'utilizzo di microsfera di vetro o ceramica (soprattutto su metalli a bassa durezza), mentre nel caso in cui si desiderino superfici maggiormente rugose è consigliabile l'utilizzo di corindone, garnet o graniglia angolosa.
- Per gli impianti funzionanti a turbina nel caso in cui l'obiettivo superficiale sia una granigliatura leggera è consigliabile l'utilizzo di graniglia sferica o cilindretti in acciaio. Nel caso in cui invece si desiderino superfici granigliate con maggiore profondità risulta essere consigliabile l'utilizzo di miscele sferiche-cilindriche o sferiche - angolose, soprattutto in presenza di materiali caratterizzati da elevata durezza.
- Nel caso in cui con una graniglia caratterizzata da granelli di una singola forma (solo graniglia sferica o solo graniglia angolosa) i risultati ottenuti siano eccessivamente blandi o eccessivamente profondi, l'azione maggiormente consigliata è quella di creare ad hoc apposite miscele.

5.2. Il processo di verniciatura

La verniciatura consiste nel processo mediante il quale un oggetto viene rivestito di vernice per motivi estetici e/o protettivi, e prevede la presenza di:

- Un **supporto** avente caratteristiche superficiali tali da renderlo idoneo al ricevimento del prodotto verniciante.
- Un **prodotto verniciante** avente caratteristiche idonee al supporto.
- Un **ciclo di applicazione** avente lo scopo di trasferire correttamente il prodotto sul substrato.

Il prodotto verniciante viene definito come una miscela di prodotti chimici che, applicata in più mani mediante una sequenza ben definita di operazioni, forma una pellicola solida dotata di resistenza meccanica e chimica tale da proteggere il supporto dall'aggressione degli agenti fisici e chimici presenti nell'ambiente e dotata di caratteristiche tali, per quanto riguarda il colore, l'aspetto, il tatto e l'uniformità, da mutare l'aspetto estetico del manufatto verniciato.

5.2.1. Composizione delle vernici industriali

Un prodotto verniciante di natura industriale risulta essere essenzialmente composto da:

- **Legante:** il quale consiste nel componente base del film, e si caratterizza per le sue funzioni di adesione e protezione.
- **Solvente/diluente:** il quale consente l'applicazione delle vernici
- **Pigmenti:** i quali forniscono colore e ricoprimento, oltre a garantire la funzione protettiva superficiale.
- **Cariche:** le quali sono utilizzate come riempitivi e si caratterizzano per un effetto coprente e opacizzante.
- **Additivi:** i quali sono presenti solitamente in quantità molto basse e permettono innumerevoli funzioni, come la catalisi, il bagnamento e la distensione.

I **leganti** costituiscono dal 20 al 50% in peso il prodotto verniciante e costituiscono il componente essenziale e indispensabile del sistema verniciante in quanto permettono di dare la formazione di un film continuo e aderente al substrato in grado di inglobare e legare tra di loro tutti i componenti del sistema. La composizione del legante da utilizzare differisce in base allo scopo della verniciatura ed alla morfologia del materiale sottoposto al processo di verniciatura. Una panoramica generale sulle tipologie di leganti, viene fornita di seguito

Tipologia di resina	Caratteristiche
Alchidica	Resine derivate dalla policondensazione di anidridi, acidi grassi e polioli, presentano un'ampia gamma di varianti e si caratterizzano quindi per un'alta versatilità applicativa ed un costo molto contenuto. Dal punto di vista del processo, permettono di ottenere un'elevata lucentezza, una buona resistenza al calore ma una durabilità inferiore alle resine poliuretaniche o poliacriliche.
Acrilica	Resine derivanti da reazioni di polimerizzazione di diversi monomeri acrilici, sulla base dei quali differiscono in termini di caratteristiche. Sono solitamente utilizzate per i prodotti di pregio (automotive, elettrodomestici) e si caratterizzano per una buona stabilità fotochimica e idrolitica, una ottima inerzia chimica, una elevata resistenza alle variazioni di temperatura ed una stabilità della lucentezza e della colorazione nel tempo.
Epossidica	Resine derivanti dalla policondensazione tra bisfenolo A ed epicloridrina, si caratterizzano per un elevato potere protettivo che le rende particolarmente resistenti alla corrosione. Per contro, tendono a degradare fotochimicamente.
Poliuretanica	Resine derivanti dalla reazione di isocianati e alcoli, si caratterizzano per un'elevata resistenza all'abrasione, una scarsa resistenza all'umidità ed una elevata tossicità.
Vinilica	Sono dette anche resine termoplastiche, e consistono in catene lunghe con legami saturi. Si caratterizzano per la resistenza agli agenti chimici e la resistenza ai fattori ambientali.
Amminica	Resine ottenute dalla condensazione di formaldeide con urea o melammina, si caratterizzano per elevati costi e promettono un'alta resistenza agli agenti chimici e un mantenimento della colorazione anche in temperatura.
Poliestere	Resine chimicamente simili alle resine alchidiche tuttavia in assenza di modificazioni con olio. Manifestano prestazioni protettive superiori alle alchidiche tuttavia conservano una versatilità applicativa quasi inalterata.
Fenolica	Resine ottenute dalla reazione di fenolo e formaldeide, possono essere utilizzate in miscela con le resine epossidiche o viniliche. Vengono utilizzate principalmente nella verniciatura dei componenti plastici o adesivi.

Tabella 9: tipologie di resine

I **pigmenti** sono prodotti solidi, impiegati in forma di polvere di opportuna granulometria, che risultano essere insolubili nel mezzo verniciante. La loro funzione risulta essere duplice: colorare e conferire capacità al sistema verniciante in modo tale da coprire e quindi nascondere il substrato su cui il sistema è applicato. I pigmenti possono essere di natura organica o inorganica, dove i primi risultano essere preferibili per la gamma particolarmente estesa di tonalità e per la nitidezza del colore, mentre i secondi offrono solitamente migliori prestazioni in quanto risultano essere totalmente insolubili. Oltre a fornire la colorazione, i pigmenti contribuiscono alla durezza, aumentano la resistenza ad abrasione, corrosione ed ai raggi UV.

I **solventi** hanno la funzione di fluidificare il sistema e di rendere possibile l'applicazione sul substrato. Una volta completata l'applicazione, i solventi vengono allontanati dalla superficie del componente mediante l'evaporazione e di conseguenza non se ne trova traccia nel film essiccato. In base alla velocità di evaporazione del solvente si possono ottenere risultati diversi, in quanto un rapido essiccamento favorisce la distensione ma aumenta il rischio di colature, mentre un procedimento più lento tende ad ostacolare la distensione del prodotto verniciante. A causa dell'elevata tossicità e dell'inquinamento ambientale provocato da questi, la tendenza moderna dell'industria è quella di limitarne l'utilizzo.

Le **cariche** sono materiali inerti utilizzati come riempitivi che permettono di migliorare le caratteristiche estetiche e reologiche del sistema e/o di ridurre la quantità di pigmenti necessaria. Solitamente sono silicati di alluminio, silicati doppi di calcio e magnesio, farine fossili, solfato di bario e ossido di silicio.

Gli **additivi** sono prodotti di varia natura che impartiscono al prodotto verniciante durante la lavorazione o a valle dell'essiccazione particolari caratteristiche. Queste sostanze sono particolarmente numerose e vengono solitamente classificati in base all'azione che esercitano, ovvero: antipelle, antingiallenti, acceleranti, anti sedimentanti, plastificanti, distendenti.

La loro efficacia varia in funzione della quantità utilizzata, che varia da poche ppm (parti per milione) al 3-4 %.

5.3. Tipologie di prodotti

L'insieme dei prodotti ottenibili dalla miscelazione di resine tradizionali, solventi, pigmenti e cariche risulta essere divenuto col tempo particolarmente limitato, per via della necessità di ottenere prestazioni sempre migliori e di abbattere l'inquinamento ambientale generato dai prodotti vernicianti. Attualmente grazie alla continua ricerca, i prodotti disponibili sul mercato sono molteplici e si possono essenzialmente suddividere in quattro diverse categorie:

- **Prodotti tradizionali:** i quali rappresentano ciò che rimane dell'unica tecnologia di origine, tuttavia risultano essere contraddistinti dalle continue innovazioni portate a quest'ultima. Attualmente la loro presenza risulta essere ancora forte, soprattutto nei settori in cui le altre tecnologie non generano sufficienti vantaggi o peggio non risultano essere applicabili.
- **Prodotti ad alto solido:** caratterizzati da un residuo secco⁴ decisamente più elevato rispetto ai prodotti tradizionali (maggiore del 70/75%), permettono di apportare notevoli benefici per quanto riguarda i costi di trasporto/applicazione e per quanto riguarda la dispersione dei solventi nell'ambiente. Sono destinati prevalentemente alla verniciatura industriale a spruzzo, sia dei metalli che del legno.
- **Prodotti all'acqua:** questa categoria di prodotti vernicianti risulta essere a sua volta divisibile in prodotti idrosolubili (dove l'acqua costituisce praticamente tutta la fase volatile e fa da solvente al legante) ed i prodotti idrodiluibili (nei quali la fase volatile del prodotto come fornito è costituita invece da solventi organici, e l'acqua si aggiunge solo al momento dell'applicazione in sostituzione del normale diluente organico). La finalità del loro utilizzo consiste nella riduzione delle emissioni di solvente nell'ambiente e di eliminare sostanze nocive ed odori sgradevoli durante l'applicazione. Questa tipologia di prodotti è destinata prevalentemente alla verniciatura industriale, sia dei metalli che del legno. Le modalità con cui il prodotto verniciante viene applicato, sono la modalità a spruzzo, quella ad immersione e l'elettroforesi.
- **Prodotti in polvere:** si caratterizzano per la totale assenza di solventi e per il recupero degli overspray. Questi prodotti risultano essere ideali dal punto di vista dell'impatto sull'ambiente e dell'igiene sul lavoro, pur riuscendo a garantire ottime prestazioni, soprattutto protettive.

5.3.1. Tecnologie di verniciatura

Le tecnologie di verniciatura sono molteplici e la scelta di quella maggiormente adatta al processo produttivo, deve essere effettuata sulla base della natura del prodotto verniciante, della geometria del componente e delle caratteristiche desiderate dal prodotto verniciato. Le principali tecnologie per l'applicazione sono:

⁴ Residuo secco: quantità di prodotto che rimane a valle dell'evaporazione del solvente.

- **Pennello e rullo manuale:** consiste nel sistema maggiormente antico, e prevede l'utilizzo di un pennello o un rullo composto di setole per la deposizione del prodotto verniciante sulla superficie del componente. Attualmente questa tecnologia risulta essere utilizzata soprattutto su opere navali e applicazioni in opera, come tralicci o opere murarie.
- **Spruzzo:** sistema in assoluto maggiormente diffuso nell'industria, può essere effettuato manualmente o mediante impianti automatizzati. L'applicazione viene effettuata mediante un aerografo nel quale la vernice viene nebulizzata grazie ad un ugello ed alla pressione dell'aria compressa. Questa metodologia di applicazione permette l'ottenimento di risultati particolarmente uniformi, tuttavia genera un elevato spreco di materiale verniciante (spruzzato fuori dall'oggetto) e necessita di un'elevata fluidità della vernice, fattore che rende necessario un intenso utilizzo di solvente.
- **Spruzzo airless:** il prodotto verniciante è racchiuso all'interno di un serbatoio e viene spinto, mediante una elevata pressione, che può raggiungere le 200 atm., all'ugello spruzzatore. La caduta di pressione che si verifica all'uscita dell'ugello provoca la nebulizzazione. Viene impiegato solitamente per la verniciatura di superfici molto estese.
- **Spruzzo elettrostatico:** tecnologia utilizzabile per la verniciatura di metalli ed altri materiali, a patto che quest'ultimi presentino una sufficiente conduttività. La conduttività del materiale sottoposto al processo di verniciatura risulta essere essenziale, in quanto questa tecnologia sfrutta il principio dell'attrazione tra corpi caricati elettricamente con segno opposto. Le particelle di pittura all'uscita dall'aerografo, in presenza di un forte campo elettrico generato mediante scarica elettrica ad alto potenziale da un elettrodo puntiforme posizionato accanto all'ugello, vengono caricate negativamente, mentre il manufatto posto a potenziale terra assume carica positiva. La differenza di potenziale fra l'ugello e il manufatto è di ca.70-90 kV e le particelle così caricate seguono nel loro percorso la risultante delle forze meccaniche ed elettriche che agiscono su di esse; quelle meccaniche dipendono dal sistema di atomizzazione, quelle elettriche sono invece dirette secondo le linee di forza del campo. Le linee di forza partono dall'atomizzatore e si chiudono sull'oggetto da verniciare. L'applicazione di questo principio permette di modificare la traiettoria delle particelle di vernice, richiamando sull'oggetto gran parte di quelle gocce che andrebbero disperse in presenza di sole forze meccaniche. Questa tecnologia come vantaggio, permette una notevole riduzione dello spreco di materiale verniciante tipica delle applicazioni a spruzzo e permette una completa automatizzazione del processo.

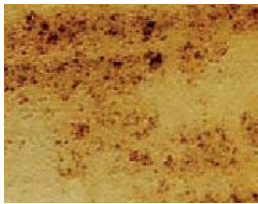
- **Verniciatura per immersione:** tecnologia che prevede l'immersione del componente (sorreggendo quest'ultimo con una catena), in una vasca contenente la pittura, quindi estratto e lasciato a gocciolare. Il sistema presenta il pregio di azzerare gli sprechi, tuttavia non consente l'ottenimento di una elevata qualità superficiale, in quanto non assicura uno spessore costante del film e può generare gocciolature.
- **Verniciatura per elettrodeposizione:** consiste in un'evoluzione della verniciatura per immersione, che sfrutta il principio della corrente elettrica per il trasporto e la deposizione del prodotto verniciante. Il manufatto, immerso in una vasca (cella elettrolitica) che contiene la pittura diluita, è collegato al polo di un generatore di corrente continua, mentre la parete della vasca funge da polo opposto. Si stabilisce una differenza di potenziale variabile da 80-200 V generando inizialmente l'elettrodeposizione su quelle parti del supporto dove il campo elettrico risulta essere maggiormente intenso. Essendo che lo strato di pittura che si deposita ha una conducibilità elettrica molto bassa, la deposizione si sposta progressivamente verso le altre zone del supporto dove l'intensità del campo è minore realizzando alla fine un rivestimento completo.

Una volta completata la deposizione del prodotto verniciante sul manufatto, la maggior parte dei prodotti industriali viene sottoposta a trattamenti termici, al fine di consentire una più rapida evaporazione dei solventi. Questi trattamenti termici vengono effettuati in forni statici o forni a tunnel, a temperature che possono variare dai 40° C ai 180° C. Sebbene queste operazioni post verniciatura consentano una maggiore produttività, è necessario sottolineare che manifestano un'onerosità in termini di consumi energetici e di recupero dei vapori del solvente.

5.4. Difetti di verniciatura

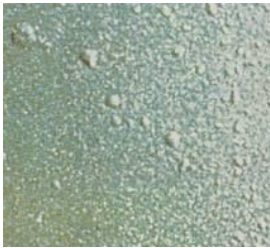
Per difetto di verniciatura, si intende l'ottenimento di un prodotto caratterizzato da un rivestimento superficiale non conforme agli standard qualitativi fissati. In letteratura esistono circa 35 tipologie di non conformità dello strato superficiale verniciato. Non essendo lo scopo del seguente lavoro approfondire le difettosità dei prodotti verniciati, di seguito verranno riportati difetti maggiormente importanti ma soprattutto riscontrati in Pietro Fiorentini S.p.a.

Tipologia del difetto	Bolle
Descrizione del difetto	Presenza di rigonfiamenti irregolari a forma di bolla
Cause del difetto	Da corrosione: danni di tipo meccanico sulla superficie verniciata, insufficiente trattamento preliminare del supporto o incompleto trattamento antiruggine, formazione di ruggine su superfici carteggiate o smontate Da essiccazione: spessori elevati, catalizzatori e diluenti troppo rapidi, tempi di appassimento brevi, temperatura IR troppo alta. Da intrappolamento d'aria: insufficiente applicazione dello stucco o della mano di fondo, presenza nella mano di fondo di sacche di aria dovute a diluente non idoneo. Elevata temperatura di essiccazione.
Immagine del difetto	

Tipologia del difetto	Ruggine
Descrizione del difetto	Presenza di corrosione evidente sulla superficie del film di finitura.
Cause del difetto	Aggressione del supporto metallico dovuta al contatto con agenti atmosferici e chimici in seguito di un danno accidentale; esposizione del supporto metallico in ambienti ad elevata umidità prima dell'applicazione del primer anticorrosivo.
Immagine del difetto	

Tipologia del difetto	Bucciatura
Descrizione del difetto	Presenza di una superficie non uniforme e granulosa del film di vernice simile alla buccia d'arancia.
Cause del difetto	Imperfetta distensione delle particelle di vernice sul supporto dovuta a: tecnica applicativa non corretta, regolazione pistola non corretta, viscosità troppo elevata, utilizzo di diluenti non idonei, appassimento tra una mano e l'altra insufficiente, temperatura della cabina o del supporto troppo elevata, eccessivo od insufficiente spessore del film di vernice.
Immagine del difetto	

Tipologia del difetto	Colature
Descrizione del difetto	Accumuli a goccia di vernice che generalmente si riscontrano su superfici verticali.
Cause del difetto	Uso di catalizzatori/diluenti non idonei, viscosità inadeguata, eccessiva quantità di prodotto, tempi di appassimento fra mano e mano inadeguati, ugello utilizzato non idoneo, ventaglio di spruzzatura non regolato.
Immagine del difetto	

Tipologia del difetto	Blistering
Descrizione del difetto	Rigonfiamenti sulla superficie del film di vernice di varie dimensioni e frequenza
Cause del difetto	Pulizia inadeguata del supporto, dove sono rimaste tracce di umidità o contaminanti come oli, prodotti inquinanti; Materiale incompatibile oppure utilizzo di diluenti non prescritti; Spessore insufficiente del film di vernice con aumento della permeabilità; Penetrazione di acqua nel film di vernice. L'esposizione alla pioggia o ad alti livelli di umidità prima del completo indurimento dello smalto aumenta il rischio di vescicamento dovuto a penetrazione
Immagine del difetto	

Tipologia del difetto	Sfogliatura
Descrizione del difetto	Il film di vernice si solleva dal supporto sottostante sottoforma di piccole scaglie.
Cause del difetto	Contaminazione dello strato sottostante ad opera di cere, grasso, silicone, oli, agenti che impediscono l'adesione; Preparazione inadeguata del supporto; Inadeguata viscosità del prodotto verniciante, utilizzo di diluente di scarsa qualità, pressione di erogazione dell'aria troppo elevata; Mano di vernice di spessore troppo elevato; Sovrapposizione di prodotti non compatibili con differenti tensioni superficiali. Ciclo inadeguato.
Immagine del difetto	

5.5. Controllo della qualità dei trattamenti superficiali

Una volta completata l'esecuzione del trattamento superficiale, al fine di garantire il rispetto degli standard qualitativi prefissati, risulta essere necessaria l'esecuzione di test atti a determinare la conformità o meno del trattamento. La frequenza con cui è necessario eseguire i test, risulta essere fortemente dipendente dalla criticità del processo, dalla variabilità del risultato e dalla presenza o meno di normative tecniche o obblighi cogenti. Esistono moltissime tipologie di test per verificare l'effettiva conformità dei trattamenti superficiali, ma al fine del seguente lavoro, risulta essere importante approfondirne quattro:

- Controllo dei parametri del profilo superficiale a valle della granigliatura
- Controllo dei residui superficiali a valle del processo di granigliatura o a monte del processo di verniciatura.
- Controllo dello spessore del film secco sul manufatto verniciato.
- Controllo dell'adesione del film superficiale secco sul substrato

5.5.1. Controllo dei parametri del profilo superficiale

Il controllo qualità dei parametri del profilo superficiale viene effettuato utilizzando solitamente un rugosimetro portatile, il quale in assenza di alcun supporto viene collocato sulla superficie granigliata ed effettuata la misurazione. In merito al seguente controllo qualitativo, si utilizza solitamente come riferimento la normativa ISO 8501-1-1998. Questa normativa tuttavia non prescrive dei valori accettabili dei parametri del profilo superficiale, ma prevede di identificare la superficie tra quattro diverse classi di sabbiatura/granigliatura, meglio conosciute come gradazione di granigliatura svedese⁵. La determinazione della classe di appartenenza deve essere effettuata sulla base del controllo visivo, in assenza di strumenti che permettano un ingrandimento visivo, quindi ad occhio nudo. Le quattro classi previste dalla normativa sono:

- **SA3:** detta anche sabbiatura a metallo bianco, prevede la completa asportazione di tutti i prodotti della corrosione, di tutte le scaglie di laminazione, di tutte le tracce di vecchie pitture e in generale di tutte le impurità della superficie metallica. La superficie ottenibile dal processo manifesta un color grigio bianco metallico di aspetto uniforme e risulta essere caratterizzata da una rugosità superficiale tale da consentire un perfetto ancoraggio del prodotto verniciante.
- **SA2 ½:** detta anche sabbiatura al metallo quasi bianco, prevede la quasi totale asportazione di tutte le impurità della superficie metallica, ad esclusione di leggerissime ombreggiature, venature molto leggere o leggeri scoloramenti causati da sporadiche macchie di ruggine oppure da leggeri residui aderenti di prodotti vernicianti.

⁵ Gradazioni di granigliatura svedese: sono così conosciute le diverse classi di sabbiatura in quanto la normativa ISO 8501-1-1998 riprende le prescrizioni fatte dalla normativa svedese SIS 055900 – 1967.

- **SA2:** detta anche sabbiatura commerciale, prevede una sabbiatura buona ma non perfetta la quale impone l'asportazione di tutta la ruggine e delle altre materie estranee sulla superficie del metallo. La superficie ottenuta a valle del processo non deve essere necessariamente uniforme sia per quanto concerne il grado di pulizia sia per quanto riguarda l'aspetto. Le superficie comunque presentano una ruvidità molto adatta a conferire una salda adesione durante la successiva applicazione dei prodotti vernicianti.
- **SA1:** detta anche sabbiatura grossolana, prevede una rimozione delle scaglie libere di ruggine, di laminazione e di verniciatura, mentre vengono lasciate sulla superficie quelle ben aderenti e tali che la superficie sabbiata possa offrire una buona aderenza e giunzione durante la successiva applicazione del prodotto verniciante.

SA1	SA2	SA2 ½	SA3
			

Tabella 10: gradi di sabbiatura secondo ISO 8501-1-1998

5.5.2. Controllo dei residui superficiali

Il test utilizzato per il controllo dei residui superficiali, viene effettuato a monte del processo di verniciatura e permette di valutare la quantità e la dimensione dei residui presenti su quest'ultima. La normativa di riferimento in questo caso è la ISO 8502-3-2000, la quale prevede di eseguire il test come segue:

- Posizionamento sulla superficie del componente di una striscia di nastro adesivo trasparente di lunghezza circa pari a 150 mm, avente una larghezza pari a 25mm e una forza adesiva massima pari a 190 N per metro.
- Rimozione del nastro applicato con una velocità costante, in un tempo circa pari a 5/6 secondi.
- Posizionamento del nastro appena rimosso sull'apposita tabella di confronto.
- Stima delle dimensioni e della quantità di residui polverosi sulla superficie mediante l'apposito strumento fornito di lente graduata.
- Identificazione delle classe di appartenenza attraverso la comparazione visiva.

La normativa identifica 5 diverse classi di “polverosità”, riportate nella pagina seguente:

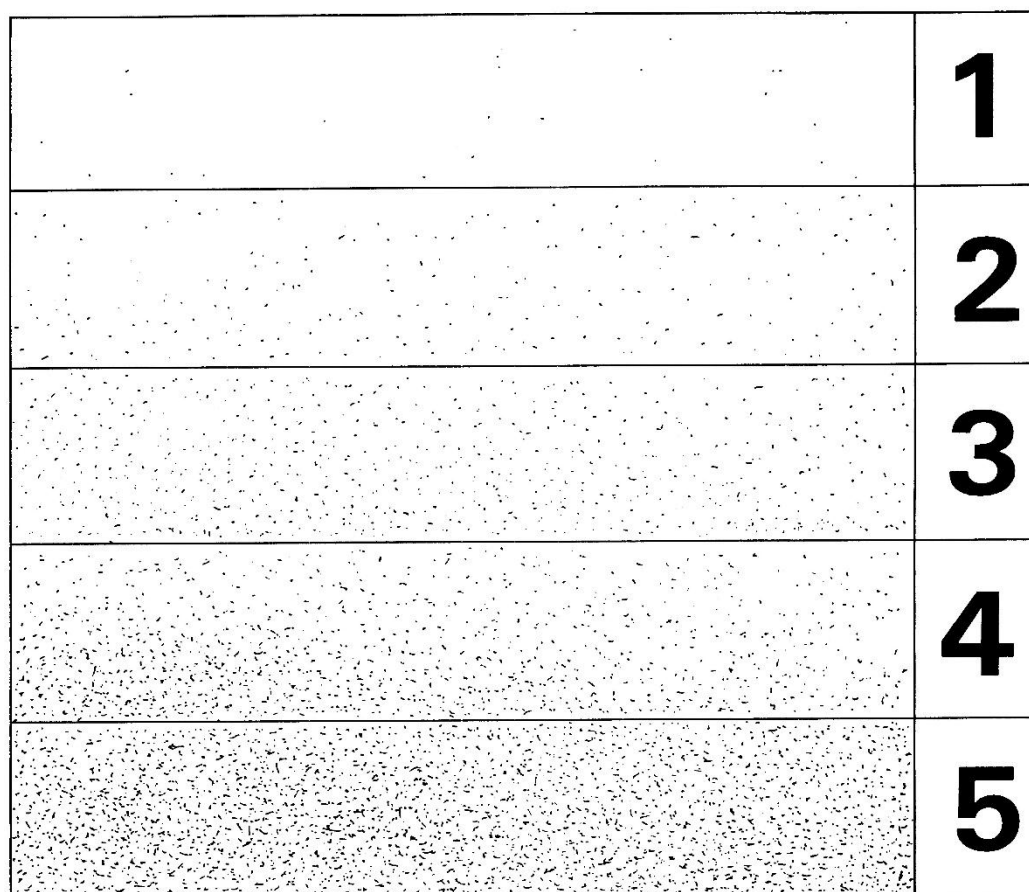


Immagine 42: gradi di polverosità superficiale secondo ISO 8502-3-2000

L'attività di controllo qualità in oggetto, può essere utilizzato come test passa/non passa sulla base delle dimensioni e della numerosità delle particelle di polvere, utilizzando come standard di riferimento le specifiche interne dell'azienda. In alternativa, il test può essere eseguito al fine di monitorare in maniera continua la qualità della pulizia superficiale a monte del processo di verniciatura, in modo tale da identificare al più presto eventuali malfunzionamenti dei processi di preparazione della superficie.

5.5.3. Controllo dello spessore del film secco

Come visto nelle precedenti pagine, una delle cause che concorrono maggiormente alla generazione dei difetti di verniciatura è la non conformità dello spessore dello strato a secco di prodotto verniciante presente sul manufatto. Ogni tipologia di prodotto verniciante, in base alla sua composizione chimica, alla numerosità di strati che ricoprono il substrato e in base alla modalità di verniciatura del componente, presenta range di conformità degli spessori diversi. La determinazione degli spessori del film secco, può avvenire sfruttando principi fisici diversi, a seconda della volontà di effettuare un controllo distruttivo o non e della volontà di implementare un processo di misura caratterizzato da errori sistematici e riproducibilità più o meno alti. La normativa di riferimento, è la ISO 2808-2007 e classifica nel seguente modo:

Principle	Method	Substrate ^a	Field of application ^b			Standard ^c	Accuracy/precision ^d
Mechanical (5.2)	4A Difference in thickness (micrometer/dial gauge) (5.2.4)	X	nd/d ^e	c	l	ASTM D 1005 DIN 50933	Mechanical: lower limit 5 µm Electronic: lower limit 3 µm
	4B Depth gauging (micrometer/dial gauge) (5.2.5)	X	d	c	l		Mechanical: lower limit 3 µm Electronic: lower limit 2 µm
	4C Surface profile scanning (5.2.6)	X	d	nc	l	ISO 4518	Lower limit: 2 µm
Gravimetric (5.3)	5 By difference in mass (5.3.4)	X	d	c	l/p/f		No data available.
Optical (5.4)	6A Cross-sectioning (5.4.4)	X	d	c	l	ISO 1463	Systematic error ± 2 µm Reproducibility ± 5 %
	6B Wedge cut (5.4.5)	X	d	c	l/p/f	DIN 50986	With the upper limit 2 µm Reproducibility ± 10 %
Magnetic (5.5)	7A Magnetic pull-off gauge (5.5.5)	Fe	nd	c	l/p/f	ISO 2178	Systematic error ± 5 µm Reproducibility ± 6 %
	7B Magnetic-flux gauge (5.5.6)	Fe	nd	c	l/p/f		Systematic error ± 3 µm Reproducibility ± 5 %
	7C Magnetic-induction gauge (5.5.7)	Fe	nd	c	l/p/f	ISO 2178	Systematic error ± 2 µm Reproducibility ± 3 %
	7D Eddy-current gauge (5.5.8)	NFe	nd	c	l/p/f	ISO 2360	Systematic error ± 2 µm Reproducibility ± 3 %
Radiological (5.6)	8 Beta backscattering (5.6.4)	X	nd	nc	l/p	ISO 3543	Systematic error ± 2 % or ± 0,5 µm, whichever is higher
Photothermal (5.7)	9 Thermal properties (5.7.4)	X	nd	nc	l/p	EN 15042-2	No data available
Acoustic (5.8)	10 Ultrasonic thickness gauge (5.8.4)	X	nd	c	l/p/f		Systematic error ± 2 µm Reproducibility ± 5 %
^a X/Fe/NFe = any/ferromagnetic metal/non-ferromagnetic metal ^b d = destructive nd = non-destructive c = contact nc = non-contact l/p/f = applicable to laboratory/production/field work ^c Representative (inter)national standards in which the methods are described. ^d Accuracy data for these methods are made available by the instrument manufacturers and can be verified with traceable calibration standards. The figures given are based on empirical values given by the instrument manufacturers and by users. Variations are possible. ^e Depends on the procedure.							

Immagine 43: classificazione degli strumenti secondo ISO 2808-2007

Sebbene siano tutti metodi importanti, il lavoro proseguirà descrivendo esclusivamente il processo di misurazione degli spessori del film mediante il cosiddetto spessimetro a corrente parassita, che rappresenta una degli strumenti maggiormente utilizzati nel mondo industriale.

Lo spessimetro a corrente parassita è uno strumento per la misurazione dello spessore del film secco di vernice funzionante grazie ad un elettromagnete che mediante le correnti parassite genera una variazione del campo magnetico nel substrato.



Dal punto di vista dei parametri che possono deviare la misurazione, la metodologia di misura a correnti parassite presenta un'incertezza che risulta essere influenzata dalla presenza di:

- **Curvatura della superficie:** influenza che varia considerevolmente in base al valore di curvatura e in base alla tipologia di tastatore utilizzato.
- **Rugosità superficiale:** la topografia della superficie influenza notevolmente la misurazione, in quanto la presenza di picchi e valli generano errori sia sistematici che casuali. Al fine di rendere la misurazione quanto più accurata possibile, la calibrazione dello strumento deve essere effettuata su una superficie avente una rugosità simile a quella dei manufatti soggetti alle successive misurazioni.
- **Pressione esercitata sul tastatore:** la pressione esercitata sul tastatore deve essere quanto più possibile costante. Per questo motivo, la misurazione deve essere effettuata dal medesimo operatore che effettuerà la successiva misurazione.
- **Temperatura:** influenza le caratteristiche del tastatore e per questo motivo, la misurazione deve essere effettuata ad una temperatura quanto più possibile simile a quella in cui si è effettuata la calibrazione dello strumento.

Essendo la deposizione del prodotto verniciante una procedura spesso svolta manualmente, ed essendo lo strumento in oggetto particolarmente influenzabile dalla morfologia della superficie e dalle condizioni in cui viene effettuata la misurazione, una singola misurazione puntuale non risulta essere sufficiente a definire la conformità o meno del manufatto. Per questo motivo, la normativa ISO 2360-2003, individua un numero di aree di test da eseguire dipendente dalla dimensione dell'area verniciata e dalla geometria della stessa, ovvero:

- Per le superfici piane, due aree di test per ogni metro quadrato.
- Per le superfici complesse, quattro aree di test per ogni metro quadrato
- Due aree di test o più per ogni metro di lunghezza delle tubazioni.

Per ogni area di test, la normativa prevede che debbano essere indicate la lista di tutti i valori rilevati, la deviazione standard di queste e il valore massimo e minimo delle letture.

5.5.4. Cross cut test

Il cross cut test consiste in una prova distruttiva, che si esegue al fine di determinare l'adesione che il prodotto verniciante asciutto manifesta nei confronti del substrato. La normativa che prescrive le condizioni, le modalità e l'analisi dei risultati del test in oggetto, è la ISO 2409-2013 e prevede l'utilizzo di:

- Strumento a lama singola o in alternativa strumento multi lama, caratterizzata da uno spessore della lama incidente pari a 0.05 mm.
- Nastro adesivo o in alternativa spazzola metallica.
- Lente di ingrandimento

La normativa prevede che il test debba essere eseguito su una superficie piana, sulla quale mediante l'utensile provvisto di una o più lame deve essere eseguita un'incisione. Una volta eseguita l'incisione, la superficie deve essere ripulita dagli eventuali residui di prodotto verniciante rimossi durante l'intaglio, e successivamente ricoperta con una striscia di nastro adesivo. Passati 5 minuti dall'applicazione del nastro adesivo, è possibile rimuovere quest'ultimo, valutando con la lente di ingrandimento (x2 o x3) gli effetti del test sulla superficie in termini di percentuale di film asciutto rimosso a causa dello strappo.

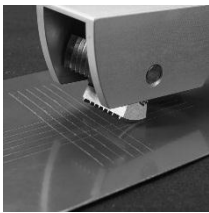
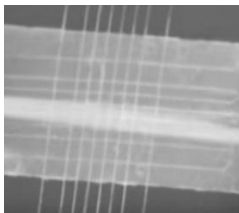
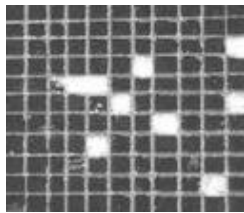
Intaglio della superficie	Applicazione del nastro	Analisi dei risultati
		

Tabella 11: test di quadrettatura

Per quanto riguarda l'analisi dei risultati al termine del test, la normativa identifica 5 diverse classi a seconda della percentuale di materiale rimosso a valle dello strappo:

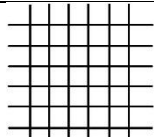
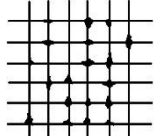
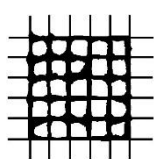
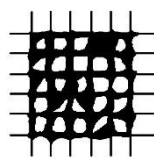
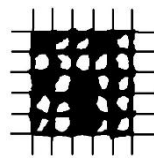
CLASSE	DESCRIZIONE	IMMAGINE
0	Gli spigoli degli intagli sono perfettamente lisci ed integri. Nessuna rimozione di materiale dalla quadrettatura	
1	Contenuta rimozione di scaglie di vernice nei pressi degli spigoli formati dall'intaglio. In percentuale la rimozione di vernice è inferiore al 5%.	
2	Il rivestimento risulta essere sfaldato parzialmente o totalmente lungo i bordi degli intagli e parzialmente o totalmente rimosso su diversi quadrati individuati dagli intagli. La percentuale di rimozione del rivestimento è compresa tra il 5 ed il 15%.	
3	Il rivestimento risulta essere sfaldato totalmente lungo i bordi degli intagli e parzialmente o totalmente rimosso su diversi quadrati individuati dagli intagli. La percentuale di rimozione del rivestimento è compresa tra il 15 ed il 35%.	
4	Il rivestimento risulta essere sfaldato totalmente lungo i bordi degli intagli e parzialmente o totalmente rimosso sulla totalità quadrati individuati dagli intagli. La percentuale di rimozione del rivestimento è compresa tra il 35 ed il 65%.	
5	Sfaldamento del prodotto verniciante in percentuale superiore a quella della classe 4.	-----

Tabella 12: classi di sfaldamento del prodotto verniciante dopo cross cut test secondo ISO 2409-2013

La rimozione del nastro adesivo dalla superficie può essere svolta manualmente da un operatore o in maniera automatizzata. Nel caso in cui quest'ultima attività venga svolta manualmente, la direzione della forza con cui si effettua la rimozione, deve essere angolata di circa 60° rispetto alla superficie. Anche l'operazione di intaglio della superficie, può essere eseguita sia in modo manuale da un operatore oppure avvalendosi di un apparato adatto al test motorizzato. Risulta importante osservare che la distanza tra i successivi intagli non è costante per tutte le tipologie di prodotto verniciante, ma differisce in base agli spessori di quest'ultimo, ovvero:

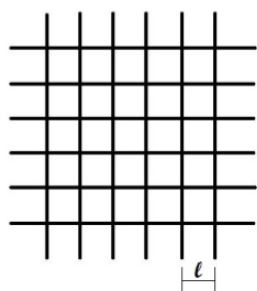
	Spessore film asciutto	ℓ
	< 60 μm	1 mm
	Compreso tra 61 μm e 120 μm	2 mm
	Superiore a 120 μm	3 mm

Immagine 46: distanza tra due intagli successivi al variare dello spessore del film secco secondo ISO 2409-2013

Per quanto riguarda l'esecuzione del test, quest'ultimo deve essere effettuato alla temperatura di $23 \pm 2^\circ \text{C}$, ad una umidità del $50 \pm 5 \%$, e considerando una temperatura iniziale dei provini pari a $23 \pm 2^\circ \text{C}$.

6.EFFETTO DEI PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE SULLE PERFORMANCE DEL RIVESTIMENTO

Il seguente capitolo, funge da introduzione per il capitolo successivo, e permette di comprendere maggiormente quali basi scientifiche hanno ispirato il lavoro svolto in Pietro Fiorentini S.P.A. In particolare, verranno approfonditi due articoli presenti in letteratura, che permettono di comprendere quale relazione sussista tra i parametri del profilo superficiale del manufatto sottoposto al processo di verniciatura e le performance di adesione del prodotto verniciante.

6.1. Tipologie di mancanza di adesione del prodotto verniciante

L'adesione del prodotto verniciante, è una delle caratteristiche basilari che questo deve vantare, in quanto una mancanza di questa genera problematiche non trascurabili. Lo scopo del prodotto verniciante risulta essere quello di restare fermamente ancorato al substrato e proteggere quest'ultimo dalla corrosione. È importante comprendere che il prodotto verniciante non presenta una struttura tale da conferire a quest'ultimo una struttura robusta, ma la resistenza che esso vanta, dipende dalle tre diverse tipologie di adesione: chimica, polare e meccanica. Le prime due tipologie di adesione, dipendono essenzialmente dalle caratteristiche chimiche del prodotto verniciante e dei componenti utilizzati per realizzare quest'ultimo e dalle caratteristiche chimiche del substrato. La resistenza meccanica invece, dipende dalle caratteristiche topografiche superficiali del manufatto sottoposto a verniciatura, in quanto una superficie caratterizzata da un maggiore numero di picchi, permette di aumentare la densità dei punti attivi nel processo di contatto ed aumentare di conseguenza l'adesione del prodotto verniciante.

In prima analisi, le *failure* del processo di verniciatura nelle quali l'adesione del prodotto verniciante risulta essere coinvolta sono quattro:

- Delaminazione rapida, che si verifica in seguito ad un impatto tra la superficie del prodotto verniciato e un corpo estraneo.
- Delaminazione lenta che si verifica in seguito all'abrasione o alla desquamazione del film superficiale. Solitamente è un processo lento e viene determinato da condizioni ambientali gravose.
- Blistering, ovvero formazione di rigonfiamenti sulla superficie del film di vernice di varie dimensioni e frequenza.

- Corrosione: ossidazione che può formarsi sulla superficie verniciata, indebolendo quest'ultima o sul substrato minando l'adesione tra film di vernice e substrato stesso.

In generale, le cause della perdita o della mancata adesione del prodotto verniciante, possono essere riassunte nello schema sottostante, proposto dalla pubblicazione “Non destructive measurement of coating adhesion” [26]:

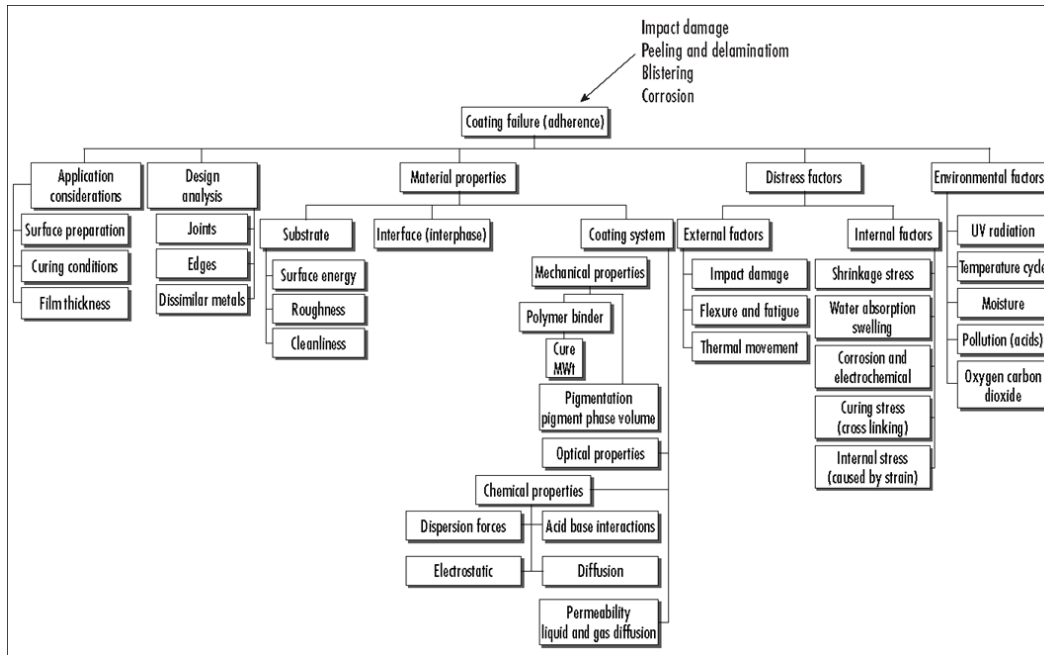


Immagine 47: principali cause della mancanza o della perdita di adesione di un prodotto verniciante

6.2. Parametri del profilo superficiale da considerare

Al fine di caratterizzare correttamente una superficie e quindi poter giudicare la sua preparazione superficiale al successivo processo di verniciatura, soltanto alcuni parametri sono realmente importanti. Risulta essere importante osservare che nella pratica, spesso si ricorre all'errore di utilizzare un solo parametro per la descrizione della superficie, solitamente Ra o Rz. Questa modalità di giudizio della conformità o della non conformità di una superficie, non risulta essere assolutamente idonea ad una caratterizzazione completa del prodotto, e quindi può facilmente generare errori e di conseguenza costi aggiuntivi in maniera variabile dalla tipologia di errori.

I possibili errori che può determinare una non corretta rilevazione o comprensione dei parametri del profilo superficiale sono:

- Nel caso in cui un prodotto sia giudicato non conforme, quando in realtà risulta essere conforme genera costi associati alla necessaria rilavorazione del pezzo.
- Nel caso in cui un prodotto sia giudicato conforme, quando in realtà risulta essere non conforme, genera costi molto più alti rispetto al caso precedente, in quanto la non conformità viene rilevata maggiormente a valle del processo, quando altre attività hanno già operato su questo e quindi ne hanno incrementato il valore aggiunto.
- Il caso più grave si genera nel momento in cui un prodotto viene giudicato conforme

quando in realtà non lo è, ed in aggiunta la sua non conformità non viene rilevata all'interno del processo produttivo, generando quindi l'invio di un prodotto non conforme al cliente. In questo caso, il danno subito dall'azienda produttrice è doppio, in quanto oltre ai costi della non conformità, quest'ultima deve sostenere ulteriori costi legati alla sostituzione del prodotto in campo ed è passibile di una perdita di fiducia da parte del cliente, con una conseguente perdita di immagine.

Risulta quindi essere necessario costruire modelli di controllo che effettivamente permettano di rilevare una non conformità, al fine di non ricadere nei casi precedentemente descritti. A questo scopo, dal punto di vista dei parametri del profilo superficiale di un manufatto a monte del processo di verniciatura, secondo Hugh J. Rooper [27] risulta essere importante considerare:

- R_{max} : valore massimo relativo alla somma delle altezze del picco del profilo Z_p e della valle del profilo Z_v successivi all'interno della lunghezza del tratto di misura
- R_t : somma delle altezze del picco più alto del profilo Z_p e della valle più profonda del profilo Z_v all'interno della lunghezza del tratto di misura.
- P_c : numero dei picchi aventi ampiezza superiore alla media della distanza tra picco e valle, espressi per unità di lunghezza.

6.3. Esposizione ambientale

Al fine di comprendere maggiormente l'influenza dei parametri del profilo superficiale sulle proprietà di adesione della vernice al manufatto, risulta necessario esporre quest'ultimo a diverse condizioni ambientali.

Una prima possibilità di verifica delle prestazioni, può essere effettuata subito a valle del processo di verniciatura, in modo tale da comprendere in assenza di alcuna esposizione, che proprietà di adesione manifesta il film della vernice asciutto

Una seconda possibilità, prevede l'utilizzo della cosiddetta camera a nebbia salina. Questa esposizione prevede l'utilizzo di un apposito macchinario, all'interno del quale devono essere posti i componenti soggetti a test. In letteratura, esistono diverse normative che prescrivono le modalità di esecuzione di questo test, in particolare la ASTM B 117 e la normativa ISO 9227 [28]. Prendendo in considerazione esclusivamente quest'ultima, la prova in oggetto al fine di essere considerata valida, deve manifestare le seguenti caratteristiche:

- La nebbia presente all'interno della camera, deve essere il risultato di una soluzione di cloruro di sodio al 5%.
- La soluzione deve essere ottenuta utilizzando acqua distillata o deionizzata con una conduttività superiore a $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, e la massa di cloruro di sodio deve essere sufficiente a produrre una concentrazione di $50 \pm 5 \text{ g/l}$.
- Il cloruro di sodio utilizzato deve contenere meno dello 0.001% in frazione di massa di rame e/o nichel, e non deve contenere più del 0.1% e/o 0.5% in frazione di massa, rispettivamente di ioduro di sodio e di impurità totali.
- Le condizioni di funzionamento, nel caso di NSS (Nebbia salina neutra), devono essere:

ELEMENTO DEL METODO DI PROVA	
Temperatura	$35 \pm 2^\circ\text{C}$
Velocità media di raccolta per una superficie di raccolta orizzontale di 80 cm^2	$1.5 \pm 0.5 \text{ ml/h}$
Concentrazione di cloruro di sodio	$50 \pm 5 \text{ g/l}$
pH (soluzione raccolta)	Compresa tra 6.5 e 7.2

Tabella 13: valori da normativa per l'esecuzione del test in nebbia salina

- La durata consigliata della prova, in assenza di specifiche, deve essere pari a 2 h, 6 h, 24 h, 48 h, 96 h, 168 h, 240 h, 480h, 720h e 1000h.
- La nebulizzazione non deve essere interrotta per tutta la durata della prova, tuttavia è prevista la possibilità di effettuare brevi aperture della camera per effettuare degli esami visivi dei componenti soggetti a test.
- Al termine della prova, i provino devono essere lasciati ad asciugare per 0.5 h/1 h e successivamente sciacquati con acqua corrente ad una temperatura minore di 40°C . Al termine del risciacquo, effettuare l'asciugatura utilizzando un getto d'aria compressa.

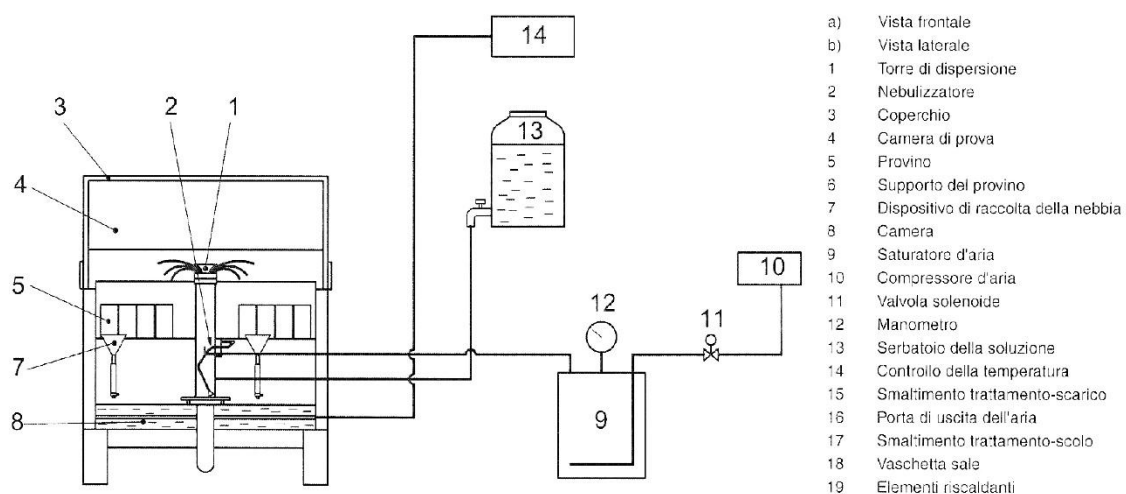


Immagine 48: schema di una camera a nebbia salina

Una terza possibilità di esposizione, permette di ottenere delle condizioni ambientali intermedie tra l'assenza di esposizione e l'esposizione in camera a nebbia salina, e risulta essere effettuabile immergendo i provini o i manufatti in una soluzione di acqua e sale. È importante osservare, che nessun ente presenta normative atte alla descrizione del seguente test, ma nel mondo industriale, soprattutto nelle aziende medio piccole, è una realtà diffusa.

6.4. Test per verificare l'adesione

Al fine di valutare le performance di adesione del film asciutto del prodotto verniciante sul substrato, sono disponibili due diversi test: il *cross cut test* e il *pull-off test*.

Il *cross cut test*, come visto nel capitolo 5, prevede l'incisione sulla superficie verniciata di un insieme di intagli, sui quali verrà applicata una striscia di nastro adesivo ed in seguito allo strappo, verrà rilevata la percentuale di vernice rimossa.

Il *pull-off test* invece, prevede di determinare l'adesione della vernice, mediante l'esecuzione di una prova a trazione. I risultati di quest'ultima quindi, non saranno più espressi in termini percentuali, ma in Mpa. Il *pull-off test*, risulta essere normato dalla ISO 4264-2016 [29], la quale prevede che la prova in oggetto, debba essere svolta misurando lo sforzo tensile minimo richiesto per staccare o rompere il film in direzione perpendicolare al sub-strato. Questo metodo massimizza la sollecitazione tensile, rispetto alla forza di taglio applicata da altri metodi come l'adesione al graffio e i risultati possono non essere confrontabili. Il test viene effettuato assicurando un piccolo piolo (*dolly*) perpendicolarmente alla superficie della vernice con un adesivo. Dopo l'essiccazione dell'adesivo, sul piolo si posiziona un apparecchio che serve per applicare una tensione perpendicolare alla superficie di prova. La forza applicata viene aumentata gradualmente e monitorata fino a quando o si stacca un tassello di vernice o si raggiunge un valore specificato.

6.5. Correlazione tra numero di picchi e performance del prodotto verniciante

I risultati presenti in letteratura, in particolare nell'articolo di Hugh J. Rooper [27] hanno ispirato il lavoro svolto nel periodo trascorso presso Pietro Fiorentini S.P.A. che verrà esplicitato nel successivo capitolo. In particolare, la ricerca condotta da Rooper, ha permesso di identificare una relazione sperimentale tra i parametri del profilo superficiale e l'adesione del prodotto verniciante al substrato.

Il test sperimentale, è stato condotto su un totale di 144 provini rettangolari, aventi tutte dimensioni pari a 10 cm * 15 cm * 0.6 cm, e proveniente dalla medesima colata di acciaio a basso tenore di carbonio. La rimozione degli ossidi dei provini è stata effettuata utilizzando una graniglia avente durezza Rockwell C 50-55, mentre per la granigliatura sono stati adottati 3 diversi tipi di graniglia metallica, al fine di ottenere tre diverse profili superficiali, caratterizzati rispettivamente da un

Basso, un medio ed un alto numero di picchi (Pc).

6.5.1. Tipologie di prodotti vernicianti

Nel lavoro eseguito da Rooper, si sono prese in considerazione 6 diverse tipologie di prodotti vernicianti, prodotte da aziende leader, il cui nome per motivi di privacy non viene riportato. È importante sottolineare che sui diversi provini utilizzati come substrato in analisi per i diversi prodotti vernicianti, non si sono rilevate differenze notevoli in termini di parametri del profilo superficiale. Di seguito una tabella riassuntiva delle tipologie di prodotti vernicianti e degli spessori riportati in specifica da quest'ultimi:

Codice del rivestimento	Descrizione	Colore	Spessore nominale	
			mils	micrometri
A	Poliuretanica ibrida	Grigio	20	500
B	Poliuretanica tipo 1	Nero	20	500
C	Poliuretanica tipo 2	Bianco	20	500
D	Epossidica	Grigio	7	175
E	Fenolica, utilizzando come processo di verniciatura l'immersione ad alta temperatura	Grigio	15	375
F	Fenolica	Crema	13	325

Tabella 14: tipologie di prodotti vernicianti utilizzati

6.5.2. Tipologie di esposizione

La tipologia di esposizione maggiormente utilizzata per i provini è stata la nebbia salina, utilizzata secondo le prescrizioni della normativa ASTM B 117 e variando la lunghezza temporale di esposizione. Una parte dei provini su cui è stato applicato il prodotto verniciante fenolico, è stato esposto in una soluzione aerata di acqua di mare sintetica. Il report riassuntivo sulle diverse tipologie di esposizione dei provini, risulta essere visibile nella tabella sottostante:

Codice del rivestimento	Esposizione	N° prov.	Numero nominale di ore di durata del test					
			Nessuna	1000 [h]	2000 [h]	3000 [h]	4000 [h]	5000 [h]
A	Nebbia salina	18	3	3	3	3	3	3
B	Nebbia salina	18	3	3	3	3	3	3
C	Nebbia salina	18	3	3	3	3	3	3
D	Camera ad umidità controllata	18	3	3	3	3	3	3
E	Nebbia salina	18	3	3	3	3	3	3
	Immersione in acqua salata	18	3	3	3	3	3	3
F	Nebbia salina	18	3	3	3	3	3	3
	Immersione in acqua salata	18	3	3	3	3	3	3

Tabella 15: tipologie di esposizione dei diversi provini

6.5.3. Test ed analisi eseguiti

La rilevazione dei parametri del profilo superficiale dei provini, è stata effettuata utilizzando un rugosimetro portatile Perthometer M4Pi, utilizzando una lunghezza di valutazione del campione pari a 0.8mm e una lunghezza totale di valutazione pari a 5.6 mm. In totale sono quindi state individuati sette segmenti uguali di valutazione, dei quali il primo e l'ultimo sono stati scartati dalla valutazione al fine di minimizzare il disturbo messo in atto dalle vibrazioni iniziali dovute all'accelerazione dello strumento. La punta tastatrice utilizzata è una conisfera avente raggio pari a 5 μm ed è rimasta invariata durante tutte le misurazioni. Al termine della rilevazione dei dati di rugosità, i provini, sulla base dei valori rilevati sono stati suddivisi sulla base del numero di picchi rilevato in tre categorie: high, medium e low.

Il test di adesione si è svolto secondo le prescrizioni fornite dalla normativa ASTM D 4541, utilizzando come strumentazione, un tester di adesione idraulica auto allineante prodotto dalla Elcometer (Elcometer 108). Il piolo, o dolly e la superficie verniciata, dopo essere stati puliti mediante una leggera abrasione, sono stati congiunti gli uni con gli altri utilizzando un collante adesivo non specificato. Per ogni provino, si sono effettuati tre test di adesione successivi.

Il test di adesione e le rilevazioni dei parametri del profilo superficiale, sono stati eseguiti dal medesimo operatore.

6.5.4. Analisi dei risultati

Di seguito si riportano i risultati sperimentali rilevati per i soli provini verniciati utilizzando i prodotti vernicianti A, ovvero utilizzando un prodotto poliuretanico ibrido. Per i valori dei parametri del profilo superficiale, si rimanda alla lettura del testo completo: "The effect of peak count of surface roughness on coating performance" [27]

Per i provini sottoposti a verniciatura con il prodotto verniciante A, ovvero poliuretanico ibrido, si sono osservati i seguenti valori

Panel ID	Peak Count	Exposure Time (h) in Salt Spray					
		@ cure	1000	2000	3000	4000	5000
1-3-A	High	3700	3367	2950	2617	2383	2217
2-3-A	Medium	4500	3766	3333	2383	1983	1883
3-3-A	Low	4067	3300	2700	2333	1917	1550

1000 psi = 6.895 MPa

Immagine 49: valori in psi rilevati dal test di adesione

Panel ID	Peak Count	Exposure Time (h) in Salt Spray					
		@ cure	1000	2000	3000	4000	5000
1-3-A	High	0	0	0	0	0	0
2-3-A	Medium	0	0	0	0	0	0
3-3-A	Low	0	0	0	0-0-10	0-15-20	40-50-60

0 = no substrate failure

Immagine 50: percentuale di failure individuata

In generale quindi, si è osservato che per la tipologia di prodotto verniciante in oggetto, esiste una chiara relazione tra le performance del prodotto verniciante e la topografia del substrato. La relazione in oggetto, risulta essere chiaramente visibile nell'immagine sottostante:

Pull-Off Tests - Coating A

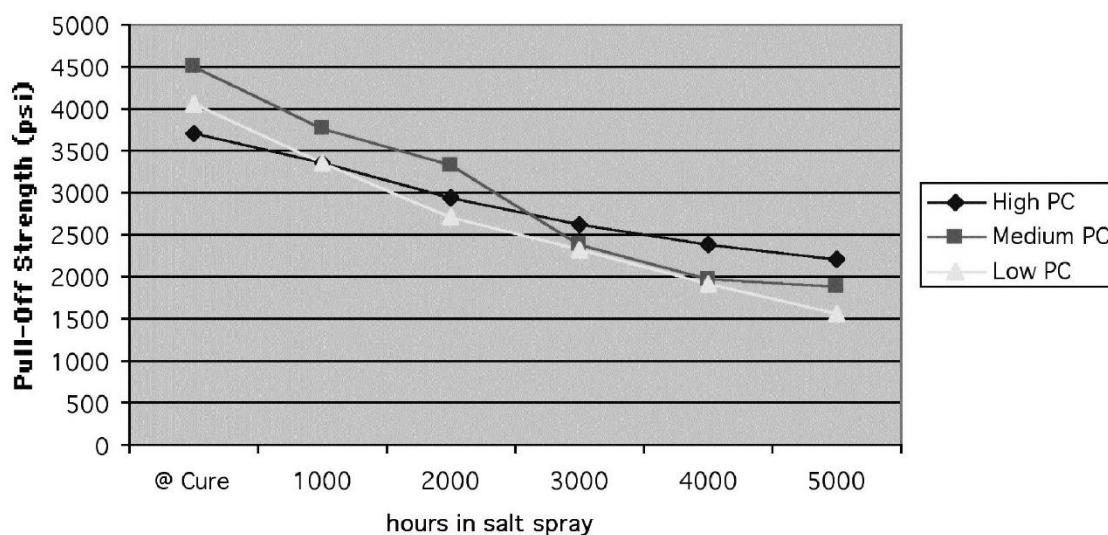


Immagine 51: relazione tra numero dei picchi e adesione del prodotto verniciante

6.6. Correlazione tra R_t e le performance del prodotto verniciante

La correlazione tra i parametri in oggetto del titolo, è stata dimostrata sperimentalmente da Saeed Khorasanizadeh nella sua pubblicazione “The effect of shot and grit blasting process parameters on steel pipe coating adhesion” [30], prendendo in considerazione un totale di 41 provini aventi dimensioni pari a 10 cm * 8 cm * 0.635 cm, la cui analisi chimica viene riportata nella pubblicazione.

6.6.1. Preparazione dei provini

I provini sono stati vernicianti utilizzando una vernice epossidica il cui valore nominale di spessore del film asciutto è pari a $150 \pm 5 \mu\text{m}$. La conformità degli spessori di verniciatura è stata provata utilizzando uno spessimetro Elkto Physic Mini Test 4100, rilevando inoltre le condizioni ambientali del processo di verniciatura.

La preparazione superficiale alla verniciatura, ovvero la granigliatura è stata effettuata utilizzando un mix di graniglia martensitica (S390) e di abrasivo (GL18), rispettivamente al 30% ed al 70%, utilizzando una sabbbiatrice monoturbina caratterizzata da un diametro della turbina pari a 500mm e una potenza di 55 KW. I diversi profili superficiali, sono stati ottenuti variando il tempo di sabbiatura per ogni singolo campione o variando il valore della corrente assorbito dalla turbina.

6.6.2. Test ed analisi eseguiti

La rilevazione dei parametri del profilo superficiale dei provini, è stata effettuata utilizzando un rugosimetro portatile Hommel Tester T1000 E-320, utilizzando una lunghezza di valutazione del campione pari a 2.5 mm e una lunghezza totale di valutazione pari a 15 mm. In totale sono quindi state individuati cinque segmenti uguali di valutazione.

Il test di adesione si è svolto secondo le prescrizioni fornite dalla normativa ISO 4624, utilizzando come strumentazione, un tester di adesione idraulica auto allineante prodotto dalla Elcometer (Elcometer 108). Il piolo, o dolly e la superficie verniciata, dopo essere stati puliti mediante una leggera abrasione, sono stati congiunti gli uni con gli altri utilizzando il nastro biadesivo 3M Scotch-Weld M2000.

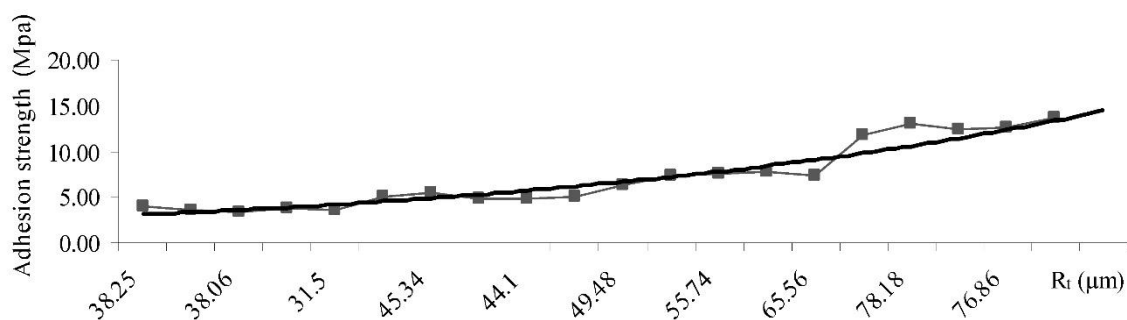
Il test di adesione e le rilevazioni dei parametri del profilo superficiale, sono stati eseguiti dal medesimo operatore.

6.6.3. Analisi dei risultati

I risultati ottenuti dal seguente test sperimentale, permettono nuovamente di osservare come i parametri del profilo superficiale di rugosità influenzino le performance del prodotto verniciante. È possibile osservare quanto appena detto nella tabella sottostante.

Step	Item	Group	Turbine wheel driver motor current (Amp.)	Blast time(S)	Surface temp. (°C)	Average of 5 points surface hardness (kg/mm ²)	Average of 10 points for R _t (μm)	Average R _t (μm) per Group	Average of adhesion strength for 3 points (Mpa)	Average of adhesion strength per group (Mpa)
1	1	1	45	5	-	-	38.25	34.275	4.00	3.66
	2						33.10		3.66	
	3						38.06		3.36	
	4						30.48		3.78	
	5						31.50		3.52	
	6	2	55				45.67	46.582	5.03	5.07
	7						45.34		5.50	
	8						48.36		4.84	
	9						44.10		4.90	
	10						49.44		5.06	
	11	3	65				49.48	59.246	6.27	7.27
	12						59.63		7.46	
	13						55.74		7.56	
	14						65.82		7.80	
	15						65.56		7.27	
	16	4	75				66.13	75.768	11.73	12.70
	17						78.18		13.15	
	18						72.24		12.42	
	19						76.86		12.55	
	20						85.43		13.64	
2	21	5	75	27.50	27.644	3.24	3.09			
	22			28.16		3.11				
	23			32.48		3.19				
	24			29.78		3.05				
	25			20.30		2.84				
	26	6	75	41.87	47.756	5.22	5.46			
	27			43.50		5.43				
	28			55.70		5.80				
	29			48.06		5.18				
	30			49.65		5.68				
3	31	7	75	0	18	169.2	-	-	-	-
	32			3	18	170	46.475		-	
	33			5	20	177.66	65.892		12.42	
	34			10	21.8	189.83	61.154		-	
	35			15	23.5	195.78	67.360		-	
	36			20	25.9	206	59.670		-	
	37			25	28.1	214	53.010		6.93	
	38			30	31.3	222.7	53.018		-	
	39			35	34.7	233	53.010		-	
	40			40	37	240.5	53.011		-	
	41			45	38.1	244.1	53.011		-	

Tabella 16: caratteristiche dei provini e risultati dei test

Immagine 52: correlazione tra R_t e resistenza al test di adesione nei provini del primo step

7. CASO STUDIO PIETRO FIORENTINI

Lo studio riportato nel seguente capitolo, risulta essere il risultato del lavoro svolto durante il tirocinio formativo presso Pietro Fiorentini S.p.a. nel periodo compreso tra ottobre 2016 e febbraio 2017.

7.1. Azienda

Pietro Fiorentini S.p.a. nasce nel 1940 a Bologna intuendo le grandi potenzialità del gas naturale e con l'obiettivo di rifornire l'industria del gas di una serie di prodotti, sistemi e servizi di alto livello. Attualmente l'organizzazione ha il suo head quarter nel città di Arcugnano ed è un gruppo di 9 stabilimenti produttivi e molti altri uffici commerciali sparsi nel mondo.

L'azienda, oltre che per i propri prodotti, risulta essere particolarmente ammirata in ambito nazionale ed internazionale in quanto risulta essere stata una delle primissime realtà italiane a credere nei principi della produzione snella. La trasformazione da azienda tradizionale ad azienda lean, ha avuto inizio nel 2000, al fine di fronteggiare un periodo di crisi che preoccupava gli azionisti. Come per le azioni di qualità, se realizzate "a spot" e quindi senza costanza e fiducia nel beneficio dell'intervento, anche la lean production non permette l'ottenimento di benefici duraturi, tuttavia non è questo il caso, in quanto fino al momento della stesura di questo lavoro, l'azienda ha organizzato 202 kaizen week, ovvero settimane in cui le risorse umane con i compiti più differenziati si riuniscono e risolvono le problematiche individuate in ottica di un continuo miglioramento dei processi e dei prodotti. La premessa appena fatta, risulta essere essenziale al fine di comprendere la mission aziendale, la quale recita: "Siamo per un'evoluzione costante in linea con le più elevate aspettative dei nostri clienti in termini di qualità e competitività".

7.2. Analisi del problema

Lo studio realizzato nel periodo indicato precedentemente, risulta essere stato condotto al fine di risolvere alcune problematiche del processo di verniciatura, sorte in seguito alla modifica del prodotto verniciante utilizzato, le quali minacciavano di intaccare la reputazione qualitativa dell'azienda.

L'individuazione della problematica di verniciatura risale a luglio 2016, in seguito alla segnalazione di una non conformità dal campo (in seguito abbreviata come NCC) derivante da una esfoliazione del prodotto verniciante su un prodotto installato da pochi mesi. Al rientro il prodotto verniciante risultava essere soggetto ad un pesante difetto di sfogliatura, tale da esporre il substrato ferroso all'ambiente circostante, determinandone una repentina ossidazione.

Sebbene si trattasse di una singola difettosità, in piena cultura Pietro Fiorentini, si è subito cercato di individuare la radice della problematica, al fine di risolverla e continuare ad assicurare un elevato standard qualitativo.

Inizialmente, in assenza di un'adeguata analisi causa – effetto fu individuata come radice del problema il mancato rispetto delle condizioni ambientali del processo di verniciatura. Al fine risolvere la problematica in oggetto si decise di bloccare il processo di verniciatura nel caso in cui le condizioni climatiche in termini di temperatura e umidità non fossero conformi. Sebbene questa prima azione correttiva rappresentò il primo passo verso il raggiungimento di una qualità standard del processo di verniciatura, da sola non fu in grado di risolvere il problema.

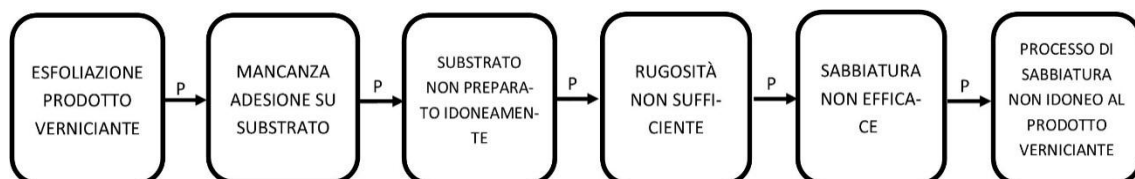
In attesa di individuare la causa radice del problema, si decise di istituire un controllo qualità al 100% a valle del processo di assemblaggio, in modo tale da intercettare i componenti che presentavano micro difettosità tali da pregiudicarne il mantenimento nel tempo.

I risultati in termini di non conformità furono impressionanti, in quanto quasi il 70% dei componenti presentava in maniera variabile, difettosità del film secco in termini di rimozione superficiale, bolle, colature...



Immagine 53: difettosità rilevate

Andando sempre a ritroso nel processo, alla ricerca della causa radice delle non conformità, supportati dalla metodologia dei 5 perché si individuò come causa principale una topografia superficiale al termine del processo non sufficiente a fornire l'adesione necessaria al prodotto verniciante



A partire da questa analisi, si è quindi compreso che evidentemente il grado di sabbiatura finora operato sui componenti, non era sufficiente a garantire l'adesione necessaria al prodotto verniciante.

Identificata la causa del problema, rimaneva da comprendere che azioni correttive implementare al fine di risolverlo. La risposta maggiormente scontata a questa domanda è stata quella di modificare il processo di sabbiatura, in modo tale da permettere un aumento del livello di rugosità superficiale in termini di distanza picco valle. Sebbene la strada fosse quella giusta, al fine di garantire un livello qualitativo adeguato, era necessario quantificare questo incremento di rugosità superficiale, ed a questo proposito è stato sviluppato il seguente studio.

7.3. Analisi tecnica

Lo studio condotto presso Pietro Fiorentini risulta essere focalizzato sull'individuazione quantitativa di un grado di rugosità, in termini di distanza picco valle tale da preparare in maniera idonea il substrato al processo di verniciatura.

A questo scopo, si è preso in considerazione il medesimo prodotto coinvolto nella prima NCC rilevata a luglio 2016, ovvero il regolatore di pressione APERVAL/G DN 50 PN16, in particolare la zona le flange del corpo.

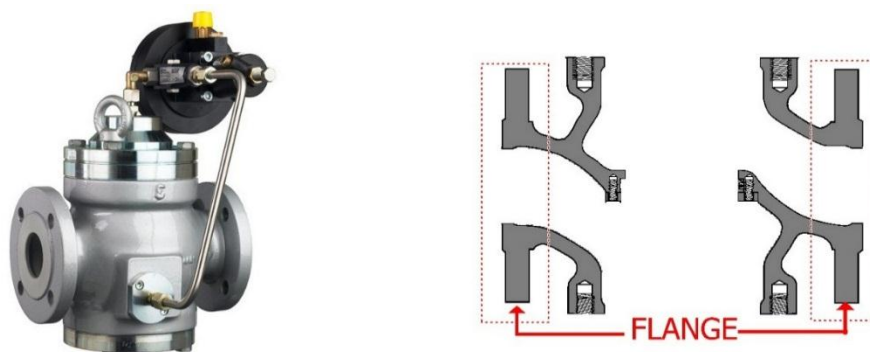


Immagine 54: APERVAL/G DN50 PN16 e relativa sezione

Dal punto di vista produttivo, il corpo del prodotto in oggetto dello studio, subisce le seguenti lavorazioni prima di essere pronto per essere assemblato:

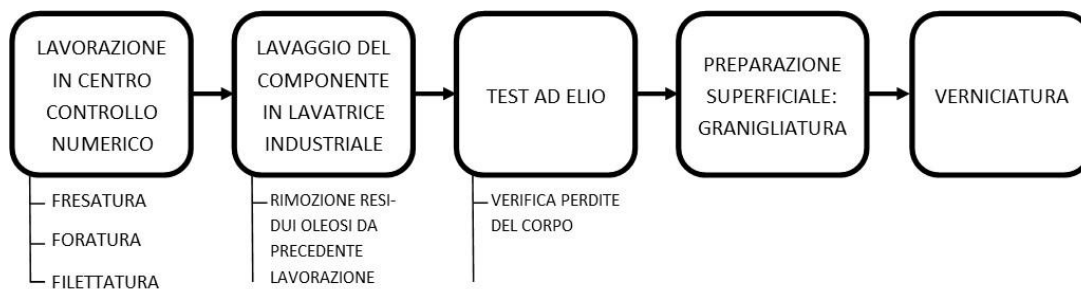


Immagine 55: processo produttivo corpi regolatori di pressione

7.3.1. Morfologia e realizzazione dei provini

Al fine di ottenere un'analisi quanto più possibile realistica e minimizzando i costi da sostenere per l'azienda nell'effettuare il seguente studio, i provini sono stati autoprodotti a partire da dei corpi utilizzati nella per la realizzazione del prodotto precedentemente descritto.

I corpi in oggetto sono stati sottoposti tutti alle medesime lavorazioni di fresatura e foratura, mediante un centro a controllo numerico.

A partire da sei diversi corpi, aventi tutti lo stesso materiale e le stesse caratteristiche di materiale, sono stati ricavati dodici provini, operando mediante un sega a nastro apposita, il taglio delle flange dal corpo.

Al fine di facilitare il successivo riconoscimento, ogni provino è stato punzonato con una lettera diversa, partendo dalla A ed arrivando fino alla L.

7.3.2. Materiale dei provini

Come già riportato in precedenza, tutti e dodici i provini risultano essere caratterizzati dal medesimo materiale, ovvero ghisa e risultano essere provenienti dalla medesima colata, realizzata in materiale GS40-18 definito dalla normativa UNI ISO 1083/ EN-GJS 400-18, avente la seguente composizione chimica:

Item	C	Si	Mn	P	S	Re	Mg	Cu
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.59	2.89	0.30	0.031	0.017	0.016	0.065	
2	3.63	2.65	0.25	0.032	0.020	0.020	0.056	

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, il materiale risulta avere le seguenti caratteristiche:

Item	Tensile strenght Rm	Apparent limit of elasticity Rp 0.2 %	Elongation	Hardness
	N/mm ²	N/mm ²	%	HB
1	165	315	19.50	150
2	507.7	369.5	18.80	172

7.3.3. Preparazione superficiale

Al fine di comprendere l'influenza della topografia superficiale sulle performance di adesione del prodotto verniciante, i dodici provini sono stati suddivisi in 4 gruppi e per ognuno di questi è stato

operato un trattamento superficiale atto ad ottenere profili superficiali diversi. Si è operata la seguente suddivisione:

PREPARAZIONE SUPERFICIALE TIPO 1			
PROVINI	D	E	F
Descrizione	Nessuna preparazione superficiale operata. Ovvero, i provini sono stati inviati al processo di verniciatura senza operare su di questi nessun processo di granigliatura.		

PREPARAZIONE SUPERFICIALE TIPO 2			
PROVINI	B	C	G
Descrizione	Tipologia granigliatrice	A tappeto in gomma, monoturbina.	
	Durata del trattamento	3 minuti	

PREPARAZIONE SUPERFICIALE TIPO 3			
PROVINI	I	H	L
Descrizione	Tipologia granigliatrice	Costruita su commessa, funzionante ad aria compressa	
	Durata del trattamento	15 minuti per lato del provino. (Totale 30 minuti)	

PREPARAZIONE SUPERFICIALE TIPO 4			
PROVINI	A	J	K
Descrizione	Tipologia granigliatrice	Gancio-paranco, con doppia turbina	
	Durata del trattamento	3 minuti	

7.3.4. Processo di verniciatura

Una volta preparati superficialmente, tutti e dodici provini sono stati sottoposti al processo di verniciatura. Tra la preparazione superficiale operata mediante granigliatura e la verniciatura, non è stata operata nessuna operazione di depolveramento del componente, al fine di riportare quanto più fedelmente possibile le condizioni operative dell'azienda. La verniciatura è stata eseguita su

tutti e dodici i provini dal medesimo operatore, caratterizzato da un'esperienza ventennale nel campo della verniciatura.

Per quanto riguarda il prodotto verniciante, si è scelto di considerare il prodotto verniciante maggiormente utilizzato, il cui marchio non viene riportato per motivi di segretezza, tuttavia le caratteristiche principali vengono di seguito riportate:

FINITURA POLIURETANICA ACRILICA AD ALTO SOLIDO	
CARATTERISTICHE PRODOTTO	
ASPETTO	Satinato, 30-40 gloss (secondo ISO 2813)
COLORE	RAL 9006
PESO SPECIFICO	$1.44 \pm 0.05 \text{ Kg/dm}^3$ (a 23° C)
CONTENUTO IN SOLIDI	IN PESO: $81 \pm 3 \%$
	IN VOLUME: $68 \pm 3 \%$
MISCELAZIONE E DILUIZIONE	
RAPPORTO DI CATALISI	IN PESO: 100 :12
	IN VOLUME: 6:1
DILUIZIONE	0 – 5 % a seconda delle condizioni ambientali
ISTRUZIONI APPLICATIVE	
APPLICAZIONE	Spruzzo airless o airmix
RAPPORTO DI COMPRESSIONE	45:1
UGELLO	015'' – 017''
PRESSIONE DI USCITA	140 – 180 atm
SPESSORE E RESA	
SPESSORE FILM SECCO	$80 \mu\text{m} - 120 \mu\text{m}$
CONSUMO TEORICO (riferito a spessore film secco)	$180 - 270 \text{ g/m}^2$
NUMERO STRATI DA APPLICARE	1

7.3.5. Test non distruttivi eseguiti

Per quanto riguarda il processo produttivo, durante la realizzazione dei provini sono stati effettuati tre diversi test, due di questi atti a verificare l'effettiva conformità alle specifiche dell'azienda, ovvero il test di polverosità e la rilevazione degli spessori mentre l'ultimo test riguarda la rilevazione dei parametri del profilo superficiale di rugosità.

Il test di polverosità è stato eseguito seguendo la normativa ISO 8502-3-2000, utilizzando la strumentazione presente in azienda, ovvero la Elcometer 142, comprensiva di una lente di ingrandimento 10x e un nastro adesivo graduato conforme alla normativa.

La rilevazione degli spessori è stata effettuata seguendo la normativa ISO 2360-2003 ed utilizzando uno spessimetro a correnti parassite Defelsko Positector 6000 il quale assicura un MPE pari a:

- $\pm (1 \mu\text{m} + 1\%)$ nel caso di spessori inferiori ai 50 μm
- $\pm (2 \mu\text{m} + 1\%)$ nel caso di spessori superiori ai 50 μm

A monte della misurazione di ogni provino, lo strumento è stato calibrato in modalità due punti, ovvero utilizzando due diversi campioni tarati forniti dal costruttore, aventi spessore noto, i quali sono stati posizionati per la misurazione su una superficie metallica lucidata. Dato che il processo di verniciatura risulta essere eseguito manualmente da un operatore, al fine di verificare il rispetto degli spessori di specifica del prodotto verniciante, sono state eseguite 30 diverse misurazioni per ogni provino. Un numero così alto di misurazioni, oltre a garantire un'elevata affidabilità nel giudizio della conformità o meno, permettono di rendere valido il teorema del limite centrale e quindi rendere possibile un calcolo di una media aritmetica caratterizzata da una maggiore affidabilità.

La rilevazione dei parametri del profilo superficiale di rugosità è stata effettuata utilizzando un rugosimetro portatile Mitutoyo Surftest SJ-210 nelle seguenti condizioni:

Punta del tastatore	Conisfera, avente raggio pari a 2 μm	
Velocità drive unit	0.5 m/s	
Lunghezza di campionamento	$\lambda_c = 0.8$	0.8 mm
	$\lambda_c = 2.5$	2.5 mm
Numero campioni di lunghezza	7	
Parametri rilevati	Ra; Rq; Rz; Rp; Rv; Rsk; Rku; Rc; RSm; RDq; Rmr; Rmr(c)10%; Rdc; Rt; Rz1max; Rk; Rpk; Rvk; Mr1; Mr2; A1; A2	

Il rugosimetro è stato settato in modo tale da eliminare le rilevazioni effettuate nel primo e nell'ultimo campione di rilevamento, al fine di minimizzare l'influenza delle vibrazioni nella lettura. Il numero di campioni di rilevamento tenuti effettivamente in considerazione risulta essere pari a 5. Per quanto riguarda le caratteristiche dello strumento in termini di risoluzione, questo offre una risoluzione pari a 0.006 μm , permettendo un range di misura pari a 100 μm . A monte della misurazione di ogni provino, è stata effettuata la calibrazione dello strumento, utilizzando un campione di rugosità tarato fornito da Mitutoyo, settando lo strumento con un filtro di cut-off λ_c pari a 0.25.



Immagine 56: da sinistra verso destra: Elcometer 142, Defelsko Positector 6000 e Mitutoyo SurfTest SJ 210

7.3.6. Test distruttivi eseguiti

L'unico test distruttivo eseguito, è il cross cut test, il quale è stato eseguito utilizzando l'attrezzatura presente in azienda, ovvero il Phynix Cross Cut Tester. Essendo lo spessore del film secco compreso tra 60 e 120 μm , la distanza tra i taglianti è pari a 2 mm.



Immagine 57: Cross cut tester Phynix

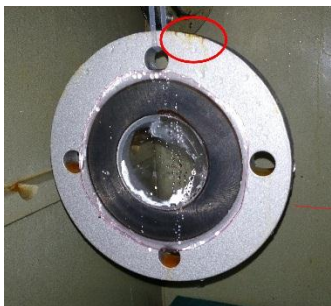
Su ogni singolo provino, sono state eseguite 8 diverse incisioni, utilizzando lo strumento appena descritto. Lo scopo di un così alto numero di rilevazioni su un singolo provino, è quello di minimizzare l'influenza della possibile non uniformità del profilo superficiale, o della non uniformità dello spessore del film asciutto relativo al prodotto verniciante.

7.3.7. Esposizione dei provini

Al fine di valutare al meglio quale fosse l'influenza dei parametri superficiale di rugosità per quanto riguarda le performance di adesione del prodotto verniciante, si è pensato di sottoporre i provini a diverse tipologie di esposizione, più o meno aggressive. I dodici provini, sono quindi stati divisi in tre gruppi, e sottoposti alle seguenti tipologie di esposizione:

NESSUNA ESPOSIZIONE				
PROVINI	F	G	H	J
DESCRIZIONE	Al termine della verniciatura e del relativo tempo di attesa necessario ad asciugare il prodotto verniciante, i provini sono stati sottoposti a cross cut test, come esposto nel precedente paragrafo. La temperatura a cui i provini sono stati esposti nel periodo tra il termine del processo di verniciatura e quello di test, è stata mantenuta costante a 20° C.			

ESPOSIZIONE AMBIENTALE ESTERNA				
PROVINI	E	B	L	A
DESCRIZIONE	Al termine della verniciatura e del relativo tempo di attesa necessario ad asciugare il prodotto verniciante, la superficie dei provini è stata ricoperta con una miscela di acqua, e sale e successivamente posta all'esterno dell'azienda. La seguente operazione di deposizione della miscela di acqua e sale, è stata ripetuta altre 6 volte durante il periodo di test. L'esposizione totale in termini di tempo dei provini alle condizioni esterne è stata pari a 1000 h. La seguente modalità di esposizione non risulta essere normata da nessun ente nazionale o internazionale, tuttavia è stata presa in considerazione in quanto attualmente utilizzata dall'azienda al fine di condurre test interni. Durante il periodo di esposizione, giornalmente sono stati rilevati i dati relativi alla temperatura esterna, la quale mediamente è stata pari a 2,7 °C, e caratterizzata da una temperatura minima pari a -2° C e massima pari a 7° C. Al termine del periodo sopraindicato, i provini sono stati sottoposti ad un ciclo di lavaggio con acqua fredda e successivamente sottoposti a cross cut test.			

ESPOSIZIONE IN CAMERA A NEBBIA SALINA				
PROVINI	C	I	K	D
DESCRIZIONE	Al termine della verniciatura e del relativo tempo di attesa necessario ad asciugare il prodotto verniciante, i provini sono stati trasportati presso una seconda sede dell'azienda, sita a Desenzano Sul Garda (BS) dove sono stati immessi nella camera a nebbia salina. La soluzione utilizzata al fine di condurre il test, ed i parametri relativi alla camera, sono stati impostati secondo quanto prescritto dalla normativa ISO 9227, e consultabili nel capitolo 6.3. Il tempo di esposizione totale in camera a nebbia salina è stato di 480 h, tuttavia il processo ha subito tre brevissime pause dopo 48 h, 168 h e 384 h, al fine di valutare l'andamento della prova.			
VALUTAZIONI INTERMEDIE				
48 h	Dopo 48 h, nessuno dei 4 provini presenta notevoli indebolimenti del film di vernice. Si osserva che in corrispondenza dello spigolo della circonferenza la corrosione inizia a manifestarsi. Nella zona interna dei fori della flangia, risultano essere presenti dei residui di percolamento.			
168 h	Dopo 168 h, non si presenta alcun particolare indebolimento del film di prodotto verniciate. I fenomeni di corrosione nelle zona relativa allo spigolo della circonferenza risultano essere maggiormente marcati, e quest'ultima ha iniziato a manifestarsi anche in corrispondenza dei fori presenti sulla flangia. Non si osserva nessun fenomeno di blistering, bolle o sfogliamento.			
384 h	Dopo 384 h, la situazione risulta essere completamente cambiata. Oltre all'estendersi dei fenomeni di corrosione precedentemente citati, sulle zone di discontinuità appare un'evidente formazione del fenomeno del blistering. Al termine della visita si reputa necessario continuare con l'esposizione fino alle 480 h definite dalla normativa.			

7.3.8. Analisi della superficie

Al termine del test di cross cut, ogni rilevazione su ogni singolo provino è stata sottoposta ad analisi mediante macchina ottica. Per questa operazione, si è considerata la macchina ottica



Mitutoyo QS-L 2010 Zoom AF, utilizzando una ingrandimento del sistema ottico pari a $\times 0.85$. Utilizzando la strumentazione in oggetto, per ogni singola area caratterizzata dall'incisione superficiale, si è acquisita un'immagine.

Le immagini acquisite, a valle di un'elaborazione manuale al fine di eliminare il disturbo provocato dalla riflessione superficiale sono state elaborate con ImageJ, ovvero un software opensource per l'elaborazione di immagini al microscopio. Il software in oggetto, a valle della conversione in 8bit dell'immagine, mediante la regolazione del Threshold al fine di correggere i valori di soglia dello spettro dell'immagine, ha permesso di calcolare per ogni singola immagine l'area percentuale in cui il prodotto verniciante risultava essersi rimosso.

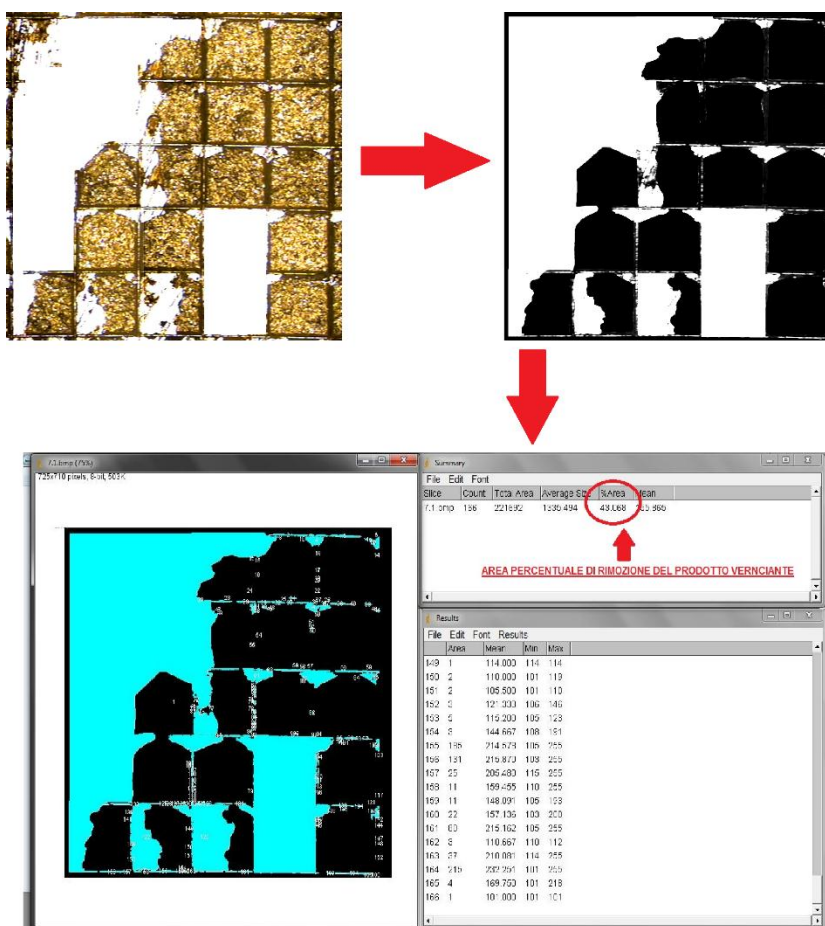
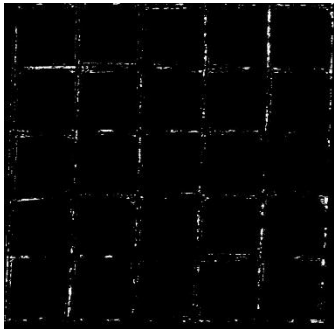
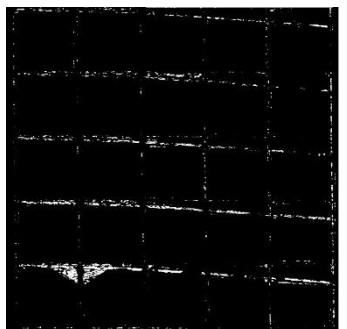


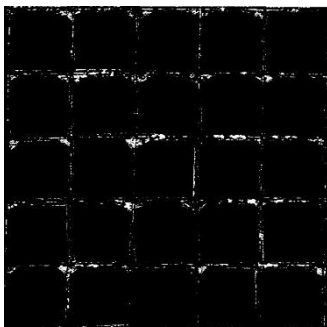
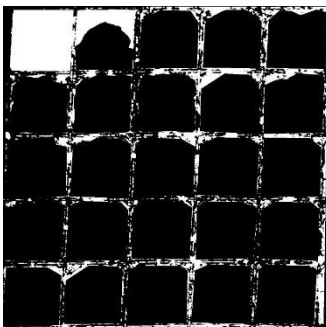
Immagine 58: procedura di acquisizione ed elaborazione immagini

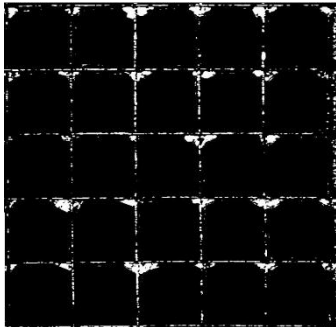
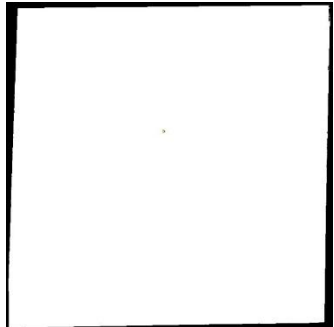
7.3.9. Report dei provini

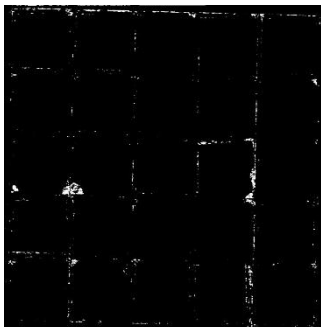
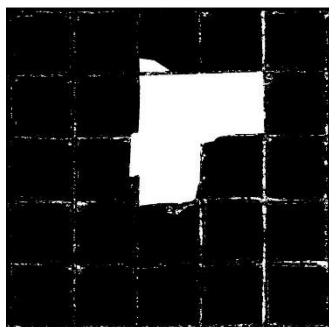
Di seguito vengono riportati i report relativi alle rilevazioni sui 12 provini:

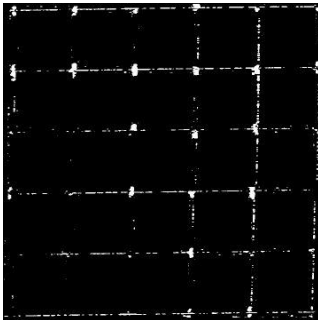
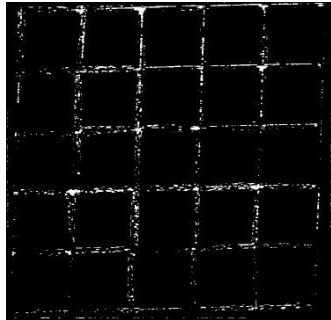
PROVINO				A	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				4	
ESPOSIZIONE				ESTERNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	6.954	[μm]	Rmr	0.800	%
Rq	8.631	[μm]	Rdc	5.644	[μm]
Rz	41.738	[μm]	Rt	54.433	[μm]
Rp	22.517	[μm]	Rz1max	51.582	[μm]
Rv	19.221	[μm]	Rk	22.377	[μm]
Rsk	0.102		Rpk	8.921	[μm]
Rku	2.854		Rvk	8.387	[μm]
Rc	26.827	[μm]	Mr1	10.060	%
RSm	490.547	[μm]	Mr2	90.329	%
RDq	0.267		A1	45.612	
Rmr	0.036		A2	42.322	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				95	
TEST DI POLVEROSITÀ					
CLASSE				5	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	1.179 %		5	0.070 %	
2	0.689 %		6	0.282 %	
3	0.186 %		7	0.049 %	
4	0.967 %		8	0.112 %	
VALORE MEDIO			0.442 %		
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	7	0.049 %	NUMERO RILEVAZIONE	1	1.179 %
					

PROVINO				B	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				2	
ESPOSIZIONE				ESTERNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	3.117	[μm]	Rmr	1.540	%
Rq	3.874	[μm]	Rdc	1.858	[μm]
Rz	19.503	[μm]	Rt	23.478	[μm]
Rp	8.290	[μm]	Rz1max	22.730	[μm]
Rv	11.213	[μm]	Rk	9.739	[μm]
Rsk	-0.459		Rpk	2.592	[μm]
Rku	2.968		Rvk	5.266	[μm]
Rc	11.763	[μm]	Mr1	6.414	%
RSm	343.533	[μm]	Mr2	86.264	%
RDq	0.197		A1	8.418	
Rmr	0.044		A2	36.022	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				79	
TEST DI POLVEROSITÀ					
CLASSE				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	1.968 %		5	1.371 %	
2	0.740 %		6	1.250 %	
3	1.256 %		7	0.825 %	
4	0.510 %		8	0.909 %	
VALORE MEDIO			1.104 %		
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	4	0.510 %	NUMERO RILEVAZIONE	1	1.968 %
					

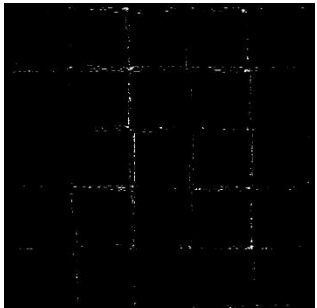
PROVINO				C	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				2	
ESPOSIZIONE				NEBBIA SALINA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	3.108	[μm]	Rmr	1.321	%
Rq	3.861	[μm]	Rdc	1.765	[μm]
Rz	19.573	[μm]	Rt	24.015	[μm]
Rp	8.387	[μm]	Rz1max	23.031	[μm]
Rv	11.187	[μm]	Rk	9.800	[μm]
Rsk	-0.479		Rpk	2.557	[μm]
Rku	3.081		Rvk	5.167	[μm]
Rc	11.563	[μm]	Mr1	5.962	%
RSm	331.393	[μm]	Mr2	86.504	%
RDq	0.196		A1	7.765	
Rmr	0.038		A2	35.389	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				95	
TEST DI POLVEROSITÀ					
CLASSE				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	1.837 %		5	5.726 %	
2	5.579 %		6	13.175 %	
3	8.070 %		7	12.378 %	
4	4.530 %		8	8.023 %	
VALORE MEDIO			7.415 %		
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	1	1.837 %	NUMERO RILEVAZIONE	6	13.175 %
					

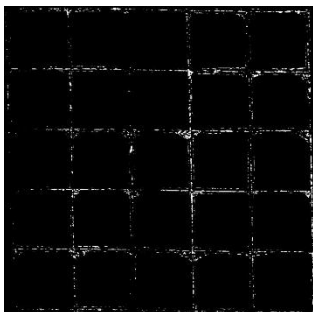
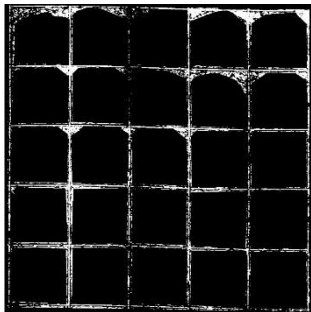
PROVINO				D	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				1	
ESPOSIZIONE				NEBBIA SALINA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	0.849	[μm]	Rmr	1.625	%
Rq	1.118	[μm]	Rdc	0.516	[μm]
Rz	5.670	[μm]	Rt	9.117	[μm]
Rp	2.383	[μm]	Rz1max	8.618	[μm]
Rv	3.287	[μm]	Rk	2.112	[μm]
Rsk	-0.572		Rpk	1.595	[μm]
Rku	5.111		Rvk	1.810	[μm]
Rc	3.320	[μm]	Mr1	8.904	%
RSm	175.290	[μm]	Mr2	83.062	%
RDq	0.116		A1	7.724	
Rmr	0.215		A2	16.666	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				167	
TEST DI POLVEROSITÀ					
CLASSE				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	6.258 %		5	97.370 %	
2	62.530 %		6	100 %	
3	95.563 %		7	43.068 %	
4	16.228 %		8	--	
VALORE MEDIO			60.145 %		
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	1	6.258 %	NUMERO RILEVAZIONE	6	100 %
					

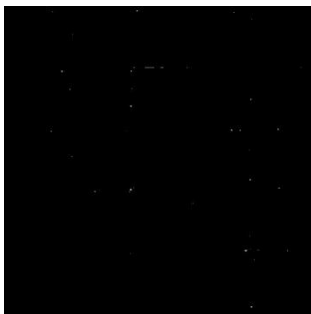
PROVINO				E	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				1	
ESPOSIZIONE				ESTERNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	0.765	[μm]	Rmr	3.515	%
Rq	1.054	[μm]	Rdc	0.605	[μm]
Rz	5.561	[μm]	Rt	8.435	[μm]
Rp	1.896	[μm]	Rz1max	7.971	[μm]
Rv	3.665	[μm]	Rk	1.794	[μm]
Rsk	-0.824		Rpk	1.104	[μm]
Rku	5.527		Rvk	2.481	[μm]
Rc	2.707	[μm]	Mr1	13.354	%
RSm	205.063	[μm]	Mr2	86.604	%
RDq	0.102		A1	7.982	
Rmr	0.239		A2	17.820	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				86	
TEST DI POLVEROSITÀ					
CLASSE				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	5.897 %		5	13.413 %	
2	7.707 %		6	1.481 %	
3	1.566 %		7	0.906 %	
4	5.161 %		8	8.549 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	7	0.906 %	NUMERO RILEVAZIONE	5	13.413 %
					

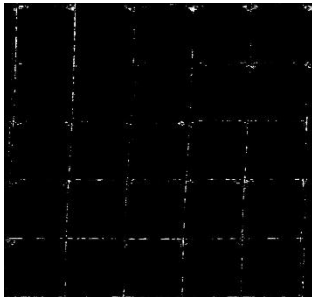
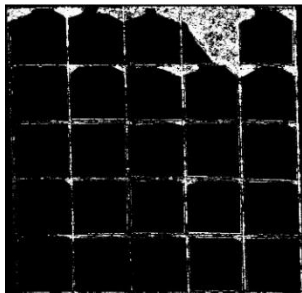
PROVINO				F	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				1	
ESPOSIZIONE				NESSUNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	0.801	[μm]	Rmr(c)	4.522	%
Rq	1.064	[μm]	Rdc	0.572	[μm]
Rz	5.489	[μm]	Rt	8.630	[μm]
Rp	1.898	[μm]	Rz1max	8.409	[μm]
Rv	3.591	[μm]	Rk	2.019	[μm]
Rsk	-0.705		Rpk	1.091	[μm]
Rku	4.513		Rvk	2.173	[μm]
Rc	3.560	[μm]	Mr1	11.619	%
RSm	179.306	[μm]	Mr2	85.576	%
RDq	0.122		A1	6.817	
Rmr	4.522		A2	16.602	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				101	
TEST DI POLVEROSITÀ					
CLASSE				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	0.839 %		5	1.312 %	
2	2.108 %		6	3.006 %	
3	1.875 %		7	2.447 %	
4	1.326 %		8	1.087 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	1	0.839 %	NUMERO RILEVAZIONE	6	3.006 %
					

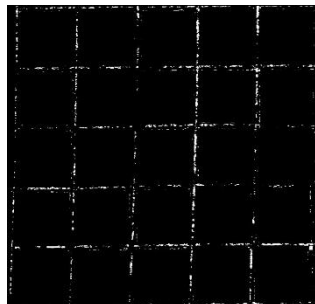
PROVINO				G	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				2	
ESPOSIZIONE				NESSUNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	4.382	[μm]	Rmr(c)	11.175	%
Rq	5.545	[μm]	Rdc	1.759	[μm]
Rz	25.847	[μm]	Rt	36.159	[μm]
Rp	7.574	[μm]	Rz1max	35.252	[μm]
Rv	18.273	[μm]	Rk	10.696	[μm]
Rsk	-1.067		Rpk	2.410	[μm]
Rku	4.012		Rvk	10.119	[μm]
Rc	16.441	[μm]	Mr1	4.266	%
RSm	501.993	[μm]	Mr2	78.503	%
RDq	0.182		A1	5.550	
Rmr	0.0808		A2	110.349	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				139	
TEST DI POLVEROSITÀ					
VALORE RILEVATO				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	0.707 %		5	0.539 %	
2	0.150 %		6	0.688 %	
3	0.037 %		7	0.353 %	
4	0.276 %		8	0.068 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	3	0.037 %	NUMERO RILEVAZIONE	1	0.707 %
					

PROVINO				H	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				3	
ESPOSIZIONE				NESSUNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	4.123	[μm]	Rmr(c)	0.690	%
Rq	5.232	[μm]	Rdc	2.893	[μm]
Rz	29.193	[μm]	Rt	37.094	[μm]
Rp	14.092	[μm]	Rz1max	35.711	[μm]
Rv	15.102	[μm]	Rk	12.929	[μm]
Rsk	-0.1807		Rpk	5.381	[μm]
Rku	3.296		Rvk	6.518	[μm]
Rc	16.226	[μm]	Mr1	8.560	%
RSm	271.510	[μm]	Mr2	87.928	%
RDq	0.323		A1	23.166	
Rmr	0.037		A2	39.870	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				155	
TEST DI POLVEROSITÀ					
VALORE RILEVATO				2	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	0.143 %		5	0.383 %	
2	0.082 %		6	0.564 %	
3	0.381 %		7	0.502 %	
4	0.316 %		8	0.198 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	2	0.082 %	NUMERO RILEVAZIONE	6	0.564 %
					

PROVINO				I	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				3	
ESPOSIZIONE				NEBBIA SALINA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	6.108	[μm]	Rmr(c)	0.831	%
Rq	7.622	[μm]	Rdc	4.579	[μm]
Rz	37.479	[μm]	Rt	47.448	[μm]
Rp	18.868	[μm]	Rz1max	44.267	[μm]
Rv	18.611	[μm]	Rk	19.579	[μm]
Rsk	-0.032		Rpk	7.918	[μm]
Rku	2.922		Rvk	8.220	[μm]
Rc	23.995	[μm]	Mr1	9.563	%
RSm	526.053	[μm]	Mr2	89.302	%
RDq	0.241		A1	38.025	
Rmr	0.034		A2	44.207	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				101	
TEST DI POLVEROSITÀ					
VALORE RILEVATO				2	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	1.947 %		5	3.414 %	
2	3.340 %		6	4.056 %	
3	5.799 %		7	7.022 %	
4	6.538 %		8	4.163 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	1	1.947 %	NUMERO RILEVAZIONE	7	7.022 %
					

PROVINO				J	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				4	
ESPOSIZIONE				NESSUNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	6.962	[μm]	Rmr(c)	0.859	%
Rq	8.647	[μm]	Rdc	5.763	[μm]
Rz	41.235	[μm]	Rt	51.884	[μm]
Rp	21.756	[μm]	Rz1max	48.654	[μm]
Rv	19.479	[μm]	Rk	22.266	[μm]
Rsk	0.082		Rpk	9.087	[μm]
Rku	2.793		Rvk	8.281	[μm]
Rc	26.583	[μm]	Mr1	10.338	%
RSm	498.780	[μm]	Mr2	89.593	%
RDq	0.257		A1	48.221	
Rmr	0.036		A2	43.949	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				106	
TEST DI POLVEROSITÀ					
VALORE RILEVATO				5	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	0.036 %		5	0.223 %	
2	0.073 %		6	0.265 %	
3	0.325 %		7	0.189 %	
4	0.191 %		8	--	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	1	0.036 %	NUMERO RILEVAZIONE	3	0.325 %
					

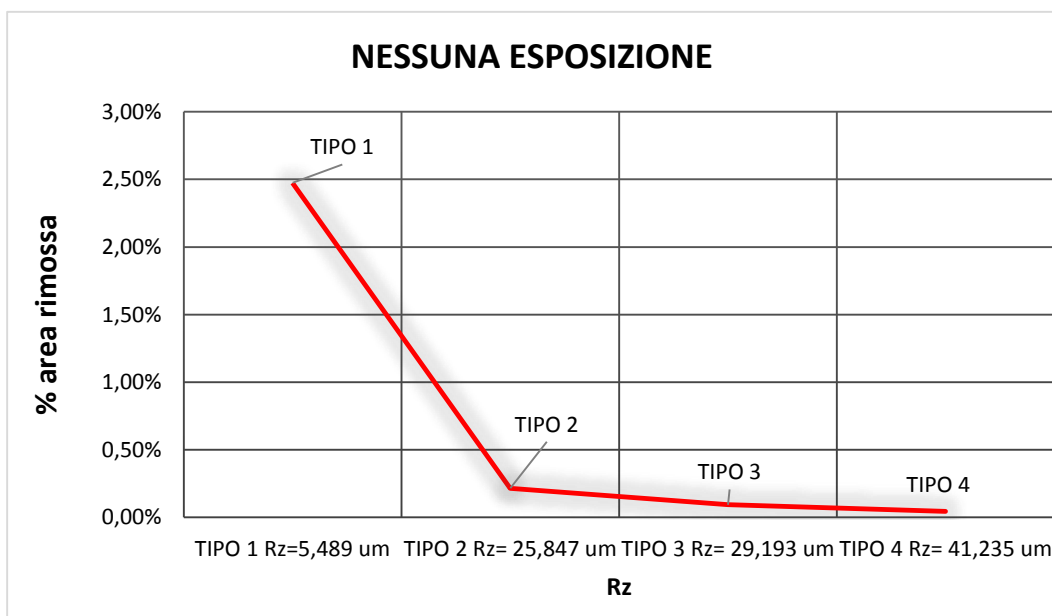
PROVINO				K	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				4	
ESPOSIZIONE				NEBBIA SALINA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	7.340	[μm]	Rmr(c)	1.957	%
Rq	9.174	[μm]	Rdc	6.565	[μm]
Rz	45.115	[μm]	Rt	57.352	[μm]
Rp	25.460	[μm]	Rz1max	57.352	[μm]
Rv	19655	[μm]	Rk	23.072	[μm]
Rsk	0.338		Rpk	12.285	[μm]
Rku	3.040		Rvk	8.970	[μm]
Rc	29.517	[μm]	Mr1	10.972	%
RSm	463.200	[μm]	Mr2	88.583	%
RDq	0.280		A1	67.400	
Rmr	0.024		A2	51.200	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				121	
TEST DI POLVEROSITÀ					
VALORE RILEVATO				2	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	7.117 %		5	1.867 %	
2	0.845 %		6	1.707 %	
3	6.931 %		7	1.818 %	
4	0.659 %		8	2.013 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	2	0.845 %	NUMERO RILEVAZIONE	1	7.117 %
					

PROVINO				L	
TIPOLOGIA TRATTAMENTO SUPERFICIALE				3	
ESPOSIZIONE				ESTERNA	
PARAMETRI DEL PROFILO SUPERFICIALE DI RUGOSITÀ					
PARAM.		U.M	PARAM.		U.M
Ra	4.376	[μm]	Rmr(c)	0.539	%
Rq	5.504	[μm]	Rdc	3.246	[μm]
Rz	30.058	[μm]	Rt	37.839	[μm]
Rp	15.267	[μm]	Rz1max	35.715	[μm]
Rv	14.791	[μm]	Rk	14.015	[μm]
Rsk	+0.056		Rpk	5.584	[μm]
Rku	3.102		Rvk	6.300	[μm]
Rc	17.111	[μm]	Mr1	8.915	%
RSm	295.683	[μm]	Mr2	89.097	%
RDq	0.323		A1	24.885	
Rmr	0.042		A2	34.597	
SPESSORE MEDIO FILM ASCIUTTO					
VALORE RILEVATO [um]				110	
TEST DI POLVEROSITÀ					
VALORE RILEVATO				1	
CROSS CUT TEST					
N° RIL.	VALORE RILEVATO		N° RIL.	VALORE RILEVATO	
1	0.460 %		5	0.588 %	
2	0.656 %		6	0.399 %	
3	0.244 %		7	0.714 %	
4	0.564 %		8	1.518 %	
CASO MIGLIORE			CASO PEGGIORE		
NUMERO RILEVAZIONE	3	0.244 %	NUMERO RILEVAZIONE	8	1.518 %
					

7.3.10. Analisi dei risultati

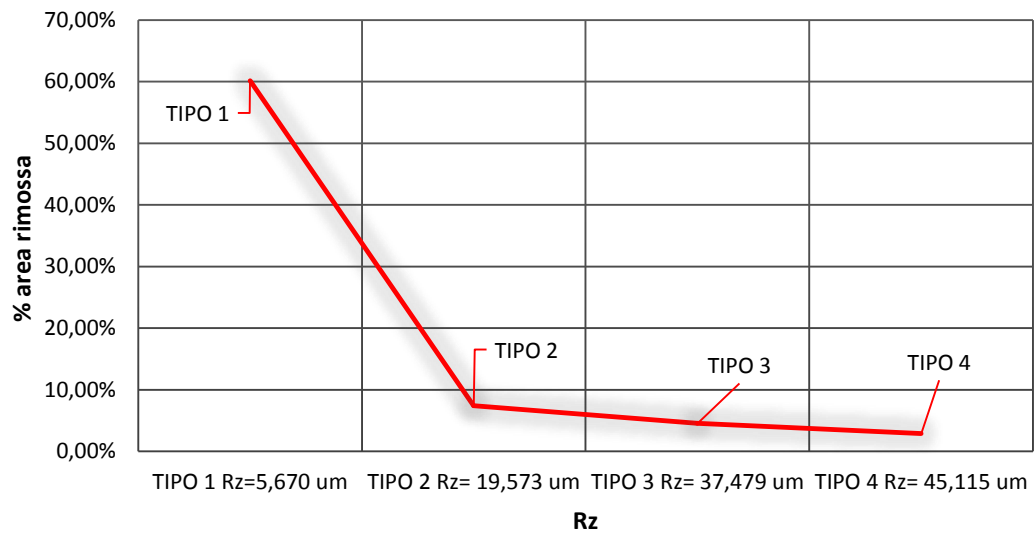
Da quanto rilevato e visibile nelle precedenti pagine, appare chiara una relazione tra i parametri del profilo superficiale di rugosità e le performance di adesione del prodotto verniciante sul substrato metallico. Di seguito, al fine di rendere maggiormente immediata la comprensione di tale relazione, per ogni gruppo di provini relativo ad una tipologia di esposizione, verrà rappresentato l'andamento dell'area percentuale di prodotto verniciante in funzione del parametro superficiale R_z . I seguenti parametri, risultano essere calcolati come la media di 8 e 30 rilevazioni, rispettivamente per la percentuale di area rimossa e per R_z .

NESSUNA ESPOSIZIONE				
TIPOLOGIA GRANIGLIATRICE	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
R_z [um]	5,489	25,847	29,193	41,235
% area rimossa	2,47%	0,22%	0,09%	0,04%



ESPOSIZIONE NEBBIA SALINA				
TIPOLOGIA GRANIGLIATRICE	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
R_z [um]	5,670	19,573	37,479	45,115
% area rimossa	60,15%	7,41%	4,53%	2,87%

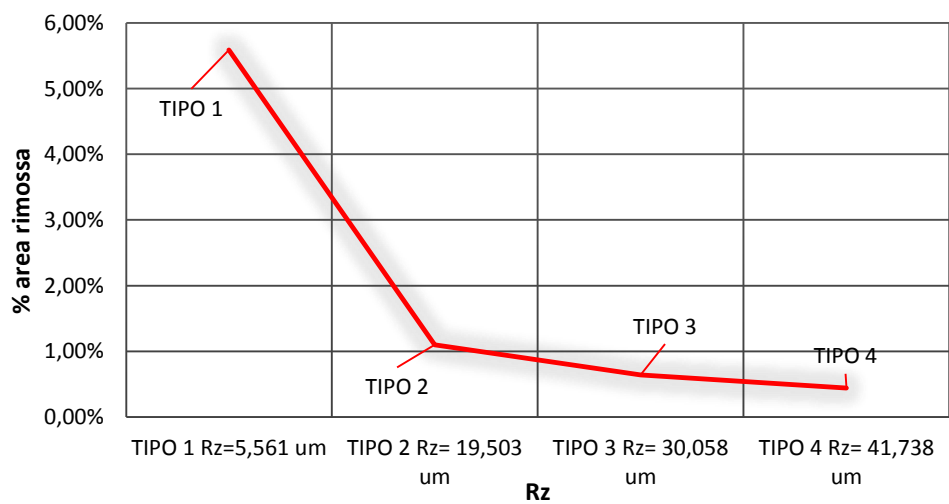
ESPOSIZIONE NEBBIA SALINA



ESPOSIZIONE AMBIENTALE ESTERNA

TIPOLOGIA GRANIGLIATRICE	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
Rz [um]	5,561	19,503	30,058	41,738
% area rimossa	5,59	1,10	0,64	0,44

ESPOSIZIONE AMBIENTALE ESTERNA



7.4. Analisi economica costi – benefici

Nel seguente paragrafo, si tenterà di fornire un'evidenza economica alla convenienza ottenibile mediante un insieme di attività volte al controllo del processo. I dati e le percentuali presentate, sono frutto dell'osservazione e dalla rilevazione di dati dal campo, in particolare associati alle attività di controllo qualità sulla verniciatura effettuate al termine del processo di assemblaggio e delle attività di controllo del processo di granigliatura e verniciatura. Come già precedentemente accennato, il seguente studio risulta essere la conseguenza della rilevazione di non conformità dal campo relative alla integrità del rivestimento superficiale dei prodotti.

La problematica in oggetto, risulta avere origine dalla modifica del prodotto verniciante utilizzato come standard da Pietro Fiorentini, ovvero il passaggio da un rivestimento superficiale realizzato su tre strati (primer, fondo e mano finale) ad un prodotto verniciante monomano. Seguendo l'erronea consuetudine aziendale, si reputava che i manufatti in ghisa non necessitassero di una preparazione superficiale atta a rendere idoneo il substrato alla verniciatura, e di conseguenza quest'ultimi non subivano alcun processo di granigliatura. In seguito alla rilevazione di 15 non conformità dal campo, identificate da un cliente particolarmente attento, si è deciso di implementare azioni correttive, al fine di garantire la conformità agli standard qualitativi che caratterizzano i prodotti Pietro Fiorentini.

7.4.1. Controllo della qualità e controllo del processo

Nel periodo antecedente alla rilevazione delle non conformità dal campo, determinate da problematiche attribuibili alla esfoliazione del film secco di vernice, in Pietro Fiorentini non veniva effettuato nessun controllo visivo sull'integrità del rivestimento, nessun tipo di controllo sullo spessore di quest'ultimo e nessun tipo di controllo sull'effettiva conformità del substrato ad essere verniciato.

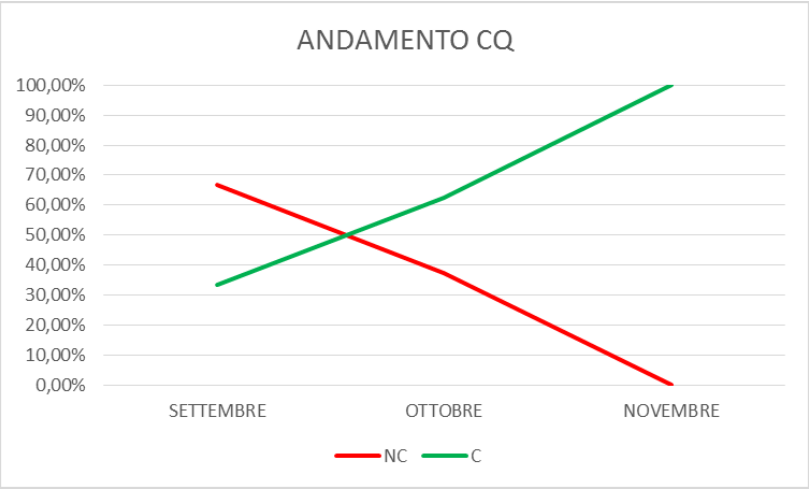
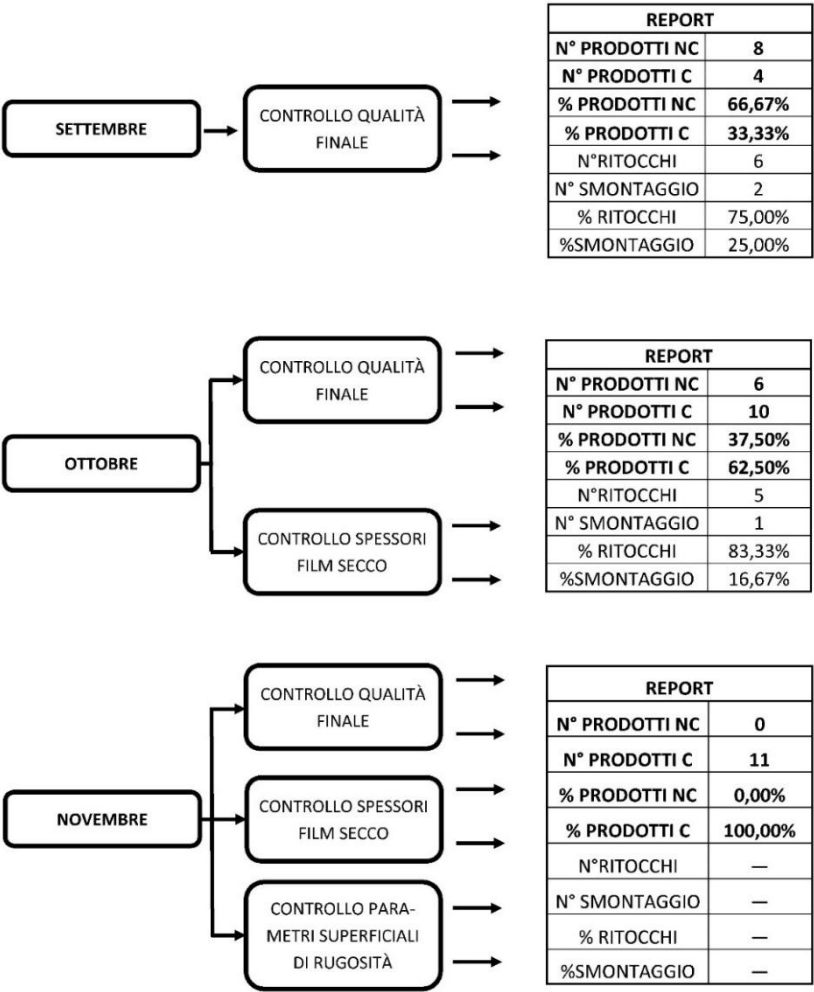
La prima azione correttiva implementata ad inizio settembre, riguardava l'aggiunta di un controllo visivo dell'integrità e dell'assenza di difettosità evidenti nel rivestimento esclusivo per i prodotti destinati ad un solo mercato. Si considerava una non conformità l'eventuale presenza di esfoliazioni, bolle, blistering, crepe sul substrato. La seguente attività veniva e viene attualmente svolta da un addetto del controllo qualità.

La seguente attività, ha permesso l'individuazione di una notevole carenza dal punto di vista della conformità del rivestimento, in quanto più del 67% dei prodotti risultava essere non conforme. A seconda della gravosità della non conformità rilevata, l'addetto al controllo decideva se poteva essere sufficiente un ritocco del difetto, oppure se risultava necessario operare il disassemblaggio del prodotto per procedere quindi al rifacimento delle verniciatura.

Data l'elevata frazione di prodotti non conformi, si comprese che evidentemente c'era qualcosa che non funzionava correttamente nel processo. Si decise quindi di implementare un controllo degli spessori relativi al film secco del rivestimento superficiale. Questa operazione veniva e viene attualmente svolta sul 100% della produzione mediante uno spessimetro a correnti parassite ed ha permesso una riduzione delle non conformità di circa il 30%, eliminando le problematiche relative alle colature ed alla fragilità del rivestimento determinato da un ridotto o un eccessivo spessore del film secco.

Sebbene il controllo degli spessori riuscisse ad assicurare la non presenza di colature o spessori non conformi alle specifiche, questa tipologia di test non riusciva ad evidenziare l'effettiva adesione al substrato del prodotto verniciante. Al fine di comprendere questo e quindi assicurare una giusta resistenza alla manipolazione durante l'assemblaggio ed una resistenza agli agenti atmosferici ai quali il prodotto sarebbe stato esposto, si è deciso di implementare un controllo di conformità a valle della granigliatura, in modo da assicurare una corretta preparazione del substrato dal punto di vista dei parametri del profilo superficiale di rugosità. Il controllo dei parametri del profilo superficiale viene attualmente svolto su campione, prelevando 3 prodotti "campione" per turno, ovvero in totale 6 campioni al giorno. Dal punto di vista del valore di accettabilità relativo alla rugosità del substrato, si è deciso di minimizzare il rischio di generare nuovamente delle non conformità e grazie anche al seguente studio, si è identificato un valore soglia del parametro R_z pari a $35\text{ }\mu\text{m}$. Il raggiungimento di questo valore nel 100% dei componenti, indipendentemente dalla geometria o dalle dimensioni, è stato reso possibile grazie ad una modifica del setup della granigliatrice ed a una modifica della graniglia utilizzata.

La situazione appena descritta, viene rappresentata nello spazio sottostante:



7.4.2. Analisi dei costi associati alle non conformità

Definita una non conformità da campo come una difettosità del prodotto o nel suo funzionamento rilevata dal cliente a valle della consegna e segnalata entro i termini di garanzia, nel 2016 Pietro Fiorentini, ha rilevato 15 non conformità di questo tipo associate a problemi di verniciatura. I costi associati alla singola non conformità dipendono essenzialmente dalla localizzazione del cliente, dalla tipologia di prodotto e dalla possibilità o meno di risolvere la problematica senza dover provvedere allo smontaggio del regolatore di pressione dall'impianto, generando quindi la necessità di una sua sostituzione. Essendo quindi numerose le variabili che concorrono alla determinazione del costo della non conformità dal campo, al fine di questo studio, i seguenti costi sono stati calcolati come la media dei costi associati alla sostituzione dei prodotti in garanzia e la loro successiva reinstallazione.

COSTO SINGOLA NON CONFORMITÀ DAL CAMPO	
NCC	15
COSTO TOTALE NCC	€ 36.359,08
COSTO SINGOLO PRODOTTO NCC	€ 2.423,94
TOTALE COMPONENTI PRODOTTI IN ASSENZA DI CONTROLLI DI QUALITÀ (GENNAIO-->SETTEMBRE COMPRESO)	116
Calcolata come il rapporto tra le NCC rilevate e i componenti che sono stati considerati erroneamente considerati conformi nei periodi in cui non si effettuava nessun controllo.	
PROBABILITÀ ACCADIMENTO NCC	12,93%

Tabella 17: costi relativi alle non conformità dal campo

Per quanto riguarda invece le non conformità interne derivanti da problematiche al rivestimento superficiale o alla non conformità della topografia superficiale del substrato, occorre fare una distinzione innanzitutto in che step del processo viene rilevata la non conformità ed in secondo luogo se risulta essere sufficiente un'operazione di ritocco e oppure se risulta necessario operare lo smontaggio del prodotto e provvedere quindi ad una sua rilavorazione.

COSTI NON CONFORMITÀ			
AZIONE CORRETTIVA 1: SMONTAGGIO			
OPERAZIONE	[MIN]	[€/H]	€/PEZZO
SMONTAGGIO	72	25	30,00
TRASPORTO	5	25	2,08
GRANIGLIATURA (RIMOZIONE PRODOTTO VERNICIANTE)	5	25	2,08
VERNICIATURA	7,28	25	3,03
RIMONTAGGIO	80	25	33,33
COLLAUDO	35	25	14,58
CQ FINALE	3,52	33	1,93
TOTALE			87,05
AZIONE CORRETTIVA 2: RITOCOCCO			
OPERAZIONE	[MIN]	[€/H]	€/PEZZO
RITOCOCCO PUNTUALE	20	25	8,33
CQ FINALE	3,52	33	1,93
TOTALE			10,27
AZIONE CORRETTIVA 3: RIGRANIGLIATURA E RIVERNICIATURA			
OPERAZIONE	[MIN]	[€/H]	€/PEZZO
GRANIGLIATURA (RIMOZIONE PRODOTTO VERNICIANTE)	5	25	2,08
VERNICIATURA	7,28	25	3,03
TOTALE			5,12
AZIONE CORRETTIVA 4: RIGRANIGLIATURA			
OPERAZIONE	[MIN]	[€/H]	€/PEZZO
GRANIGLIATURA	5	25	2,08

Tabella 18: costi relativi alle non conformità interne

Lo smontaggio completo del regolatore di pressione viene effettuata soltanto nel caso di difettosità irrisolvibili mediante semplici operazioni di ritocco puntuale, come nel caso di presenza di bolle d'aria, bucciatura del rivestimento, sfogliatura, ecc...

Il ritocco puntuale viene solitamente eseguito nel caso di semplici non conformità relative al rivestimento superficiale, come nel caso di piccole mancanze di colore determinate solitamente da un'erronea operazione di aggancio del componente durante le operazioni di asciugatura del prodotto verniciante.

Le operazioni di rigranigliatura/verniciatura e quelle di rigranigliatura, vengono eseguite soltanto se la non conformità viene rilevata prima delle operazioni di assemblaggio, relativamente dagli operatori di assemblaggio stessi e dall'operatore addetto alla verniciatura.

7.4.3. Costi associati al controllo di processo e controllo qualità

L'esecuzione di attività finalizzate all'assicurazione ed alla conferma dell'effettivo rispetto della qualità da parte del prodotto e del processo, necessita di investimenti in tempo e strumenti. Nel seguente report, vengono considerati gli investimenti che Pietro Fiorentini ha sostenuto nel corso del 2016 al fine di migliorare la qualità dei propri prodotti dal punto di vista della verniciatura.

COSTI DELLE ATTIVITÀ DI ISPEZIONE					
OPERAZIONE	TEMPO[min]	[€/H]	€/PEZZO	FREQUENZA CONTROLLO	[€/pz]
RILEVAZIONE PARAMETRI SUPERFICIALI DI RUGOSITÀ	1,83	25	0,76	1	0,76
RILEVAZIONE SPESSORI PRODOTTO VERNICIANTE	1,17	25	0,49	1	0,49
CONTROLLO QUALITÀ FINALE	3,55	33	1,95	1	1,95
TOTALE					3,20

Tabella 19: costi relativi alle attività di ispezione

L'ammortamento degli strumenti di misura è stato calcolato ripartendo in tutti gli anni di vita utile presunta l'investimento effettuato, in assenza di interessi e considerando nullo il valore residuo. Nel seguente calcolo non si sono considerati i costi associati alla manutenzione ed alle operazioni di taratura degli strumenti.

AMMORTAMENTO ANNUO DELLA STRUMENTAZIONE			
OGGETTO	COSTO [€]	DURATA [anni]	[€/ANNO]
RUGOSIMETRO PORTATILE MITUTOYO SJ-210	1900	10	€ 190,00
SPESSIMETRO DEFELSKO 6000	600	5	€ 120,00
TOTALE	2500		€ 310,00

Tabella 20: ammortamento annuo della strumentazione necessaria al processo di ispezione

7.4.4. Analisi costi-benefici

Nel seguente paragrafo si tenterà di dimostrare l'effettiva convenienza in termini di risparmio sui costi nell'implementare un processo di ispezione. In particolare, verranno prese in considerazione quattro diverse alternative:

- **Alternativa 1:** processo produttivo caratterizzato esclusivamente da attività di ispezione eseguite esclusivamente mediante controlli visivi.
- **Alternativa 2:** processo produttivo caratterizzato dalla sola attività di ispezione degli spessori del film asciutto del rivestimento superficiale, effettuato mediante lo spessimetro a correnti parassite DeFelsko 6000 da parte del personale dell'ufficio controllo qualità, a monte della spedizione del prodotto al cliente.
- **Alternativa 3:** processo produttivo caratterizzato dalla sola attività di ispezione degli spessori del film asciutto del rivestimento superficiale, effettuato mediante lo spessimetro a correnti parassite DeFelsko 6000 da parte degli operatori dell'assemblaggio, a monte di prelevare il componente.
- **Alternativa 4:** processo produttivo caratterizzato dall'attività di ispezione relativa ai parametri di profilo superficiale e dell'attività di rilevazione degli spessori del film asciutto del rivestimento, effettuate relativamente dall'operatore addetto alla verniciatura e dall'operatore dell'assemblaggio, mediante rispettivamente il rugosimetro portatile Mitutoyo SJ-210 e lo spessimetro a correnti parassite DeFelsko 6000.

Gli step che il prodotto deve seguire, ed i relativi controlli vengono schematizzati mediante un diagramma di flusso nella pagina seguente. Al fine di una maggiore comprensione del flow chart proposto, vengono di seguito elencate le definizioni della notazioni utilizzate:

- **Volume produttivo:** numero totale di prodotti APERVAL/G DN 50 PN16 realizzati in un anno da parte di Pietro Fiorentini SPA.
- **Granigliatura:** processo di granigliatura realizzato presso l'officina meccanica.
- **p C/NC GRAN:** probabilità del processo di granigliatura di generare un prodotto conforme/non conforme.
- **p id/Nid 1:** probabilità che l'operatore addetto alle attività di verniciatura identifichi la conformità/non conformità del prodotto in attesa di essere verniciato.
- **p C/NC VERN:** probabilità del processo di verniciatura di generare un prodotto conforme/non conforme dal punto di vista degli spessori del film asciutto, dell'integrità del rivestimento e dal punto di vista dell'assenza di difetti di verniciatura.
- **p id/Nid 2:** probabilità che l'operatore addetto alle attività di verniciatura identifichi la conformità/non conformità del prodotto a valle delle attività di verniciatura.

- **p id/Nid 3:** probabilità che l'operatore addetto alle attività di assemblaggio identifichi la conformità/non conformità del prodotto a valle delle attività di verniciatura.
- **p id/Nid 4:** probabilità che gli addetti dell'ufficio controllo qualità identifichino la conformità/non conformità del prodotto a valle del processo di assemblaggio ed a monte della spedizione al cliente

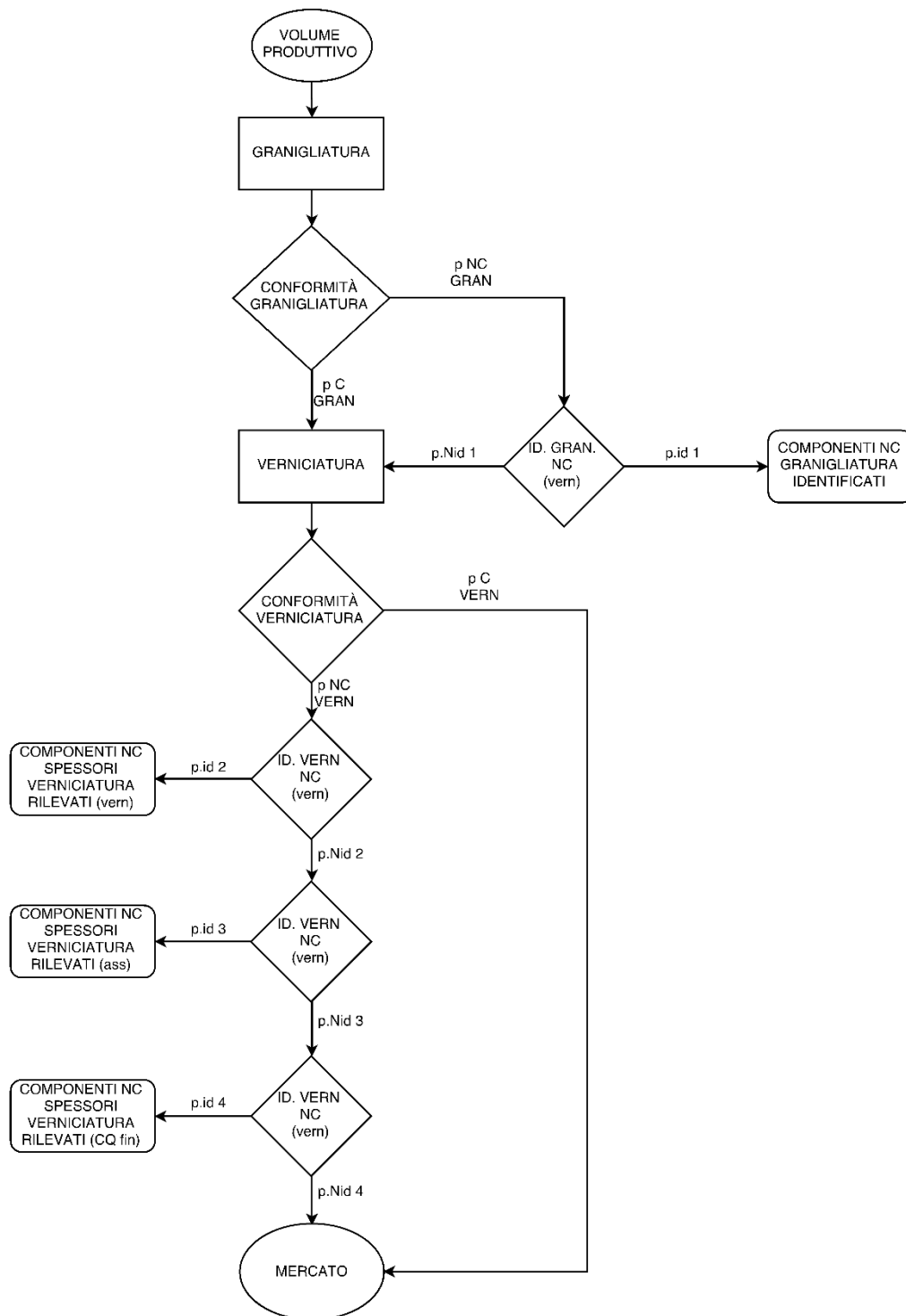


Immagine 59: diagramma di flusso relativo al processo produttivo e al processo di ispezione

ALTERNATIVA	p NC GRAN	p.Nid. 1	p NC VERN	p.Nid. 2	p.Nid. 3	p.Nid. 4
1	30,00%	95,00%	67,00%	95,00%	95,00%	90,00%
2	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	95,00%	20,00%
3	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%
4	4,44%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%

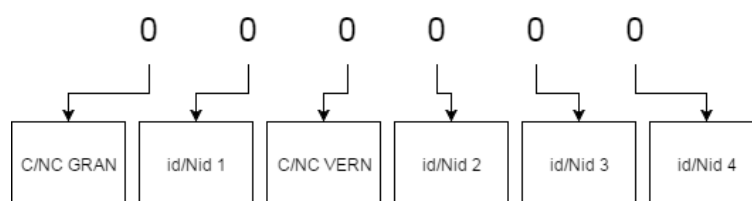
Tabella 21: probabilità di non conformità/mancata identificazione nelle diverse alternative

Risulta importante sottolineare che nell'alternativa 4 si osserva una netta diminuzione delle non conformità generate dal processo di granigliatura in quanto grazie alle attività di ispezione, è stato possibile identificare una netta carenza del processo e quindi cogliere l'opportunità di apportare un significativo miglioramento, grazie alla modifica della miscela di graniglia utilizzata. La p NC GRAN relativa all'alternativa 4 risulta quindi essere determinata dall'esclusiva decadenza progressiva del processo di granigliatura, determinata da una riduzione del potere abrasivo/granigliante della miscela di graniglia utilizzata.

Per ogni singola alternativa, è stato sviluppato un'analisi dello scenario a livello di probabilità, confrontando tutte le possibili condizioni che possono verificarsi nel processo a livello di conformità/non conformità ed a livello di identificazione/non identificazione del prodotto non conforme. In particolare, utilizzando una notazione di tipo numerico, si è calcolata la probabilità cumulata per ogni diversa combinazione, utilizzando i numeri:

- **0:** realizzazione di una non conformità o mancata identificazione di un prodotto non conforme.
- **1:** realizzazione di un prodotto conforme o identificazione di un prodotto non conforme.
- **2:** assenza di controllo di ispezione sul prodotto in quanto la non conformità risulta essere stata intercettata nelle precedenti attività di ispezione.

Per ogni diversa combinazione, si è quindi realizzato un codice di una lunghezza pari a 6 cifre, che identifica in modo univoco la combinazione di conformità/non conformità e identificazione/mancata identificazione:



COMBINAZIONE	CODICE	GRAN	id 1	VERN	id 2	id 3	id 4
1	000000	0	0	0	0	0	0
2	000001	0	0	0	0	0	1
3	000012	0	0	0	0	1	2
4	000122	0	0	0	1	2	2
5	001222	0	0	1	2	2	2
6	012222	0	1	2	2	2	2
7	120000	1	2	0	0	0	0
8	120001	1	2	0	0	0	1
9	120012	1	2	0	0	1	2
10	120122	1	2	0	1	2	2
11	121222	1	2	1	2	2	2

Tabella 22: combinazioni di conformità/non conformità, identificazione/non identificazione

Per ognuna delle quattro alternative, è stata calcolata la probabilità cumulata di ogni singola combinazione, espressa come il prodotto delle k-esime probabilità ed indicata con p [%]:

ALTERNATIVA								1
COMB.	CODICE	GRAN	id 1	VERN	id 2	id 3	id 4	
		70,00%	5,00%	33,00%	5,00%	5,00%	10,00%	pc,k [pid,k]
		30,00%	95,00%	67,00%	95,00%	95,00%	90,00%	pnc,k [pNid,k]
								p [%]
1	000000	30,00%	95,00%	67,00%	95,00%	95,00%	90,00%	15,51%
2	000001	30,00%	95,00%	67,00%	95,00%	95,00%	10,00%	1,72%
3	000012	30,00%	95,00%	67,00%	95,00%	5,00%	100,00%	0,91%
4	000122	30,00%	95,00%	67,00%	5,00%	100,00%	100,00%	0,95%
5	001222	30,00%	95,00%	33,00%	100,00%	100,00%	100,00%	9,41%
6	012222	30,00%	5,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	1,50%
7	120000	70,00%	100,00%	67,00%	95,00%	95,00%	90,00%	38,09%
8	120001	70,00%	100,00%	67,00%	95,00%	95,00%	10,00%	4,23%
9	120012	70,00%	100,00%	67,00%	95,00%	5,00%	100,00%	2,23%
10	120122	70,00%	100,00%	67,00%	5,00%	100,00%	100,00%	2,35%
11	121222	70,00%	100,00%	33,00%	100,00%	100,00%	100,00%	23,10%

Tabella 23: probabilità cumulata nelle diverse combinazioni dell'alternativa 1

ALTERNATIVA								2
COMB.	CODICE	GRAN	id 1	VERN	id 2	id 3	id 4	
		70,00%	5,00%	83,33%	5,00%	5,00%	80,00%	pc,k [pid,k]
		30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	95,00%	20,00%	pnc,k [pNid,k]
								p [%]
1	000000	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	95,00%	20,00%	0,86%
2	000001	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	95,00%	80,00%	3,43%
3	000012	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	5,00%	100,00%	0,23%
4	000122	30,00%	95,00%	16,67%	5,00%	100,00%	100,00%	0,24%
5	001222	30,00%	95,00%	83,33%	100,00%	100,00%	100,00%	23,75%
6	012222	30,00%	5,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	1,50%
7	120000	70,00%	100,00%	16,67%	95,00%	95,00%	20,00%	2,11%
8	120001	70,00%	100,00%	16,67%	95,00%	95,00%	80,00%	8,43%
9	120012	70,00%	100,00%	16,67%	95,00%	5,00%	100,00%	0,55%
10	120122	70,00%	100,00%	16,67%	5,00%	100,00%	100,00%	0,58%
11	121222	70,00%	100,00%	83,33%	100,00%	100,00%	100,00%	58,33%

Tabella 24: probabilità cumulata nelle diverse combinazioni dell'alternativa 2

ALTERNATIVA								3
COMB.	CODICE	GRAN	id 1	VERN	id 2	id 3	id 4	
		70,00%	5,00%	83,33%	5,00%	80,00%	10,00%	pc,k [pid,k]
		30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%	pnc,k [pNid,k]
								p [%]
1	000000	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%	0,81%
2	000001	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	10,00%	0,09%
3	000012	30,00%	95,00%	16,67%	95,00%	80,00%	100,00%	3,61%
4	000122	30,00%	95,00%	16,67%	5,00%	100,00%	100,00%	0,24%
5	001222	30,00%	95,00%	83,33%	100,00%	100,00%	100,00%	23,75%
6	012222	30,00%	5,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	1,50%
7	120000	70,00%	100,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%	2,00%
8	120001	70,00%	100,00%	16,67%	95,00%	20,00%	10,00%	0,22%
9	120012	70,00%	100,00%	16,67%	95,00%	80,00%	100,00%	8,87%
10	120122	70,00%	100,00%	16,67%	5,00%	100,00%	100,00%	0,58%
11	121222	70,00%	100,00%	83,33%	100,00%	100,00%	100,00%	58,33%

Tabella 25: probabilità cumulata nelle diverse combinazioni dell'alternativa 3

ALTERNATIVA								4
COMB.	CODICE	GRAN	id 1	VERN	id 2	id 3	id 4	
		95,56%	5,00%	83,33%	5,00%	80,00%	10,00%	pc,k [pid,k]
		4,44%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%	pnc,k [pNid,k]
								p [%]
1	000000	4,44%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%	0,12%
2	000001	4,44%	95,00%	16,67%	95,00%	20,00%	10,00%	0,01%
3	000012	4,44%	95,00%	16,67%	95,00%	80,00%	100,00%	0,53%
4	000122	4,44%	95,00%	16,67%	5,00%	100,00%	100,00%	0,04%
5	001222	4,44%	95,00%	83,33%	100,00%	100,00%	100,00%	3,51%
6	012222	4,44%	5,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,22%
7	120000	95,56%	100,00%	16,67%	95,00%	20,00%	90,00%	2,72%
8	120001	95,56%	100,00%	16,67%	95,00%	20,00%	10,00%	0,30%
9	120012	95,56%	100,00%	16,67%	95,00%	80,00%	100,00%	12,11%
10	120122	95,56%	100,00%	16,67%	5,00%	100,00%	100,00%	0,80%
11	121222	95,56%	100,00%	83,33%	100,00%	100,00%	100,00%	79,63%

Tabella 26: probabilità cumulata nelle diverse combinazioni dell'alternativa 4

Per ognuna delle quattro alternative, si è quindi proceduto a calcolare i costi relativi alle non conformità ed alle non conformità dal campo disponibili nelle quattro pagine seguenti

ALT.	1	AZIONE CORRETTIVA	p [%]	PROD [pz]	COST O NC [€/pz]	COSTI NC [€]	p NCC [%]	NCC [pz]	COSTI NCC [€]
COMB.									
1	000000	NESSUNA	15,51%	26,83	0	0,00	44,62%	11,97	29020,62
2	000001	2	1,29%	2,24	10,27	22,96	0,00%	0,00	0,00
		1	0,43%	0,75	87,05	64,88	0,00%	0,00	0,00
3	000012	3	0,91%	1,57	5,12	8,03	0,00%	0,00	0,00
4	000122	3	0,95%	1,65	5,12	8,45	0,00%	0,00	0,00
5	001222	NESSUNA	9,41%	16,27	0	0,00	32,24%	5,25	12715,15
6	012222	4	1,50%	2,60	2,08	5,41	0,00%	0,00	0,00
7	120000	NESSUNA	38,09%	65,90	0	0,00	6,44%	4,24	10287,65
8	120001	2	3,51%	6,08	10,27	62,40	0,00%	0,00	0,00
		1	0,72%	1,24	87,05	108,37	0,00%	0,00	0,00
9	120012	3	1,85%	3,20	5,12	16,37	0,00%	0,00	0,00
10	120122	3	1,95%	3,37	5,12	17,23	0,00%	0,00	0,00
11	121222	NESSUNA	23,10%	39,96	0	0,00	0,00%	0,00	0,00
TOTALE						314,11			52023,42

Tabella 27: analisi dei costi determinati dalle non conformità interne e dal campo per l'alternativa 1

ALT.	2	AZIONE CORRETTIVA	p [%]	PROD [pz]	COST O NC [€/pz]	COSTI NC [€]	p NCC [%]	NCC [pz]	COSTI NCC [€]
COMB.									
1	000000	NESSUNA	0,86%	1,48	0	0,00	44,62%	0,66	1604,56
2	000001	2	2,85%	4,93	10,27	50,57	0,00%	0,00	0,00
		1	0,58%	1,01	87,05	87,82	0,00%	0,00	0,00
3	000012	3	0,23%	0,39	5,12	2,00	0,00%	0,00	0,00
4	000122	3	0,24%	0,41	5,12	2,10	0,00%	0,00	0,00
5	001222	NESSUNA	23,75%	41,09	0	0,00	32,24%	13,25	32107,69
6	012222	4	1,50%	2,60	2,08	5,41	0,00%	0,00	0,00
7	120000	NESSUNA	2,11%	3,64	0	0,00	6,44%	0,23	568,81
8	120001	2	6,99%	12,10	10,27	124,21	0,00%	0,00	0,00
		1	1,43%	2,48	87,05	215,70	0,00%	0,00	0,00
9	120012	3	0,46%	0,80	5,12	4,07	0,00%	0,00	0,00
10	120122	3	0,48%	0,84	5,12	4,29	0,00%	0,00	0,00
11	121222	NESSUNA	58,33%	100,91	0	0,00	0,00%	0,00	0,00
TOTALE						<u>497,17</u>			<u>34281,05</u>

Tabella 28: analisi dei costi determinati dalle non conformità interne e dal campo per l'alternativa 2

ALT.	3	AZIONE CORRETTIVA	p [%]	PROD [pz]	COST O NC [€/pz]	COSTI NC [€]	p NCC [%]	NCC [pz]	COSTI NCC [€]
COMB.									
1	000000	NESSUNA	0,81%	1,41	0	0,00	44,62%	0,63	1520,11
2	000001	2	0,07%	0,13	10,27	1,33	0,00%	0,00	0,00
		1	0,02%	0,03	87,05	2,31	0,00%	0,00	0,00
3	000012	3	3,61%	6,25	5,12	31,97	0,00%	0,00	0,00
4	000122	3	0,24%	0,41	5,12	2,10	0,00%	0,00	0,00
5	001222	NESSUNA	23,75%	41,09	0	0,00	32,24%	13,25	32107,69
6	012222	4	1,50%	2,60	2,08	5,41	0,00%	0,00	0,00
7	120000	NESSUNA	2,00%	3,45	0	0,00	6,44%	0,22	538,87
8	120001	2	0,18%	0,32	10,27	3,27	0,00%	0,00	0,00
		1	0,04%	0,07	87,05	5,68	0,00%	0,00	0,00
9	120012	3	7,36%	12,73	5,12	65,17	0,00%	0,00	0,00
10	120122	3	0,48%	0,84	5,12	4,29	0,00%	0,00	0,00
11	121222	NESSUNA	58,33%	100,91	0	0,00	0,00%	0,00	0,00
TOTALE						<u>121,53</u>			<u>34166,66</u>

Tabella 29: analisi dei costi determinati dalle non conformità interne e dal campo per l'alternativa 3

ALT.	4	AZIONE CORRETTIVA	p [%]	PROD [pz]	COST O NC [€/pz]	COSTI NC [€]	p NCC [%]	NCC [pz]	COSTI NCC [€]
COMB.									
1	000000	NESSUNA	0,12%	0,21	0	0,00	44,62%	0,09	224,98
2	000001	2	0,01%	0,02	10,27	0,20	0,00%	0,00	0,00
		1	0,00%	0,00	87,05	0,34	0,00%	0,00	0,00
3	000012	3	0,53%	0,92	5,12	4,73	0,00%	0,00	0,00
4	000122	3	0,04%	0,06	5,12	0,31	0,00%	0,00	0,00
5	001222	NESSUNA	3,51%	6,08	0	0,00	32,24%	1,96	4751,94
6	012222	4	0,22%	0,38	2,08	0,80	0,00%	0,00	0,00
7	120000	NESSUNA	2,72%	4,71	0	0,00	6,44%	0,30	735,63
8	120001	2	0,25%	0,43	10,27	4,46	0,00%	0,00	0,00
		1	0,05%	0,09	87,05	7,75	0,00%	0,00	0,00
9	120012	3	10,05%	17,38	5,12	88,97	0,00%	0,00	0,00
10	120122	3	0,66%	1,14	5,12	5,85	0,00%	0,00	0,00
11	121222	NESSUNA	79,63%	137,76	0	0,00	0,00%	0,00	0,00
TOTALE						113,42			5712,55

Tabella 30: analisi dei costi determinati dalle non conformità interne e dal campo per l'alternativa 4

Sulla base dei dati di costo calcolati per ognuna delle quattro diverse alternative, si è realizzato un report comparativo, che permette di comprendere in modo rapido e sintetico la convenienza nell'implementazione di un processo di ispezione:

ALTERNATIVA	AMMORTAMENTO STRUMENTAZIONE [€/anno]	COSTO ATTIVITÀ DI MISURAZIONE [€/anno]	COSTI NC [€/anno]	COSTI NCC [€/anno]	COSTO TOTALE [€/anno]
1	0	0	314,11	52023,42	52337,53
2	€ 120,00	421,88	496,17	34281,05	35319,10
3	€ 120,00	421,88	121,53	34166,66	34830,07
4	€ 310,00	554,03	113,42	5712,55	6690,00

Tabella 31: report riassuntivo dei costi delle quattro diverse alternative

Dal report risulta quindi evidente che il processo di ispezione, sebbene nell'alternativa maggiormente accurata comporti costi per 554,03 €/anno, risulta essere in grado di determinare un abbassamento dei costi totali dovuti alle non conformità di oltre 87%.

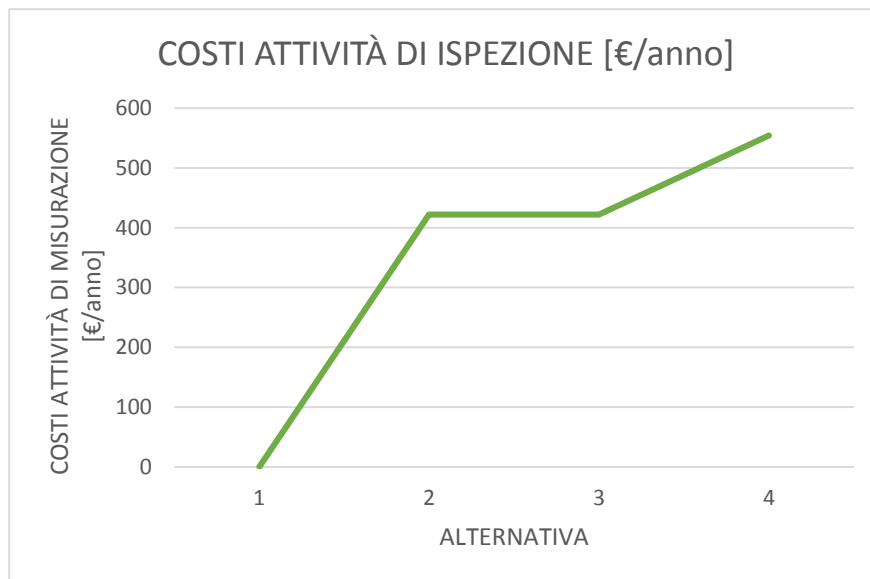


Immagine 61: costi relativi alle attività di ispezione

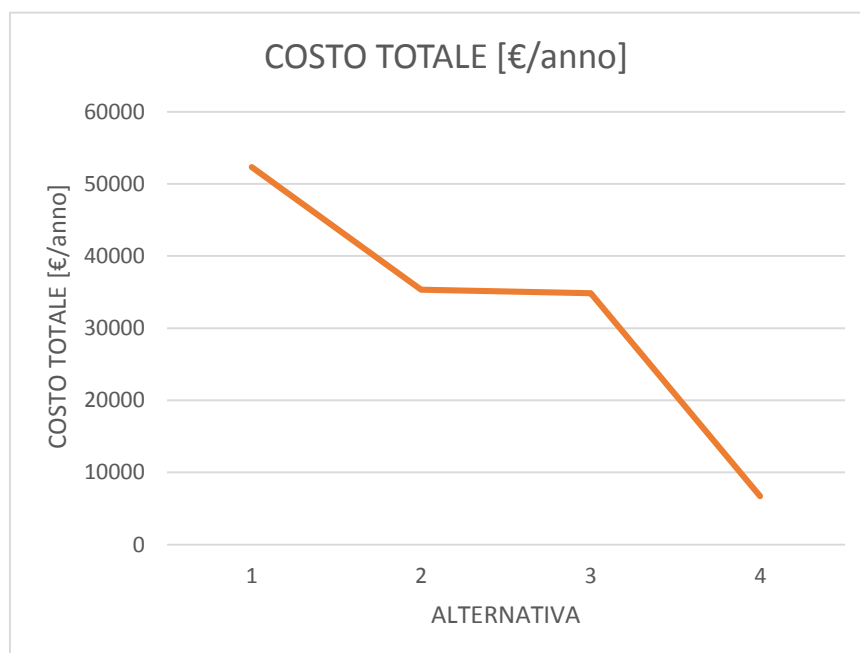


Immagine 62: costi totali, ottenuti dalla somma dei costi relativi alle non conformità interne/esterne e i costi del processo di ispezione

8.MIGLIORAMENTI FUTURI

Essendo Pietro Fiorentini SPA un'azienda particolarmente attenta al kaizen, ovvero al miglioramento continuo, di seguito verranno proposti due diversi spunti di miglioramento per il futuro.

8.1. Rilevazione e registrazione dei dati

Una delle problematiche essenziali della rilevazioni di dati riguardanti i parametri qualitativi del processo, risulta essere il formato con cui si effettua, ovvero il classico modulo prestampato. Sebbene questa modalità di report consenta di ottenere un discreto contenuto informativo con investimenti particolarmente bassi, è da tenere in considerazione che il suo aggiornamento e le operazioni di validazione del contenuto, risultano essere particolarmente onerose in termini di tempo. Per questo motivo, un possibile miglioramento potrebbe riguardare la modalità di rilevazione dei dati e del loro successivo trattamento ed archiviazione. Si osserva difatti che riuscendo a collegare lo strumento di rilevazione degli spessori del film di vernice asciutto ad un supporto informatico, i dati relativi a questo parametro del processo sarebbero sempre disponibili in formato elettronico e sulla base di questi, sarebbe possibile eseguire un controllo statistico del processo in assenza della necessità di riportare periodicamente i dati dalla carta ad un formato elettronico.

Il medesimo ragionamento può essere fatto per qualsiasi attività di misurazione che abbia a che fare con il controllo del processo, ad esempio nel caso trattato nel capitolo precedente, la rilevazione della rugosità superficiale.

8.2. Cataforesi

Considerando che i regolatori di pressione prodotti da Pietro Fiorentini possono essere installati anche in zone geografiche caratterizzate da condizioni climatiche particolarmente severe (deserti, fondali marini, zone particolarmente fredde...), a volte l'assicurazione che i parametri del processo di verniciatura risultano essere rispettati non risulta essere sufficiente ad assicurare una corretta resistenza alla corrosione negli anni. Per questo motivo, l'azienda sta valutando di modificare il processo di verniciatura per alcuni componenti del prodotto ritenuti maggiormente critici nella resistenza a corrosione. L'eventuale modifica proposta, riguarda in particolare alcune flange dei regolatori di pressione, le quali dovrebbero essere sottoposte ad un processo di verniciatura per cataforesi nera e successivamente sovraverniciate mediante spruzzo.

La cataforesi è un processo ad immersione che consiste nell'applicazione tramite elettrodeposizione su manufatti ferrosi, di uno strato cataforetico di spessore medio di 15 μ che conferisce ai manufatti elevate caratteristiche anticorrosione su tutta la superficie e nelle cavità

più difficili da raggiungere rispetto al tradizionale sistema a spruzzo. Una volta agganciati i componenti ad appositi telai, il processo di verniciatura per cataforesi si effettua in 13 diversi passaggi, eseguiti in flusso continuo:

- Sgrassaggio alcalino
- Primo risciacquo con acqua di rete
- Secondo risciacquo con acqua di rete
- Terzo risciacquo con acqua di rete
- Decapaggio acido
- Risciacquo con acqua neutralizzata
- Risciacquo con acqua di rete
- Risciacquo con acqua demineralizzata
- Conversione
- Risciacquo con acqua demineralizzata
- Immersione nella vasca della cataforesi (elettrodeposizione): i pezzi vengono immersi tramite un trasportatore aereo nella vasca contenente il liquido cataforetico
- Lavaggio dei pezzi con acqua ultrafiltrata (UF)
- Forno di polimerizzazione (forno a circolazione d'aria forzata a 200 C°)

BIBLIOGRAFIA E NORMATIVE DI RIFERIMENTO

- [1] N.Slack, A.Brandon-Jones et al, Gestione delle operations e dei processi, Pearson, 2013.
- [2] UNI EN ISO 9000, Quality management systems -- Fundamentals and vocabulary, 2015.
- [3] UNI EN ISO 9001, Quality management systems -- Requirements, 2008.
- [4] UNI EN ISO 9004, Managing for the sustained success of an organization -- A quality management approach, 2009.
- [5] Douglas C. Montgomery, Controllo statistico della qualità, McGraw-Hill, 2006.
- [6] J.K. Liker, L. Attolico, The Toyota Way, Hoepli, 2014.
- [7] Toyota, «www.toyota-forklifts.it,» Toyota Forklifts, [Online]. Available: <http://www.toyota-forklifts.it/It/Academy/Toyota-Production-System/Jidoka/Pages/default.aspx>.
- [8] Peter S. Pande, Robert P. Neuman, Roland R. Cavanagh, The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance, McGraw-Hill Education, 2000.
- [9] CEI Comitato Elettrotecnico Italiano, CEI UNI 70099, «Vocabolario Internazionale di Metrologia,» [Online]. Available: <http://www.ceinorme.it/it/lavori-normativi-it/vim.html>.
- [10] UNI EN ISO 10012, Measurement management systems -- Requirements for measurement processes and measuring equipment, 2003.
- [11] BS ISO 5725-2, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method, 1994.
- [12] SINAL, Sistema Nazionale per l'Accreditamento di Laboratori, «Guida Al Calcolo Della Ripetibilità Di Un Metodo Di Prova Ed Alla Sua Verifica Nel Tempo,» [Online]. Available: http://www.accredia.it/UploadDocs/321_DT0002_6rev0.PDF.

- [13] UNI EN ISO 14253-2, «Geometrical product specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification,» 2011.
- [14] E.Sperindio, «Modello economico per a gestione industriale delle attività metrologiche,» Università degli studi di Padova, 2011.
- [15] UNI EN ISO 14253-1, Geometrical product specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications, 1999.
- [16] E.Savio, «A methodology for the quantification of value-adding by manufacturing,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, n. 1, pp. 503-506, 2012.
- [17] G.Malagola; A.Ponterio, La metrologia dimensionale per l'industria meccanica, Augusta, 2004.
- [18] L.De.Chiffre et al, «Quantitative Characterisation of surface texture,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 49, n. 2, pp. 635-642 644-652, 2000.
- [19] UNI EN ISO 4287, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters, 1998.
- [20] UNI EN ISO 4287, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters, 1998.
- [21] UNI EN ISO 13565-2, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties -- Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve, 1998.
- [22] DIN 4772, Electrical Contact (Stylus) Instruments For The Measurement Of Surface Roughness By The Profile Method, 1979.
- [23] UNI EN ISO 12179, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Calibration of contact (stylus) instruments, 2000.

- [24] UNI EN ISO 4288, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Rules and procedures for the assessment of surface texture, 1998.
- [25] UNI EN ISO 11124, Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Specifications for metallic blast-cleaning abrasives, 1997.
- [26] J.Graystone; R.Kennedy, «Non destructive measurement of coating adhesion,» *Surface Coatings International*, n. 8, pp. 389-398, 2000.
- [27] H.J. Rooper, «The effect of peak count of surface roughness on coating performance,» *The Journal of Physical Chemistry Letters*, pp. 52-64, 2005.
- [28] UNI EN ISO 9227, Corrosion tests in artificial atmospheres -- Salt spray tests.
- [29] UNI EN ISO 4624, Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion, 2016.
- [30] S.Khorasanizadeh, «The effect of shor and grit blasting process parameters on steel pipe coating adhesion,» *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, vol. 4, n. 6, pp. 513-521, 2010.
- [31] Pietro Fiorentini SPA, «http://www.fiorentini.com/it/it/chi_siamo,» [Online].
- [32] R.M. Montereali, G. Baldacchini, F. Bonfigli, M.A. Vincenti, «Il microscopio confocale a scansione laser: uno strumento versatile per la caratterizzazione di microdispositivi e nanostrutture,» Servizio Edizioni Scientifiche - ENEA, Frascati (RM), 2008.