



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2024

**Analisi dei parametri che influenzano la
qualità e l'efficienza di un processo di
saldatura laser di un materiale plastico**

Relatore:

Prof. Franceschini Fiorenzo

Candidato:

Incorvaia Alessio

Indice

Ringraziamenti	5
Lista degli acronimi	6
INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO	7
CAPITOLO 1 – AZIENDA OSPITANTE E PRODOTTI REALIZZATI	8
1.1 Il Quality Management in Continental Brakes Italy	9
1.1.1. Gestione della risposta ai reclami cliente	10
1.2. Tipologie di freni.....	12
1.3. Freni a tamburo	14
1.4. Freno a tamburo SiC-M – Caratteristiche e componenti	16
1.4.1. Cilindretto idraulico (wheel cylinder)	17
1.4.2. Piatto porta freno (Backplate)	19
1.4.3. Ganasce	20
1.4.4. Tamburo	21
1.4.5. Autoregistro	22
1.4.6. Abutment	23
1.4.7. Freno di stazionamento	23
1.4.8. Il modello SiC M	24
1.4.9. MGU – Motor Gear Unit	25
CAPITOLO 2 – DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI SALDATURA LASER E IMPATTO DELLA TRASPARENZA	28
2.1. Descrizione del prodotto	28
2.1.1. Processo produttivo.....	31
2.2. La saldatura laser	32
2.2.1. Descrizione del processo	33
2.2.2. Tipologie di saldatura	35
2.2.3. Tipologie di laser	36
2.3. La saldatura laser nei materiali plastici.....	36
2.3.1. Gli effetti dei parametri di saldatura	37
2.4. Il concetto di trasparenza e la correlazione con la saldatura laser	40
2.4.1. Misurare la trasparenza.....	41
2.4.2. Fattori che influenzano la trasparenza dei materiali plastici	42
2.5. Il processo di saldatura laser in Continental.....	44
2.5.1. Non conformità rilevate durante il processo.....	47
CAPITOLO 3 – PROGETTO DELL’ESPERIMENTO E RISULTATI OTTENUTI.....	49
3.1. Letteratura sui modelli di regressione	50

3.1.1. Valutazione della bontà del modello	53
3.1.2. Verifiche di ipotesi	54
3.2. Process Capability Analysis e indici di capacità di processo.....	55
3.2.1. Indice Cp.....	55
3.2.2. Indice Cpk.....	56
3.3. Metodologie di misura e strumenti utilizzati.....	57
3.3.1. Misurazione della trasmittanza delle cover.....	57
3.3.2. Misurazione della geometria di cover e housing.....	60
3.4. Confronto tra lotto difettoso e lotto conforme.....	63
3.5. Confronto tra i due fornitori.....	64
3.6. Costruzione del modello di regressione.....	67
3.6.1. Utilizzo del software Minitab	69
3.6.2. Costruzione del modello.....	70
3.6.3. Analisi dei residui.....	81
3.6.4. Interpretazione del modello.....	85
CAPITOLO 4 – PROGETTAZIONE DI UN CONTROLLO DI ACCETTAZIONE IN ARRIVO PER LE COVER.....	87
4.1. Letteratura sui controlli di accettazione	87
4.1.1. Parametri di un controllo di accettazione.....	88
4.1.2. Piano per attributi.....	89
4.1.3. ATI (Average Total Inspection)	93
4.1.4. Piano di accettazione per variabili	94
4.2. Applicazione al caso di studio	96
4.2.1. Stima dei parametri	96
4.2.2. Piano per attributi.....	98
4.2.3. Piano per variabili.....	101
4.2.4. Confronto tra i due piani	103
Conclusioni	104
Riferimenti bibliografici	105

Ringraziamenti

Torino, Aprile 2024

Lo sviluppo di questa tesi segna la fine del mio percorso universitario, fatto di alti e bassi e durato sei anni in cui ho avuto la fortuna di conoscere persone meravigliose con cui ho condiviso molto sia dentro che fuori l'ambiente universitario.

Sfrutto questa pagina per ringraziare tutti coloro che mi hanno supportato durante questi anni. In primo luogo, vorrei ringraziare i miei genitori e i miei fratelli essendo i primi a supportarmi e consigliarmi nei momenti in cui ne ho avuto bisogno.

Vorrei anche ringraziare il mio coinquilino fraterno Mehdi, per aver reso questo percorso più leggero e spensierato avendo condiviso feste, viaggi, uscite ed esperienze e mi ha fatto conoscere persone meravigliose con cui ho condiviso tanto in questi anni.

Un ringraziamento speciale va anche a Continental Cairo, azienda dove ho avuto il piacere di svolgere il tirocinio curriculare. In particolare, ringrazio la mia tutor aziendale Nadia per tutto quello che mi ha insegnato e trasmesso in questi mesi e per la sua immensa disponibilità. Ringrazio anche Ricky e Mirko per aver contribuito a rendere i mesi trascorsi in azienda molto piacevoli non facendo mai mancare risate e momenti gioiosi. Ringrazio anche Federico per avermi proposto l'argomento di questa tesi e assistito durante lo sviluppo. E, infine, ci tengo a ringraziare tutto il team di qualità di Continental Cairo per tutti questi mesi trascorsi in azienda.

Infine, vorrei ringraziare il Professore Fiorenzo Franceschini per avermi fatto sia da tutor accademico per il mio tirocinio che da relatore per questa tesi e, soprattutto, per avermi fatto appassionare ed incuriosire a temi relativi all'Ingegneria della Qualità.

Lista degli acronimi

ISO: International Organization for Standardization

IATF: International Automotive Task Force

CSL: Control shipping level

TQM: Total Quality Management

SQM: Supplier Quality Management

EPB: Electronic Parking Brake

MGU: Motor Gear Unit

Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

AQL: Acceptable Quality Level

LTPD: Lot Tolerance Percent Defective

AOQ: Average Outgoing Quality

ATI: Average Total Inspection

LSL: Lower specification limit

USL: Upper specification limit

VIF: Variance Inflation Factor

INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

Il nucleo centrale di questo studio riguarda il processo di saldatura laser applicato a due componenti in materiale plastico. In particolare, uno di questi componenti ospita la motrice responsabile dell'azionamento elettrico del freno a mano nelle autovetture, tale componente è chiamato housing. L'altro componente, invece, è chiamato cover ed è incaricato di racchiudere la suddetta motrice. Durante il processo di saldatura, si è riscontrato che alcune cover, le quali devono presentare una trasparenza sufficiente al laser, vengono bruciate anziché saldate regolarmente.

Il primo obiettivo di questa tesi consiste nell'indagare se la bassa trasparenza delle cover costituisca la causa principale di questa non conformità. Ciò è stato possibile grazie all'utilizzo di uno strumento in grado di misurare la trasparenza di un materiale. Una volta confermato il ruolo della trasparenza come causa della non conformità nel processo, il passo successivo sarà definire un valore minimo di trasparenza da includere nei requisiti per i fornitori.

Considerando l'aumento della domanda di freni EPB, l'azienda è interessata a identificare i parametri che influenzano il tempo di saldatura al fine di ridurlo e, di conseguenza, aumentare la produttività della saldatrice. Sono stati analizzati diversi parametri, tra cui la provenienza dell'housing e le caratteristiche geometriche dei componenti sottoposti a saldatura. L'impatto di tali parametri è stato valutato mediante la costruzione di un modello di regressione multipla.

Infine, come azione di contenimento per gestire la problematica della bruciatura delle cover durante la saldatura, è stato progettato un piano di accettazione in arrivo delle cover. Questo piano ha lo scopo di limitare i danni in termini di costi e tempi causati dalla bruciatura delle cover, garantendo così la conformità e la qualità dei componenti utilizzati nel processo di produzione dei freni EPB.

CAPITOLO 1 – AZIENDA OSPITANTE E PRODOTTI REALIZZATI

L'azienda Continental AG è stata fondata nel 1897 ad Hannover, dove ha ancora oggi la sua sede principale. Originariamente nata come una modesta società produttrice di pneumatici chiamata Neue Hannoversche Gummi-Waarenfabrik, Continental è ora uno dei principali fornitori internazionali per l'industria automobilistica. Nel 2022, ha registrato un fatturato di 39,4 miliardi di euro, confermandosi tra i leader mondiali nella produzione di pneumatici, sistemi di frenata, sistemi di controllo di stabilità del veicolo e altre componenti automobilistiche. La sua presenza globale è garantita da uffici e impianti produttivi distribuiti in tutto il mondo.

La struttura aziendale del gruppo Continental è articolata in sei divisioni:

- Chassis & Safety
- Powertrain
- Interior
- Passenger & Light Truck Tires
- Commercial Vehicle Tires
- ContiTech

Riconosciuta come il quarto più grande produttore di pneumatici a livello mondiale, il primo in Germania e il secondo in Europa, Continental si distingue anche come il principale produttore mondiale di freni e sistemi di frenata ABS e ASC. Occupa la quinta posizione tra i fornitori dell'industria automobilistica.

Uno degli obiettivi chiave di Continental è la riduzione del consumo di carburante, realizzata attraverso sistemi d'iniezione ad alta efficienza, pneumatici a basso consumo e sistemi di propulsione ibrida.

Il portafoglio di marchi di pneumatici di Continental comprende nomi come Continental, Uniroyal, Semperit, Barum, General Tire, Euzkadi, Viking, Gislaved, Mabor e Matador. Nel mercato nordamericano, i marchi Continental, General ed Euzkadi sono ampiamente riconosciuti.

Contrariamente ad altri produttori di pneumatici, la produzione di questo componente principale non costituisce più del 30% dell'attività complessiva di Continental. Infatti, la Continental Automotive Systems rappresenta la divisione più grande in termini di fatturato, focalizzandosi sulla produzione di freni, programmi elettronici di stabilità (ABS...) e, in generale, componenti elettronici per veicoli.

ContiTech, un'altra divisione chiave, gestisce diverse unità che producono una vasta gamma di articoli basati su componenti in gomma, destinati all'industria automobilistica e non solo. Questi includono cinghie di trasmissione, sospensioni pneumatiche, nastri trasportatori, interni di arredamento auto, manicotti e blocchi antivibrazioni.

La Continental Brakes Italy è parte integrante della divisione Chassis & Safety, concentrata in particolare nella Business Unit Hydraulic Brake Systems (HBS).

La storia della Continental Brakes Italy inizia nel 1984 con il nome di Automotive Products Italia (AP) S.r.l., un'azienda nata come fornitore esclusivo del gruppo Fiat per i servizi di outsourcing dei processi aziendali. Questo legame monogamo con il gruppo Fiat è proseguito fino al 1997, quando gran parte della produzione consisteva in sistemi frenanti destinati a vetture e veicoli commerciali del gruppo.

A partire dal 1998, l'azienda ha intrapreso una nuova strategia aziendale volta a diversificare la sua base clienti, portando a una notevole espansione dell'azienda sia in termini di dimensioni fisiche che di numero di dipendenti.

L'attività principale svolta nello stabilimento di Cairo Montenotte (SV) si concentra sulla progettazione e produzione di freni a tamburo destinati all'equipaggiamento di automobili e veicoli commerciali. Questi freni a tamburo hanno equipaggiato un vasto parco veicoli e sono stati montati di serie su molti veicoli attualmente in circolazione o in produzione. Tra i marchi automobilistici che hanno utilizzato o utilizzano ancora questi freni troviamo Fiat, Lancia, Ford, Mazda, Renault, Nissan, Opel, Toyota, Land Rover, Volkswagen, BMW, Skoda. Inoltre, questi freni possono essere installati su veicoli che originariamente non erano equipaggiati con freni Continental al primo impianto.

Oggi, lo stabilimento produttivo di Cairo Montenotte è un punto di riferimento a livello europeo per la progettazione e produzione di freni a tamburo. Nel 2007, l'azienda è stata acquisita dal gruppo Continental. Questa acquisizione ha portato a un cambiamento di nome, da Automotive Products Italia S.r.l. a Continental Brakes Italy S.p.a., come è conosciuta oggi.

1.1 Il Quality Management in Continental Brakes Italy

Le aziende del settore Automotive, visti gli alti costi di non qualità, hanno adottato approcci di gestione della qualità sempre più mirati al raggiungimento dell'obiettivo zero difetti. Oltre a ragioni legate ai costi, le aziende appartenenti al settore Automotive devono periodicamente dimostrare che i loro processi e prodotti siano conformi non solo alle norme ISO 9001 ma anche alle norme IATF 16949. IATF sta per "International Automotive Task Force", un gruppo formato da costruttori di automobili e le loro rispettive associazioni commerciali con l'obiettivo di migliorare sia la qualità dei prodotti che la soddisfazione del cliente all'interno dell'industria automobilistica globale. Possedere la certificazione IATF 16949 è un requisito necessario per essere fornitore delle maggiori case automobilistiche.

Per tali ragioni, Continental Brakes Italy si serve degli approcci di gestione della qualità che si avvicinano sempre di più al TQM (Total Quality Management). Il Total Quality Management (TQM) è un approccio alla gestione della qualità che si concentra sull'obiettivo di migliorare continuamente la qualità di tutti i processi, prodotti e servizi di un'organizzazione, coinvolgendo

tutti i suoi membri, dalla direzione ai dipendenti di ogni livello. Il TQM si basa sul principio che la qualità non è solo responsabilità del dipartimento di controllo qualità, ma di ogni singolo membro dell'organizzazione.

Per adottare questo approccio, il reparto qualità dell'azienda è così suddiviso:

- **Qualità cliente (*Customer Quality*):** Ha lo scopo di garantire il rispetto dei requisiti qualitativi richiesti dai clienti durante la fase di sviluppo e industrializzazione dei nuovi prodotti e assicurare l'assistenza tecnico/qualitativa alla clientela durante la produzione di serie e nel periodo di garanzia dei prodotti esistenti.
- **SQM (*Supplier Quality Management*):** riguarda la gestione e il controllo della qualità dei fornitori. Questo processo include la valutazione dei fornitori per assicurare che i loro prodotti o servizi rispettino gli standard di qualità richiesti, il monitoraggio delle performance dei fornitori, e l'attuazione di azioni correttive quando necessario. L'SQM è fondamentale per prevenire problemi di qualità nella catena di approvvigionamento e per assicurare che i materiali o servizi acquistati contribuiscano alla creazione di prodotti di alta qualità.
- **Qualità interna/Qualità prodotto:** Si occupa delle politiche, procedure, e attività volte a monitorare e migliorare la qualità dei processi interni di un'organizzazione. Questo include il controllo della produzione, il monitoraggio della conformità ai requisiti di qualità, l'implementazione di miglioramenti continui nei processi aziendali e la riduzione degli sprechi.
- **Qualità sistema:** Si concentra sulla creazione e implementazione di tutte le procedure necessarie a rispettare i requisiti di qualità dell'azienda. Tali funzioni possono riguardare manuali della qualità, procedure operative standard (SOP), istruzioni di lavoro e registrazioni di qualità, conduzione di audit interni e, soprattutto, verificare che l'azienda soddisfi i requisiti per il conseguimento delle certificazioni necessarie.
- **Laboratorio metrologico:** supporta le altre funzioni di qualità fornendo dati accurati necessari per valutare la conformità del prodotto e per implementare miglioramenti.

Tutti questi apparati sono tra loro complementari e sono sotto la responsabilità del Quality Manager che, a sua volta, è sotto la responsabilità del direttore di stabilimento (Plant Manager).

1.1.1. Gestione della risposta ai reclami cliente

Quando un cliente lamenta un reclamo, questo viene segnalato al reparto Qualità Clienti che, istantaneamente, emette un "quality alert" nelle linee di produzione coinvolte, segnalando così all'azienda la ricezione di un reclamo da parte del cliente. Il quality alert ha il compito di informare

la linea che ha prodotto quel freno e tutti gli attori interessati della non conformità segnalata dal cliente e le azioni di contenimento da adottare. Una volta emesso il quality alert, viene identificata la causa del difetto e le azioni correttive da intraprendere attraverso strumenti di problem solving come i moduli 8D. Inizialmente sviluppato da Ford il metodo 8D è lo strumento più usato per il problem solving nell'industria automotive e non solo. Il processo 8D segue otto passaggi disciplinati, ognuno dei quali ha un obiettivo specifico:

1. **Formare il Team:** Creazione di un gruppo di lavoro con le competenze necessarie per affrontare e risolvere il problema.
2. **Descrivere il Problema:** Fornire una descrizione dettagliata del problema, includendo tutte le informazioni rilevanti per comprenderne le cause e l'impatto.
3. **Implementare azioni di contenimento immediate:** Mettere in atto misure temporanee di contenimento per prevenire l'aggravarsi del problema, mentre si lavora alla sua risoluzione definitiva.
4. **Determinare la Causa Principale o Root Cause:** Analizzare il problema per identificarne la causa radice. Questo può includere l'utilizzo di tecniche di analisi delle cause come il diagramma di Ishikawa o il metodo delle 5 Why's.
5. **Definire e Verificare le Azioni Correttive Permanenti:** Sviluppare e implementare azioni correttive che affrontano la causa radice del problema per prevenire che si ripresenti.
6. **Implementare le Azioni Correttive:** Mettere in pratica le azioni correttive decise, monitorando attentamente l'implementazione per assicurarsi che siano efficaci.
7. **Prevenire la Ricorrenza:** Modificare i processi, le politiche e le procedure necessarie per assicurarsi che il problema non si ripresenti in futuro. Questo può includere la formazione del personale o cambiamenti nella progettazione dei prodotti.
8. **Congratulare il Team:** Riconoscere e premiare gli sforzi del team per il loro impegno e il successo nel risolvere il problema.

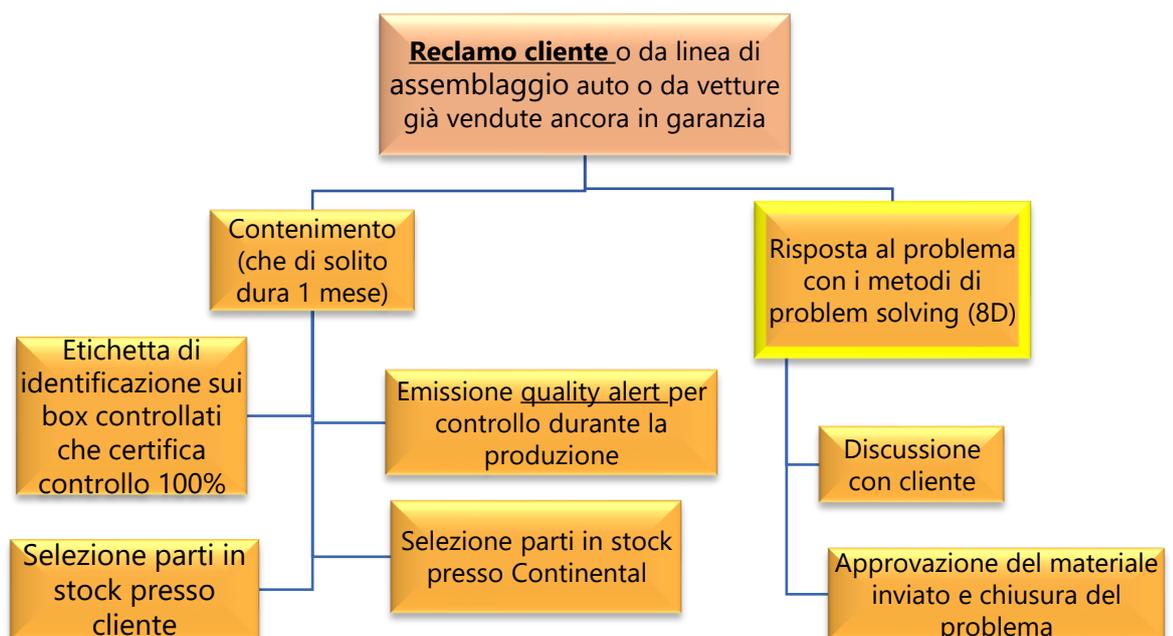


Figura 1.1: Schema della gestione dei reclami dei clienti in Continental Brakes Italy

Nel caso in cui l'individuazione della causa radice/implementazione delle azioni correttive non sia abbastanza rapida o soddisfacente per il cliente, il cliente stesso può decidere di imporre controlli aggiuntivi sul materiale che viene spedito, tali controlli prendono il nome di CSL (Controlled shipping level); durante il periodo di applicazione del CSL, il fornitore deve realizzare, limitatamente alle caratteristiche concordate, un controllo aggiuntivo al 100% sui particolari prodotti, effettuato su postazioni di controllo aggiuntive e dedicate e con personale addestrato. Tali controlli si suddividono in tre livelli, in base alla gravità del difetto:

- **Controlled Shipping Level 1 (CSL1):** Processo di controllo imposto dal cliente al fornitore che ne cura l'esecuzione (come concordata con cliente)
- **Controlled Shipping Level 2 (CSL2):** Processo di controllo imposto dal cliente al fornitore, che è tenuto a dotarsi di una società terza accreditata dal cliente per l'esecuzione del controllo. In tal caso il fornitore dovrà mettere a disposizione della Società Accreditata un'area nella quale quest'ultima effettuerà i controlli aggiuntivi.
- **Controlled Shipping Level 3 (CSL3):** Nel caso di CSL3, vista l'incapacità del Fornitore di risolvere le cause radice delle non conformità riscontrategli, si richiede che esso assuma un Ente Certificatore accreditato di terza parte, il quale, oltre a tutte le attività richieste in un CSL2, fornirà supporto per una crescita della qualità del processo del Fornitore, e lo aiuterà ad eliminare le cause radice che hanno portato alle non conformità riscontrate.

1.2. Tipologie di freni

Un sistema frenante è composto da una componente fissa collegata al telaio e da una parte solidale alla ruota, costituendo così il freno. La sua funzione primaria è duplice: mantenere il veicolo in posizione durante lo stazionamento e rallentarlo o arrestarlo durante la marcia in caso di necessità.

I freni che sfruttano l'attrito radente, ovvero il contatto di strisciamento tra due superfici solide, vengono utilizzati sia per controllare che per arrestare il movimento. Questo avviene trasformando l'energia cinetica del veicolo in calore attraverso lo strisciamento tra un materiale d'attrito e una parte rotante del freno, che può essere un disco o un tamburo.

Per evitare surriscaldamenti del freno, che potrebbero compromettere le prestazioni, è fondamentale garantire una dissipazione efficace del calore. Durante la progettazione, devono essere considerate tutte le possibili condizioni di utilizzo: tempo asciutto, bagnato, caldo, freddo, sporco, umido, al fine di studiare soluzioni in grado di garantire una forza frenante adeguata in ogni scenario.

Le grandezze caratterizzanti un freno includono la forza di comando (o di azionamento), la corsa di lavoro e l'indice di comando, che rappresenta il prodotto tra la forza di comando e la corsa di lavoro. L'efficacia, definita come il rapporto tra la coppia di frenatura e l'indice di comando, e la regolarità, misurata dalla variazione della coppia di frenatura rispetto alla variazione del fattore di attrito, sono parametri chiave.

Gli obiettivi durante la progettazione di un freno includono una bassa forza di comando, un'elevata efficacia senza compromettere la sicurezza, una bassa regolarità per prestazioni costanti, una forma costruttiva semplice e un costo contenuto.

Le tipologie di freni attualmente utilizzate in ambito automotive sono i freni a disco rotante e i freni a tamburo ad espansione. Le caratteristiche principali che differenziano queste due tipologie includono l'efficacia, le forze di comando e la corsa di lavoro, la regolarità, l'usura, le caratteristiche costruttive, le condizioni di esercizio gravose e le condizioni ambientali.

In breve, le analisi e i confronti tra questi due tipi di freni considerano l'efficacia, la facilità di frenata percepita dal conducente, l'uniformità dell'usura, la complessità costruttiva, la performance in condizioni gravose e la resistenza alle influenze ambientali.

In *figura 1.2* vengono riassunte le principali tipologie di sistemi frenanti ad attrito radente

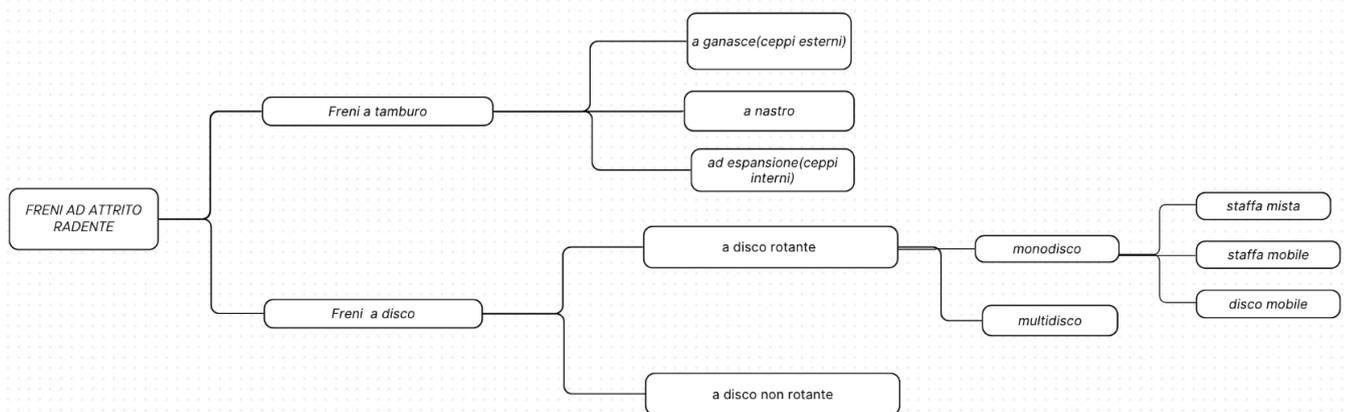


Figura 1.2 Classificazione delle diverse tipologie di freno ad attrito radente

I freni a tamburo sono comunemente utilizzati su veicoli leggeri ed economici, soprattutto sulle ruote posteriori. Questa scelta si verifica spesso in auto di fascia bassa o modelli con sospensioni posteriori più semplici. Veicoli commerciali pesanti, come camion e autobus, possono anche adottare freni a tamburo a causa della loro capacità di gestire carichi pesanti e frenate ripetute.

D'altra parte, i freni a disco sono impiegati principalmente sulle ruote anteriori di veicoli leggeri e medi. Questo offre una migliore sensibilità e prestazioni di frenata durante la guida normale. Veicoli sportivi e da competizione, nonché molte auto di fascia alta, utilizzano freni a disco su tutte e quattro le ruote per massimizzare le prestazioni di frenata e il controllo.

1.3. Freni a tamburo

Il freno a tamburo è un tipo di sistema frenante utilizzato nelle automobili e in altri veicoli. È un sistema più tradizionale rispetto al freno a disco, ma è ancora in uso su alcuni veicoli, soprattutto su quelli più economici e leggeri. Il sistema di frenatura a tamburo è composto principalmente da un tamburo, ossia un corpo di forma cilindrica solidale alla ruota, e da un complesso formato da una o più ceppi montate su un piatto, ancorato solidamente al veicolo, dette **ganasce**.

Le ganasce, gli elementi chiave del sistema, possono essere distinte in due categorie principali a seconda del verso di rotazione: avvolgenti e svolgenti. Nel caso di ganasce avvolgenti, la forza generata dal cilindretto spinge la ganascia verso il tamburo, facendola ruotare nella stessa direzione di quest'ultimo. Al contrario, le ganasce svolgenti ruotano nella direzione opposta al tamburo. La configurazione specifica dipende dalla progettazione del sistema e dalle esigenze di frenatura del veicolo.

In termini di montaggio, possiamo trovare freni a tamburo in diverse configurazioni, tra cui il tipo Simplex e il tipo Duplex. Nel caso del Simplex, si ha un ceppo avvolgente e uno svolgente, entrambi operati da un unico organo di comando. Questo design offre un funzionamento uniforme indipendentemente dal verso di rotazione. Nel Duplex, invece, sono presenti due ceppi avvolgenti, il che aumenta l'efficacia complessiva del freno, ma richiede due organi di comando. In situazioni di inversione di moto, il freno Duplex diventa a due ceppi svolgenti, riducendo leggermente l'efficacia.

Nel contesto automobilistico, il freno a tamburo di tipo Simplex è ampiamente utilizzato, caratterizzato dalla presenza di una ganascia avvolgente (primaria) e una svolgente (secondaria).

Un aspetto rilevante nella progettazione dei freni a tamburo è rappresentato dalla scelta tra ceppi a punti fissi o fluttuanti. Nel primo caso, i ceppi sono incernierati sul piatto, mentre nel secondo caso sono appoggiati su una superficie di riscontro mantenuta in contatto tramite una molla. Questa scelta influisce sul comportamento dinamico del sistema durante le operazioni di frenatura.

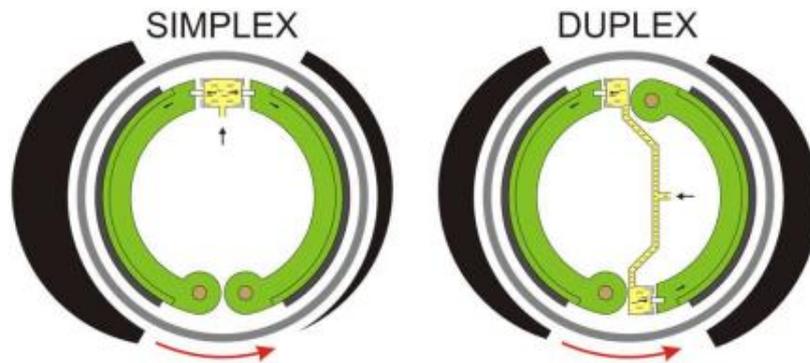


Figura 1.3 Schema del funzionamento simplex e duplex

Di seguito vengono riportati i pro/contro dei sistemi frenanti a tamburo.

Vantaggi del freno a tamburo:

1. Costo di Produzione:

I freni a tamburo sono generalmente meno costosi da produrre rispetto ai freni a disco. Questo può contribuire a ridurre il costo complessivo di produzione dei veicoli.

2. Maggiore Durata:

I freni a tamburo possono avere una durata più lunga in condizioni normali di guida. La loro costruzione chiusa offre maggiore protezione contro polvere, sporco e umidità, riducendo l'usura.

3. Controllo Termico:

In alcune situazioni, come in applicazioni pesanti o con guida costante, i freni a tamburo possono gestire meglio il calore rispetto ai freni a disco.

4. Design Compatto:

Il design compatto del freno a tamburo lo rende più adatto a essere integrato in spazi ristretti, rendendolo una scelta comune per le ruote posteriori di molti veicoli.

Svantaggi del freno a tamburo:

1. Prestazioni di Frenata:

In generale, i freni a disco offrono prestazioni di frenata superiori rispetto ai freni a tamburo. I freni a disco forniscono una migliore sensibilità e controllo durante la frenata, specialmente in condizioni di guida ad alte velocità.

2. Manutenzione e Sostituzione:

La manutenzione e la sostituzione delle ganasce freno e delle altre componenti interne del freno a tamburo possono essere più complesse rispetto ai freni a disco. Ciò potrebbe aumentare i costi di manutenzione.

3. Peso Aggiuntivo:

I freni a tamburo tendono ad essere più pesanti rispetto ai freni a disco. In applicazioni in cui il peso è un fattore critico, questo potrebbe essere considerato uno svantaggio.

4. Sensibilità e Risposta:

I freni a tamburo possono offrire una minore sensibilità e una risposta meno immediata rispetto ai freni a disco, specialmente in condizioni di guida più aggressive.

5. Tendenza all'Usura Irregolare:

A volte, i freni a tamburo possono mostrare una tendenza all'usura irregolare delle ganasce freno, il che potrebbe influire negativamente sulle prestazioni e sulla durata.

1.4.Freno a tamburo SiC-M – Caratteristiche e componenti

Il freno a tamburo EPB (Electronic Parking Brake) SiC-M, rappresenta un'innovazione nel settore dei freni a tamburo e, a differenza del freno a tamburo tradizionale, è dotato di un attuatore (EPB actuator) che consente l'azionamento automatico del freno a mano anziché manualmente tramite leva; in particolare, il conducente dà il comando di attivare il freno di stazionamento tramite un interruttore all'interno.

Di seguito viene riportata la distinta base del freno a tamburo di tipo SiC-M.

1. Cilindretto idraulico (wheel cylinder)
2. Molla superiore (upper spring)
3. Molla inferiore (lower spring)
4. Perno di ritegno della ganascia (shoe retaining pin)
5. Clip di ritegno della ganascia (shoe retaining clip)
6. Leva del freno a mano (hand brake lever)
7. Ganascia primaria (leading shoe)
8. Ganascia secondaria (trailing shoe)
9. Abutment
10. Piatto portafreno (backplate)
11. Autoregistro incrementale automatico (automatic incremental adjuster)

12. Tappo di ispezione (inspection plug)
13. Guida del cavo (Cable guide plate)
14. Supporto per l'attuatore (Bracket)
15. Attuatore incluso il cavo (MGU – Motor Gear Unit)

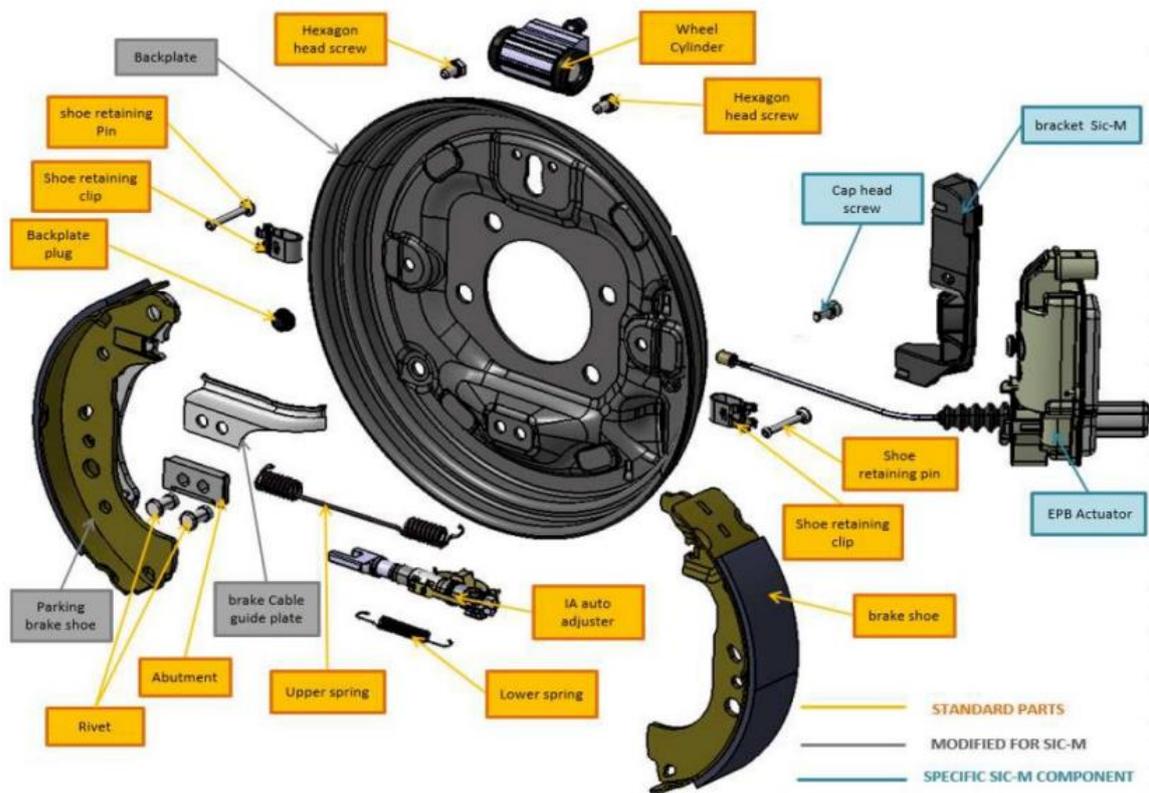


Figura 1.4 schema grafico della Bill of Material del Sic-M

Da quanto riportato dalla distinta base, le componenti del Sic – M sono le medesime del freno a tamburo tradizionale fatta eccezione dell'attuatore (MGU Motor Gear Unit).

1.4.1. Cilindretto idraulico (wheel cylinder)

Il cilindretto (Wheel cylinder) svolge il ruolo di cilindro idraulico responsabile della gestione dell'apertura delle ganasce, permettendo così l'esecuzione della frenata. La sua struttura è articolata nei seguenti elementi:

- **Corpo:** Il corpo è un cilindro realizzato in alluminio, con una parte posteriore piana progettata per adattarsi correttamente al pianetto corrispondente sul piatto, facilitando così la sua fissazione. Il lato piatto del cilindro presenta quattro fori: due per le viti di fissaggio, uno per l'alimentazione idraulica e uno per l'inserimento della vite di spurgo. Quest'ultima è fondamentale per eliminare l'aria compressa nel circuito idraulico, evitando problemi come una pressione insufficiente per aprire le ganasce o una risposta inadeguata del pedale del freno durante la frenata.
- **Pistoncini:** All'interno del corpo sono alloggiati due pistoncini, i veri attuatori del freno a tamburo. Questi pistoncini spingono le ganasce verso l'esterno quando il sistema è sottoposto a pressione. La porzione a contatto con le ganasce ha un diametro minore rispetto al corpo del pistoncino, che ha lo stesso diametro del corpo. Sul fondo, i pistoncini presentano un incavo che agevola l'entrata dell'olio, migliorando l'efficacia della spinta rispetto a un'applicazione su una superficie piana. Anelli di tenuta in materiale polimerico sono fissati sui pistoncini per garantire una tenuta ottimale del sistema.
- **Molla:** Una molla è inserita nel corpo per agevolare il ritorno dei pistoncini alla posizione di riposo dopo una frenata.
- **Cuffie:** Due cuffie, realizzate anch'esse in materiale polimerico, sono fissate tra le estremità dei pistoncini e il corpo del cilindretto. Queste cuffie fungono da barriera protettiva, preservando la camera di lavoro e le guarnizioni da eventuali contaminanti esterni che potrebbero compromettere il corretto funzionamento del sistema.
- **Vite di Spurgo:** Una vite di spurgo è incorporata nel cilindro attuatore per permettere la purga del circuito idraulico, evacuando l'aria compressa che potrebbe compromettere le prestazioni durante le frenate.



Figura 1.5 Esploso del cilidretto

1.4.2. Piatto porta freno (Backplate)

Il piatto porta freno (Backplate) è progettato per il supporto degli altri componenti del freno, ed è realizzato mediante un processo di profondo stampaggio dell'acciaio. La lamiera di acciaio utilizzata per la sua produzione è ottenuta attraverso un processo di laminazione a caldo e successivamente modellata tramite lavorazioni di stampaggio a freddo per conferirle la geometria finale desiderata. Lo spessore del piatto varia tipicamente tra 2.5 e 3.5 millimetri.

È importante notare che queste fasi di lavorazione iniziali avvengono al di fuori delle strutture dell'azienda, svolte dai fornitori. Una volta che i piatti giungono presso Continental Brakes Italy, vengono sottoposti a un processo di verniciatura in cataforesi. Questa tecnica prevede un trasferimento di corrente continua, e la tensione applicata varia in base allo spessore specifico desiderato, di solito oscillando tra i 200 e i 250 volt. Questo processo è discontinuo poiché il cestello che contiene i piatti passa attraverso diverse fasi di lavorazione, ognuna con i propri tempi.



Figura 1.6: Modello 3D del Backplate

Il piatto porta freno presenta una serie di caratteristiche e dettagli progettuali di notevole importanza, tra cui:

1. **Superfici d'appoggio per le ganasce:** Queste aree, comunemente denominate bugne o pianetti, sono zigrinate per favorire la corretta lubrificazione e garantire una superficie di attrito adeguata tra il piatto e le ganasce.
2. **Foro d'ingresso del cavo della leva del freno a mano.**
3. **Pianetto sede dell'abutment.**
4. **Pianetto sede del cilindretto.**
5. **Foro per le viti di fissaggio del piatto al mozzo della sospensione.**
6. **Foro di ispezione dell'usura delle ganasce (requisito di omologazione).**
7. **Foro di ispezione per la leva del freno a mano (se presente).**
8. **Foro per alloggiamento del sensore ABS (se previsto).**

1.4.3. Ganasce

Le componenti fondamentali del sistema frenante sono le ganasce, tecnicamente denominate **ceppi**, che costituiscono gli elementi responsabili della frenata. La loro funzione è premere contro la superficie interna del tamburo al fine di generare attrito, trasformando così l'energia cinetica in calore. Ogni ganascia è composta da tre parti principali: la costa, la fascia e il materiale d'attrito, comunemente noto come "**lining**."

La costa e la fascia, realizzate in materiale metallico, vengono unite tramite rivetti per creare la struttura portante della ganascia. Il materiale d'attrito, invece, viene applicato esternamente alla fascia e costituirà il punto di contatto con il tamburo. Questo materiale è attentamente progettato per fornire un elevato coefficiente di attrito e per ridurre al minimo l'usura, garantendo una distribuzione uniforme su tutta la superficie del lining.

Le ganasce si distinguono in primaria e secondaria: la ganascia primaria è situata nella parte anteriore del veicolo, mentre la ganascia secondaria è situata nella parte posteriore, considerando il veicolo come punto di riferimento. Le posizioni e lo spessore del materiale d'attrito sulle due ganasce possono variare poiché vengono progettati per resistere alle diverse sollecitazioni e livelli di usura. Di solito, durante una frenata in avanti, che rappresenta la maggior parte delle situazioni durante la vita utile del freno, le zone maggiormente coinvolte e soggette all'usura sono rispettivamente la parte superiore della ganascia primaria e la parte inferiore della ganascia secondaria.

Nei freni dotati del sistema EPB SiC-M, che prevede l'attuazione elettrica del freno di stazionamento, la leva del freno di stazionamento è montata sulla ganascia primaria e fissata tramite rivetti sulla sua costa. Questo tipo di configurazione è necessario poiché, in questi freni, l'attuatore è montato nella parte posteriore del piatto, e quindi il cavo del freno di stazionamento proviene dalla parte posteriore rispetto alla leva. Nel caso di freni di stazionamento manuali, invece, il cavo verrebbe tirato dalla parte anteriore del veicolo.

Le ganasce vengono fissate al freno attraverso clip elastiche che si agganciano su perni ancorati al piatto. Inoltre, esse sono supportate inferiormente dal reaction block, su cui esercitano pressione grazie a una molla inferiore, e superiormente dai pistoncini del cilindretto, mantenuti a contatto da una molla superiore.



Figura 1.7: Modello 3D delle ganasce

1.4.4. Tamburo

Il tamburo è una componente cilindrica e la sua funzione principale è fornire una superficie di contatto per le ganasce freno e contribuire al processo di frenata. Il tamburo svolge le seguenti funzioni:

- **Contenimento delle Componenti:** Il tamburo racchiude al suo interno altre componenti del sistema frenante a tamburo, come le ganasce freno, i pistoni e le molle. Questo design chiuso protegge tali componenti dall'ambiente esterno, compresi detriti, polvere, umidità e acqua.
- **Superficie di Contatto per la Frenata:** La superficie interna del tamburo funge da superficie di contatto contro cui le ganasce freno vengono spinte durante la frenata. Questa azione genera attrito tra le ganasce freno e la superficie interna del tamburo, che rallenta la rotazione del tamburo e, di conseguenza, delle ruote del veicolo, consentendo così di fermarsi in modo efficace.
- **Dissipazione del Calore:** Durante il processo di frenata, il tamburo assorbe e dissipa il calore generato dall'attrito tra le ganasce freno e la superficie interna. Questo contribuisce a prevenire il surriscaldamento del sistema frenante.

1.4.5. Autoregistro

L'autoregistro, introdotto recentemente nei freni a tamburo, non si focalizza principalmente sulla sicurezza, ma piuttosto sulla comodità di evitare interventi periodici per compensare l'usura.

L'aumento del gioco tra le ganasce e il tamburo deriva dall'usura progressiva del rivestimento delle ganasce, costituito da un materiale soggetto a usura. Questo fenomeno si traduce in un aumento della corsa del pedale del freno e, conseguentemente, in una maggiore escursione del pedale al crescere dell'usura delle ganasce. L'obiettivo di questo componente è proprio quello di prevenire questa problematica, mantenendo la distanza tra il rivestimento delle ganasce e la superficie interna del tamburo pressoché costante. In questo modo, si recupera il gioco creatosi a causa dell'usura del materiale d'attrito.

Le parti fondamentali di questo meccanismo includono:

1. Lama bimetallica
2. Molla a balestra
3. Settore filettato
4. Spindle

Il funzionamento regolare del sistema è garantito da un nottolino, una molla a balestra e un settore filettato. La lama bimetallica ha invece un ruolo di controllo. Durante situazioni in cui il freno viene sollecitato prolungatamente, ad esempio, in discesa su lunghe distanze, la temperatura potrebbe aumentare, causando una dilatazione del tamburo. Questo comporterebbe un aumento del gioco tra le ganasce e il tamburo. Se non ci fosse un dispositivo per bloccare l'auto-registro, quest'ultimo potrebbe recuperare tutto il gioco, causando il blocco del freno una volta raffreddatosi.

La lama bimetallica, costituita da due metalli con coefficienti di dilatazione termica differenti, si flette e si incastra su appositi ganci con l'aumento della temperatura. Questo blocca il funzionamento dell'auto-registro. La temperatura di attivazione di questa termoclip è compresa tra 70°C e 90°C.

Questa soluzione brevettata risolve in modo efficace il problema descritto senza comportare un significativo aumento dei costi del freno.

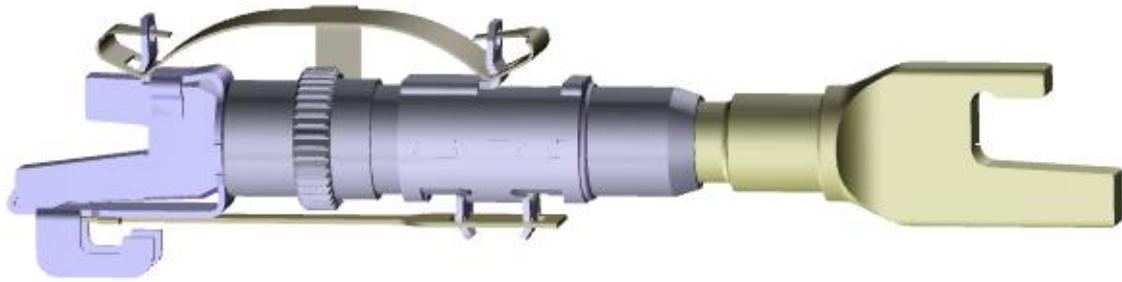


Figura 1.8: Modello 3D dell'autoregistro

1.4.6. Abutment

Il reaction block, noto anche come abutment quando rivettato sul piatto o come reaction block quando fissato tramite viti, ha la funzione di mantenere le ganasce saldamente posizionate sul loro fulcro durante il funzionamento. Questa presenza, combinata con l'azione della molla inferiore, consente al freno di operare senza la necessità di un perno aggiuntivo, evitando così un aumento dei costi e della complessità del sistema frenante.



Figura 1.9: Reaction block

1.4.7. Freno di stazionamento

Il freno di stazionamento, conosciuto anche con il nome di freno a mano, è una componente fondamentale dei veicoli a motore, è responsabile della sicura immobilizzazione dell'auto in situazioni di parcheggio. Nel corso degli anni, questo componente ha subito notevoli

trasformazioni, passando dalla tradizionale leva del freno a mano a soluzioni più avanzate, come il freno di stazionamento elettronico. Questo sistema rappresenta una significativa innovazione nel settore automobilistico, offrendo non solo funzionalità avanzate ma anche un maggiore livello di comfort e sicurezza per i conducenti.

Il freno di stazionamento elettronico si distingue dalla sua controparte tradizionale per la sua completa automazione. L'azione manuale di tirare una leva per attivare il freno di stazionamento è stata sostituita da un'interfaccia elettronica, spesso un pulsante posizionato all'interno dell'abitacolo. Questo sistema è alimentato da una centralina elettronica, che comunica con altri sistemi a bordo dell'auto, consentendo diverse funzionalità avanzate.

Uno dei vantaggi principali offerti dal freno di stazionamento elettronico è la funzione Auto-Hold. Questa caratteristica permette di mantenere l'auto in posizione ferma, senza dover tenere il piede sul pedale del freno, in situazioni come soste prolungate o quando si è fermi in una posizione inclinata.

Il funzionamento del freno di stazionamento elettronico si basa su due componenti principali: il cavo e la leva. Il cavo è costituito da fili d'acciaio intrecciati, avvolti secondo un modello specifico, a destra o sinistra a seconda del lato in cui è montato il freno. Questi fili sono protetti da una guaina. All'estremità del cavo è collegato un "nipple" che si aggancia all'uncino inferiore della leva. Quando si attiva il freno di stazionamento, il cavo viene tirato, mettendo in moto la leva.

La leva è collegata al fulcro della ganasce primaria e agisce sul settore filettato dell'autoregistro. Quest'ultimo è responsabile della trasmissione del movimento alla ganasce secondaria, causandone l'apertura. In questo processo, la ganasce primaria si apre allo stesso tempo. L'intero meccanismo è progettato in modo che la distanza tra le ganasce e il tamburo, conosciuta come "Total Shoes Center Clearance" (TSCC), rimanga sostanzialmente costante. Ciò consente di evitare il problema di un'escursione maggiore del pedale del freno man mano che il materiale d'attrito delle ganasce si consuma con l'usura.

1.4.8. Il modello SiC M

L'introduzione del freno a mano elettrico è resa possibile dalla presenza del sistema EBP SiC-M rappresenta un'evoluzione del modello tradizionale del freno a tamburo. La novità consiste nell'introduzione di un MGU (Motor Gear Unit) che rappresenta l'unità motrice che permette l'azionamento del freno di stazionamento in maniera elettrica. L'MGU viene fissato al resto del freno dal bracket, che funge quindi da interfaccia tra l'MGU e il piatto.



Figura 1.10: Il sistema EPB-SiC M



Figura 1.11: Bracket

1.4.9. MGU – Motor Gear Unit

Come precedentemente accennato, l'MGU (Motor Gear Unit) assume la responsabilità di attivare la leva del freno a mano e opera in corrente continua. Tale unità MGU è alloggiata in un contenitore in materiale plastico noto come "housing" ed è protetta da una copertura dello stesso materiale nota come "cover". Questi componenti sono uniti insieme tramite un processo di saldatura laser.



Figura 1.12: Modello 3D dell'MGU

Il fulcro centrale della motrice elettrica risiede nell'albero motore elettrico, che è responsabile della generazione del movimento rotatorio iniziale. Questo movimento circolare è poi trasformato in un movimento lineare attraverso l'impiego di un componente noto come "spindle." Lo "spindle" sfrutta un sofisticato meccanismo di ruota dentata elicoidale - vite senza fine per effettuare una riduzione della velocità dell'albero condotto, ottenendo così il movimento lineare desiderato.

Lo spindle è costituito da sei componenti principali:

1. **Madrevite:** Questo elemento si accoppia alla vite senza fine presente sull'albero del motore elettrico. L'accoppiamento avviene grazie ai denti esterni situati sul corpo della madrevite, i quali ingranano con la vite del motore elettrico grazie a un'inclinazione corrispondente all'angolo dell'elica della vite. In questo modo, la rotazione lungo l'asse dell'albero del motore elettrico viene convertita in una rotazione lungo una direzione perpendicolare, corrispondente all'asse della vite centrale. All'interno, la madrevite presenta una semplice filettatura per l'accoppiamento con la vite centrale stessa.
2. **Cuscinetto a sfere:** Questo cuscinetto si posiziona sopra la madrevite e viene fissato all'interno dell'housing. Il suo anello esterno si incastra nell'apposito slot dell'housing con un'accoppiatura leggermente interferente, mentre l'anello interno è accoppiato in interferenza con il corpo della madrevite, al di sopra della ruota dentata esterna.

3. **Cuscinetto assiale a rullini:** Questo componente si trova al di sotto della madre vite.
4. **Vite centrale:** La vite centrale funge da elemento di fissaggio per il cavo del freno di stazionamento, collegandolo tramite crimpatura. Questa vite ha il compito di convertire il moto rotativo della madre vite, controllato dal motore elettrico, in un moto lineare lungo il proprio asse. Ciò avviene grazie al corpo trilobato situato alla base della vite stessa, che si accoppia con il coperchio dell'housing. Questo coperchio presenta una sorta di cilindro anch'esso trilobato nella zona corrispondente, permettendo al corpo estremo della vite di scorrere senza ruotare grazie all'accoppiamento tra i lobi e le guide nel coperchio dell'housing.
5. **Molle a tazza:** Smorzano l'impatto generato dal ritorno della vite quando viene rilasciato il freno di stazionamento evitando possibili danni causati dall'usura.
6. **Coperchio**

L'intero sistema dell'MGU viene, infine, fissato al resto del freno grazie a dei fori presenti sulla parte esterna dell'housing. Infatti, tramite la presenza di tre attacchi posti nella superficie dell'housing è possibile fissare l'intero sistema al bracket.



Figura 1.13: Sistema EPB pronto all'assemblaggio



Figura 1.14: Intero freno EPB assemblato

CAPITOLO 2 – DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI SALDATURA LASER E IMPATTO DELLA TRASPARENZA

2.1. Descrizione del prodotto

Il tema di ricerca di questa tesi si concentra sulla cover dell'MGU. Come precedentemente illustrato nel capitolo 1, questo componente ha il compito di alloggiare l'MGU all'interno dell'housing, e queste due parti vengono unite tramite saldatura laser per racchiudere l'MGU.

Sul retro della cover, si individua una regione sporgente che ospita lo spindle del motorino. Inoltre, lungo i bordi della copertura sono presenti scanalature e piccole sporgenze che servono a garantire un perfetto accoppiamento tra la copertura stessa e l'housing.



Figura 2.1 modello 3D della cover

La cover è costituita da un materiale composito composto per il 70% da una matrice polimerica derivata dal Polibutilentereftalato (PBT), un termoplastico derivato dal petrolio e, per il restante 30%, da fibre di vetro. Il PBT si distingue per la sua notevole resistenza alle sollecitazioni dinamiche, all'abrasione e agli urti, nonché per l'elevata rigidità (con un modulo di trazione compreso tra 1.700 e 17.000 MPa) e un'ottima capacità di mantenere la sua forma anche in presenza di variazioni termiche significative.

L'integrazione di fibre di vetro in questa matrice polimerica comporta diversi vantaggi. Le fibre di vetro conferiscono al materiale una notevole resistenza meccanica, potenziando notevolmente la sua capacità di sopportare carichi e stress. Questa caratteristica lo rende particolarmente adatto per applicazioni in cui la robustezza riveste un ruolo fondamentale.

Inoltre, le fibre di vetro contribuiscono a limitare la deformazione termica del materiale, conferendogli una maggiore stabilità dimensionale in un intervallo di temperature più ampio. Questa proprietà è necessaria per applicazioni soggette a variazioni termiche considerevoli, come quando il materiale deve resistere a processi di saldatura a laser o altre sollecitazioni termiche.

L'aggiunta delle fibre di vetro conferisce al materiale un'eccellente resistenza chimica e ambientale, insieme a una notevole durabilità e capacità di sopportare fatiche meccaniche.

Infine, le fibre di vetro migliorano notevolmente la rigidità e la stabilità torsionale del materiale, contribuendo in modo significativo alla sua integrità strutturale. Questo lo rende un materiale ideale per una vasta gamma di applicazioni industriali che richiedono prestazioni affidabili e durevoli.

Le seguenti tabelle mostrano valori relativi alle caratteristiche chimico-fisiche del materiale

- **CARATTERISTICHE TERMICHE**

CARATTERISTICA	VALORE E UNITA' DI MISURA	CONDIZIONI DEL TEST	METODO DEL TEST
Temperatura di autoignizione	350 °C		ASTM D1929
Heat Deflection Temperature (HDT)	204 °C		ISO 75
Temperatura di decomposizione	> 290 °C		
Punto di fusione	223 °C		ISO 3146

Tabella 2.1: Caratteristiche termiche del materiale plastico della cover
(Fonte: <https://omnexus.specialchem.com/product/t-basf-ultradur-b-4300-g6-1t-bk15092>)

- **CARATTERISTICHE MECCANICHE**

CARATTERISTICA	VALORE E UNITA' DI MISURA	CONDIZIONI DEL TEST	METODO DEL TEST
Pendolo di Charpy	9.6 kJ/m ²	A 23 °C	ISO 179
Prova d'urto di Izod	9 kJ/m ²	A 23 °C	ISO 180
Modulo di flessione	9000 MPa	A 23 °C	ISO 178
Modulo di elasticità	10000 MPa	A 23 °C	ISO 527-2
Deformazione in rottura	2.5%	A 23 °C, in rottura	ISO 527-2
Punto di rottura in trazione	140 MPa	A 23 °C	ISO 527-2

Tabella 2.2: Caratteristiche meccaniche del materiale plastico della cover
(Fonte: <https://omnexus.specialchem.com/product/t-basf-ultradur-b-4300-g6-lt-bk15092>)

- **CARATTERISTICHE FISICHE**

CARATTERISTICA	VALORE E UNITA' DI MISURA	CONDIZIONI DEL TEST	METODO DEL TEST
Densità	1.53 g/cm ³		ISO 1183-2
Viscosity Number	102 cm ³ /g		ISO 1628
Assorbimento dell'umidità	0.2%		ISO 62
Assorbimento dell'umidità	0.4%		ISO 62

Tabella 2.3: Caratteristiche fisiche del materiale plastico della cover
(Fonte: <https://omnexus.specialchem.com/product/t-basf-ultradur-b-4300-g6-lt-bk15092>)

2.1.1. Processo produttivo

Il processo di stampaggio ad iniezione, impiegato per la produzione della cover, rappresenta una tecnica avanzata per la creazione di componenti tridimensionali in materiale plastico. Questo processo coinvolge due unità principali all'interno della macchina dedicata: il gruppo di iniezione e il gruppo di chiusura.

Il gruppo di iniezione è responsabile di diversi passaggi chiave. Prima di tutto, riscalda il materiale plastico fino a renderlo fuso e plastificato. Successivamente, spinge il materiale fuso con precisione all'interno dello stampo, un'azione solitamente eseguita da una vite senza fine o un pistone mobile noto come vite punzonante.

Contemporaneamente, il gruppo di chiusura mantiene lo stampo ben chiuso durante l'intera fase di iniezione, contrastando la notevole pressione generata dal gruppo di iniezione, che altrimenti potrebbe causare l'apertura accidentale delle due parti dello stampo.

All'interno del processo di stampaggio ad iniezione, le presse dedicate presentano una serie di componenti principali. Un piano fisso costituisce la base su cui è fissato uno dei semi-stampi, noto come semi stampo femmina o matrice. Il piano mobile, sul quale è fissato l'altro semi-stampo denominato punzone, si apre alla fine del processo di raffreddamento per permettere l'estrazione del componente stampato. Il piano mobile è supportato da un sistema di guida, tipicamente quattro colonne a sezione cilindrica, mentre le guide prismatiche sul basamento forniscono il supporto necessario per il peso.

Il meccanismo di chiusura dello stampo è spesso costituito da una ginocchiera azionata da pistoni idraulici. Un componente centrale è il "gruppo di plastificazione e iniezione," che incorpora una vite senza fine con profilo e sezione variabile. Questa vite si trova all'interno di un cilindro riscaldato elettricamente e può ruotare attorno al proprio asse, consentendo il caricamento e la fusione del materiale plastico. Inoltre, può spostarsi in avanti in modo assiale per iniettare il materiale fuso nella cavità dello stampo. Un ugello posizionato nella testa del cilindro permette l'iniezione del materiale attraverso un foro nello stampo.

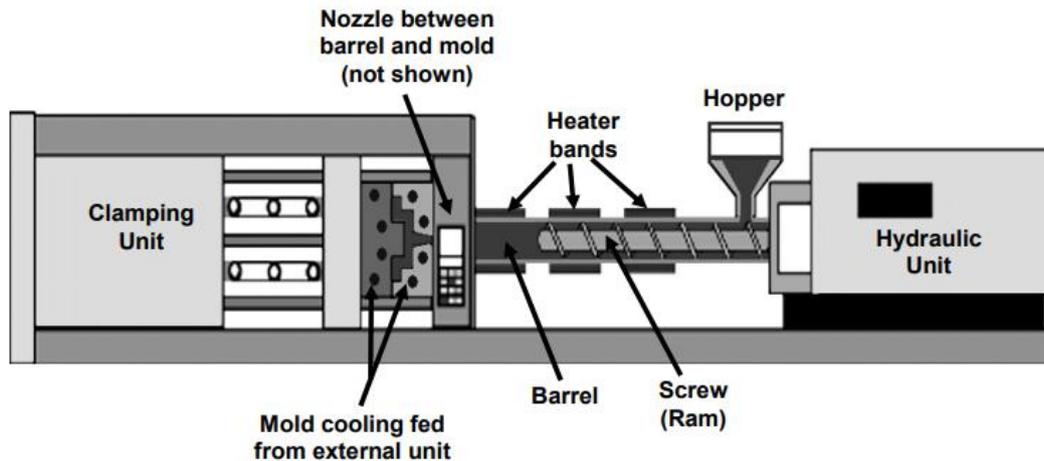


Figura 2.2: Schema del funzionamento della pressa per lo stampaggio ad iniezione

(Fonte: https://www.elettroplastsrl.it/allegati/documenti/stampaggio_ad_iniezione.pdf)

Il processo di stampaggio ad iniezione segue una sequenza di fasi ben definite. Comincia con la fase di plastificazione, in cui il materiale plastico viene fuso all'interno di un cilindro riscaldato. La macchina successivamente chiude lo stampo e raffredda il dado dello stampo in preparazione per l'iniezione. La fase di iniezione comporta l'inserimento controllato del materiale fuso nella cavità dello stampo. Dopo l'iniezione, il materiale si raffredda e si solidifica all'interno dello stampo, con il tempo di raffreddamento variabile in base alle dimensioni e alle proprietà del componente. Infine, la cover finita viene estratta quando il dado dello stampo si apre, con il processo di estrazione che può essere eseguito manualmente o automaticamente, in base alle specifiche dell'applicazione.

2.2. La saldatura laser

La saldatura laser, acronimo di "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation," è un avanzato processo di unione di metalli o materiali termoplastici mediante un raggio laser focalizzato.

Un laser è costituito essenzialmente da tre componenti principali:¹

1. **Mezzo attivo:** Materiale in cui viene generato il laser, contiene gli elettroni che verranno eccitati per la generazione dei fotoni
2. **Sistema di pompaggio:** Questo sistema fornisce energia al mezzo attivo, portandolo a uno stato eccitato in cui inizia a emettere fotoni. I metodi di pompaggio possono variare, ma in generale coinvolgono l'apporto di energia elettrica o ottica.
3. **Cavità ottica o risonatore ottico:** Questa è una parte cruciale del laser che serve a concentrare le radiazioni emesse dal mezzo attivo in un unico fascio coerente.

¹ Fonte: <https://it.wikipedia.org/wiki/Laser>

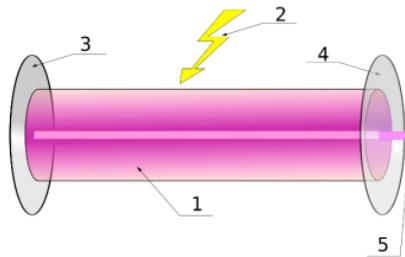


Figura 2.3 Componenti di un Laser:

- 1) Mezzo ottico attivo
- 2) Energia fornita al mezzo ottico
- 3) Specchio
- 4) Specchio semiriflettente
- 5) Fascio laser in uscita

(Fonte: <https://it.wikipedia.org/wiki/Laser>)

2.2.1. Descrizione del processo

Come già anticipato, la generazione del fascio di luce avviene dopo aver eccitato gli elettroni contenuti nel mezzo attivo e averli portati ad un livello energetico superiore grazie all'energia fornita dal sistema di pompaggio. L'eccitazione del mezzo attivo è solitamente ottenuta tramite un'azione elettrica o ottica, ad esempio attraverso l'uso di lampade stroboscopiche, diodi laser o altre fonti di eccitazione. La lunghezza d'onda dell'emissione laser è determinata dal tipo di mezzo attivo utilizzato, che può essere gassoso (come la CO₂ o miscele di elio e neon), liquido (come metanolo, etanolo o glicole etilenico con l'aggiunta di coloranti chimici) o solido (come il rubino, il neodimio o semiconduttori).

Gli elettroni eccitati, tuttavia, non rimangono nello stato eccitato ma ritornano nello stato energetico più basso. In questo preciso momento vengono rilasciati i **fotoni**, che producono energia pari alla differenza tra due stati energetici. I fotoni sono delle particelle prive di massa che costituiscono la radiazione elettromagnetica costituente il laser.

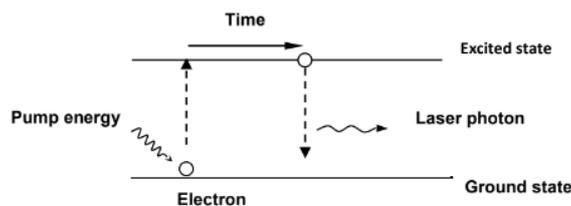


Figura 2.4: Schema raffigurante la generazione dei fotoni

(Fonte: AMADA WELD TECH INC. 2020, Laser Welding Fundamentals)

Infine, per assicurare l'unidirezionalità interviene la cavità ottica. La cavità ottica è costituita da pareti interne che sono riflettenti, tranne una che è semiriflettente. Questa superficie semiriflettente consente al raggio laser di uscire. Una volta fuori dalla cavità ottica, il raggio passa attraverso una serie di lenti e specchi che consentono di regolarne la posizione, la concentrazione e l'ampiezza.

Una volta generato il laser, è fondamentale concentrare il raggio su un'area ridotta della superficie dei materiali da unire. Questo passo è essenziale per massimizzare l'energia laser in un punto preciso e innalzare la temperatura dei materiali da saldare. L'essenza della saldatura laser consiste nell'assorbimento del laser da parte dei materiali, inducendo un incremento termico significativo.

Quando il raggio laser interagisce con la superficie da saldare, l'energia dei fotoni viene assorbita dal reticolo del materiale, provocando onde di calore che si diffondono attraverso il materiale per conduzione termica. L'assorbimento continuo dei fotoni alla fine conduce alla fusione dei materiali nel punto di focalizzazione del laser, facendo sì che passino dallo stato solido a quello liquido.

L'efficienza del processo di saldatura è strettamente legata alle caratteristiche del raggio laser, tra cui intensità, lunghezza d'onda, frequenza di pulsazione e divergenza. Inoltre, è influenzata dalle proprietà ottiche del materiale, come il coefficiente di assorbimento e di riflessione (o riflettività). Il coefficiente di assorbimento è dipendente dalla temperatura e dallo stato fisico del materiale. In generale, al crescere della temperatura del materiale solido, si registra un leggero aumento del coefficiente di assorbimento.

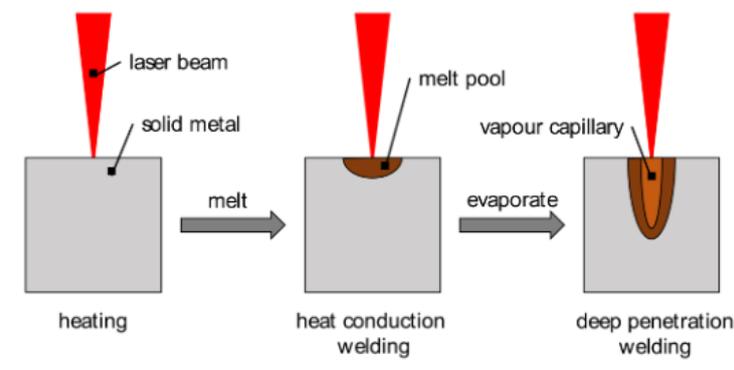


Figura 2.5: Schema illustrativo della formazione del giunto di saldatura

(Fonte: AMADA WELD TECH INC. (2020). Laser Welding Fundamentals)

Dopo la fase di fusione, quando il raggio laser viene spento o viene spostato, i materiali fusi iniziano a solidificarsi e raffreddarsi. Durante questo processo, i materiali si legano insieme, formando una saldatura solida.

2.2.2. Tipologie di saldatura

L'efficacia del laser nel processo di saldatura dipende strettamente dalla sua potenza, influenzando sia la qualità che le caratteristiche fisiche della saldatura prodotta sulla superficie di lavoro. La potenza del laser determina tre categorie principali di tecniche di saldatura:²

1. **Saldatura in modalità di conduzione:** Questa tecnica si avvale della minore intensità di potenza, specificatamente 0.5 MW/cm^2 . Tale livello energetico è adeguato a formare una saldatura caratterizzata da un'ampia e superficiale cavità. Il calore necessario per la fusione viene generato e trasferito alla superficie attraverso il punto di contatto.
2. **Modalità di transizione:** Con un incremento di potenza a 1 MW/cm^2 , si entra nella fase di transizione. Durante questa fase, le dimensioni della cavità di saldatura si espandono, formando ciò che è noto come "keyhole", ovvero una colonna di materiale vaporizzato che penetra verticalmente nel materiale da saldare. L'estensione del keyhole varia in base all'intensità della potenza applicata.
3. **Modalità di penetrazione:** Raggiungendo l'apice della densità di potenza a 1.5 MW/cm^2 , si ottiene una profondità e lunghezza maggiore del keyhole. Questo incremento di potenza non solo migliora la qualità della saldatura permettendo un keyhole più esteso, ma minimizza anche l'area affetta dal calore, riducendo l'impatto sul materiale circostante.

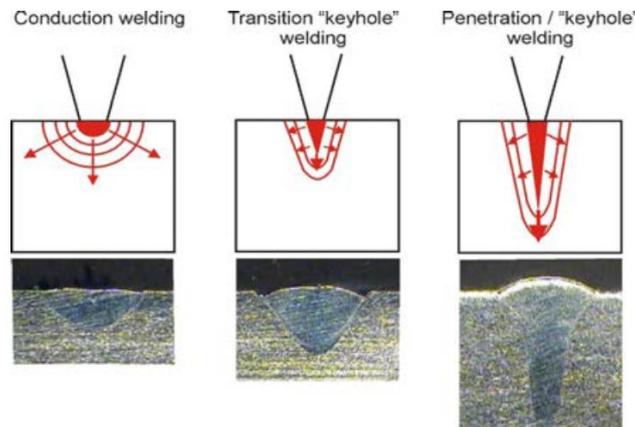


Figura 2.6: il punto di saldatura nelle diverse tipologie

(Fonte: AMADA WELD TECH INC. (2020). Laser Welding Fundamentals)

Oltre alla differenziazione in base alla potenza, le tipologie di laser variano anche considerando il modo in cui la potenza è erogata nel tempo. In questo contesto, si possono identificare due modalità principali: la modalità continua (**Continuous Wave, CW**), in cui la potenza del laser rimane costante nel tempo, generando un cordone di saldatura continuo sul materiale, e la modalità pulsata (**Pulsating Wave, PW**), che prevede l'emissione di impulsi di potenza invece di un flusso costante. Con la modalità pulsata, si ottiene una serie di punti di saldatura distanziati,

² Fonte: AMADA WELD TECH INC. (2020). Laser Welding Fundamentals

allineati in successione, la cui separazione è determinata dalla velocità di avanzamento e dalla frequenza degli impulsi.

2.2.3. Tipologie di laser

Esistono diverse tipologie di laser ampiamente impiegate nell'ambito industriale³:

- **Laser al CO₂**: Questa categoria di laser è tra le più comuni nell'industria, apprezzata per la sua elevata potenza di uscita. Questi dispositivi possono operare sia in modalità continuativa che pulsata, raggiungendo potenze fino a 20 kW in modalità continua. Quando sono impostati in modalità pulsata, possono produrre impulsi brevi, circa 0,1 millisecondi, con potenze di picco che superano fino a cinque volte quelle in modalità continua. Il loro funzionamento si basa sull'uso di un gas attivo composto da anidride carbonica, azoto ed elio, con l'anidride carbonica che funge da emettitore principale della radiazione laser. La lunghezza d'onda emessa da questi laser è tipicamente di 10,6 micron.
- **Laser Nd:YAG**: Appartenenti alla famiglia dei laser a stato solido, questi dispositivi sono realizzati con un materiale attivo, il granato di ittrio e alluminio (YAG), dotato di ioni di neodimio. Vengono eccitati da una lampada a flash, che trasforma l'energia luminosa in radiazione laser. La radiazione emessa ha una lunghezza d'onda di 1,06 micron e, in modalità pulsata, questi laser possono erogare potenze che arrivano fino a 5 kW, sebbene la potenza continua tipica si aggiri intorno a 1 kW.
- **Laser Excimer**: I laser Excimer si caratterizzano per l'emissione di impulsi brevi ad alta potenza e operano su lunghezze d'onda nell'ordine dei nanosecondi. Il nome "Excimer" proviene dall'abbreviazione di "dimeri eccitati", riferendosi a molecole biatomiche che si formano in uno stato energetico elevato. Questi dispositivi sono generati attraverso l'accoppiamento di fluoro con gas nobili quali argon, cripto o xeno. Una scarica elettrica in un ambiente ad alta pressione di questi gas permette la creazione delle molecole eccitate, le quali rilasciano energia sotto forma di radiazione elettromagnetica nel momento in cui ritornano allo stato di base. Introdotto più recentemente rispetto ad altre tecnologie, il laser Excimer ha trovato una vasta gamma di applicazioni, soprattutto nel settore medico.

2.3. La saldatura laser nei materiali plastici

La saldatura laser nei polimeri è diventata sempre più popolare negli ultimi anni, grazie agli sviluppi legati all'industria 4.0 e ai numerosi vantaggi che offre, tra cui flessibilità nel cambiare il design, velocità, efficienza, precisione e costi contenuti.

³ Fonte: Fragassa, C., Gregorio, S., & Fortunato, A. (2004). *Il Laser Nella Saldatura Industriale*.

Questo processo coinvolge due unità di materiale plastico: uno trasparente al laser e l'altro opaco e in grado di assorbire il raggio laser.

Il laser, generato attraverso il processo descritto precedentemente, viene indirizzato sulla parte trasparente del pezzo. Successivamente, la parte del raggio laser che attraversa il materiale trasparente viene assorbita dal materiale opaco, trasformandosi in calore. Questo calore causa la fusione delle superfici coinvolte, formando così la giunzione saldata.

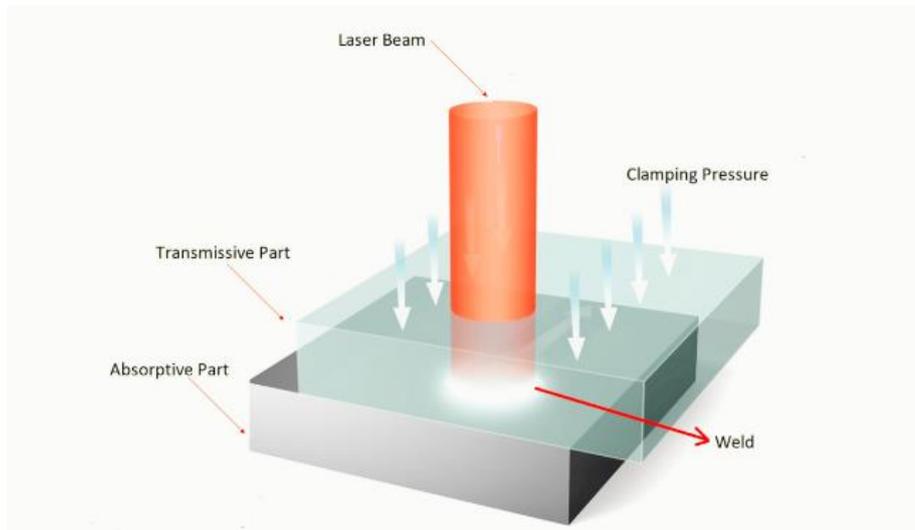


Figura 2.7: Schema del processo di saldatura laser tra due materiali plastici

(Fonte: Ghosh, R. LASER WELDING ON PLASTICS. LinkedIn, 2023)

2.3.1. Gli effetti dei parametri di saldatura

La scelta dei parametri di saldatura ha un effetto diretto sulla qualità e sulle prestazioni del processo di saldatura. Alcuni parametri sono caratteristici della saldatrice che si sta usando, come ad esempio la potenza del laser, altri invece, possono essere modificati in base alle esigenze. I parametri di saldatura che accomunano le saldatrici più diffuse sul mercato sono:⁴

- **Potenza del laser [W]**
- **Velocità di saldatura [mm/s]**
- **Lunghezza d'onda [nm]**
- **Diametro del fascio [mm]**
- **Pressione sullo stampo [Mpa]**

⁴ Fonte: Acherjee, B. (2021). Laser transmission welding of polymers – A review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications.

Potenza del laser

La potenza del laser è il parametro che influenza maggiormente la quantità di calore trasmessa alla superficie della saldatura. L'intensità (I_p), derivante direttamente dalla potenza del laser W con un fascio di diametro D , è definita dalla formula 2.1 [Rif. Bappa Acherjee, 2020]

$$I_p = \frac{4W}{\pi D^2} \quad (2.1)$$

Tale grandezza si misura in W/m^2 .

A seconda della potenza erogata, la superficie di saldatura può assumere quattro stati distinti⁵: nessuna fusione del materiale, fusione parziale, saldatura e saldatura con danneggiamento della superficie, corrispondenti a intensità molto bassa, bassa, media e alta, rispettivamente. La qualità della saldatura è fortemente influenzata dalla potenza applicata sulla superficie. Una potenza molto bassa non fornisce sufficiente energia per portare il materiale al punto di fusione e creare la giunzione, mentre valori di potenza eccessivi possono provocare un'eccessiva energia sulla superficie, portando alla sua bruciatura.

La potenza ottimale deve collocarsi in un valore intermedio, capace di formare la giunzione correttamente senza danneggiare la superficie. In particolare, esiste una soglia di potenza al di sotto della quale la forza della giunzione è massima. Allontanandosi da questo valore, la forza della giunzione e, di conseguenza, la qualità diminuiscono. Questa soglia corrisponde alla potenza necessaria per portare la superficie alla temperatura di fusione del materiale coinvolto.

Sebbene questo valore di potenza ottimale sia solitamente associato a un aumento della forza della giunzione, è importante notare che superare questa soglia può comportare una diminuzione della qualità della giunzione.

Velocità di saldatura

La velocità di saldatura indica la rapidità con cui il raggio laser si sposta lungo la linea di saldatura⁶.

Essa influisce direttamente sulla durata in cui la superficie è esposta al laser e quindi al calore. In questa relazione, l'energia assorbita dalla superficie e la velocità di saldatura si comportano in modo inversamente proporzionale.

Una velocità di saldatura troppo bassa può portare a un'eccessiva esposizione al calore, rischiando di bruciare la superficie. Al contrario, una velocità di saldatura molto alta potrebbe non garantire il tempo necessario per raggiungere il punto di fusione, rendendo il processo inefficace. Di solito, si

^{6,5}Fonte: Acherjee, B. (2021). *Laser transmission welding of polymers – A review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications.*

preferisce mantenere una velocità di saldatura più bassa per garantire una maggiore esposizione al calore. Questo può incrementare la profondità di penetrazione del raggio laser, generando giunzioni più robuste.

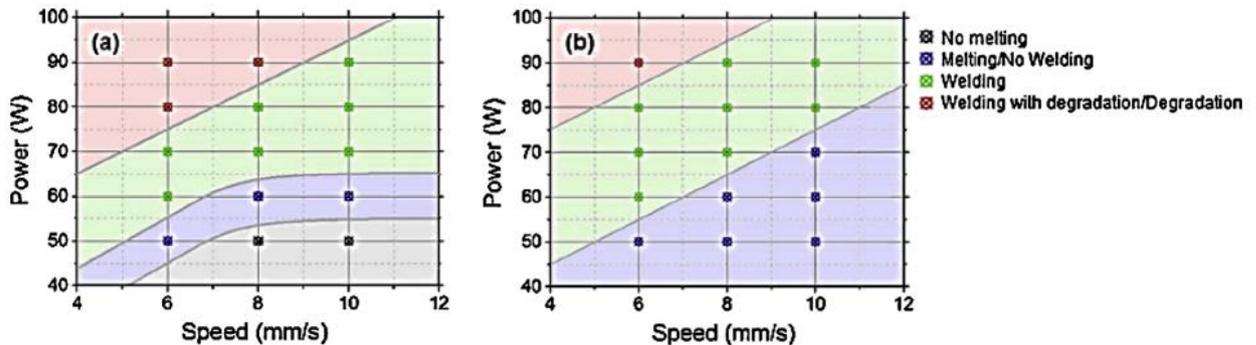


Figura 2.8: relazione tra potenza, velocità di saldatura e stato di saldatura

(Fonte: Acherjee, B. (2021). *Laser transmission welding of polymers – A review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications*).

I grafici presentati nella Figura 2.8 mostrano come, a parità di potenza erogata, la fase della saldatura progredisce riducendo la velocità, portando a un miglioramento della qualità, soprattutto in termini di profondità del giunto di saldatura, su *polietilene tereftalato (PET)* rinforzato con vari additivi.

Lunghezza d'onda

Per lunghezza d'onda di un raggio laser si intende la distanza tra due creste successive (o due vette) dell'onda luminosa. In altre parole, è la misura della distanza spaziale tra due punti identici su un'onda elettromagnetica, rappresentata dalla distanza tra i massimi della cresta.

La lunghezza d'onda è una delle proprietà più importanti di un laser in quanto molte proprietà ottiche del materiale da saldare dipendono proprio dalla lunghezza d'onda del laser, come ad esempio la trasparenza del materiale.

Il grafico sottostante mostra la relazione tra la lunghezza d'onda del laser e la percentuale di trasmissione dello stesso nel materiale

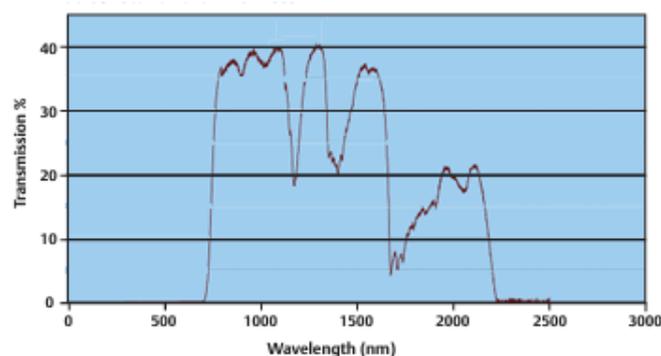


Figura 2.9: Relazione tra la lunghezza d'onda e la percentuale di trasmissione laser

(Fonte Branson Ultrasonics Corporation, 2016 *Laser Welding Technical Information*.)

Diametro del fascio

Il diametro del fascio laser influenza direttamente la forma della giunzione, determinando la sua qualità. Un fascio più ampio produce una giunzione più larga ma meno profonda, mentre un fascio più stretto crea una giunzione meno ampia ma più profonda, a parità di potenza e velocità di saldatura. Questo avviene perché diametri più piccoli concentrano una maggiore potenza per unità di superficie. I diametri più sottili non solo favoriscono una giunzione più profonda e resistente, ma migliorano anche la precisione della saldatura, coinvolgendo meno area del materiale, riducendo l'effetto dell'energia del laser.

Pressione applicata sullo stampo

Durante il processo di saldatura, si applica pressione tramite una morsetta per mantenere il pezzo stabile. Questa pressione può influire sulla distanza tra le particelle e la struttura cristallina del materiale, modellando la sua capacità di condurre il calore. Ad esempio, in alcuni solidi, una maggiore pressione avvicina le particelle, migliorando la trasmissione del calore. Questo favorisce la conduzione termica tra il polimero assorbente sottostante e quello trasparente sovrastante, agevolando il flusso del materiale fuso nella zona di saldatura. In molti processi di saldatura laser per materiali plastici, la pressione esercitata di solito oscilla tra 0.5 e 2.5 Mpa.

2.4. Il concetto di trasparenza e la correlazione con la saldatura laser

La trasparenza di un materiale è una proprietà fisica che consente alla luce di oltrepassare il materiale. Il comportamento della luce quando interagisce con la superficie di un materiale dipende dalle proprietà ottiche del materiale.

La proprietà inversa della trasparenza è l'opacità. I materiali opachi assorbono o riflettono la luce, invece di lasciarla passare, e quindi non permettono di vedere attraverso. Questa caratteristica è determinata dalla struttura interna del materiale e dalla sua interazione con specifiche lunghezze d'onda della luce.

In generale, quando un fascio di luce entra in contatto con la superficie di un materiale, possono verificarsi cinque diverse situazioni:

- 1. Riflessione:** È il processo attraverso il quale la luce che incide su una superficie viene rimandata indietro nel mezzo da cui proviene. La riflessione può essere speculare (come uno specchio, dove l'angolo di riflessione è uguale a quello di incidenza) o diffusa (come un muro bianco, dove la luce è dispersa in molte direzioni).
- 2. Trasmissione:** Si riferisce al passaggio della luce attraverso un materiale. Quando la luce attraversa un materiale trasparente, come il vetro, gran parte di essa passa all'altro lato

senza essere assorbita o riflessa significativamente. La trasmissione dipende dalla trasparenza del materiale e può essere influenzata da fattori come la lunghezza d'onda della luce e le proprietà ottiche del materiale.

3. **Assorbimento:** Questo fenomeno si verifica quando la luce che entra in un materiale viene assorbita dall'oggetto anziché passare attraverso di esso o essere riflessa. L'assorbimento dipende dalla natura chimica e fisica del materiale e dalla lunghezza d'onda della luce. Un materiale che assorbe tutte le lunghezze d'onda appare nero.
4. **Rifrazione:** Cambiamento della direzione di un'onda luminosa al passaggio tra due mezzi con diversa densità ottica, che modifica la velocità della luce.
5. **Diffusione:** Deviazione della luce in molteplici direzioni quando incontra particelle o irregolarità, causando fenomeni come il cielo azzurro o il colore rossastro dell'alba e del tramonto.

Il comportamento della luce durante l'interazione con un materiale è influenzato non solo dalle proprietà ottiche del materiale stesso, ma anche dalle caratteristiche del fascio luminoso, come lunghezza d'onda, frequenza ed energia. Questi fattori determinano come la luce viene riflessa, trasmessa, assorbita o diffusa dal materiale. Ad esempio, la lunghezza d'onda influenza l'assorbimento e la trasmissione della luce attraverso materiali trasparenti, mentre l'energia e la frequenza della luce possono determinare la natura e l'entità dell'interazione con le strutture atomiche e molecolari del materiale.

Di conseguenza, non esiste un materiale universalmente trasparente; la trasparenza dipende dalla lunghezza d'onda della luce che lo attraversa. Un materiale può essere trasparente a certe lunghezze d'onda, ma opaco ad altre.

2.4.1. Misurare la trasparenza

La trasparenza non è una caratteristica direttamente misurabile in termini quantitativi; invece, si calcola il coefficiente di trasmissione o **trasmittanza** per quantificare quanto un materiale sia "trasparente" ad una determinata lunghezza d'onda. Più è alto il valore della trasmittanza più il materiale è trasparente a quella lunghezza d'onda e viceversa.

La trasmittanza è definita come il rapporto tra l'intensità della luce che passa attraverso un materiale e l'intensità della luce incidente. Viene solitamente espressa in percentuale e indica quanta luce viene trasmessa attraverso il materiale.

Matematicamente, la trasmittanza T è data dalla formula:

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (2.2)$$

dove:

- I_t è l'intensità della luce trasmessa,
- I_o è l'intensità della luce incidente.

Per calcolare la trasmittanza, si misura prima l'intensità della luce incidente su un materiale I_o e poi l'intensità della luce che effettivamente passa attraverso il materiale I_t . Il rapporto tra queste due intensità, moltiplicato per 100, dà la trasmittanza in percentuale.

2.4.2. Fattori che influenzano la trasparenza dei materiali plastici

La trasparenza o trasmissione della luce visibile è caratterizzata dalla trasmittanza luminosa. Si tratta della percentuale di luce incidente trasmessa attraverso un campione standardizzato di plastica. Più alta è la percentuale di trasmittanza, maggiore è la trasparenza. Un materiale con buona trasparenza avrà un'elevata trasmittanza e una bassa opacità.

La trasparenza delle plastiche dipende dal tipo e dalla struttura del polimero/cristallinità, nonché dai tipi di additivi, riempitivi, coloranti, ecc., utilizzati.

In generale, i polimeri amorfi, come il policarbonato (PC) o polistirene (PS), sono generalmente più trasparenti rispetto ai loro omologhi cristallini o semi-cristallini a causa delle differenze nella loro struttura molecolare. In un polimero amorfo, la disposizione casuale e disordinata delle molecole impedisce la formazione di interfacce regolari o limiti di fase che potrebbero diffondere o riflettere la luce. Questa mancanza di ordine regolare consente alla luce di attraversare il materiale senza incontrare deviazioni significative. Al contrario, i polimeri semicristallini/cristallini, come il polibutilene tereftalato (PBT), polietilene tereftalato (PET) e poliammide (PA), presentano una struttura più ordinata, con regioni cristalline distinte. Queste regioni creano variazioni nell'indice di rifrazione all'interno del materiale, ovvero il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la sua velocità all'interno del materiale, portando alla diffusione della luce e quindi a una minore trasparenza. Inoltre, la presenza di difetti cristallini come dislocazioni o confini di grano nei polimeri cristallini può agire come centri di diffusione per la luce, ulteriormente riducendo la trasparenza.

Oltre alla natura del polimero, la trasparenza può anche essere influenzata da:⁷

- **Pigmenti e additivi:** Coloranti, riempitivi e altri additivi polimerici possono ridurre la chiarezza, a causa della riduzione della trasmissione della luce. I polimeri trasparenti tendono ad essere puri con pochi additivi. Tuttavia, alcuni additivi come nucleanti e chiarificatori possono migliorare la chiarezza di plastiche come il PP, agendo sulla crescita e sulla dimensione della struttura cristallina.

⁷ Fonte: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/transparency>

- Catalizzatori residui: Residui della polimerizzazione possono causare un aspetto opaco e ridurre la chiarezza ottica. Sono minimizzati nei polimeri trasparenti.
- Contaminanti: Particolato, polvere o altri contaminanti nel polimero possono diffondere la luce, che deve essere evitata per garantire un'elevata trasparenza. Un adeguato processo di polimerizzazione aiuta a minimizzare i contaminanti.
- Regolarità strutturale: Strutture polimeriche uniformi trasmettono la luce meglio di catene meno ordinate. L'orientamento delle catene influisce anche sulla birifrangenza e polarizzazione.
- Qualità della superficie: Qualsiasi rugosità o difetti superficiali possono ridurre la trasparenza. Ciò può avvenire durante la lavorazione, la stampa o la manipolazione dei polimeri. Le superfici lisce sono richieste per la chiarezza ottica. L'apparizione di graffi o difetti superficiali è il risultato dell'esposizione alla trasmissione della luce.
- Spessore: Molti polimeri trasmettono la luce come film sottili. Tra i termoindurenti, il poliestere insaturo, i rinforzi interferiscono nella trasmissione.
- Cambiamento chimico: Degradazione, ossidazione o diffusione possono influenzare la trasparenza.

La correlazione tra la trasparenza e la saldatura laser

La trasparenza al laser è una proprietà fondamentale di un materiale che determina la sua capacità di consentire al raggio laser di penetrare attraverso di esso senza essere significativamente assorbito o disperso. Questa caratteristica è necessaria per i processi di saldatura laser nei materiali plastici poiché il raggio laser deve attraversare il materiale per raggiungere la zona di saldatura, di conseguenza

Quando un materiale non è abbastanza trasparente al laser, si verifica un fenomeno noto come "overburning". In questa situazione, il raggio laser non può attraversare il materiale in modo efficace, e di conseguenza, l'energia viene assorbita dalla superficie esterna, causando un surriscaldamento eccessivo e danni alla zona di saldatura. Questo fenomeno può portare a difetti nella saldatura, come la formazione di porosità, cricche o deformazioni.

2.5. Il processo di saldatura laser in Continental

Il processo di saldatura laser che avviene in Continental ha lo scopo di racchiudere l'MGU tra l'housing e la cover. La saldatura avviene dopo aver fissato l'MGU nell'housing, saldando quest'ultima alla cover.



Figura 2.10: Parti coinvolte nel processo di saldatura

Come indicato nel paragrafo precedente, la saldatura laser tra due materiali plastici richiede la presenza di un componente trasparente allo stesso e di un componente opaco al laser e assorbente.

Nel caso in esame, la cover funge da materiale trasparente al laser, mentre l'housing è il materiale opaco e assorbente. Entrambe le parti sono fornite dai medesimi produttori e presentano la stessa composizione di base. Tuttavia, l'housing richiede la capacità di assorbire il calore per consentire la saldatura laser.

Per questo motivo, è stato introdotto del carbonio (conosciuto come Carbon black) nel materiale dell'housing, rappresentando circa lo 0.5% della composizione finale. Il carbon black svolge un ruolo di additivo e, all'aumentare della sua concentrazione, incrementa il coefficiente di assorbimento del polimero. Questo porta a una maggiore capacità di assorbire il calore generato dal raggio laser.

Il processo inizia con l'assemblaggio dell'MGU: nei motorini vengono montati le varie madreviti in una zona separata. Nel frattempo, viene preparato il bracket, ovvero viene inserita la vite senza fine all'interno dello stesso e predisposto all'inserimento del motorino.

Nella figura 2.11 si intravede il processo di montaggio della vite senza fine all'interno dell'housing, rendendo i pezzi pronti ad ospitare il motorino.



Figura 2.11: preparazione dell'housing



Figura 2.12: Caricamento dei layer nella stazione

Una volta montata la vite senza fine nell' housing e la madrevite nel motorino, i due pezzi convogliano nella stessa stazione, trasportati tramite nastri trasportatori azionati da un meccanismo alimentato da catene.

Nel frattempo, in un altro lato dell'isola, vengono caricate i layer contenenti le cover, che verranno saldate con il bracket contenete l'MGU.

A questo punto avviene la vera e propria saldatura. La giunzione viene effettuata lungo tutto il la superficie di contatto tra i due, dove è presente la scanalatura. Una volta terminata la saldatura, i pezzi conformi vengono raccolti tramite un apposito contenitore e trasportati nell'apposita linea per essere assemblati al resto del freno.



Figura 2.13: l'insieme EPB prossimo alla saldatura

Di seguito vengono esposti le specifiche della saldatrice laser utilizzata.

Parametri	Valore
Potenza del laser	370 W
Working area	250 mm x 250 mm
Focal spotsize	2.2 – 4.4 mm (regolabile)
Clamping force	750 N – 6000 N

Tabella 2.4: Specifiche tecniche della saldatrice utilizzata in Continental



Figura 2.14: Saldatrice laser utilizzata

Il processo di saldatura laser in Continental avviene in un'isola interamente dedicata ai freni di tipo EPB, raffigurata dal layout in figura 2.15.

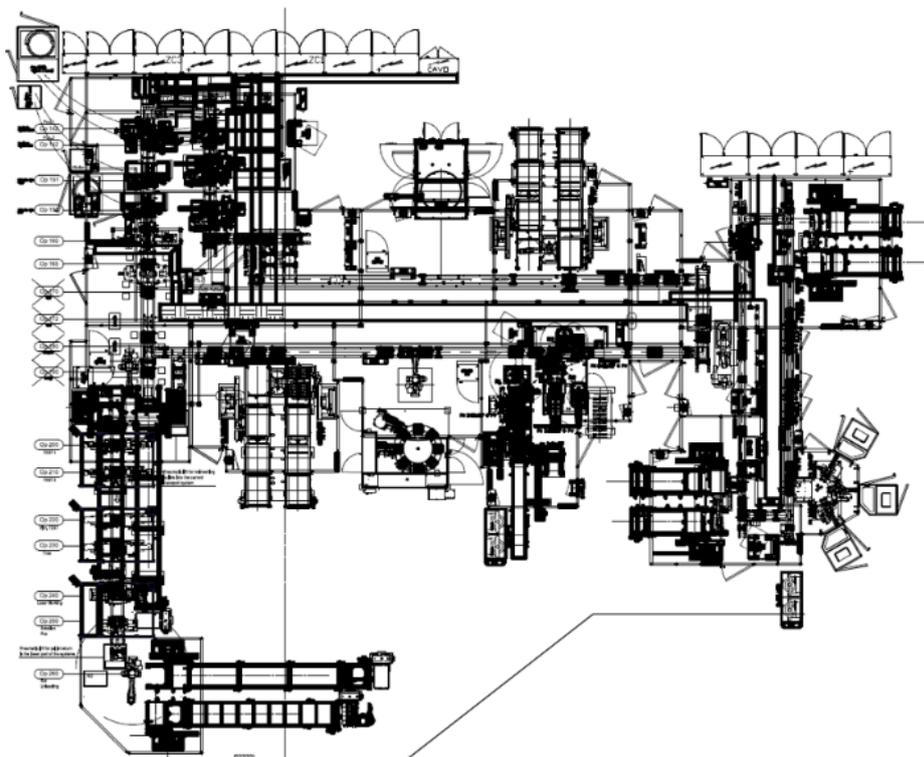


Figura 2.15: layout della linea dedicata ai freni di tipo EPB

2.5.1. Non conformità rilevate durante il processo



Figura 2.16 e 2.17: Esempio di 2 pezzi bruciati a seguito del processo

Nell'ultimo anno si è riscontrata un'anomalia nel processo di saldatura che ha causato innumerevoli inefficienze in termini di costi e tempi. Infatti, si è riscontrata una quantità molto alta di cover che non sono state in grado di essere saldate. In particolare, anziché uscire dalla saldatrice come un pezzo correttamente saldato, alcune cover sono state bruciate durante il processo finendo per danneggiare anche il bracket e l'MGU che vi alloggia all'interno.

Dopo un'analisi visiva, la bruciatura sarebbe dovuta ad un eccesso di calore sulla superficie della cover che ha scatenato il fenomeno dell'*overheating*.

L'*overheating* ha portato il materiale plastico a superare di gran lunga la temperatura di fusione causando una rottura dei legami polimerici e, di conseguenza, decomposizione termica.

CAPITOLO 3 – PROGETTO DELL'ESPERIMENTO E RISULTATI OTTENUTI

Il primo obiettivo è indagare se la causa delle non conformità sia effettivamente attribuibile alla bassa trasparenza delle cover. Per raggiungere questo obiettivo, è stato condotto un confronto tra un lotto di cover difettose e uno conforme. La valutazione si è basata sulla misurazione della trasmittanza dei campioni di entrambi i lotti.

Nel caso in cui la causa delle non conformità fosse riconducibile alla bassa trasparenza, sarebbe necessario derivare un valore minimo di trasmittanza da inserire nei contratti di fornitura come limite di specifica inferiore. Questo valore minimo è stato determinato utilizzando il metodo della "Capability Analysis", sfruttando gli indici di capacità di processo.

Attualmente, le cover provengono da un singolo fornitore, ovvero il fornitore A. Tuttavia, a causa della crescente domanda dei freni EPB derivata dallo sviluppo di un nuovo freno per un cliente e della considerevole presenza di lotti non conformi da parte del fornitore A, l'azienda sta valutando l'ampliamento del proprio parco fornitori, includendo un nuovo fornitore, il fornitore B, specializzato nello stampaggio plastico di cover e housing.

Per valutare le prestazioni del nuovo fornitore B, l'azienda ha ricevuto un lotto di campionatura di cover nell'ottobre 2023.

L'aumento significativo dei volumi di produzione per i freni EPB ha spinto l'azienda a cercare di ridurre il tempo di saldatura al fine di ottimizzare il tempo ciclo del processo. La riduzione del tempo ciclo consentirebbe di incrementare il numero di pezzi saldati per unità di tempo, evitando di avere un processo produttivo "capacity constrained".

Per comprendere gli aspetti che influenzano il tempo di saldatura, in particolare l'impatto della trasparenza delle cover, sono stati valutati diversi fattori. Oltre alla trasparenza, sono stati esaminati l'impatto della geometria dei pezzi, in particolare il volume della cava dell'housing e il volume del cordolo di saldatura della cover. Infine, è stata valutata l'eventuale influenza della provenienza dell'housing, distinguendo tra il fornitore A e il fornitore B. Per condurre questa analisi, sono stati utilizzati i campioni precedentemente menzionati. Va considerato che il tempo ciclo è la somma dei tempi che comprendono: il tempo necessario dal braccio robotico per prelevare housing contenente l'MGU e posizionare la stessa nella stazione di saldatura, prelevare la cover e posizionarla sopra l'housing e l'MGU, il tempo di saldatura e, infine, il tempo per posizionare il pezzo saldato nell'apposito contenitore. L'unico tempo controllabile per ridurre il tempo ciclo è proprio quello necessario alla saldatura, ottimizzando i componenti in maniera tale da minimizzare il tempo, gli altri tempi elencati sono funzione delle caratteristiche di fabbricazione della saldatrice e, di conseguenza, non possono essere modificati.

Durante le misurazioni di trasmittanza, ad ogni cover è stato associato un numero univoco per tracciare le misurazioni. Successivamente, ad ogni cover è stato associato un housing, misurando i volumi di cava e cordolo di saldatura. Infine, i pezzi sono stati sottoposti a saldatura, e il tempo di saldatura è stato registrato attraverso il terminale della saldatrice. La valutazione delle correlazioni

tra i tre parametri (trasparenza, volumi cava e cordolo e fornitore dell'housing) è stata effettuata attraverso un modello di regressione multipla.

La regressione e le correlazioni individuate forniscono "leve decisionali" all'azienda per gestire i fornitori in base ai risultati ottenuti. Ad esempio, se la trasparenza è fortemente correlata e i pezzi del fornitore B presentano bassa trasparenza, ciò potrebbe influenzare la preferenza verso il fornitore A e viceversa.

3.1. Letteratura sui modelli di regressione

La regressione è una tecnica statistica utilizzata per esplorare e modellare la relazione tra una variabile dipendente (risposta) e una o più variabili indipendenti (predittori). L'obiettivo principale della regressione è di identificare e quantificare il grado di relazione tra le variabili, permettendo di fare previsioni o inferenze sulla base dei dati disponibili.

Gli effetti di una variabile sull'altra vengono stimati a partire da una certa quantità di dati derivati da osservazioni sulla manifestazione di un fenomeno o da dati sperimentali

L'espressione che quantifica gli effetti sulla variabile dipendente (indicata con Y) dalle variabili indipendenti (X) di tipo:⁸

- Lineare – lineare, in cui entrambe sia la variabile dipendente che le variabili indipendenti sono in forma lineare.
- Lineare-logaritmica, in cui la variabile dipendente è espressa sotto forma lineare mentre la variabile indipendente è espressa sotto forma logaritmica.
- Logaritmica-logaritmica, in cui entrambe sia la variabile dipendente che le variabili indipendenti sono in forma logaritmica.
- Variabile dipendente binaria (modelli **probit** e **logit**), in questo caso la risposta è espressa sotto forma binaria (sì o no, difettoso o non difettoso, 1 o 0, ecc.). In questo caso, modello di regressione è espresso come la probabilità che la variabile dipendente assuma un determinato valore in funzione dei valori delle variabili indipendenti.

La regressione lineare è il modello più semplice di regressione e, come già accennato prima, modella la correlazione tra due variabili in forma lineare. Essendo il modello lineare, graficamente viene rappresentata da una retta avente equazione come segue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + u_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.1)$$

Dove Y è la variabile dipendente, X è la variabile indipendente, β_0 è l'intercetta, β_1 è il coefficiente angolare, e u_i rappresenta l'errore casuale.

Il coefficiente β_1 indica la variazione media in Y per unità di variazione in X , mentre l'intercetta β_0 rappresenta il valore atteso di Y quando X è zero.

⁸ Fonte: Stock, J. H., Watson, M. W., & Peracchi, F. (2012). Introduzione all'econometria (3ª ed.). Pearson

I parametri del modello β_0 e β_1 sono stimati cercando di minimizzare l'errore residuo u attraverso il **metodo dei minimi quadrati (OLS)**, cercando di minimizzare la somma dei quadrati delle differenze tra i valori osservati e quelli predetti. La funzione da minimizzare è raffigurata nella formula [Rif. Stock, Watson & Peracchi, 2012]:

$$\min_{b_0, b_1} \sum_{i=1}^n [Y_i - (b_0 + b_1 X_i)]^2$$

Minimizzando tale funzione, si ricavano le espressioni degli stimatori che minimizzano i residui:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.2)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} \quad (3.3)$$

β_0 rappresenta il punto in cui la retta di regressione intercetta l'asse delle ordinate, mentre β_1 riflette l'inclinazione della retta, ovvero quanto varia la variabile dipendente per un cambiamento unitario nella variabile indipendente.

Nel caso in cui, invece, la variabile dipendente sia influenzata da più di una variabile indipendente, il modello più adatto è un modello di regressione lineare multipla. Tale modello è un'estensione del modello di regressione lineare semplice e consente di valutare il contributo di più variabili nello stesso modello. In generale, un modello di regressione lineare multipla si presenta nella seguente forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \dots + \beta_p X_{pi} + u_i$$

Dove:

- β_0 è l'intercetta e indica il valore di Y quando tutti i predittori sono pari a zero
- β_1 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_1 tenendo costanti le variabili X_2, X_3, \dots, X_p e indica la variazione di Y al variare di X_1
- β_2 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_2 tenendo costanti le variabili X_1, X_3, \dots, X_p e indica la variazione di Y al variare di X_2
- β_3 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_3 tenendo costanti le variabili X_1, X_2, \dots, X_p e indica la variazione di Y al variare di X_3
- β_p è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_p tenendo costanti le variabili $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{p-1}$ e indica la variazione di Y al variare di X_p
- u_i è l'errore casuale dell'osservazione i-esima

La robustezza e l'affidabilità del metodo dei minimi quadrati nella regressione lineare semplice dipendono dalla validità di alcune assunzioni fondamentali:⁹

- **Linearità:** La relazione tra la variabile indipendente (X) e la variabile dipendente (Y) deve essere approssimativamente lineare. Questo significa che un cambiamento unitario in X dovrebbe causare un cambiamento costante in Y .
- **Indipendenza:** Gli errori (u_i) devono essere indipendenti l'uno dall'altro. Ciò implica che l'errore associato a un'osservazione non fornisce informazioni sulla natura degli errori delle altre osservazioni.
- **Normalità degli Errori:** Gli errori seguono una distribuzione normale. Se gli errori sono normalmente distribuiti, ciò implica che le stime dei parametri saranno distribuite normalmente e consentirà l'applicazione di test statistici.
- **Omoschedasticità:** La varianza degli errori deve essere costante lungo tutto il range dei valori di X . In altre parole, la dispersione degli errori non dovrebbe cambiare in modo sistematico al variare di X .
- **Assenza di Multicollinearità:** Le variabili indipendenti non devono essere altamente correlate. La presenza di multicollinearità può rendere difficile l'interpretazione dei coefficienti e aumentare la varianza delle stime. Tale assunzione è valida nei modelli lineari multipli, ovvero quando nel modello vengono incluse più variabili indipendenti. Ex-ante la costruzione del modello si valuta la collinearità tra le variabili utilizzando l'indice di Pearson. L'indice di correlazione di Pearson, rappresentato dal simbolo r , misura la forza e la direzione della relazione lineare tra due variabili quantitative X e Y . La formula è data da:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.4)$$

Il coefficiente r assume valori tra -1 e 1, indicando la forza e la direzione della correlazione: valori vicini a 1 indicano correlazione positiva, vicini a -1 correlazione negativa, e 0 indica assenza di correlazione lineare.

Successivamente alla costruzione del modello e alla visualizzazione dell'output, per valutare gli effetti di un eventuale multicollinearità si utilizza il Variance Inflation Factor (VIF). Esso misura quanto l'accuratezza di una stima di regressione è influenzata dall'alta correlazione tra le variabili predittive. Il VIF per ciascuna variabile è calcolato come il rapporto tra la varianza dell'**estimatore del coefficiente di regressione** quando questa variabile è inclusa nel modello e la varianza dell'estimatore quando la variabile è esclusa dal modello. In termini più formali, il VIF per la variabile X_i è dato dalla formula 3.5 [Rif. Jamal I. Daoud, 2017]:

⁹ Fonte: Stock, J. H., Watson, M. W., & Peracchi, F. (2012). Introduzione all'econometria (3ª ed.). Pearson

$$VIF(X_i) = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (3.5)$$

Un VIF elevato, solitamente superiore a 10, suggerisce la presenza di multicollinearità significativa che potrebbe compromettere l'affidabilità delle stime di regressione.

- **Assenza di Outliers e Leverage Points:** Gli outliers e i leverage points possono influenzare significativamente le stime dei coefficienti. La loro identificazione è essenziale per garantire la robustezza del modello.

3.1.1. Valutazione della bontà del modello

Una volta stimati i parametri del modello attraverso il metodo dei minimi quadrati, è essenziale valutare la bontà del modello per comprendere quanto bene si adatti ai dati osservati. La misura più comunemente utilizzata è il coefficiente di determinazione (R^2)

La somma totale dei quadrati (TSS) rappresenta la varianza totale della variabile dipendente senza considerare il modello. In un modello di regressione lineare, TSS può essere scomposta in tre componenti [Rif. Stock, Watson & Peracchi, 2012]:

$$TSS = ESS + RSS \quad (3.6)$$

Dove:

- TSS è la somma totale dei quadrati, ovvero la varianza campionaria di Y
- ESS è la somma al quadrato delle deviazioni tra i valori predetti e la loro media
- RSS è la somma dei quadrati degli errori.

R^2 rappresenta la proporzione di varianza totale della variabile dipendente (Y) che è spiegata dal modello. In termini più semplici, R^2 indica quanto delle variazioni in Y può essere attribuito alle variazioni delle variabili indipendenti attraverso il modello. Matematicamente, è definito dalla formula 3.7 [Rif. Stock, Watson & Peracchi, 2012]:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.7)$$

R^2 assume valori compresi tra 0 e 1, con 1 indicante una perfetta adattabilità del modello ai dati.

Un R^2 elevato suggerisce che una percentuale significativa della variazione nella variabile dipendente è spiegata dalle variabili indipendenti nel modello.

3.1.2. Verifiche di ipotesi

Una volta valutata, sulla base dell'analisi dei residui, l'adeguatezza del modello di regressione lineare multipla, si verifica se la relazione tra la variabile dipendente e l'insieme delle variabili esplicative sia statisticamente significativa.

Se si vuole testare la significatività di un parametro singolo β_j , viene effettuato un test t. In particolare, ogni parametro β_j nel modello è sottoposto a un'ipotesi nulla $H_0: \beta_j = 0$, che sostanzialmente dichiara che il predittore j non ha un impatto significativo sulla risposta, contro l'ipotesi alternativa $H_1: \beta_j \neq 0$, che dichiara che il predittore ha un effetto statisticamente significativo sulla risposta. Inoltre, si ipotizza che i coefficienti β_j seguano una distribuzione normale con media zero e una varianza costante σ^2 . La statistica t viene calcolata come il rapporto tra la stima del parametro β_j e il suo errore standard stimato $SE(\hat{\beta}_j)$:

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{SE(\hat{\beta}_j)} \quad (3.8)$$

In base al valore del p-value, si stabilisce se accettare o meno l'ipotesi nulla. In particolare, fissato un livello di significatività α , se il p-value risulta maggiore di α l'evidenza empirica non è sufficientemente contraria all'ipotesi nulla che quindi non può essere rifiutata. Viceversa, se il p-value è minore di α l'evidenza empirica è fortemente contraria all'ipotesi nulla che quindi va rifiutata. In tal caso i parametri saranno statisticamente significativi.

Nel caso in cui si vuole testare tutti i parametri del modello si effettua il **test di ipotesi per il modello globale**, basato sulla statistica F, che segue una distribuzione F di Fisher. Questo test verifica l'ipotesi nulla $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$, che afferma che nessuna delle variabili indipendenti ha un impatto significativo sul modello, contro l'ipotesi alternativa $H_1: \text{Almeno un } \beta_j \neq 0$, ovvero che almeno un parametro risulta significativo per il modello. La statistica F confronta la varianza spiegata (ESS) con la varianza residua (RSS), indicando se il modello nel suo complesso è significativo [Rif. Stock, Watson, 2012]:

$$F = \frac{ESS}{k} \times \frac{n-k-1}{RSS} \quad (3.9)$$

Dove k è il numero di predittori nel modello e n è il numero totale di osservazioni nel campione.

Anche in questo caso il test di ipotesi viene valutato tramite il valore del p-value, come nel caso precedente con il test t. Un p-value basso rifiuta l'ipotesi nulla, suggerendo che almeno una delle variabili ha un impatto significativo sul modello.

3.2. Process Capability Analysis e indici di capacità di processo

L'analisi della capacità dei processi, conosciuta come Process Capability Analysis, consiste in un insieme di attività utilizzate per quantificare la capacità di un processo attraverso l'impiego di tecniche statistiche. Nei processi, è spesso identificabile una grandezza misurabile direttamente correlata al prodotto finale. I valori obiettivo, noti anche come valori target, e i limiti di specificazione di questa caratteristica sono di solito definiti. In generale, la caratteristica di qualità presenta una variabilità intrinseca al processo produttivo, manifestandosi attraverso oscillazioni rispetto al valore target. Quando il processo è sotto controllo statistico, questa variabilità naturale può essere descritta, almeno approssimativamente, attraverso una distribuzione normale, indicata come $X \sim N(\mu, \sigma)$. In tal contesto, vengono definiti i limiti naturali di tolleranza del processo, ossia il limite di specifica superiore (USL) e il limite di specifica inferiore (LSL). Attraverso il calcolo degli indici di capacità di processo è possibile, quindi, stimare l'allineamento del processo alle specifiche del cliente.

Gli indici maggiormente utilizzati per il monitoraggio della capacità di un processo sono gli indici C_p e C_{pk}

3.2.1. Indice C_p

Una volta raccolto un campione del processo che si vuole analizzare, è possibile calcolare l'indice C_p tramite la formula (3.9) [Rif. Franceschini, Galetto, Maisano, Mastrogiacomo, 2016]

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (3.10)$$

Tale indice è progettato per esprimere la relazione tra la variabilità intrinseca del processo e l'ampiezza delle specifiche del prodotto, detta anche tolleranza ingegneristica.

Alla base del calcolo del C_p vengono assunte le seguenti ipotesi:

- La grandezza misurata ha una distribuzione normale
- Il processo è in controllo, ovvero non ci sono cause che ne perturbino il comportamento o che generino anomalie

- Il valore centrale, ovvero la media tra USL e LSL, sia posizionato a metà tra i due limiti di specifica

Quando il processo è centrato e segue una distribuzione gaussiana, un valore di Cp superiore a 1 indica che il processo è capace di produrre quasi il 100% di prodotti accettabili, con meno dello 0,3% dei campioni al di fuori delle specifiche.

I valori di tale indice possono essere:

- Cp>1: il processo è più che capace di produrre la quasi totalità dei prodotti entro le tolleranze.
- Cp=1: il processo è appena capace di produrre entro le tolleranze.
- Cp<1: il processo non è in grado di produrre il 100% di risultati accettabili.

Un singolo valore di Cp fornisce un rapido riferimento sulla variabilità naturale del processo rispetto alle tolleranze ingegneristiche. Tuttavia, se il processo non è centrato, un valore di Cp superiore a 1 non garantisce necessariamente che il processo stia attualmente producendo il 100% di prodotti accettabili. In altre parole, anche se Cp è maggiore di 1, potrebbe essere che solo una parte della curva normale cada entro le tolleranze ingegneristiche, senza garantire che il processo stia effettivamente producendo il 100% di prodotti accettabili, specialmente se la media del processo è oltre il limite superiore di specifica (USL).

Per tale motivo, viene introdotto l'indice Cpk, che considera la centratura del processo, ovvero la posizione della media rispetto ai limiti di specifica.

3.2.2. Indice Cpk

Rispetto all'indice Cp, Cpk fornisce una valutazione più completa, integrando non solo la variabilità del processo ma anche la posizione della media rispetto ai limiti di specifica.

Il Cpk è definito dalla formula (3.10) [Rif. Franceschini, Galetto, Maisano, Mastrogiacomo, 2016]:

$$Cpk = \text{Min} \left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma} \right) \quad (3.11)$$

Il coefficiente di capacità del processo (Cpk) rappresenta la minima distanza, normalizzata a tre volte la deviazione standard calcolata su un insieme limitato di dati, tra la media del processo e i limiti di specifica. Un aumento del valore di Cpk, indicante una bassa deviazione standard o una media distante dai limiti di specifica, corrisponde a una riduzione dei casi al di fuori dei limiti di specifica e, di conseguenza, dei prodotti scartati.

- Un valore di Cpk superiore a 1 indica che il processo è in grado di produrre articoli entro i limiti specificati, tenendo conto sia della variabilità che della posizione della media. In questo scenario, il processo è considerato centrato.
- Se Cpk è pari a 1, il processo appena riesce a produrre articoli entro le specifiche.
- Un valore di Cpk inferiore a 1 suggerisce che il processo potrebbe avere difficoltà a soddisfare completamente le specifiche richieste, indicando che il processo non è centrato. In generale, un processo viene ritenuto capace e centrato se **Cpk \geq 1,33**.

Relazioni Cp e Cpk:

- Cpk è sempre minore o uguale a Cp.
- Cpk è uguale a Cp solo in un processo perfettamente centrato.
- Cp rappresenta il massimo valore possibile di Cpk.
- Cp non può essere calcolato per processi con un solo limite di specifica.
- Cpk può essere calcolato in un processo con un solo limite di specifica.

3.3. Metodologie di misura e strumenti utilizzati

Come anticipato prima, ai fini dell'esperimento sono state condotte delle misurazioni relative, in primo luogo, alla trasparenza delle cover e, successivamente, alla geometria delle cover e housing.

3.3.1. Misurazione della trasmittanza delle cover

Per misurare la trasparenza/trasmittanza è stato utilizzato un particolare strumento ("Optimize Softing LTW-1", prodotto dall'azienda Softing AG), specifico per i materiali plastici destinati alla saldatura laser.

Lo strumento in questione è stato progettato in modo tale da essere ottimizzato per materiali con componenti in fibra di vetro. Il dispositivo è quindi adattato in modo ottimale al processo di saldatura laser e si applica perfettamente al caso di studi in esame.



Figura 3.1 e 3.2. Misuratore di trasmittanza utilizzato in Continental

La parte principale dello strumento è rappresentata dal doppio tubo che racchiude tra le due parti del tubo il pezzo da misurare. Per inserire il pezzo è necessario applicare nella vite posta in alto al doppio tubo una leggera pressione con la mano che permette al tubo superiore di alzarsi e al tubo inferiore di abbassarsi per lasciare spazio al pezzo da inserire, come mostrato in *figura 3.3*.



Figura 3.3: funzionamento del doppio tubo

Il processo di misurazione della trasmittanza cerca di simulare il processo di saldatura laser, sostituendo, però, il laser con una luce a led con una lunghezza d'onda quanto più vicina possibile a quelle delle saldatrici laser più utilizzate in campo industriale.

Il principio della misurazione consiste nell'indirizzare la il fascio LED verso lo stampo e determinare la percentuale di luce che riesce a oltrepassare il pezzo.

In particolare, la luce LED viene diretta sul campione attraverso una punta che fuoriesce dalla parte superiore del tubo, avente un diametro di 1,5 mm. Dall'altro lato del campione, la luce trasmessa colpisce l'apertura della parte inferiore del tubo composta da acciaio inossidabile con un diametro interno < 1,2 mm. Una fibra ottica nel tubo riceve la luce con un angolo solido di circa 60° e lo guida ad un fotodiode. La corrente del fotodiode risulta proporzionale alla quantità di luce trasmessa.

A questo punto, viene misurata la trasmittanza del pezzo rapportando il flusso della luce LED emergente del pezzo al flusso entrante, tale misura viene, infine, visualizzata nel display dello strumento.

È necessario sottolineare che la trasmittanza viene misurata punto per punto, quindi, sarebbe più opportuno misurare più punti dello stesso pezzo, dato che le misure, in genere, variano in base al punto della superficie.

CARATTERISTICA	VALORE
Tensione	88-264 V, 50-60 Hz
Lunghezza d'onda del LED	950nm
Larghezza di banda spettrale (FWHM)	55nm
Tempo di riscaldamento	3 minuti
Intervallo delle misurazioni	0 – 100%
Risoluzione	±0,1%
Accuratezza delle misure mostrate nel display	0,01% (2 cifre decimali)

Tabella 3.1: Caratteristiche dello strumento di misurazione usato

Le misurazioni sono state impostate misurando 8 punti diversi della superficie, raffigurati in figura 3.4. Tali punti sono stati scelti in base a come varia la superficie dello stampo; infatti, tengono conto di tutte le variazioni della forma del contorno della superficie.

Tuttavia, per questioni di praticità, è necessario che ad ogni pezzo venga assegnata una sola misura indicativa della trasmittanza e, a tal proposito, si è deciso di effettuare una media degli otto punti misurati, ottenendo quindi, una misura univoca per ogni pezzo.



Figura 3.4: Punti della cover misurati durante l'esperimento

Per raccogliere le misurazioni è stato utilizzato un foglio Excel dove le misure dei singoli pezzi sono riportate lungo le varie righe, mentre sulle colonne vengono riportate le misure degli otto punti.

A fine di ogni riga viene riportato, tramite la formula "MEDIA" di Excel il valore medio degli otto punti misurati e tale valore, per motivi di praticità, verrà considerato il valore rappresentativo per il pezzo. Un esempio è riportato in figura 3.5 sottostante.

#	1	2	3	4	5	6	7	8	Mean profile	Note
1	0,66	0,9	0,89	0,83	0,89	0,73	0,71	0,89	0,8125	
2	0,37	0,32	0,31	0,29	0,3	0,31	0,33	0,36	0,32375	
3	0,31	0,36	0,39	0,39	0,39	0,43	0,29	0,34	0,3625	
4	0,5	0,53	0,49	0,46	0,48	0,47	0,44	0,46	0,47875	
5	0,78	0,69	0,65	0,55	0,62	0,79	0,71	0,74	0,69125	

Figura 3.5: Template usato per raccogliere misurazioni

Come riportato nel paragrafo 2.4.1, essendo misure di trasmittanza, i valori sopra riportati sono espressi in percentuale.

3.3.2. Misurazione della geometria di cover e housing

Per geometria di cover e housing, ci riferiamo alle misurazioni del cordolo di saldatura all'interno delle cover e della cava degli housing. Nello specifico, si è esaminata superficie, altezza e volume sia della cava che del cordolo, dettagli essenziali per comprendere la conformità e la precisione dei componenti. A causa della complessità delle forme coinvolte, l'impiego di strumenti di misura tradizionali risulterebbe non solo complesso, ma anche dispendioso in termini di tempo e risorse. Pertanto, per ottenere misurazioni accurate ed efficienti, si è adottato una metodologia basata sulla **luce strutturata**. La luce strutturata è una tecnica di scansione 3D che coinvolge la proiezione di un

modello di luce, come linee o griglie, su un oggetto. Una fotocamera cattura l'immagine dell'oggetto con il modello di luce proiettato, e la deformazione di questo modello sulla superficie fornisce informazioni sulla struttura tridimensionale. Analizzando la deformazione, è possibile calcolare le distanze e generare una rappresentazione tridimensionale dettagliata dell'oggetto.

Per prima cosa, il pezzo da misurare (sia cover che housing) viene messo su un apposito supporto per essere scansionato (figura 3.6), per le misurazioni si è utilizzato lo scanner 3D COMET®LED 2 (figura 3.7) di ZEISS. In seguito, la sorgente luminosa (LED nel caso del Comet LED 2M) proietta un modello di luce sul pezzo da scansionare e la deformazione di questo modello sulla superficie dell'oggetto ne identifica la geometria. La fotocamera integrata nello scanner cattura le immagini del pezzo con il modello di luce proiettato.

Le figure 3.6, 3.7 e 3.8 riportano, come esempio, la scansione di un housing.



Figure 3.6, 3.7, 3.8: Posizionamento del pezzo (foto sx), scanner utilizzato (foto centrale), scannerizzazione del pezzo (foto dx)

Una volta catturate le immagini, il software dello scanner calcola le distanze tra l'oggetto e lo scanner per ciascun punto del modello di luce deformato. Queste distanze vengono utilizzate per generare una nuvola di punti tridimensionale, che rappresenta la superficie dell'oggetto scansionato.

La parte appena descritta riguarda la scannerizzazione del pezzo, la misura vera e propria viene svolta con l'ausilio del Software di analisi dimensionale 3D Polyworks.

Una volta scannerizzato il pezzo, il modello viene importato da Polyworks dove è possibile visualizzare il modello 3D in forme che ne indicano anche la densità sulla superficie dell'oggetto, come mostrato nella figura sottostante.

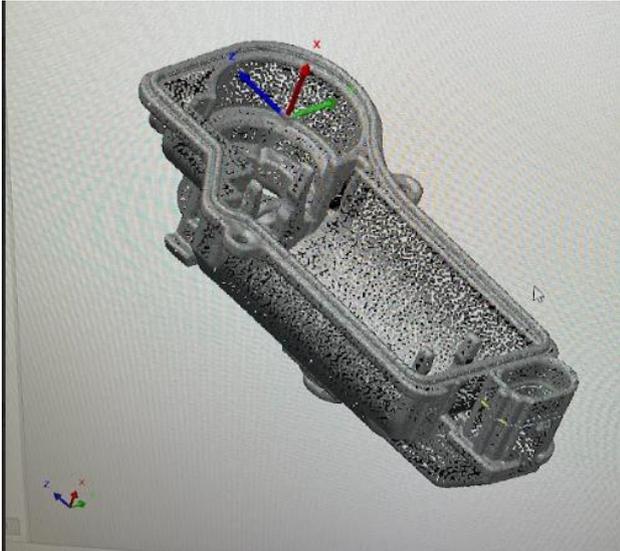


Figura 3.9: Densità di punti dell'housing dopo la scannerizzazione

Dopo aver visualizzato il modello, bisogna definire una "Region of Interest" (ROI), ovvero una regione specifica dell'oggetto che si vuole misurare, nel caso in esame la ROI corrisponde al cordolo di saldatura se il pezzo in esame è una cover mentre nel caso dell'housing la cava.

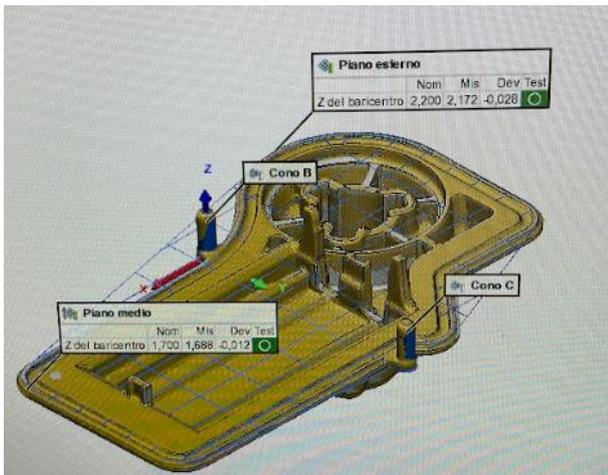


Figura 3.10: Definizione del ROI di una cover

Infine, per ottenere le misurazioni desiderate, una volta definito il ROI, nella barra degli strumenti di misura si sceglie cosa si vuole misurare del ROI selezionato. Nel caso in esame si misurano altezza, superficie e volume sia della cava dell'housing che del cordolo di saldatura della cover. Questa metodologia di misura prevede un'incertezza di circa ± 0.035 mm.

3.4. Confronto tra lotto difettoso e lotto conforme

In primo luogo, l'esperimento si è incentrato sull'analizzare la differenza tra un lotto scartato ed un lotto non scartato. Per fare ciò, si è prelevato un campione da 40 unità da entrambi i lotti e si sono analizzati i valori di trasmittanza.

In azienda non c'è una procedura specifica che identifica quando scartare un lotto e quando non scartarlo. In generale, la decisione di scartare un lotto è a discrezione dell'operatore addetto alla saldatura. Quest'ultimo decide di scartare un lotto quando, dallo stesso lotto, vengono fuori molte parti bruciate. Quando ciò avviene, il processo di saldatura viene arrestato e i layer restanti facenti parte del lotto inseriti nel rullo che convoglia alla saldatrice vengono rimossi e trasportati in un'apposita area dedicata ai lotti scartati.

Quindi per prelevare dei pezzi da un lotto scartato è stato sufficiente prelevare i pezzi da un lotto in quest'area. Invece, per quanto riguarda i prodotti conformi, questi sono stati prelevati direttamente in prossimità della saldatrice, inserendo un layer di cover in produzione; se i pezzi contenuti in tale layer non presentavano difetti durante il processo di saldatura, allora il lotto è considerato buono e il campione è stato prelevato dal lotto di cui faceva parte il layer.

Una volta raccolti i due campioni, si è proceduto con le misurazioni utilizzando il metodo descritto precedentemente nel paragrafo 4.1, quindi si sono raccolte misurazioni su 8 punti diversi dello stampo e la media degli 8 punti sarà la misura rappresentativa dello stampo.

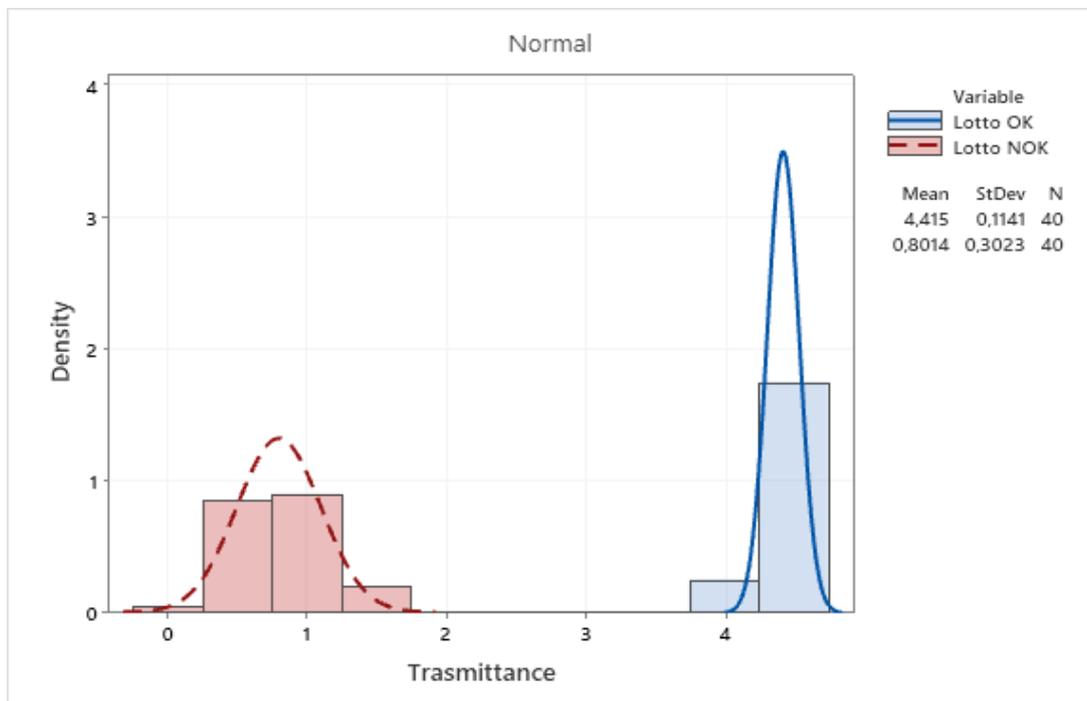


Figura 3.11: Risultati delle misurazioni dei due lotti

Da un primo confronto sui valori risulta molto evidente la differenza di valori in termini di trasmittanza media tra il lotto OK e il lotto KO, il che rende non necessaria qualsiasi test statistico per testare l'uguaglianza delle medie. A fronte di ciò, si può affermare con estrema significatività il fatto che la causa della non conformità (bruciatura) degli stampi durante la saldatura laser è riconducibile alla troppo poca trasparenza al laser delle cover.

Il lotto conforme riporta una media del 4,415% di trasmittanza con una deviazione standard pari a 0,1141% mentre il lotto scartato riporta una media pari a 0,8014% e una deviazione standard pari a 0,3023%.

A fronte di questi valori, ciò che si evince è la non presenza di lotti misti. Ciò è stato anche confermato dagli operatori addetti alla saldatura che affermano che storicamente la bruciatura di pezzi avviene tra pezzi facenti parti di un unico lotto e raramente si osservano lotti misti. Quindi, ciò che perturba il processo e causa non conformità non è la variabilità dei pezzi presenti nel lotto, ma la variabilità tra i lotti stessi.

La rarità di trovare lotti "misti" ovvero lotti che una piccola percentuale di pezzi difettosi all'interno, in realtà, può portare sia a svantaggi che a vantaggi. Il vantaggio di avere forniture con questo comportamento è sicuramente il fatto di velocizzare eventuali controlli prima di effettuare la saldatura per evitare di mettere in produzione lotti difettosi, oppure se il lotto fosse difettoso e venisse ugualmente mandato in produzione, si potrebbe accorgere subito se il lotto è difettoso già dai primi pezzi saldati. Quest'ultimo aspetto, tuttavia, non è applicabile in quanto la saldatura è un processo completamente automatizzato. L'operatore, infatti, si limita a caricare i layer contenenti le cover nei pressi della saldatrice. Successivamente, le singole cover vengono prelevate da un robot e vengono posate per essere saldate.

Successivamente, attraverso un sistema di visione automatico, viene ispezionata il giunto di saldatura per scartarlo o meno. Se scartato, l'interno MGU viene riposto in un apposito contenitore posto nelle vicinanze della saldatrice. Di solito, infatti, quando un lotto è difettoso almeno il 20 % del lotto di cover viene processato, danneggiando altrettanti motorini e housing.

3.5. Confronto tra i due fornitori

In settembre 2023 l'azienda ha ricevuto un lotto di campionatura da un ulteriore fornitore (fornitore B) per valutare l'integrazione del fornitore. Lo strumento ed il metodo di misurazione sono gli stessi utilizzati per misurare gli stampi del fornitore A, descritti nel paragrafo 4.3

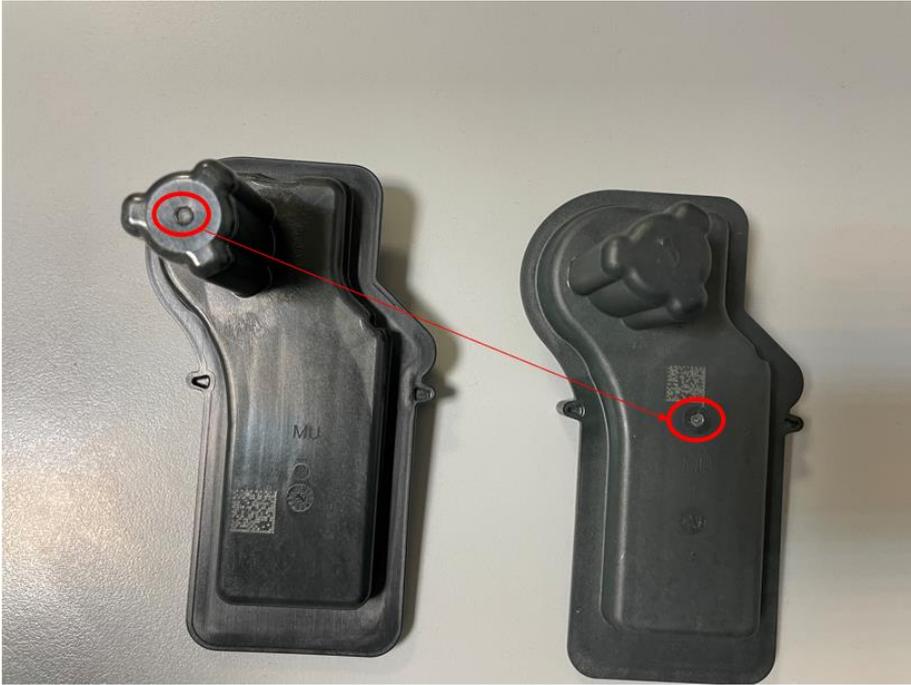


Figura 3.12: Confronto tra cover del Fornitore A(sinistra) e Fornitore B(destra)

È bene considerare che entrambi i fornitori usano il medesimo materiale plastico per produrre lo stampo (Ultradur® B 4300 G6 LT BK15092).

In figura 3.9 vengono confrontate visivamente una cover del fornitore A con una cover del fornitore B.

In termini di processo, la differenza principale tra gli stampi dei due fornitori è il punto di iniezione dello stampo. Infatti, il fornitore A inietta il materiale nello stampo nella cavità sporgente dove alloggia lo spindle del motorino, mentre l'iniezione del materiale nello stampo del fornitore B avviene al centro dello stampo.

Il diverso punto di iniezione è una caratteristica che impatta notevolmente la trasparenza al laser del materiale. Infatti, un diverso punto di iniezione determina l'orientazione delle fibre di vetro che, a loro volta, influenzano direttamente la trasparenza.

Altra differenza che si può notare è la diversa posizione del datamatrix(DMC), caratteristica che però non influisce sulla trasparenza dello stampo.

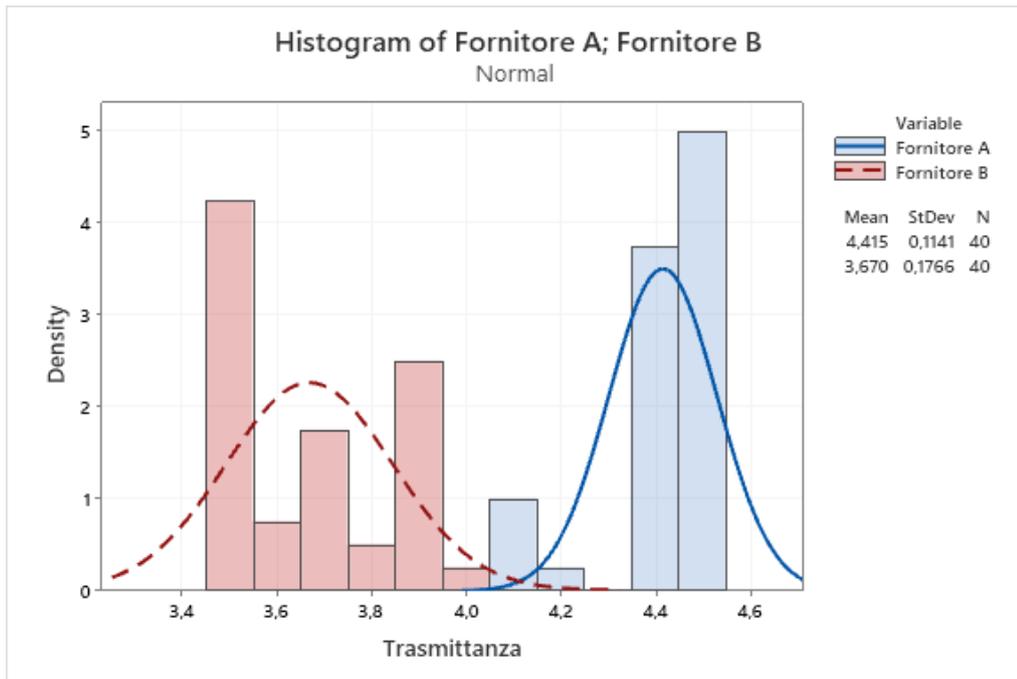


Figura 3.13: Istogramma rappresentante i valori dei due campioni

È bene sottolineare che i 40 campioni misurati del fornitore B sono stati, successivamente, sottoposti a saldatura e, come tutto il resto del cassone, tale processo è andato a buon fine e non ha registrato pezzi bruciati. Dei pezzi misurati, il pezzo con trasmittanza più bassa ha un valore del 3,46%, il che fornisce ci indica che stampi con trasmittanza minore del 3,5% possono essere ritenuti conformi.

Da confronto tra i due fornitori risulta un evidente differenza di valori dei due campioni, sia in termini di media che in termini di deviazione standard; infatti, i campioni del fornitore A hanno media pari a 4,415% ed una deviazione standard pari 0,11%, mentre il campione del fornitore B riportano media e deviazione standard pari a 3,67% e 0,18% rispettivamente.

Guardando ai dati ottenuti, si evince facilmente che gli stampi del fornitore A sono, in media, più trasparenti al laser e, quindi, trasmettono meglio i fasci laser e, di conseguenza, dovrebbero garantire lotti migliori con una minore difettosità. Infatti, si ha una differenza del valore medio dei due campioni pari a 0,75 circa.

Per comprendere al meglio la differenza tra le misure dei due campioni, si calcola un intervallo di confidenza per la differenza delle medie dei due campioni. A partire dalla differenza delle medie campionarie, pari a 0,75 circa, si potrebbe costruire un intervallo di confidenza al 95% usando la t di student, dato che le misure derivano da due popolazioni con media e varianza non note; l'intervallo di confidenza è fatto come segue:

$$CI = (\bar{x}_a - \bar{x}_b) \pm t_{\alpha,df} \cdot \sqrt{\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b}} \quad (3.12)$$

Dove df sono i gradi di libertà della t di student, pari a n_a+n_b-2 e α rappresenta il livello di rischio associato all'intervallo di confidenza.

Tuttavia, essendo $n_a, n_b > 30$, la t di student si può sostituire con una normale standard, trasformando così la relazione precedente come segue:

$$CI = (\bar{x}_a - \bar{x}_b) \pm z_\alpha \times \sqrt{\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b}} \quad (3.13)$$

Con un livello di fiducia del 95%, usando le tavole della distribuzione normale standard, si ottiene $Z_{0.95} = 1,96$.

Sostituendo i dati numerici nella formula di sopra, si ottiene il seguente intervallo di confidenza:

$$CI = [0,68; 0,81]$$

Ciò indica che, se si estraggono due campioni dalle rispettive forniture e si effettuano le misure, al 95% dei casi le medie dei due campioni differiscono per un valore contenuto in tale intervallo.

Quindi, a fronte dei dati a disposizione, si può affermare che il fornitore A garantisce misure di trasmittanza più alte ma con una differenza che risulta essere inferiore a 0,82.

Questa analisi, però, è vero che dimostra che il fornitore A è in grado di fornire pezzi più trasparenti rispetto al fornitore B, ma è anche vero che si è confrontato un lotto OK del fornitore A con un lotto OK del fornitore B. Ma il problema, però, è che molti lotti scartati del fornitore A, come descritto nel paragrafo precedente, non contengono pezzi conformi al loro interno.

3.6. Costruzione del modello di regressione

Come già anticipato nell'introduzione del capitolo, lo scopo di questa analisi è quello di scoprire da quali fattori è influenzato il tempo di saldatura per avere delle "leve" a disposizione su cui agire per ridurre il tempo ciclo in modo da aumentare il numero di pezzi saldati per unità di tempo.

Dopo aver misurato la trasmittanza e i volumi di cava e cordolo, i pezzi sono stati sottoposti al processo di saldatura e registrato il tempo di saldatura di ogni coppia cover-housing, tale tempo viene riportato nel terminale della saldatrice ogni volta che viene saldato un pezzo, come riportato nell'immagine sottostante.

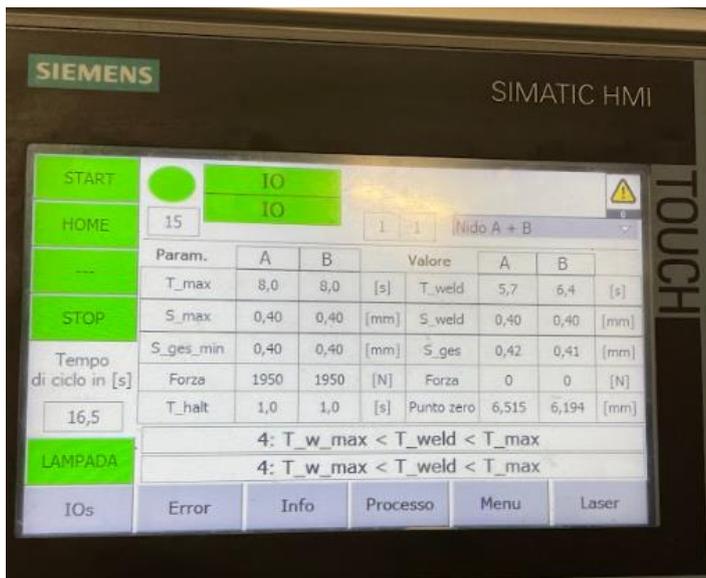


Figura 3.14: Terminale della saldatrice

Il tempo di saldatura è indicato nella parte in alto a destra della figura 4.11, in corrispondenza della riga "T_weld". Le colonne A e B indicano la mano dei pezzi saldati; A indica che il pezzo saldato è destro, mentre B indica il pezzo sinistro. Questo perché il processo di saldatura avviene con due pezzi per volta, un destro e un sinistro.

Una volta raccolti tutti i dati, si valutano, tramite la costruzione del modello i parametri che influenzano tale tempo. In particolare, sono stati valutati tre parametri:

- Trasparenza delle cover, valutata tramite le misure di trasmittanza ottenute
- Geometria dei pezzi: valutata tramite il rapporto tra il volume della cava dell'housing e il volume del cordolo di saldatura, usando le misure ottenute con il metodo descritto in precedenza.
- Provenienza dell'housing: viene valutato se la provenienza dell'housing (se viene dal fornitore A o dal fornitore B) abbia un impatto sul tempo di saldatura

Per la costruzione del modello si è adottato un approccio iterativo, ovvero si parte da un modello base con una sola variabile indipendente e, successivamente, si vanno ad aggiungere ulteriori variabili finquanto si ottiene un valore di R^2 accettabile

Il modello di regressione viene costruito utilizzando il software statistico Minitab.

3.6.1. Utilizzo del software Minitab

Una volta importati i dati nel worksheet di Minitab, per costruire il modello di regressione, sono stati intrapresi i passaggi riportati nelle immagini sottostanti.

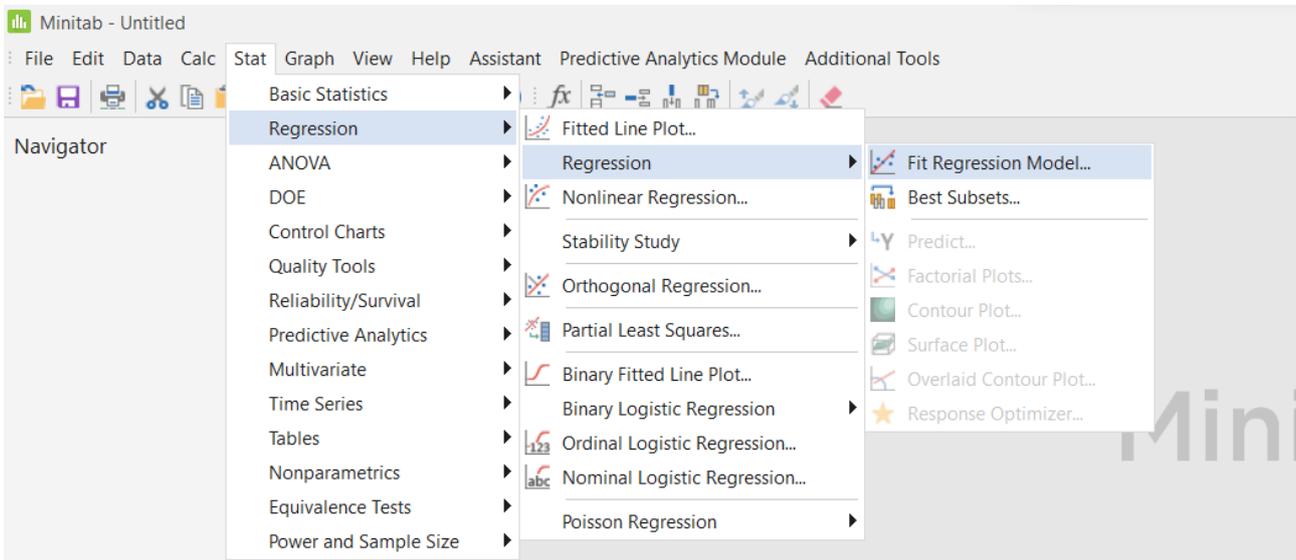


Figura 3.15: Passaggi seguiti per impostare il modello di regressione su Minitab

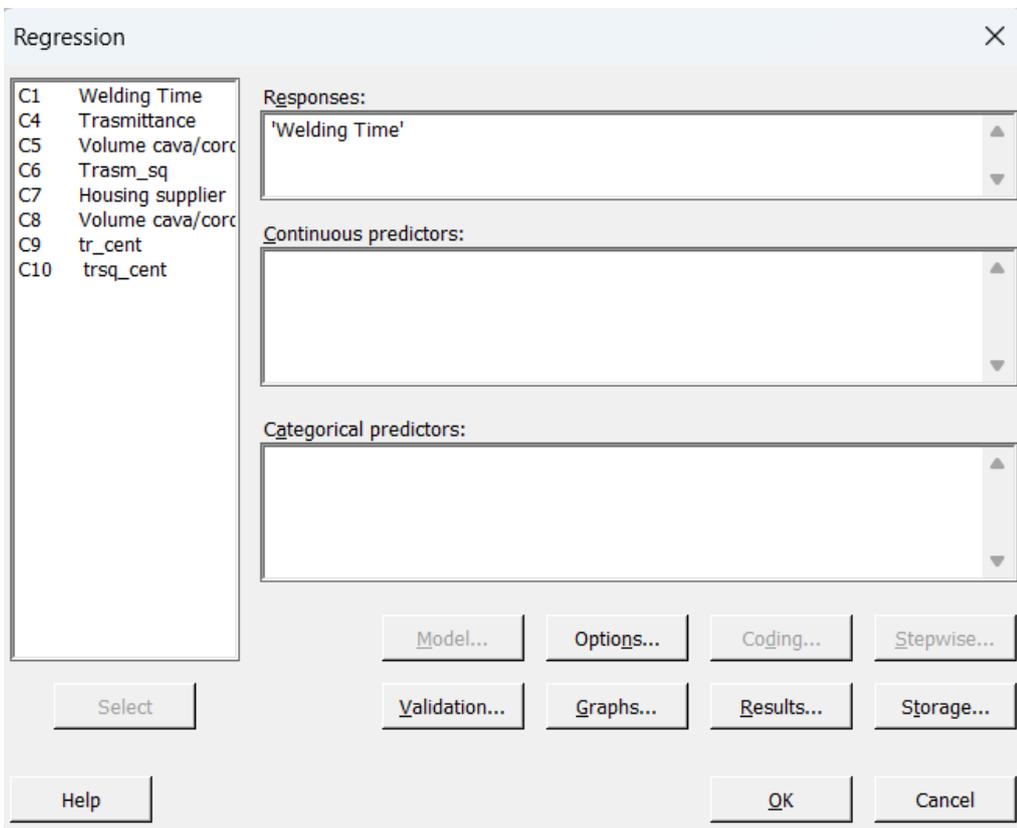


Figura 3.16: Screenview mostrante la scelta dei predittori da includere nel modello

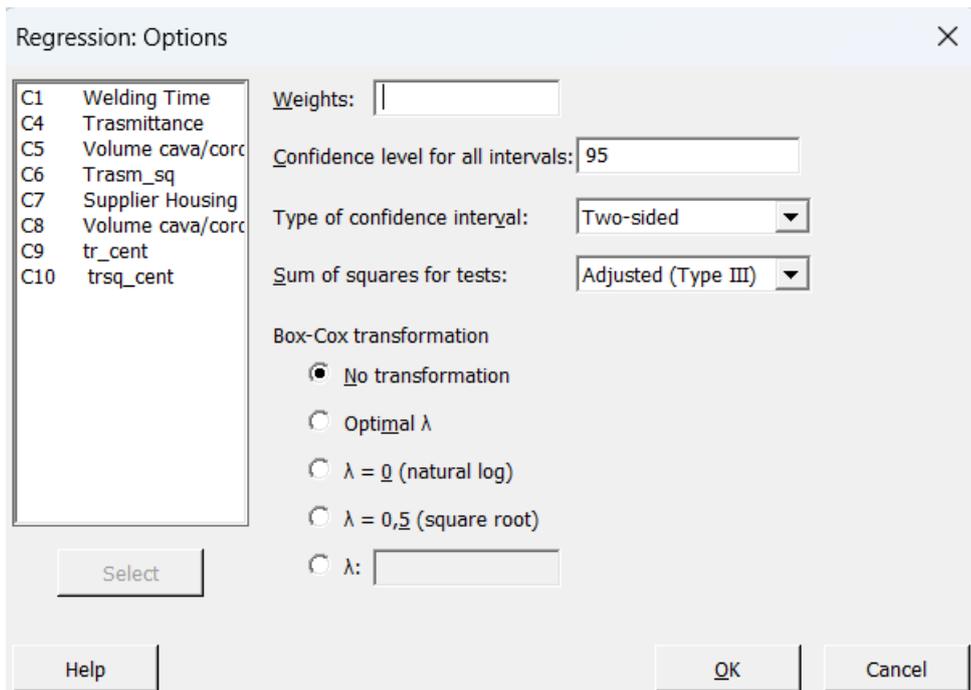


Figura 3.17: Screenview mostrante le impostazioni del modello

3.6.2. Costruzione del modello

Il modello di partenza equivale al modello di regressione più semplice che si può realizzare, ovvero un modello di regressione lineare con un solo predittore. Come primo parametro è stata valutata la trasmittanza. Di seguito viene riportato l'output di Minitab per tale modello.

Regression Equation

Welding Time = 7,073 - 0,404 Trasmittance

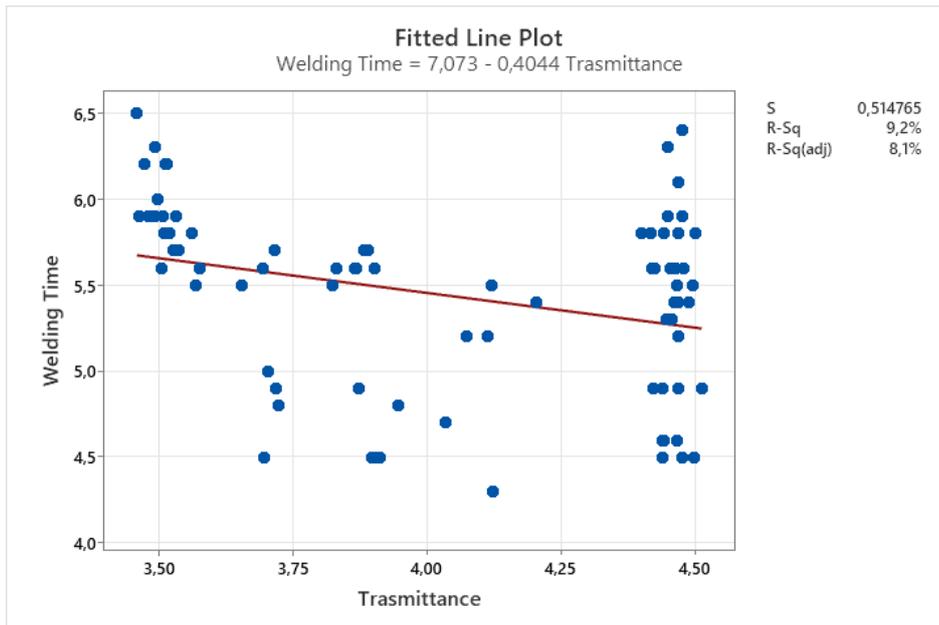


Figura 3.18: Scatterplot del modello lineare

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	7,073	0,584	12,11	0,000	
Trasmittance	-0,404	0,144	-2,81	0,006	1,00

Tabella 3.2: Coefficienti del modello lineare

Il termine costante rappresenta il tempo di saldatura quando la variabile Trasmittance è zero. In questo caso, il valore è di 7,073 con un errore standard di 0,584. Il t-value elevato (12,11) e il p-value basso (0,000) indicano che il termine costante è statisticamente significativo.

Questo termine rappresenta la pendenza della relazione tra la variabile Trasmittance e il tempo di saldatura. Il coefficiente di -0,404 suggerisce che c'è una relazione negativa tra la trasparenza e il tempo di saldatura. In altre parole, all'aumentare della trasmittanza di una unità, ci si aspetta una diminuzione del tempo di saldatura pari a 0,404 s. Il t-value (-2,81) e il p-value (0,006) indicano che questo termine è anche statisticamente significativo, in quanto il p-value risulta minore di α , impostato pari al 5%.

Tuttavia, in base al valore di R-squared, il modello spiega solo il 9,22% della variazione, indicando che potrebbero essere necessarie più variabili per migliorare la previsione.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	2,0988	2,0988	7,92	0,006
Trasmittance	1	2,0988	2,0988	7,92	0,006
Error	78	20,6687	0,2650		
Lack-of-Fit	70	19,8020	0,2829	2,61	0,074
Pure Error	8	0,8667	0,1083		
Total	79	22,7675			

Tabella 3.3: ANOVA del modello lineare

L'analisi della varianza mostra che la regressione è statisticamente significativa (p-value = 0,006), suggerendo che la trasmittanza contribuisce in modo significativo alla spiegazione della variazione nel tempo di saldatura.

Tuttavia, il test Lack-of-Fit indica che potrebbe esserci ancora della variazione non spiegata dal modello, poiché il p-value (0,074) suggerisce che la regressione potrebbe non essere significativamente migliore della previsione costante. Ciò potrebbe indicare la necessità di ulteriori variabili nel modello.

Un valore così basso di R-squared indica, quindi, che sono necessarie altre variabili nel modello oppure valutare se la trasparenza delle cover e il tempo di saldatura correlino in maniera non lineare.

Per fare ciò, si è valutato se una relazione di tipo quadratica tra il tempo di saldatura e la trasparenza riesce ad adattarsi meglio ai dati.

Regression Equation

$$\text{Welding Time} = 49,52 - 21,79 \text{ Trasmittance} + 2,666 \text{ Trasm_sq}$$

Dove "Trasm_sq" rappresenta il termine quadratico della trasmittanza.

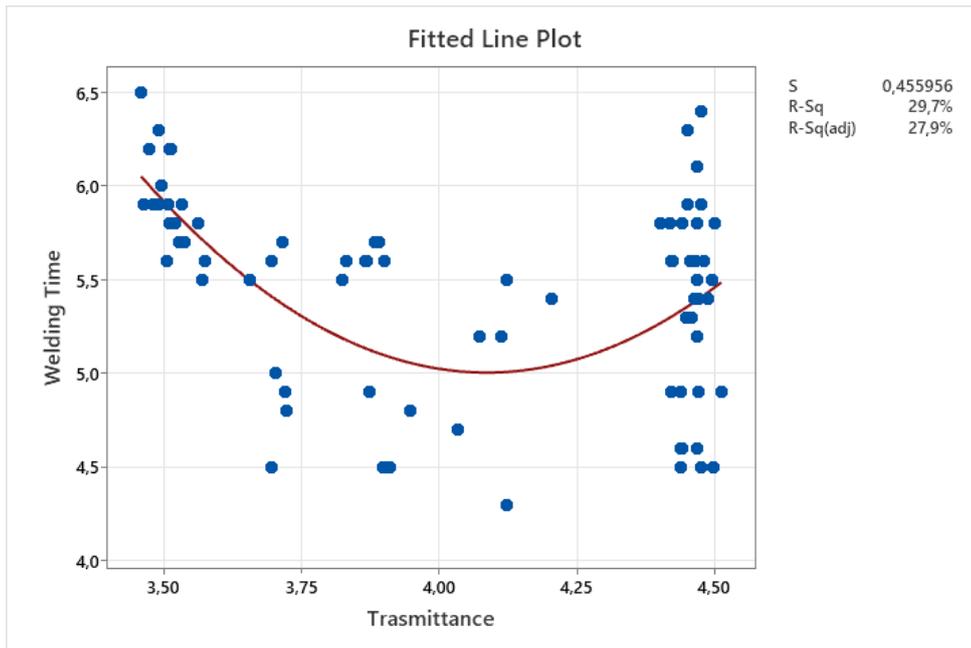


Figura 3.19: Scatterplot del modello quadratico

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	49,52	8,98	5,51	0,000
Trasmittance	-21,79	4,52	-4,82	0,000
Trasm_sq	2,666	0,563	4,73	0,000

Tabella 3.4: Coefficienti del modello quadratico

Rispetto al modello lineare è stato aggiunto il contributo quadratico nel modello. Il coefficiente è 2.666, indicando l'effetto quadratico positivo di Transmittance. Questa variabile, così come le altre, è statisticamente significativa (p-value = 0.000), suggerendo un contributo significativo alla variazione del tempo di saldatura.

Il grafico che rappresenta la regressione mostra una parabola di tipo convesso con punto di minimo in corrispondenza di un valore di trasmittanza di poco superiore al 4,1% circa. Ciò significa che, secondo questo modello, il tempo di saldatura diminuisce all'aumentare della trasparenza al laser dei pezzi per cover con una trasmittanza minore del 4,1%. Invece, per le cover con trasmittanza superiore a tale valore, il tempo cresce al crescere della stessa.

L'R-squared è ora del 29.69%, in aumento rispetto al modello lineare (9.22%). Questa percentuale più elevata indica che il modello quadratico riesce a spiegare una maggiore quantità di variazione nei dati e, di conseguenza, risulta molto più adeguato rispetto al modello lineare.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	6,7595	3,3797	16,26	0,000
Trasmittance	1	4,8348	4,8348	23,26	0,000
Trasm_sq	1	4,6606	4,6606	22,42	0,000
Error	77	16,0080	0,2079		
Lack-of-Fit	69	15,1413	0,2194	2,03	0,143
Pure Error	8	0,8667	0,1083		
Total	79	22,7675			

Tabella 3.5: ANOVA del modello quadratico

L'analisi di varianza mostra che l'aggiunta del termine quadratico ha migliorato la capacità del modello di spiegare la variazione nei dati (F-Value = 16.26). Inoltre, il p-value associato all'analisi di varianza è inferiore a 0.05, indicando che il modello complessivo è statisticamente significativo. Il p-value del test lack-of-fit risulta pari a 0.143 e supera la soglia convenzionale di 0.05. Pertanto, non c'è evidenza sufficiente per rifiutare l'ipotesi nulla di "lack-of-fit", cioè che il modello è in grado di spiegare adeguatamente la variazione nei dati rispetto all'errore casuale.

Tuttavia, il valore di R-squared, pari al 29,7 % è troppo basso per considerare il modello affidabile e eventuali conclusioni o decisioni prese sulla base di tale modello potrebbero non essere accurate. Per tale ragione, al modello è stato un parametro che rappresenta gli effetti del volume della cava e del cordolo di housing e cover, misurati con il metodo descritto nel paragrafo 3.3.2.

Effetti del volume della cava e del cordolo

Le misurazioni relative alla geometria delle zone di saldatura di cover e housing hanno coinvolto vari parametri, tra cui area, altezza e volume di cava e cordolo rispettivamente. Tuttavia, nell'ambito dell'analisi condotta, si è fatto ricorso esclusivamente al volume, poiché questa misura incorpora sia l'area che l'altezza. In particolare, l'altezza del cordolo di saldatura equivale allo spessore dello stesso.

Al fine di rendere adimensionale il parametro che descrive gli effetti geometrici, analogamente alla trasmittanza, è stato introdotto nel modello di regressione il rapporto tra il volume della cava e il volume del cordolo di saldatura.

Per esplorare la possibile correlazione tra il rapporto tra il volume della cava e il volume del cordolo, si ricorre al grafico a dispersione sottostante.

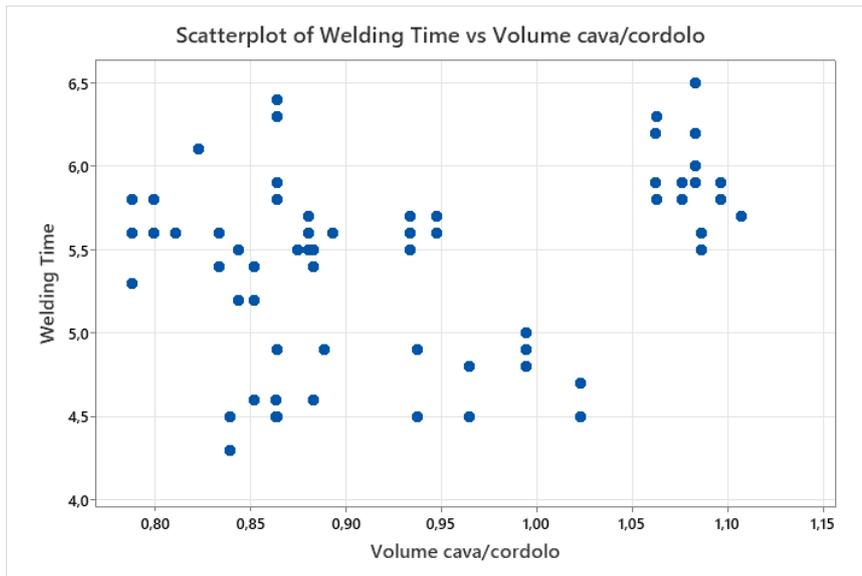


Figura 3.20: Scatterplott tra il rapporto volume cava/cordolo e il tempo di saldatura

In accordo con il grafico a dispersione, la nuvola di punti sembrerebbe richiamare una forma quadratica convessa. Per tale ragione, il parametro viene inserito nel modello sottoforma quadratica.

Regression Equation

$$\text{Welding Time} = 66,6 - 24,25 \text{ Trasmittance} + 2,890 \text{ Trasm_sq} - 20,2 \text{ Volume cava/cordolo} + 9,06 \text{ Volume cava/cordolo_sq}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	66,6	10,8	6,20	0,000
Trasmittance	-24,25	6,27	-3,87	0,000
Trasm_sq	2,890	0,764	3,79	0,000
Volume cava/cordolo	-20,2	14,8	-1,37	0,176
Volume cava/cordolo_sq	9,06	7,90	1,15	0,255

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,435307	37,58%	34,25%	30,53%

Tabella 3.6: Coefficienti del modello dopo l'aggiunta del parametro volume cava/cordolo

Con un p-value pari a 0, la variabile della trasmittanza mantiene un'influenza significativa e negativa sul tempo di saldatura, indicando che una trasmittanza più bassa è associata a un aumento del tempo di saldatura. Anche la componente quadratica della trasmittanza contribuisce in modo significativo al modello, confermando la non linearità dell'effetto della trasmittanza.

Tuttavia, il rapporto tra il volume della cava e il volume del cordolo non mostra un impatto significativo sul tempo di saldatura, poiché i p-value associati al termine lineare e quadratico (0,176

per il termine lineare e 0,255 per il termine quadratico) sono di gran lunga maggiori della soglia, fissata al 5%. Per cui si può affermare che la geometria di cover e housing **non influenza** il tempo di saldatura. Per questa ragione, questi due parametri verranno rimossi dal modello.

Ciò è rafforzato anche dal valore di R-squared, che risulta essere pari a 37,58%. Infatti, nonostante tale valore sia aumentato con l'aggiunta di ulteriori parametri, tale aumento è ridotto se si considera che, rispetto al modello precedente, si sono aggiunti due parametri al modello.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	8,5556	2,1389	11,29	0,000
Trasmittance	1	2,8353	2,8353	14,96	0,000
Trasm_sq	1	2,7150	2,7150	14,33	0,000
Volume cava/cordolo	1	0,3541	0,3541	1,87	0,176
Volume cava/cordolo_sq	1	0,2493	0,2493	1,32	0,255
Error	75	14,2119	0,1895		
Lack-of-Fit	73	13,8019	0,1891	0,92	0,656
Pure Error	2	0,4100	0,2050		
Total	79	22,7675			

Tabella 3.7: ANOVA del modello dopo l'aggiunta del parametro volume cava/cordolo

Infine, come mostrato dalla tabella sopra, anche in questo caso non c'è evidenza sufficiente per rifiutare l'ipotesi nulla di "lack-of-fit".

Effetti della provenienza dell'housing

L'ultimo aspetto considerato è la provenienza dell'housing, ovvero se l'origine dell'housing dal fornitore A o B incide o meno sul tempo di saldatura. Per incorporare questa variabile nel modello, si adotta una variabile dummy (Housing supplier), ossia una variabile binaria che assume il valore 1 quando l'housing proviene dal fornitore A e 0 quando proviene dal fornitore B.

Regression Equation

$$\text{Welding Time} = 40,77 - 17,19 \text{ Trasmittance} + 2,090 \text{ Trasm_sq} - 0,6540 \text{ Housing supplier}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	40,77	6,33	(28,15; 53,38)	6,44	0,000	
Trasmittance	-17,19	3,19	(-23,54; -10,84)	-5,39	0,000	1292,70
Trasm_sq	2,090	0,398	(1,298; 2,882)	5,26	0,000	1293,04
Housing supplier	-0,6540	0,0720	(-0,7974; -0,5106)	-9,08	0,000	1,03

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,317844	66,28%	64,95%	8,48180	62,75%

Tabella 3.8: Coefficienti del modello dopo l'aggiunta del parametro housing supplier

Il coefficiente di "Housing supplier" riflette la differenza prevista nel tempo di saldatura tra housing provenienti dai fornitori A e B. Il coefficiente negativo indica che utilizzando un housing proveniente dal fornitore A si ottiene, in media, un tempo di saldatura di 0,654 secondi più veloce rispetto ad un housing proveniente dal fornitore B.

Inoltre, l'aggiunta di tale parametro ha contribuito ad aumentare il valore di R-squared da 29,7% al 66,28%, ciò indica l'enorme impatto dell'housing sulle prestazioni del processo.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	15,0896	66,28%	15,0896	5,0299	49,79	0,000
Trasmittance	1	2,0988	9,22%	2,9332	2,9332	29,03	0,000
Trasm_sq	1	4,6606	20,47%	2,7908	2,7908	27,63	0,000
Housing supplier	1	8,3301	36,59%	8,3301	8,3301	82,46	0,000
Error	76	7,6779	33,72%	7,6779	0,1010		
Lack-of-Fit	68	6,8112	29,92%	6,8112	0,1002	0,92	0,613
Pure Error	8	0,8667	3,81%	0,8667	0,1083		
Total	79	22,7675	100,00%				

Tabella 3.9: ANOVA del modello dopo l'aggiunta del parametro housing supplier

Infine, anche in questo caso, la significatività complessiva del modello è evidenziata dal basso p-value nella sezione "Regression". L'F-Value fornisce ulteriore conferma della validità del modello complessivo. Così come il p-value elevato nella sezione "Lack-of-Fit" suggerisce che il modello è in grado di spiegare adeguatamente la variazione nei dati.

Tuttavia, il valore che assume rilevanza nell'output di sopra sono i valori del VIF associati alle variabili "Trasmittance" e "Trasmittance^2", 1292,7 e 1293,04 rispettivamente. Tali sono ben più alti della soglia massima accettabile, ovvero 10. Valori superiori a tale soglia indicano che per quelle variabili vi è una forte multicollinearità.

Dall'altro lato, però, quest'anomalia è molto comune nei modelli polinomiali con termini di grado maggiore di 1. Infatti, quando si includono nel modello termini quadratici o cubici o di qualsivoglia potenza si viene a creare una sorta di **multicollinearità funzionale**¹⁰, ovvero una alta correlazione tra più variabili indipendenti che è naturale del modello e che esiste nel modello polinomiale in quanto tale. Infatti, le due variabili sono altamente correlate perché, banalmente, una è il quadrato

¹⁰ Fonte: The Pennsylvania State University. (2023). Reducing Structural Multicollinearity

dell'altra. E, come mostrato dal grafico di correlazione sottostante, l'indice r di Pearson risulta pari a 1, ovvero il caso in cui la correlazione tra le due variabili è massima.

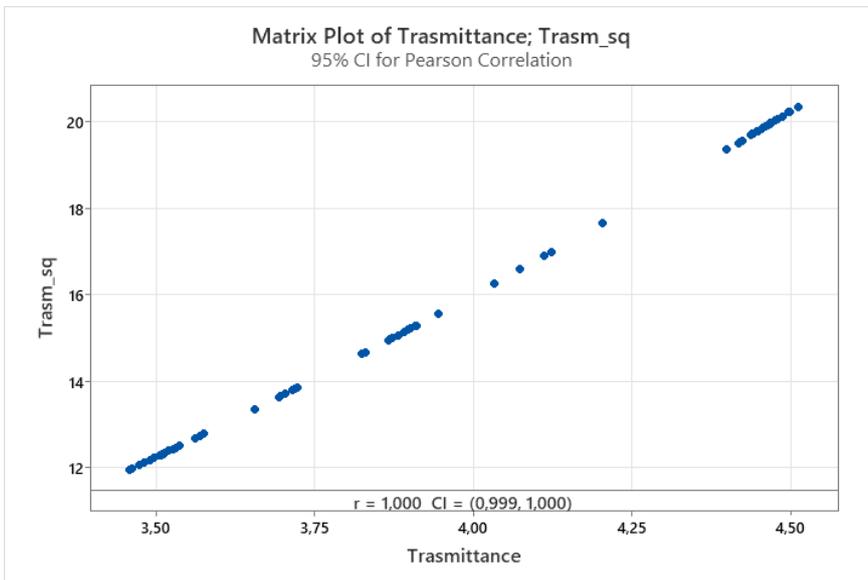


Figura 3.21: Grafico di correlazione tra la trasmittanza e il suo quadrato

Questa correlazione può influenzare negativamente l'analisi e l'interpretazione del modello. In particolare, la multicollinearità può alterare significativamente l'affidabilità delle stime dei coefficienti, indebolendo la capacità inferenziale del modello. Si verificano conseguentemente stime dei coefficienti di regressione poco precise, che possono manifestarsi attraverso segni invertiti o valori di coefficienti improbabili per determinati regressori, in quanto gli impatti specifici di ciascuna variabile si confondono a vicenda. Questa condizione porta inoltre a evidenziare come lievi modifiche ai dati possono risultare in variazioni sostanziali delle stime dei coefficienti di regressione. Questo incrementa la volatilità delle stime e complica l'interpretazione dei risultati, a causa della condivisione di variazione tra le variabili esplicative.¹¹

Per ovviare a questo problema, si agisce direttamente sui dati necessari a stimare i parametri coinvolti. In particolare, si effettua una trasformazione lineare sui dati relativi alla trasmittanza per abbassare il valore dell'indice r di Pearson. Tale trasformazione consiste nella centratura dei predittori¹².

La centratura dei predittori coinvolge la sottrazione della media delle osservazioni a ciascuna osservazione della variabile interessata, creando così una nuova variabile centrata. In termini matematici, la centratura della variabile X per l'osservazione X_i è espressa come dalla formula 3.15 [Rif. The Pennsylvania State University, 2023]

$$X'_i = X_i - \mu \quad (3.14)$$

¹¹ Fonte: Yoo, W., Mayberry, R., Bae, S., Singh, K., He, Q. P., & Lillard, J. W., Jr. (2014). *A Study of Effects of MultiCollinearity in the Multivariable Analysis*

¹² Fonte: The Pennsylvania State University. (2023). *Reducing Structural Multicollinearity*

dove X_i' rappresenta il valore centrato di X per l'osservazione i-esima, X_i è il valore originale della variabile per l'osservazione X_i , e \bar{X} è la media della variabile X su tutte le osservazioni.

L'effetto pratico di questa trasformazione è una riduzione della correlazione tra la variabile originale e la sua controparte quadratica, attenuando così il problema della multicollinearità.

Nella pratica, tale operazione consiste nel sottrarre a tutte le 80 misure di trasmittanza la media dell'intero campione, che risulta pari a 4,04. La nuova variabile ottenuta verrà denominata `tr_cent` mentre il suo quadrato `trsq_cent`.

Come mostrato nel grafico sottostante, la correlazione risulta di gran lunga minore tra le due nuove variabili, risolvendo il problema della multicollinearità.

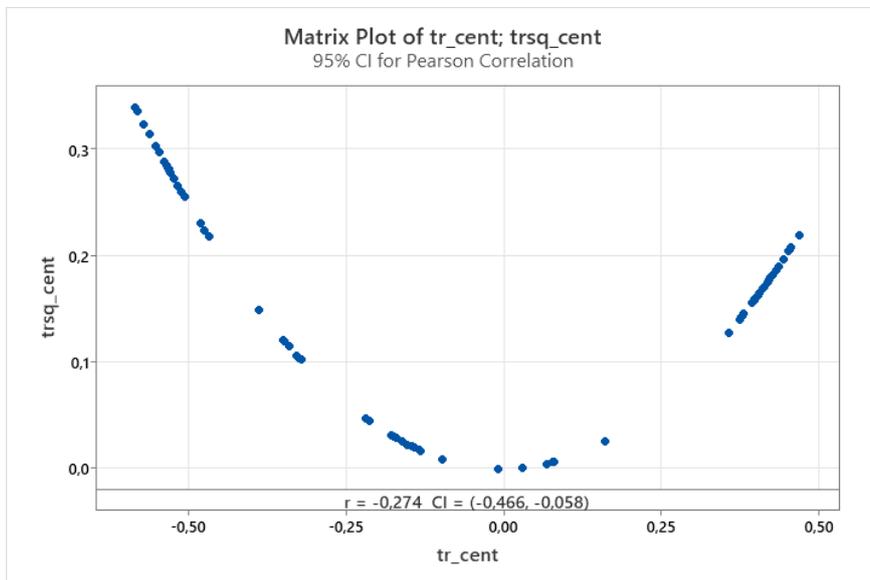


Figura 3.22: Grafico di correlazione tra la trasmittanza centrata e il suo quadrato

Il grafico mostra una forma parabolica rispetto alla forma lineare evidenziando, quindi, la drastica diminuzione dell'indice di correlazione, passando da 1 a -0,274.

A questo punto si prosegue con il modello di regressione definitivo, utilizzando le variabili centrate.

Regression Equation

$$\text{Welding Time} = 5,4293 - 0,2920 \text{ tr_cent} + 2,090 \text{ trsq_cent} - 0,6540 \text{ Housing supplier}$$

Dove:

- `tr_cent` rappresenta la variabile di trasmissione centrata.
- `trsq_cent` rappresenta il quadrato della variabile di trasmissione centrata.
- `Housing supplier` è la variabile dummy per la provenienza dell'housing

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	5,4293	0,0858	(5,2584; 5,6002)	63,28	0,000	
tr_cent	-0,2920	0,0925	(-0,4762; -0,1078)	-3,16	0,002	1,09
trsq_cent	2,090	0,398	(1,298; 2,882)	5,26	0,000	1,11
Housing supplier	-0,6540	0,0720	(-0,7974; -0,5106)	-9,08	0,000	1,03

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,317844	66,28%	64,95%	8,48180	62,75%

Tabella 3.10: Coefficienti del modello centrato

Modificando i termini con la centratura porta a cambiare l'interpretazione del modello, fatta eccezione della variabile dummy, dato che non subisce effetti dalla trasformazione lineare. Il termine costante rappresenta il valore atteso del tempo di saldatura quando tutte le variabili indipendenti sono uguali a zero. In questo caso, indica il tempo di saldatura previsto quando la trasmittanza è alla sua media centrata e la variabile dummy Housing supplier vale zero (provenienza da fornitore B).

Il modello presenta un R-squared pari a 66,28%, ovvero lo stesso valore che si è ottenuto nel modello con i parametri non centrati e, di conseguenza, valgono le medesime considerazioni fatte in precedenza. Inoltre, anche in questo caso tutti i parametri presentano un p-value minore del 5% e, quindi, si possono considerare tutti statisticamente significativi.

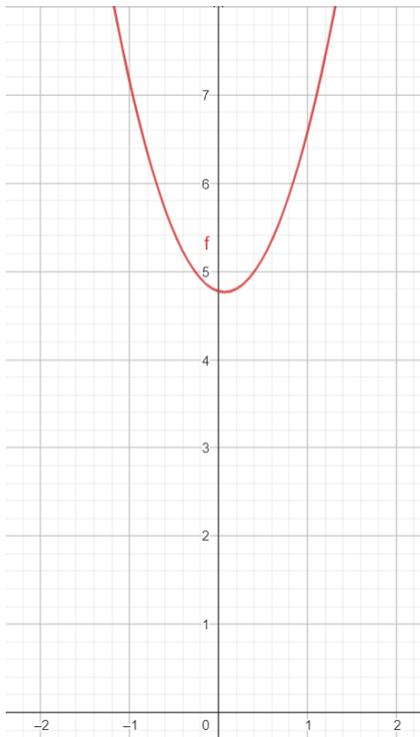
Si osserva, inoltre, che i valori del VIF sono notevolmente diminuiti rispetto al modello precedente, passando da 1292,7 e 1293,4 a 1,09 e 1,11 per il termine lineare e quadratico rispettivamente, indicando un miglioramento significativo nella multicollinearità. In particolare, i VIF vicini a 1 per le variabili centrate indicano che la correlazione tra queste variabili e le altre è stata efficacemente ridotta.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	15,0896	66,28%	15,0896	5,0299	49,79	0,000
tr_cent	1	2,0988	9,22%	1,0067	1,0067	9,96	0,002
trsq_cent	1	4,6606	20,47%	2,7908	2,7908	27,63	0,000
Housing supplier	1	8,3301	36,59%	8,3301	8,3301	82,46	0,000
Error	76	7,6779	33,72%	7,6779	0,1010		
Lack-of-Fit	68	6,8112	29,92%	6,8112	0,1002	0,92	0,613
Pure Error	8	0,8667	3,81%	0,8667	0,1083		
Total	79	22,7675	100,00%				

Tabella 3.11: ANOVA del modello centrato

L'ANOVA mostra che il modello complessivo è statisticamente significativo, con un p-value praticamente nullo per la regressione ed un p-value maggiore del 5% per il test lack of fit.



La figura sinistra mostra il grafico della funzione di regressione nel caso in cui Housing supplier vale 1 (housing proveniente dal fornitore A) in cui si può osservare la variazione del tempo di saldatura al variare della trasmittanza centrata.

In grafico mostra che il tempo di saldatura, per bassi valori di trasmittanza, diminuisce all'aumentare della trasparenza della cover quindi, in questo tratto, prevale il termine lineare con segno negativo. Una volta raggiunto il punto di minimo che si raggiunge quando la variabile indipendente (tr_cent) assume valore pari a 0,07, cioè quando la trasmittanza assume valore pari a 4,11%.

Superato tale valore, il tempo di saldatura cresce al crescere della trasparenza delle cover e, in questo caso, predomina il termine quadratico con il segno positivo.

Figura 3.23: interpretazione grafica del modello centrato

3.6.3. Analisi dei residui

Come indicato prima, i residui rappresentano la differenza tra i valori osservati e quelli previsti dal modello e sono essenziali per valutare la bontà e l'adeguatezza del modello e sono parte delle assunzioni fatte ex-ante la costruzione del modello.

In particolare, viene verificato se:

- Gli errori siano tra loro indipendenti ed identicamente distribuiti (i.i.d.) in modo approssimabile ad una distribuzione Normale con media pari a 0 e varianza pari a σ^2
- Omogeneità della varianza dei residui (omoschedasticità)
- Assenza di outliers

La prima verifica consiste nel verificare se gli errori si distribuiscono secondo una normale. Per fare ciò, si utilizza un istogramma che rappresenta tutti i residui del modello (figura 4.21) e, successivamente, si effettua un test di normalità e un grafico Q-Q plot utilizzando Minitab. Il test di normalità applicato è il test Kolmogorov-Smirnov (KS). Il test KS confronta la distribuzione cumulativa empirica dei residui con quella attesa sotto l'ipotesi di normalità.

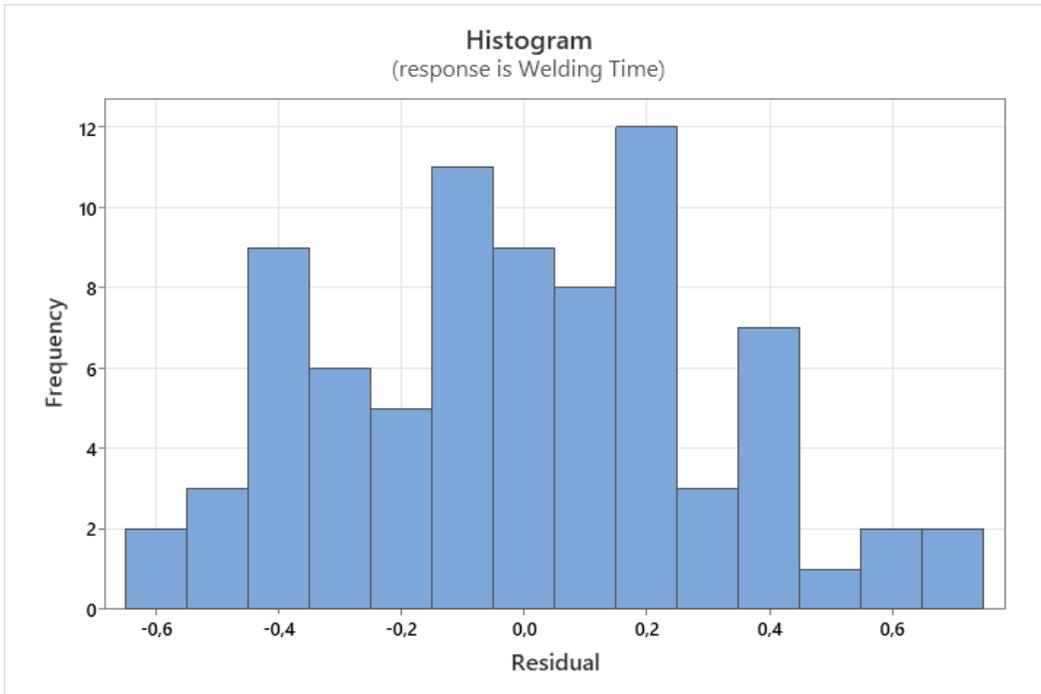


Figura 3.24: Istogramma dei residui

L'istogramma dei residui rimanda alla forma a campana della normale.

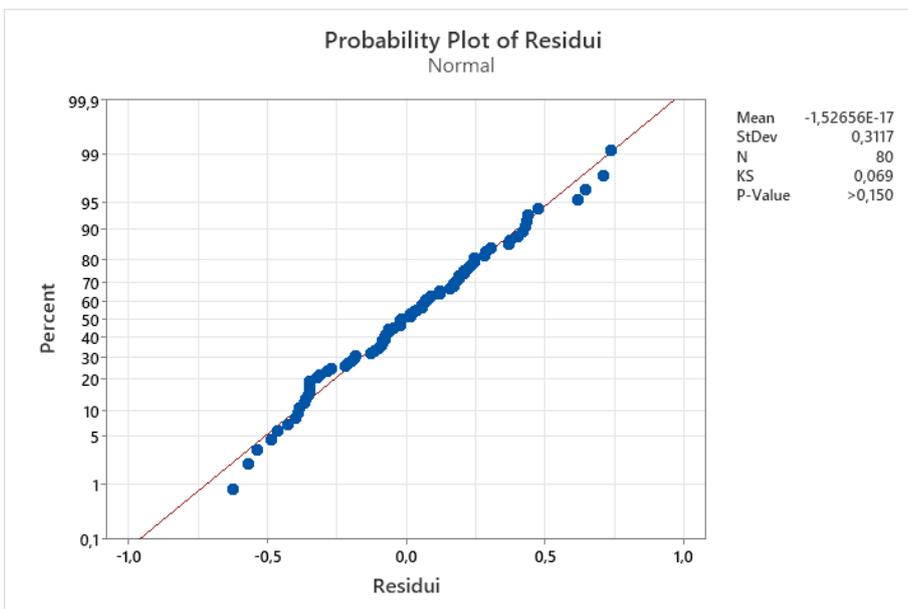


Figura 3.25: Q-Q plot e test KS dei residui

Il p-value associato al test KS risulta pari a 0,150. Tale valore, maggiore del 5%, indica che non ci sono evidenze statistiche sufficienti per respingere l'ipotesi nulla di normalità.

Infine, per valutare se la media dei residui si possa considerare pari a 0 si effettua un test statistico t, dove si testa l'ipotesi nulla $H_0 = \mu = 0$ dove μ è la media degli errori, contro l'ipotesi alternativa $H_1: \mu \neq 0$. Con un livello di confidenza del 95% si ottiene:

Test

Null hypothesis $H_0: \mu = 0$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu \neq 0$

T-Value P-Value
 -0,00 1,000

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI for μ
80	-0,0000	0,3117	0,0349	(-0,0694; 0,0694)

μ : population mean of Residui

Tabella 3.12: Test t sulla media dei residui

In base ai risultati ottenuti dal test statistico, non ci sono evidenze sufficienti per rifiutare l'ipotesi nulla che la media dei residui sia pari a 0.

A questo punto, si va a verificare l'omoschedasticità dei residui, ovvero verificare se la varianza dei residui sia omogenea.

Un modo comune è tracciare i residui in funzione dei valori predetti dal modello costruendo un grafico di dispersione. Se si nota una dispersione costante dei residui lungo l'asse delle variabili predette, ciò suggerisce omoschedasticità. Al contrario, se la dispersione dei residui cambia con i valori predetti, potrebbe indicare la presenza di eteroschedasticità. Un pattern a forma di ventaglio o megafono nei residui può indicare eteroschedasticità. Ciò che è importante è verificare che i residui si dispongono in maniera casuale e non seguano pattern specifici.

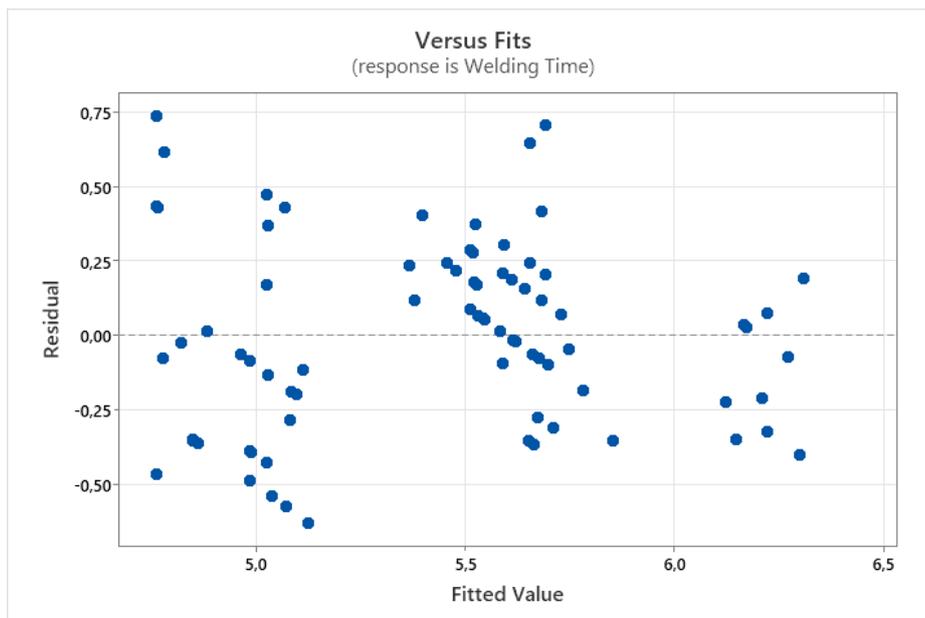


Figura 3.26: Scatterplot dei residui in funzione dei valori predetti

Dal grafico di sopra non si nota un pattern specifico, come ad esempio un pattern crescente o a forma di ventaglio oppure ciclico. Ma, al contrario, si nota una dispersione della nuvola di punti abbastanza casuale, con i punti che si posizionano sopra e sotto la linea dello zero in maniera quasi equivalente.

Questo porta alla conclusione che si può affermare l'omoschedasticità dei residui e, a questo punto, l'assunzione che $u_i \sim N(0, \sigma^2)$ è soddisfatta, σ^2 è la varianza comune dei residui.

Infine, l'ultima verifica da effettuare è la presenza di eventuali outliers. Gli outliers, o valori anomali, sono osservazioni in un insieme di dati che si discostano significativamente dal comportamento tipico delle altre osservazioni. In altre parole, sono punti dati che sono inusuali o distinti rispetto alla maggior parte delle altre osservazioni.

Gli outliers possono verificarsi per vari motivi, tra cui errori di misurazione, errori di inserimento dati, o perché rappresentano vere e proprie eccezioni nel fenomeno che si sta studiando. La loro presenza può distorcere stime e valutazioni dei parametri del modello.

Una delle metodologie più utilizzate per la ricerca degli outliers consiste nel calcolo dell'indice di Cook.

L'indice di Cook per l'osservazione i si calcola sommando i quadrati delle differenze tra le stime dei parametri ottenute includendo e escludendo l'osservazione i dal modello. In formule, l'indice di Cook (Cook's D) per l'osservazione i è dato dalla formula (3.16)¹³

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{Y}_j - \hat{Y}_{j(i)})^2}{p \cdot \text{MSE}} \quad (3.15)$$

dove:

- \hat{Y}_j è la previsione ottenuta includendo tutte le osservazioni,
- $\hat{Y}_{j(i)}$ è la previsione ottenuta escludendo l'osservazione i ,
- p è il numero di parametri del modello,
- MSE è l'errore quadratico medio.

Valori elevati dell'indice di Cook indicano un'alta influenza dell'osservazione i sulla stima dei parametri. In particolare, "per dataset con $n > 15$, si possono considerare i punti come influenti:

- se $D_i > 0,7$ per $p=2$, (un predittore)
- se $D_i > 0,8$ per $p=3$, (due predittori)
- se $D_i > 0,85$ per $p > 3$, (più che predittori)"¹⁴

¹³ Fonte: <https://se.mathworks.com/help/stats/cooks-distance.html>

¹⁴ Fonte: McDonald, B. (2002, June 2). A Teaching Note on Cook's Distance - A Guideline.

Tipicamente, si considera un valore soglia, tipicamente pari a 1, oltre il quale un'osservazione può essere considerata influente. I valori di tale indice vengono calcolati da Minitab e visualizzati con l'output del modello.

Di seguito viene riportato l'istogramma dei valori dell'indice di Cook.

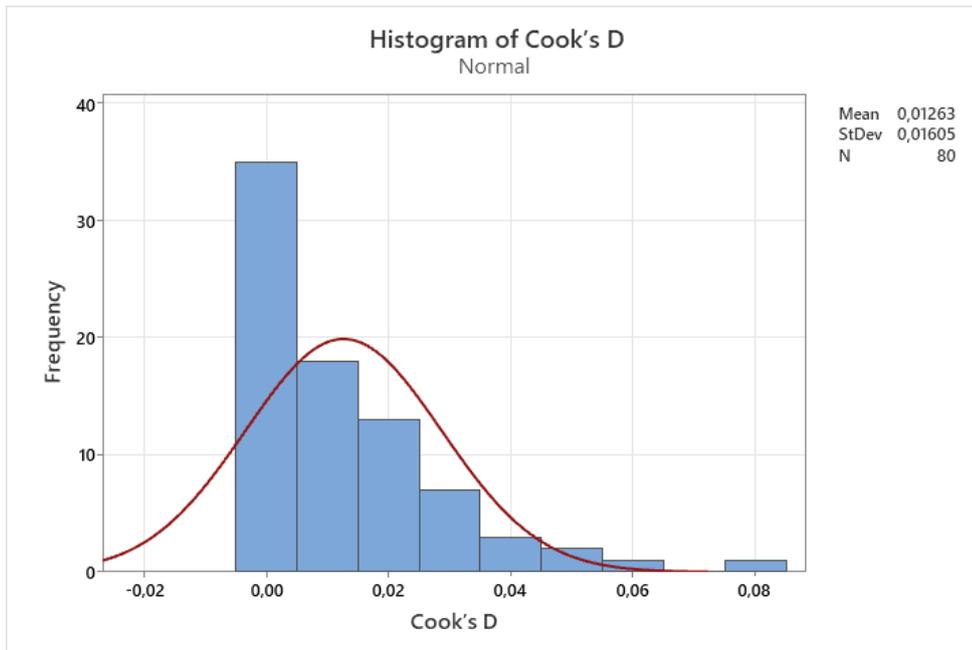


Figura 3.27: Iistogramma dei valori dell'indice calcolati

Nel caso in esame, si hanno tre predittori e, come si evince dall'istogramma riportato in figura 3.23, in nessun caso il valore dell'indice supera il valore soglia di 0,8 stabilito da Barry McDonald.

In particolare, il valore minimo è pari a 0, mentre il massimo 0.08, valori molto distanti dalla soglia. A fronte di tali valori, si può escludere la presenza degli outliers.

Tutti i test effettuati sui residui hanno dato esito positivo e non sono state riscontrate anomalie che possano perturbare la capacità del modello di adattarsi ai dati e di fornire previsioni circa il tempo di saldatura.

3.6.4. Interpretazione del modello

Una volta costruito il modello di regressione e verificata la sua validità, è possibile trarre conclusioni sul comportamento del tempo di saldatura in relazione ai parametri analizzati. Questo fornisce insight sulle performance dei due fornitori per quanto riguarda la fornitura di cover e housing. L'obiettivo è implementare una strategia di procurement basata sul modello di regressione.

Per l'housing, il modello suggerisce chiaramente che il tempo di saldatura previsto utilizzando l'housing del fornitore A è inferiore di 0,654 secondi rispetto a quello del fornitore B. Nonostante questa differenza sembri modesta in termini di tempo ciclo, considerando la produzione giornaliera di quasi 6000 freni, il risparmio diventa significativo. Pertanto, l'adozione di una strategia di dual

sourcing, con preferenza per il fornitore A, potrebbe essere ottimale. L'azienda potrebbe affidarsi principalmente al fornitore A e, in caso di necessità, acquisire le quantità mancanti dal fornitore B.

Per le cover, l'analisi della trasparenza ha evidenziato che più la trasmittanza si avvicina al punto di minimo (4,11%), più il tempo di saldatura diminuisce a parità di housing. Un approccio potrebbe consistere nel calcolare il tempo di saldatura previsto utilizzando le medie delle trasmittanze dei due fornitori. I risultati mostrano che, assumendo l'uso dell'housing del fornitore A, il tempo previsto è di 4,96 secondi per il fornitore A e 5,17 secondi per il fornitore B.

Tuttavia, un'analisi più dettagliata evidenzia differenze significative nei valori di trasmittanza delle cover del fornitore B tra i lati BU e MU. Le cover lato BU hanno una trasmittanza media di 3,51, corrispondente a un tempo previsto di 5,52 secondi, mentre le cover lato MU presentano una media di 3,83, con un tempo previsto di 4,93 secondi, addirittura inferiore a quello del fornitore A. Pertanto, potrebbe essere vantaggioso valutare una possibile differenziazione della fornitura delle cover in base al lato, assegnando al fornitore A le cover lato BU e al fornitore B quelle lato MU, al fine di minimizzare il tempo di saldatura e, di conseguenza, il tempo ciclo complessivo.

CAPITOLO 4 – PROGETTAZIONE DI UN CONTROLLO DI ACCETTAZIONE IN ARRIVO PER LE COVER

L'obiettivo di questo capitolo consiste nella progettazione di un sistema di controllo di accettazione, mirato a verificare la conformità delle forniture in arrivo alle specifiche richieste. Attraverso tale approccio, si intende decidere se accettare o rifiutare il lotto di cover destinate a essere impiegate come azione di contenimento per eventuali non conformità riscontrate durante il processo di saldatura. Il criterio di accettazione sarà basato sulla percentuale minima di trasparenza, calcolata nel capitolo precedente e fissata al 3%, imposta come requisito minimo per i fornitori.

Il piano di accettazione ha l'obiettivo di minimizzare la presenza di cover con bassa trasparenza nella produzione. La bruciatura delle cover durante il processo di saldatura comporta un aumento significativo dei costi di qualità, poiché danneggia in maniera irreversibile l'interno MGU, incluso l'housing, il cui costo si attesta intorno agli 8,15 €/unità. Inoltre, tale fenomeno impatta negativamente sull'efficienza del processo, poiché ogni lotto difettoso richiede l'arresto immediato del processo, la rimozione di tutti i layer presenti nella stazione e la sostituzione del lotto. Ciò si traduce in notevoli perdite di efficienza e tempo, specialmente considerando gli sforzi dell'azienda nel ridurre il tempo ciclo per aumentare la produttività della saldatrice.

4.1. Letteratura sui controlli di accettazione

I controlli di accettazione hanno lo scopo di ispezionare i materiali in arrivo per assicurare che siano conformi agli standard desiderati prima di procedere con ulteriori fasi di produzione o distribuzione.

Il controllo di accettazione può essere classificato in diverse tipologie, a seconda dell'approccio e della profondità del controllo effettuato:¹⁵

1. **Nessun Controllo:** In questo approccio, le partite vengono accettate senza alcuna ispezione. Questo metodo è generalmente adottato quando si ha una forte fiducia nella qualità del fornitore o quando il costo del controllo supera il potenziale rischio di difetti. Tuttavia, questa strategia può essere rischiosa, in quanto ignora completamente la possibilità di ricevere prodotti difettosi.

¹⁵ Fonte: Montgomery D.C., *Introduction to Statistical Process Control*, 2008

2. **Controlli a Campione:** Questo metodo prevede l'ispezione di un campione casuale prelevato dalla partita totale. Il campionamento può seguire vari schemi statistici, come il piano di campionamento semplice o il piano di campionamento sequenziale. La decisione di accettare o rifiutare l'intera partita si basa sui risultati ottenuti dal campione. Questo approccio è un equilibrio tra l'efficienza del tempo e la precisione del controllo, riducendo il costo e il tempo necessari per l'ispezione senza trascurare completamente la qualità.
3. **Controlli a Tappeto:** In questo caso, ogni singolo articolo nella partita viene ispezionato. Questo approccio è il più rigoroso e viene utilizzato quando la qualità è di estrema importanza o quando i rischi associati a prodotti difettosi sono elevati. Sebbene questa metodologia garantisca il più alto livello di controllo sulla qualità, è anche la più costosa e richiede tempo in termini di risorse e manodopera.

4.1.1. Parametri di un controllo di accettazione

Ancor prima di esporre i concetti riguardanti i controlli di accettazione, è bene definire i parametri principali che i lotti. I parametri principali da considerare includono:

- **N (Numerosità del Lotto):** Questo parametro indica il numero totale di unità in un lotto. La numerosità del lotto è un fattore determinante nella scelta del piano di campionamento e influisce sulla probabilità di rilevare difetti.
- **D (Difettosi nel lotto):** Indica il numero di elementi difettosi presenti all'interno di un lotto
- **p (Percentuale di Difettosità del Lotto):** Questo parametro rappresenta la proporzione di unità difettose presenti in un lotto e viene calcolato dal rapporto D/N .
- **c (Numero di Accettazione):** Il numero di accettazione è il numero massimo di unità difettose che possono essere trovate in un campione perché il lotto venga accettato. Questo parametro è strettamente legato al livello di qualità che il committente è disposto a tollerare.

I parametri appena elencati fanno riferimento alle caratteristiche dei lotti. Per la progettazione di un piano di accettazione, vengono definiti ulteriori parametri che regolano la posizione del fornitore e del committente nonché il loro rapporto contrattuale:

- **AQL (Acceptable Quality Level):** È il livello di difettosità accettabile, espressa in percentuale. L'AQL rappresenta, quindi, il livello di qualità minimo del processo produttivo del fornitore che il committente ritiene accettabile.

- **LTPD (Lot Tolerance Percent Defective):** Rappresenta la percentuale di difetti massima che un lotto deve non deve superare per essere considerato accettabile con un alto grado di sicurezza

AQL e LTPD sono legati, rispettivamente al rischio del fornitore e al rischio dell'acquirente.

- **Rischio del Fornitore (Alpha):** È la probabilità che un lotto di qualità accettabile venga rifiutato a causa dei risultati del controllo a campione. Questo rischio è un aspetto critico nella gestione delle relazioni con i fornitori, poiché un alto rischio alpha può portare a rifiuti ingiustificati e tensioni nella catena di fornitura.
- **Rischio del Committente (Beta):** È la probabilità che un lotto non conforme venga erroneamente accettato. Questo rischio è particolarmente rilevante per la sicurezza e la soddisfazione del cliente, poiché un alto rischio beta può significare l'accettazione di prodotti di qualità inferiore.

4.1.2. Piano per attributi

Un piano di accettazione per attributi è definito da un insieme specifico di criteri che determinano l'accettabilità di un lotto. Questi criteri sono spesso basati sul numero di difetti trovati in un campione preso dal lotto, per questo viene definito per attributi. Infatti, in questo caso, le singole unità che compongono il lotto vengono identificate come difettosi o non difettosi e non in base alla misura di una grandezza continua come la massa, la lunghezza del diametro, la temperatura, e così via.

In linea di massima, un piano per attributi semplice consiste quindi nell'ispezionare un campione n estratto da un lotto di dimensione N , se il numero di difettosi d presenti nel campione n è maggiore della soglia c allora il lotto viene rifiutato, viceversa, se il numero di difettosi è minore di c allora il lotto viene accettato.

Progettare un piano semplice per attributi significa, quindi, determinare la dimensione del campione n e il numero di accettazione c in funzione dei parametri AQL e LTPD.

Lo strumento più usato per valutare le prestazioni di un controllo di accettazione è la costruzione di una **curva operativa caratteristica (OC)** che esprime la capacità discriminatoria (potenza) del piano di campionamento. In particolare, tale curva esplicita la probabilità di accettazione del lotto P_a in funzione della percentuale di difettosità p dello stesso.

Nei piani per attributi la probabilità di accettazione varia in relazione al reinserimento delle unità ispezionate.

Se si suppone di avere un lotto di dimensione N molto grande e si estrae un campione n con il reinserimento nel lotto dei pezzi controllati, il numero di difettosi d contenuti in n segue una distribuzione binomiale con parametri n e p , dove p è la percentuale di difettosità del lotto. Quindi la probabilità di ottenere esattamente un numero di difettosi pari a d è data dalla formula 4.1 [Rif. Montgomery, 2008]

$$P(d) = \frac{n!}{d!(n-d)!} p^d (1-p)^{n-d} \quad (4.1)$$

Con $d = 0, 1, \dots, n$.

A questo punto, si può definire la probabilità di accettare il lotto P_a , che equivale alla probabilità che il numero di difettosi d sia minore del numero di accettazione c [Rif. Montgomery, 2008]:

$$P_a = P\{d \leq c\} = \sum_{d=0}^c \frac{n!}{d!(n-d)!} p^d (1-p)^{n-d} \quad (4.2)$$

Dal punto di vista grafico la curva OC assume la tipica forma ad S, come mostrato nell'esempio in figura 4.1.

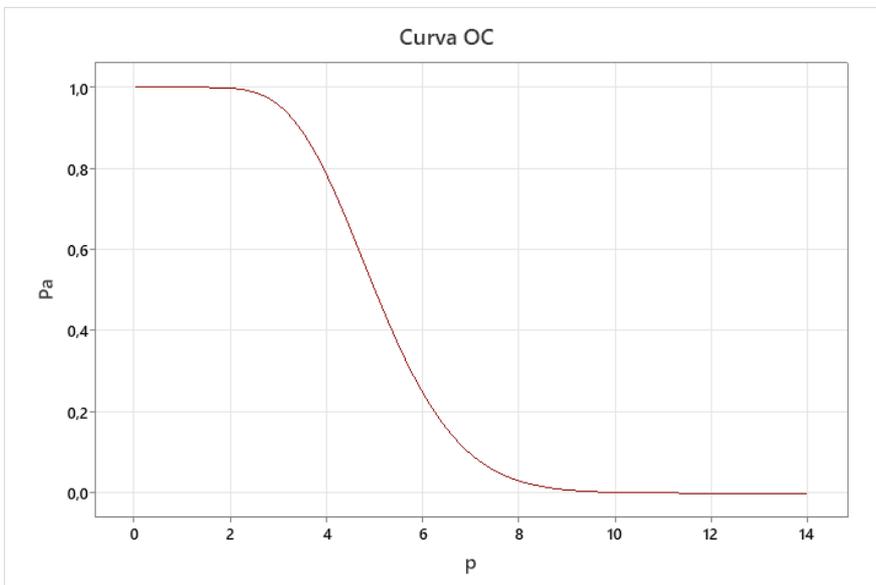


Figura 4.1: Esempio di una curva OC

Tale forma è dovuta al calo della probabilità di accettazione all'aumentare della difettosità del lotto. Inoltre, quando si ispeziona un lotto tramite un campionamento si fa un test di ipotesi e si testa l'ipotesi nulla H_0 : il lotto è conforme alle specifiche, contro l'ipotesi alternativa H_1 : il lotto non è conforme alle specifiche con livelli di rischio α e β . Questo spiega la forma curvata del grafico. Infatti, nel caso di controllo a tappeto ciò non accade e la curva assume una forma quadrata con rischi nulli come mostrato nella figura sottostante.



Figura 4.2 Confronto tra curva ideale e reale

La funzione rettangolare mostra la curva reale, senza i rischi del campionamento annessi. Questa curva si ottiene nei casi di campionamento a tappeto, dove tutti i singoli item facenti parte del lotto, se il numero di item difettosi supera il numero di accettazione la probabilità di accettazione si azzerava mentre nel caso opposto questa risulta unitaria.

La curva reale, invece, diventa sempre più simile alla curva ideale all'aumentare della dimensione del campione n . All'aumentare di c la curva si avvicina sempre di più all'origine degli assi. In sintesi, all'aumentare di n e al diminuire di c la curva si restringe sempre di più diventando più ripida, in questo caso il controllo di accettazione risulta essere più "severo". Viceversa, al diminuire di n e all'aumentare di c la curva trasla verso destra e diventa meno inclinata.

Per progettare un piano di accettazione, quindi, bisogna stabilire i parametri n e c una volta fissati i parametri AQL e LTPD. Si supponga di volere costruire un piano di campionamento tale che la probabilità di accettazione sia $1 - \alpha$ per lotti con frazione di elementi difettosi AQL e che la probabilità di accettazione sia β per lotti con frazione di elementi difettosi LTPD. I parametri n e c si ottengono risolvendo il seguente sistema a due equazioni [Rif. Montgomery, 2008]:

$$1 - \alpha = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} AQL^x (1 - AQL)^{n-x} \quad (4.3)$$

$$\beta = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} LTPD^x (1 - LTPD)^{n-x} \quad (4.4)$$

Questo metodo impone, sostanzialmente, che la curva OC passi per due punti prefissati.

In alcuni casi possono essere adottate strategie di abbattimento della difettosità entrante. Una di queste è l'adozione di **piani di campionamento con rettifica**. La rettifica consiste nel controllare a tappeto un lotto che è stato rifiutato al fine di rilavorare tutti i pezzi difettosi trovati o sostituirli con pezzi conformi.

Si suppone che un lotto in arrivo abbia difettosità pari a p_0 . Se il lotto viene accettato, il lotto non viene ispezionato a tappeto e non viene effettuata nessuna rettifica e, di conseguenza, il lotto rimane con difettosità p_0 . Viceversa, se il lotto viene rifiutato si esegue la rettifica da parte del

fornitore consistente in un'ispezione a tappeto del lotto e la sostituzione dei pezzi difettosi. Ciò implica che la difettosità dopo l'ispezione non è più quella iniziale p_0 , ma viene completamente azzerata, avendo controllato il 100% del lotto.

In questo tipo di campionamento, si definisce la qualità media uscente AOQ (Average Outgoing Quality), ovvero un indice che misura la qualità media dei lotti che vengono sottoposti ad ispezione e qualsiasi azione di screening o rettifica. Questo indice tiene conto sia dei lotti accettati direttamente sia di quelli che, dopo essere stati inizialmente rifiutati, sono stati sottoposti a ispezioni al 100% e da cui sono stati rimossi i difetti. Tale indice è così definito [Rif. Montgomery, 2008]:

$$AOQ = \left[\frac{p(N-n)}{N} \cdot P_a \right] + [0 \cdot (1 - P_a)] = P_a \cdot \frac{p(N-n)}{N} \quad (4.5)$$

Tale indice esprime la difettosità come il numero atteso di unità difettose nel caso in cui il lotto viene accettato con una difettosità p , pesato per la probabilità di accettazione e nel caso in cui il lotto viene rifiutato con una difettosità nulla, pesato con probabilità $1 - P_a$, cioè la probabilità di rifiutare il lotto.

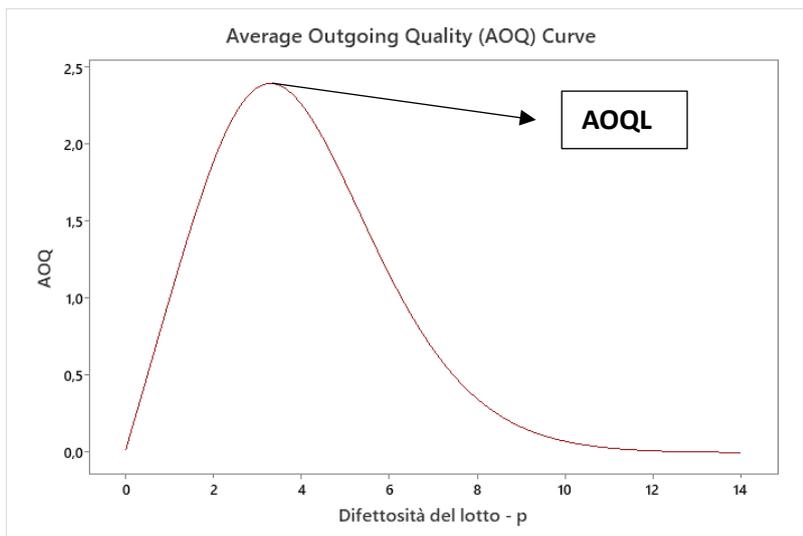


Figura 4.3: Esempio grafico dell'indice AOQ

Il grafico mostra l'andamento tipico di AOQ in funzione della difettosità entrate del lotto. Il tratto iniziale crescente evidenzia come in corrispondenza di una difettosità entrante bassa corrisponde un AOQ basso. Dopo il tratto crescente, la curva presenta un punto di massimo e poi scende. Tale punto di massimo in ordinata rappresenta la qualità media peggiore che si ottiene dall'ispezione con rettifica ed è chiamato AOQL. Dopo questo punto la curva assume un andamento decrescente. Questo avviene perché i lotti con più alta difettosità hanno maggiore probabilità di essere rifiutati e, nel caso di ispezione con rettifica, i pezzi difettosi vengono sostituiti e, di conseguenza, la qualità uscente viene abbattuta.

4.1.3. ATI (Average Total Inspection)

Uno degli indici più utilizzati per valutare le prestazioni e l'efficacia dei piani di campionamento è l'indicatore ATI (Average Total Inspection).

L'Average Total Inspection (ATI) è una misura della quantità totale di ispezioni che si prevede di eseguire, in media, per lotto. L'ATI considera sia i campioni ispezionati durante la valutazione iniziale sia le eventuali ulteriori ispezioni necessarie per i lotti inizialmente rifiutati.

L'ATI può essere calcolato come [Rif. Montgomery, 2008]:

$$ATI = nP_a + N(1 - P_a) = n + (N - n)(1 - P_a) \quad (4.6)$$

Questa formula tiene conto del fatto che, per i lotti rifiutati, si potrebbe procedere a un'ispezione completa (cioè di tutte le N unità) prima di decidere se accettarli o meno

Da tale relazione si evince che l'indice ATI dipende direttamente dalla probabilità di accettazione del lotto che, a sua volta, dipende dalla difettosità dello stesso. Di conseguenza, l'indice ATI dipende dalla difettosità p del lotto. In particolare, l'andamento tipico dell'indice è mostrato nel grafico sottostante, che riporta l'esempio di un campione di numerosità pari a n=250 unità a fronte di un lotto composto da N=10000 unità.

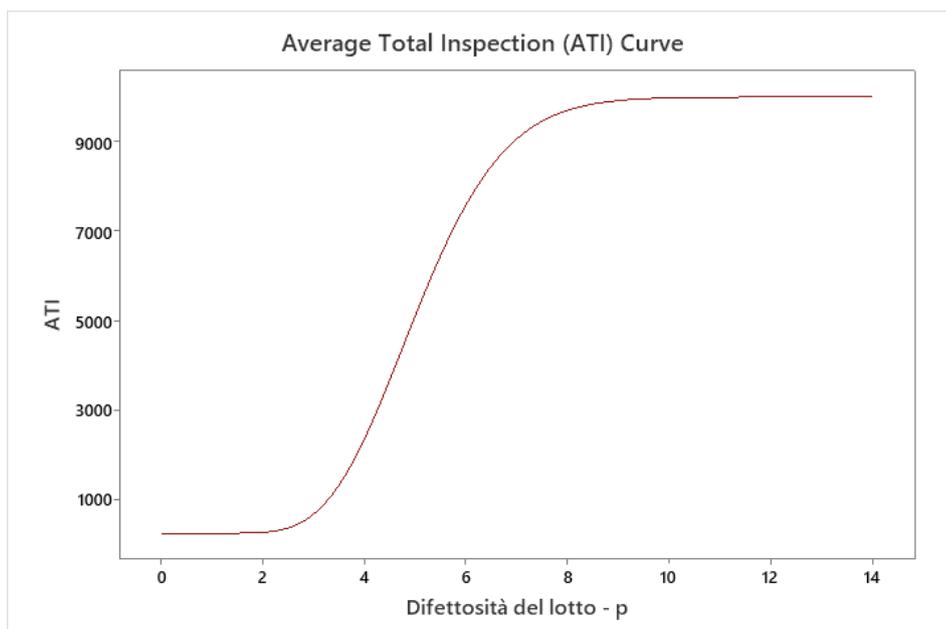


Figura 4.4: Grafico raffigurante l'andamento tipico dell'ATI in funzione della difettosità

Se la difettosità è nulla, la probabilità di accettazione risulta unitaria e, in questo caso il valore di ATI è esattamente pari a N. All'aumentare della difettosità il numero di ispezioni di ispezioni aumenta e il valore di ATI tenderà asintoticamente a N.

4.1.4. Piano di accettazione per variabili

I piani di accettazione per variabili, a differenza dei piani per attributi che valutano la presenza o assenza di difetti (es. pezzi difettosi/non difettosi), si basano sulla misurazione di caratteristiche quantificabili del prodotto (es. dimensioni, peso, resistenza). Questi piani permettono di ottenere un'immagine più dettagliata e accurata della qualità dei lotti e sono particolarmente utili quando le caratteristiche del prodotto possono essere misurate su scale continue.

Mentre nei piani per attributi il risultato è binario (conforme o non conforme), nei piani per variabili si utilizzano parametri statistici come la media e la deviazione standard per valutare se il lotto rientra nei limiti di qualità definiti.

La progettazione di un piano di campionamento per variabili avviene previa definizione di un limite di specifica, sia esso superiore o inferiore o entrambi. Tale progettazione può seguire due metodologie distinte:

- Metodo K
- Metodo M

In generale, quando si ha un solo limite di specifica viene utilizzato il metodo k. Viceversa, in presenza di entrambi i limiti si predilige il metodo M. Nel caso in esame verrà utilizzato il metodo K, dato che è definito soltanto il limite di specifica inferiore (LSL).

Il metodo k si basa nel verificare che la media della misurazione interessata sia distante almeno K volte la deviazione standard dal limite di specifica. Maggiore è la distanza da tale limite, minore è la percentuale di elementi difettosi presenti nel campione.

Come primo step della progettazione di un piano per variabili è necessaria la definizione dei parametri AQL e LTPD, nonché i livelli di rischio α e β , in maniera analoga al piano per attributi.

Una volta definiti tali parametri, occorre definire la dimensione del campione n e il parametro k.

I parametri n e k dipendono dai parametri AQL e LTPD e dai rispettivi livelli di rischio. In particolare, k viene ricavato dalla seguente relazione:

$$k = \frac{Z_{AQL}Z_{\beta} - Z_{LTPD}Z_{1-\alpha}}{Z_{1-\alpha} - Z_{\beta}} \quad (4.7)$$

Per quanto riguarda la grandezza del campione n , bisogna distinguere il caso in cui la deviazione standard sia nota e il caso in cui non è nota. Nel caso di σ nota il valore di n è così definito:

$$n = \left(\frac{-Z_{1-\alpha} Z_\beta}{Z_{AQL} - Z_{LTPD}} \right)^2 \quad (4.8)$$

Nel caso di σ non nota, invece, tale relazione diventa:

$$n = \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) \left(\frac{-Z_{1-\alpha} Z_\beta}{Z_{AQL} - Z_{LTPD}} \right)^2 \quad (4.9)$$

Una volta calcolati tutti i parametri necessari, si può applicare tale piano estraendo dal lotto in esame un campione di dimensione n . Da tale campione si misura la media e la deviazione standard e si calcola la statistica Z_{LSL} :

$$z_{LSL} = \frac{\mu - LSL}{\sigma} \quad (4.10)$$

Se tale statistica è maggiore del parametro k , il lotto viene accettato. Viceversa, se il valore di Z_{LSL} è minore del parametro k , il lotto verrà rifiutato.

Anche la probabilità di accettazione viene differenziata in base alla deviazione standard. Infatti, nel caso di deviazione standard nota si ha:

$$P_a = \Phi(-(z_p + k)\sqrt{n}) \quad (4.11)$$

Invece, qualora fosse nota:

$$P_a = \Phi\left(-\frac{(z_p + k)\sqrt{n}}{\sqrt{1 + \frac{k^2}{2}}}\right) \quad (4.12)$$

I vantaggi di adottare un piano per variabili rispetto ad un piano per attributi possono essere duplici:

- Dimensione del campione ridotta: di solito, a parità di parametri, i piani di accettazione per variabili prevedono una dimensione del campione da ispezionare ridotta rispetto ai piani per attributi.
- Maggiore contenuti informativi: rispetto ad un piano per attributi che classifica i prodotti in difettoso/non difettoso, il piano per variabili prevede delle misurazioni che dettagliano meglio le condizioni del lotto

Dall'altro lato, lo svantaggio principale di un piano per variabile è quello di progettare tanti piani quante sono le caratteristiche da misurare.

4.2. Applicazione al caso di studio

Per la realizzazione di un controllo di accettazione delle cover verranno progettati, in base ai parametri calcolati, sia un piano per attributi che per variabili e, successivamente, verranno confrontati i due piani e, in base alle esigenze e ai vincoli dell'azienda, verrà scelto il piano più adatto. Per la progettazione di entrambi i piani si è utilizzato, anche in questo caso, il software Minitab, dato che tale software consente una maggiore precisione di calcolo rispetto all'utilizzo del normogramma binomiale e, inoltre, fornisce come output anche i grafici relativi alla curva operativa caratteristica e agli indicatori AOQ e ATI.

4.2.1. Stima dei parametri

Per quanto riguarda il livello di difettosità accettabile, ovvero AQL, viene in genere definito dal mercato e dal settore di riferimento. Tipicamente nel settore automotive i livelli di difettosità delle forniture che un cliente si aspetta dal fornitore sono molto bassi. Questo perché, in questo settore, i costi di non qualità sono molto alti. Se un produttore di automobili acquista dei lotti di freni a tamburo e dovesse trovare un solo freno con un grave difetto, nella maggior parte dei casi sarà necessario ispezionare l'intera fornitura spedita. Il tutto a spese del fornitore che effettuerà la selezione presso la sede del cliente avvalendosi di una ditta esterna che fornisce manodopera a dei costi orari molto alti, soprattutto se il cliente si trova in paesi ad alto costo della manodopera, come ad esempio la Germania. Inoltre, nel capitolo precedente era stata analizzata la variabilità interna dei lotti e si era sottolineato che, al loro interno, i lotti erano abbastanza omogenei in termini di trasparenza delle cover e le problematiche nascevano dalla variabilità tra i vari lotti. Di conseguenza, riconoscere un lotto non conforme diventa più semplice. A fronte di tali considerazioni, si è ritenuto ragionevole fissare per AQL un valore pari all'1%. Per quanto riguarda il parametro LTPD, invece, esso riguarda la difettosità massima tollerata affinché un lotto sia considerato accettabile. Per l'azienda è stato ritenuto ragionevole fissare tale valore pari al 6%.

Tali valori sono stati scelti in modo da bilanciare il controllo di accettazione e non renderlo eccessivamente rigido e dispendioso. Infatti, la scelta di un AQL dell'1% riflette la complessità e l'alta richiesta di qualità nel settore automotive, che tollera minimamente la presenza di difetti nei lotti di fornitura, visti gli alti costi di non qualità tipici di questo settore. D'altra parte, l'impostazione di un LTPD al 6% tiene conto dell'omogeneità osservata all'interno dei lotti in termini di trasparenza delle cover. Questa soglia relativamente elevata per la difettosità massima

tollerata consente una certa flessibilità nel processo di controllo di accettazione, evitando rigidità eccessive nei controlli che potrebbero risultare in rifiuti ingiustificati di lotti sostanzialmente conformi.

A questo punto, vengono stimati i rischi α e β , ovvero i rischi per il fornitore e il committente, rispettivamente.

Per la stima di tali parametri si è seguito un approccio relativo ai costi che fornitore e committente sostengono ogni qualvolta venga rifiutato un lotto.

In particolare, per quanto riguarda il parametro α , ovvero il rischio che il fornitore si veda rifiutato un lotto buono, si è stimato rapportando il costo che il fornitore sostiene quando viene rifiutato un lotto e il ricavo derivato dalla vendita giornaliera dei lotti.

Siano considerate le seguenti assunzioni, necessarie al calcolo dei parametri:

- Un cassone è composto da 26 layer, ogni layer contiene 36 cover. Di conseguenza, un cassone è composto da 936 cover
- Il prezzo di un cassone di cover per il committente è $P_c = 600 \text{ €/cassone}$
- L'azienda ordina, in media, 6 cassoni al giorno
- Nel caso di rifiuto di un lotto, il fornitore dovrà pagare una penale pari al 20% di prezzo del cassone, ovvero 120€, sottoforma di sconto per l'acquisto successivo
- Per il settore dello stampaggio plastico, il margine lordo si aggira intorno al 30% del prezzo

Per il calcolo del parametro α si considera una situazione in cui il committente ordina sei cassoni di cover in un giorno. Si suppone che, di questi sei cassoni, uno venga rifiutato. Il costo per questo rifiuto sarà pari alla penale che dovrà pagare, ovvero 120€ per il singolo cassone rifiutato, e il costo opportunità generato, ovvero il margine che il fornitore ha sul cassone che è pari al 30% del prezzo di vendita, ovvero 180€.

A questo punto, per il calcolo di α , bisogna rapportare il costo per il rifiuto del singolo cassone, ovvero $120\text{€} + 180\text{€} = 300\text{€}$, al ricavo giornaliero dei 6 lotti, ovvero 3600€. In questo modo si ottiene un valore di α pari al 8,33%.

Per il calcolo del parametro β si segue un approccio simile per il calcolo del parametro precedente, ovvero si rapporta il costo di non qualità generato con il ricavo. In particolare, si rapporta il costo generato da una singola cover difettosa, quindi con bassa trasmittanza, con il ricavo di un freno EPB. Come si è accennato ad inizio del capitolo, quando una cover non è abbastanza trasparente alla lunghezza d'onda del laser, la stessa viene bruciata durante il processo di saldatura. Bruciandosi, la cover danneggia l'intero MGU, rendendo le componenti inutilizzabili. Il costo di un intero MGU è così composto: il costo delle cover è pari a 0,641€/unità, costo che si ottiene dividendo il prezzo di un cassone (600€) con la quantità di cover al suo interno (936 unità); il costo di un motorino compreso di tutte le viti è di circa 7€; infine, il costo di un housing è di circa 0,5 €/unità. Il costo totale è, quindi, pari a 8,141 €/unità.

Inoltre, il ricavo per un freno di tipo EPB è circa 55€/unità.

A questo punto, per il calcolo del parametro β si rapporta il costo di non qualità generato (8,141 €/unità) con il ricavo generato (55€/unità), ottenendo un valore di β pari a 14,8%.

4.2.2. Piano per attributi

Una volta stimate le posizioni del fornitore F (AQL, $1 - \alpha$) e committente C (LTPD, β) si hanno tutti gli strumenti necessari alla creazione del piano.

Poiché un controllo di accettazione per attributi prevede una classificazione binaria delle unità (difettoso o non difettoso), saranno considerate difettose tutte le cover con trasmittanza media inferiore al 3%, misurate con il metodo illustrato nel capitolo 3. Di seguito viene riportato

procedimento utilizzato per la progettazione del piano su Minitab.

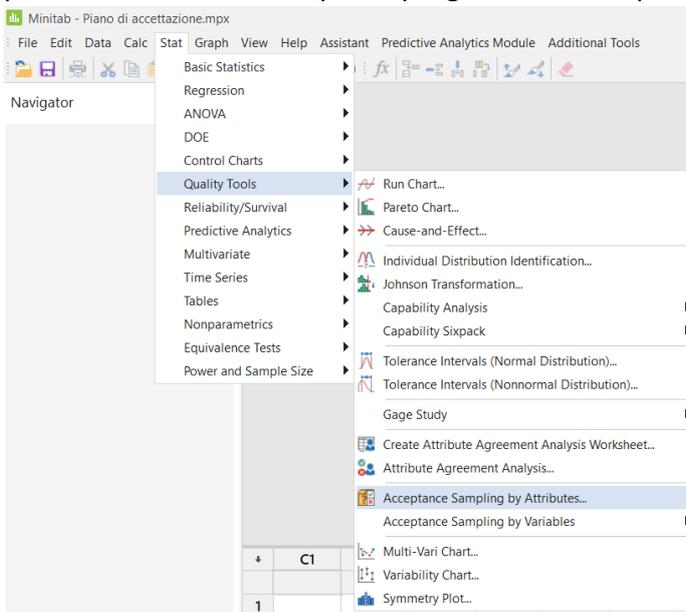


Figura 4.5: Primo step della creazione di un piano per attributi su Minitab

Acceptance Sampling by Attributes

Create a Sampling Plan

Measurement type: Go / no go (defective)

Units for quality levels: Percent defective

Acceptable quality level (AQL): 1

Rejectable quality level (RQL or LTPD): 6

Producer's risk (Alpha): 0,083

Consumer's risk (Beta): 0,148

Lot size: 936

Options...
Graphs...
OK
Cancel
Help

Figura 4.6: inserimento dei parametri del piano su Minitab

Di seguito viene riportato l'output del software, ovvero i parametri n e c del piano per attributi

Method

Acceptable Quality Level (AQL)	1
Producer's Risk (α)	0,083
Rejectable Quality Level (RQL or LTPD)	6
Consumer's Risk (β)	0,148

Generated Plan(s)

Sample Size	78
Acceptance Number	2

Accept lot if defective items in 78 sampled ≤ 2 ; Otherwise reject.

Percent Defective	Probability Accepting	Probability Rejecting	AOQ	ATI
1	0,956	0,044	0,877	115,5
6	0,146	0,854	0,803	810,7

Tabella 4.1: parametri del piano per attributi su Minitab

L'output fornisce un valore della dimensione del campione n pari a 78 e un numero di accettazione c pari a 2. Secondo tali valori, da ogni lotto composto da $N = 936$ cover, per essere accettato, dovrà essere estratto un campione di 78 unità e non più di due unità del campione devono avere trasmittanza media minore del 3%.

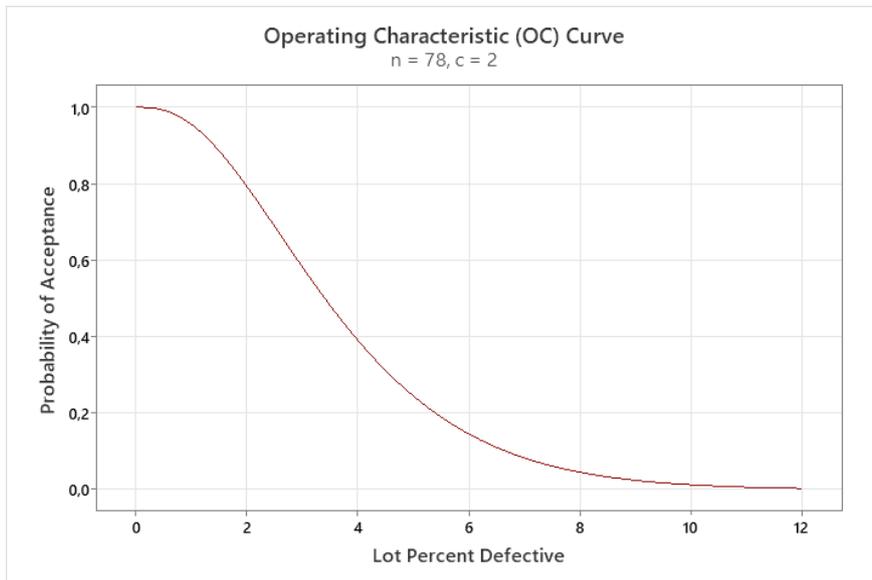


Figura 4.7: Curva OC del piano

La curva OC mostrata sopra dimostra la "severità" del piano di accettazione sviluppato. Questo perchè il valore basso di c congiuntamente alla consistente numerosità del campione generano una curva ripida, schiacciata verso l'origine degli assi dove la probabilità di accettazione diminuisce in maniera molto marcata all'aumentare della difettosità del lotto.

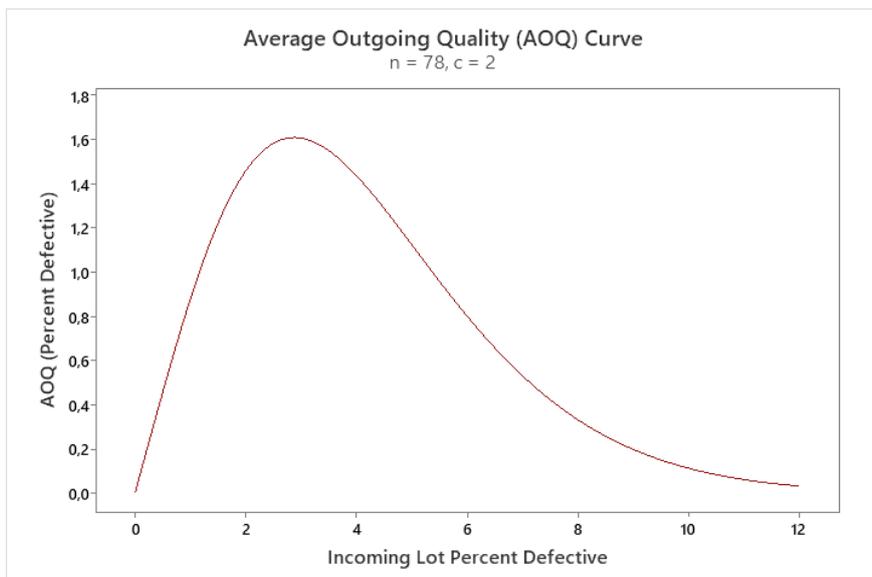


Figura 4.8: inserimento dei parametri del piano su Minitab

Anche la curva dell'indice AOQ conferma la "severità" del piano, con un valore della difettosità corrispondente al valore di AOQL molto bassa, che si attesta ad un valore pari al poco sopra al 2%, al cui corrisponde un AOQL pari a 1.6 %.

4.2.3. Piano per variabili

Per la creazione di un piano per variabili, si effettua lo stesso procedimento visto con il piano per attributi. In questo caso però, è necessario specificare almeno un limite di specifica. Nel caso in esame, si ha il limite di specifica inferiore pari al 3%.

Figura 4.9: Inserimento dei parametri del piano per variabili su Minitab

Method

Lower Specification Limit (LSL)	3
Lot Size	936
Acceptable Quality Level (AQL)	1
Producer's Risk (α)	0,083
Rejectable Quality Level (RQL or LTPD)	6
Consumer's Risk (β)	0,148

Generated Plan(s)

Sample Size	28
Critical Distance (k Value)	1,88657

$Z_{LSL} = (mean - lower\ spec) / standard\ deviation$
 Accept lot if $Z_{LSL} \geq k$; otherwise reject.

Percent Defective	Probability Accepting	Probability Rejecting	AOQ	ATI
1	0,923	0,077	0,895	97,9
6	0,161	0,839	0,940	789,4

Tabella 4.2: parametri del piano per variabili su Minitab

Sopra viene riportato l'output generato da Minitab che fornisce i parametri n e k del piano di accettazione per variabili. Il piano prevede l'estrazione di un campione di dimensione pari a n = 28 unità e, successivamente, viene misurata la media e la deviazione standard della grandezza interessata (nel caso in esame la trasmittanza) del campione. Infine, per decidere se accettare o meno il lotto, viene calcolata la statistica Z_{LSL} , sottraendo alla media il limite di specifica inferiore e dividendo per la deviazione standard calcolata. Il lotto sarà accettato se il valore di tale statistica sarà maggiore del valore $k=1,89$, viceversa sarà rifiutato.

Di seguito viene riportato una proposta di modulo utilizzato per la misurazione della trasmittanza del campione di 28 unità.

		MISURAZIONI TRASPARENZA LOTTI COVER							Mod.	3
									Data	
I.Q. 038 - M01									Firma	B.D.
									N°	
#	P/N	1	2	3	4	5	6	7	8	Mean profile
1	BFJ036-X120.0 31123A000	3,45	3,52	3,2	3,42	3,78	3,76	3,54	3,59	3,53
2	BFJ036-X120.0 31123A000	3,55	3,6	3,19	3,35	3,82	3,66	3,35	3,46	3,50
3	BFJ036-X120.0 31123A001	3,61	3,69	3,12	3,34	3,84	3,52	3,47	3,35	3,49
4	BFJ036-X120.0 31123A001	3,42	3,48	3,18	3,46	3,76	3,62	3,26	3,61	3,47
5	BFJ036-X120.0 31123A001	3,66	3,59	3,19	3,42	3,82	3,5	3,43	3,49	3,51
6	BFJ036-X120.0 31123A001	3,49	3,58	3,18	3,4	3,81	3,7	3,5	3,51	3,52
7	BFJ036-X120.0 31123A001	3,52	3,41	3,22	3,48	3,82	3,55	3,35	3,59	3,49
8	BFJ036-X120.0 31123A001	3,42	3,52	3,24	3,45	3,7	3,58	3,25	3,55	3,46
9	BFJ036-X120.0 31123A001	3,51	3,55	3,13	3,39	3,82	3,43	3,25	3,6	3,46
10	BFJ036-X120.0 31123A000	3,65	3,65	3,19	3,37	3,81	3,69	3,2	3,56	3,52
11	BFJ036-X110.0 31123A021	3,53	3,42	3,19	3,5	3,8	3,62	3,21	3,59	3,48
12	BFJ036-X110.0 31123A020	3,48	3,52	3,2	3,44	3,82	3,67	3,4	3,58	3,51
13	BFJ036-X110.0 31123A021	3,5	3,51	3,21	3,53	3,65	3,75	3,4	3,52	3,51
14	BFJ036-X110.0 31123A020	3,65	3,65	3,19	3,79	3,81	3,67	3,29	3,56	3,58
15	BFJ036-X110.0 31123A020	3,47	3,45	3,24	3,47	3,82	3,65	3,6	3,6	3,54
16	BFJ036-X110.0 31123A020	3,5	3,5	3,24	3,53	3,8	3,56	3,47	3,62	3,53
17	BFJ036-X110.0 31123A021	3,68	3,68	3,2	3,41	3,82	3,57	3,18	3,55	3,51
18	BFJ036-X110.0 31123A021	3,7	3,68	3,24	3,38	3,84	3,65	3,47	3,54	3,56
19	BFJ036-X110.0 31123A020	3,41	3,53	3,27	3,49	3,78	3,73	3,23	3,61	3,51
20	BFJ036-X110.0 31123A020	3,68	3,66	3,17	3,45	3,84	3,67	3,54	3,55	3,57
21	BFJ036-U440.0 31423A050	3,62	3,63	3,66	3,86	4,01	4,02	3,82	3,98	3,83
22	BFJ036-U440.0 31423A050	3,62	3,67	3,43	3,69	3,78	3,65	3,69	3,72	3,66
23	BFJ036-U440.0 31423A051	3,76	3,7	3,76	3,85	4,07	4,09	3,96	4,02	3,90
24	BFJ036-U440.0 31423A051	3,62	3,67	3,46	3,7	3,84	3,6	3,75	3,92	3,70
25	BFJ036-U440.0 31423A051	3,59	3,63	3,33	3,67	3,81	3,91	3,87	3,92	3,72
26	BFJ036-U440.0 31423A050	3,68	3,73	3,71	3,85	4,05	4,12	3,97	4,02	3,89
27	BFJ036-U440.0 31423A051	3,61	3,65	3,75	3,88	4,07	4	3,63	4,06	3,83
28	BFJ036-U440.0 31423A051	3,68	3,73	3,76	3,83	4,08	3,84	3,97	4,04	3,87

	Valore medio
Dev.ST	0,142
Media	3,594
K	1,89
LSL	3,0
Z _{LSL}	4,18
STATUS	ACCEPTED

Figura 4.10: esempio di un controllo per variabili

Utilizzando questo modulo, una volta campionati i lotti, le cover vengono misurate con la metodologia esposta nel capitolo precedente e le misurazioni necessarie vengono automaticamente calcolate grazie alle formule preinserite nel software Excel. In particolare, l'esito dell'ispezione viene calcolato utilizzando la formula "SE" di Excel.

A titolo di esempio vengono inseriti i dati del lotto del campione di cover del fornitore B.

4.2.4. Confronto tra i due piani

Dopo aver progettato entrambi i piani di campionamento, si procede al confronto per determinare quale meglio si allinea alle necessità aziendali, che preferirebbe allocare non oltre una risorsa per il controllo di accettazione delle cover. La misurazione della trasmittanza di una cover impiega mediamente due minuti per gli otto punti specificati nel capitolo precedente. Il piano per attributi, che richiede l'ispezione di 78 unità per lotto, con sei lotti al giorno, comporterebbe un totale di 468 unità da ispezionare, richiedendo circa 936 minuti, o 15,6 ore, superando la capacità di una singola risorsa, che avrebbe bisogno di un supporto aggiuntivo. Al contrario, il piano per variabili, con un'ispezione di 28 unità per lotto, totalizza 168 unità, richiedendo 336 minuti o 5,6 ore, compatibile con l'impiego di una sola risorsa. Pertanto, il piano per variabili si allinea meglio alle esigenze aziendali. Altra motivazione che spinge ad adottare un piano per variabili è il fatto di avere una sola caratteristica da misurare, ovvero la trasmittanza.

Conclusioni

Il settore Automotive, notoriamente esigente in termini di qualità dei prodotti, si trova ad affrontare costi considerevoli dovuti a difetti e inefficienze nella produzione. Questo problema è ulteriormente accentuato nel caso specifico dell'impianto frenante, un componente critico per la sicurezza del veicolo. Attraverso questa ricerca, si evidenzia il ruolo cruciale anche di componenti relativamente semplici e poco costosi come le cover del freno EPB nell'influenzare la qualità e l'efficienza del processo produttivo dell'intero freno.

L'impatto della trasparenza sulla qualità della saldatura è stato evidente sia attraverso le misurazioni effettuate che confrontando lotti conformi e non conformi. Inoltre, l'identificazione di un limite di specifica inferiore ha permesso di introdurre un requisito aggiuntivo nei disegni delle cover per i fornitori, vincolandoli al rispetto di tale specifica e istituendo un controllo delle cover in fase di accettazione per ridurre al minimo il numero di pezzi non sufficientemente trasparenti che vengono sottoposti alla saldatura.

Attraverso il modello di regressione sviluppato, è stato possibile identificare una serie di parametri che influenzano il tempo di saldatura del giunto cover-housing, permettendo di minimizzare il tempo ciclo del processo e aumentarne la produttività per soddisfare la crescente domanda di freni EPB. In particolare, si è osservato che la provenienza dell'housing ha un impatto significativo sul tempo di saldatura, con gli housing provenienti dal fornitore A che mostrano una maggiore capacità di assorbire il calore generato dal laser, rendendo il processo più efficiente. L'impatto della trasparenza è risultato altrettanto significativo, con il tempo di saldatura che mostra una dipendenza quadratica rispetto alla trasparenza del materiale.

Basandosi sui dati raccolti, tuttavia, non vi sono prove sufficienti per dimostrare una dipendenza del tempo di saldatura dagli aspetti geometrici delle componenti coinvolte. Questo modello ha permesso lo sviluppo di una strategia di gestione dei fornitori che prioritizza le forniture con un impatto maggiore sul tempo ciclo del processo, contribuendo così a ottimizzare l'efficienza complessiva della produzione.

Riferimenti bibliografici

La stesura del primo capitolo della presente tesi si basa su fonti, immagini e schemi tratti da documentazione interna dell'azienda ospitante.

Bibliografia e Sitografia

SpecialChem. (2024). Transparency. <https://omnexus.specialchem.com/product/t-basf-ultradur-b-4300-g6-It-bk15092>

https://www.elettroplastsrl.it/allegati/documenti/stampaggio_ad_iniezione.pdf

<https://it.wikipedia.org/wiki/Laser>

Fragassa, C., Gregorio, S., & Fortunato, A. (2004, Maggio 1). Il Laser Nella Saldatura Industriale. www.meccanicaneWS.com. https://www.researchgate.net/publication/304778197_Il_Laser_Nella_Saldatura_Industriale

AMADA WELD TECH INC. (2020). Laser Welding Fundamentals. <https://amadaweldtech.com/wp-content/uploads/2019/12/Laser-Welding-Fundamentals.pdf>

Ghosh, R. (2023, March 13). LASER WELDING ON PLASTICS. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/laser-welding-plastics-dr-reetuparna-ghosh/>

Acherjee, B. (2021). Laser transmission welding of polymers – A review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 421-443

Dave, F., Ali, M. M., Sherlock, R., Kandasami, A., & Tormey, D. (2021). Laser transmission welding of semi-crystalline polymers and their composites: A critical review. *Polymers*, 13, 675.

Branson Ultrasonics Corporation. (2016). Laser Welding Technical Information. Emerson. <https://www.emerson.com/documents/automation/technical-brief-laser-welding-technical-information-branson-en-us-160146.pdf>

Xu, J., Jiang, Q., Yang, J., Cui, J., Zhao, Y., Zheng, M., Oliveira, J. P., Zeng, Z., Pan, R., & Chen, S. (2023). A Review on Ultrafast Laser Microwelding of Transparent Materials and Transparent Material–Metals. *Metals*, 13, 876.

Shi, C., Dai, F., Lu, C., Yu, S., Lu, M., Gao, X., Wang, Z., & Zhang, S. (2022). Color Recognition of Transparent Plastic Based on Multi-Wavelength Transmission Spectrum. *Applied Sciences*, 12, 4948.

Sabreen, S. R., & Benatar, A. (2018). Overview of Methods for Laser Welding Optically Clear Plastics. *Plastic Decorating*. <https://plasticsdecorating.com/articles/2018/overview-of-methods-for-laser-welding-optically-clear-plastics/>

SpecialChem. (2024). Transparency. <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/transparency>

Stock, J. H., Watson, M. W., & Peracchi, F. (2012). Introduzione all'econometria (3ª ed.). Pearson. ISBN 9788871927800.

Franceschini F., Galetto M., Maisano D., Mastrogiacomo L., Ingegnera della Qualità. Applicazioni ed Esercizi. Terza edizione. Ed. CLUT, Torino, 2016.

The Pennsylvania State University. (2023). Reducing Structural Multicollinearity. <https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/12/12.6>

McDonald, B. (2002, June 2). A Teaching Note on Cook's Distance - A Guideline. Research Letters in the Information and Mathematical Sciences, 3.

<https://se.mathworks.com/help/stats/cooks-distance.html>

Yoo, W., Mayberry, R., Bae, S., Singh, K., He, Q. P., & Lillard, J. W., Jr. (2014). A Study of Effects of MultiCollinearity in the Multivariable Analysis. International Journal of Applied Science and Technology, 4(5), 9-19

Montgomery D.C., Introduction to Statistical Process Control, Sixth edition, Ed. J. Wiley, New York, 2008.