POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

INDUSTRIA 4.0 Sensoristica su stampi di lamiera per la manutenzione



RELATORE

CANDIDATO

Chiar.mo Prof. Terenziano Raparelli

Umberto Bisceglia

CORRELATORE

Chiar.mo Ing. Gianfranco Aimo

INDICE

INTRODUZIONE	3
Capitolo 1 - Processo di Stampaggio	4
1.1 Introduzione al processo di stampaggio	4
1.2 Proprietà meccaniche del materiale e curva di formabilità	4
1.3 Fenomeno del ritorno elastico	10
1.4 Descrizione Presse	12
1.5 Descrizione e componenti stampi	15
1.6 Il processo di stampaggio nell'automotive	21
1.7 Stampaggio a freddo 1.7.1 Tranciatura 1.7.2 Linea di presse	23 23 25
1.8 Stampaggio a caldo	28
1.9 Analisi per la costruzione degli stampi	31
Capitolo 2 - Metodologie World Class in ottica Industria 4.0	34
2.1 Evoluzione storica dell'industria e Industria 4.0	34
2.2 Il World Class Manufacturing	37
2.3 Pilastri tecnici sulla manutenzione	41
2.4 Il World Class Technology	42
2.5 Il concetto di manutenzione e la CBM	43
2.6 Presentazione sensori	49
2.7 Il valore aggiunto dato dai sensori	53
Capitolo 3 – Analisi del processo di stampaggio	55
3.1 Applicazione metodologia WCT	55
3.2 Problemi collegati alla qualità finale del pezzo	60
3.3 Possibili controlli da eseguire	63
3.4 Sistema di sensori associato	66

Capitolo 4 – Caso Studio, Identificativo Stampo	71
4.1 Problemi collegati alle informazioni dello stampo	71
4.1.1 Raccolta informazioni dello stampo non ottimizzata	71
4.1.2 Difficile interfaccia tra enti diversi	73
4.1.3 Gestione flusso manutentivo dello stampo	75
4.2 Metodologia seguita	77
4.3 Descrizione e funzionamento dei componenti	79
4.4 Test del sistema su pressa	82
4.5 Vantaggi e svantaggi del sistema	84
4.6 Analisi costi e benefici	86
4.7 Implementazione del sistema	90
4.8 Conseguenze sulla manutenzione e benefici apportati	92
CONCLUSIONI	94
BIBLIOGRAFIA	95

INTRODUZIONE

La velocità con cui l'evoluzione tecnologica ha raggiunto livelli sempre più straordinari negli ultimi anni, ha aperto le porte alla possibilità di sviluppare dispositivi Smart sempre più precisi e raffinati rispetto al passato. In questo modo, la ricerca nel campo dei sistemi cibernetici rappresenta un elemento fondamentale nello sviluppo industriale per il miglioramento continuo di ogni azienda. Seguendo i passi di questa rapida evoluzione, l'obiettivo finale dell'attività di tesi è quello di ottimizzare il processo di stampaggio della lamiera, utilizzando sistemi integrati e interconnessi in ottica Industria 4.0, applicando le metodologie della World Class Technology, sia per quanto riguarda la qualità finale del pezzo stampato, sia per la gestione del flusso manutentivo dello stampo e di tutti i suoi componenti, cercando di implementare una manutenzione su condizione. Il presente lavoro di tesi è stato svolto durante il periodo di tirocinio presso il FCA Mirafiori - Press Shop & Dies. La parte iniziale della tesi è incentrata sull'introduzione del processo di stampaggio della lamiera, descrivendo le caratteristiche principali delle presse e degli stampi, con particolare attenzione ai concetti di fattibilità e difetti superficiali o estetici dell'elemento. Inoltre, vengono descritte le principali attività del dipartimento di tecnologie, analizzando l'intero flusso di progettazione di uno stampo e il successivo flusso di produzione dell'elemento finale. Partendo da questi concetti e avendo, quindi, acquisito una visione generale del processo di fabbricazione degli stampi, si è passati ad un'analisi critica di quest'ultimo, evidenziando i punti deboli e le criticità da ottimizzare. L'intera analisi si basa sul concetto e sugli ideali dell'Industria 4.0 e dei sistemi cibernetici, applicando le metodologie World Class per lo sviluppo e l'avanzamento delle attività. Una volta descritto l'intero ciclo di stampaggio a caldo e a freddo, dividendolo in zone logicamente diverse, ci si è soffermati sui controlli possibili da poter inserire all'interno dello stampo o a fondo linea per il miglioramento della qualità del prodotto finale, ricercando attraverso attività di Benchmark con fornitori esterni, un sistema di sensori (i protagonisti dei sistemi cibernetici) con caratteristiche adeguate. Ci si è poi soffermati, in particolare, sulle criticità riscontrate nel sistema di gestione della manutenzione dello stampo e delle sue informazioni, descrivendo gli step successivi seguiti per la definizione di un sistema in grado di poter fornire le informazioni dello stampo direttamente a bordo di quest'ultimo e, allo stesso tempo, gestire l'intero flusso digitalmente, analizzando i benefici apportati e il rientro dell'investimento.

La parte conclusiva è incentrata sulle implementazioni future da poter sviluppare con il sistema preso in esame per sfruttare al massimo le sue potenzialità nel ciclo di stampaggio della lamiera.

Capitolo 1 - Processo di Stampaggio

1.1 Introduzione al processo di stampaggio

Sotto il nome di stampaggio si raggruppano tutti quei processi di produzione industriale che hanno in comune l'utilizzo come utensile principale di una forma permanente chiamata stampo che ha come funzione quella di offrire al metallo un profilo a cui adattarsi. Una prima divisione del processo può essere fatta prestando attenzione al tipo di deformazione applicata al grezzo da lavorare, ovvero tra trasformazione plastica di pezzi metallici e formatura di materiale metallico o plastica: mentre il primo sfrutta la pressione applicata dalla pressa allo stampo, il secondo si basa su riempimento dell'utensile del materiale in forma liquida facilitato da forza centrifuga (stampaggio rotazionale) o tramite forza di iniezione (stampaggio ad iniezione, principale processo industriale per i materiali plastici).

In ambito automotive, la maggior parte delle lavorazioni dei componenti metallici avviene tramite stampaggio di lamiere per effetto di trasformazione plastica. Una lamiera è una lastra ottenuta dal processo di laminazione di bramme (un semilavorato a sezione rettangolare) con caratteristica principale quella di essere un oggetto piano nel quale una dimensione è molto più piccola delle altre due: per le applicazioni principali, lo spessore di una lamiera generalmente è tra i 0,8 mm ai 3 mm, mentre lunghezza e larghezza sono variabile al secondo del pezzo da lavorare, ma comunque superiori di almeno un ordine di grandezza, arrivando in molti casi ad alcuni metri.

1.2 Proprietà meccaniche del materiale e curva di formabilità

Poiché il processo di stampaggio si basa principalmente sulla deformazione plastica dei materiali, una prima fondamentale analisi va incentrata sulle caratteristiche che influiscono la formabilità delle lamiere. Con formabilità si definisce l'attitudine di un determinato materiale metallico laminato a subire una deformazione plastica permanente senza subire danni e dipende dalle sue caratteristiche meccaniche: carico di snervamento, allungamento e durezza. Vi sono inoltre due altri parametri significativi caratterizzanti il comportamento a imbutitura (fase principale del processo di stampaggio), ovvero il modulo di incrudimento n e il coefficiente di anisotropia r.

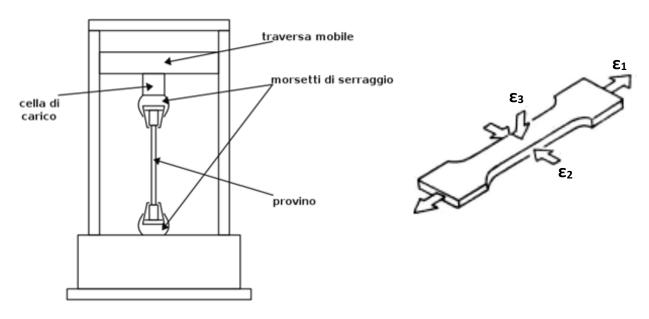


Figura 1 - Schema prova di trazione e deformazioni sul provino

Tutte queste caratteristiche possono essere valutate attraverso la prova di trazione ($Figura\ 1$), in cui un provino (dello stesso materiale della lamiera e con dimensioni standardizzate) vieni sottoposto ad un carico F mono-assiale inizialmente nullo che viene incrementato in modo graduale ad un valore massimo che determina la rottura del materiale.

Durante la prova di trazione vengono misurati carichi e deformazione agenti sul provino per ogni istante di tempo in modo tale da poter poi diagrammare i risultati ($Figura\ 2$). Il diagramma tensioni - deformazioni (σ - ϵ) cosi ricavato è diviso in due zone: elastica e plastica, dove la prima va dal carico nullo fino al carico di snervamento e rappresenta la zona dove non vi è una deformazione permanente del materiale (ritorna alla configurazione iniziale), mentre la seconda è da quest'ultimo fino al carico a rottura ed è la zona di particolare interesse nello stampaggio in quanto determina deformazione permanente. Dal diagramma è possibile, inoltre, osservare una zona a pendenza decrescente nella parte plastica prima della rottura completa dovuta al fenomeno di strizione, che consiste in un assottigliamento che determina il limite di formabilità.

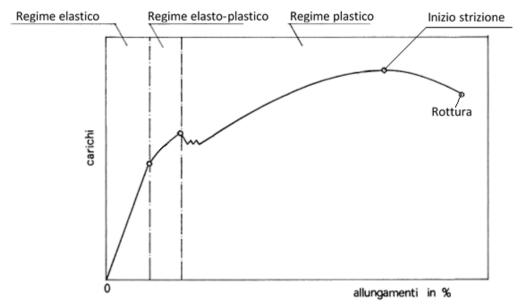


Figura 2 – Diagramma σ-ε con particolari su zone di maggior interesse

La curva sperimentale può essere approssimata tramite la legge costitutiva del materiale ed è possibile ricavare il coefficiente di incrudimento *n* facendo un'interpolazione logaritmica di questa curva calcolandone la pendenza nel tratto plastico. Ad alti valori del coefficiente sono associati un miglior lavoro di deformazione plastica e quindi un buon comportamento della lamiera in presenza di sollecitazione.

Il coefficiente r indica, invece, l'anisotropia del materiale, ovvero la proprietà per cui le caratteristiche dipendono dalla direzione lungo la quale vengono considerate. Esso viene definito come il rapporto tra la deformazione in larghezza e quella in spessore ed è strettamente collegato alla bontà del materiale ad essere imbutito. Ad altri valori del coefficiente, corrisponderà una più profonda imbutitura del materiale senza avere rottura.

$$r = \frac{\mathbf{\epsilon}_2}{\mathbf{\epsilon}_2}$$

Una volta definiti i parametri del materiale è possibile passare allo studio della sua formabilità, prestando particolare attenzione alle zone critiche determinate dal tipo di deformazione. Se tracciamo dei cerchi sul materiale da stampare, questi si deformano in ellissi durante l'operazione di formatura e ciò dipende dai tre tipi possibili di deformazione sulla lamiera (Figura 3): stiramento, deformazione piana e imbutitura che si differenziano tra di loro per il valore delle ε lungo le direzioni principali.

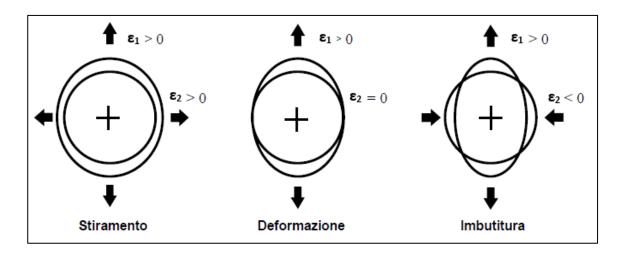


Figura 3 – Deformazioni principali che può subire una lamiera

Per studiare la formabilità è necessario un diagramma cartesiano (*Figura 4*), chiamato *Forming Limit Diagram (FLD)*, le cui coordinate sono i valori delle deformazioni principali di ogni zona presa in considerazione. Dovendo analizzare le diverse deformazioni, gli assi di questo diagramma sono in ascissa i valori delle deformazioni ε_2 (che può essere positivo, negativo o nullo) e in ordinata il valore di ε_1 (sempre positivo).

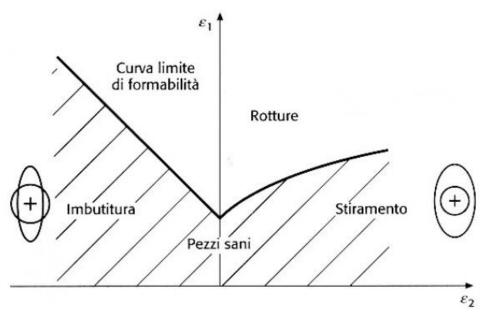


Figura 4 – Diagramma di Formabilità FLD [5]

Per costruire il diagramma FLD bisogna riportare le deformazioni presenti sulla lamiera, formando una dispersione o nuvola di punti: i punti dei 3 tipi di deformazioni vanno a coprire l'intero diagramma, mentre le zone soggette a strizione definiscono una curva limite detta *Curva Limite di Formabilità (CLF)*. La CLF divide il diagramma in due parti: quella inferiore contiene le combinazioni di deformazioni principali che garantiscono un pezzo integro, mentre quella superiore indica le condizioni in cui si ha probabile rottura del pezzo, in prossimità della linea definitiva, e la certezza di rottura man mano che ci sia allontana da quest'ultima.

Sperimentalmente, il diagramma FLD può essere determinato con il test Nakazima che consiste nel valutare tutte le possibili combinazioni di ε_1 e ε_2 nei tre principali campi di deformazione: ciò è possibile stampando provini rettangolari aventi lunghezza fissa e larghezza variabile, garantendo quindi condizione di massimo stiramento nei campioni più larghi e massima imbutitura per quelli più stretti. Il test si divide in 3 fasi principali:

- Stampaggio iniziale di provini del materiale da analizzare di diversa larghezza fino all'insorgere del fenomeno della strizione. Per valutarne le deformazioni i campioni sono reticolati con una griglia ad inchiostro (dopo il processo il reticolo è distorto rispetto alla sua configurazione iniziale);
- Si misurano le deformazioni sull'area dove è avvenuta la strizione per ogni larghezza scelta per il provino;
- Vengono diagrammati i risultati ottenuti per ogni provino (Figura 5) e si traccia la curva limite di formabilità del materiale analizzato unendo i punti di strizionamento. Se il materiale non ha superato la strizione, per tracciare la CLF si uniscono i punti più alti del diagramma.

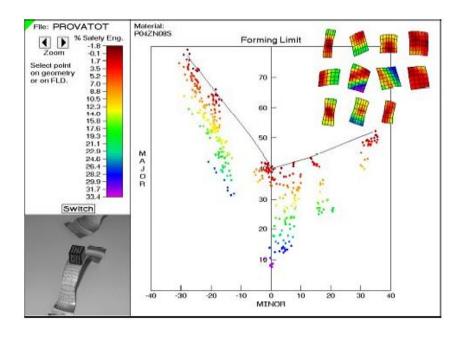


Figura 5 – Unione dei punti sperimentali per la CLF

Le caratteristiche e i vari parametri propri del materiale hanno effetto sul diagramma di formabilità e in particolare sulla CLF. Vengono riportati di seguito gli andamenti al variare del coefficiente di incrudimento n (Figura 6a) e della velocità di deformazione m (Figura 6b).

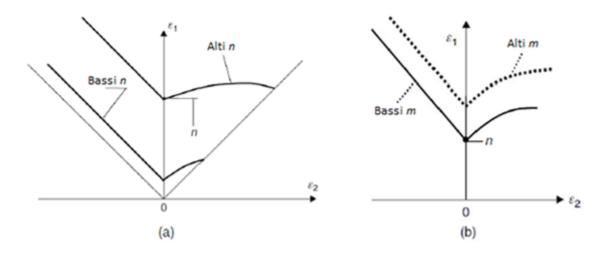


Figura 6 – Variazione della CLF al variare di n (a) e m (b)

Da notare che un elevato valore della velocità di deformazione porta ad un miglioramento delle CLF a parità di altre condizioni, questo poiché tende a ritardare il fenomeno della strizione.

1.3 Fenomeno del ritorno elastico

Durante l'analisi preliminare del processo di stampaggio bisogna prestare molta attenzione alla fase di formatura che è soggetta al fenomeno del ritorno elastico (*springback*, in inglese) [6]. Quando lo stampo si chiude per effetto della pressione esercitata dalla pressa, la lamiera viene forzata ad assumere la forma dello stampo, ma nel momento dell'apertura le sollecitazioni si estinguono ed essa modifica la geometria che aveva assunto durante il processo di stampaggio: tale variazione prende il nome di ritorno elastico.

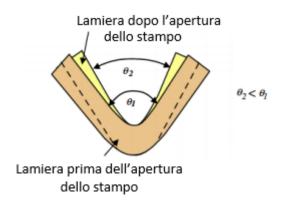


Figura 7. – Illustrazione di un tipico fenomeno di ritorno elastico [6]

Ovviamente, questo è un fenomeno indesiderato ai fini della precisione di forma e dimensione del pezzo, compromettendo la sua funzione estetica, funzionale e ad un suo eventuale assemblaggio con altri componenti. Il motivo di questo fenomeno sta nel fatto che durante il processo di stampaggio, la deformazione del materiale segue il legame costitutivo elasto-plastico seguendo il primo andamento lineare fino a quando si è nel campo elastico. Una volta terminato il processo con l'apertura dello stampo, il materiale tende a recuperare (almeno in parte) il lavoro di deformazione e quindi a ripercorrere l'andamento lineare con la stessa inclinazione avuta con lo stampo chiuso [7]: il ritorno elastico è pari alla differenza tra la deformazione plastica e la perdita di forma dovuta alla componente elastica (*Figura 8*).

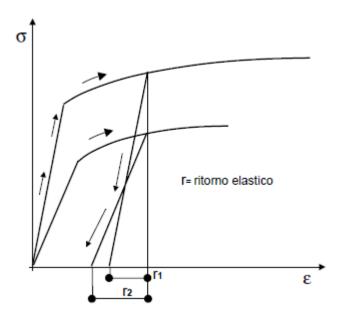


Figura 8 – Diagramma σ-ε evidenziando il ritorno elastico

Per studiare e limitare i problemi legati al ritiro elastico, vengono svolti test specifici per valutarne l'influenza, di cui il più diffuso e usato è l'U-bending Test. Questo consiste nello stampare provini di dimensione predefinita del materiale da testare, utilizzando diverse forze del premilamiera, essendo quest'ultimo un utensile dello stampo che serve per stirare meglio la lamiera: maggiore è la trattenuta e minore sarà il ritorno elastico. Viene utilizzata una geometria ad U per evidenziare meglio il comportamento del materiale. Le forze impostabili nella prova dipendono dalle caratteristiche del materiale e variano tra un valore minimo per riuscire a mantenere la forma ad U voluta ad un massimo oltre al quale si ha rottura del materiale. Il fenomeno del ritorno elastico si manifesta nel rialzamento della flangia e nella curvatura delle superfici. Misurando e diagrammando la geometria del pezzo in funzione della forza sul premilamiera è possibile ricavare delle curve che permettono di effettuare una valutazione comparativa del comportamento del ritorno elastico su lamiere con materiale diverso. Da questi studi si è ottenuto che l'entità del ritorno elastico dipende in gran parte dal carico di snervamento e dal modulo di elasticità del materiale.

Per risolvere i problemi legati al fenomeno del ritorno elastico sono state sviluppate tecniche e soluzioni nell'industria manifatturiera che possano eliminarlo o quanto meno limitarne gli effetti. Una tecnica comune è la piegatura eccessiva, ovvero piegare la lamiera di un angolo tale per cui dopo il ritorno elastico (calcolato in via preventiva in modo esatto) si abbia l'angolo come originariamente previsto a progetto. Un altro metodo è deformare plasticamente il materiale nella zona dove avviene la piegatura: le forze di compressione localizzate in questa zona deformano

plasticamente il nucleo elastico della lamiera, impedendo il ritorno elastico. Per fare ciò è necessario applicare una forza aggiuntiva attraverso il punzone dopo il completamente della piegatura [7].

In seguito agli studi svolti, avendo definito le proprietà e le caratteristiche dei materiali, si è giunti all'utilizzo principalmente di due materiali per i processi di laminazioni: acciaio e leghe di alluminio da lavorazione plastica.

1.4 Descrizione Presse

Le macchine di impiego più comune per la lavorazione plastica di lamiere metalliche sono le presse. La pressa è una macchina utensile che, mediante un'azione di compressione di valore massimo a fine corsa, imprime la forma desiderata alla lamiera. Il movimento della slitta è prodotto da un dispositivo di comando che fornisce la forza e l'energia necessaria per l'operazione di deformazione plastica. La slitta della pressa può essere mossa tramite attuatori meccanici (mediante cinematismo biella-manovella mosso da un motore elettrico sfruttando l'energia di un volano) o oleodinamico/ idrauliche (basato su un sistema di cilindri). Una pressa oleodinamica ha il vantaggio di poter regolare una pressione ed una velocità di discesa slitta costante, tuttavia per molti lavori è più vantaggiosa una pressa meccanica, in quanto ha una cadenza produttiva maggiore.

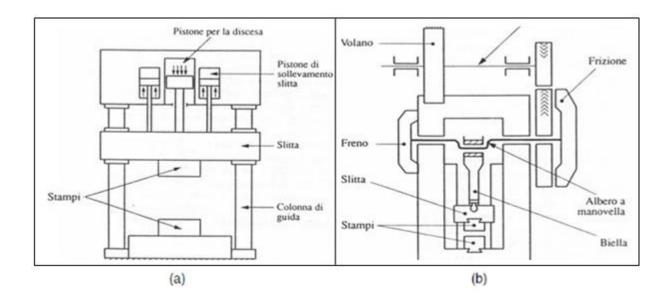


Figura 9 – Schema generale di una pressa idraulica (a) e meccanica (b)

Oltre alla divisione basata sul tipo di sistema di movimento delle slitte, un ulteriore classificazione può essere fatta in basa al numero degli effetti: possiamo avere presse a semplice effetto (due piani operativi, uno fisso e uno mobile), a doppio effetto (tre piani, uno fisso e due mobili) e a triplice effetto (quattro piano, con tre mobili). Nella configurazione a semplice effetto (Figura 10) vi è la presenza di colonne per il cuscino sul basamento fisso inferiore: la funzione del cuscino è quella di dare la forza necessaria per spingere il premilamiera sulla lamiera da lavorare e successivamente, durante la discesa della matrice, dare la pressione necessaria per far aderire in modo ottimale la lamiera al punzone (fisso in questa configurazione). Per ogni tipo di configurazione è comunque presente un sistema di guide per le slitte in modo tale da evitare di avere forze laterali sulle presse che andrebbero a creare usura dei componenti mobili e sbilanciamento della pressione sulla lamiera, comportando pezzi finali con errori geometrici e in alcuni casi rottura di componenti degli stampi.

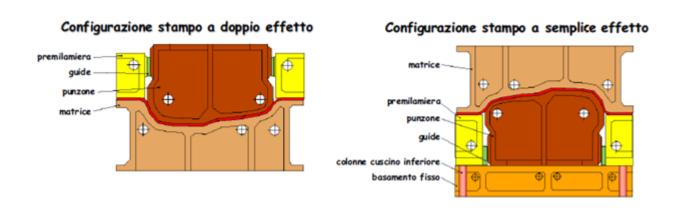


Figura 10 – Paragone tra la configurazione dello stampo a doppio o a semplice effetto

Nella maggior parte dei casi le lavorazioni da svolgere sulla lamiera vengono svolte in successione lungo una linea di presse con un sistema di comando per la movimentazione della lamiera tra una pressa e la successiva. I tipi di sistema di comando sono: a passo, a trasferta e robotizzata.

Nelle presse a passo l'avanzamento delle lamiere viene realizzato tramite nastro movimentato da rulli di alimentazione e guidato lateralmente dagli stampi: sono caratterizzati da alta velocità di stampaggio (e quindi alta cadenza di colpi al minuto) e da corsa ridotta della slitta (poche decine di mm); per questo motivo il particolare da stampare sarà di dimensione e forma molto semplice per ridurre al minimo il problema di ingombri e interferenze nell'avanzamento.

Per quanto riguarda le presse a trasferta, la movimentazione delle lamiere viene eseguita tramite una coppia di barre traslatrici poste ai due lati della pressa. Agendo direttamente sullo stampo è

necessario che sia presente un sistema di alzata della lamiera per facilitarne la presa. L'operazione di trasferimento del particolare da uno stampo all'altro avviene simultaneamente per ogni pressa, per questo motivo questo tipo di linea è in grado di effettuare diverse lavorazioni in progressione, ma su un solo particolare e con una determinata serie di stampi.

Negli ultimi anni con l'avanzamento tecnologico e dell'automazione in ambito industriale, si è passati ai più moderni sistemi di movimentazione robotizzati: tra una pressa e l'altra possono essere inseriti uno o più robot a seconda se la lamiera viene traslata direttamente oppure vi è una sosta intermedia; il sistema di presa del robot può essere di vari tipi, ma i più usati in ambito industriale sono quelli a ventose e di sollevamento ai lati (simile alla presa dei sistemi a trasferta). I sistemi di comando robotizzati vengono usati per pezzi più grandi e di forma più complessa in quanto non si hanno problemi di interferenze con la pressa nella loro movimentazione grazie alla possibilità di eseguire percorsi variabili con i loro bracci articolati.



Figura 11 – Esempio di robot di presa con ventose

Per la scelta delle caratteristiche della pressa bisogna valutare lo sforzo occorrente per deformare il metallo che può essere fatta in fasi successive: per prima cosa bisogna conoscere il tipo di operazione specifica da eseguire (tranciatura, imbutitura flangiatura ecc.), in quanto a diverse operazioni corrispondono diverse esigenze di pressione e tempi di applicazione; successivamente bisogna analizzare le caratteristiche di resistenza del materiale da formare in dipendenza al tipo di lavorazione da effettuare (per esempio per lavori di imbutitura andrà ricercata la resistenza a

trazione); infine, vanno calcolate i valori delle proprietà geometriche (area da lavorare) e fisiche della lamiera.

1.5 Descrizione e componenti stampi

L'elemento della pressa che agisce direttamente ed è in contatto con la lamiera è lo stampo. A differenza della pressa, lo stampo è una *quasi-macchina* la cui definizione viene data dalla Direttiva macchine 2006/42/CE che afferma che le quasi macchine sono "un insieme che costituiscono una macchina, ma che, da soli, non sono in grado di garantire un'applicazione ben determinata Le quasi-macchine sono unicamente destinate ad essere incorporate o assemblate ad altre macchine o ad altre quasi-macchine o apparecchi per costruire una macchina disciplinata dalla direttiva" [1]. Nella prima parte della si afferma che una quasi-macchina è simile ad una macchina (la cui definizione prevede che debba avere almeno un organo mobile), ma che mancando di alcuni elementi, non è in grado di svolgere la specifica applicazione per cui nasce (lo stampo può tranciare una lamiera solo grazie al movimento della pressa).

Lo stampo è diviso in base superiore e base inferiore, all'interno delle quali sono presenti i vari componenti atti a svolgere in modo ottimale l'operazione specifica sulla lamiera. Le parti principali di uno stampo sono punzone, matrice e premilamiera [3]: i primi due vanno sagomati secondo la forma da conferire al pezzo e dato che sono parti in movimento tra di loro, per evitare problemi di usura devono avere tra di loro un certo gioco; inoltre, la matrice va dotata di un certo angolo di sformo e/o di un sistema di traslazione/rotazione per facilitare l'espulsione della lamiera a lavorazione terminata per evitare strisciamenti o sottosquadri. Il compito del premilamiera è quello bloccare la lamiera al bordo all'inizio e durante il processo di lavorazione per sfruttare il fenomeno dello stiramento ed evitare grinze sul pezzo finito.

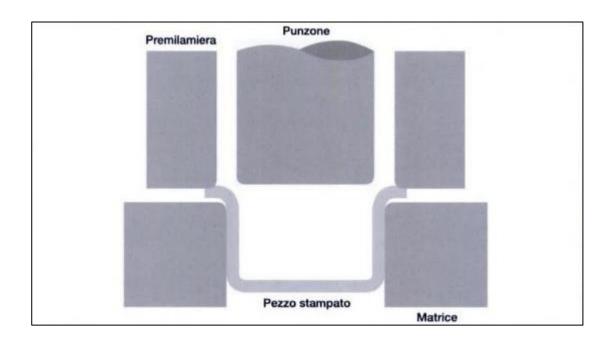


Figura 12 – Schema base degli utensili principali all'interno dello stampo [3]

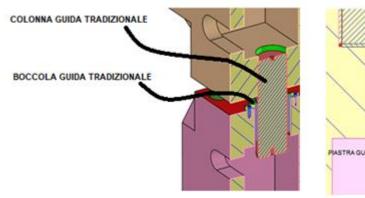
Oltre questi componenti principali, presenti nella maggior parte degli stampi, altri sono presenti solo in lavorazioni specifiche in quanto addetti a determinate azioni.

Uno dei sistemi fondamentali da predisporre negli stampi sono i sistemi di guida delle parti mobili per limitare al minimo forze laterali e gli sbilanciamenti. I due principali sistemi utilizzati sono colonna-boccola e piastra su piastra (*Figura 13*): il primo riesce a dare precisione esatta alla chiusura sfruttando l'ingresso della colonna (montata principalmente nello stampo inferiore), nella boccola montata nella parte opposta; in genere se ne hanno quattro di cui una dissestata. Per quanto riguarda il sistema piastra su piastra (utilizzato nella maggior parte delle presse per imbutitura) essendo meno preciso ha bisogno di una registrazione iniziale: riesce a dare anche un sostegno come reggispinta e va montato sia in direzione x che y. Spesso vengono installati entrambi i sistemi, per massimizzare gli effetti e ridurre i rischi di disallineamento.

Per migliorare ulteriormente l'equilibratura degli stampi, in alcune operazioni possono essere inseriti anche coni di centraggio.

SISTEMA COLONNA-BOCCOLA

SISTEMA PIASTRA SU PIASTRA



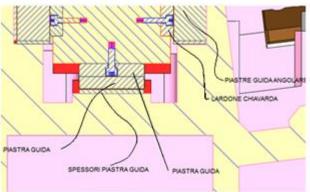


Figura 13 – Raffigurazione tramite software dei sistemi di centraggio di uso comune

Uno dei modi per poter subito indentificare una situazione di sbilanciamento è quello di posizionare nello stampo inferiore dei fondo-corsa. Questi sono dei cilindri (generalmente sono quattro e possono avere diametro variabile a seconda della situazione) che marcano visivamente il pezzo in un'area dove non ci sono controlli estetici: se il sistema non fosse bilanciano, le impronte marcate dai fondo-corsa saranno diverse tra di loro e l'operatore, tramite un controllo visivo, potrà agire per risolvere il problema nel minor tempo possibile; va quindi ben progettato il posizionamento dei cilindri e concentrarsi su zone dove sbilanciamento creerebbe seri errori.

Non tutta la lamiera che inizia il ciclo di lavorazione servirà per il pezzo finito, infatti le operazioni di tranciatura, rifilatura e foratura sono incentrate sulla rimozione di alcune parti (chiamate sfridi) e va previsto un sistema di evacuazione adeguato composto da scivoli che facilitano l'ingresso degli sfridi in botole opportunamente dimensionate e posizionate. In alcuni casi (specialmente in operazioni di tranciatura e rifilatura di lamiere di grandi dimensioni) va previsto un sistema di trancia sfridi (integrale o riportato con tassello) per ridurne le dimensioni e facilitarne l'evacuazione per evitare l'inconveniente di avere degli sfridi accumulati che possono creare seri problemi al ciclo di produzione (anche arresto). Per problemi di interferenze, necessità di spazio ulteriore e/o posizione delle botole da rispettare, gli scivoli possono essere di altezza diversa tra di loro oppure essere mobili [2].



Figura 14 – Esempio di scivoli con altezza diversa [2]

Per effettuare il taglio degli sfridi bisogna montare un'apposita lama nello stampo che permetta la corretta operazione evitando bave, strisciamenti e piegature non volute. La lama può essere direttamente di fusione quando c'è spazio oppure di billetta e ha un'altezza compresa tra i 60 e i 360 mm. A causa delle caratteristiche meccaniche del materiale usato per la lamiera, le proprietà geometriche variano: abbiamo infatti due tipi di lame per taglio alluminio e acciaio. In entrambe le applicazioni, abbiamo un angolo di scarico (*Figura* 15) che serve ad evitare inutile strisciamento tra la lama e la lamiera già tagliata che provocherebbe tensioni inutili e rischio di bave. La differenza sostanziale tra le due applicazioni (oltre che a misure strettamente numeriche nella geometria) sta nell'angolo di 5° presente solo nelle lame per alluminio che serve ad invitare la lamiera al taglio per migliorarne la qualità: ciò è dovuta alla minor durezza e maggior malleabilità dell'alluminio rispetto all'acciaio (il quale non ha bisogno di questa accortezza).

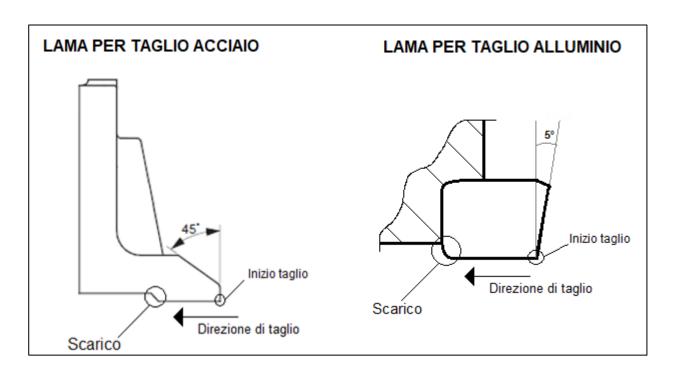


Figura 15 – Schema generale da normativa di lame per taglio di lamiere in materiale diverso

Un ulteriore sistema per ridurre al minimo gli sbilanciamenti dello stampo sono i compensatori che hanno il compito di riequilibrare il sistema di forze nel caso in cui si abbiano errori. Essi indicano lo 0 assoluto tra le parti mobili e possono essere due tipi di compensatori: cilindrici e rettangolari. Nei primi, il bilanciamento viene attuato inserendo dischi di spessore variabile (generalmente dell'ordine di decimi di millimetro) per equilibrare uno sbilanciamento in specifiche zone.

I compensatori rettangolari (*Figura 16*) sono formati da due superfici contrapposte segmentate, aventi profili con angoli reciproci di circa 0° 14" in modo tale che uno scorrimento provoca un aumento o una diminuzione di altezza del compensatore (in genere scorrimento verso destra alzo, e abbasso verso sinistra).

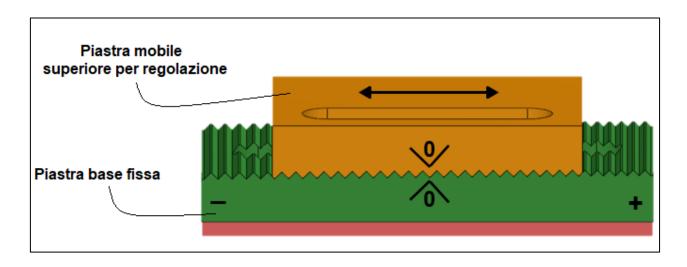


Figura 16 – Compensatore rettangolare

Nelle operazioni di tranciatura a sviluppo, la lamiera avanza in modo costante nella pressa subendo due operazioni consecutive, per questo motivo va previsto un sistema di rotelle per la traslazione e, in alcuni casi, un sistema di espulsione per facilitarne l'uscita laterale.

Per applicazioni dove le operazioni da svolgere non sono di tipo standard (angoli di taglio maggiori del range ammissibile con inclinazione prestabilita della lamiera, angoli di flangiatura maggiori ecc.) o per facilitare l'uscita della lamiera dopo l'operazione in presenza di sottosquadri, bisogna inserire un sistema CAM. Quest'ultimo è un dispositivo che sfrutta un piano inclinato per trasformare la direzione della forza data dalla pressa da verticale a quella richiesta per la lavorazione ed è generalmente composto da un cuneo superiore, un cuneo inferiore e una slitta. A seconda del tipo di operazione da svolgere e dalla configurazione dello stampo, vi possono essere diversi tipi di cinematismi sfruttati dal sistema CAM; il principale è il già citato formato da slitta e cunei, ma lo stesso principio viene ottenuto sostituendo a uno dei cunei un sistema di rotazione (roto-CAM) che può essere attuato anche grazie a cilindri con molla di ritorno.

A seconda del tipo di operazione da svolgere sulla lamiera e dalle sue dimensioni, lo stampo può essere costruito per lavorare in modo tale da avere uno, due (specchiati, uguali o diversi) o quattro (in genere solo per oggetti di piccole dimensioni) pezzi finali.

1.6 Il processo di stampaggio nell'automotive

Il processo di produzione industriale del settore automobilistico si divide in quattro fasi principali: stampaggio, saldatura, verniciatura e assemblaggio. Nello *stampaggio* si trasformano lamiere di forma semplice in pezzi per la carrozzeria. Il processo si basa sul posizionare la lamiera in una linea di presse. Nella fase di *saldatura* (*Figura* 17) vengono uniti centinai di parti singole (fatte di acciaio o alluminio di differenti grandezze e spessori) in un preciso corpo.



Figura 17 – Esempio saldatura di vari componenti in un unico corpo [4]

È una fase particolarmente veloce e automatizzata grazie alle caratteristiche degli attuali robot industriali. Prima di iniziare la fase di *verniciatura* (*Figura* 18) i corpi così ottenuti vengono prima puliti in vasche di immersione e sgrassati, quindi rivestiti con uno strato di fosfato di zinco: questo costituisce la base per una protezione anticorrosiva duratura nel tempo. Successivamente, vengono fatte altre quattro mani di vernice che servono a proteggere ulteriormente il veicolo dagli agenti atmosferici e conferiscono brillantezza nei colori. La particolare attenzione data alla verniciatura è legata a proteggere e preservare il valore dell'automobile, essendo il dettaglio che più colpisce i sensi del compratore.



Figura 18 – Verniciatura del corpo centrale [4]

La fase finale di *assemblaggio* (*Figura 19*) viene svolta da personale ben qualificato, poiché possono essere presenti richieste di modifiche o aggiunte personalizzate. Una volta assemblato il corpo centrale viene montata l'unità motrice del motore, il sistema di trasmissione, lo scarico e le ultime parti prima di iniziare una serie di numerosi test prima di mettere il veicolo in commercio.



Figura 19 – Assemblaggio al corpo centrale di altri componenti [4]

Lo stampaggio delle lamiere viene diviso in due macro-categoria a seconda del tipo di processo a cui il pezzo verrà sottoposto:

- Stampaggio a freddo;
- Stampaggio a caldo.

1.7 Stampaggio a freddo

Lo stampaggio della lamiera a freddo è quel complesso di operazioni meccaniche utilizzate con lo scopo di conferire, tramite deformazione plastica, una particolare forma ad una lamiera inizialmente piana. Una volta che abbiamo gli sviluppi sagomati, in base alle caratteristiche del particolare da produrre, essi vengono portati sulla linea di presse dove avremo una serie di stampi (imbutitura, rifilatura, assestamento, flangiatura e foratura). Per questo motivo la prima lavorazione da effettuare è quella di tranciatura: nel ciclo dello stampaggio prende il nome di *Op10*.

1.7.1 Tranciatura

Nel processo di tranciatura si sfrutta il carico a rottura del materiale per oltrepassare la zona di deformazione plastica e arrivare alla frattura: si deve quindi studiare correttamente la posizione e la pressione del premilamiera per evitare rialzamenti indesiderati nelle zone di taglio.

La linea di tranciatura (*Figura 20*) ha come prerequisito quello di ricevere da fornitori esterni un coil, ovvero un avvolgimento continuo del materiale che andrà poi stampato.

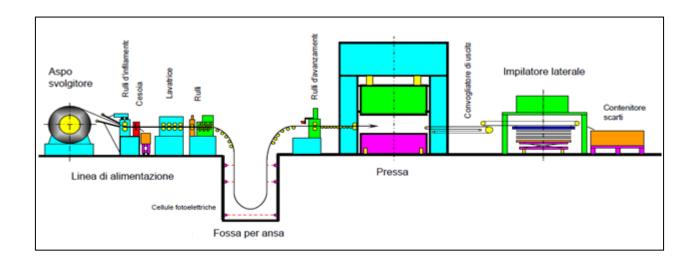


Figura 20 – Schema linea di tranciatura

Il primo componente della linea è l'aspo svolgitore, addetto al caricamento e allo svolgimento del coil. La parte iniziale viene tagliata e buttata via, poiché è soggetta in prima persona ad agenti esterni dannosi che vanno ad intaccare l'idoneità per le lavorazioni successive: per questo motivo va inserita una cesoia. Prima di inserire il coil steso nella pressa, esso dovrà passare attraverso la fossa per ansa, il cui compito è quello di evitare deformazioni causate dal moto diverso tra quello continuo dato dai rulli e quello alterno dato dalla pressa. Una volta che il coil viene tranciato in lamiera, esso viene trasportato verso l'impilatore laterale tramite un sistema a rulli per gravità e successivamente un sistema mediante magneti. Prima di essere stoccate in magazzino, le lamiere vengono attentamente analizzate dal controllo qualità che può essere *reattivo*, segnalando solo problemi, o *proattivo*, aiuta la progettazione a trovare una soluzione al problema.

Questo è lo schema principale della linea di tranciatura nello stabilimento FCA di Mirafiori, ma esso è studiato solo per lamiere in acciaio, in quanto nel sistema di movimentazione in dotazione è presente uno spostamento mediante magneti e l'alluminio è un materiale paramagnetico, ovvero risente poco dell'effetto di un campo magnetico. Per questo motivo le lamiere di alluminio vengono comprate da fornitori esterni e non prodotte internamente. Il ciclo iniziale di lavorazione dell'alluminio sarà quindi diverso e composto solo da controllo qualità della lamiera comprata dai fornitori e stoccaggio in magazzino.

Generalmente il processo di tranciatura avviene a sviluppo (*Figura 21*), ovvero per avere la lamiera si effettuano due operazioni consecutive e contemporanee tra due pezzi successivi all'interno della pressa. La lavorazione avverrà con un certo *passo* e in alcuni casi avrà bisogno di espulsori meccanici o pneumatici per spostare la lamiera finale verso il raccoglitore laterale oltre che un sistema di rulli per la traslazione.

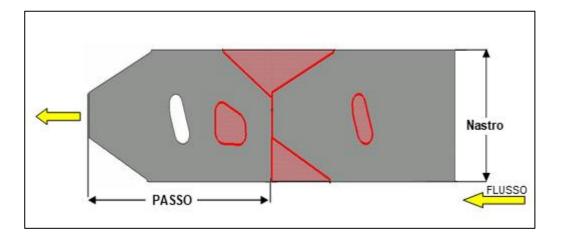


Figura 21 – Esempio trancia a sviluppo

1.7.2 Linea di presse

Un componente metallico con geometria complessa non può essere ottenuto tramite una singola operazione semplice di stampaggio, per questo motivo va prevista una serie di presse, con una precisa sequenza di lavorazione e ognuna con un'operazione specifica da svolgere.

Le caratteristiche degli stampi per ogni pressa dipendono dal tipo di componente che si sta stampando e dall'operazione che dovrà essere eseguita. Per definire le operazioni si usa la nomenclatura Op_{-} dove, come già visto, la Op10 è sempre riferita alla tranciatura della lamiera, mentre le successive sono variabili a seconda del ciclo studiato. Le operazioni terminanti con un 5 $(Op_{-}5)$ sono riferite a soste dovute a movimentazione o tempi diversi di lavorazione tra presse successive. Idealmente si vuole completare la produzione del pezzo definitivo in 4 operazioni totali (per ridurre drasticamente costi e tempi), ma per pezzi di elevata complessità questo non è possibile e si arriva anche a 7 operazioni (*Figura 22*).

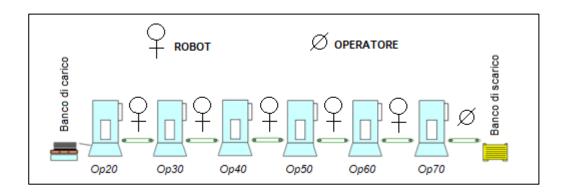


Figura 22 – Schema generale di una linea di presse per lo stampaggio a freddo

Lo spostamento della lamiera viene ormai sempre svolta da robot industriali per la loro elevata duttilità e velocità di operazione, mentre in genere lo spostamento della lamiera finale viene eseguita da un operatore che spesso ha anche il compito di fare una prima analisi qualitativa sul pezzo in modo tale da dare nel più breve tempo possibile una retroazione per ridurre rischi di guasto e pezzi non idonei da scartare. Prima dell'immagazzinamento viene fatto un controllo qualitativo finale sui pezzi finali per poi essere trasferiti al reparto di saldatura.

Di seguito viene riportato un esempio di sequenza di operazioni per una fiancata:

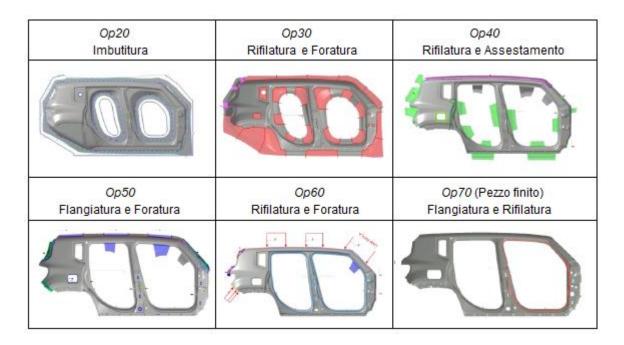


Figura 23 – Esempio metodo per una fiancata

In genere la *Op20* è l'operazione dedicata all'imbutitura, seguita da rifilature preventive e definitive, flangiature, assestamento e nelle ultime operazioni c'è la foratura. Imbutitura, flangiatura e assestamento sono operazioni di formatura che sfruttano deformazione plastica della lamiera, mentre rifilatura e foratura sono operazioni di taglio.

Il processo di imbutitura consiste nella trasformazione di una lastra piana di metallo laminato in un corpo concavo [5], mantenendo quasi inalterato lo spessore medio che varia di poco poiché vi è presenza di una deformazione secondaria. Nella pressa vi è inizialmente il posizionamento della lamiera sulla matrice seguito dall'abbassamento del premilamiera che blocca la lamiera al bordo. La funzione del premilamiera nell'imbutitura è quella di evitare la creazione di pieghe e aumenti di spessore indesiderati dovuti a diversi stati tensionali derivanti dalla pressione del punzone (come conseguenza abbiamo una contrazione in direzione circonferenziale e allungamento in quella radiale [5]). Un ulteriore accorgimento per evitare la formazione di errori è quello di inserire dei rompigrinze, ovvero risalti sulla matrice e corrispondenti cavità sul premilamiera con la funzione di ostacolare il flusso radiale del materiale (e quindi la formazione di grinze). Con la discesa del punzone, la lamiera viene costretta a scorrere entro la matrice e prendere la forma richiesta; a fine operazioni, punzone e premilamiera risalgono e la lamiera può così essere spostata nella pressa successiva.

Dopo la fase d'imbutitura, abbiamo della lamiera in eccesso (sia in zona perimetrale sia eventualmente in zone interne) che non serve e viene eliminata tramite gli stampi di rifilatura. Lo sfrido consiste in una perdita e vanno quindi attentamente analizzati lo stampo e la lamiera per minimizzare sprechi e di conseguenza costi. La rifilatura che viene eseguita con un taglio verticale, viene attuata in genere tramite lame fissate sulla base superiore (in caso di necessità possono essere anche di billetta). Nel caso in cui il taglio abbia una componente orizzontale (e quindi con un certo angolo di taglio), deve essere utilizzato un sistema CAM come quelli citati precedentemente: si ricordi che essi, sfruttando la forza trasmessa della pressa, riescono a convertire la spinta verticale in una con direzione diversa.

L'operazione di foratura provvede ad eseguire i fori richiesti attraverso la discesa di un punzone perforante una matrice. Così come la rifilatura, l'operazione può essere svolta da punzoni verticali sulla base superiore (e corrispettiva matrice sulla base inferiore) oppure, per fori su profili flangiati, essere eseguiti tramite sistema CAM. In genere, la foratura avviene come ultima operazione per avere la massima precisione sui fori che sono di fondamentale importanza per le successive fasi di assemblaggio.

La flangiatura è un processo di deformazione plastica dove le lamiere vengono sottoposte ad un'azione di flessione oltre il limite elastico del materiale. Viene applicata in zone in cui è richiesta un'elevata rigidità torsionale e flessionale e quindi diventano rinforzi per i componenti del veicolo. Questa operazione può essere eseguita solo con il sistema CAM tradizionali o le roto-CAM.

L'assestamento è uno delle operazioni finali del ciclo delle linee di presse e viene applicato nelle zone perimetrali o zone di maggiore importanza geometrica (in particolare su piccoli raggi). Il compito è quello di verificare che le aree interessate dall'operazioni soddisfino i requisiti geometrici e di tolleranza richiesti a progetto che non possono essere garantiti completamente solo con operazioni di imbutitura. Inoltre, senza l'assestamento, le deformazioni plastiche dovute all'operazione di estrazione genererebbero tensioni residue che andrebbero ad intaccare la qualità del pezzo finito.

1.8 Stampaggio a caldo

La differenza più marcata rispetto allo stampaggio a freddo è la lavorazione della lamiera a temperatura elevata che comporta differenze nelle operazioni e nei metodi di lavorazione. Lo stampaggio a caldo si usa per stampare materiale molto resistente (σ_s = 1400 MPa) e per questo motivo nell'automotive viene usato per la struttura portante delle portiere (avendo anche funzione di sicurezza).

Il ciclo di lavorazione dello stampaggio a caldo è molto più semplice - dal punto di vista di fasi successive - rispetto a quello a freddo visto precedentemente, infatti può essere diviso in riscaldamento in forno e in un unico processo di formatura in una sola pressa. Un prerequisito di questo tipo di stampaggio è quello di ricevere in pressa lamiere con profilo prossimo a quello definitivo e non semplicemente rettangolare in quanto dopo la formatura il materiale è difficilmente lavorabile.

La lamiera viene preriscaldata fino a circa 930°C in un forno (lungo anche 24m, quindi riesce a riscaldare più lamiere contemporaneamente) diviso in 8-10 zone con temperatura crescente fino ad avere un T costante nelle ultime (*Figura 24*). Il movimento della lamiera all'interno del forno è attuato tramite un nastro mosso da rulli.

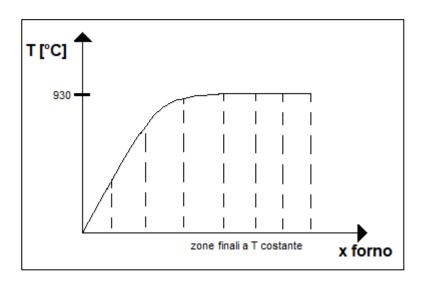


Figura 24 – Andamento teorico della temperatura all'interno del forno

Una volta uscito dal forno, un robot posiziona la lamiera incandescente nella pressa (Figura 25).



Figura 25 – Uscita della lamiera incandescente dal forno

Il movimento di quest'ultima viene dato da un sistema idraulico (e non meccanico come principalmente succede nello stampaggio a freddo) poiché non solo deve svolgere processo di imbutitura, ma deve tenere stampo chiuso per alcuni secondi per raffreddare il pezzo: qui vi è una tempra del materiale, creando martensite ed è per questo che non è facile svolgere lavorazioni successive, in quanto il materiale dopo lo stampaggio ha durezza elevata. Per facilitare il raffreddamento (e quindi ridurre i tempi) si usa un sistema ad acqua (12-14°C) composto da rami di tubi percorsi da acqua corrente presenti sia sul punzone che sulla matrice.

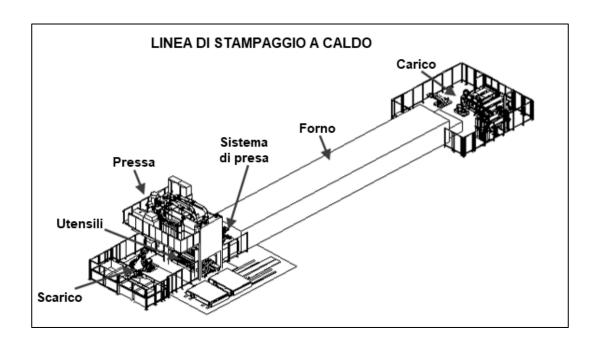


Figura 26 – Schema generale di una linea di stampaggio a caldo

Dopo lavorazione si può tagliare e lavorare il pezzo con operazioni simili a quelle svolte a freddo (molto più veloci, ma non sempre applicabili a causa della durezza del materiale) o taglio laser (1 su 11 volte più lento, con tempi di circa 58 secondi a pezzo). Nel caso di taglio tradizionale bisogna prestare particolare attenzione all'angolo di taglio, in quanto deve essere normale con un errore massimo di \pm 2 °C.

Per proteggere il pezzo da corrosione (poiché con questo materiale si hanno problemi già dopo un giorno di fermo) si crea sulla superfice della lamiera una patina di alluminio di alcuni micron. Ciò però crea un problema quando la pressa è in pausa (per manutenzione o guasto), in quanto il sistema di emergenza del forno, per evitare di perdere tutti i pezzi, permette ai rulli di farli andare avanti e indietro in attesa di ripristino del ciclo. Questo meccanismo può durare fino a un massimo di 15 minuti, in quanto da quel momento in poi il delta dello strato di alluminio diventa troppo elevato (più la lamiera viene lasciata ad alte temperature più ci sarà infiltrazione dell'alluminio con crescita dello strato superficiale) e la differenza troppo marcata tra massimi e minimi crea problemi di "sbottonamento" in saldatura del pezzo (*Figura 27*). Per questo motivo vanno sempre tenute in magazzino delle lame di riserve in caso di rottura per ridurre al minimo i tempi di attesa del forno, poiché i tempi di riparazione sono molto più lunghi di quelli di sostituzione.

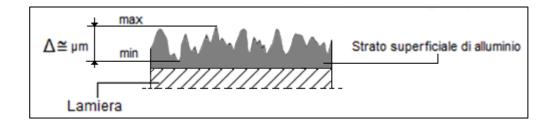


Figura 27 – Particolare dello strato superficiale di alluminio sulla lamiera

1.9 Analisi per la costruzione degli stampi

In FCA, il processo che porta alla costruzione finali degli stampi è diviso in tre macro-aree consecutive (spesso lavorano in parallelo), ovvero *Tecnologia di Stampaggio*, *Ingegneria degli Stampi* e *Produzione Stampi*. Le macro-aree sono divise al loro interno da ulteriori sezioni che collaborano e lavorano interfacciandosi continuamente per ottimizzare i tempi di completamento e la qualità del prodotto. L'input all'intero processo viene dato dal FCA R&D Center (Il centro di ricerca e sviluppo di FCA), dove vi è la fase di programmazione del veicolo (design, componenti, caratteristiche ecc.). Una volta terminata la costruzione, lo stampo verrà inviato al FCA Press Shop, pronto ad essere utilizzato nel ciclo produttivo.

Una volta arrivati gli ordini, vi è un'analisi sui carichi di lavoro dei singoli componenti per assegnare quali saranno Make e quali Buy, ovvero quali saranno progettati internamente e quali no. Per i componenti make, l'intera progettazione viene svolta in azienda, in genere vengono assegnati a questa categoria i componenti più grandi per evitare gli alti costi di trasporto e tempi lunghi per l'eventuale consegna in caso di guasti. Per i pezzi buy, invece, la progettazione è data ai fornitori, programmando in genere controlli e riunioni periodiche nel tempo per verificarne l'avanzamento: questo avviene per pezzi di piccola dimensione, in quanto, nell'eventualità di una rottura, è possibile rimediare internamente alla soluzione in tempi brevi.

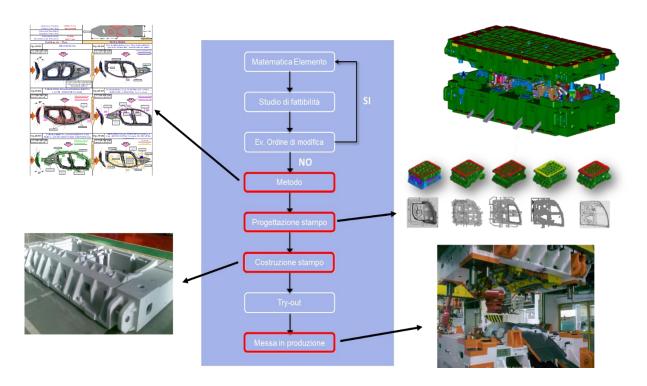


Figura 28 – Schema generale flusso di progettazione di uno stampo

Lo schema generale (Figura 28) parte con l'arrivo della matematica e della geometria del componente make da stampare, successivamente viene svolto, nell'area di tecnologia di stampaggio, uno studio preliminare di fattibilità seguita da una analisi iniziale sul metodo e sul progetto degli stampi. Nello studio di fattibilità viene analizzata la geometria del componente per evidenziarne le zone critiche che andrebbero modificate o eliminate per infattibilità. Il metodo, invece, è la fase nella quale si studia il componente decidendo il numero e le caratteristiche di ogni operazione da svolgere (e quindi di stampi) e ha come obiettivo quello di ottenere il componente finale nel minor numero di operazioni con qualità ottimale. L'analisi più onerosa è quella di rendere possibile le operazioni con angoli non ammissibili con stampaggio tradizionale, dove si rende necessario l'uso di CAM particolari: va quindi studiato anche il movimento di ogni parte mobile per eliminare ogni possibile rischio di interferenza. Da qui si arriva alla specifica degli utensili necessari e si passa all'area di ingegneria dove vengono simulate le varie operazioni. I software di simulazione usati sono Autoform e PamStamp, nei quali viene simulato il processo di deformazione che subisce la lamiera durante lo stampaggio. La simulazione è diversa per stampaggio a freddo e a caldo proprio per le loro caratteristiche intrinseche che portano inevitabilmente ad avere particolare attenzione nel secondo (oltre a quelle comuni in entrambi sui ritiri elastici, deformazioni, grinze, aumento di spessore, vuoti e rotture) sulla temperatura della lamiera nella pressa. In parallelo viene svolto uno studio sul processo e design dei singoli stampi che porta al

poter simulare l'intero processo e l'intero ciclo prestando particolare attenzione alle interferenze tra i pezzi mobili, alla movimentazione delle lamiere tramite robot e ai colpi al minuto delle presse. A questo punto è possibile fresare i primi modelli prototipali 3D degli stampi per verificarne l'effettivo funzionamento, passando così all'area di produzione stampi, nella quale viene svolto assemblaggio, prove definitive, controllo qualità e vendita.

Capitolo 2 - Metodologie World Class in ottica Industria 4.0

2.1 Evoluzione storica dell'industria e Industria 4.0

L'inizio dell'evoluzione industriale viene fatta coincidere con la rivoluzione industriale della seconda metà del XVIII secolo, prima in Inghilterra e poi diffusa in tutta Europa. Questa "prima" rivoluzione industriale interessò principalmente il settore tessile e metallurgico, avendo come caratteristica principale l'utilizzo per la prima volta di energia: l'introduzione della macchina a vapore consentì, infatti, alle fabbriche di abbandonare mulini e avere una meccanizzazione della produzione all'insegna di una maggiore velocità, potenza e efficienza.

Per parlare di *Industria 2.0* bisogna arrivare al 1870, dove vi è una seconda rivoluzione energetica legata all'utilizzo prima dell'elettricità e, successivamente, del petrolio, che permisero di incrementare ulteriormente i livelli di meccanizzazione e di produzione. Grazie a questa rinnovata potenza e grazie alle idee innovative di Henry Ford si arrivò all'introduzione della catena di montaggio che permise l'inizio dell'era della produzione di massa.

L'Industria 3.0 (fatta cominciare a metà degli anni 50 del XX secolo) riassume l'ingresso in fabbrica dell'ICT (Information and Communication Tecnologies): vi è un incremento dei livelli di automazione nell'ambito produttivo, ma, soprattutto, in quello organizzativo, grazie all'uso dei sistemi informatici e digitali. Si ha un passaggio dalla meccanica, dalle tecnologie elettriche e analogiche alla tecnologia digitale, con l'aumento di sistemi digitali e di conservazione dei dati. Si diversificano le infrastrutture e il lavoro umano, migliorando la qualità della produzione.

L'idea e il concetto di *Industria 4.0* prende il nome dal piano industriale del governo tedesco (presentato nel 2011) e concretizzato alla fine del 2013. Nello specifico, la paternità del termine tedesco "Industrie 4.0" viene attribuita a Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e Wolfgang Wahlster che lo impiegarono per la prima volta in una comunicazione, tenuta alla Fiera di Hannover del 2011, in cui preannunciarono lo Zukunftsprojekt Industrie 4.0 (ovvero Progetto Futuro Industria 4.0). Il piano industriale tedesco prevedeva investimenti su infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende per ammodernare il sistema produttivo e riportare la manifattura tedesca ai vertici mondiali rendendola competitiva a livello globale.

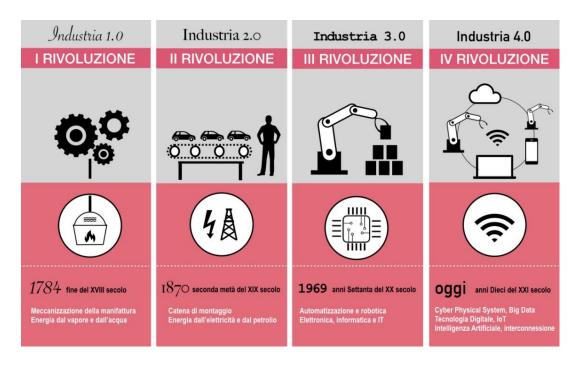


Figura 29. – Evoluzione storica dell'Industria [8]

Il pilastro su cui si basa l'Industria 4.0 è il nuovo rapporto che si può instaurare tra il mondo fisico degli esseri umani e il mondo del digitale. L'unione dei due mondi è molto complicata e si stanno studiando le interfacce più idonee per ottenerla, ma i vantaggi che si ricaverebbero sono elevatissimi in quanto si riuscirebbe a sfruttare tutto l'enorme potenziale delle tecnologie digitali, oggi impiegato in minima parte, per fare notevoli passi avanti nel miglioramento dei sistemi produttivi e sociali: da questa fusione si ottiene ciò che viene denominato sistema cyber-fisico (CPS). L'obiettivo dell'Industria 4.0 è impiegare questo sistema cyber-fisico per migliorare i processi industriali e distributivi, sia nel senso di ottenere più efficienza, sia nel senso di aggiungere nuovi prodotti e nuovi servizi, oggi impossibili da realizza per le limitazioni nell'uso delle tecnologie [9].

Da uno studio di Boston Consulting emerge che la quarta rivoluzione industriale si concentra sull'adozione di alcune tecnologie definite abilitanti; alcune di queste sono concetti già presenti, ma che non hanno mai sfondato il muro della divisione tra ricerca applicata e sistemi di produzione veri e propri. Le tecnologie abilitanti sono alla base del progetto Industria 4.0 attuato anche in Italia: il *Ministero dello sviluppo economico* raggruppava nel 2017 le 9 tecnologie abilitanti come segue:

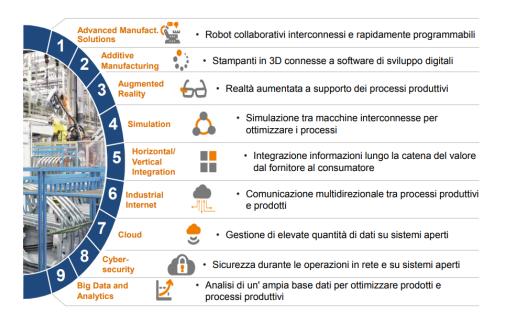


Figura 30 – Tecnologie abilitanti Industria 4.0 [10]

I vantaggi apportati dall'Industria 4.0 possono essere così raggruppati [10]:

- ✓ Maggiore flessibilità attraverso la produzione di piccoli lotti ai costi della grande scala;
- ✓ Maggiore velocità dal prototipo alla produzione in serie attraverso tecnologie innovative;
- ✓ Maggiore produttività attraverso minori tempi di set-up, riduzione errori e fermi macchina;
- ✓ Maggiore competitività del prodotto grazie a maggiori funzionalità derivanti dall'Internet delle cose;
- ✓ Migliore qualità e minori scarti mediante sensori che monitorano la produzione in tempo reale.

Una delle conseguenze dovute a questi vantaggi – soprattutto per la possibilità di monitorare in tempo reale il ciclo produttivo – è l'analisi dei componenti per evitare il presentarsi di guasti, essendo quest'ultimi fra le cause più frequenti di criticità in ambito industriale. Il tempo e il denaro

non investito in una periodica revisione delle macchine è speso doppiamente quando queste si bloccano a causa di un malfunzionamento. Si tratta di una logica emergenziale che crea danni anche importanti all'impresa con conseguenze tanto nell'immediato (consegne in ritardo o che saltano) come nel medio-lungo periodo (una reputazione con il mercato esterno che diminuisce per mancanza di affidabilità). Anche in questo caso, un sistema ben congegnato e interconnesso è in grado di restituire dati chiari e interpretabili sullo stato di salute del proprio impianto, prevenendo il problema, piuttosto che attendendo di risolverlo nel caso si presenti. [8] È proprio in quest'ottica che si fa ampio spazio il concetto di manutenzione, cardine centrale nell'industria moderna.

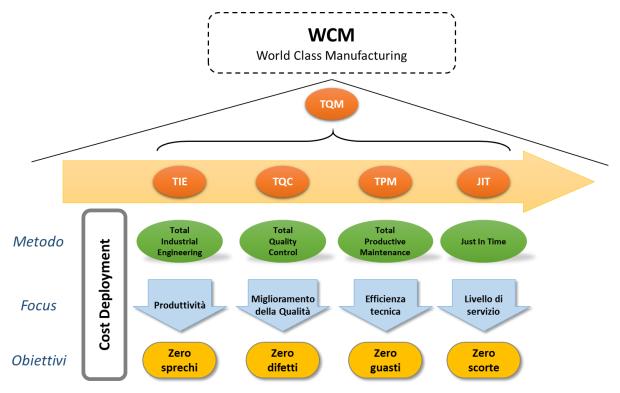
2.2 II World Class Manufacturing

Come è emerso dal paragrafo precedente, lo scenario industriale recente è caratterizzato da una spinta competitiva verso la massimizzazione dell'efficacia, dell'efficienza e della flessibilità del ciclo produttivo, ma non è più possibile scindere questa spinta dall'analisi degli sprechi che rappresentano la causa principale dei costi. Il World Class Manufacturing (WCM) è un programma di innovazione di origine giapponese che si basa su questo concetto e si concentra sul miglioramento continuo, eliminando ogni tipo di spreco e perdita (Muda, in giapponese) con il coinvolgimento di tutta l'organizzazione nel suo complesso, partendo dalla fabbrica (Gemba) passando poi per la qualità dei prodotti ed il perfezionamento dei processi logistici interni ed esterni, per giungere al reparto acquisti e management.

Il concetto di miglioramento continuo nasce dall'idea del *Kaizen*, che è la composizione di due termini giapponesi, KAI (cambiamento, miglioramento) e ZEN (buono, migliore). All'interno del concetto di WCM, il Kaizen si basa sulla convinzione del mondo orientale che tutti gli aspetti della vita (e quindi di un'azienda) possano essere costantemente migliorati attraverso un percorso lento e graduale; questo concetto si oppone alle abitudini occidentali di rifare da capo tutte le cose che non sembrano funzionare.

Alla base del WCM vi sono metodologie già conosciute nell'ambito della Lean Manufacturing: il TPM (Total Productive Maintenance), che mira a ridurre i guasti; il TQC (Total Quality Control), dove i principi di ottimizzazione della qualità vengono applicati a tutte le aree aziendali; il TIE (Total Industrial Engineering), nel quale si punta a ridurre gli sprechi; il JIT (Just in Time), rivolto a ridurre le scorte. L'insieme di queste metodologie diede inizio al *Total Quality Management* (TQM), dal quale il WCM pone le sue radici, differenziandosi da quest'ultimo per scegliere strategie e impianti

"critici" in base al cosiddetto Cost Deployment. Il tutto è sintetizzato schematicamente in *Figura* 31.



Valori Coinvolgimento delle persone, creazione di valore, soddisfazione cliente.

Figura 31 – Struttura e obiettivi del WCM

Gli obiettivi del WCM si raggiungono essenzialmente attraverso tre fattori: implementando metodi specifici (pilastri tecnici e manageriali); applicando e diffondendo determinati strumenti; mutando gli atteggiamenti e le capacità delle persone. L'impiego di questi fattori è funzionale al raggiungimento del target del WCM, che si può riassumere con il concetto di "Zero" così declinabile:

- ZERO insoddisfazione del cliente;
- ZERO disallineamenti;
- ZERO burocrazia;
- ZERO insoddisfazione degli azionisti;
- ZERO sprechi;

- ZERO lavoro che non crei valore;
- ZERO fermate;
- ZERO opportunità perse;
- ZERO informazioni perse.

La metodologia del WCM è sostenuta da 10 pilastri manageriali e da 10 pilastri tecnici. I 10 pilastri manageriali consistono nell'impegno gestionale, la chiarezza degli obiettivi, il percorso verso la WCM, la ripartizione dei ruoli tra persone altamente qualificate, l'impegno organizzativo, la competenza organizzativa, il tempo ed il budget, il livello di dettaglio, il livello di espansione e crescita e la motivazione degli operatori. Questi pilastri manageriali sono legati ai 10 pilastri tecnici (*Figura 32*) dove viene rappresentato iconicamente il WCM come un tempio sorretto dai 10 pilastri tecnici che poggiano sui 10 manageriali. Negli ultimi anni, nel pilastro dell'ambiente è stato introdotto un sotto-pilastro dell'energia, per ridurre gli sprechi e ottenere una maggiore efficienza energetica.



Figura 32 – I 10 pillar tecnici del World Class Manufacturing

Per adempiere ad ogni pilastro, ciascuno di esso viene diviso in 7 step, diversi per ognuno, da seguire per raggiungere gli obiettivi prefissati attraverso un processo di miglioramento continuo. A loro volta, questi 7 step possono essere riuniti in tre livelli: reattivo, dove viene individuato il problema e vengono messe in pratica azione correttive per ridurne gli effetti negativi; preventivo, atto a identificare le cause dei problemi e eliminarle; proattivo, dove si studia il processo e i suoi eventuali problemi per prevenirne l'avvenimento. Gli strumenti utilizzati nella metodologia per conseguire i vari step sono i cosiddetti *Tools*, dei quali possono esserne usati diversi per uno stesso obiettivo. Tra i più diffusi ci sono: i 5 Whys, ovvero porsi in modo iterativi domande sul perché di un determinato evento; il PDCA (*Figura 33*), ovvero il Plan-Do-Check-Act, che consiste in un

metodo iterativo diviso in quattro fasi utilizzato per il controllo e il miglioramento continuo di processi e prodotti.

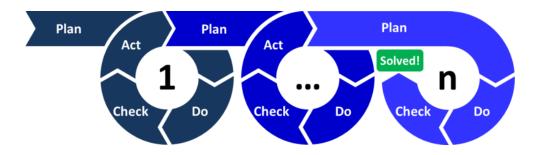


Figura 33 - Miglioramento continuo (Kaizen) tramite ciclo PDCA

La conseguenza dell'adottare la metodologia WCM per tutti gli stabilimenti che vogliono rispettarne le regole è quello di essere sottoposti ad un sistema di misurazione delle prestazioni: la verifica e il raggiungimento dei diversi livelli di performance è documentato con una serie di audit interni ed esterni con cadenza semestrale o annuale. Gli audit interni servono come autovalutazione e vengono effettuati dagli stessi responsabili dei pilastri, mentre quelli esterni sono delegati dalla World Class Manufacturing Association (WCMA). Nel corso di audit della WCMA, viene analizzato l'operato dello stabilimento nei venti pilastri e al termine viene assegnato a ciascuno di essi un punteggio da 0 a 5: un punteggio pari a 0, indica che la metodologia in questione non è stata applicata; al contrario, quando il punteggio è 5, significa che la metodologia è stata completamente compresa e implementata in tutti i processi coinvolti dell'impianto.

Una volta analizzate tutti i pilastri della metodologia, viene fatta una somma di tutti i punteggi stabilendo un voto globale che può variare da 0 a 100 (denominato Methodology Implementation Index, MII). La WCMA ha fissato dei livelli (e delle corrispettive medaglie) ai quali l'impianto può essere associato in base al risultato totale raggiunto, ovvero: Bronze (50), Silver (60), Gold (70) e World Class (85). Questo tipo di valutazione ha una duplice valenza, in primo luogo serve a dare un giudizio il quanto più veritiero dello stato di lavoro dell'impianto (sia per valutazioni interne, sia per confronto e per rapporti con aziende esterne) e in secondo luogo a dare un raffronto ad ogni lavoratore sul proprio operato in modo da motivarlo a dare il massimo.

Per quanto riguarda la misura dei risultati delle azioni implementate, nel WCM esistono due indicatori chiave: i KPI (Key Performance Indicators) che rappresentano un indice del miglioramento dei progetti e valutano i risultati effettivi; ed i KAI (Key Activities Indicators) che sono gli indicatori delle attività svolte e dello sforzo necessario per raggiungere un miglioramento.

In sintesi, i KPI misurano i risultati finali, mentre i KAI rappresentano le modalità con cui questi risultati vengono raggiunti.

2.3 Pilastri tecnici sulla manutenzione

Come già analizzato per l'Industria 4.0, anche nel concetto di World Class Manufacturing viene data notevole importanza ad un'efficiente manutenzione, ciò si evince dalla presenza di due pilastri collegati a quest'ultima: uno sulla *Manutenzione automa e organizzazione del luogo di lavoro* e l'altro sulla *Manutenzione professionale*.

La Manutenzione Autonoma è la più grande novità del WCM portata dalla TPM (Total Productive Maintenance) e comprende le attività di manutenzione preventiva di primo livello atte a prevenire i guasti degli impianti o fermate di quest'ultimi in caso di lavorazioni in condizioni diverse da quelle ottimali. L'obiettivo è dirigere in modo autonomo l'ispezione, il controllo e il ripristino delle condizioni della macchina, eliminando qualunque causa di sporco e usura: per questo motivo questo tipo di manutenzione va divisa da quella professionale, in modo tale da avere due team in grado di lavorare simultaneamente per migliorare ogni aspetto. In conclusione, la manutenzione autonoma consiste nell'attività svolta dagli operatori di produzione per la cura quotidiana degli impianti atta a incrementare l'efficienza globale di quest'ultimi e di conseguenza la qualità dei prodotti.

Di contro, quando si prende in analisi il pilastro tecnico della Manutenzione Professionale, si fa riferimento alle attività per la realizzazione di un sistema in grado di azzerare i guasti e di aumentare la vita utile dei macchinari, organizzando piani sostenibili di Manutenzione Pianificata. Questa attività va in aiuto agli addetti alla Manutenzione Autonoma grazie all'aumento delle competenze di ispezione. Attraverso un approfondito studio dei macchinari e delle modalità di guasto collegate, viene quindi applicato il ciclo manutentivo più appropriato, differenziando le macchine tra quelle che si rompono spesso (si può prendere in considerazione la sostituzione dei componenti critici) e quelle con poche problematiche (dove si può considerare l'introduzione di una manutenzione a guasto).

2.4 Il World Class Technology

Sulla base della lunga esperienza in ambito Produzione del World Class Manufacturing e dei notevoli risultati ottenuti, in FCA si è avuta l'idea di poter migliorare altri processi aziendali con l'utilizzo dei metodi World Class, sino all'elaborazione di una metodologia orientata a migliorare il modo di lavorare di enti che si occupano della progettazione dei processi, chiamata *World Class Technology*. Quest'ultima consiste di dieci pilastri tecnici e dieci pilastri manageriali come il WCM, con particolare attenzione all'ottimizzazione dei costi di funzionamento facendo leva sulle cosiddette *Lessons Learnt*, ovvero l'esperienza del mondo della produzione (e quindi tutto ciò che concerne il WCM) serve ad avere un segnale retroattivo verso la progettazione dei processi per dare miglioramenti in stile World Class.

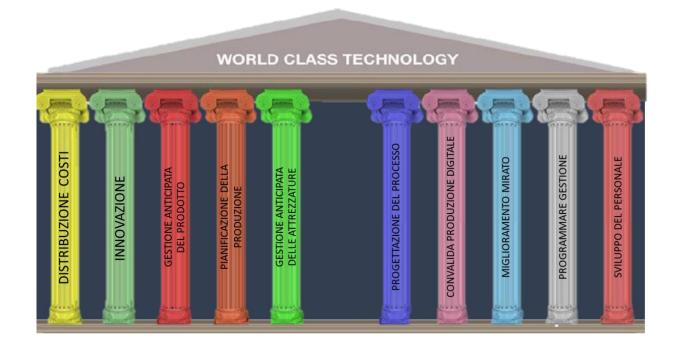


Figura 34 - I 10 pillar tecnici del World Class Technology

Seguendo le orme del WCM, i 10 pilastri sono divisi in 7 step di applicazione che sfruttano strumenti come il metodo dei 5 Whys o la Failure Mode Effects Analysis (FMEA). Inoltre, a supporto del raggiungimento degli obiettivi aziendali desiderati durante il lancio di nuovi prodotti e della produzione, anche per il WCT sono presenti i KPI basati però sul concetto di Mutually Exclusive Collectively Exhaustive (MECE).

2.5 Il concetto di manutenzione e la CBM

Essendo ormai entrati nell'ottica di Industria 4.0 e metodologia World Class Technology, è evidente come sia necessario un sistema ottimale di gestione manutentiva in ogni impianto soprattutto per i componenti di vitale importanza e/o a rischio guasti (*Figura 35*).

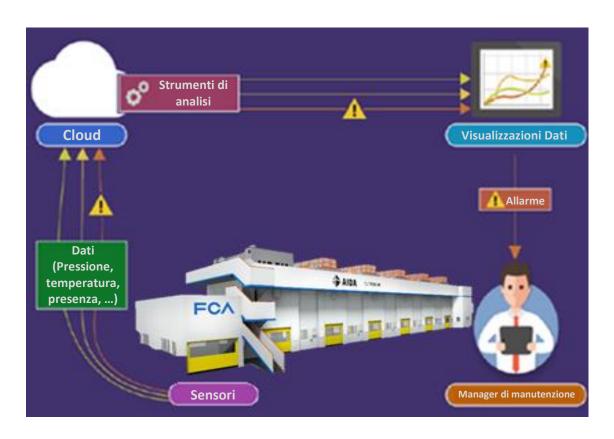


Figura 35 – Schema generale di un sistema per la gestione dei dati dai sensori [11]

Vanno studiate efficienza e affidabilità dei componenti, intese come attitudine a svolgere la funzione richiesta in date condizione e per un intervallo di tempo stabilito. Per manutenzione si intendono tutte quelle attività destinate a mantenere o a riportare un componente in uno stato in cui possa essere affidabile: risulta chiaro come la possibilità di monitorare in tempo reale il ciclo produttivo (e quindi i suoi componenti attivi) possa essere un notevole aiuto per la manutenzione. L'insieme di queste attività costituisce il *Piano di Manutenzione* che può anche prevedere interventi a guasto tutte le volte che questa modalità risulti la più conveniente. Essendo un processo strategico fondamentale per la gestione dell'impresa, il piano di manutenzione (oltre che variabile a seconda del tipo di macchinario) deve presupporre obiettivi aziendali, controlli efficaci e impiego rigoroso di metodi coerenti.

Per questo motivo la definizione del piano manutentivo si sviluppa attraverso una precisa sequenza, divisa in 5 fasi:

- 1) Scomporre gli impianti in parti di esso per dividerli in classi aventi stessi modi di guasto;
- 2) Svolgere un'analisi di criticità dei guasti in modo tale da identificare i fattori critici che influenzano maggiormente la capacità produttiva, i costi o le prestazioni del sistema;
- 3) Applicare la FMEA (Failure Modes and Effect Analysis), ovvero un'analisi sulle cause, effetti e rimedi dei possibili problemi che possono verificarsi nel sistema (viene dato un valore numerico di pericolo ad ogni problema e si monitorano solo quelli che superano un certo valore limite);
- 4) Applicare gli standard di ispezione;
- 5) Applicare sistematicamente le tecniche di manutenzione per migliorare l'affidabilità e verificare i risultati tramite opportuni indicatori (ad esempio MTBF, ovvero Mean Time Between Fail).

In funzione delle direttive aziendali e dall'applicazione, viene scelto il tipo di manutenzione da effettuare nell'impianto (*Figura 36*).



Figura 36 – Schema generale dei tipi di manutenzione

Un primo esempio è la manutenzione correttiva o a guasto (Breakdown Maintenance – BM), scelta solo nei casi in cui il costo di riparazione sia inferiori a quello di prevenzione. Il principio di base è il più semplice di tutti, ovvero si attende il guasto prima di effettuare i lavori manutentivi.

L'altro ramo in cui si dividono i tipi di manutenzione è quella pianificata, che si divide a sua volta in due rami, di cui il primo è la manutenzione migliorativa (detta anche proattiva), dove si interviene sul componente per migliorarne l'efficienza, aumentandone quindi anche il valore economico.

La più utilizzata allo stato d'arte attuale, per motivi di costi e impatti sui tempi dei cicli di lavorazione, è la manutenzione appartenente al secondo ramo, ovvero la manutenzione preventiva (Preventive Maintenance – PM), costituita dalla manutenzione di routine per mantenere l'affidabilità dell'impianto e prevenirne i guasti. Essa si divide in due modalità operative fondamentali, di cui la prima è la manutenzione periodica, che si basa su controlli ad intervalli di tempo prestabiliti atti a monitorare ciclicamente lo stato dei macchinari. Tuttavia, data l'attuale complessità e intensità di fabbricazione raggiunti dagli stabilimenti produttivi nel mondo automotive e il livello d'automazione, si tende sempre più ad applicare il secondo tipo di metodologia preventiva, ovvero la manutenzione predittiva (Predictive Maintenance – PdM) anche detta manutenzione su condizione. Quest'ultima si basa sull'individuare in tempo reale la vita utile di parti importanti dell'impianto, al fine di sfruttare al massimo il loro funzionamento, minimizzando così i costi di manutenzione e ottimizzando la disponibilità del macchinario, aumentandone la produzione e i tempi di utilizzo.

Il metodo si basa su due prerequisiti essenziali: l'esistenza di un indicatore che possa valutare la ridotta resista al guasto del componente e la disponibilità di un intervallo di tempo adeguato tra la rilevazione di quest'ultimo e il guasto. Da questa necessità è nata la *Curva P-F*, Potential failure – Functional failure (*Figura 37*), dove è possibile osservare l'influenza del tipo di manutenzione sullo stato del componente. Il diagramma è diviso in zone di competenza dei vari tipi di manutenzione e mette in risalto come la manutenzione preventiva sfrutti al massimo la vita utile del componente rischiando in alcuni casi di lavorare in situazioni non ottimali.

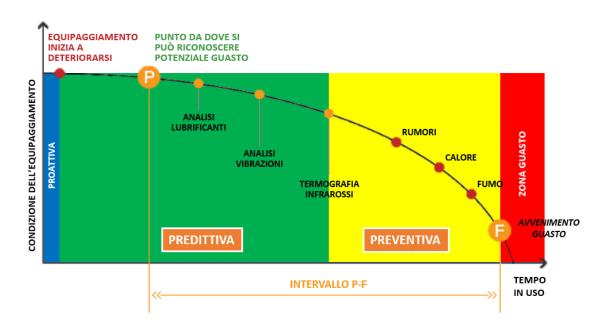


Figura 37 - Diagramma Potential failure - Functional failure

Allo stesso modo del "time based", qui si parla di *Manutenzione su condizione* (Condition Based Maintenance - CBM), che determina la necessità d'intervento in base al monitoraggio e alla valutazione dello stato di funzionamento di un componente o di un macchinario: la qualità di tale stato è valutata controllando se i parametri chiave di stima presi come riferimento (temperatura, grado di vibrazioni, tensione elettrica, ecc.) rientrano nei valori limite da rispettare per quel dato componente. Di conseguenza, questo metodo consiste nel compiere diagnosi in tempo reale, permettendo di prevedere guasti, rotture o malfunzionamenti con diverso tempo di anticipo e riducendo drasticamente i fermi macchina avendo come ipotesi principale quella di considerare che i guasti non accadono istantaneamente, ma si sviluppano lungo un certo periodo di tempo [12]. Il controllo dello stato di macchine e impianti può avvenire tramite accesso remoto, senza che sia necessaria la presenza di un tecnico direttamente in campo.

L'intera metodologia della CBM si basa sulla conoscenza delle effettive condizioni del sistema, maturata tramite il *condition monitoring*, che sta avendo un grande sviluppo in correlazione all'avanzamento tecnologico dell'Industria 4.0 che permette di avere una gestione di grandi set di dati raccolte sul Cloud o su un database.

La gestione del flusso dei dati nella manutenzione su condizione è divisa in quattro fasi [11]:

- Acquisizione dati: prevede studio del posizionamento di sensori nel macchinario per acquisire e gestire i dati attraverso un'unità centrale. L'acquisizione può essere svolta in maniera continua (risultati migliori, ma una quantità di dati elevati) o in maniera discreta ad intervalli di tempo programmati.
- 2) **Pre-elaborazione dei dati:** il flusso dei dati che viene inviato alla piattaforma Cloud viene processato preventivamente per ridurne la quantità e, di conseguenza, la latenza del processo decisionale. Un ulteriore vantaggio è la riduzione dei costi, poiché questi vengono calcolati in funzione dei dati elaborati dal Cloud.
- 3) Elaborazione dei dati del Cloud: dopo l'archiviazione dei dati sulla piattaforma Cloud, vi è l'analisi di quest'ultimi mediante tecniche di machine learnig, dove il sistema può essere interrogato volta per volta su dati specifici. In questa fase è anche possibile trasferire i dati offline che non hanno più bisogno di essere elaborati e quindi il Cloud può fungere anche da archivio dati.
- 4) Post-elaborazione dei dati: consiste nell'analisi definitiva delle informazioni raccolte mediante 4 finalità principali successive, ovvero reportistica, supporto decisionali, analisi model-based e service. Gli output del processo di condition-monitoring vengono divisi in diversi report sullo stato del macchinario e dei suoi componenti in modo tale da semplificare la consultazione delle diverse di tipologie di dati. Un servizio di supporto strutturato aggiorna e analizza lo storico dei dati raccolti per fornite una risposta critica sull'operato e in caso di ricevuto allarmi dalla piattaforma Cloud, è possibile utilizzare strumenti di elaborazione del segnale più avanzati per valutare i dettagli sul guasto e inviare automaticamente un report ai tecnici di assistenza.

I principali benefici apportati dalla Condition Based Maintenance sono di carattere economico, infatti riduce le spese manutentive e aumenta il tempo di utilizzo dei componenti e dei macchinari. Vi sono quindi dei profitti nascosti, dove si minimizzano non solo i costi diretti di riparazione, ma anche la probabilità di rotture improvvise che provocano costi elevati, influenzando anche la vita utile dei componenti per funzionamento dei macchinari non in condizioni ottimali. Inoltre, grazie alla raccolta e all'elaborazioni dei dati, è possibile avere una conoscenza più approfondita del

funzionamento della propria componentistica garantendo una base solida per una manutenzione più efficiente [12].

La CBM porta con sé anche alcuni svantaggi, in particolare la presenza di molti dati da gestire. Inoltre, alcune delle analisi specifiche che vanno condotte, richiedono attrezzature e training piuttosto costosi, con tempi lunghi per sviluppare trend e individuare soglie d'allarme.

Per sfruttare al meglio i vantaggi della manutenzione su condizione bisogna realizzare in ambito industriale un collegamento fra le diverse macchine, avendo una HMI (Human Machine Interface) e raccogliendo tutti i dati: risulta così evidente la necessità di avere in dotazione un sistema di *sensori* posti sugli stessi macchinari che riesca a fornire tutti i dati per avere in tempo reale lo stato dei componenti (*Figura 38*).



Figura 38 – Schema logico generale di un sistema CPS con HMI [13]

2.6 Presentazione sensori

Avendo compreso il ruolo centrale dei sensori per avere una manutenzione su condizione efficiente in ottica Industria 4.0 e World Class Technology, risulta evidente come vada approfondito lo studio di quest'ultimi e sui loro possibili utilizzi futuri per poter implementare sistemi CPS sempre più integrati.

In linea del tutto generale, un sensore è un dispositivo in grado di rilevare una grandezza interagendo con essa, convertendo la questa grandezza fisica in ingresso in una in uscita acquisibile per via elettrica. Spesso il termine sensore è utilizzato confondendolo al concetto di trasduttore (*Figura 39*), il quale è invece un dispositivo che converte una grandezza in un'altra di natura diversa: la differenza marcata è che il sensore converte in una grandezza legata alla prima da una legge nota.

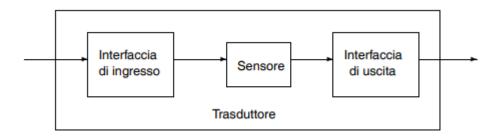


Figura 39 – Schema di un trasduttore e sua correlazione con il sensore

Le principali caratteristiche di un sensore sono: campo di misura, sensibilità (intesa come minima variazione misurabile), precisione (ovvero immunità dagli effetti di agenti esterni alla misurazione di interesse e ripetibilità su più misurazioni), finezza (non deve perturbare la grandezza da rilevare e quindi dimensioni e disturbi devono essere modesti), rapidità di acquisizione dati e economicità. Andrà trovato un compromesso accettabile tra queste caratteristiche in fase di progettazione per poter adempiere in modo efficiente ai compiti ai quali il sensore verrà destinato. Bisogna considerare che l'utilizzo di un sistema di sensori è utile solo in componenti dove vi possono essere criticità prevedibili (per esempio difficoltà evacuazione sfridi o sbilanciamento forze) oppure per componenti importanti (per costi, richieste elevate in prestazioni o tempi ecc.), altrimenti è solo un consumo eccessivo di denaro in progettazione dello stampo e manutenzione correlata.

A seconda dell'elemento preso come parametro di scelta, esistono diversi tipi di classificazione in cui posso essere divisi i sensori. Un primo esempio di classificazione è per tipo di grandezza fisica misurata:

- Grandezza continua, che può assumere valori continui all'interno di un certo intervallo, alla quale corrispondono segnali analogici continui nel tempo;
- Grandezza discreta, che assume valori discreti e alla quale corrispondo segnali codificati oppure segnali logici.

Un ulteriore classificazione può essere fatta in base alla tipologia di energia di ingresso e di uscita: in questo caso abbiamo trasduttori omogenei se queste ultime sono di identica natura, viceversa si parlerà di trasduttori non omogenei (o ibridi) come quelli elettromeccanici. Rimanendo su analizzare le energie in gioco, si ha una possibile divisione anche in base al rapporto tra l'energia di uscita e quella di ingresso: se la prima è inferiore alla seconda si avranno trasduttori passivi (o inerti), in caso fosse uguale o maggiore, si avranno trasduttori attivi (ciò implica che il trasduttore deve essere alimentato da una fonte di energia ausiliaria esterna).

Risulta più conveniente classificare i sensori in base al principio di funzionamento, ovvero alla grandezza di uscita, avremo quindi sensori di tipo meccanico, elettrico, ottico (più precisamente, sensori a fibra ottica) e digitali.

Un importante impiego dei sensori in ambito industriale è quello dei sensori di prossimità per la rilevazione di presenza o assenza (per esempio vengono usati nello stampaggio per controllare il corretto posizionamento e l'effettiva presenza della lamiera all'interno dello stampo per far avviare il ciclo di lavoro della pressa). I sensori di prossimità possono essere realizzati basandosi su diversi tipi di tecnologie: induttivi, capacitivi, meccanici (per esempio i finecorsa), magnetici (sfruttano contatti Reed o effetto Hall), ad ultrasuoni (sonar), ottici (riflessione di un fascio luminoso o variazione di quest'ultimo) e fotoelettrici (composti da sorgente ottica, in genere infrarossa, e un ricevitore). Di questi, i primi tre sono i più utilizzati nello stampaggio a causa delle loro migliori affidabilità e minor costi.

I sensori di prossimità induttivi (*Figura 40*) sono progettati per funzionare mediante la generazione di un campo elettromagnetico e la rilevazione delle perdite (calcolate come variazione negativa della riluttanza) per correnti parassite generate dall'entrata nel campo di oggetti target di materiale che devono essere necessariamente ferromagnetici. Il circuito è costituito da una bobina

alimentata con tensione sinusoidale ad alte frequenze (parecchi MHz), un oscillatore LC e un raddrizzatore. Superata una certa soglia di variazione, questi sensori fanno commutare il segnale in uscita.

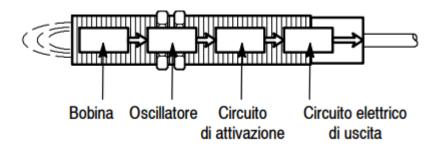


Figura 40 – Schema di un sensore di prossimità induttivo

La portata nominale di rilevazione è in genere bassa (ordine di quale millimetro) e commuta a frequenze molto alte (ordine di migliaia di volte al secondo), caratteristiche che lo rende ideale per la rilevazione di oggetti in rapido movimento. Dividendo il sensore a blocchi (*Figura 41*) è possibile dividerlo in:

- 1) Sensore di campo;
- 2) Oscillatore;
- 3) Demodulatore;
- 4) Trigger Schmitt, che trasforma il segnale da analogico a digitale (ON/OFF);
- 5) Uscita logica (0 o 1, ovvero assenza o presenza).

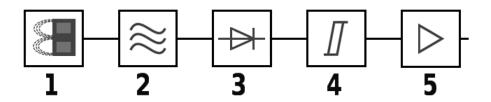


Figura 41 – Schema a blocchi di un sensore di prossimità induttivo

I sensori di prossimità capacitivi si basano invece sulla rilevazione della capacità elettrica di un condensatore. Il principio di funzionamento consiste nell'avere il loro lato sensibile che costituisce un'armatura di un condensatore, mentre l'eventuale presenza nelle immediate vicinanze di un oggetto conduttore, realizza l'altra armatura che chiude il circuito facendo in modo tale che i rilevatori interni registrino la variazione e comandino la commutazione del segnale di uscita. Sono

limitati nella velocità di commutazione (10-50 Hz) ma presentano alcuni vantaggi rispetto ai sensori induttivi, ovvero avere portate nominali maggiori (fino a 20 mm), possibilità di rilevare anche materiali non ferromagnetici (purché parzialmente conduttivi) e sono immuni da disturbi esterni elettromagnetici. Questi vantaggi lo rendono il sensore usato per la rilevazione della presenza di lamiera all'interno degli stampi nello stampaggio.

Di seguito viene riportata una panoramica riassuntiva dei diversi sensori che è possibile ritrovare per monitorare un processo di stampaggio:

- Sensori di forza: possono registrare i valori di punta del carico o il carico in funzione dello spostamento o del tempo di scorrimento. Questi sensori sono generalmente posizionati nel telaio della pressa, nei sistemi di movimentazione, nelle guide o direttamente nell'utensile. La misura della forza può essere utilizzata per impedire il sovraccarico della pressa o lo sbilanciamento del carico, per monitorare l'usura degli utensili e per rilevare i cambiamenti nella lubrificazione o la frattura del materiale. Le celle di carico e i sensori piezoelettrici sono i più usati dispositivi di misurazione della forza.
- Sensori acustici: oltre ai sensori di forza, è possibile utilizzare anche sensori di emissione ultrasonica o acustica per rilevare alcuni cambiamenti nel processo. Quando una cricca è generata nel pezzo o nell'utensile, da questa cricca si propagano delle onde che possono essere registrate da sensori di emissione ultrasonica e acustica. È necessario prestare particolare attenzione per individuare e interpretare i risultati di questo tipo di sensore, poiché i segnali di rumore possono interferire con le misurazioni, serve quindi scegliere sensori idonei in grado di schermare i possibili disturbi mantenendo allo stesso tempo alta l'affidabilità del dato misurato.
- Sensori di spostamento: sono tipicamente utilizzati per tracciare la posizione dello stampo per prevenire incidenti, e possono anche essere utilizzati per rilevare l'inizio della grinza del blank nella zona della flangia durante un processo di stampaggio o di imbutitura. Questa tecnica può essere importante in un processo automatizzato in cui la forza di supporto del blank può essere regolata localmente. Trasformatori differenziali variabili lineari, sensori di prossimità, sensori a ultrasuoni e sensori fotoelettrici sono utilizzati per questi compiti.
- Sensori di correnti parassite: le proprietà meccaniche del materiale hanno un effetto significativo sulle condizioni di lavorazione e sulla qualità delle parti. Le proprietà elettriche, meccaniche e magnetiche del materiale possono variare da lotto a lotto o anche all'interno

dello stesso lotto. Pertanto, nella produzione su larga scala, è buona norma misurare le proprietà di ciascun lotto prima dell'uso. Ciò può essere realizzato conducendo prove di trazione o utilizzando un sensore di corrente parassita.

Sensori di spessore: la quantità e il tipo di lubrificante richiesto possono variare a seconda
dell'obiettivo principale: raffreddare il blank e gli utensili, ridurre l'usura dell'utensile o
migliorare il flusso del materiale. La quantità può anche dipendere dalla rugosità della
superficie del materiale in esame. Tecniche come la spettroscopia possono essere utilizzate
per misurare lo spessore del lubrificante in tempo reale durante la produzione.

2.7 Il valore aggiunto dato dai sensori

Il motivo principale per il quale è fondamentale l'uso dei sensori è quindi quella di rendere possibile l'implementazione di tecniche di manutenzione predittiva, migliorando l'efficienza complessiva dell'impianto conoscendo in tempo reale il comportamento del macchinario. In stretto collegamento con questo concetto, è di particolare interesse la definizione del Virtual Commissioning, che è quella metodologia di lavoro che prevede lo sviluppo di un gemello digitale della macchina, chiamato "Digital Twin," ed essere in grado di interagire con esso tramite dispositivi del mondo fisico (appunto i sensori).

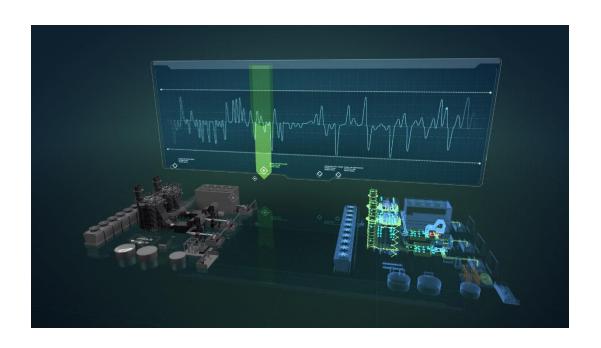


Figura 42 – Controllo del macchinario attraverso il concetto di Digital Twin

La possibilità di avere un Digital Twin del macchinario reale ha una duplice valenza:

- 1. Se opportunamente correlato ai dati misurati attraverso i sensori nel mondo fisico, il gemello virtuale è in grado di comprendere e adattarsi in modo sempre più preciso per i vari processi aziendali, dalla prevenzione alla manutenzione;
- 2. Attraverso l'uso di software dedicati, è possibile simulare i cinematismi e le dinamiche peculiari di ogni macchina e svolgere analisi preventive sul macchinario e sul processo, in modo tale da poterne valutare potenzialità e possibili criticità anche prima dell'acquisto per avere un mezzo aggiuntivo per l'analisi dei costi/benefici.

Per avere questo collegamento è necessario trasformare le grandezze misurate nel mondo fisico in dati trasmissibili al mondo virtuale ed è questo il motivo per cui si è passati dall'uso degli strumenti di misura classici a quello dei sensori intelligenti (Smart Sensor). Sotto questo punto di vista ecco come i sensori diventano il ponte tra il mondo fisico e quello della simulazione.

Grazie alla sempre più efficace interfaccia tra i sensori ed i microprocessori, nasce un connubio che rende possibile la trasmissione solo dei dati più importanti, riuscendo autonomamente a scinderli da quelli inutili in modo tale da ridurre i costi di gestione ed elaborazione dei dati nei Cloud. Il sensore diventa quindi lo strumento più piccolo dei CPS, dal quale si parte per evolvere il macchinario in ottica Industria 4.0, puntando alla massima applicazione delle metodologie World Class.

Capitolo 3 – Analisi del processo di stampaggio

3.1 Applicazione metodologia WCT

Obiettivo finale dell'attività di tesi è quello di ottimizzare il processo di stampaggio della lamiera, utilizzando sistemi integrati e interconnessi in ottica Industria 4.0, applicando le metodologie della World Class Technology. Per far ciò risulta necessario un grado di controllo sulla linea più profondo, puntuale e immediato, per garantire un livello di qualità costante, gestendo efficacemente le derive dei sistemi o le perturbazioni esterne in modo da ottenere una manutenzione preventiva o predittiva ottimale.

Verranno valutate e classificate sia le soluzioni già impiegate sul mercato (anche in ambienti simili, ma non identici allo stampaggio di lamiera) sia le innovazioni (che verranno appunto studiate durante l'attività).

In aiuto all'analisi vi è la possibilità di sfruttare strumenti virtuali di previsione e di simulazione del processo che saranno integrati coi dati reali derivanti dal controllo, in modo tale da avere il già descritto Digital Twin del sistema reale, applicando la metodologia del Virtual Commissioning. La simulazione servirà non solo a ottimizzare i cicli produttivi in fase di messa a punto, ma anche per valutare i criteri ottimali da adottare nella gestione delle derive e dei disturbi esterni, oltre che gestire la vita utile dei componenti del macchinario.

Il primo passo è stato condurre un'attività finalizzata ad individuare i vari parametri in grado di influenzare efficienza e produttività, ma anche qualità finale del prodotto. Sono stati individuati degli indici di qualità, in grado di rappresentare le maggiori criticità di processo, misurabili in linea mediante sensori. Una volta determinati i parametri di processo e prodotto da monitorare, si è discriminato, tra quest'ultimi, quali potessero essere facilmente misurabili in linea mediante l'uso di sensori. Successivamente, si è dato maggior peso a quelli che potessero costituire grandezze significative in input per gli strumenti di simulazione virtuale in modo tale da avere un ulteriore sistema di feedback.

Il tutto deve avere come priorità quella di adeguare i processi aziendali alle nuove tecnologie, in modo da renderli robusti e affidabili per sostenere l'innovazione tecnologica. La vera sfida è comprendere dove l'innovazione può creare valore e dove può distruggerlo: spesso infatti manca un collegamento fra l'adozione di queste tecnologie e la loro gestione, che implica inevitabilmente anche un cambiamento nella cultura aziendale. Per innovare il prodotto bisogna preventivamente conoscere e innovare il proprio processo. [14]

Per ottenere un processo robusto e affidabile, la qualità va costruita durante il processo stesso e non solo mediante ispezione finale. Nei principi del *Quality Control*, le caratteristiche del prodotto che vengono percepite come 'Qualità' dal mercato vengono correlate logicamente e rigorosamente con le specifiche di materiale, con i metodi di produzione, con le conoscenze della manodopera e con le caratteristiche delle macchine (tools delle 4M, *Figura 43*). Queste correlazioni generano un insieme di condizioni e parametri relativi al processo per evitare le Non Conformità e trovarne le cause.

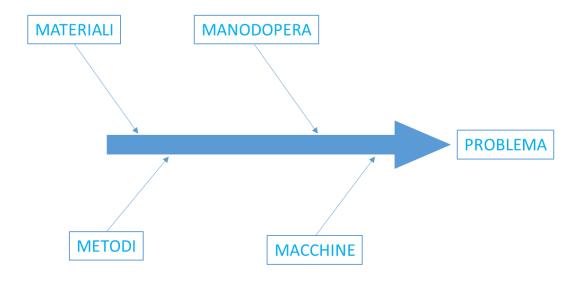


Figura 43 - Schema Tools delle 4M, detto anche Diagramma di Ishikawa

Lo studio delle soluzioni e della sensoristica associata mira anche a definire il tipo di architettura che il sistema di controllo e monitoraggio dovrà avere su una stazione di lavoro, prendendo in considerazione non solo le specifiche caratteristiche dei vari sensori, ma anche la posizione di quest'ultimi in modo tale da eliminare qualsiasi tipo di ingombro con le parti del macchinario in movimento ed evitare qualsiasi tipo di interferenza su misurazione e trasmissione dati.

Al fine di garantire una base solida per lo sviluppo della demo di sensori e raggiungere l'obiettivo dell'attività, è stata condotta una procedura interna di World Class Technology, finalizzata ad individuare idee, soluzioni e azioni, attraverso sessioni dedicate a:

- Problem Statement, ovvero una descrizione sintetica del problema da affrontare,
 identificando il divario tra lo stato attuale (problema) e lo stato desiderato (obiettivo);
- Idea Generation, nella quale, per raggiungere l'obiettivo prefissato, vengono raccolte una serie di idee, senza le quali non ci sarebbe innovazione;

• Sorting & Priortization, dove le idee raccolte dal team vengono ordinate, definendo una priorità collegata a esigenze specifiche e/o benefici apportati.

Alla base del Problem Statement vi è l'idea per cui il primo passo da fare per risolvere un problema è capirlo fino in fondo. Per questa fase iniziale e per l'analisi dei bisogni necessari, si è utilizzato il tool dei "Sei Cappelli per pensare". Esso si basa sul concetto che ognuno di noi tende a esaminare un problema sempre secondo un solo punto di vista. Questa condizione limita la nostra capacità di risolvere i problemi in modi diversi e ostacola i possibili progressi: per ovviare a questa "mancanza" intrinseca del carattere umano, viene usata la tecnica dei sei capelli per pensare ideata da Edward De Bono. Questa tecnica incoraggia ad osservare il problema da una diversa prospettiva, sperimentando nuovi approcci, e consiste nell'utilizzare sei capelli diversi, ognuno dei quali simboleggia un atteggiamento di pensiero diverso: bianco, il ragionamento analitico; rosso, espressione libera dell'emotività; nero, rileva gli aspetti negativi, ovvero le cose che non possono andar bene; giallo, rileva gli aspetti positivi e i vantaggi; blu, stabilisce le priorità, pianifica e conduce l'intera tecnica. Attraverso questa tecnica, nella fase di Problem Statement sono state individuate le esigenze legate a controllo qualità, controllo sul pezzo, controllo sul processo e controllo fuori o in linea.

Le considerazioni emerse sono servite da input per la fase successiva di Idea Generation nella quale è stato applicato il tool "BrainWriting". Questa tecnica consiste nel dividere il team in gruppi di massimo 4-6 persone, presentare loro il problema e far trovare 3 soluzioni ciascuno in 5 minuti. Lo scopo della tecnica è quello di stimolare le persone a pensare in modo creativo e libero, sfruttando il focus su determinati problemi.

Le idee generate devono essere elaborate dagli specialisti di processo per ordinarle e avere una priorità: questo processo è stato eseguito mediante l'uso del tool "Daisy Wheel" (Figura 44). Alla base della metodologia vi è una margherita, della quale ogni petalo fornisce un pensiero per utilizzare in modo ottimale l'idea. Il fine è quello di consentire l'espansione o la crescita di un'idea e può anche supportare l'unione di due di queste in una più grande.

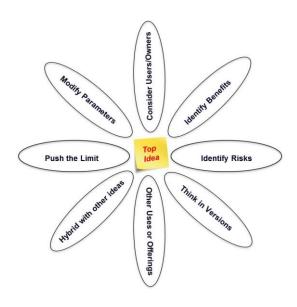


Figura 44 - Schema del Tools Daisy Wheel

Dopo aver preso in considerazione i benefici, i rischi e i limiti delle migliori idee, l'analisi ha fatto sì che emergessero le seguenti priorità, valutabili, in questa fase del progetto, come potenziali azioni da mettere in pratica per la realizzazione dei dimostratori finali:

- 1) Creare un database dei difetti possibili di un prodotto finito, di modo tale che, a partire dal rilievo in linea, il difetto sia subito riconducibile a una famiglia e/o a una tipologia, in modo tale da ridurre drasticamente i tempi di reazione;
- 2) Preparare delle specifiche tecniche per la realizzazione dei sensori in grado di effettuare verifiche e misure definite in correlazione al tipo di applicazione per il quale vengono usati;
- 3) Individuare tra tutti gli output rilevabili dal controllo in linea quelli che possono determinare uno stop della pressa (da verificare se in modo automatico tramite azione diretta del PLC o manuale);
- 4) Realizzare un database dei materiali che consenta, partendo dalla verifica sulle caratteristiche del materiale in ingresso alla macchina, di impostare il relativo settaggio ottimale dei parametri macchina in modo tale da garantire qualità elevate;

- 5) Realizzare un database sulle condizioni ottimali di lubrificazione che consenta, partendo dalla verifica sullo stato della lubrificazione, di avviare la relativa taratura automatica della macchina;
- 6) Effettuare nuovi studi per ottenere una sempre maggiore sovrapposizione numerico sperimentale (simulazione virtuale che insegua il reale).

Alla luce di quanto emerso dall'analisi sarà fondamentale evidenziare le correlazioni tra le non conformità individuate e il processo. Bisognerà, inoltre, definire le anomalie prioritarie, pesando i difetti in funzione di parametri quali: frequenza con cui comparare; costi correlati sia alla manodopera sia al materiale; localizzazione della fase del processo in corrispondenza della quale il difetto si è manifestato. Una volta classificate le anomalie occorrerà attaccare le non conformità più critiche e lavorare in parallelo sul processo più critico. Un eventuale sistema di controllo dovrà essere pensato anche con l'obiettivo di ridurre al minimo le micro-fermate, vale a dire fermate macchina dovute a un malfunzionamento o a un errore della movimentazione automatica del processo o fermate macchina dovute al verificarsi di un problema di qualità (registratore allo stato attuale mediante ispezione visiva a fondo linea). Una micro-fermata richiede l'azione di un operatore per il ripristino delle condizioni operative, resettando o riattivando il sistema. Tra le maggiori cause delle micro-fermate ci sono i micro-difetti della macchina stessa che possono essere rilevati mediante sensori ottici o acustici.

Per un effettivo miglioramento occorre trovare la soluzione migliore per ogni problema, trovandone la radice, testando e standardizzando le possibili soluzioni.

In ottica di applicazione di uno schema di gestione PDCA (Plan-Do-Check-Act), quanto appena descritto corrisponde a una fase di pianificazione, durante la quale sono state dapprima approfondite le necessità legate alla realizzazione dei dimostratori, poi sono state formulate delle idee in merito alla realizzazione stessa ed infine è stata condotta una indagine di priorità sulle azioni da mettere in pratica.

3.2 Problemi collegati alla qualità finale del pezzo

Il risultato dell'attività dovrà essere un'evoluzione del processo di stampaggio in ottica Industria 4.0. L'area di intervento sarà una linea presse per stampaggio lamiera (a caldo o a freddo), mentre l'obiettivo sarà l'ottimizzazione del processo nelle sue diverse fasi, in modo da gestire tutti i parametri principali per mantenere sotto controllo la qualità dei componenti stampati e l'efficienza della linea. È fondamentale che ci sia il focus sia sul prodotto che sul processo e che questo concetto non cambi nell'atteggiamento aziendale futuro verso l'avanzamento tecnologico: l'obiettivo dovrà essere non solo quello di controllare la qualità, ma anche e soprattutto quello di "costruire" la qualità col prodotto nella attuazione del processo, con approccio preventivo, prima ancora che reattivo.

Applicando i concetti del WCT, la metodologia da adottare può essere così riassunta:

- Identificazione parametri e grandezze influenzanti le variabili prese in considerazione;
- Identificazione delle tipologie di sensori e attuatori per monitorare ed eventualmente controllare le grandezze;
- Validazione processo sperimentale o numerico;
- Identificazione logiche di controllo del processo;
- Implementazione dei sensori e attuatori ed integrarli nel sistema di controllo con le logiche di controllo;
- Impiego informazioni raccolte in un database per ottimizzazioni processo (nuove fasi di Messa a Punto, cambio stampo, manutenzione predittiva, ecc.).

A partire dall'attuale linea pressa si prevede di inserire una serie di sensori o sistemi per monitorare i principali parametri e grandezze che influenzano la qualità finale dei componenti stampati, insieme ad una serie di attuatori correlati che permettano di modificare i parametri di processo in relazione ai dati ricevuti dai sensori (CPS, Cyber Physical Systems).

Alla fine della linea verrà previsto un sistema di Reverse Engineering (*Figura 45*) che, abbinato agli altri sensori, leggerà le forme e le tolleranze dei componenti stampati e le confronterà con il CAD nominale, per verificarne la qualità e la deviazione rispetto al desiderato. Queste informazioni saranno usate per decidere in che modo attivare gli attuatori per operare l'ottimizzazione di processo e recuperare le deformazioni fuori tolleranza.

Il fine ultimo in ottica Industria 4.0 è che il sistema possa essere in grado di ottimizzare il processo produttivo in modo autonomo, arrivando a regime più velocemente rispetto al sistema attuale di messa a punto, basato sul metodo test and trials. L'impiego di simulazioni di formatura metallica, insieme al controllo integrato di processo, e al database per la linea pressa, permetterà di gestire i cambi stampo o i cambi produttivi in maniera più efficace.



Figura 45 - Schema riassuntivo dell'idea di nuova linea di presse

Per facilitare l'analisi è stato utile dividere l'intero processo di stampaggio in cinque zone logicamente distinte (*Figura 46*) tenendo conto di:

- A. *Ingresso Materiale*, che consiste nella fase di conferimento del materiale alla linea di stampaggio;
- B. *Posizionamento*, dove vi è il prelievo della lamiera e deposito in pressa;
- C. **Stampaggio**, comprendente tutte le operazioni all'interno della linea di presse (differenziate tra stampaggio a freddo e a caldo);
- D. *Scarico*, controllo del pezzo e rimozione dello stesso dalla pressa;
- E. *Controllo Qualità*, cella di qualità a fondo linea.

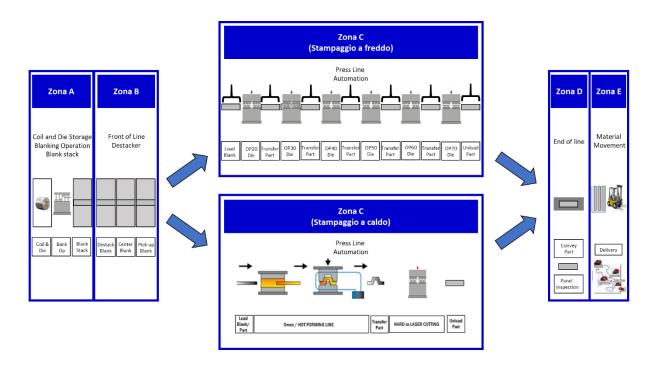


Figura 46 - Schema generale della divisione in zone dell'intero processo di stampaggio

Nella fase di ingresso materiale, il coil è accompagnato da una scheda tecnica relativa al lotto, con le informazioni di composizione chimica, spessore lamiera e caratteristiche meccaniche (rottura ed allungamento medio). Le lamiere di acciaio per lo stampaggio a freddo arrivano con uno strato protettivo anticorrosivo di zinco (richiesta nel Capitolato Tecnico) che può essere applicato sulla lamiera mediante processo di zincatura a caldo (a fuoco) o elettrochimica. A seconda del processo impiegato la zincatura può essere mediamente più o meno spessa, e può essere più o meno costante come spessore lungo la superficie. Si noti che la zincatura potrebbe, in base a come viene eseguita, rimanere depositata sullo stampo (accumulandosi), creando difetti e rotture, quindi, fermi macchina.

Inoltre, le lamiere di acciaio e di alluminio per lo stampaggio a freddo arrivano con uno strato sottile di lubrificante. In base alla quantità di lubrificante misurato la lamiera viene accettata o meno. Il lubrificante, se in quantità eccessiva, può generare scorrimenti anomali o problemi di accumulo sui pezzi successivi, mentre se in quantità troppo ridotta può generare rotture a causa degli attriti elevati che si innescano. Queste caratteristiche del coil in ingresso vanno monitorate, poiché influenzano la qualità finale del pezzo, ma deve essere premesso che questi sono, allo stato attuale, rilevabili solamente mediante applicazione di stress meccanici al materiale medesimo, simulando il tipo di sollecitazione a cui sarà sottoposto il materiale durante lo stampaggio: non si

potrà parlare di semplici sensori, ma di vere e proprie macchine di misura per le quali si dovrà valutare l'adattabilità in linea di produzione.

Proseguendo con le zone, per quanto riguarda quella di stampaggio effettivo, prendiamo in considerazione per prima l'operazione d'imbutitura, dove la lamiera assume la nuova forma sia per piegatura che per stiramento, per cui i difetti dimensionali ed estetici che possono nascere sono: scorrimenti, vuoti in figura, grippature, ondulazioni, puntinature e deformazioni. Per le altre operazioni vi possono essere problemi analoghi con l'aggiunta di non conformità nella forma e/o tolleranze, che possono essere controllati in linea (durante la lavorazione o in fase di scarico) o a fondo linea (fase di controllo qualità a fondo linea).

Le scelte di progetto, che si elaborano durante lo studio del processo di stampaggio, sono mirate a diminuire la probabilità di formazione di questi difetti; tuttavia, essendoci in gioco fenomeni molto complessi, le tecniche adottate per controllare certe criticità sono in concorrenza con la creazione di altre criticità. Se ne deduce, dunque, che difficilmente esiste una soluzione ottimale sotto tutti i punti di vista: sarà compito del progettista adottare quelle scelte che realizzino il miglior compromesso fra tutti i possibili rischi di creare difetti estetici e funzionali, in modo tale da ridurre i controlli necessari al sistema e di conseguenza i dati da elaborare.

3.3 Possibili controlli da eseguire

La stabilità del processo di stampaggio, ovvero la riduzione al minimo delle variazioni dimensionali (causate da lubrificazione, proprietà del materiale o variazioni di spessore), è un requisito fondamentale nella produzione di massa. Pertanto, un problema importante è la capacità di produrre in modo affidabile parti di qualità, senza strappi né grinze e con un ritorno elastico minimo, utilizzando un dato blank (con dimensioni, spessore e proprietà del materiale specificate) ed utensili con geometria specificata.

Durante l'analisi sono stati presi in considerazione i seguenti tipi di controlli, divisi, per facilità di analisi, nelle stesse zone utilizzate precedentemente:

■ ZONA A – Ingresso materiale

A.1: Controllo della qualità e caratterizzazione del materiale in ingresso, che, come anticipato, può necessitare di un macchinario aggiuntivo (per esempio per l'indentazione strumentata, dove viene "pizzicato" il materiale per studiarne le caratteristiche);

- **A.2:** Verifica quantità di olio presente sulla lamiera entrante, per evitare attriti eccessivi (poco olio) o eccessivi scorrimenti (troppo olio);
- **A.3:** Verifica dello spessore del materiale in ingresso, necessario per evitare difetti estetici e/o di forma;
- **A.4:** Verifica saldatura di giunzione tra coil, che può portare a difetti estetici indesiderati.
- **A.5:** Avviamento automatico del ciclo o segnale di emergenza da caricatore esterno (solo nello stampaggio a caldo), che attualmente sono manuali;

■ ZONA B – Posizionamento

- **B.1:** Verifica del corretto posizionamento della lamiera nello stampo, controllando che non vi siano spostamenti e angoli diversi da quelli nominali;
- **B.2:** Misura della temperatura in uscita dal forno (solo nello stampaggio a caldo), che attualmente viene fatta solo nella fase di messa a punto dello stampo.

■ ZONA C – Stampaggio della lamiera sotto pressa

- **C.1:** Verifica della velocità di discesa effettiva in fase di attivazione della pressa, in modo tale da evidenziatore possibili anomalie che potrebbe comportare riduzione qualità pezzo e/o rotture indesiderate;
- **C.2:** Manutenzione, conteggio colpi per singolo stampo per stima usura (verrà approfondito successivamente);
- **C.3:** Verifica real-time della pressione applicata sul pezzo, sia con simulazione FEM per studiare correlazione tra pressione e qualità, sia con pressostati digitali integrati nello stampo;
- **C.4:** Verifica dello scorrimento lamiera posta nella pressa, dovuta a fenomeni di ritorno elastico.

■ ZONA D – Scarico

D.1: Verifica corretta evacuazione sfridi, in quanto in alcuni casi la forma, la velocità e la dimensione dello sfrido può creare una loro non corretta fuoriuscita dagli scivoli che può provocare accumulo di quest'ultimi e causare problemi al pezzo/stampo, con conseguenze anche in termini di sicurezza dell'operatore;

D.2: Verifica correttezza sagoma nelle zone di tranciatura e foratura, operazione attualmente svolta a fine linea solo visivamente;

■ ZONA E – Controllo qualità

E.1: Verifica forma, tolleranze, spessori e difetti estetici su pezzo finito tramite macchine di visione automatiche, in modo tale da rendere il controllo oggettivo e non soggettivo come attualmente risulta, essendo svolto da operatori visivamente;

E.2: Verifica distribuzione delle temperature su materiale temprato (solo nello stampaggio a caldo), alla quale sono collegate le caratteristiche del materiale in uscita dalla pressa.

Una volta raccolti tutti i possibili tipi di controlli da migliorare o da implementare all'interno del ciclo di stampaggio, si è svolta un'analisi sulle priorità di sperimentazione di ognuno di essi basandosi su: fattibilità con le tecnologie attuali; facilità di analisi e studio in collegamento allo stato dell'arte attuale; presenza di soluzioni simili in altre applicazioni o in competitors; eventuali difficoltà del controllo causati da ingombri, posizione, interferenza di segnale e simili; conoscenza della sensoristica associata con caratteristiche adeguate.

Da questa fase di *Sorting & Priortization* si è arrivati a scegliere determinati tipi di controlli ad alta priorità (*Figura 47*).

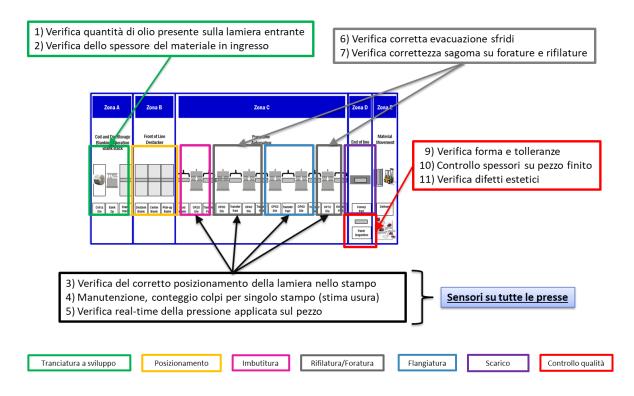


Figura 47 – Schema riassuntivo dei controlli ad alta priorità nelle varie zone dello stampaggio lamiera

3.4 Sistema di sensori associato

All'interno dell'intero processo non vi è solo un tipo di sensore in grado di svolgere il controllo richiesto: si sono quindi analizzate le caratteristiche dei sensori considerati più adeguati a cui seguirà una fase di testing per verificarne vantaggi e svantaggi. La *Figura 48* mostra un esempio di ciclo ideale di monitoraggio e controllo della pressione sul premilamiera nella fase di imbutitura.

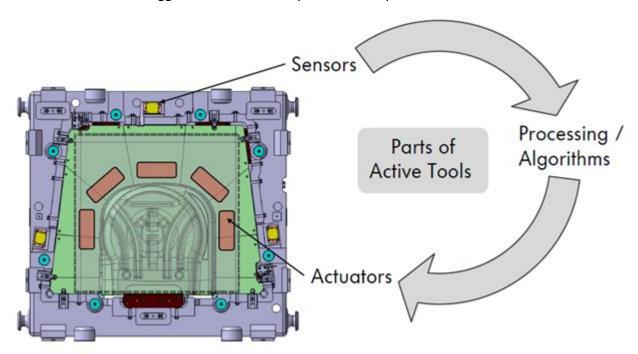


Figura 48 – Sistema di controllo e monitoraggio della pressione del premilamiera

Al monitoraggio del sistema di sensori, segue la fase di elaborazione dei dati raccolti per avere in output le eventuali azioni che gli attuatori dovranno fare per ristabilire la lavorazione con parametri ottimali (fase di controllo).

I parametri in gioco sono numerosi e devono essere tutti presi in considerazione per ridurre le difettosità sul componente finale: per tale ragione si potrebbe ricorrere ad un controllo in anello chiuso. Il numero di attuatori utilizzati per controllare la distribuzione di pressione del premilamiera sul pezzo in lavorazione è in costante aumento e nuovi sensori vengono sviluppati per monitorare il flusso di materiale durante la corsa del punzone.

I principali sviluppi dei sensori per consentire il controllo dell'imbutitura si sono concentrati sul monitoraggio del flusso di materiale attraverso il premilamiera durante la corsa del punzone. Ciò può essere ottenuto con trasduttori di spostamento lineari, sensore laser a triangolazione, sensore ottico non a contatto, bobine di induzione senza contatto, sensori a correnti parassite o con una serie di sensori piezoelettrici montati sotto uno strato protettivo vicino alla superficie dell'utensile. Trasduttori di spostamento contrapposti possono essere utilizzati per monitorare l'altezza e la lunghezza d'onda delle grinze, oppure i premilamiera possono essere montati su celle di carico piezoelettriche, per monitorare le forze di attrito.

La termografia a infrarossi può essere utilizzata per confrontare la distribuzione della temperatura in ciascun componente con quello realizzato precedentemente, come mezzo per prevedere cambiamenti nelle condizioni operative del processo.

Per garantire che siano rispettati i severi standard di qualità sulle superfici per le parti e gli assiemi stampati più esposti, quindi quelli estetici (in particolare pannelleria), si utilizzano le ispezioni di qualità delle superfici sia virtuali che manuali. In particolare, nelle fasi di rifilatura e foratura, oltre il controllo della forma data al pezzo dalle lame, vi deve essere svolto anche un controllo efficace per la corretta evacuazione degli sfridi.

Si sono studiate quattro possibili soluzioni:

- Fibra ottica, da usare per il controllo puntuale del passaggio dello sfrido con un'area di misura fino a 100 mm di larghezza o filo con armatura in acciaio;
- **Sistema infrarosso** (*Figura 49.a*), concettualmente simile al precedente, ma usa tecnologia diversa con logica presenza-assenza sfrido con raggio infrarosso;
- Sistema a tappeto vibrante, dove, in correlazione al tipo di sfrido e al suo angolo di discesa
 dallo stampo, si predispone un tappeto in grado di vibrare con velocità e frequenza
 adeguata permettendo allo sfrido di cadere in modo corretto;
- **Sistema nastro trasportatore** (*Figura 49.b*), dove, attraverso un sistema unico di trasmissione con motoriduttore, l'evacuazione dello sfrido viene facilitata attraverso un nastro in movimento (in modo continuo o solo quando viene registrato uno o più sfridi fermi nello scivolo).

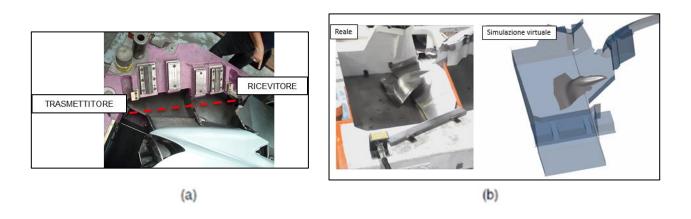


Figura 49 – Sistemi di controllo evacuazione sfridi infrarosso (a) e nastro trasportatore (b)

Per quanto riguarda il controllo qualità a fondo linea c'è da soffermarsi su una necessità: durante un'analisi interna si è svolta uno studio sulla ripetibilità e riproducibilità delle ispezioni manuali sulle superfici, usando un campione di persone esperte nel controllo qualità. Le misure manuali dell'ispezione contenevano grandi variazioni, solo alcuni specialisti valutatori hanno raggiunto un perfetto 100, mentre la maggioranza degli ispettori ha ottenuto punteggi inferiori a 76.

L'ispezione dei difetti superficiali richiede tempo, sforzi ed esperienza considerevoli e i risultati dipendono dall'operatore e sono altamente variabili. Valutazioni incoerenti e poco frequenti portano a un lavoro inutile, a una strategia di manutenzione degli stampi non ottimizzata, a tendenze di qualità inaffidabili e a scarti o rilavorazioni non necessari.

Le cause principali sono state identificate in: dipendenza dalla percezione e dal giudizio umano; mancanza di quantificazione oggettiva; mancanza di dati dalla tendenza affidabile. In conclusione, si evince come sia necessario inserire uno strumento che permetta un controllo oggettivo sulla qualità del pezzo.

Nell'analisi dei difetti estetici, occorre riprodurre ciò che ad oggi viene realizzato con lo Stoning (analisi condotta sul filo esterno estetico del componente imbutito e esclusivamente al termine della fase di rilassamento delle tensioni di stampaggio). Il tool di stoning si caratterizza per essere una analisi di tipo geometrico, riproducendo in ambiente virtuale lo stesso tipo di analisi condotta dai rilievi sperimentali di officina, quindi, mediante lo strofinamento di una pietra (prisma calibrato di lunghezza nota, *Figura 50*) su tutta la superficie esterna dell'elemento.



Figura 50 – Schema analisi di stoning manuale

Al termine della fase di misurazione vengono messe in evidenza le zone affette da difetto estetico ovvero tutte le zone che presentano uno scostamento dimensionale rispetto alla geometria richiesta da progetto. Il tecnico dovrà saper distinguere gli scostamenti che appartengono alla geometria caratteristica del componente (nominale) dai restanti (avvallamenti, scorrimenti, grippature, ecc), che sono indice di pezzi finiti non aventi regolare forma o qualità superficiale. Al termine dell'analisi, l'output grafico realizzato (post-processing) comprende la localizzazione e la quantificazione (in millimetri) dei difetti geometrici rilevati mediante la distanza tra la quota della geometrica rilevata con la geometria nominale.

Per le diverse quote rilevate è corrispondente uno specifico demerito estetico DM (valutato come range positivo e negativo):

- Nessun difetto estetico da 0 a 0.01 mm;
- **DM10**, Difetto estetico leggermente visibile da 0.01 a 0.05 mm;
- **DM50**, Difetto estetico visibile da 0.05 a 0.127 mm;
- **DM100**, Difetto estetico fortemente visibile a partire dai 0.127 mm in poi.



Figura 51 – Scala demeriti mediante analisi di stoning

Dall'analisi svolta in simulazione è possibile evidenziare le zone soggette a possibili difetti estetici o di forma, nelle quali è opportuno aggiungere sistemi di visione (rilevazione ottica, fotografica, ecc) e/o di dimensione (distanziometri laser, sensori induttivi, capacitivi o laser).

In conclusione, risulta evidente come poter rendere oggettivi e ripetibili i controlli nell'intero ciclo di stampaggio, porterebbe a notevoli benefici: ciò sarà possibile solo grazie al continuo sviluppo tecnologico dei sistemi smart in ottica Industria 4.0, che renderanno le applicazioni in ambienti difficili come lo stampaggio sempre più vantaggiose.

Capitolo 4 – Caso Studio, Identificativo Stampo

4.1 Problemi collegati alle informazioni dello stampo

Una volta analizzate le problematiche collegate alla qualità finale del pezzo stampato e i conseguenti possibili controlli per ottimizzarne il processo, si è passati ad un'analisi incentrata sulle informazioni legate allo stampo e sul ciclo manutentivo che svolge periodicamente durante la sua vita in produzione. A tal proposito si è svolta un'analisi dettagliata delle informazioni e dei documenti che vengono utilizzati durante l'intero ciclo di progettazione e produzione di uno stampo, dall'arrivo delle matematiche iniziali, fino alla fine della sua vita utile: ciò che è subito emerso è il non ottimale controllo del processo direttamente sullo stampo, al quale è associata una gestione dei documenti prevalentemente manuale in cartaceo e, solo alcune volte, in digitale. Queste due inefficienze comportano perdite di tempo (che significa, quindi, anche costi aggiuntivi) e di informazione dovute alla mancanza di un sistema ottimale che leghi tra loro i documenti e le caratteristiche della pressa, compromettendo la tempestività di intervento in situazioni di emergenza (quali guasti inaspettati o ricerca di cause a malfunzionamenti).

Da questa analisi preliminare dell'intero sistema, si è passati ad analizzare la situazione attuale dello stabilimento e dell'area di tecnologie, prestando particolare attenzione agli elementi che contribuiscono maggiormente alle perdite.

4.1.1 Raccolta informazioni dello stampo non ottimizzata

Partendo dalla fase iniziale di studio di fattibilità dell'elemento, la quantità di documenti legati allo stampo, gestiti e modificati da Tecnologie, aumentano in continuazione, fino ad arrivare alla fase di messa in produzione. A questo punto, ovvero nel momento in cui lo stampo è ormai finito e ai file non verranno più fatte modifiche eccessive, la maggior parte della documentazione (come il metodo, la matematica dell'elemento, il Cad 3D, ecc.) viene immagazzinata e conservata su CD-ROM e/o in modo cartaceo in raccoglitori posti in scaffali (*Figura 52*) al fine di ottimizzare il più possibile lo spazio su computer.



Figura 52 – Sistemi di raccolta attuale della documentazione dello stampo

Purtroppo, avere questo tipo di immagazzinamento dei documenti significa certamente raccogliere tutte le informazioni dello stampo in una zona precisa, ma allo stesso tempo comporta sostenere: costi dei locali adibiti ad archivi e problemi connessi alla loro localizzazione; costi di archiviazione e di gestione degli archivi; tempi di ricerca lunghi (difficoltà nel reperimento del documento); rischi di errori (documenti obsoleti o non aggiornati); rischi di deperimento per cause accidentali come incendi e allagamenti.

Di contro, un documento informatico, per sua natura, può essere modificato e riprodotto infinite volte, ottenendo copie identiche all'originale e per questo motivo elimina o rende minimi i rischi correlati alla sua versione cartacea. Va sottolineato che al documento informatico va connesso il rischio di obsolescenza tecnologica - nullo nel caso cartaceo – e che quindi andrebbero predisposti controlli periodici per svolgere, quando necessario, un upgrade ai file e/o importarli in un nuovo formato/software compatibile con lo stato d'arte informatico attuale per evitare spreco di tempo nelle conversioni o mancanza di licenze. Ulteriori vantaggi apportati dall'implementazione di un sistema di gestione dei documenti informatizzato sono: miglioramento e snellimento dei processi aziendali; diminuzione dello smarrimento dei documenti e recupero veloce di informazioni; riduzione della circolazione cartacea; maggiore controllo dei costi di gestione.

In collegamento ai rischi e alle motivazioni citate, è possibile confrontare i due tipi di archiviazione su un diagramma, paragonandone i costi collegati ai volumi di documenti da immagazzinare (*Figura 53*).

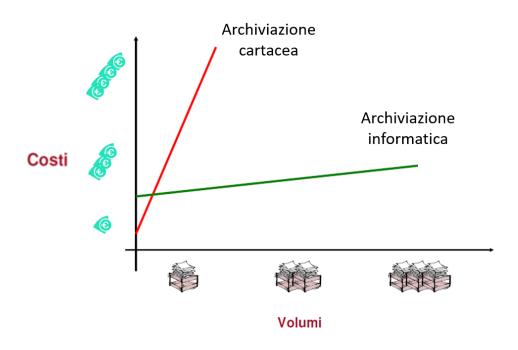


Figura 53 – Diagramma Costi vs Volumi di archiviazione cartacea e informatica

È evidente come per bassi volumi di documenti convenga utilizzare un metodo di archiviazione cartacea, in quanto a fronte di costi per l'implementazione di un sistema in grado di gestire i documenti in modo digitale non corrisponde un ritorno economico in grado di giustificarne la spesa. Per il motivo opposto, conviene optare per un metodo di archiviazione informatica nei casi di volumi di documenti elevato, in quanto si facilita la ricerca e si annullano i rischi.

4.1.2 Difficile interfaccia tra enti diversi

In collegamento alla mancanza di un efficiente metodo di ricerca veloce nell'archiviazione cartacea, vi è una difficile interfaccia tra operatori appartenenti a enti diversi come manutenzione, produzione e progettazione. Il motivo di questa difficoltà è lo stesso per cui vi sono tempi lunghi per il reperimento di documenti interni, ovvero la mancanza di una localizzazione precisa e immediatamente consultabile, situazione che viene aggravata dal fatto di dover consultare documenti esterni al proprio ente, dove le informazioni sono ancora più imprecise. Tutto ciò provoca situazioni con soluzioni non ottimali. È il caso della manutenzione a guasto, dove un fermo macchina improvviso dovuto a una rottura di uno o più componenti comporta tempi lunghi per il

ripristino dovuti alla difficoltà nel reperimento dei documenti per l'interfaccia tra produzione e manutenzione.

Un altro esempio è quello collegato al documento di collaudo dello stampo (*Figura 54*). Durante la fase di progettazione dello stampo viene redatto un documento *teorico* nel quale vengono inserite tutte le caratteristiche di funzionamento dello stampo in questione: altezza e movimento slitta, angoli di movimentazione delle cam e delle slitte, spinta e velocità della pressa, cadenza di lavorazione ecc.

I valori di queste caratteristiche sono appunto teorici in quanto si basano su interpretazione dei progettisti dal modello Cad 3D dello stampo su software di movimentazione dello stampo nella pressa. Nella successiva fase di messa in produzione, viene svolta una simulazione sul campo dove definire in modo *effettivo* questi valori, che verranno poi inseriti nella pressa in produzione: nella maggior parte dei casi, i valori sono differenti rispetto a quelli teorici.

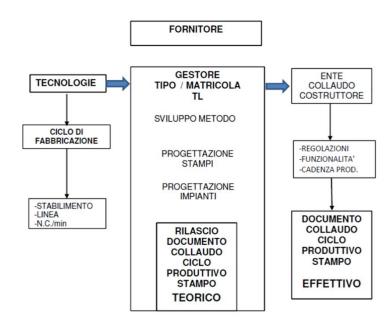


Figura 54 – Schema riassuntivo per stesura documento di collaudo

Non avendo un sistema di gestione dei documenti informatico, alle modifiche svolte sul documento di collaudo (spesso consultato nella sua versione cartacea) vi è una mancanza di retroazioni delle informazioni che sarebbero in grado di facilitare la soluzione di problemi simili futuri, provocando tempi lunghi e possibili rotture inaspettate (un errore nei gradi di movimentazione delle slitte potrebbe provocare rotture dei punzoni e/o delle cam).

4.1.3 Gestione flusso manutentivo dello stampo

Un ulteriore problema collegato alla mancanza di un sistema informatizzato è l'insieme di tutti i documenti e della loro gestione che vengono redatti durante il controllo della lavorazione dello stampo per i suoi interventi manutentivi (*Figura 55*).

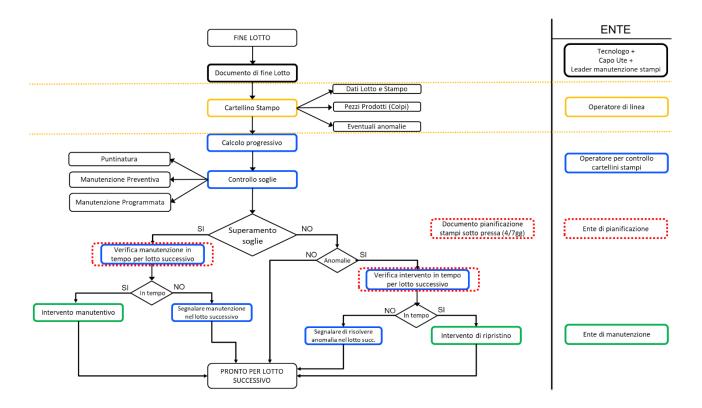


Figura 55 – Schema logico della gestione attuale del flusso manutentivo

Ogni stampo lavora in lotti dell'ordine del migliaio di colpi ciascuno e, a seconda della tipologia di materiale e di componente stampato, dovrà periodicamente essere sottoposto a lavori manutentivi di ispezione, di puntinatura, oltre che di manutenzione preventiva e programmata. Al fine di monitorare i colpi fatti durante il lotto e quelli totali svolti dallo stampo (oltre che per prendere nota di eventuali anomalie riscontrate), un operatore di linea delle presse compila manualmente il Cartellino Stampo (Figura 56), ovvero un documento cartaceo nel quale vengono registrati dati del lotto, dello stampo e i relativi colpi eseguiti.



Figura 56 – Esempio di un Cartellino Stampo

Successivamente, un secondo operatore raccoglie il cartellino stampo dalla linea, ne calcola i colpi totali e ne controlla le soglie per le manutenzioni, accertandosi di non aver superato il numero di colpi ai quali lo stampo deve essere sottoposto a interventi manutentivi. In caso di necessità di intervento, consulta il documento di pianificazione degli stampi sotto pressa settimanale e verifica se vi è l'arco temporale necessario per svolgere tutte le operazioni prima del ritorno in produzione. Come si evince da una semplice descrizione dell'intero flusso manutentivo, vi è la presenza di diversi documenti cartacei compilati manualmente che porta – oltre ai già citati problemi intrinsechi a questi tipi di archiviazione dati - ad un notevole spreco di tempo con rischi elevati di errori umani.

4.2 Metodologia seguita

La descrizione dei problemi riscontrati per lo stampo fa parte del primo step della Metodologia seguita per la ricerca di una soluzione (*Figura 57*), ovvero risulta essere l'analisi della situazione attuale che serve a marcare la differenza esistente fra la realtà e l'obiettivo. Questa metodologia risulta essere applicazione diretta della metodologia del WCT.

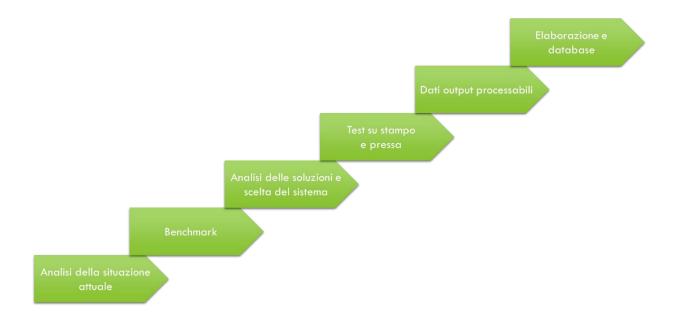


Figura 57 – Riassunto degli step seguiti per ricerca soluzione

Una volta definito il gap tra il target e situazione attuale, si è passati a una fase di benchmarking per ricercare le soluzioni offerte dal mercato. La prima necessità risulta essere quella di introdurre sullo stampo e/o sulla pressa dei sistemi informatici smart in grado di comunicare tra loro attraverso la rete Internet, abilitando e facilitando così anche le interazioni uomo-macchina.

Per ovviare alla mancanza di informazioni direttamente sullo stampo, risulta necessario inserire delle memorie in grado di contenere dati o di rimandare a link esterni dove consultarli. Da una prima approssimazione si potrebbe pensare di inserire dei classici codici a barre a bordo dello stampo, ma da un'attenta valutazione risulta evidente come quest'ultimi presentino problemi collegati a rischi di usura della scritta e soprattutto i dati presenti su di essi non possono essere in alcun modo modificati: in ottica ambiente smart e Industria 4.0, questi due fattori non sono attuabili, per questo motivo questa soluzione è stata scartata.

La soluzione andrà quindi ricercata in memorie digitali e sistemi di comunicazione Wireless, in grado di poter svolgere simultaneamente funzioni di lettura e scrittura: la scelta cade, dunque, sulla tecnologia Radio Frequency IDentification (RFID).

La tecnologia RFID consente lo scambio di informazioni attraverso l'utilizzo della comunicazione tramite radiofrequenze tra un dispositivo trasmittente, indicato come trasponder o tag, e un dispositivo ricevente, detto reader.

I tag sono dispositivi dotati di una Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM) e di un microprocessore che consentono la memorizzazione, la lettura e la modifica di una quantità limitata di dati. Esistono diverse tipologie di tag che possono o meno essere dotati di una batteria interna. Quelli che non necessitano di alcun apporto energetico esterno, indicati come tag attivi, consentono la comunicazione fino a distanze di alcune decine di metri e una vita utile maggiore, ma sono caratterizzati da dimensioni elevate e risultano essere più costosi. Al contrario, i tag passivi, sono sprovvisti di alimentazione, ricavano l'energia per il funzionamento dal segnale proveniente dal lettore e presentano costi limitati, dimensioni notevolmente ridotte e un'area di applicazione molto più vasta. Allo stesso tempo, però, essi consentono la comunicazione solo tra dispositivi a distanza limitata.

Il reader, d'altra parte, è un dispositivo dotato di un'alimentazione interna e di un microcontrollore. Esso, oltre ad occuparsi della ricezione dei dati, gestisce l'aggiornamento delle informazioni presenti nei tag. La comunicazione tra tag e reader avviene tramite il fenomeno di mutuo accoppiamento, induttivo o elettromagnetico, tra le antenne presenti sui due dispositivi. Quando il reader deve connettersi ad un tag, il microcontrollore, sfruttando l'alimentazione interna, genera un campo magnetico di ampiezza variabile che si concatena con l'antenna presente sul tag producendo una corrente. Secondo questo principio, considerando che la potenza del campo magnetico è inversamente proporzionale alla distanza tra i due dispositivi, la tipica distanza di comunicazione di questa tecnologia è di qualche decina di centimetri.

Allo stesso tempo, per favorire la gestione degli interventi manutentivi, servirebbe avere un controllo diretto dei colpi svolti dallo stampo e la sua memorizzazione in tempo reale.

Avendo ora presente le necessità che il sistema dovrà avere, si sono cercati sul mercato componenti in grado di poter garantire le funzionalità descritte, analizzando le possibili soluzioni e scegliendo quella che più riesca a garantire potenziali applicazioni per lo stabilimento: questa fase risulta essere il terzo step della metodologia.

Il sistema scelto è già attuato in applicazioni simili in alcune aziende europee che lo sfruttano nello stampaggio di materie plastiche, diverso per caratteristiche rispetto allo stampaggio di lamiera. Per questo motivo dovrà essere sottoposto a test diretti sulla pressa (quarto step) per verificarne

l'idoneità e il corretto funzionamento in un ambiente per il quale non è stato direttamente progettato.

4.3 Descrizione e funzionamento dei componenti

Prima di passare alla fase di testing ed elaborazione dei suoi dati, risulta opportuno analizzare nei minimi dettagli tutti i componenti del sistema, per poter svolgere uno studio oggettivo del suo funzionamento. Esso utilizza la tecnologia RFID, quindi è dotato di un *tag*, che funge da memoria digitale dello stampo, e da un *reader* in grado di leggere e scrivere i dati sul tag.

La prima operazione da fare per il corretto funzionamento del sistema è quello di inizializzare il tag inserendo le soglie di allarme e i dati di riconoscimento dello stampo quali il suo codice, il nome della pressa dove viene stampato, luogo di lavorazione, caratteristiche di funzionamento e altri. Gli altri componenti appartenenti al sistema sono: l'unità centrale, che consiste nel modulo principale che gestisce tutti i segnali degli altri componenti e ne permette la corretta interfaccia, oltre che garantirne l'alimentazione; un trigger, ovvero un sensore induttivo in grado di contare i colpi dello stampo tramite la movimentazione della pressa; una lampada in grado di comportarsi come un segnale luminoso per indicare lo stato attuale dello stampo in tempo reale.

L'elemento caratteristico del sistema è quello di utilizzare il protocollo di comunicazione *IO-Link*. Quest'ultimo è un protocollo di comunicazione seriale basato su standard aperti che consente lo scambio bidirezionale dei dati tra i sensori e i tutti dispositivi che supportano IO-Link, collegati anche a un master [15], che nel nostro caso corrisponde all'unità centrale. Il master IO-Link trasmette i dati su reti rendendoli accessibili per utilizzarli immediatamente oppure per eseguire analisi sul lungo termine, tramite un controller, nel nostro caso ad esempio il PLC della pressa o un'interfaccia HMI a bordo stampo. Occorre sottolineare che IO-Link è un protocollo di comunicazione punto-punto tra un sistema IO compatibile e un dispositivo sul campo. Poiché IO-Link è uno standard aperto, i dispositivi possono essere integrati praticamente in qualsiasi sistema di automazione. Per sue caratteristiche intrinseche, esso offre numerosi vantaggi, tra cui il cablaggio standardizzato con minore complessità di collegamento, la maggiore disponibilità dei dati, la configurazione e il monitoraggio remoti, la sostituzione semplice dei dispositivi e non ultimo, le funzionalità di diagnostica avanzate [15], con conseguenze sui costi ed efficienza del processo. La scelta recente di adottare in ambito industriale sempre più sistemi con protocollo IO-Link è dovuta specialmente alla grande flessibilità che ne garantisce.

Nell'identificativo stampo, il principio di funzionamento si basa tutto sul cervello dell'intero sistema, ovvero l'unità centrale (il master IO-Link), che necessita di un'alimentazione a 24V in grado di alimentare anche gli altri componenti. Essa riceve in input i segnali provenienti dal trigger (che consistono in segnali 0-1 in successione, ogni 1 corrisponde a un colpo registrato dallo stampo e 0 situazione di riposo) e li invia in tempo reale al reader che li scrive sul tag. Sul tag vengono, quindi, registrati i colpi dello stampo in lavorazione e si confrontano in tempo reale quest'ultimi con le soglie di allarme inizializzate nella memoria. La lampada funge da "semaforo", segnalando visivamente lo stato attuale del sistema tramite i segnali provenienti dal tag. Al tempo stesso, l'unità centrale deve essere collegata al PC e/o alla rete Ethernet, inviando così i dati in tempo reale a un software di gestione, che permette di visualizzare i dati del tag in qualsiasi momento anche da remoto. Ovviamente, tutti i componenti del sistema sono degli IO-Link, per questo motivo è possibile scegliere il componente con caratteristiche ottimali di ognuno a seconda delle necessità specifiche dello stabilimento (ad esempio, nel test svolto, il trigger base del sistema è stato sostituito con uno più piccolo per facilitarne il montaggio su stampo senza essere troppo invasivo).

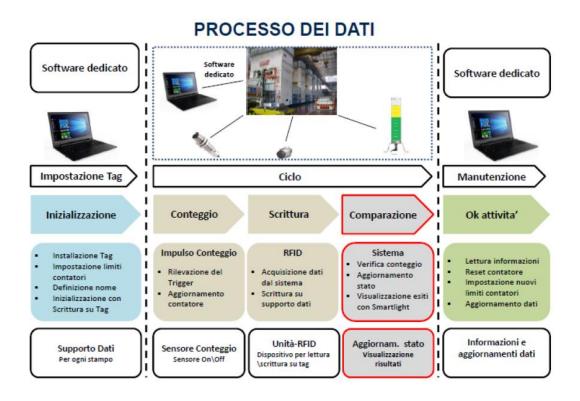


Figura 58 – Schema logico di funzionamento del sistema

Dallo schema di funzionamento e dal cablaggio tra i vari componenti (*Figura 59*) è possibile identificare i componenti che andranno installati sulla pressa e quali, invece, sullo stampo: trigger e tag vanno installati su quest'ultimo, proprio per la loro funzione nell'intero sistema; l'unità centrale e la lampada verranno montati sulla pressa, in posizioni idonee per garantire rischi nulli di ingombri con le slitte in movimento e al tempo stesso facile identificazione; il reader, sarà un elemento collegato tramite cavo IO-link all'unità centrale e tramite aggancio meccanico al tag (da notare come non è necessario contatto fisico, in quanto il collegamento si basa su radiofrequenze).

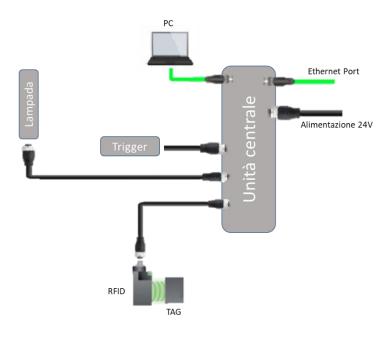


Figura 59 – Schema del sistema con componenti e cablaggi

Ulteriore caratteristica fornita dal sistema è quella di poter leggere e scrivere i dati sul tag tramite Near Field Communication (NFC), ovvero tramite un insieme di tecnologie di connettività wireless a corto raggio ideali per la trasmissione di piccole quantità di informazioni con tempi di configurazione e consumo di energia minimi. La tecnologia NFC consente interazioni semplici e sicure bidirezionali (punto-punto) tra dispositivi elettronici, portandoli a una distanza tipicamente di pochi millimetri, basata su un accoppiamento induttivo tra due antenne a loop. Sfruttando questa tecnologia è possibile interrogare il tag tramite telefono, tablet e/o palmari configurabili per esigenze specifiche in qualsiasi momento, anche quando lo stampo non è sotto pressa, ma, per esempio, in magazzino.

La possibilità di avere un collegamento al PC (e quindi anche alla rete) o direttamente al cavo Ethernet, permette di trasferire in tempo reale i dati presenti sul tag e i colpi contati dal trigger direttamente su un portale online base in grado di elaborarli e gestirli. Il portale online fa parte del sistema ed è incorporato nel firmware dell'unità centrale, corrispondente ad un semplice indirizzo http online. All'interno del portale è possibile inizializzare l'intero sistema (ovvero i cablaggi IO-Link con l'unità centrale, il nome dello stampo e della pressa sul quale è montato, ecc.) e il tag, inserendo i dati delle soglie e gli eventuali colpi già effettuati dallo stampo. Avendo ogni Master IO-Link il suo indirizzo online, sarà possibile visionare in remoto la situazione di tutte le presse in contemporanea, monitorando al tempo stesso anche gli eventuali stampi in lavorazione.

4.4 Test del sistema su pressa

Una volta analizzato il sistema, si è passati alla verifica del corretto funzionamento dei componenti direttamente tramite un test su pressa (quarto step della metodologia seguita) per verificarne la resistenza meccanica. Prima di montare il sistema su pressa e stampo, si è svolta una prova a banco in modo tale da poter inizializzare i componenti e il tag.

Per la scelta dello stampo sul quale montare il sistema, l'unico vincolo ricercato è stato quello di avere una produzione ad alta cadenza (sia in termini di colpi per lotto, sia per numero di lotti mensili) per verificare tutti i componenti in situazioni verosimili alle possibili applicazioni future. Questo vincolo è stato incrociato con la necessità di avere una presa a 24V per facilitare l'alimentazione dell'unità centrale senza avere la necessità di un alimentatore portatile. La scelta è ricaduta sull'operazione di imbutitura (Op20) dell'ossatura cofano del Renegade.

Il passo successivo è stato stabilire il corretto posizionamento di tutti i componenti sia sullo stampo (*Figura 60*) che sulla pressa. Per registrare i colpi fatti, si è inserito il finecorsa induttivo (trigger) al posto di uno dei due sensori usati per la presenza elemento, sfruttando il circuito elettrico già predisposto e, quindi, evitare lavori aggiuntivi sullo stampo. Con questa configurazione, il trigger commuta il suo stato da 0 a 1 per tutto il tempo di permanenza del pezzo sullo stampo (da quando viene posizionato dal robot sotto pressa, fino a quando viene tolto) e in questo modo viene persa la possibilità di riuscire a monitorare simultaneamente anche la cadenza produttiva del lotto. Per questo motivo, in future applicazioni, il posizionamento del trigger dovrà essere scelto in modo tale da garantirne la commutazione per l'effettivo tempo di stampaggio del pezzo.

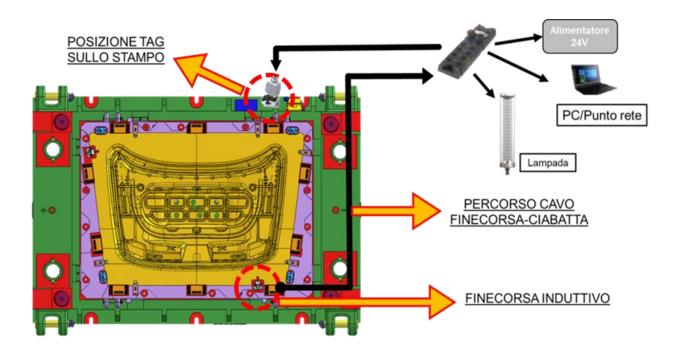


Figura 60 – Posizionamento dei componenti sullo stampo di imbutitura dell'ossatura cofano Renegade

La prova si è svolta nell'arco di due turni di lavorazione in modo tale da poter controllare il corretto raggiungimento di tutte le soglie di allarme e simulando un ipotetico cambio stampo (e quindi tag) lasciando l'unità centrale, la lampada e i relativi cavi in pressa (*Figura 61*)

Il motivo principale del test è stato verificare il corretto funzionamento di tutti i componenti del sistema durante la lavorazione sotto pressa, analizzando la tenuta degli stessi sotto notevoli stress meccanici e vibrazionali. A tal proposito, durante i due lotti produttivi, si sono verificati periodicamente i corrispettivi conteggi colpi svolti dal software di gestione manutentivo attuale (che conta i colpi tramite inserimento manuale a fondo linea, quindi collegato all'intera linea di presse) e quello del sistema (collegato, invece, al singolo stampo) riscontrando scostamenti non rilevanti: per questo motivo si può dire che per le finalità del test esso ha dato esito positivo e si può passare alla fase successiva.



Figura 61 – Posizionamento dei componenti sullo stampo e sulla pressa

4.5 Vantaggi e svantaggi del sistema

Seguendo un ragionamento basato sulla metodologia World Class Technology, una volta analizzate le soluzioni dei problemi riscontrati e aver scelto quella considerata migliore per testarne i componenti, risulta necessario svolgere un'analisi critica di ogni aspetto del sistema per portare avanti il processo di continuo miglioramento dell'azienda.

Risultano evidenti i benefici apportati: le informazioni di identificazione dello stampo e della pressa sono presenti sia sul portale online sia direttamente nel tag sullo stampo (caratteristica inesistente nelle semi-macchine attuali), garantendo veloce reperimento di dati anche quando lo stampo viaggia tra diversi enti o stabilimenti, ottenendo così un'estensione orizzontale tra gli stabilimenti e una comunicazione ottimale tra produzione, progettazione e manutenzione; l'unità centrale è in grado di gestire fino a un massimo di sei tag contemporaneamente; ogni pressa ha bisogno di essere dotata dei suoi corrispettivi componenti solo la prima volta che verrà dotata del sistema e potrà lavorare liberamente con tutti i tag e, quindi, con tutti gli stampi dotati del sistema che andranno in lavorazione sotto quella pressa, rendendo il sistema flessibile, con investimento iniziale recuperabile in minor tempo; il ciclo di gestione della manutenzione risulta completamente privo di carta, in quanto non è più necessario stilare il cartellino stampo (con passaggio di documenti cartacei) per monitorare le soglie, dato che questo controllo viene fatto dal sistema in automatico e in tempo reale, comportando un risparmio di ore di lavoro (Figura 62); l'uso del protocollo di comunicazione IO-Link rende il sistema molto flessibile, potendo utilizzare trigger diversi da quelli base (come fatto nel nostro test) o componenti con caratteristiche diverse a

seconda delle esigenze specifiche; vi è un controllo più puntuale dei colpi eseguiti garantendo un ciclo manutentivo più preciso e, di conseguenza, un'ottimizzazione del processo produttivo con riduzione dei fermi macchina e migliore operatività di linea per una più rapida manutenzione straordinaria; attraverso il controllo in tempo reale dello stato dello stampo, è possibile stimare con largo anticipo le necessità di intervento, avendo così una ottimizzazione dei tempi dei cicli manutentivi; la possibilità di inviare la reportistica direttamente online permetterà, in futuro, l'interfaccia di questi dati digitali con sistemi di gestione della manutenzione di livello superiore.

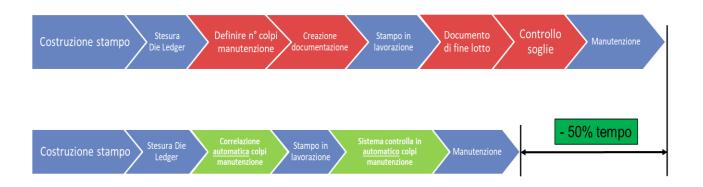


Figura 62 – Confronto del ciclo di gestione manutenzione tra attuale e con il sistema

A questi vantaggi si contrappongono svantaggi e limiti caratteristici, dei quali la maggior parte dipendenti dalla ancora lontana appartenenza degli ambienti industriali attuali al concetto di sistemi smart in ottica Industria 4.0.

Gli stampi attuali sono dotati di scarsi sistemi di trasmissione dati digitali, perciò risulta impossibile, allo stato d'arte corrente, inserire direttamente componenti con tecnologia troppo avanzata, poiché per avere un reale e proficuo miglioramento, quest'ultimo deve essere costante e la conseguente spesa idonea alle caratteristiche del proprio macchinario: è inutile dotare quest'ultimo di sistemi moderni se poi non è in grado di sfruttarli al massimo della loro potenzialità. Tra gli svantaggi e i limiti del sistema studiato troviamo: parte dei collegamenti dell'unità centrale sono attualmente solo via cavo con protocollo IO-Link, ciò provoca rischi di intralcio per gli operatori e di usura nel tempo per il cavo stesso, oltre che aumentare i tempi di messa in servizio e smontaggio dello stampo; l'unità centrale di questo sistema può attualmente gestire solo un finecorsa induttivo (trigger) per volta e nessun altro tipo di sensore, limitando i controlli possibili e la loro interfaccia; il numero massimo di soglie di allarme inseribili risulta essere un limite, in quanto in uno stampo coesistono molti componenti diversi tra loro, ognuno con i suoi cicli manutentivi (e colpi correlati diversi); il portale online base fornito direttamente dal sistema non

è previsto di un database in grado di gestire a livello più alto i dati inviati, quindi, vi è una mancanza di un software customizzato per le necessità manutentive dello stabilimento.

4.6 Analisi costi e benefici

Una volta sottolineati i benefici e i limiti del sistema, è opportuno svolgere un'analisi incentrata anche sui costi. L'analisi costi-benefici rappresenta una disciplina organica per la valutazione dei progetti e ha lo scopo di verificare la sostenibilità finanziaria dell'investimento. L'obiettivo è verificare se i benefici, analizzati precedentemente e derivanti dall'implementazione del sistema, superino i costi necessari alla sua realizzazione. La componente di beneficio è più ampia di quella di ricavo: mentre quest'ultima identifica un'entrata puramente monetaria, il concetto di beneficio viene riferito a qualsiasi risorsa prodotta o risparmiata per effetto della realizzazione del progetto. La componente di costo identifica, invece, il valore delle risorse consumate. La metodologia è pertanto orientata alla quantificazione in termini monetari delle grandezze di costo e beneficio. Uno degli elementi principale che determina la fattibilità di un progetto è la sua sostenibilità da un punto di vista finanziario: i flussi di cassa in entrata (nel nostro caso sono flussi indiretti, poiché collegati a un risparmio di spesa nel flusso manutentivo) devono riuscire a coprire interamente tutti i costi di investimento nel più breve tempo possibili. In caso contrario il progetto può essere tecnicamente fattibile, ma finanziariamente non sostenibile.

Innanzitutto, si è valutato l'investimento iniziale da dover fare per dotare i macchinari di tutti i componenti necessari al corretto funzionamento, discriminando ciò che va montato su pressa e ciò che va sullo stampo. L'importanza di questa divisione consiste nel fatto che l'investimento su pressa risulta essere un costo fisso iniziale da spendere solo per il primo modello stampato con questo tipo di sistema (per i successivi modelli non sarà necessario investire ulteriormente sulla pressa, a patto che venga stampato sulle stesse presse del modello pilota), mentre, si dovrà solo investire per dotare gli stampi dei corrispettivi componenti. È stato, quindi, valutato l'investimento iniziale per adibire il primo modello con questo sistema e poi quello per modelli successivi. Per i calcoli, si è preso in considerazione un modello pilota avente 26 matricole (143 Stampi) stampate su 10 linee diverse (60 Presse). Inoltre, è stato già considerata anche una stima di investimento per un software in grado di gestire ed elaborare i dati del sistema, per avere un calcolo più preciso per il rientro totale.

Al fine di evidenziare le differenze per valutarne i costi, ci si è soffermati sulla gestione attuale del ciclo manutentivo, individuando le operazioni che vengono svolte automaticamente dal sistema in contrapposizione a quelle attualmente svolte manualmente.

Sfruttando lo schema logico della gestione attuale già analizzato, è possibili seguire lo stesso ragionamento e diagrammare quello possibile con il sistema digitale (*Figura 63*), evidenziando le operazioni manuali eliminate.

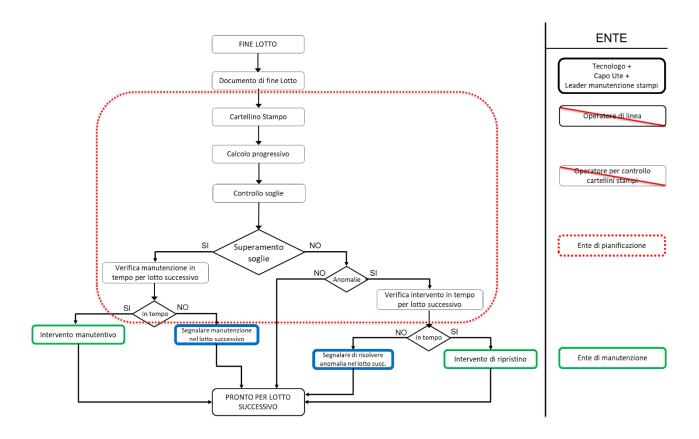


Figura 63 – Schema logico della gestione del flusso manutentivo con sistema, evidenziando operazioni eliminate

Paragonando il flusso attuale con quello gestito dal sistema (*Figura 64*), risulta evidente come la stesura del cartellino stampo risulti inutile, così come il calcolo e il controllo delle soglie, ottenendo un risparmio di ore per queste tre operazioni svolte attualmente manualmente. A fronte di questo risparmio di ore, c'è da sottolineare l'aumento del tempo per la stesura del documento di fine lotto e di quello di pianificazione stampi, in quanto sarà necessario interfacciare direttamente il sistema con questi due documenti trasformati da cartaceo in digitale.

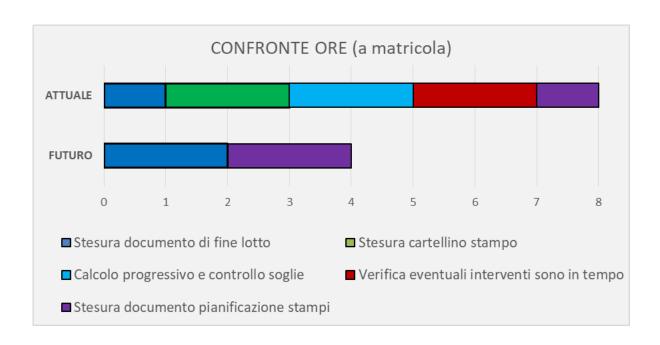


Figura 64 – Diagramma confronto tempo per gestione documenti flusso manutentivo

Per confrontare i costi di gestione tra loro, si è quindi partiti dalle ore calcolate, moltiplicandole per il costo orario di un operatore. Inoltre, poiché il confronto di ore è stato fatto sul sistema di gestione della manutenzione che avviene per ogni lotto di ogni matricola, partendo dall'investimento totale calcolato precedentemente, si è calcolato il numero di lotti per il raggiungimento del Break Even Point (*Figura 65*).

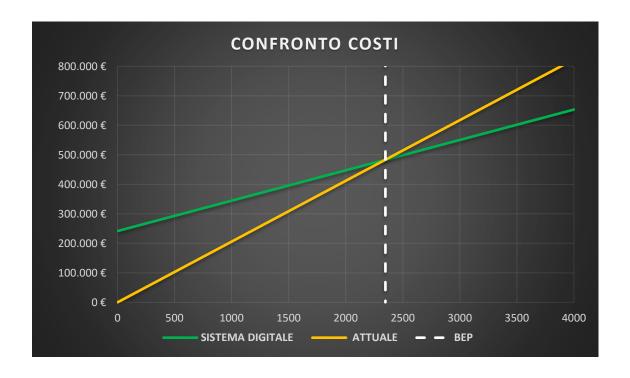


Figura 65 – Diagramma confronto costi per valutare Break Even Point

Nel modello preso in considerazione, il numero di matricole era di 26, quindi va diviso il numero calcolato per questo numero. Incrociando il numero di lotti dove si raggiunge il BEP con una stima dei lotti produttivi svolti al mese (dividendo il numero di pezzi prodotti all'anno con quelli prodotti a lotto), è possibile calcolare il tempo di rientro di investimento (*Figura 66*).

Allo stesso tempo, è possibile valutare il guadagno totale stimando una vita utile produttiva di 6 anni, dividendo i modelli successivi tra quelli a numeri di lotti annuali bassi (quindi alti numeri di pezzi stampati a lotto) da quelli a numero di lotti annuali alti, essendo il guadagno proporzionale al numero di lotti svolto.

	TEMPO RIENTRO (anni)	GUADAGNO (in una vita utile - 6 anni)
PRIMO MODELLO	2,17	427.000 €
SUCCESSIVO (n° lotti basso)	0,36	377.200 €
SUCCESSIVO (n° lotti alto)	0,19	724.960 €

Figura 66 – Tempo di rientro dell'investimento per modello pilota e futuri con calcolo guadagno

4.7 Implementazione del sistema

Una volta analizzata nei minimi particolari la soluzione al problema dell'identificazione stampo e della sua correlata gestione manutentiva, evidenziandone benefici e svantaggi, si può svolgere un'analisi in ottica futura riguardante le possibili implementazioni e ottimizzazioni del sistema preso in esame per eliminare o almeno ridurre i limiti riscontrati.

Una prima ottimizzazione potrà essere quella di dividere le informazioni di identificazione stampo e di gestione manutenzione in due tag diversi per un duplice motivo: in primis, essendo il tag una memoria digitale, esso è soggetto nel tempo a usura dovuta ai continui cicli di lettura e scrittura dati, con rischio di perdita di parti di informazioni nel tempo; in secondo luogo, esso può contenere un numero limitato di dati, aggiungendone uno è possibile inserire più informazioni e senza far lavorare la memoria nella sua zona di massimo riempimento (con rischio di lentezza di trasferimento dati). Per questo motivo potrebbe esserci la divisione in un tag per i dati statici e un altro per i dati manutentivi.

Per quanto riguarda il primo, esso dovrebbe:

- Registrare le informazioni statiche (ovvero che non variano nel tempo) di identificazione dello stampo e i contenuti del suo cartellino operazione, allestimento linea e ciclo manutentivo;
- Poter registrare i dati durante la costruzione dello stampo con la possibilità di modifiche e/o ottimizzazioni durante le fasi di messa a punto e avviamento;
- Consentire la lettura e la modifica dei dati da parte degli utenti autorizzati nelle aree di costruzione, manutenzione e produzione;
- Conservare le informazioni utili nel caso lo stampo sia allocato in altri stabilimenti con altri input di ciclo (attualmente è tutto cartaceo e/o su disco);
- Possibilità di rilevazione immediata dell'effettiva correlazione della pressa con il rispettivo stampo (potendo controllare in tempo reale corse e gradi di avviamento slitte, pressione, velocità, n° colpi, altezza colonne ecc), riducendo drasticamente i tempi di avviamento.

Il tag dei dati manutentivi dovrebbe:

- Registrare le informazioni degli interventi manutentivi dello stampo;
- Avere una cronologia degli interventi ordinari e/o straordinari svolti nello stampo (attualmente cartacei e/o assenti);
- Rendere possibile la descrizione dettagliata degli interventi (sia manutentivi che di ripristino eseguiti in situazioni ordinarie e/o straordinarie, attualmente cartacei).

Inoltre, per quanto riguarda il secondo tag presentato, potrebbe essere inserita la funzionalità di poter essere indirizzati a dei link esterni al software per consultare documenti o file utili all'attività manutentiva (come il die ledger dello stampo, il suo metodo o file generali di progettazione) in modo tale da non caricare eccessivamente le memorie, ma rendere possibile la consultazione di qualsivoglia informazione ovunque sia lo stampo. Andrebbe quindi creato un database in grado di poter raccogliere e gestire l'intero flusso dei dati sia in input e che in output per rendere efficace e ottimizzare al meglio questa divisione.

A fronte dei benefici apportati da questa scelta ci sarebbero comunque dei costi aggiuntivi per l'attrezzaggio del doppio di tag sullo stampo, oltre che una spesa aggiuntiva per customizzazione del software. Per quanto riguarda il primo problema, esso può essere ovviato dalla già presenza di due tag (attualmente vuoti e non utilizzati ancora) all'interno della centralina elettrica presente in tutti i nuovi stampi già sotto normativa FCA, in quel caso andrebbe solo predisposto il corretto posizionamento per interfaccia tra antenna e tag dei dati manutentivi.

Continuando l'analisi sulle possibili ottimizzazioni future e ricollegandosi direttamente ai componenti già presenti nell'attuale sistema, sarebbe interessante inserire la possibilità di avere visione dello stato effettivo dello stampo anche quando quest'ultimo non è in lavorazione sotto pressa. Attualmente la lampada presenta lo stato delle soglie dello stampo solo quando l'antenna è collegata al tag e quindi solo quando lo stampo è sotto pressa. La scelta più facile attualmente sarebbe quella di introdurre una postazione in magazzino simil-pressa per simulare lo stesso ambiente di quando lo stampo è in lavorazione, ma in futuro si potrebbe inserire un led in grado di indicare su richiesta lo stato manutentivo dello stampo anche fuori pressa o, ancor meglio, avere un sistema a realtà aumentata per evitare di inserire ulteriore componentistica (con conseguenza di ingombri) allo stampo.

Un ulteriore implementazione da sviluppare potrebbe essere quella della comunicazione tra i vari componenti del sistema che attualmente è in maggior parte garantita da cavi. In futuro si dovrebbe cercare di utilizzare tecnologie wireless in grado di ovviare ai limiti imposti dall'utilizzo di cavi. Attualmente quest'ultima richiesta risulta in fase di studio, ma ancora non fattibile a causa delle interferenze o dell'impossibilità di trasferire il segnale per colpa delle superfici schermanti presenti in ambiente industriale (si ricorda, ad esempio, che lo stampo è fatto di ghisa).

Oltre il fatto di avere un numero limitato di soglie inseribili (problema che può essere risolto con l'implementazione del software), il più grande limite del sistema attuale rimane quello per cui l'unità centrale riesce a gestire solo un trigger alla volta, potendo così solo garantire il controllo dei colpi svolti dallo stampo. Per poter garantire la possibilità di riuscire a gestire con sensori più controlli sul processo in simultanea è evidente come vengano richieste modifiche non banali e, sempre se fattibili, esse andrebbero a stravolgere tutto il sistema: per questo motivo a differenza delle altre, questa implementazione consiste in una creazione di un sistema evoluto che usi quello attuale come fondamenta di partenza.

C'è da precisare che i controlli svolti con questi sensori sono diversi da quelli analizzati nel capitolo precedente, in quanto questi non servono a verificare direttamente la qualità del pezzo finito, ma si concentrano sui parametri di processo di lavorazione dello stampo, quali pressione dei cilindri d'azoto, temperatura, forza applicata sulle superfici e velocità di discesa.

A questo punto si aprirebbe la strada anche alle possibili retroazioni da far svolgere agli attuatori in caso di funzionamento in condizioni non ottimali: è l'esempio dei pressostati digitali nei cilindri ad azoto, dove ad una registrazione di variazione di distribuzione di pressione può essere collegato il controllo automatico dell'altezza dei compensatori rettangolari in modo da bilanciare il sistema e quindi poter garantire sempre la lavorazione in condizioni ottimali.

4.8 Conseguenze sulla manutenzione e benefici apportati

La possibilità di avere i dati presenti su due tag diversi con l'inserimento di link a documenti esterni permette di poter collegare direttamente lo stampo con il suo Die Ledger elettronico, potendo così collegare in automatico ogni componente con il suo ciclo manutentivo senza dover inizializzare il sistema, risparmiando così in questa fase ulteriore tempo aggiuntivo rispetto a quello già calcolato precedentemente. In secondo luogo, la possibilità di avere in tempo reale il monitoraggio e il controllo dei parametri di processo del sistema (oltre il già presente conteggio colpi) permette di

aprire la strada alla *manutenzione predittiva* (*Figura 67*), ovvero la manutenzione su condizione citata nei capitoli precedenti alla quale si punta in ottica Industria 4.0.



Figura 67 – Schema gestione flusso manutentivo con implementazione del sistema

Potendo controllare in tempo reale le condizioni di lavorazione del processo e, quindi, lo "stato di salute" dei componenti dello stampo, è possibile svolgere una manutenzione non programmata ad un certo numero di colpi fissato, ma variabile a seconda delle reali condizioni di funzionamento. Inizialmente, i tempi necessari per l'inizio del ciclo manutentivo potrebbero anche essere inferiori a quelli programmati, specialmente in situazione dove i componenti inseriti provengono da fornitori esterni che garantiscono condizioni di lavoro diverse da quelle effettive poi nello stampo. A regime (ovvero nel momento in cui si saranno definiti i componenti idonei e ottimali per la lavorazione), la manutenzione tenderà ad essere posticipata, garantendo un numero di colpi maggiore rispetto a quello programmato con la manutenzione periodica e, di conseguenza, un risparmio economico notevole nel tempo.

Ulteriori benefici apportati dal sistema implementato sono: ottimizzazione del processo di produzione, con riduzione dei fermi macchina; possibilità di avere un patrimonio di informazioni per l'implementazione di un'efficace manutenzione; interfaccia immediata tra dati digitali e sistema di gestione manutenzione online con la stesura dei die ledger elettronico dal die design; processo produttivo, parametri di processo e ciclo manutentivo completamente paperless; verifica immediata di congruenza tra materiale previsto in distinta base dell'ordine (dal die ledger) ed il materiale disponibile a monte linea; miglior qualità finale del pezzo e di lavorazione a causa dell'utilizzo dei componenti sempre in condizioni ottimali; individuazione dei parametri di lavorazione ottimali derivanti da produzioni precedenti identificati come best, con conseguenza miglior conoscenza del proprio processo produttivo; meno ore di lavoro e meno errori umani avendo collegamento digitale diretto tra tutti i dati; miglioramento operatività di linea per una più rapida manutenzione straordinaria; vi è inoltre la possibilità di localizzare lo stampo anche quando non è sotto pressa, inserendo appositi sensori di rilevazione dello spostamento attraverso ponti presenti in varie zone dello stabilimento (prevalentemente uscite e ingressi).

CONCLUSIONI

Al fine di ottimizzare il processo di stampaggio della lamiera, è stato svolta un'analisi strutturata seguendo la metodologia World Class Technology per individuare i parametri di processo da controllare per poter garantire qualità finale del pezzo e gestione dello stampo ottimale.

A fine trattazione risulta evidente come per adottare ideali dell'Industria 4.0 (soprattutto per una manutenzione predittiva) sia necessario l'utilizzo di sistemi Smart in grado di poter comunicare autonomamente tra loro. Allo stesso tempo, è necessario svolgere una pre-analisi del proprio processo produttivo per investire in modo adeguato sulla componentistica innovativa da inserire, prestando molta attenzione al concetto fondamentale di avere un numero di dati non eccessivo, in quanto all'acquisizione di informazioni, corrisponde una loro elaborazione, con costi proporzionali alla quantità.

Per quanto riguarda il controllo della qualità finale del pezzo, si sono trovati 11 controlli prioritari con annessi tipologie di sensori associati.

Mentre dall'analisi del caso studio di identificazione stampo, avendo analizzato i vantaggi e gli svantaggi del sistema, è inoltre evidente come, a fronte di un investimento iniziale, il rientro economico e i benefici ne garantiscono la fattibilità.

Sintetizzando i risultati ottenuti, si avrebbe un ritorno economico dopo circa 2 anni per il primo modello, mentre alcuni mesi per modelli successivi, con un guadagno economico variabile tra i 400k€ e 700k€ a vita utile di ogni modello.

Al tempo stesso, però, deve essere chiaro che il sistema può essere ottimizzato e customizzato per esigenze proprie di stabilimento, garantendone prestazioni massime in ambito stampaggio di lamiera, con conseguenti maggiori benefici, anche se con costi aggiuntivi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Legge 17 Maggio 2006, Direttiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo, Articolo 2, Lettera g.
- [2] Bordignon S., Evacuatore di sfridi ad aria e scivoli.
- [3] Suzzani R., Manuale di lavorazione della lamiera, Tecniche nuove, 2004.
- [4] [web] FCA Stabilimento Avv. Giovanni Agnelli, Grugliasco, https://www.fcagroup.com/plants/it-IT/ agap/the_plant/Pages/default.aspx.
- [5] Appunti università Bergamo.
- [6] Sutasn T. and Surasit R., *Investigation of spring-go phenomenon using finite element method*, Materials and Design 29, p.1526-1532, 2008.
- [7] [web] Sheet Metal Bending, http://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html.
- [8] [web] Da dove iniziare per costruire una smart factory, https://www.bureauveritas.it/homenews/did-you-know-that/industria-40-e-il-presente-da-dove-iniziare-per-costruire-una-smart-factory
- [9] Magone A., Mazzali T., *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*, goWare & Guerini e Associati, 2016
- [10] Ministero dello sviluppo economico. Piano nazionale Industria 4.0. Investimenti, produttività e innovazione. Roma, 2017
- [11] [web] Riduzione dei costi e aumento dell'efficienza con il condition monitoring in ambito industrial, https://digitalplant.it/blog/it/articolo/31/riduzione-dei-costi-e-aumento
- [12] Martin A., CBM, la manutenzione che predice il futuro. *Automazione e Strumentazione, 8,* 44-47. Ottobre 2012
- [13] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, N. Rosenberg, (2014), How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective, Int. J. Sci. Eng. Technol., vol. 8, no. 1, pp. 37–44
- [14] Barbato E., Creare l'allineamento tra i processi e le tecnologie. Este, cultura d'impresa. Fabbrica Futuro, 2019. Torino.
- [15] [web] IO-Link: Cos'è e quali sono i cinque principali vantaggi, https://www.bannerengineering. com/it/it/company/expert-insights/io-link.html#