

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

Applicazione di strategie di manutenzione preventiva al modello produttivo di Philip Morris Bologna

Relatori:

Prof. Alessandro Salmi

Prof.ssa Laura Maria Vergani

Dott. Francesco Tozzi

Ing. Alex Claudio

Candidato:

Federico Ribatti

Dicembre 2018

“Siamo come nani sulle spalle di giganti, così che possiamo vedere più cose di loro e più lontane, non certo per l'altezza del nostro corpo, ma perché siamo sollevati e portati in alto dalla statura dei giganti”

(Bernardo di Chartres, “*Metalogicon*”)

A Mamma e Papà, i miei Giganti.

“E mi è tornato in mente

Che non avevamo niente

Nelle tasche solamente

Le mie mani fredde, qualche sogno infranto e le sigarette”

(Gionata Boschetti)

Indice

Sommario.....	7
Introduzione.....	8
1. La manutenzione nei sistemi produttivi.....	9
1.1 L'ingegneria di manutenzione.....	9
1.2 Le attività della manutenzione.....	10
1.3 Principi chiave della manutenzione.....	11
1.3.1 Il concetto di costo globale.....	11
1.3.2 Affidabilità e manutenibilità.....	12
1.3.3 Mean Time Between Failures (MTBF).....	15
1.4 Le politiche manutentive.....	15
1.5 Le strategie manutentive.....	16
1.5.1 La manutenzione a guasto o correttiva.....	16
1.5.2 La manutenzione preventiva.....	17
1.5.3 La pianificazione della manutenzione preventiva.....	19
1.5.4 Cenni sulle valutazioni economiche della manutenzione preventiva.....	20
1.5.5 La manutenzione predittiva.....	21
1.5.6 Tecniche di manutenzione predittiva.....	25
1.5.7 Analisi vibrazionale.....	25
1.5.8 Termografie.....	28
1.5.9 Tribologia.....	29
1.5.10 Ferrografie.....	31
1.5.11 Analisi del rumore.....	32
1.5.12 Ispezioni visive.....	33
1.5.13 Esempi di applicazione.....	34
1.5.14 La manutenzione migliorativa.....	35
1.5.15 Scelta della strategia manutentiva.....	36
1.5.16 L'utilizzo di IoT in manutenzione.....	37
1.5.17 Analisi delle modalità di guasto.....	39
1.5.18 La Total Productive Maintenance (TPM).....	40
1.5.19 La pianificazione degli interventi manutentivi.....	41
1.5.20 La programmazione degli interventi manutentivi.....	42
1.5.21 Linee guida della programmazione.....	42
1.5.22 Alcuni cenni sulla pianificazione in PMI MTB.....	43
2. L'azienda.....	49

2.1 Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna	49
3. La manutenzione in PM MTB.....	52
4. Il nuovo approccio organizzativo: Open+	54
4.1 I KPI di Open+.....	54
4.2 Open+ e la manutenzione	55
4.3 Parametri di processo	56
4.4 Cleaning, Inspecting and Lubricating	57
4.5 Defect Handling	58
5. Il caso di studio: sostituzione spondine	60
5.1 Descrizione problema.....	60
5.2 Studio dell'MTBF	66
5.2.1 Calcolo dell'MTBF in giorni	67
5.2.2 Dipendenza dell'MTBF dalle modalità di montaggio.....	69
6. Obiettivi e identificazione della soluzione.....	73
6.1 Soluzione per l'usura da meccanismo b).....	73
6.2 Soluzione per l'usura da meccanismo a)	74
6.2.1 La soluzione con attuatori pneumatici	75
6.2.2 Batch di analisi delle sollecitazioni.....	75
6.2.3 Il modello CAD.....	76
6.2.4 Batch: Caso 1.....	78
6.2.5 Batch: Caso 2.....	82
6.2.6 Batch: Caso 3.....	85
6.2.7 Batch: Caso 4.....	88
6.2.8 Batch: Caso 5.....	91
6.2.9 Batch: Caso 6.....	94
6.3 Analisi delle sollecitazioni nodali	97
7. Realizzazione costruttiva	99
7.1 Soluzione α : Leva a V	102
7.2 Soluzione β : leva diritta	104
7.3 Soluzione γ : pistone compatto con montaggio laterale.....	106
7.4 Valutazione delle ipotesi e scelta della soluzione	107
8. Risultati attesi e Follow-up actions	108
9. Conclusioni	110
Bibliografia	111
Ringraziamenti.....	113

Sommario

La moderna concezione di realtà produttiva riconosce alla manutenzione un ruolo sempre più cruciale. La manutenzione è attualmente vista come un servizio volto a preservare costantemente inalterata l'efficienza di macchinari e impianti, senza per questo trascurare allo stesso tempo le esigenze della qualità, dell'efficienza energetica e della sicurezza. Il presente lavoro di Tesi è condotto in un contesto come quello di Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna, in cui tali principi sono da tempo radicati.

Oggetto della Tesi sono la verifica della conformità del piano manutentivo aziendale con quanto prescritto da letteratura o applicato da altre realtà produttive e l'analisi delle condizioni di lavoro di un determinato componente di processo, finalizzata al miglioramento dell'uptime di linea legato a tale componente. Come risultato finale della Tesi, sarà proposta una nuova configurazione di montaggio per il componente oggetto di studio, finalizzata alla messa in atto di una nuova gestione di manutenzione preventiva per esso. L'intervento migliorativo apportato presenta un ROI inferiore a 2 settimane ma consente di ottenere un aumento almeno del 60% del valore di MTBF di linea legato a tale componente.

Introduzione

Per manutenzione s'intende "quella funzione aziendale cui sono demandati il controllo costante degli impianti e l'insieme dei lavori di riparazione e revisione necessari ad assicurare il funzionamento regolare e il buono stato di conservazione degli impianti produttivi, dei servizi e delle attrezzature di stabilimento" [1]. Se in passato tale funzione rivestiva un ruolo assolutamente subalterno rispetto alla produzione in tutte le realtà produttive, la sua considerazione attuale si è molto accresciuta, in quanto ogni azienda ha oggi la piena coscienza di quanto un efficace lavoro di manutenzione possa permettere di conseguire importanti risultati economici, di qualità e di sicurezza.

Il presente lavoro di Tesi parte dall'identificazione e classificazione delle principali strategie manutentive che oggi trovano applicazione in ambito industriale. Grazie al supporto di alcuni autorevoli riferimenti di settore, viene delineata una panoramica delle strategie manutentive, volta a comprendere quale degli approcci esaminati possa risultare più efficace se applicato ad una moderna realtà produttiva.

Successivamente, viene proposta un'analisi di benchmark fra il piano manutentivo di una specifica area dello stabilimento Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna e lo stato dell'arte. I dati utili al confronto vengono ricavati da articoli scientifici presenti in letteratura o dall'esperienza pregressa in altre aziende di alcuni dipendenti di PMMTB.

A valle dell'analisi emerge come, pur essendo il piano manutentivo aziendale piuttosto conforme allo stato dell'arte, vi sia un caso di breakdown di linea ancora frequente legato ad un componente di processo critico la cui sostituzione e manutenzione veniva ancora gestita a guasto. Si è dunque deciso di intervenire allo scopo di rendere possibile una gestione preventiva della manutenzione del componente.

Analizzando l'attuale condizione di lavoro del componente e le modalità attraverso cui esso si usura, si riscontra come la metodologia di messa in pressione manuale di questo componente sia foriera di una disuniforme sollecitazione sulla superficie messa in pressione, sia per la non ripetibilità dovuta al serraggio manuale, sia per il posizionamento delle forze di pressione sulla superficie. Viene dunque condotto un batch di analisi FEM, volto a determinare la configurazione ottimale di forze di pressione in grado di garantire la sollecitazione più uniforme possibile sulla superficie del componente. Successivamente, viene proposta una nuova soluzione con attuatori pneumatici, al fine di rendere assolutamente ripetibile la fase di montaggio del componente. Infine, vengono elaborate alcune strategie di montaggio finalizzate al superamento del problema degli ingombri.

1. La manutenzione nei sistemi produttivi

La crescente automatizzazione dei sistemi produttivi viene realizzata per mezzo dell'installazione di macchinari sempre più moderni e sofisticati che mirano, a differenza di quanto avvenisse in passato, non solo all'ottimizzazione della produttività ma anche alla salvaguardia della qualità del prodotto e della sicurezza sul lavoro. La crescente complessità dell'impianto che ne consegue richiede una gestione più attenta e razionale di tutti i macchinari. La manutenzione ha lo scopo di rispondere a tale necessità mettendo in campo una serie di azioni volte a garantire la disponibilità dei sistemi, l'economicità della loro conduzione, la sicurezza del lavoro e la sicurezza ambientale.

Al fine di realizzare tutto questo, è importante scegliere correttamente le attività gestionali da intraprendere, le quali saranno inevitabilmente guidate da necessità che si pongono all'incrocio fra il tecnico e l'amministrativo.

La manutenzione non fa eccezione in quanto la sua impostazione strategica è un'attività gestionale molto complessa, legata ad aspetti sia tecnici che amministrativi e la cui buona riuscita risulta fondamentale alla luce dei numerosissimi risvolti operativi che da essa scaturiscono.

Una prima distinzione da fare da subito è quella fra politica manutentiva e strategia manutentiva.

La politica manutentiva rappresenta l'attitudine generale dell'impresa rispetto ai problemi manutentivi ed è da tale attitudine che scaturiscono poi tutti gli interventi operativi volti alla risoluzione di tali problemi.

La strategia manutentiva dunque, si presenta a valle rispetto alla politica manutentiva e rappresenta la traduzione in interventi operativi dell'atteggiamento generale dettato dalla politica aziendale. [2]

1.1 L'ingegneria di manutenzione

Il moderno modello di impresa, i cui principi risultano largamente applicati nelle realtà produttive odierne, si pone come obiettivo quello della valorizzazione economica di ogni singola funzione aziendale. In questo contesto, assumono grande rilievo attività come la riduzione dei costi di produzione e la salvaguardia della corretta funzionalità dei macchinari e dei beni aziendali. Da quest'ultima necessità deriva il ruolo cruciale assunto dalla moderna manutenzione.

Mentre in passato essa veniva vista semplicemente come una funzione generatrice di costo, la manutenzione è percepita nel moderno modello aziendale come una funzione in grado di creare valore

economico dell'azienda preservando la "salute dell'impianto" e prevenendo possibili condizioni di degradato funzionamento dei macchinari.

Tale scopo "nobilita" la funzione manutentiva che è da considerarsi come condizione necessaria della produttività dell'azienda, avendo essa il compito di garantire la qualità e la continuità della produzione, senza ovviamente trascurare la sicurezza sul lavoro e la sicurezza ambientale. Per garantire ciò, gli interventi manutentivi devono essere opportunamente pianificati in maniera che il piano manutentivo si sposi al meglio con il piano di produzione.

L'ingegneria di manutenzione non può dunque esclusivamente limitarsi alle competenze tecniche ma deve dotarsi di strategie, indicatori e strumenti gestionali volti a sfruttare le limitate risorse a disposizione per conseguire una serie di obiettivi come la riduzione dei costi di manutenzione, la creazione di una pianificazione flessibile rispetto alle esigenze della produzione, la conservazione di beni e macchinari e l'implementazione di politiche volte al sistematico miglioramento di tutte le funzioni. [2]

1.2 Le attività della manutenzione

Alla luce di quanto esposto finora riguardo ai profondi cambiamenti del ruolo della manutenzione, è lecito attendersi una crescente complessità di ciascuna delle sue funzioni.

La moderna manutenzione è fondata sulla disponibilità di informazioni e dati ricavati direttamente dall'area produttiva e che possano costituire uno specchio fedele delle condizioni dell'impianto. L'istantanea di tali condizioni è rappresentata da alcuni indicatori ben definiti che prendono il nome di *Key Performance Index* (KPI). L'efficacia di questo processo di raccolta dei dati sul campo risulta inoltre massimizzato dall'utilizzo delle moderne tecnologie di trasferimento dei dati a distanza (LAN, Wi-Fi, ecc.) e dalla nascita di modelli affidabilistici dei macchinari. Sono infatti stati sviluppati sofisticati modelli basati sulla continua osservazione di specifici parametri legati ai macchinari durante il loro intero ciclo di vita, portando così a una gestione degli interventi secondo il modello della manutenzione a condizione. Si tratta di un metodo di gestione della manutenzione in grado di portare ad ottimi risultati, ma che necessita di una notevole conoscenza dei macchinari e delle loro condizioni di funzionamento, necessaria per interpretarne correttamente le condizioni di lavoro e stimarne la durata.

Uno degli aspetti da considerare assolutamente prioritari all'interno della manutenzione è quello dei ricambi. La presenza di ricambi in magazzino è condizione necessaria perché vengano rispettati i piani di produzione e manutenzione. Infatti, la mancanza di un certo pezzo di ricambio determina

l'impossibilità della sostituzione del pezzo stesso e questo può portare a un fermo delle linee o ad un funzionamento a regime ridotto dei macchinari, portando così a sostanziali perdite economiche per l'impresa.

Il reperimento dei materiali a seguito del fabbisogno aziendale, può essere portato a termine secondo due differenti logiche.

- Logica a fabbisogno: l'ordine dei materiali avviene contestualmente al sorgere della necessità. Ne esistono due tipologie:
 - Sistemi push come il Material Requirement Planning (MRP);
 - Sistemi pull come il Just in Time (JIT);
- Logica a scorta: i ricambi vengono gestiti attraverso una scorta a magazzino. Questo tipo di approccio incide sulla voce di costo legata alla suddetta scorta. Si possono anche qui individuare due differenti tipologie:
 - Sistemi a intervallo di riordino costante: il livello delle scorte viene ripristinato a cadenza temporale fissa;
 - Sistemi a livello di riordino costante: il livello delle scorte viene ripristinato non appena esso scende al di sotto di un determinato valore prefissato.

La logica a scorta introduce un problema di non semplice gestione ovvero la scelta da parte dell'ingegnere del compromesso fra il costo di un possibile mancato ricambio e il costo del mantenimento di un codice inattivo a magazzino, in maniera tale da individuare la logica di riordino più consona. [2]

1.3 Principi chiave della manutenzione

Essendo quello manutentivo un campo di complessa applicabilità, tale applicabilità deve essere validata dalla definizione ed analisi di alcuni principi fondanti della stessa. Tali principi sono infatti sempre al centro di qualsiasi tipo di valutazione o ragionamento aziendale volto a stabilire se sia effettivamente possibile e conveniente mettere in atto una determinata strategia manutentiva. [3]

1.3.1 Il concetto di costo globale

La valutazione basilare da prendere in considerazione per decidere quale strategia manutentiva applicare ad una determinata attrezzatura riguarda sicuramente il costo della stessa. Si può a tal proposito introdurre il concetto di *costo globale*.

Il *costo globale* di acquisto ed utilizzazione di un'attrezzatura comprende:

- Costo dell'attrezzatura A: incluso il costo dei capitali investiti, costante nel tempo;
- Costo cumulato d'utilizzazione F: linearmente variabile nel tempo;
- Costi diretti cumulati di manutenzione M: variabili con legge quadratica nel tempo.

$$C = A + F + M \quad (1)$$

L'introduzione del concetto di costo globale permette per ogni attrezzatura di valutare il costo di ogni possibile strategia di manutenzione. Al passare del tempo, l'intervento attraverso una determinata strategia manutentiva non risulta conveniente laddove il suo costo superi il valore residuo dell'attrezzatura. [3]

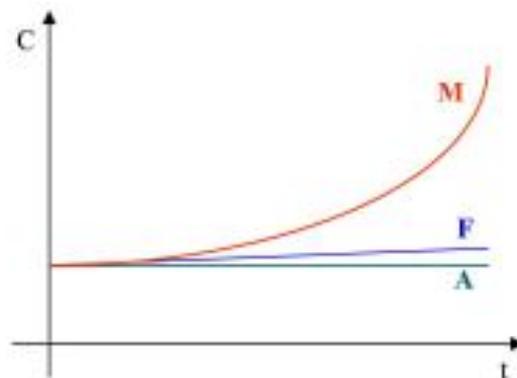


Figura 1: Andamento della funzione costo totale

1.3.2 Affidabilità e manutenibilità

L'affidabilità è definita come “l'attitudine di un dispositivo a svolgere una funzione richiesta secondo le condizioni di utilizzazione e per un periodo di tempo definito” [3].

Detta $f(t)$ la densità di probabilità di guasto e definita come la probabilità infinitesima che l'attrezzatura si rompa al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt , allora è possibile anche definire analiticamente l'affidabilità come la probabilità che l'elemento studiato sopravviva al passare del tempo t :

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2)$$

Mentre, analogamente è possibile definire l'*inaffidabilità* come la probabilità che l'attrezzatura effettivamente si rompa proprio entro l'istante t:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (3)$$

Dunque appare chiaro come le due funzioni risultino essere il complemento ad 1 l'una dell'altra. Il *tasso di guasto* è "la funzione $\lambda(t)$ tale che la probabilità infinitesima che il componente si rompa al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt sia pari a $\lambda(t)dt$, nell'ipotesi che in t sia ancora funzionante" [3]:

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < \bar{t} < t + dt | \bar{t} > t)}{dt} \quad (4)$$

Si può dimostrare che:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

Il *tasso di guasto* può dunque essere definito come una probabilità di guasto residua legato alle attrezzature ancora in buono stato al tempo t.

Dalla definizione di tasso di guasto è possibile delineare la tipica curva dei guasti di un componente elettromeccanico (anche nota come curva a *vasca da bagno*):

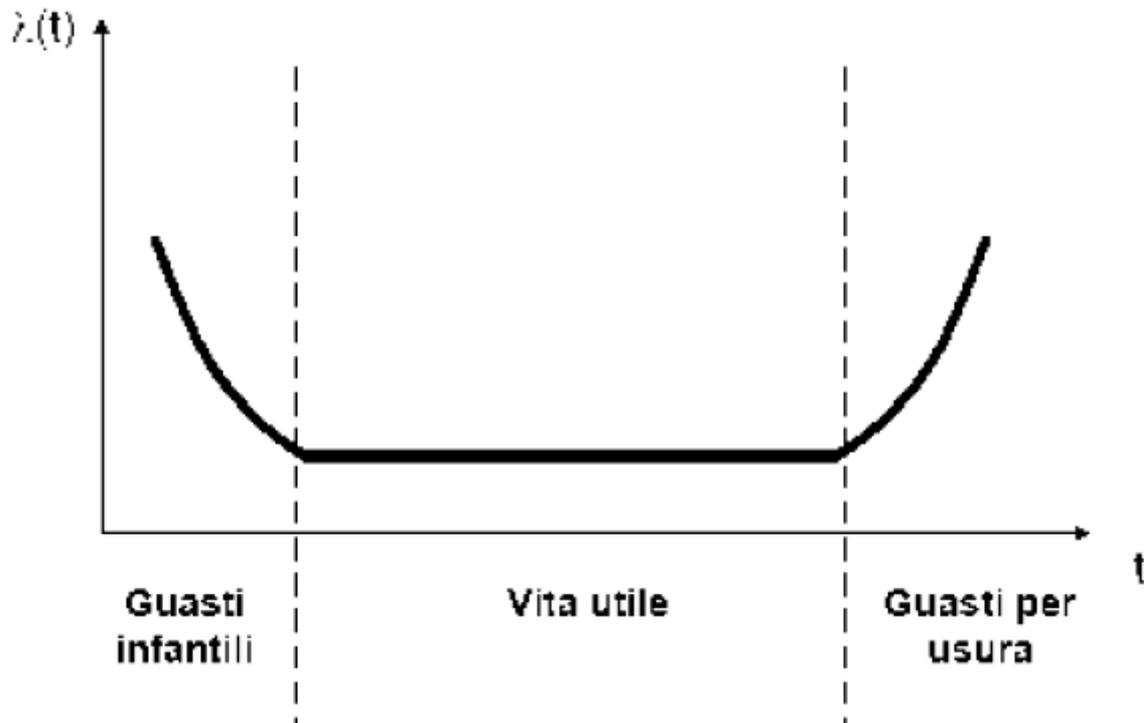


Figura 2: Curva dei guasti di un componente elettromeccanico

Nel periodo di rodaggio si riscontrano i cosiddetti “guasti infantili”, causati principalmente da errori progettuali oppure errori nell’utilizzo della nuova attrezzatura dettati dall’inesperienza. La maturità del pezzo è invece caratterizzata da cause di guasto del tutto casuali mentre, una volta superato tale periodo, le cause di guasto sono principalmente usura e fatica.

La legge di affidabilità di più tipico utilizzo è quella di Weibull:

$$R(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}} \quad (6)$$

Laddove:

α : parametro di scala;

β : parametro di forma;

γ : parametro di posizione;

t : tempo di utilizzazione.

La *manutenibilità* viene invece definita come “l’attitudine (la probabilità) di una data attrezzatura ad essere mantenuta o ad essere riportata – in un prefissato periodo di tempo – in uno stato nel quale può svolgere la funzione richiesta” [3]. Come indicatore di manutenibilità è tipicamente utilizzato il *Mean*

Time To Repair (MTTR), ovvero il tempo medio necessario a ripristinare la normale funzionalità di una determinata attrezzatura, a partire dal momento del guasto. [3]

1.3.3 Mean Time Between Failures (MTBF)

Il *Mean Time Between Failures (MTBF)* non è un vero e proprio principio manutentivo ma è da considerare come un *Key Performance Index* della manutenzione. Esso è definito come: “tempo operativo medio tra i guasti. Il valore atteso del tempo operativo tra i guasti” [4].

Lo studio di questo KPI è fondamentale alla luce dell’implementazione di strategie manutentive non a guasto: l’implementazione di qualsiasi altro tipo di strategia manutentiva richiede la necessità di anticipare il guasto ripristinando il corretto funzionamento del componente prima che esso si verifichi e dunque l’MTBF rappresenta un’informazione fondamentale onde stabilire le tempistiche dell’intervento.

1.4 Le politiche manutentive

Il più basilare dei compiti della manutenzione era in passato quello di porre rimedio ai guasti dei macchinari al fine di allungare la loro vita utile. Qualsiasi funzione o ruolo lavorativo legato alla manutenzione risultava dunque limitato a tale missione.

Il concetto primordiale di politica manutentiva prevedeva dunque l’attesa della comparsa di un guasto e la successiva organizzazione tecnica dell’intervento al fine di porre rimedio allo stesso ripristinando la funzionalità originale del macchinario.

Una politica manutentiva più moderna è quella che invece associa alla manutenzione anche lo scopo di prevenire il guasto, qualora possibile, attraverso l’utilizzo di specifiche tecniche. In questo modo il ruolo della manutenzione inizia a divenire parte integrante dell’attività produttiva dell’azienda.

Un esempio di politica manutentiva ancora più recente è invece quello di manutenzione predittiva il quale, mettendo a disposizione dell’azienda strumenti sempre più all’avanguardia mira a ridurre il personale addetto alla manutenzione, responsabilizzando in merito a tali attività gli operatori di processo. L’addetto alla manutenzione viene così visto come una figura specialistica a cui la produzione attinge esclusivamente in caso di circostanze che richiedano competenze più elevate.

Prima di introdurre nello specifico come le principali politiche manutentive vengano tradotte nell’applicazione pratica attraverso strategie manutentive, occorre specificare come l’orientamento manutentivo scelto sia dipendente anche da chi è il *richiedente* dell’intervento manutentivo.

“A fronte della necessità di eseguire un lavoro, deve essere formulata una richiesta. Il richiedente può essere chiunque. Gli utenti più tradizionali sono:

- La Produzione, di solito su guasto, ma anche per assistenza o supporto in fasi specifiche del Processo.
- La Manutenzione, a fronte di uno scadenziario piuttosto che dell'esito di un'ispezione che evidenzia la necessità di un intervento (Predittiva). Non rare e sempre auspicabili, le attività migliorative.
- Il Servizio Prevenzione e Protezione (SPP), in seguito ad evidenze da audit interno piuttosto che da prescrizioni delle varie Autorità preposte.
- La Progettazione, in determinate fasi della realizzazione dei nuovi Investimenti. Il contributo diretto della manutenzione è importante, in quanto diviene automaticamente formazione in campo. Inoltre, il poter dimostrare la capitalizzazione su progetto di un certo numero di ore da parte dei manutentori costituisce prova di “diligenza” agli effetti delle vigenti norme sulla Sicurezza. Attenzione: le ore devono essere caricate sul budget dell'investimento, non su quello della manutenzione.” [5]

Alla luce di quanto appena affermato è allora utile specificare che le strategie manutentive descritte nel paragrafo 1.5 potranno essere molto difficilmente applicate come compartimenti stagni all'interno di una realtà aziendale complessa. La strategia manutentiva aziendale sarà un mix delle strategie descritte e sarà volta per volta dettata dalle caratteristiche del macchinario e dagli scopi di chi richiede l'intervento. [2]

1.5 Le strategie manutentive

Si possono individuare quattro principali strategie di manutenzione:

- *A guasto o correttiva;*
- *Preventiva;*
- *Predittiva o su condizione;*
- *Migliorativa.*

Uno degli indici sulla base dei quali è significativo valutare il successo di una strategia manutentiva rispetto ad un'altra è l'efficacia di una detta strategia nel prevenire i guasti andando a diminuire il tempo complessivo di fermo macchina legato alla manutenzione ed andando dunque ad incidere positivamente sull'uptime dell'impianto. [2]

1.5.1 La manutenzione a guasto o correttiva

La manutenzione a guasto prevede semplicemente di preparare e realizzare un intervento manutentivo su un determinato macchinario a valle del verificarsi di un guasto, con lo scopo di ripristinare la funzionalità che il macchinario stesso aveva prima dell'avvenimento di guasto.

La manutenzione a guasto può tuttora essere considerata una scelta vincente laddove applicata su macchinari non critici e/o a basso costo. Infatti, si tratta della strategia manutentiva che richiede minori costi e minore complessità organizzativa. Tuttavia, intraprendendo questa strategia, si espone matematicamente l'impianto ad un fermo o ad una produzione a regime ridotto, andando in ciascuno dei due casi a ledere sulla produttività dell'impianto. Inoltre, l'utilizzo del personale di manutenzione risulta altamente inefficiente mentre il magazzino ricambi dovrà necessariamente essere sovradimensionato al fine di garantire l'immediatezza dell'intervento a guasto. [2]

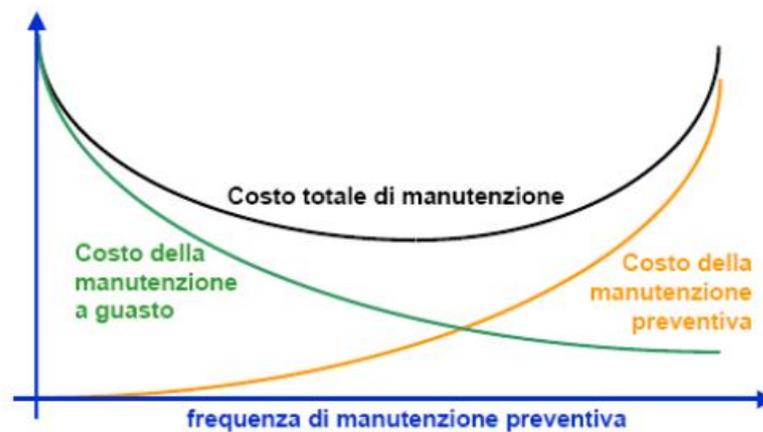


Figura 3: Andamento dei costi di manutenzione a guasto e preventiva

In Fig.3 è possibile osservare come differiscano gli andamenti dei costi di manutenzione a guasto e preventiva al variare della frequenza di manutenzione preventiva. Più sono frequenti gli interventi di manutenzione preventiva (che sarà illustrata nel dettaglio nel paragrafo 1.5.2), più rari sono i guasti dunque si abbassano i costi legati alla manutenzione a guasto. [6]

1.5.2 La manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva è una strategia che prevede l'esecuzione di interventi manutentivi "ad intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di una entità" e dunque prevenendo l'avvenimento di un guasto. Una delle attività fondamentali che stanno dunque alla base dell'applicazione di tale teoria è la determinazione a priori della vita media utile del componente al fine di proporre una pianificazione degli interventi manutentivi che vada ad anticipare il guasto. Proprio per questa ragione, come specificato nel paragrafo 1.3.3, la conoscenza di KPIs come l'MTBF risulta cruciale.

Si tratta della tipologia di manutenzione pianificata più di uso comune e la sua efficacia viene esaltata se gli interventi seguono criteri volti a rilevare segni di usura o funzionamento degradato dei

macchinari. Infatti, uno degli aspetti che maggiormente può porre in discussione l'approccio d'intervento ad intervalli temporali predeterminati, è l'evidenza sperimentale del fatto che la maggior parte dei guasti avvengono in maniera casuale, rendendo così inefficace questa soluzione.

La manutenzione preventiva ha come punti di forza tutti gli aspetti che rendono debole la manutenzione a guasto: implementando la manutenzione preventiva si riesce a ridurre il numero di guasti, ad ottimizzare l'utilizzo del personale di manutenzione e delle scorte a magazzino. Tuttavia, con tale strategia si va certamente incontro ad un aumento dei costi diretti della manutenzione e bisogna tenere in conto che gli interventi dettati da tale strategia possono essi stessi condurre a dei guasti. [2]

Come già accennato nel paragrafo 1.3.1, uno dei fattori decisivi al fine di valutare la convenienza dell'applicazione di un programma di manutenzioni preventive è quello dei costi. Il costo aggiuntivo delle manutenzioni preventive deve tuttavia essere giustificato da una riduzione del costo complessivo di riparazione e dal miglioramento delle performance dell'attrezzatura in questione. Infatti, se il costo di un intervento preventivo non supera quello di una riparazione a guasto (accompagnata da ispezioni preventive), l'approccio preventivo non può essere ritenuto conveniente. Se invece il verificarsi di un guasto può introdurre un grave danneggiamento dell'attrezzatura o elevati costi di riparazione, allora deve essere presa in considerazione l'applicazione di una strategia preventiva.

Altro fattore cruciale da valutare è l'utilizzazione percentuale dell'attrezzatura da mantenere. In particolare, in ogni linea produttiva possono essere individuati elementi ed attrezzature cruciali per cui l'applicazione di una strategia preventiva può essere considerata sicuramente conveniente. Laddove invece si considerino elementi piccoli e non cruciali come piccoli motori elettrici, si osserva come l'applicazione di una strategia manutentiva supera di gran lunga come costo quello della sostituzione a guasto, che si conferma in questi casi essere l'approccio più conveniente.

Per questa ragione nelle realtà aziendali è raro trovare l'applicazione di programmi centralizzati di manutenzione preventiva, che invece viene applicata a determinati elementi singoli dell'attrezzatura. Tale soluzione di compromesso è spesso la più efficace data la sua flessibilità: non avendo infatti un piano di manutenzione rigido da applicare su ogni singolo elemento dell'attrezzatura, viene dato valore alla familiarità con le attrezzature e all'abilità da parte dei manutentori di riuscire ad individuare in anticipo i problemi meccanici di una determinata attrezzatura. [6]

Un approccio molto efficace può essere la programmazione di shutdown periodici completi delle singole unità produttive aziendali per effettuare la revisione completa. Tuttavia, si tratta di una

strategia che non si sposa bene con le esigenze produttive, specialmente dove si realizzano quotidianamente grandi volumi di produzione.

Una soluzione di compromesso molto efficace in tal senso è quello di sfruttare proprio i breakdown accidentali delle linee produttive per realizzare importanti ispezioni e sostituzioni che necessitano il fermo della linea. Si tratta tuttavia di un approccio che richiede una registrazione continua delle inefficienze dell'impianto e di interventi repentini e perfettamente coordinati fra manutenzione e supervisione.

In ciascuno dei due approcci esaminati, può manifestarsi la necessità di prolungare il tempo di shutdown della linea produttiva oltre lo stretto necessario proprio per portare a termine cruciali interventi di ispezione o sostituzione.

Alla base della manutenzione preventiva vi è la presenza fondamentale dell'*ingegneria preventiva*. Si tratta di uno strumento molto potente per la riduzione dei downtime, e per la verità si tratta di un approccio che viene applicato anche in realtà dove non vi è un programma di manutenzioni preventive. La principale attività dell'ingegneria preventiva è l'analisi delle cause di guasto. Essa non si limita semplicemente a implementare supporti con maggiore aspettativa di vita o migliori sistemi di lubrificazione, ma si addentra nell'analisi di ogni singolo guasto verificatosi andandone a scoprirne puntualmente la causa, perseguendo gli obiettivi tangibili della riduzione della frequenza di guasto e del costo di riparazione.

La differenza sta dunque nella capacità di chi è preposto all'ingegneria preventiva di saper direzionare gli sforzi in maniera intelligente ed efficace proprio laddove è sorta la problematica. Per questo, potrebbe essere utile affidare tali attività a unità speciali di riduzione del costo definite dall'azienda. Un'analisi di questo tipo ha ovviamente senso solo laddove un problema risulta verificarsi in maniera troppo frequente sulla linea produttiva o comunque comporta elevati costi di manutenzione. L'efficienza di questo tipo di approccio può essere raggiunta solo e soltanto laddove le esigenze di tale approccio siano considerate svincolate ed indipendenti da quelle della produzione. [7]

1.5.3 La pianificazione della manutenzione preventiva

La pianificazione è il cuore della manutenzione preventiva. Il primo passo è certamente la definizione degli items da introdurre all'interno del programma delle preventive e quali procedure di ispezione/revisione includere nelle attività di manutenzione. La scelta e redazione delle procedure di manutenzione è molto complicata in quanto si rendono necessarie grandi abilità comunicative ma allo stesso tempo la giusta esperienza relativa alle pratiche manutentive. Alcuni requisiti risultano fondamentali:

- 1) Ogni procedura deve avere un titolo ed un numero identificativo;
- 2) Lo scopo deve essere chiaramente esplicitato;
- 3) Strumenti e parti necessari devono essere chiaramente elencati;
- 4) Gli accorgimenti relativi alla sicurezza devono essere chiaramente esplicitati;
- 5) Deve essere previsto uno spazio dove il manutentore ha la possibilità di riportare commenti riguardo il completamento, soddisfacente o meno, dell'intervento manutentivo.

Si può considerare preferibile avere fisicamente le procedure stampate, in modo tale che possano essere portate dal manutentore anche sul luogo dell'intervento e restituite poi alla fine del lavoro. La pianificazione deve ovviamente tenere conto degli imprevisti, ovvero delle azioni non pianificate necessarie per riparare i difetti (rif. paragrafo 4.5) trovati durante le manutenzioni preventive. Gli approcci possibili sono due: uno è quello di risolvere il difetto al momento, l'altro è di identificarli e classificarli chiaramente ma risolverli solo in un secondo momento. In caso si tratti di un difetto di sicurezza esso può essere comunque risolto in un secondo momento ma bisognerà immediatamente fermare l'attrezzatura ed apporre l'apposita segnaletica di sicurezza. Lo standard tipico deve essere definito a livello di policy aziendale. Una tipica considerazione di buonsenso è quella di risolvere qualsiasi difetto se la risoluzione richiede una quantità di tempo inferiore ai 10 minuti mentre aprire una differente richiesta di intervento in caso contrario. Il tempo in questione non è ovviamente fisso a 10 minuti ma deve essere scelto in base a:

- 1) Tempo necessario a raggiungere la work location;
- 2) Effetti sulla produzione;
- 3) Necessità di aderenza al time schedule da parte dei manutentori.

Per limitare i viaggi da parte dei manutentori, se ne ha le competenze è preferibile che chi identifica il difetto lo risolva sul momento, anche se ovviamente ciò è possibile solo in caso di piccole riparazioni. Non è invece ritenuto produttivo che il manutentore si fermi per la risoluzione di difetti di lunga risoluzione in quanto ciò andrebbe a compromettere il completamento delle azioni manutentive pianificate causando problemi ancora più gravi.

Le procedure di manutenzione preventiva devono prevedere anche uno spazio sul documento cartaceo aperto per l'aggiunta di eventuali ulteriori azioni manutentive che dovrebbero essere incluse nella pratica preventiva standard ad opinione del manutentore. [7]

1.5.4 Cenni sulle valutazioni economiche della manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva può essere considerata a tutti gli effetti un investimento. Per definizione da un investimento ci si aspetta che la quantità di denaro e risorse investita porti ad un guadagno superiore rispetto all'investimento iniziale.

Si tratta di un'analisi molto complessa in quanto profondamente legata alla variazione temporale del valore del denaro. Occorre dunque considerare:

- La quantità di denaro coinvolta;
- La durata temporale del flusso operativo;
- Il costo del denaro atteso lungo tale periodo temporale.

L'analisi finanziaria deve essere accurata e dettagliata, basandosi su numerosi indicatori finanziari per stabilire se la strategia preventiva in esame sia efficace dal punto di vista dei costi. I due principi alla base di questa analisi sono l'abbassarsi del valore del denaro a lungo termine e l'abbassarsi dell'affidabilità delle attività pianificate a lungo termine. [7]

1.5.5 La manutenzione predittiva

La manutenzione predittiva è una particolare tipologia di manutenzione su condizione o Condition Based Maintenance (C.B.M.). L'idea principale su cui tale strategia manutentiva si fonda è quella secondo la quale un guasto tipicamente non avviene in maniera istantanea ma è frutto del deterioramento nel tempo delle condizioni di un determinato componente.

Il monitoraggio di alcuni parametri può denunciare condizioni di funzionamento anomale e dunque segnalare la necessità di un intervento. Chiari sintomi di un funzionamento fuori standard sono variazioni di temperatura, presenza di particelle di usura degli oli o un anomalo spettro di vibrazioni. Tutte queste grandezze possono essere facilmente misurate e portare alla corretta identificazione del problema.

La strategia predittiva è fondata sul Condition Monitoring, ovvero sul monitoraggio di alcune condizioni e/o indici considerati cruciali ai fini del corretto funzionamento della macchina, allo scopo di rilevare in anticipo condizioni di non corretto funzionamento o comunque condizioni preparatorie ad un possibile guasto.

Una volta effettuata la rilevazione, vi è una successiva fase di analisi della problematica ed eventuale pianificazione dell'intervento. Fra le strategie finora introdotte si tratta di quella che ha le maggiori potenzialità dal punto di vista della massimizzazione dell'uptime e della riduzione dei costi di manutenzione. Il presente approccio, permette di condurre un'analisi approfondita che porti alla comprensione della radice del problema (cosa non sempre possibile adottando ad esempio la strategia a guasto) e di poter anche condurre ispezioni a bassissimo costo.

Queste caratteristiche della manutenzione predittiva la rendono una strategia manutentiva molto attuale, la cui implementazione in area produttiva è fondamentale per ritenere un'azienda competitiva. [2]L'evoluzione degli apparati informatici e della sensoristica rende ancora più potente questo approccio fornendo alla manutenzione dati sempre più puntuali e precisi.

Una strategia di manutenzione preventiva non è da considerare alternativa alle tradizionali strategie di manutenzione ma come un valore aggiunto all'interno di un programma manutentivo complessivo. Laddove i tradizionali piani manutentivi si occupano di fornire una rapida risposta a guasti inaspettati, la strategia di manutenzione preventiva agisce solo laddove richiesto dalle condizioni dell'attrezzatura. Ne consegue che l'implementazione di questo tipo di strategia non può totalmente eliminare l'utilizzo di strategie a guasto o preventive, ma può costituire un utilissimo supporto al funzionamento di entrambe le strategie manutentive. La manutenzione predittiva permette infatti di ridurre il numero di guasti o anche di costruire un piano di manutenzioni preventive più affidabile.

La manutenzione predittiva è basata sul principio secondo il quale il monitoraggio sistematico delle condizioni reali dei macchinari e dell'efficienza operativa del processo porta ad ottenere il massimo intervallo di tempo fra due interventi manutentivi consecutivi, il minimo numero e costo dei guasti non programmati e migliorare l'uptime complessivo dell'impianto. [6]

Da alcuni sondaggi condotti su un campione eterogeneo di impianti negli Stati Uniti, emerge come i maggiori benefici derivanti dall'implementazione di questo tipo di strategia riguardino: costi di manutenzione, guasti non programmati, downtime di riparazione, inventario dei pezzi di ricambio. Inoltre sono stati individuati eccezionali miglioramenti riguardo la vita della macchina, la produzione, la sicurezza degli operatori e anche la qualità del prodotto. Secondo i dati ricavati da queste fabbriche dall'implementazione delle predittive ci si può attendere una riduzione dei costi di manutenzione anche superiore al 50%, senza considerare i costi di mancata produzione dovuti ai downtime della linea e altri costi direttamente attribuibili ad inefficienti pratiche di manutenzione. Allo stesso tempo è stata riscontrata una riduzione del 55% del numero di guasti dei macchinari ma con l'implementazione più estesa della strategia è anche possibile arrivare ad una riduzione del 90%. Si può anche notare una riduzione del tempo necessario per portare a termine l'intervento manutentivo, data la riduzione del 60% del *Mean Time To Repair* (MTTR) riscontrata a valle dell'implementazione delle predittive. Questo dato può essere spiegato considerando che l'approccio predittivo permette di individuare più nello specifico qual è il componente della macchina che non sta lavorando bene, permettendo ai manutentori un intervento più rapido e mirato. L'implementazione di questo tipo di approccio ha condotto negli impianti sotto esame ad una riduzione media del 30% dell'inventario dei pezzi di ricambio.

Un vantaggio “incidentale” che può essere attribuito all’adozione di questa strategia è l’abilità di monitorare automaticamente l’MTBF. Conoscendo questo dato è possibile avere un’indicazione anche temporale di quando può essere considerato conveniente sostituire o revisionare l’attrezzatura, esattamente come avviene per le strategie di manutenzione preventiva. Conoscendo alla perfezione e costantemente il dato di MTBF si potrà monitorarne lo sviluppo e procedere alla sostituzione del pezzo laddove si giunge ad un valore dell’MTBF tale per cui il costo di manutenzione risulta superiore a quello della sostituzione stessa. Attraverso questo tipo di approccio operativo si ha la certezza dell’utilizzo del miglior equipment possibile.

Un altro vantaggio molto importante misurato è stato l’incremento del 30% dell’uptime dei macchinari, senza nemmeno prendere in considerazione l’incremento di efficienza degli impianti.

L’applicazione di un piano predittivo integrale che coinvolge anche i parametri di processo porta ad un miglioramento dell’efficienza operativa e dunque della produttività dell’impianto. Nei casi di alcuni impianti è stato possibile riscontrare un incremento dell’output di produzione anche del 50% dovuto semplicemente all’efficientamento del processo di produzione.

Una strategia preventiva porta alla riduzione degli infortuni come confermano le statistiche ed anche il fatto che le compagnie assicurative offrano premi assicurativi ridotti alle imprese che si impegnano ad adottare ed implementare questo tipo di strategia manutentiva.

L’analisi delle vibrazioni, che rappresenta uno degli strumenti chiave della manutenzione preventiva, può essere utilizzata per comprendere, prima della ripartenza della linea, se l’intervento ha risolto il problema o aggiunto un ulteriore comportamento insolito dal punto di vista vibrazionale. Questa possibilità è importantissima in quanto consente di evitare il secondo fermo della linea spesso necessario per correggere errori aggiuntivi dovuti proprio all’intervento di manutenzione. La strategia sotto esame consente inoltre di acquisire una notevole quantità di dati che sono utili alla pianificazione anche a lungo termine dei fermi dell’impianto.

Complessivamente dunque si può concludere come la manutenzione preventiva si è dimostrata poter migliorare le attività di produzione e la conduzione dell’impianto. Statisticamente è possibile notare come i vantaggi si manifestino in maniera tangibile anche nel giro di tre mesi.

GRANDEZZA	Variazione a seguito dell'approccio predittivo
Costi di manutenzione	-50%
Numero di guasti	-55%
MTTR	-60%
Inventario pezzi di ricambio	-30%
Uptime macchinari	+30%

Tabella 1: Benefits dell'approccio predittivo

Nonostante gli innumerevoli vantaggi appena analizzati la manutenzione predittiva presenta anche degli svantaggi.

L'implementazione di una simile strategia richiede comunque un investimento iniziale cospicuo se si considerano tutte le attrezzature necessarie per il monitoraggio dei parametri di interesse e per trasmettere al personale le conoscenze necessarie per il corretto utilizzo di tali attrezzature.

Inoltre, tale approccio richiede una conoscenza sul comportamento della macchina fondata sulla disponibilità di uno storico dati e di trends che possono essere ottenuti in maniera affidabile solo dopo lunghi tempi di rilevazione. [8]

Attraverso l'analisi di un caso di studio [9] è possibile delineare quali siano i principali aspetti che un'azienda deve prendere in considerazione al momento di decidere se implementare una strategia di Condition Based Maintenance. Innanzitutto la scelta deve essere affrontata da un punto di vista manageriale. Occorre partire dalla precisa identificazione della strategia manutentiva attuale e dei suoi costi diretti e indiretti, avendo definito in questo modo il punto di partenza è possibile definire quali vantaggi siano effettivamente raggiungibili attraverso l'implementazione della CBM, in termini di produttività e sicurezza. In merito, è opinione diffusa [10] che la strategia in questione abbia maggiori probabilità di impattare in maniera positiva sulla produzione, laddove venga supportata e promossa in maniera esplicita e convinta sia dal management che dal personale tecnico.

La scelta dell'implementazione di una strategia di manutenzione come la CBM, non può essere calata dall'alto sul personale ma deve essere adeguatamente comunicata e motivata. Il successo della CBM è inoltre favorito da una strategia di comunicazione volta a sottolineare in modo particolare i risultati positivi ottenuti per merito dell'implementazione della nuova strategia, soprattutto nella fase iniziale [11]. Ricopre grandissima importanza anche lo sviluppo di un piano di aggiornamento del personale a tutti i livelli, in modo tale che l'intera popolazione aziendale sviluppi familiarità e confidenza con la nuova strategia.

La cooperazione e il coinvolgimento in merito alla scelta deve essere totale e riguardare sia gli imprenditori che i clienti. A livello organizzativo è importante creare organizzazioni temporanee interne interfunzionali a capo dello sviluppo e implementazione della CBM, in modo da minimizzare i problemi e le difficoltà che sorgono puntualmente con lo sviluppo di ogni nuova strategia [11].

In letteratura [12] è inoltre addirittura possibile trovare una descrizione dettagliata degli otto passi da seguire per l'implementazione pratica della strategia in azienda:

- 1) Diffondere un senso comune di necessità del cambiamento;
- 2) Formare un gruppo di lavoro che funga da guida;
- 3) Sviluppare una precisa visione e una strategia;
- 4) Comunicare e diffondere il cambio di visione;
- 5) Agire in modo generalizzato in accordo con la nuova strategia;
- 6) Enfatizzare i primi successi dovuti alla nuova visione;
- 7) Consolidare i miglioramenti e sviluppare nuove modifiche;
- 8) Rendere il nuovo approccio parte integrante dei principi fondamentali della cultura aziendale.

1.5.6 Tecniche di manutenzione predittiva

Un programma di manutenzioni predittive prevede una discreta varietà di tecnologie. Gran parte degli impianti è tipicamente formato da sistemi meccanici e dunque fra le tecnologie dominanti figura certamente l'analisi vibrazionale. Tuttavia tale tecnologia è limitata al monitoraggio delle condizioni meccaniche mentre l'affidabilità della manutenzione e l'efficienza del macchinario dipendono anche da altri parametri critici. Di seguito verranno analizzate le principali tecniche di manutenzione predittiva.

1.5.7 Analisi vibrazionale

L'analisi vibrazionale è la tecnica di manutenzione predittiva dominante. Infatti si tratta della tecnica di più vasta applicazione in ogni impianto data la natura prevalentemente meccanica di gran parte dell'attrezzatura dell'impianto. Si tratta tipicamente della tecnica che porta ai maggiori benefici dal punto di vista della pianificazione manutentiva. L'obiettivo di questa tecnica è quello di utilizzare le vibrazioni create dall'attrezzatura meccanica o da un generico sistema dell'impianto per determinarne le reali "condizioni di salute". Le tecnologie e strumentazioni utilizzate per questo tipo di analisi sono

ritenute molto affidabili ed efficienti nell'individuazione delle radici di un non corretto funzionamento del macchinario. Tuttavia, gli elevati costi delle attrezzature e le competenze necessarie per l'analisi dei dati ricavati da questo tipo di analisi rappresentano spesso un deterrente per l'applicazione di questa tecnica. Spesso una strategia manutentiva di questo genere viene applicata solo sui macchinari più critici, in modo da giustificare la spesa. Gli ultimi progressi nella tecnologia dei microprocessori, unita alla sempre maggiore competenza industriale rispetto alla diagnostica dei problemi dei macchinari, hanno portato allo sviluppo di modelli manutentivi basati su tale tecnica predittiva che risultano allo stesso tempo efficaci anche dal punto di vista economico. I sistemi basati su questi microprocessori rendono molto semplice l'acquisizione e l'analisi dei dati, rendendoli più accessibili anche ai meno esperti. I sistemi oggi più diffusi a livello commerciale sono in grado di valutare trend temporali e riportare le condizioni meccaniche di tutte le attrezzature analizzate. Attraverso questo programma, è possibile schedulare la manutenzione potenzialmente di tutte le macchine rotanti e alternative. Infatti, è semplice attraverso queste tecnologie riuscire a stabilire una correlazione diretta fra le condizioni meccaniche di un'attrezzatura e i dati vibrazionali rilevati. [7]

L'applicazione di questa tecnica è molto comune per identificare problemi di equilibramento o malfunzionamenti dei supporti. L'ampiezza e la frequenza dei segnali vibrazionali ricavati dai sensori risultano determinanti al fine di determinare l'entità del malfunzionamento e la sua origine.

Di seguito è riportato un esempio degli effetti di un malfunzionamento dei supporti sul segnale vibrazionale di un motore elettrico AC trifase. Il deterioramento delle prestazioni dei supporti passa tipicamente attraverso quattro fasi.

- 1) I supporti funzionano normalmente e non sono danneggiati (Fig.4);
- 2) Compaiono i primi picchi nello spettro delle frequenze relativo al motore, in corrispondenza di specifiche frequenze correlate alla tipologia di malfunzionamento e dette "defect frequencies";
- 3) Appaiono numerosi picchi in corrispondenza di numerose "defect frequencies". La buona prassi impone la sostituzione dei supporti una volta raggiunta questa fase (Fig.5);
- 4) I picchi delle "defect frequencies" scompaiono e sono sostituiti da rumore casuale in corrispondenza della zona delle basse frequenze. Giunti a questo livello, il supporto è a rischio di generare rotture catastrofiche in quanto molto costose in termini di riparazione di componenti danneggiate.

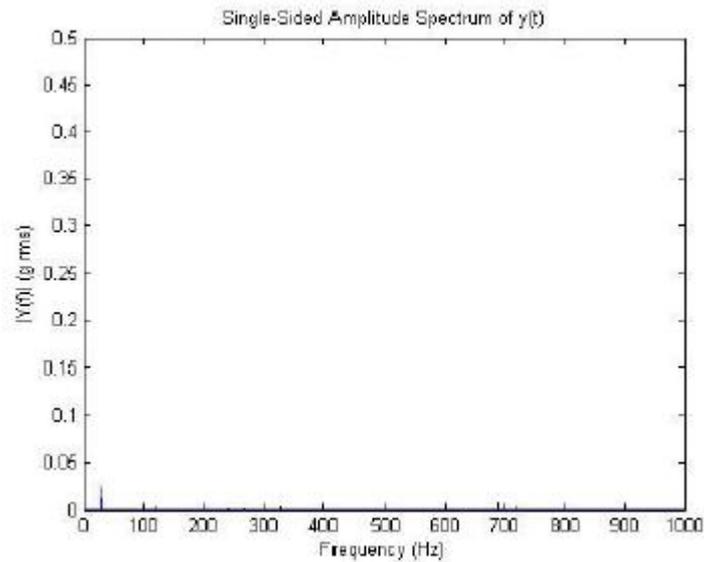


Figura 4: Spettro delle frequenze motore AC trifase con supporti non danneggiati (0-1 kHz)

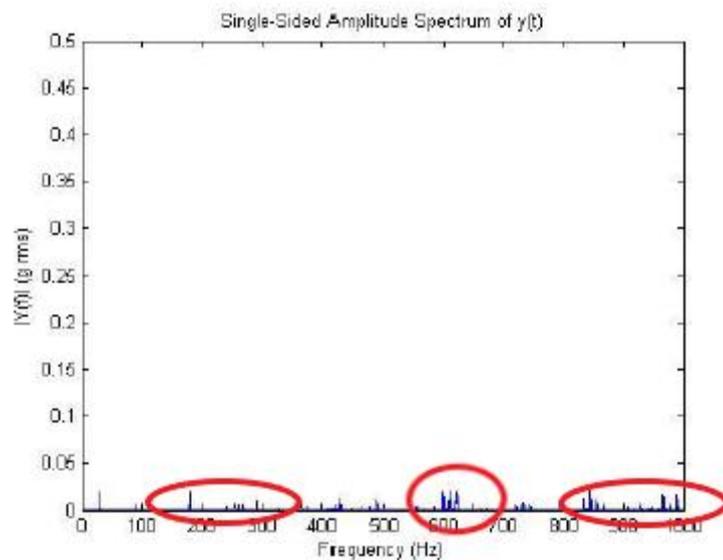


Figura 5: Spettro delle frequenze motore AC trifase con supporti danneggiati (0-1 kHz)

Dal confronto fra le Figure 4 e 5 si ha un'evidente conferma di quanto affermato nell'analisi delle varie fasi di guasto dei supporti. Si nota come nello spettro del motore con supporti danneggiati compaiano numerosi picchi in corrispondenza delle "defect frequencies", le quali non risultano multiple della frequenza di rotazione (in questo caso 30 Hz). [13] I costi fissi necessari per implementare un programma di manutenzioni predittive basato sulle analisi vibrazionali può variare fra gli 8000 e i 50000 €, a seconda delle tecniche specifiche che si decide di implementare. [8]

1.5.8 Termografie

Le termografie rappresentano un'altra tecnica di manutenzione predittiva da utilizzare per il monitoraggio delle condizioni delle attrezzature dell'impianto. Viene utilizzata una strumentazione progettata per monitorare l'emissione di radiazioni infrarosse come la temperatura. In questo modo è possibile individuare anomalie termiche dell'attrezzatura e prevenire incipienti condizioni di guasto. Questa tecnologia è particolarmente adatta per individuare l'eccessivo calore sviluppato da fenomeni d'attrito in componenti meccanici rotanti malfunzionanti. Un classico esempio può essere rappresentato dal malfunzionamento di una valvola di raffreddamento [15]: questo tipo di fenomeno induce un'immediata crescita della temperatura della macchina portando all'avvio di una serie di reazioni a catena come perdite dalle guarnizioni, stop della macchina e grippaggio del motore. Le tecnologie ad infrarossi sono basate sul fatto che tutti i corpi aventi temperatura superiore allo zero assoluto emettono energia o radiazioni. La radiazione infrarossa rappresenta una forma di energia emessa. Le radiazioni infrarosse sono quelle aventi lunghezza d'onda inferiore e sono visibili solo mediante ausilio di specifiche attrezzature. L'intensità delle radiazioni infrarosse emesse da un determinato corpo è direttamente correlata alla temperatura superficiale del corpo stesso. Tuttavia, misurare la temperatura superficiale di uno specifico corpo è complicato attraverso il solo utilizzo di tecnologie ad infrarossi, in quanto verrebbero rilevate tre diverse fonti di energia: quella emessa dal corpo, quella riflessa dal corpo e quella trasmessa dal corpo. Tuttavia, essendo interessante da un punto di vista manutentivo solo l'energia emessa, c'è bisogno dunque di filtrare le radiazioni infrarosse derivanti da riflessione e trasmissione. Un corpo perfettamente emissivo è detto "corpo nero" ed ha un coefficiente di emissione pari ad 1. Questi tipi di superficie non presentano riflessione, ma assorbono tutta l'energia esterna che verrà poi riemessa all'esterno sotto forma di radiazione infrarossa. Le superfici che riflettono le radiazioni infrarosse sono invece note come "corpi grigi" ed il loro coefficiente di emissione è inferiore ad 1. Tale definizione è molto più accurata per la descrizione fisica delle attrezzature presenti in un impianto produttivo. Il coefficiente di emissione reale di molti materiali è tabulato in apposite tabelle che possono fungere da linea guida per poter risalire all'emissività di un macchinario. Le variazioni della superficie della macchina, vernici, rivestimenti protettivi e condizioni dell'ambiente di lavoro possono generare una variazione del reale coefficiente d'emissione del corpo. La misurazione termografica può anche essere influenzata dall'ambiente che si trova fra lo strumento di misurazione ed il corpo. Infatti, gas e vapori sono in grado di assorbire le radiazioni infrarosse. Allo stesso tempo, la rilevazione può essere distorta da polveri e dall'illuminazione. Considerando anche le costanti variazioni dell'ambiente circostante, i dati termografici vanno acquisiti con grandissima cura. Molti sistemi di misurazione ad infrarossi

sono dotati di speciali filtri in grado di isolare gli effetti negativi derivanti dall'attenuazione atmosferica delle radiazioni infrarosse. Tuttavia, è necessaria l'abilità da parte dell'utilizzatore di individuare quali sono i fattori in grado di influenzare la misura ed applicare gli appositi filtri. [7] Dunque, l'applicazione di questo tipo di tecnica richiede la rilevazione di una serie di indicatori ottici all'interno dell'impianto. Gli strumenti di misurazione basati su tecnologie termografiche utilizzano come sensori microbolometri non raffreddati e creano false immagini a colori dette termogrammi, in grado di "mostrare" le radiazioni infrarosse, tipicamente nella regione di lunghezza d'onda compresa fra i 7 e i 14 μm . Attraverso tali strumenti è possibile ottenere uno scanning remoto di grandi aree e di numerosi componenti come interruttori, trasformatori ecc. La rilevazione di elevate temperature può anche essere fondamentale nella rilevazione di difetti nelle attrezzature meccaniche relativi al serraggio dei supporti in motori e pompe oppure blocchi ed intasamenti all'interno di condotte. L'utilizzo di tali tecniche può essere fondamentale per il monitoraggio di condensatori e scambiatori di calore. Il costo dell'applicazione di questo tipo di tecnica dipende da tipo di strumentazione impiegata. [14] Un termometro ad infrarossi ad utilizzo puntuale può avere un costo inferiore ai 1000 €. L'impiego di un sistema ad immagini infrarosse dotato di uno scanner in bianco e nero ma senza memoria interna può arrivare agli 8000 €, mentre un sistema simile ma basato sull'utilizzo di un microprocessore e con immagini a colori può avere un costo superiore ai 60000 €. Tecnologie più avanzate sono in grado di sfruttare principi magnetici oltre ai principi termici. [8]

1.5.9 Tribologia

La tribologia si riferisce allo studio delle dinamiche operative legate alla lubrificazione delle strutture di supporto rotoriche dei macchinari. Esistono numerose differenti tecniche di tribologia applicabili alla strategia predittiva come l'analisi degli oli lubrificanti, le analisi spettrografiche o le ferrografie. L'analisi degli oli lubrificanti è volta alla determinazione delle condizioni degli oli presenti nei macchinari. Attraverso queste analisi è spesso possibile determinare le quantità di elementi chimici, fra cui additivi e particelle contaminanti, presenti nell'olio. Attraverso un'analisi della quantità di particelle metalliche ritrovate in campioni d'olio successivi è possibile riuscire a delineare modelli di usura per il componente e riuscire a stimarne la vita residua. In passato la tribologia si serviva di processi di analisi lenti e costosi, con necessità di impiego di tecniche di laboratorio tradizionali e lavoro specializzato. L'odierna implementazione di sistemi basati su microprocessori permettono di automatizzare le analisi spettrografiche e degli oli lubrificanti, riducendo costi e lavoro manuale. Attraverso queste tecniche è possibile effettuare controlli qualità e determinare l'intervallo di cambio olio più efficiente. I risultati di queste analisi permettono di accertarsi che le condizioni dell'olio in esame rispettino o meno gli standard macchina ed in base a questo decidere se sostituire l'olio o

cambiare tipologia. Le tecniche tribologiche, in quanto tecniche di manutenzione predittiva possono essere utilizzate per programmare gli intervalli di cambio olio, basandosi sulle reali condizioni dello stesso attraverso procedure molto semplici ed economiche come test e campionamenti. Al fine di massimizzare l'efficienza dell'analisi degli oli, occorre che l'analisi sia condotta con un elevato numero di dati, sufficiente per costruire uno storico adeguato. [7]

Uno dei più citati esempi di applicazione delle tecniche tribologiche al fine di migliorare l'efficacia della manutenzione è rappresentato dalla miniera di materiali ferrosi Sishen, situata in Sudafrica. Grazie all'applicazione di tecniche tribologiche è stato lanciato in tale sede un programma "no wear" volto a contrastare gli effetti dei fenomeni di usura dei componenti. Alla base di tale programma è posta la verifica dell'integrità di ogni nuovo fluido. Infatti, qualsiasi tipo di controllo di contaminazione nelle attrezzature perde di significato laddove si vadano ad alimentare le stesse attraverso fluidi in condizioni non accettabili. Per verificare l'integrità di ogni nuovo fluido occorre controllare:

- Livello di pulizia;
- Filtrabilità;
- Degradazione chimica;
- Contenuto di particelle solide. [16]

Al fine di assicurare il rispetto di tali requisiti, vengono avviati processi di controllo qualità degli oli in ingresso, vengono installati filtri nelle linee di alimentazione dei lubrificanti e definite procedure standard per la distribuzione e l'immagazzinamento dei fluidi lubrificati.

Le principali grandezze misurate per i lubrificanti sono:

- Viscosità: misura la resistenza del fluido allo scorrimento;
- Total Acid Number (TAN): misura l'acidità per un dato lubrificante;
- Contenuto di particelle solide: quantifica il contenuto di contaminanti come detriti metallici o materiali di tenuta negli oli;
- Total Base Number (TBN): misura la basicità di un dato lubrificante;
- Contenuto d'acqua: quantifica il contenuto d'acqua per un dato lubrificante.

Una delle più frequenti applicazioni delle analisi tribologiche riguarda gli oli circolanti all'interno di turbine. Attualmente, gli oli di origine fossile stanno lasciando il passo in queste applicazioni agli esteri fosfati sintetici per via della loro stabilità rispetto all'ossidazione. Tuttavia, le proprietà lubrificanti del fluido risultano ridotte e perciò occorre monitorare nel dettaglio la percentuale di

particelle contaminanti. Un'eccessiva presenza di tali agenti può anche causare problemi di surriscaldamento viste le ridotte proprietà di scambio termico degli esteri. Anche valori come la resistività vanno tenuti sotto controllo in quanto valori intorno ai 70 M ohm/m possono causare importanti danni da erosione.

Nelle applicazioni con trasformatori diventa invece fondamentale la sicurezza. Gli oli da utilizzare in tali applicazioni vengono segregati nelle fasi di immagazzinamento e trasporto per evitare la contaminazione con altri oli o acqua. Anche contaminazioni molto piccole con acqua possono alterare le proprietà dielettriche del fluido, fondamentali in questi casi. La composizione chimica dell'olio va meticolosamente controllata con frequenza periodica onde evitare la potenziale formazione di situazioni esplosive. Necessaria anche la misurazione di viscosità e TAN. [17]

Tipicamente il costo fisso per le strumentazioni per le analisi spettrografiche è tipicamente troppo elevato da giustificare una sperimentazione *in-plant*. Il costo di un sistema spettrografico basato su microprocessore varia fra i 30000 e i 60000 €. Per questo molte imprese affidano i loro programmi di manutenzione predittiva su analisi di campioni di olio realizzate da terze parti. Tali analisi hanno un costo decisamente più limitato che può variare fra i 20 e i 150 € per campione (solo in caso di richiesta di analisi più dettagliate o sofisticate). [8]

1.5.10 Ferrografie

Si tratta di una tecnica simile alla spettrografia eccetto per due principali differenze. Innanzitutto, la ferrografia è in grado di individuare la contaminazione di particelle attraverso l'utilizzo di un campo magnetico mentre nella spettrografia viene bruciato un campione. Per questa ragione la ferrografia è efficace solo per l'individuazione di particelle ferrose o magnetiche. Il suo utilizzo risulta dunque particolarmente indicato per misurare la qualità dei lubrificanti utilizzati negli ingranaggi [15]. Inoltre, attraverso la ferrografia, è possibile separare ed analizzare particelle contaminanti di grandezza maggiore di 10 micron, dando così una migliore rappresentazione della contaminazione totale dell'olio rispetto a quella che si può ottenere attraverso un'analisi spettrografica. Questa tecnica spesso non trova elevatissima diffusione per via degli elevati costi delle attrezzature necessarie. Inoltre, raccogliere campioni rappresentativi dell'attuale condizione dell'olio in macchina non è semplice. Il campione, in particolare, potrà essere ritenuto rappresentativo o meno a seconda del punto della macchina da cui esso viene estratto. Ad esempio, in un compressore, un campione d'olio prelevato a valle dell'apposito filtro non potrà essere ritenuto rappresentativo delle condizioni di lavoro dell'olio a monte dello stesso. [8] Per riuscire a realizzare un'efficiente manutenzione predittiva vanno definiti dunque degli standard anche in merito al campionamento. In questi standard

andranno ovviamente definiti anche i punti di prelievo per i campioni in modo che risultino rappresentativi delle condizioni che si intende monitorare. La frequenza di campionamento viene scelto in funzione dell'MTBF relativo a rotture per eccessiva usura. Per macchinari critici si arriva a frequenze di campionamento di 25 ore, ma per la maggior parte delle attrezzature la frequenza è mensile. Se vi sono attrezzature operanti ad elevati carichi, si sceglie in tal caso la frequenza settimanale. Altro limite molto importante relativo a questa tecnica è l'accessibilità dei risultati delle analisi. Spesso tali risultati risultano complicati da interpretare per ingegneri e tecnici.

Vi sono 6 principali tipi di detriti da usura:

- Detriti da sfregamento: Tratti staccatisi casualmente da geometrie di contorno e dotati di superfici lisce. Derivano dai residui delle superfici soggette a sfregamento;
- Detriti da taglio: Particelle lunghe e curve generate da compenetrazioni fra superfici;
- Detriti sferici: Piccole sfere generate da rotture per fatica a rotazione di supporti oppure da erosione per cavitazione. La formazione è spesso associata alle elevate temperature d'esercizio;
- Detriti laminari: Particelle sottili derivanti da tratti staccatisi casualmente da geometrie di contorno. Presentano superfici lisce con frequente presenza di buchi. Si formano dal contatto in rotolamento di un detrito da usura con una superficie;
- Chunk: Particelle grossolane caratterizzate da una superficie regolare e lavorata mentre nelle direzioni ad essa perpendicolari si trovano superfici irregolari e contorno frastagliato. Formate dalla combinazione fra fatica per rotolamento e usura per strisciamento;
- Detriti da strisciamento: Superficie con graffi che si presentano in gruppi di solchi paralleli.

Per aggirare il problema dell'importante background chimico necessario per l'interpretazione dei risultati di questa tecnica, si stanno sviluppando sistemi automatici come l'analisi delle immagini tramite computer. La morfologia dei detriti da usura può infatti spesso essere identificata numericamente attraverso alcuni parametri. Questo purtroppo non è vero per i detriti laminari, i detriti da sfregamento e i chunk che presentano spesso morfologie di contorno molto più complicate. [18]

1.5.11 Analisi del rumore

L'analisi del rumore prodotto da macchinari ed attrezzature durante il corso del loro funzionamento può essere una tecnica molto efficace al servizio della strategia predittiva. Al fine di condurre un'analisi appropriata del fenomeno è opportuno definire un limite inferiore e un limite superiore entro i quali il rumore prodotto dal macchinario può essere ritenuto normale. Il limite inferiore può

essere fissato al rumore prodotto dalla macchina nel corso del suo funzionamento a vuoto, mentre quello superiore sarà rappresentato dal rumore prodotto dalla macchina in fase di produzione. Se il rumore prodotto dalla macchina ha un'intensità inferiore rispetto al limite inferiore settato, si tratta di un segnale allarmante, allo stesso modo di un rumore troppo forte. Ad esempio, in una macchina contenente catene, un rumore troppo basso può essere indice che una o più di queste catene sono disingaggiate o rotte. Questo tipo di approccio può essere decisivo laddove un'ispezione visiva richiederebbe di rimuovere carter e organi di protezione. [19]

1.5.12 Ispezioni visive

Le ispezioni visive rappresentano una delle tecniche di manutenzione predittiva più spesso sottovalutate. Tuttavia, tramite questa semplice operazione non intrusiva si possono ricavare informazioni vitali riguardo le condizioni della macchina. A bassissimo costo si riescono a rilevare in questo modo soprattutto perdite e montaggi errati. Il grosso limite di questa metodologia è che essa genera informazioni qualitative e soggettive, e dunque fortemente dipendenti dall'esperienza e dal background tecnico di chi ispeziona. [15]

Nella seguente tabella sono riassunte le peculiarità delle principali tecniche di manutenzione predittiva.

TECNICA MANUTENTIVA	ITEMS INTERESSATI	COSTI DI IMPLEMENTAZIONE
Analisi vibrazionali	<ul style="list-style-type: none"> • Supporti • Motori • Organi rotanti 	8000 €: 50000 €
Termografie	<ul style="list-style-type: none"> • Valvole • Guarnizioni • Trasformatori • Condensatori • Scambiatori di calore • Organi rotanti 	1000 €: 60000 €
Tecniche tribologiche	<ul style="list-style-type: none"> • Supporti • Turbine • Trasformatori • Organi attraversati da olio 	30000 €: 60000 €

Tabella 2: Confronto fra le principali tecniche di manutenzione predittiva

1.5.13 Esempi di applicazione

Le tecniche di manutenzione predittiva trovano larga affermazione nei più disparati settori produttivi. Uno degli esempi più interessanti è rappresentato dall'applicazione di tali tecniche in campo navale. I componenti strutturali navali si danneggiano tipicamente per fenomeni di fatica, dunque il monitoraggio attraverso tecniche di indagine non distruttiva consente di monitorare con maggiore precisione la tolleranza al danno e la vita residua di ogni componente. Oggi questi tipi di controllo vengono effettuati prevalentemente in fase di assemblaggio, laddove vengono controllate saldature e giunzioni fra le componenti strutturali e gli apparati di propulsione. Le tecniche più utilizzate sono:

- Radiografia: analisi che presenta come limitazione l'accessibilità di entrambe le superfici del componente;

- Magnetoscopia: utilizzata per determinare l'eventuale presenza di cricche all'interno di alberi di trasmissione;
- Liquidi penetranti: utilizzati per verifiche di cricche superficiali in piccoli componenti oppure difetti superficiali nelle saldature;
- Indagini ultrasonore: utilizzate non solo per la verifica di saldature e giunzioni ma anche per verifiche strutturali di componenti critici per la sicurezza come timoni, eliche o alberi di trasmissione. [20]

Attualmente, sono in fase di sviluppo metodologie per l'applicazione della manutenzione predittiva anche in ambito ferroviario. Attraverso analisi geostatiche del terreno e analisi tensionali dei componenti, è possibile infatti sviluppare precisi modelli matematici che permettono di gestire in modo predittivo la manutenzione dei componenti ferroviari (rotaie, deviatori ecc.). In questo modo è possibile tenere in conto l'evoluzione della natura porosa dei materiali coinvolti, della frequenza dei carichi, delle condizioni tensionali e a fatica dei componenti. [21]

1.5.14 La manutenzione migliorativa

La manutenzione migliorativa punta ad intervenire prima del verificarsi di un guasto. Il primo passo è l'individuazione delle cosiddette "radici del guasto", ovvero gli elementi scatenanti dello stesso. La presente strategia mira dunque ad attaccare il problema a livello del primo degrado, ovvero prima ancora che ciò si traduca in condizioni di lavoro degradate del componente e poi in un guasto. Si tratta di una strategia manutentiva profondamente legata non solo a funzioni aziendali come pianificazione e produzione ma anche al rapporto con i fornitori, determinante per ottenere buoni risultati.

La manutenzione migliorativa dà la possibilità di risolvere alcuni problemi con interventi a basso costo ma elevata efficacia e attraverso questa strategia è molto spesso possibile riuscire ad eliminare in modo permanente dei problemi ricorrenti.

Per contro, talvolta questo approccio strategico si rivela inefficiente laddove sia difficile individuare la causa primaria di un guasto. L'implementazione della strategia migliorativa può richiedere importanti azioni di riprogettazione dell'impianto, conducendo dunque ad elevati costi e ad elevati periodi di fermo macchina. Allo stesso tempo, l'introduzione di nuove attrezzature implica l'introduzione di nuove possibilità di guasto. A valle di questo, occorre affermare come ovviamente le soluzioni proposte da questa strategia non sempre possono garantire il raggiungimento dei risultati sperati, nonostante gli elevati costi e complicazioni che esse introducono. [6]

1.5.15 Scelta della strategia manutentiva

La scelta della strategia manutentiva da implementare passa dall'identificazione dei *significant items*. Si tratta di quei componenti il cui fallimento/rottura può causare gravi problemi di produzione o sicurezza. Una volta definiti i *significant items* e i *non significant items* è possibile definire la strategia manutentiva da applicare per ognuno di essi.

- Manutenzione a guasto: applicabile a non significant items oppure a quei significant items la cui condizione è difficile da monitorare o per le quali l'applicazione di una strategia preventiva sarebbe troppo costosa;
- Manutenzione preventiva: da applicare agli items significativi per la sicurezza le cui condizioni non possono essere monitorate.
- Manutenzione predittiva o su condizione: applicabile a tutti i significant items caratterizzati da condizioni operative monitorabili senza eccessivi costi.

Sicuramente fra i principali aspetti da valutare in sede di scelta di una determinata strategia manutentiva figurano dunque i costi. Non è tuttavia semplice analizzare tale aspetto in maniera completa. I costi più semplici da analizzare sono quelli diretti dovuti ai costi di manodopera, consumo energetico, pezzi di ricambio ecc. Oltre a questi costi vengono però spesso trascurati i costi indiretti ovvero quelli associati ad ogni inefficienza di impianto. Tali costi includono mancata produzione, scarti, capacità produttiva insufficiente o danni di immagine e sono spesso delle fonti di costo difficili da valutare. Un errore comune da parte delle aziende è quello di risparmiare sui costi diretti della manutenzione, andando però in questo modo a pesare sui costi indiretti che risultano però appunto molto difficili da valutare e rintracciare nonostante in realtà rappresentino innegabilmente un danno per il business. [22]

Una delle strategie più adottate a livello aziendale è la Reliability Centered Maintenance, una metodologia volta a rendere razionale la manutenzione basandosi su "dati certi". I principi cardine di questa strategia sono:

- Utilizzo dell'esperienza acquisita ma accompagnato da una sistematica verifica di tutte le assunzioni;
- Applicazione di strategie di manutenzione preventiva basata su criteri affidabilistici;
- Analisi logica delle decisioni finalizzate a prevenire laddove possibile gli interventi correttivi.

L'RCM si dimostra molto utile all'aumentare della complessità dell'impianto. Gli indicatori della metodologia RCM permettono un immediato riscontro relativo a guasti e costi di ogni macchinario,

permettendo di gestire dunque al meglio gli interventi manutentivi e la produzione. Uno degli esempi che è possibile citare in merito è tratto dal progetto Europeo CRAFT Tomas [25] e riguarda l'applicazione della RCM in una fonderia francese. Uno dei risultati più significativi ottenuti a valle di quest'analisi riguarda una revisione delle gerarchie degli interventi manutentivi: a valle di un approccio logico applicato alla manutenzione si è notato come determinati interventi sino ad allora messi in secondo piano si sono dimostrati in realtà molto più importanti e dunque da ritenere prioritari. L'implementazione della RCM ha inoltre consentito di monitorare più da vicino determinati indicatori tecnici di produzione e basare le scelte manutentive su tali valori. [23]

Una volta effettuata la scelta strategica relativa alla manutenzione è poi possibile valutare in modo concreto se la gestione della manutenzione è più o meno efficiente, attraverso alcuni indicatori.

$$\frac{\text{Costi diretti di manutenzione}}{\text{Valore aggiunto della produzione}} \quad (7)$$

Laddove i costi diretti di manutenzione comprendono i costi di manodopera, materiali e dei lavori esterni mentre il valore aggiunto della produzione è calcolato come differenza fra il costo della produzione e il costo dei materiali grezzi. Il valore di questo rapporto è compreso fra 10 e 11 per gli impianti del settore meccanico.

$$\frac{\text{Costi diretti di manutenzione}}{\text{Costi di sostituzione dei componenti}} \quad (8)$$

Il valore di questo rapporto è compreso fra 12 e 13 per gli impianti del settore meccanico.

$$\frac{\text{Downtime della linea dovuto ad accidentali}}{\text{Ore teoriche di produzione calcolate su base annuali}} \quad (9)$$

Il valore di questo rapporto è compreso fra 10 e 11 per gli impianti del settore meccanico. [24]

1.5.16 L'utilizzo di IoT in manutenzione

La manutenzione degli asset produttivi dunque si sta evolvendo in modo da rendere questa funzione aziendale il più efficiente possibile. Ciò non sarebbe ovviamente possibile se alla base non ci fosse un'importante evoluzione tecnologica. Il Transparency Market Report valuta la crescita di questo mercato stimando un passaggio dai 2 ai 6,5 miliardi di euro, nel periodo fra il 2013 e il 2019. La strategia manutentiva che maggiormente può beneficiare di tale progresso tecnologico è sicuramente la predittiva. Tale strategia presenta potenzialità notevolmente maggiori attraverso l'implementazione di queste tecnologie. Infatti, lo stato di degrado del componente e la vita residua del componente

possono essere determinati in maniera molto più accurata attraverso l'utilizzo di precisi modelli matematici. Inoltre, la disponibilità di nuovi strumenti può permettere di trovare nuovi servizi a valore aggiunto da affiancare all'offerta tradizionale. Fondamentale è la disponibilità di dati in tempo reale riguardanti lo stato di macchinari, dispositivi e impianti: grazie alla grande velocità di reazione e alla diagnostica strumentale via Internet, i sensori applicati sui macchinari possono sensibilmente ridurre i costi degli interventi manutentivi, eliminando possibilmente ogni tipo di manutenzione a guasto. Il servizio di monitoraggio in tempo reale dell'impresa, potrebbe inoltre anche essere rivenduto a terzi, rappresentando così un'attività a valore aggiunto. I segnali registrati dai sensori devono inoltre essere correttamente interpretati ed integrati con la piattaforma software adibita alla manutenzione aziendale. I segnali vengono interpretati anche grazie alle tecniche di *machine learning* che sfruttano tecniche tipiche dell'intelligenza artificiale per modellizzare sistemi non lineari di difficile interpretazione, utilizzati per la modellizzazione del funzionamento dei macchinari. Per garantire tutto questo, l'azienda deve focalizzare la propria attenzione sull'infrastruttura di rete relativa a sensori e storage di informazioni. [26] Tali attività possono essere portate a termine in maniera notevolmente più efficace attraverso le ultime innovazioni legate al cloud computing, big-data e Internet of Things. Il concetto di Internet of Things può essere descritto come un sistema di connettività intelligente finalizzato a permettere la comunicazione fra i vari dispositivi tecnologici. Il passo principale è l'utilizzo di una piattaforma IoT in grado di raccogliere dati da differenti attrezzature. L'obiettivo è la creazione di un sistema di manutenzione predittiva avanzato e basato su piattaforme cloud. Per permettere la trasmissione di grandi moli di dati è necessario impiegare sistemi di comunicazioni molto veloci che leghino il sensore alla storicizzazione, scopo per cui possono essere adoperate le attuali reti Ethernet industriali. Attraverso questi progressi tecnologici è possibile anche immaginare una remotizzazione della manutenzione. A valle di derive rilevanti di determinate variabili d'impianto può scattare un'opportuna allarmistica, a valle della quale avviene l'intervento manutentivo in remoto, che anticipa il guasto evitando l'interruzione della produzione. Il più grande svantaggio dell'utilizzo di tecnologie IoT è la difficoltà di riuscire a connettere macchinari industriali tradizionali con piattaforme web. Alcune ricerche scientifiche [27] presentano un metodo per superare questo problema, attraverso un'integrazione fra dispositivi e software basata su nuove procedure di traduzione di differenti linguaggi dei macchinari industriali in protocolli web. L'introduzione di un importante apparato di sensoristica a livello industriale introduce un'importante problematica riguardante l'affidabilità di tali sensori. In sistemi critici per la produzione o la sicurezza laddove sia previsto l'utilizzo di sensori, vengono introdotti software e hardware ridondanti in modo da assicurare che il breakdown del sensore non abbia alcun effetto sul funzionamento del sistema. Alcune nuove ricerche scientifiche [28], propongono inoltre specifici modelli matematici in grado di stimare con

accuratezza, per sensori di pressione, il grado di invecchiamento del sensore in base alla rilevazione dei regimi operativi e dei sovraccarichi sopportati dallo stesso. Adoperando simili metodologie con tutte le tipologie di sensori è possibile immaginare di conferire grande affidabilità a tutto l'impianto sensoristico e dunque poter applicare in maniera efficace e credibile una strategia di manutenzione predittiva.

1.5.17 Analisi delle modalità di guasto

Un guasto è un danno permanente in un sistema o in un impianto, non eliminabile con i mezzi a disposizione, senza effettuare la fermata del sistema o dell'impianto stesso.

I guasti possono derivare da numerosissime differenti cause producendo altrettanti differenti effetti: per questa ragione è necessario condurre delle analisi volte a classificare tali guasti.

Condizione necessaria ai fini di una corretta analisi dei guasti è il possesso della conoscenza completa delle caratteristiche di ogni singolo componente del prodotto, in ogni fase del suo ciclo di vita, e la traduzione di tali caratteristiche in specifiche tecniche. Tale conoscenza è fondamentale per garantire una corretta classificazione delle diverse tipologie di guasto, conferendo maggiore priorità a quei guasti che hanno un maggiore impatto potenziale sulla qualità del prodotto.

Si può certamente considerare buona norma in ambito aziendale implementare un'analisi del rischio di guasto. Si tratta di uno studio semplificato volto a scomporre in unità elementari i macchinari e le linee di trasferimento che ad essi fanno capo per condurre un'analisi su ciascuna di tali unità. Lo studio si concentra sull'analisi delle linee ritenute significative (ovvero critiche per la qualità del prodotto, per la stabilità del processo o per potenziale pericolosità), e parte dalla definizione della funzionalità di ogni singolo componente al fine di avere l'esatta conoscenza di quali possano essere le conseguenze potenziali a valle di un guasto dello stesso.

La visione d'impresa oggi dominante sullo scenario mondiale propone obiettivi di produttività e di efficienza sempre più ambiziosi al fianco dei quali vengono imposti tuttavia vincoli di sicurezza altrettanto sfidanti e stringenti. L'affidabilità diviene dunque aspetto centrale nella vita dell'azienda causando una crescita di sensibilità e di conoscenze in merito da parte di tutte le figure aziendali.

L'industria di processo rispetto alla classica industria manifatturiera deve far fronte a un'ulteriore difficoltà in merito al problema dei guasti. La maggior parte dei guasti in un'azienda legata alla produzione in serie sono legati al fenomeno dell'usura e dunque alla variabile tempo. Analizzando i guasti allo stesso modo in un contesto legato all'industria di processo significherebbe trascurare la componente umana e quella processuale. Infatti, all'interno di queste realtà, si nota che la maggior

parte dei guasti avviene anzitempo ad esempio per via di erosioni o danneggiamenti causati da manovre errate o da temperature e pressioni troppo elevate.

Un approccio basato su uno studio approfondito dei guasti permette una lucida presa di coscienza sulle conseguenze derivanti da ogni singolo guasto e dunque un'oculata scelta su che tipo di strategia manutentiva adottare per ogni componente e per ogni macchinario a seconda di quanto esso risulti critico.

Si stima che adottando un corretto piano manutentivo studiato su base affidabilistica si possa prolungare la vita utile dell'impianto anche del 30%. [2]

1.5.18 La Total Productive Maintenance (TPM)

Uno dei concetti più innovativi relativi alla teoria della manutenzione è quello di *manutenzione produttiva*. Con questo termine si intende "l'insieme di azioni volte alla prevenzione, al miglioramento continuo ed al trasferimento di funzioni elementari di manutenzione al conduttore dell'entità, avvalendosi del rilevamento di dati e della diagnostica sull'entità da mantenere" [3].

Essa dunque si fonda su alcuni principi fondamentali:

- Prevenzione mediante il monitoraggio dei segnali deboli;
- Miglioramento continuo;
- Manutenzione autonoma;
- Attività di piccoli gruppi interfunzionali.

Uno dei risultati più interessanti ottenibili a valle di questo tipo di approccio è l'abbandono di mentalità settoriali da parte delle singole funzioni aziendali, proprio attraverso l'attivazione di gruppi interfunzionali e dunque non legati unicamente ad una singola funzione.

La definizione di questo tipo di approccio deriva dall'esperienza e ha dato forma alla teoria giapponese della *Total Productive Maintenance* (TPM). L'obiettivo della TPM è quello di massimizzare affidabilità ed efficienza dei macchinari rendendo l'intera popolazione aziendale responsabile delle attività manutentive. Attraverso la responsabilizzazione di tutte le risorse aziendali in merito al tema della manutenzione, essa non sarà più compito esclusivo dei soli manutentori e ciò conduce ad una gestione manutentiva sempre più continuativa e tempestiva.

Per coinvolgere l'intera popolazione aziendale è necessario che tutti gli operatori seguano training mirati al miglioramento delle loro competenze tecnico/gestionali relative alla manutenzione.

Fra gli obiettivi della TPM figura anche la riduzione dei ritardi di messa in opera delle nuove apparecchiature. Ciò può essere ottenuto attraverso una progettazione mirata delle apparecchiature che miri a semplicità e funzionalità in modo da ottimizzare costi e utilizzazione dei macchinari. [3]

1.5.19 La pianificazione degli interventi manutentivi

La pianificazione degli interventi manutentivi è una delle attività più complesse dell'intera realtà produttiva. Essa rappresenta la traduzione delle strategie manutentive che si intendono applicare in una sequenza di attività pratiche da realizzare concretamente sull'impianto nel corso della settimana. Tale attività è resa complessa in particolare dal fatto che in un impianto moderno non può esistere una sola strategia manutentiva attiva e dunque il piano manutentivo deve riuscire a far coesistere interventi manutentivi figli di strategie fra loro differenti se non contrastanti fra di loro. Tuttavia, si deve tenere presente, che la manutenzione a guasto deve sempre godere della priorità più elevata fra le quattro principali strategie manutentive enunciate, proprio perché si tratta della strategia che deve tempestivamente intervenire laddove sorgono necessità manutentive non previste.

Per quanto riguarda le strategie "periodiche" si deve sempre tenere presente come esse possano migliorare manutenibilità e durata ma non possono evitare il fisiologico decadimento delle prestazioni delle attrezzature nel tempo dovuto all'usura. Ne consegue, che l'usura lavora costantemente su qualsiasi componente dei macchinari produttivi e dunque strategie manutentive come la preventiva e la predittiva, che puntano ad intervenire in anticipo rispetto al guasto, devono meticolosamente definire una precisa logica d'intervento basata su un preciso modello di usura. Gli approcci possibili sono differenti:

- 1) **Primo approccio:** adottare il tempo trascorso come misura dell'usura. Il numero di cicli fatti da un organo rotante, il numero di pezzi fatti e molte grandezze tipiche della produzione sono legate a doppio filo con il tempo trascorso. Tuttavia, esiste anche un insieme di variabili che incidono sull'usura ma non sono correlabili al tempo.
- 2) **Secondo approccio:** effettuare controlli sull'attrezzatura a frequenza temporale determinata. A seconda dei risultati ottenuti da tale controllo si può scegliere di programmare l'intervento manutentivo oppure di intensificare/diradare i controlli sull'equipment. Si tratta di una delle principali applicazioni pratiche dei principi della Total Productive Maintenance, in quanto attraverso questo approccio è possibile coinvolgere attivamente l'intero personale della produzione nelle attività manutentive. Questo approccio raggiunge la sua massima efficacia laddove sia possibile misurare univocamente il *segnale debole* sull'attrezzatura, ovvero una determinata condizione di lavoro premonitrice di un imminente degrado delle prestazioni. [5]

1.5.20 La programmazione degli interventi manutentivi

Per inquadrare il problema della programmazione è utile sintetizzare la situazione che si ritrova tipicamente in ambito aziendale:

- Manutenzione e produzione fanno programmazione congiunta solo riguardo le attività soggette a controlli di legge;
- Le funzioni di gestione manutentiva sono in grado per ogni componente di scegliere la strategia manutentiva, le frequenze ed il personale necessario. Inoltre, tempi e costi degli interventi sono perfettamente noti come anche la necessità di effettuare o meno l'intervento a linea ferma;
- La Produzione ha ben precisi piani e fermate programmate. Fra questi spesso si inserisce un'attività condivisa con la manutenzione ovvero la taratura periodica degli strumenti. Tale attività dovrà essere tenuta in conto anche in fase di redazione del piano manutentivo;
- Non sempre le condizioni di processo consentono il rispetto delle fermate programmate in termini di data e/o durata.
- La manutenzione non riesce a saturare i tempi morti. Raggiungere il 100% di efficienza di pianificazione delle attività manutentive è pressoché impossibile, dove con efficienza di pianificazione si intende il rapporto fra gli slot di lavoro pianificati per i manutentori e gli slot totali disponibili. [5]

1.5.21 Linee guida della programmazione

Da letteratura si possono individuare delle preziose linee guida per una ottimale programmazione degli interventi manutentivi:

- 1) **Selezionare i paletti:** Alcune attività manutentive, come quelle soggette a controllo per legge, sono da inserire con priorità nel piano manutentivo rispetto a qualsiasi altro tipo di attività pianificata;
- 2) **Evitare fermate per sola manutenzione programmata normale:** è preferibile se possibile sfruttare i fermi dettati da esigenze primarie come ad esempio i sopra citati controlli di legge;
- 3) **Saturare la “manutenzione opportunistica”:** i fermi dettati dalla produzione come ad esempio i cambi campagna o i lavaggi periodici sono slot temporali ideali da sfruttare per effettuare interventi manutentivi a macchina ferma. Il concetto di “manutenzione opportunistica” è basato sulla convenienza dell'eventuale prolungamento della fermata tecnologica laddove sia necessario;

- 4) **Verificare la registrazione dei lavori di automanutenzione:** i lavori di “automanutenzione” ovvero quelli eseguiti in autonomia dagli operatori devono essere puntualmente segnalati, in modo da avere una panoramica attendibile e aggiornata delle “condizioni di salute” dell’equipment;
- 5) **Assicurare il rispetto dei programmi di fermata:** non è raro che alcune fermate programmate possano saltare, ad esempio per necessità di produzione, tuttavia bisogna evitare che ciò accada con frequenza troppo elevata. Se ciò accade, sta a significare che probabilmente il piano manutentivo in essere non è praticabile e va rivisto.

Il risultato finale di questo processo è la pianificazione macchina per macchina, formato da un elevato numero di attività elementari, caratterizzate dalle più disparate frequenze. Tale piano va messo in pratica spalmando le attività sul calendario e dunque nel pieno rispetto di paletti, turni, festività, fermate programmate ecc. Si deve dunque realizzare una calendarizzazione ottimale ed attendibile che può anche servirsi di strumenti automatici e appositi software. [5]

1.5.22 Alcuni cenni sulla pianificazione in PMI MTB

A valle dell’analisi teorica delle diverse tipologie di strategia manutentiva applicabili e della loro pianificazione e programmazione, può essere interessante un confronto con l’applicazione pratica quotidiana di tali concetti nella realtà produttiva. Il confronto è stato fatto ovviamente sfruttando l’esempio dello stabilimento Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna, nel reparto Primary. Il macroprocesso preso in considerazione è quello del Dryer, ovvero una linea produttiva in continuo formata da numerose differenti macchine ed attrezzature, che ha come scopo quello di essiccare il prodotto portandolo dallo stato liquido allo stato solido, per poi avvolgerlo ed inviarlo in forma di bobine al successivo macroprocesso. Alcune di queste attrezzature sono state prese in esame per confrontare gli interventi di manutenzione previsti da letteratura per tali attrezzature con quelli che in realtà vengono applicati.

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva	Freq.reale
Motore elettrico	rottura cuscinetti	lubrificazione	non applicabile perché lubrificati a vita		X			
		analisi vibrazionale	3 mesi (dipende dai carichi in gioco)				X	
		termografia	3 mesi				X	6 mesi
	corto circuito	verifica curva polarizzazione	6 mesi				X	
		verifica isolamento elettrico	6 mesi				X	

Tabella 3: Interventi manutentivi su motori elettrici

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva	Freq.reale	
Motoriduttori traino dryer	rottura cuscinetti motore	lubrificazione	non applicabile perché lubrificati a vita		X				
		analisi vibrazionale	3 mesi (dipende dai carichi in gioco)				X		
		termografia	3 mesi				X	6 mesi	
	corto circuito	verifica curva polarizzazione	6 mesi				X		
		verifica isolamento elettrico	6 mesi				X		
	rottura cuscinetti all'interno del riduttore	lubrificazione	sostituz. olio a tempo o tramite analisi tribologica				X	X	
		lubrificazione	verifica perdite e controllo livello		X				
		analisi vibrazionale	3 mesi (dipende dai carichi in gioco)					X	
		termografia	3 mesi					X	6 mesi

Tabella 4: Interventi manutentivi su motoriduttori traino Dryer

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva	
Nastro trasporto	rottura cuscinetti rulli	lubrificazione	non applicabile perché lubrificati a vita		X			
		analisi vibrazionale	3 mesi (dipende dai carichi in gioco)				X	
		termografia	3 mesi				X	
	rottura nastro stesso	verifica centratura	6 mesi	X				
		verifica qualità gomma / integrità	3 mesi	X				
		verifica tensionamento	6 mesi	X				
	rottura guide supporto nastro	controllo stato usura guide	3 mesi	X				
	rottura cuscinetti all'interno del riduttore	lubrificazione	sostituzione olio a tempo o tramite analisi tribologica				X	X
			verifica perdite e controllo livello		X			
		analisi vibrazionale	3 mesi (dipende dai carichi in gioco)					X
		termografia	3 mesi					X

Tabella 5: Interventi manutentivi nastro di trasporto

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva	Freq.reale
centraline di comando	perdita rete profibus	controllo stato integrità cablaggi	6 mesi	X				
		controllo serraggio connettori	6 mesi	X				
		controllo resistenza chiusura circuito	6 mesi	X				
	perdita aria	verifca perdite	6 mesi	X				3 mesi
	valvole ritegno	verifica tenuta	6 mesi	X				3 mesi
pistoni / attuatori	perdite	verifca perdite	6 mesi	X				3 mesi
	integrità stelo	verifca perdite	6 mesi	X				3 mesi
	integrità anelli di tenuta	verifca perdite	6 mesi	X				3 mesi
micro di posizionamento	verifica del corretto fissaggio	verifca perdite	6 mesi	X				3 mesi

Tabella 6: Interventi manutentivi centraline, pistoni e micro

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva
Quadri elettrici	surriscaldam. connessioni potenza	verifica tensionamento bulloneria	6 mesi inizialmente poi 1 anno	X			
		anali termografica a quadro aperto	1 anno				X
	surriscaldam. interno cabinet	verifica funzionamento sistema ricambio aria	6 mesi	X			
		sostituzione filtri aspirazione aria	6 mesi	X			
	contatti interni / polvere che a lungo andare danneggia i teleruttori	pulizia interna quadro elettrico	1 anno		X		

Tabella 7: Interventi manutentivi quadri elettrici

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva
valvole manuale vapore	perdita capacità di tenuta	verifica tenuta a chiusura	6 mesi	X			
valvole automatiche	perdita capacità di tenuta	verifica tenuta a chiusura	6 mesi	X			
	corretto PID apertura chiusura	verifica aprendo parzialmente (25 - 50 - 75 -100%)	6 mesi	X			
piping	perdite guarnizioni	controllo visivo	3 mesi	X			

Tabella 8: Interventi manutentivi su valvole

Componente	Modo di guasto	Check - controlli	Frequenza	Visual inspect.	Rottura	Preventiva	Predittiva	
Centralina idraulica tensionamento nastro	intasamento filtro	controllo delta P	mensile	X				
	rottura / perdita efficienza pompa ad ingranaggi	verifica pressione esercizio	3 mesi	X				
	deviazione capacità di regolazione valvola proporz.	verifica corretta risposta sistema / corretta regolazione	3 mesi	X				
	perdite olio	check visivo	3 mesi	X				
	perdita capacità	sostituzione olio		24 mesi			X	
		controllo tribologico		6 mesi				X
	rottura cuscinetti motore	lubrificazione		non applicabile perché lubrificati a vita		X		
		analisi vibrazionale		3 mesi (dipende dai carichi in gioco)				X
		termografia		3 mesi				X
	corto circuito elettrico /	verifica curva polarizzazione		6 mesi				X
		verifica isolamento elettrico		6 mesi				X

Tabella 9: Interventi manutentivi su centralina idraulica tensionamento nastro

Negli esempi riportati nelle Tabelle 3-9 è possibile osservare quali siano gli interventi manutentivi da effettuare su alcuni macchinari ed attrezzature secondo letteratura e le relative frequenze. Tali interventi sono stati oggetto di confronto con le reali pratiche manutentive per determinare quanto queste ultime fossero aderenti a quelle previste secondo letteratura.

Per ogni attrezzatura, appaiono su sfondo giallo gli interventi manutentivi effettivamente applicati mentre su sfondo bianco quelli che invece non vengono applicati. Si può notare che gli interventi prescritti da letteratura vengono in gran parte effettuati anche in pratica, tuttavia vi sono alcuni interventi che vengono effettuati con frequenza differente, o non effettuati affatto. Questo avviene in quanto a partire dall'esperienza di usura dei macchinari dell'impianto, tali interventi vengono valutati inutili o troppo costosi.

Lo studio degli interventi manutentivi applicati sulle varie attrezzature sarà determinante per l'individuazione del caso di studio, come si vedrà nel capitolo 5.

2. L'azienda

Il presente lavoro di Tesi ha preso forma durante un tirocinio curriculare svolto dal candidato presso Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna S.p.A., stabilimento facente parte del gruppo Philip Morris International. Philip Morris International, azienda leader nel settore, possiede 6 dei 15 principali marchi di sigarette (fra cui Marlboro, il numero 1 al mondo) e ha 46 sedi operative in 32 Paesi del mondo. [2]

2.1 Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna

Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna S.p.A. (PM M&TB), precedentemente nota come Intertaba S.p.A., è il sito produttivo e centro di eccellenza di Philip Morris International (PMI) a livello mondiale per la prototipazione, la produzione su larga scala e la formazione del personale per tutto ciò che concerne i prodotti a potenziale rischio ridotto (RRPs) e per i filtri ad alto contenuto tecnologico. Già attiva con la sua sede produttiva a Zola Predosa (Bologna) dal 1963, nel settembre 2016 l'azienda ha ampliato la sua presenza sul territorio emiliano con l'apertura del nuovo stabilimento produttivo nel Comune di Valsamoggia (Bologna). Costruito nell'area industriale di Crespellano, è il primo stabilimento al mondo per la produzione su larga scala di prodotti senza fumo, tra cui gli HEETS o HeatSticks per il dispositivo elettronico IQOS, che l'azienda sta commercializzando in più di 40 Paesi.



Figura 6: Polo produttivo PM MTB di Crespellano

Lo stabilimento è il frutto di un investimento di circa 1 miliardo di euro e ha consentito dal 2014 la creazione di circa 1200 nuovi posti di lavoro rappresentando uno dei più grandi impianti produttivi costruiti ex novo in Italia dal dopoguerra ad oggi.

L'impianto soddisfa la domanda internazionale di più di 40 Paesi dove IQOS è attualmente commercializzato e si pone come "lead site" tra i 46 stabilimenti produttivi di Philip Morris International presenti nel mondo. Philip Morris Manufacturing & Technology Bologna è infatti il centro produttivo in cui vengono definiti i processi industriali per la produzione dei prodotti senza fumo, il cui know-how viene successivamente trasferito alle altre affiliate produttive del gruppo Philip Morris International.

Gli sticks di tabacco prodotti in PMMTB sono caratterizzati da una composizione e da un processo produttivo differenti rispetto ad una sigaretta tradizionale. Gli sticks vengono infatti inseriti in un apposito dispositivo elettronico, prodotto e distribuito da PMI e che prende il nome di *IQOS* (Fig.2), il quale permette di riscaldare e non bruciare il tabacco contenuto producendo grazie alla *HEATCONTROL*TM Technology (Fig.8), un aerosol di vapore che restituisce all'utilizzatore il gusto del vero tabacco.



Figura 7: Dispositivo IQOS

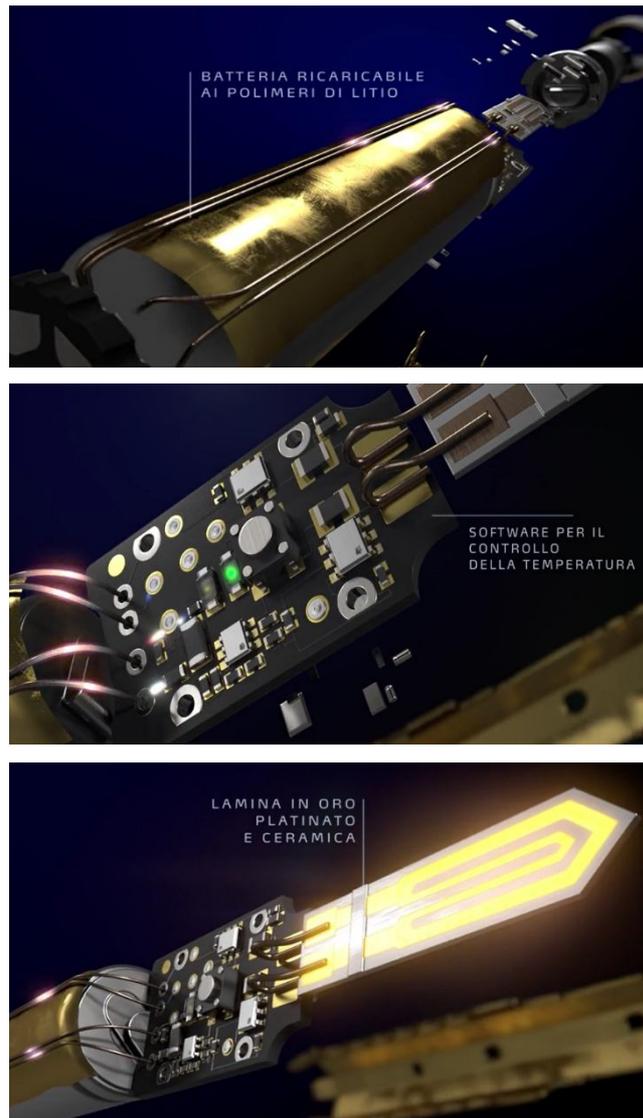


Figura 8: HEATCONTROL Technology

Lo stabilimento PM MTB di Crespellano si divide in due aree produttive principali ovvero il Primary e il Secondary. Nel primo vi è un processo di lavorazione a partire dalla foglia di tabacco, mentre nel secondo avvengono i processi di confezionamento e inscatolamento, in maniera molto simile a quanto già avveniva nelle tradizionali aziende del tabacco. [2] [29]

3. La manutenzione in PM MTB

Lo stabilimento PM MTB è operativo 24 ore al giorno per 320 giorni all'anno. La gestione della funzione manutentiva risulta dunque tutt'altro che semplice ed è affidata ad una squadra di ingegneri, la quale ha il compito di coordinare le squadre di manutenzione operanti su differenti turni.

La gestione del magazzino è coadiuvata da un software di MRP. Attraverso l'utilizzo di un software non solo si è in grado di tenere traccia della disponibilità di ogni singola risorsa a magazzino, ma possono essere impostati parametri fondamentali per ogni singolo componente come il livello di riordino e la quantità massima stoccabile. La definizione di tali parametri spetta alla squadra di ingegneria e risulta molto complicata. Infatti, il tabacco non è un materiale di semplice lavorazione in quanto le sue caratteristiche fortemente abrasive sono causa di veloce usura anche per l'acciaio inossidabile. La definizione di questi parametri risulta maggiormente corretta laddove gli ingegneri posseggano notevole esperienza nell'industria del tabacco. La gestione del magazzino attraverso software consente una tracciabilità completa per ogni acquisto fatto e permette di automatizzare questa procedura basandosi su uno storico dati e sul lead time del fornitore.

Le attività della manutenzione vengono schedate in completo accordo con i piani della produzione. Ciascuna delle linee produttive ha determinati fermi pianificati da rispettare, in concomitanza dei quali vengono pianificati gli interventi manutentivi che richiedono un fermo della linea dando ovviamente precedenza a quelli maggiormente prioritari. Per quanto riguarda gli interventi che non necessitano un fermo della linea per essere portati a termine essi godono di maggiore flessibilità per la loro pianificazione e come vincoli da rispettare hanno la disponibilità dei pezzi di ricambio e del personale di manutenzione. Una volta ultimata la pianificazione settimanale degli interventi manutentivi, essa viene riportata sulla Maintenance Dashboard (fig.9), utile a fornire una visione chiara a tutte le figure coinvolte e ad apportare modifiche in maniera rapida laddove necessario.

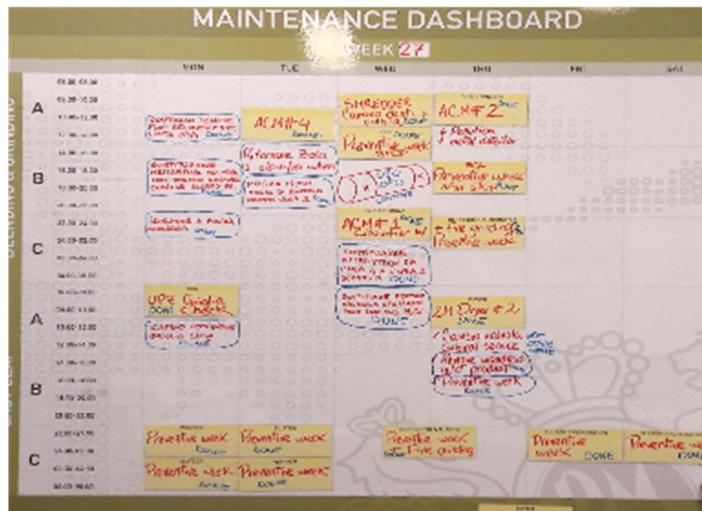


Figura 9: Maintenance Dashboard

Gli interventi manutentivi possono essere molto vari: da sostituzioni pianificate e regolazioni sino a semplici analisi tecniche sul campo volte all'applicazione di migliorie operative o processuali dei macchinari.

PMI ispira il proprio modello aziendale alle filosofie produttive giapponesi. Per quanto riguarda la produzione, l'azienda si ispira ai principi della Lean Production e dunque punta sistematicamente alla riduzione degli sprechi, all'efficientamento dei processi e all'ordine e pulizia del luogo di lavoro. Riflesso diretto di questo tipo modus operandi è la riduzione degli sprechi e dunque dei costi legati alla produzione.

La manutenzione in PMI è invece basata sui principi della Total Production Maintenance (TPM) che focalizza anch'essa le proprie attività sull'efficientamento della produzione. Il pilastro imprescindibile alla base di questa filosofia è l'importanza del coinvolgimento degli operatori nelle attività di manutenzione. Questo principio mira alla riduzione dei costi della manutenzione attraverso la responsabilizzazione degli operatori di processo allo svolgimento delle operazioni di pulizia e di manutenzione di base dei macchinari, attività che vengono dunque sgravate dal carico di lavoro del personale di manutenzione. Inoltre, la TPM prevede che, in concomitanza col riscontrarsi frequente di un problema su un macchinario, non sia sufficiente la risoluzione del guasto ma occorra aprire un Focus Improvement legato a tale problematica e volto all'identificazione della radice del problema in modo da scongiurare che esso si presenti nuovamente. [2]

4. Il nuovo approccio organizzativo: Open+

Strettamente legata alla scelta ed applicazione delle strategie di manutenzione risulta essere l'introduzione del nuovo modello organizzativo aziendale che prende il nome di Open+. Si tratta di una struttura organizzativa nata per interfacciarsi in maniera integrata sia con la produzione che con la manutenzione al fine di prevenire guasti ed emergenze evitando che essi si presentino.

Gli strumenti adottati per realizzare questo risultato sono:

- Programmazione sistematica delle attività di produzione e manutenzione;
- Standardizzazione di parametri e operazioni;
- Costante scambio bidirezionale di informazioni con il personale a macchina.

Quotidianamente questa struttura organizzativa monitora i KPI della produzione e li confronta con i risultati pianificati al fine di monitorare l'andamento della produzione e di spingerla verso risultati ambiziosi. A valle dell'analisi dei dati lo scopo giornaliero di Open+ è:

- Rivedere l'esecuzione degli standards per ottenere i risultati pianificati;
- Sviluppare un piano d'azione per eliminare le perdite più significative;
- Identificare nuovi standards per prevenire il verificarsi di scarti.

La struttura di Open+ è fondata su 3 figure formanti la cosiddetta "Line Structure". Questa struttura ha una funzione di supporto nei confronti di operatori e tecnici consistente nella creazione e sviluppo di standards utili a una conduzione il più possibile efficiente della produzione. I ruoli in questione sono:

- Line Leader: ha il compito di definire le priorità del Team e ha la responsabilità sul personale e sui risultati quotidiani della linea;
- Maintenance Leader: ha il compito di minimizzare gli stop non programmati attraverso le conoscenze tecniche;
- Process Leader: ha il compito di condurre l'analisi dei dati della produzione ed elaborare gli standard utili ad ottimizzare la conduzione dei macchinari.

4.1 I KPI di Open+

Come spiegato precedentemente, una delle fasi fondamentali che guidano l'operato giornaliero di Open+ è l'analisi dei dati della produzione. Esistono alcuni indici considerati cruciali per il monitoraggio della produzione, ovvero i cosiddetti KPI. Per ciascuno di essi viene definita a priori

una soglia minima o massima da soddisfare ogni giorno con i dati reali della produzione. Laddove questo non avvenga, vengono immediatamente intraprese azioni correttive che vengono considerate come assolutamente prioritarie.

Uno dei principali intenti alla base di questa struttura organizzativa è quello di abbassare l'Unplanned Downtime a favore del Planned Downtime. Si tratta dei tempi di fermo linea, rispettivamente non pianificato e pianificato, calcolati in percentuale del tempo complessivo di una giornata. Tale intento appare chiaramente essere un diretto riflesso della strategia manutentiva scelta. L'incentivare i fermi pianificati a favore dei non pianificati è l'ovvio presupposto alla scelta della manutenzione preventiva rispetto alla manutenzione a guasto.

Altri importanti KPI sono:

- Waste (kg): kg di scarto prodotti giornalmente;
- Uptime (%): percentuale di tempo in cui la linea ha lavorato, calcolata sul tempo complessivo;
- Quality Loss (%): rappresenta la percentuale di prodotto scartata rispetto al totale a causa di non conformità a uno o più standard di qualità;
- MTBF (min.): è il *Mean Time Between Failures* ovvero il tempo medio che è intercorso in una giornata produttiva fra un failure della linea e il successivo (con "failure" si intende un fermo linea non pianificato di durata maggiore di 10 minuti).

4.2 Open+ e la manutenzione

L'introduzione di una nuova struttura organizzativa che si occupi in maniera integrata di produzione e manutenzione non può dunque che essere preparatoria all'applicazione pratica di un modello di manutenzione completamente diverso rispetto a quello classico. Le differenze fra i due differenti approcci possono essere sintetizzate come segue:

APPROCCIO TRADIZIONALE

- Non fermare gli impianti (fino a che riescono a marciare);
- Intervenire solo per riparazione;
- Accettare carenze qualitative, amplificazione dei danni, sprechi energetici, rischi di sicurezza;
- Contare su interventi immediati e veloci (quando la fermata diviene inevitabile);
- Assicurare ampie disponibilità di risorse (personale, materiali, terzi);
- Riconoscere alla produzione "pieni poteri".

APPROCCIO ATTUALE

- Programmare gli interventi e fermare gli impianti quando necessario;
- Ispezionare e revisionare su condizione;
- Ridurre le fonti di “spreco” (scarti, energia, risorse);
- Riconoscere relazioni organizzative “da pari a pari”.

Per portare a termine la propria missione, Open+ si è dotata di alcuni strumenti che fungono da vero e proprio ponte fra la produzione e la manutenzione. Essi sono: i parametri di processo, le CIL e i difetti.

4.3 Parametri di processo

La vita quotidiana dell'azienda vede, a fianco delle manutenzioni preventive, l'importante presenza delle manutenzioni migliorative. Esse nascono da una logica diversa rispetto alle prime. Mentre le prime nascono da una serie di interventi pianificati la cui esecuzione periodica è stata determinata essere importante per la salute dei macchinari, queste ultime nascono dalla logica opposta e cioè vengono realizzati a valle dell'osservazione delle condizioni dei macchinari.

All'interno di Open+ sono state create numerose strutture utili a osservare con dettaglio e accuratezza le condizioni di ogni singolo macchinario e dunque, la gran mole di dati acquisiti consente ad ogni risorsa a contatto con lo specifico macchinario di individuare facilmente la necessità di operare un intervento manutentivo più o meno complicato sulla stessa. Gli interventi manutentivi individuati attraverso questo meccanismo possono essere effettuati a linea in marcia o ferma. In quest'ultimo caso la loro esecuzione viene programmata in coincidenza con il successivo fermo macchina pianificato.

Fra i più importanti sistemi di rilevazione dello “stato di salute” della macchina, vi sono i parametri di processo. Per ogni macchinario, vi sono una serie di parametri fisici di processo (pressioni, temperature, flussi ecc.) il cui valore è ritenuto fondamentale risieda in un ben specifico range al di fuori del quale si va incontro ad un funzionamento deteriorato del macchinario oppure ad una qualità del prodotto non all'altezza dello standard voluto. Al fine di misurare queste grandezze, su macchinari e linee produttive vi è la presenza di un gran numero di sensori. Ciascuno di questi sensori riporta ad un sistema informatico centrale, accessibile a ciascuno degli operatori impiegati a macchina, mettendo questi ultimi nelle condizioni di tenere d'occhio istante per istante tali parametri e riportare su appositi moduli preposti l'eventuale deviazione dal range desiderato di questi parametri. A valle di questa fase tocca al team di Open+ la lettura di questi moduli e la relativa analisi dei cosiddetti parametri “Out Of Limit”. Se effettivamente viene appurato che la deviazione del parametro dallo

standard non rientra e causa condizioni di lavoro o del prodotto deteriorate, si interviene pianificando un intervento manutentivo correttivo.

La struttura appena descritta è tutt'altro che rigida. I range di processo dei parametri studiati possono variare a seconda delle caratteristiche fisiche delle materie prime in ingresso o alle condizioni di usura più o meno pronunciata dei vari componenti della macchina. Lo studio di tali parametri è attento e costante in maniera tale che i range da tenere sott'occhio siano il più possibile accurati e corretti.

4.4 Cleaning, Inspecting and Lubricating

Le “condizioni di salute” del macchinario e dell'intera linea produttiva vengono monitorate anche attraverso la procedura di “Cleaning, Inspecting and Lubricating”. Si tratta di tre fasi fondamentali appartenenti alla manutenzione preventiva. Alla fine di ogni turno lavorativo, della durata di 8 ore, il personale addetto alle macchine ha il compito di svolgere una serie di operazioni di pulizia, ispezione e lubrificazione dei componenti dei macchinari della linea produttiva.

Si tratta di una procedura molto importante che si trova potenzialmente all'incrocio fra la manutenzione predittiva e quella migliorativa. Le fasi che danno il nome alla procedura, e le semplici operazioni che le compongono, sono vere e proprie operazioni di manutenzione preventiva in quanto si tratta di operazioni periodiche individuate come fondamentali al fine di prevenire possibili rotture o funzionamenti deficitari. Quest'attività è figlia del principio cardine della Total Production Maintenance, che pone l'operatore al centro della manutenzione di base dei macchinari. Il completamento di questo tipo di attività ad opera del personale a macchina, permette a tutte le risorse coinvolte di poter ispezionare i componenti dei macchinari nel corso di questa operazione: ciò permette di poter individuare possibili malfunzionamenti rimasti sino a quel momento nell'ombra (come i Difetti di cui si parlerà approfonditamente nel prossimo paragrafo).

La pulizia rappresenta un primo passo fondamentale per le attività di manutenzione preventiva. Un basso grado di ordine e pulizia causa perdite e nasconde possibili problemi dei macchinari. La presenza di sporcizia in parti rotanti, traslanti o sistemi pneumatici ed idraulici causa spesso deterioramenti forzati del funzionamento, malfunzionamenti e perdite.

Inoltre, la sporcizia oltre ad essere fonte di malfunzionamenti può anche nascondere altre cause di malfunzionamento, rendendone difficile l'individuazione e ostacolando perciò la soluzione del problema.

La pulizia dunque rappresenta la prima ispezione possibile. Durante le fasi di pulizia infatti, ogni parte del macchinario viene toccata, rendendo possibile l'individuazione di ogni singolo graffio o ammaccatura.

La forza di questo tipo di approccio risiede principalmente nella standardizzazione. Le operazioni da svolgere sono ben definite e riportate in appositi moduli. I team di operatori vengono istruiti agli standard di esecuzione delle operazioni di pulizia e riportano nei moduli precedentemente menzionati osservazioni o anomalie rilevate durante lo svolgimento di tali operazioni. Allo stesso modo il team di Open+ è istruito in modo da poter interpretare le eventuali anomalie rilevate, analizzarle e poter mettere in campo le corrette azioni correttive laddove necessario.

4.5 Defect Handling

Per ridurre i costi di manutenzione e i Downtime di processo è necessario ridurre il più possibile le cause che conducono a queste problematiche. Una delle principali cause che è possibile individuare sono certamente i difetti. Un difetto è qualsiasi tipo di condizione della macchina che differisce dalla condizione standard che si aveva con il macchinario nuovo. Si tratta spesso di problematiche dei macchinari che possono essere risolte con piccoli interventi mirati e senza dover pianificare appositi fermi (perdite dalle tubazioni, cavi scoperti, sostituzione guarnizioni, potenziali problematiche di sicurezza ecc.). A seconda della loro natura, tali difetti possono essere causa di successive problematiche oppure denunciare la presenza di altre problematiche a monte che potrebbero rendere necessario l'intervento immediato della manutenzione.

Data la complessità dei macchinari, la presenza dei difetti deve essere data per scontato in quanto essi possono essere originati anche dal più piccolo errore di installazione o di assemblaggio lungo la linea, che possono inoltre combinarsi ad errori operativi del personale addetto.

L'eliminazione dei difetti parte dalla loro individuazione. In corrispondenza di ciascuna delle linee produttive vi sono degli appositi moduli utili ad annotare la presenza del difetto, la sua natura e la sua locazione. I team di operatori sono istruiti alla compilazione e all'individuazione dei difetti come parte integrante del proprio turno di lavoro.

Un valore anomalo rilevato su di un certo parametro di processo, in caso non sia conseguenza di un problema manutentivo maggiore, è spesso invece dovuto alla presenza di un difetto che non era ancora stato rilevato. Allo stesso modo, le CIL sono il momento ideale per l'individuazione dei difetti in quanto si tratta di un momento in cui l'operatore ha l'opportunità di ispezionare ogni singolo componente che occorre pulire e venire a contatto diretto con ogni suo difetto o problematica.

La rilevazione di un difetto richiede a valle una duplice attività per la sua risoluzione: l'individuazione della causa e la risoluzione dei suoi effetti nell'immediato mediante interventi manutentivi.

Queste operazioni sono a carico del team di Open+. La fase di individuazione delle cause richiede analisi di dati e confronto con gli standard al fine di poter eliminare permanentemente il presentarsi

del difetto. La risoluzione immediata del difetto richiede la programmazione di un intervento manutentivo specifico che sia rispettoso però del piano manutentivo già stabilito a priori e dettato dalle necessità di manutenzione preventiva.

La schedulazione dell'intervento di risoluzione del difetto è dunque subordinata alla disponibilità del corretto slot temporale, del giusto numero di manutentori nonché della presenza dei pezzi di ricambio eventualmente necessari.

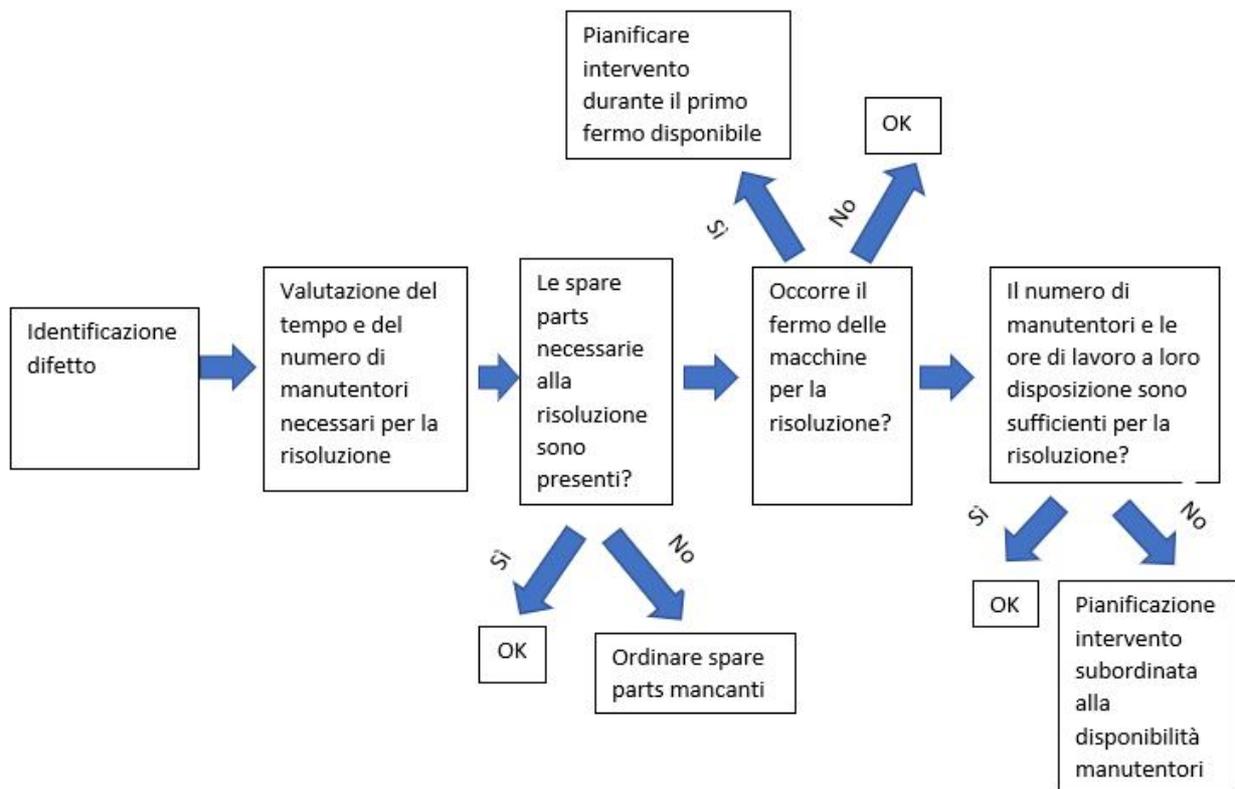


Figura 10: Diagramma di flusso della risoluzione dei difetti

La Fig.10 è introdotta allo scopo di chiarire il flusso che porta dall'identificazione di un difetto alla sua risoluzione. Si nota come la risoluzione di un difetto sia subordinata alla presenza delle necessarie spare parts, del corretto numero di manutentori, del corretto slot temporale ed eventualmente anche del fermo delle macchine.

Ciascuno di questi requisiti rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente: un'efficace pianificazione della risoluzione di un difetto deve dunque tenere conto di ciascuno di questi fattori, individuando per la risoluzione il momento in cui ciascuno di questi input risulta disponibile.

5. Il caso di studio: sostituzione spondine

Come già precedentemente discusso, la moderna concezione di manutenzione largamente impostasi in moltissime aziende prevede il passaggio dalla manutenzione a guasto all'applicazione di strategie di manutenzione preventiva.

Il modello produttivo di Philip Morris MTB non fa eccezione e la realizzazione pratica di questo obiettivo è demandata alla struttura organizzativa Open+.

Nell'ambito del presente lavoro di Tesi è stato scelto un caso di studio pratico derivante dalle problematiche di uno specifico componente meccanico, con l'intento di efficientare la gestione manutentiva di questo componente.

La scelta del componente oggetto di studio deriva dall'incrocio fra le informazioni relative agli interventi manutentivi sulle attrezzature (come si vede nel paragrafo 1.5.12) e le informazioni relative ai guasti più ricorrenti sulla linea produttiva.

In particolare, si è notato come la spondina fosse, fra i componenti con maggiore incidenza sui guasti del Dryer, l'unico a essere ancora gestito con una strategia manutentiva "a guasto". Per queste ragioni la spondina è stata selezionata come oggetto di un'attività di efficientamento delle condizioni di lavoro.

Questa ambiziosa attività di efficientamento si articola su due fasi:

- Miglioramento delle condizioni di lavoro del componente al fine di allungarne la vita utile, attraverso l'implementazione di una nuova configurazione di supporto strutturale del componente;
- Applicazione di strategie che consentano la previsione e il monitoraggio dello "stato di salute" del componente consentendo l'applicazione di manutenzione preventiva anziché a guasto.

5.1 Descrizione problema

Il componente meccanico scelto per lo studio è noto con il nome di *spondina*.

La spondina (Fig.11) è un pannello laterale in polietere etere chetone (*PEEK*), montato sui fianchi di una macchina della linea produttiva attraversata da un fluido a base di tabacco.



Figura 11: Spondina smontata

Come è possibile notare facilmente dalla Fig.11, essa possiede una superficie piatta. Il disegno della spondina prevede uno dei due profili a spezzata (in fase di montaggio sarà il profilo superiore) mentre l'altro è un profilo curvo (in fase di montaggio sarà il profilo inferiore).

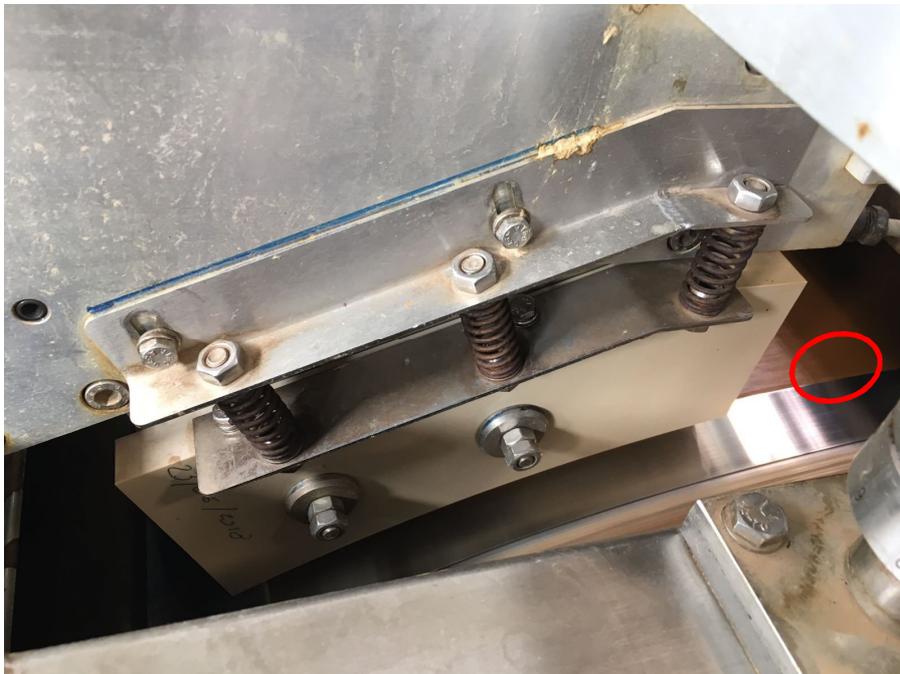


Figura 12: Spondina montata

Come si può notare dalla Fig.12, la funzione delle asole è proprio quella di fungere da guida rispetto alla posizione della spondina. Gli elementi attraverso cui la spondina è messa in pressione sono 3 molle la cui azione si esercita in 3 differenti punti lungo il profilo della spondina stessa. La funzione della spondina è di cruciale importanza ai fini dell'ottenimento della corretta qualità del prodotto.

Infatti, il macchinario per cui la spondina funge da pannello laterale è preposto a processare un fluido pastoso a base di tabacco e consentirne il passaggio alle successive fasi della lavorazione attraverso un rullo trasportatore sottostante. In Fig.12 all'interno del circolo in rosso è possibile osservare il prodotto che viene trasferito attraverso lo scorrimento lungo il rullo meccanico sottostante.

Durante il suo funzionamento tuttavia, il macchinario in questione è soggetto a vibrazioni. Al fine di preservare la qualità del prodotto è molto importante che lo svolgimento del fluido pastoso lungo il rullo sia assolutamente lineare in questa fase, in tutto il suo procedere. Perché questo succeda, la spondina ha il compito di inibire qualsiasi tipo di vibrazione laterale del macchinario, mentre deve consentirne le vibrazioni verticali.

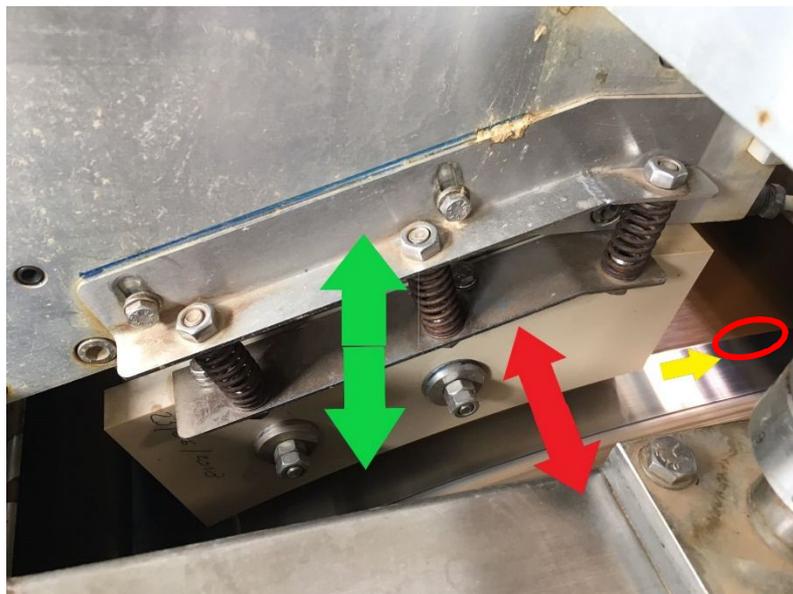


Figura 13: Movimenti spondina

In Fig.13 sono mostrati con maggiore chiarezza i movimenti consentiti e inibiti perché la spondina funzioni correttamente. In verde viene indicato come la spondina debba avere la possibilità di spostarsi in verticale, consentendo così al macchinario di vibrare verticalmente. Al contrario, come indicato dalle frecce in rosso, la spondina non deve assolutamente presentare gioco laterale in modo da inibire qualsiasi tipo di vibrazione laterale del macchinario. Con la freccia in giallo è indicato il procedere del prodotto lungo il nastro trasportatore. La linearità dello svolgimento del prodotto rappresenta l'indice del corretto funzionamento della spondina. Si può parlare di linearità nel momento in cui la linea di demarcazione fra prodotto e rullo è netta a livello cromatico (come in Fig.13).

Uno scorretto scorrimento del prodotto è denunciato dal cosiddetto fenomeno del *bordo frastagliato*. In caso si presenti tale eventualità, si nota come la linea di demarcazione cromatica fra il bordo del prodotto e il rullo trasportatore non è così netta ed in particolare il colore del prodotto inizia a

schiarirsi nelle vicinanze del bordo. Tale fenomeno denuncia chiaramente come nelle zone laterali del prodotto vi sia una carenza di materiale rispetto alla parte centrale e dunque si stiano verificando dei trafiletti di materiale a causa di uno scorretto funzionamento della spondina. Le principali cause di scorretto funzionamento della spondina sono tipicamente:

- a) Errato serraggio delle molle in fase di montaggio. Questo causa una sollecitazione disomogenea lungo il profilo del materiale che porta tipicamente ad un'erosione disomogenea dello smusso presente lungo il profilo curvo della spondina (impedendo alla stessa di esercitare ovunque la sua azione di contenimento delle vibrazioni laterali essendo proprio tale smusso l'elemento attraverso il quale è esercitata la pressione) oppure alla creazione di scanalature sul profilo stesso (attraverso cui avviene trafiletto di materiale);
- b) Formazione in fase di montaggio o in fase di lavoro di gioco laterale della spondina rispetto al macchinario di lavoro (causa di notevoli trafiletti).

Una volta smontata la spondina difettosa non è complicato comprendere se il suo scorretto funzionamento sia stato originato dall'una o dall'altra causa. Nel caso a) l'errato montaggio della spondina origina una sollecitazione disomogenea lungo il profilo della stessa, il che si riflette su un'altrettanto disomogenea erosione dello smusso terminale della spondina, che è l'elemento che effettivamente permette al componente di fare pressione sul macchinario, contenendone le vibrazioni laterali. In un caso di corretto funzionamento della spondina, l'erosione dovrebbe avvenire in maniera omogenea lungo tutto il profilo, conservando invariata la forma della curva. In caso di sollecitazione disomogenea, l'erosione si presenta molto più spiccata su una zona della curva e molto più limitata su un'altra portando velocemente al consumo totale dello smusso lungo una delle zone della curva e dunque all'impossibilità da parte del componente, in coincidenza di tale zona, di esercitare la pressione necessaria. Risulta dunque semplice identificare questo tipo di scorretto funzionamento in quanto la spondina smontata presenterà una curva sottostante dal profilo completamente alterato.



Figura 14: Spondina usurata. Caso a)

Dalla Figura 14 è possibile notare chiaramente come lo smusso, fondamentale per permettere alla spondina di fare pressione, sia praticamente eroso nella parte destra mentre pressoché intatto nella parte sinistra. In Fig. 14 si possono notare delle linee tratteggiate che ricalcano il profilo inferiore (in rosso) e il profilo superiore (in blu) dello smusso: mentre nella parte sinistra è possibile vedere una pronunciata differenza fra le due linee, tale distanza va affievolendosi passando verso il centro sino a scomparire quasi del tutto in coincidenza dell'estremità destra.

Nel caso b) non si osserva questo tipo di fenomeno. Lo smusso della spondina si erode con il tempo in maniera omogenea lungo tutto il suo profilo.



Figura 15: Spondina usurata. Caso b)

Utilizzando lo stesso codice grafico di Fig.14, si vede in Fig. 15, come lo spazio fra le linee tratteggiate rimanga costante lungo il profilo curvo, a testimonianza di un'usura omogenea sul profilo.



Figura 16: Depositi microscopici di prodotto su tre spondine (zona smusso)

Tuttavia, si può osservare che per via dei trafilamenti vi sono depositi di prodotto macroscopici a livello della superficie del pezzo, che non si formano in maniera così ingente nel caso a). Tramite un'osservazione al microscopio è possibile osservare in questi casi come tali depositi siano presenti anche a livello dello stesso smusso. Il fenomeno si può apprezzare in maniera evidente dalle immagini di Fig.16, catturate attraverso un microscopio. L'immagine di sinistra rappresenta lo smusso di una spondina nuova, quella centrale è relativa ad una spondina usurata secondo il modo a), mentre quella di destra fa invece riferimento ad una spondina usurata secondo il modo b). Si nota come, ovviamente i depositi siano totalmente assenti nell'immagine di sinistra, mentre la loro presenza si manifesta in modo lieve nel caso a) ed invece in modo decisamente più marcato nel caso b).

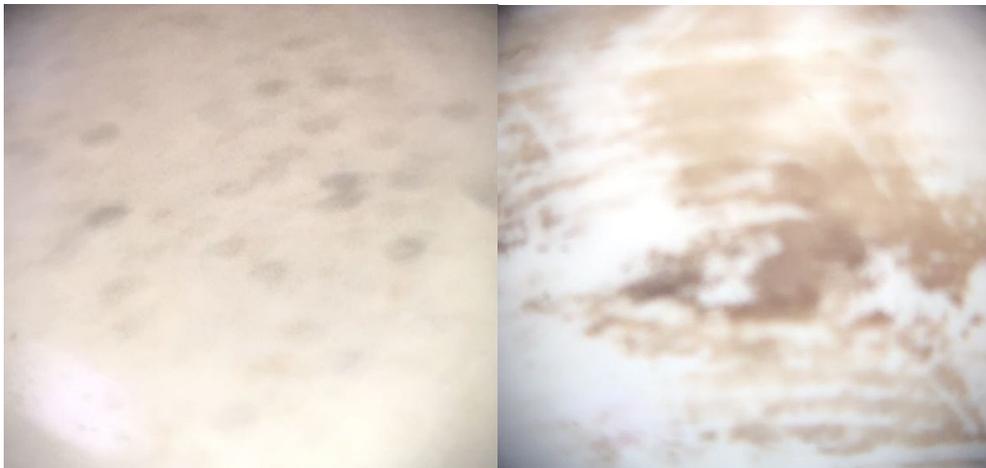


Figura 17: Depositi microscopici di prodotto su due spondine (superficie frontale)

Il fenomeno si ripete analogo anche sulla zona della superficie frontale della spondina come si nota dalla Fig.17 (caso a) a sinistra e caso b) a destra).

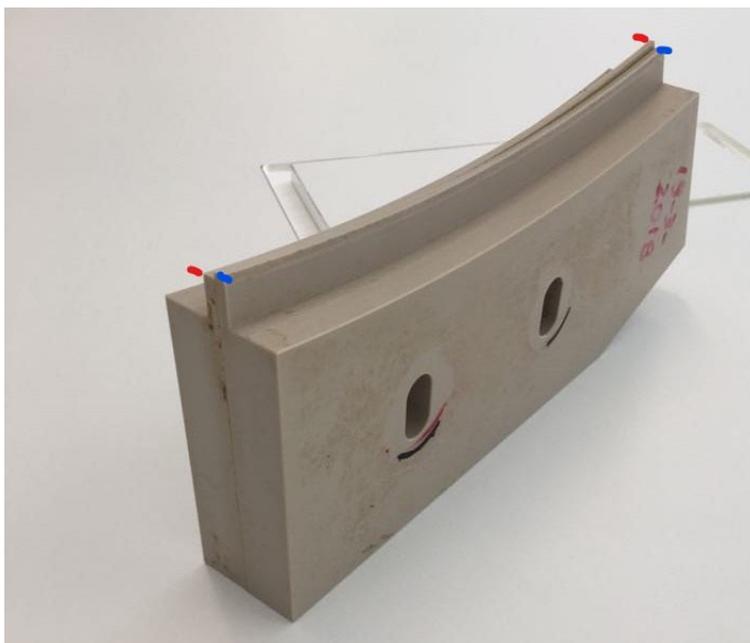


Figura 18: Confronto fra spondine usurate secondo i meccanismi a) e b)

Evidenza dei diversi effetti provocati dai due differenti meccanismi di usura è data anche dall'immagine in Fig.18. Mentre la spondina a sx è consumata secondo il meccanismo b) e dunque presenta un'usura omogenea della parte superiore dello spigolo lungo tutto il suo profilo, si vede che la spondina a dx, usurata secondo il meccanismo a) vede un'usura disomogenea nella stessa zona ed in particolare molto più pronunciata sull'estremità dx ed in pratica assente su quella sx. Ne consegue un profilo alterato della parte superiore dello smusso, evidenziata nettamente dai tratti colorati in Figura 18. Mentre al livello dell'estremità sx il tratto blu (rappresentativo della spondina dx) è più in alto del tratto rosso (rappresentativo della spondina sx), a causa dell'usura eccessivamente bassa su tale estremità, a livello dell'estremità dx si verifica l'esatto contrario, a causa dell'usura eccessivamente alta su tale estremità.

5.2 Studio dell'MTBF

Uno degli strumenti più importanti per l'analisi di un problema manutentivo è il *Mean Time Between Failures* o MTBF: si tratta del tempo medio che intercorre fra due *failures* consecutivi (dove con *failure* si intende un fermo della linea produttiva di durata superiore ai 10 minuti). In questo caso si analizzeranno i *failures* dovuti a sostituzioni o regolazioni delle spondine per comprendere quanto questo problema manutentivo sia frequente e impattante sulla produzione.

5.2.1 Calcolo dell'MTBF in giorni

Per il calcolo dell'MTBF in giorni sono stati monitorati due periodi di produzione, uno relativo al 2017 e l'altro al 2018. Il monitoraggio è relativo a tutte le linee produttive dell'azienda. In ciascuno di questi periodi di produzione, è stato individuato ogni mese il volume di produzione complessivo per determinare mese per mese il numero medio di linee produttive contemporaneamente attive. Con cadenza mensile è stato anche individuato il numero di *failures* causati dalla spondina. Identificare il numero medio di linee attive è fondamentale per determinare l'MTBF in quanto poi si deve considerare la presenza di 2 spondine per ogni linea produttiva.

2017	ore di lavoro [h]	durata spondina [settimane]
Mese 1	720	4,5
Mese 2	720	2,5
Mese 3	720	2,9
Mese 4	720	6,7
Mese 5	720	8,6
Mese 6	720	9,5
Mese 7	720	7,0
TOT	5040	5,2

Tabella 10: Calcolo dell'MTBF in giorni nel 2017

Il numero medio di linee attive viene calcolato dividendo la quantità oraria prodotta in un mese per la quantità oraria prodotta in media da una singola linea. La durata della singola spondina viene determinata in settimane come segue:

$$\frac{n. settimane}{n. failures} \cdot 2 \cdot n. medio linee \quad (10)$$

Laddove il fattore 2 tiene appunto conto della presenza di 2 spondine per linea produttiva.

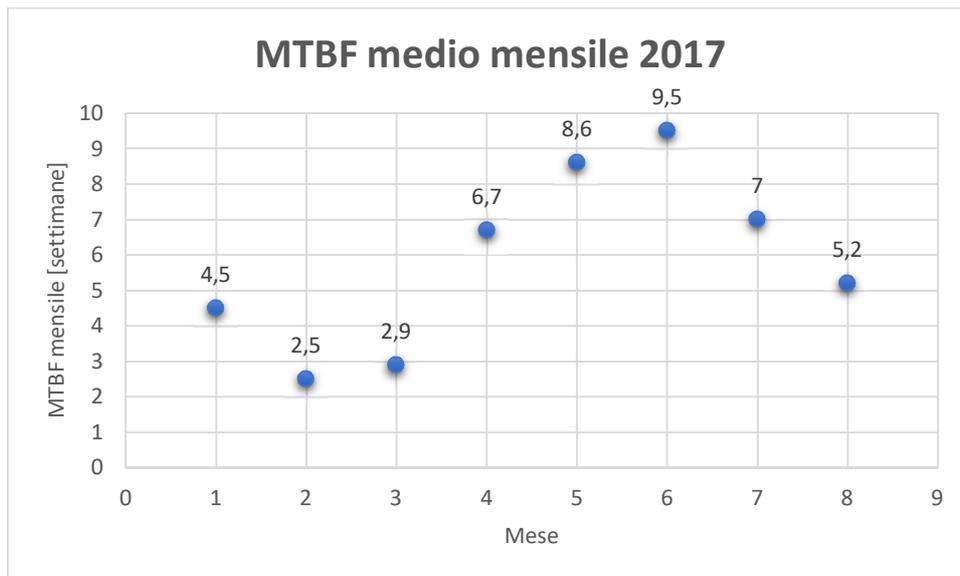


Figura 19: MTBF medio mensile 2017

In Fig.19 è possibile apprezzare i valori di MTBF medio mensile del 2017. Dalla rappresentazione grafica è evidente la spiccata variabilità dell’MTBF medio.

L’MTBF medio in settimane ottenuto si vede nella riga “TOT” della Tabella 10 e corrisponde a 5,2 settimane. Convertendo in giorni si ottiene un MTBF di 36,6 giorni.

Il calcolo può essere ripetuto identico considerando un nuovo periodo di monitoraggio, questa volta nel 2018.

2018	ore di lavoro [h]	durata spondina [settimane]
Mese 1	720	4,0
Mese 2	720	4,1
Mese 3	720	6,2
Mese 4	720	3,9
Mese 5	720	7,4
Mese 6	720	2,5
TOT	4320	4,7

Tabella 11: Calcolo dell’MTBF in giorni nel 2018

Si ottiene in questo caso un risultato molto simile. L’MTBF risulta essersi abbassato a 4,7 settimane corrispondenti a 33,1 giorni.

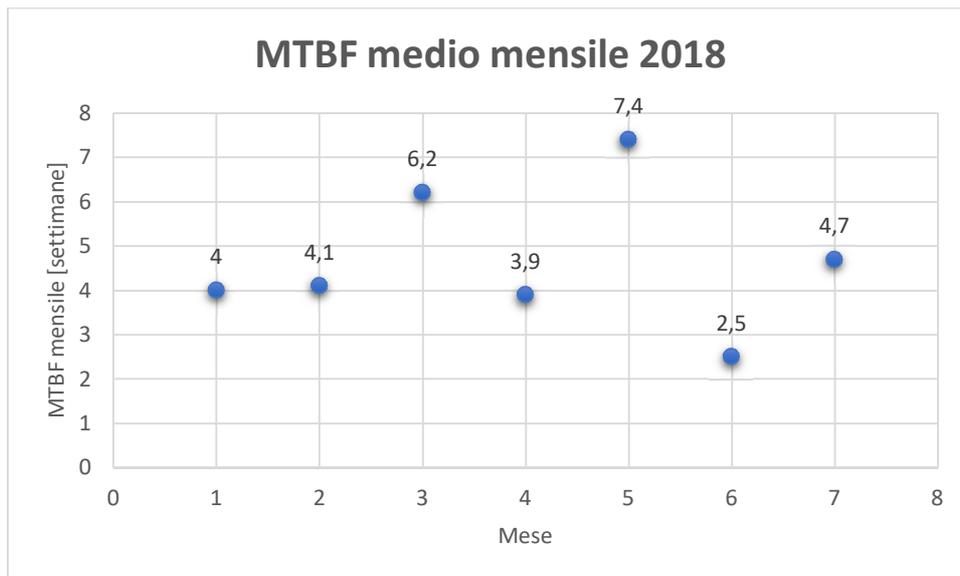


Figura 20: MTBF medio mensile 2018

Analizzando la Fig.20 si possono fare considerazioni analoghe relativamente alla variabilità dell'MTBF rispetto a quelle già fatte nel corso dell'analisi del 2017.

5.2.2 Dipendenza dell'MTBF dalle modalità di montaggio

Altra importante problematica che emerge dall'analisi sulla sostituzione delle spondine è la dipendenza dell'MTBF dalle modalità di montaggio. Se si conduce un'analisi linea per linea dell'MTBF relativo alle spondine si nota come la durata della spondina possa essere anche superiore rispetto a quella media precedentemente calcolata ma soprattutto come tale durata sia contraddistinta da una spiccata variabilità, legata alle modalità con cui la spondina viene montata.

Di seguito sono riportati i dati relativi ai giorni intercorsi fra una sostituzione e l'altra della spondina. L'analisi è stata condotta sulla linea X in un periodo di monitoraggio del 2017 e sulla linea Y in un periodo di monitoraggio relativo al 2018.

	Spondina SX	Spondina DX
TBF 1	27	60
TBF 2	65	15
TBF 3	60	64
TBF 4		46

Tabella 12: Studio del TBF su Linea X nel 2017

	Spondina SX	Spondina DX
TBF 1	46	25
TBF 2	22	66
TBF 3	43	
TBF 4	46	
TBF 5	1	

Tabella 13: Studio del TBF su Linea Y nel 2018

La dipendenza dalle modalità di montaggio è evidente dal fatto che, su entrambe le linee analizzate, si nota che le due spondine seppur montate sulla stessa macchina e dunque teoricamente soggette alle medesime condizioni di lavoro, presentano in realtà durate sensibilmente differenti il che denuncia la presenza di uno o più fattori responsabili di tale variabilità.

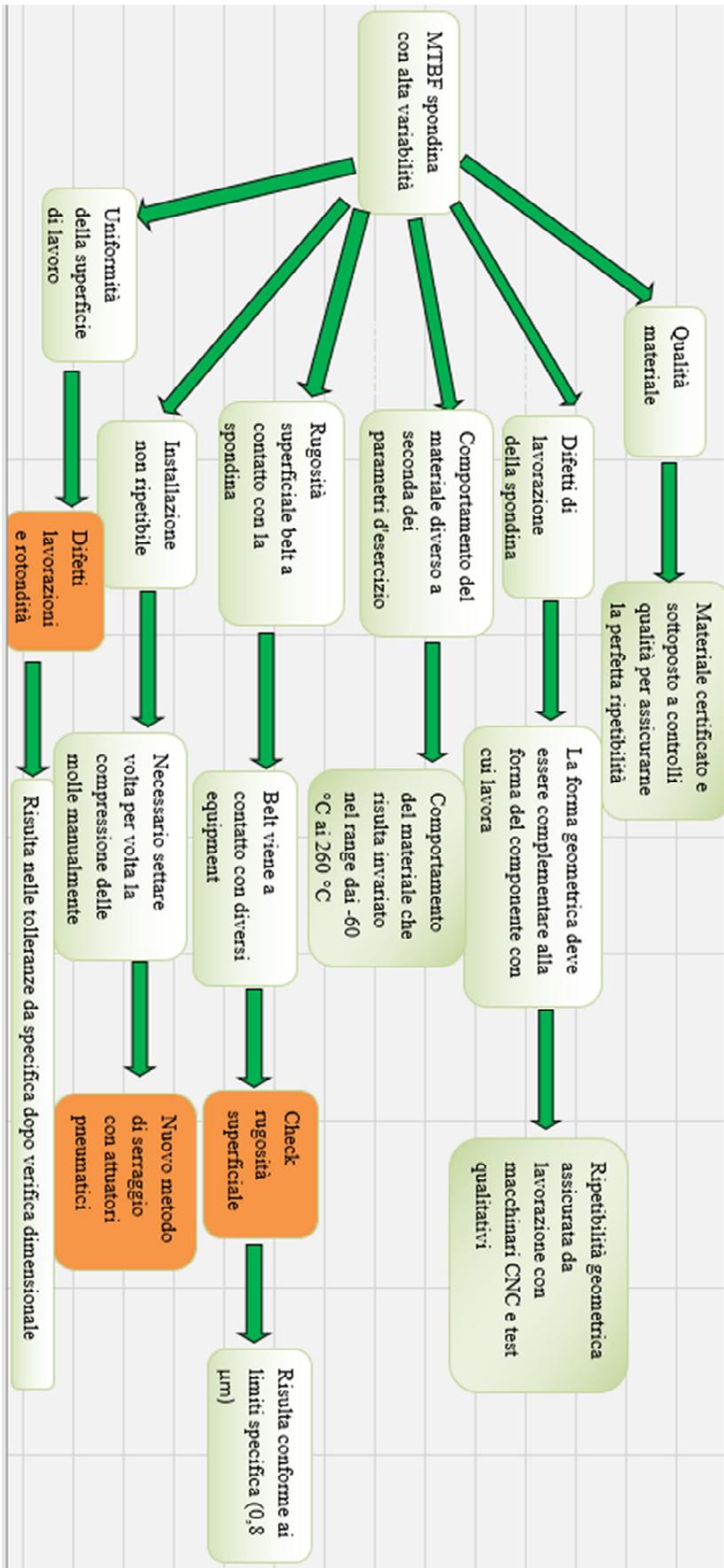


Figura 21: Analisi delle cause di variabilità dell'MTBF

Dalla Fig.21 si ha una visione completa di tutte le possibili cause della variabilità dell'MTBF.

Tale variabilità può sicuramente essere determinata da variazioni nella qualità del materiale o da difetti di lavorazione della spondina, tuttavia tali ipotesi vengono scartate attraverso controlli qualità in grado di assicurare la perfetta ripetibilità per ciascuno dei due aspetti.

Il materiale di cui è composta la spondina è inoltre caratterizzato da un range di lavoro molto ampio che porta anche ad escludere un'incidenza delle variazioni delle condizioni di esercizio, che risultano essere molto piccole ed ampiamente comprese all'interno di tale range.

Possibili fonti di variabilità possono essere la disomogeneità della superficie della spondina oppure la rugosità superficiale del belt o rullo trasportatore che va a contatto con la spondina. Tuttavia, le due cause, sottoposte ad opportuni controlli, risultano rispettare le specifiche sulle tolleranze.

Infine, si può individuare come possibile causa la procedura di installazione della spondina. Il metodo di serraggio attualmente in uso, prevede l'utilizzo di molle la cui compressione va settata manualmente volta per volta e dunque porta inevitabilmente all'introduzione di irripetibilità.

Sarà dunque quest'ultima la causa su cui lavorare, mediante la proposta di un nuovo sistema di serraggio in grado di garantire la perfetta ripetibilità, e che sarà approfondito nel dettaglio nella parte successiva.

6. Obiettivi e identificazione della soluzione

Il caso di studio illustrato finora presenta dunque due problematiche principali:

- MTBF troppo limitato;
- Dipendenza dell'MTBF dalle modalità di montaggio.

La soluzione da identificare deve dunque necessariamente centrare due obiettivi:

- a) Aumentare l'MTBF medio relativo alle spondine;
- b) Identificare un nuovo sistema di montaggio che risulti più semplice ed elimini la variabilità dovuta al contributo umano, rendendo così il montaggio perfettamente ripetibile.

Come già illustrato in precedenza, sono due i principali meccanismi che conducono all'usura e dunque alla necessità di sostituzione/regolazione della spondina:

- a) Errato serraggio delle molle in fase di montaggio;
- b) Formazione di gioco laterale della spondina rispetto al macchinario di lavoro.

La soluzione da individuare dovrà essere efficace per entrambi i meccanismi allo scopo di raggiungere gli obiettivi prefissati.

6.1 Soluzione per l'usura da meccanismo b)

La soluzione per l'usura da meccanismo b) è stata identificata attraverso un test svolto su una delle linee produttive. Essendo questo meccanismo generato dalla formazione di gioco fra spondina e macchinario che avviene o in fase di montaggio o in fase di lavoro, è stata implementata una soluzione che fornisca un'ulteriore pressione alla spondina, favorendo l'adesione della stessa al macchinario e scongiurando così l'ipotesi della creazione di gioco.

Per porre in pressione la spondina è stata scelta una coppia di molle, montate a livello delle asole.



Figura 22: Spondina con l'aggiunta della coppia di molle

Le molle scelte hanno le seguenti caratteristiche:

- Acciaio INOX;
- Diametro esterno = 16 mm;
- Lunghezza libera = 45 mm;
- Rigidezza k della molla = 8 N/mm;
- Compressione della molla \approx 6 mm.

Attraverso l'implementazione di questa semplice soluzione è già stato possibile osservare una risoluzione pressoché definitiva delle infiltrazioni di prodotto a livello della spondina, che non si ripresentano più almeno a livello macroscopico.

6.2 Soluzione per l'usura da meccanismo a)

Mentre l'usura da meccanismo b) viene risolta in maniera pressoché definitiva attraverso una soluzione piuttosto semplice, l'usura da meccanismo a) risulta sicuramente più complicata da risolvere. Essa risulta infatti dovuta ad una disuniforme sollecitazione lungo il profilo della struttura, intrinseca alla modalità di montaggio utilizzata. L'obiettivo in questo caso è dunque di analizzare i motivi per cui il sistema di montaggio con tre molle genera questa sollecitazione disuniforme e proporre un sistema di montaggio alternativo che sia in grado non solo di sollecitare uniformemente la struttura, ma anche di garantire la perfetta ripetibilità del montaggio. Si desidera infatti un sistema di montaggio che sia perfettamente ripetibile sempre nello stesso modo senza possibilità che l'errore umano possa influire sulla durata della spondina.

Una volta implementata questa soluzione, subentra il successivo obiettivo ovvero quello di rendere preventiva questa tipologia di manutenzione. Basandosi sulle caratteristiche tecniche della nuova soluzione di montaggio selezionata occorrerà individuare una metodologia di monitoraggio delle "condizioni di salute" della spondina, che consentano di effettuare la relativa sostituzione/regolazione

in maniera preventiva, evitando così che il funzionamento degradato del componente generi un *failure*.

6.2.1 La soluzione con attuatori pneumatici

Decisiva ai fini della scelta della soluzione di montaggio è proprio la considerazione relativa alla ripetibilità dell'operazione. Anziché l'opzione con le molle viene scelta una soluzione di montaggio che preveda l'utilizzo di un sistema pneumatico che metta in pressione la spondina mediante l'utilizzo di pistoni. Il vantaggio di questo tipo di soluzione è la possibilità di individuare il preciso valore di pressione da trasmettere alla spondina attraverso i pistoni e regolare l'azione di tali pistoni in maniera tale che sia proprio tale preciso valore di pressione ad essere applicato, evitando così il montaggio con le molle che prevedeva una regolazione umana e dunque per definizione non ripetibile.



Figura 23: Attuatore CD85N10-40C-B

La soluzione scelta prevede dunque l'utilizzo di 2 pistoni. L'intensità della forza da applicare sulla spondina, il punto di applicazione della stessa e l'inclinazione con la quale agiranno i pistoni saranno scelte a valle di un'opportuna analisi.

L'attuatore scelto è il CD85N10-40C-B contraddistinto dalle seguenti caratteristiche [30]:

- Diametro = 16,7 mm;
- Lunghezza = 133 mm;
- Corsa = 40 mm;
- Pressione massima assoluta = 1,5 MPa.

6.2.2 Batch di analisi delle sollecitazioni

Una volta scelta la soluzione costruttiva sostitutiva del sistema con pistoni, è necessario tuttavia scegliere le posizioni in cui è più opportuno fare pressione sulla spondina in modo da generare un

profilo di sollecitazione il più possibile omogeneo sulla stessa. Lo studio è stato condotto mediante un batch di analisi finalizzato all'approfondimento e confronto della distribuzione delle sollecitazioni sulla spondina in diversi casi di studio, contraddistinti da diversi punti di applicazione della pressione. Fra i vari casi studiati vi è anche la riproduzione del sistema attuale, che funge da parametro di paragone per tutte le altre soluzioni prese in esame: per poter essere degna di nota, la nuova soluzione dovrà presentare una distribuzione di sollecitazioni più omogenea rispetto al sistema attuale e se possibile anche una minore sollecitazione di picco.

6.2.3 Il modello CAD

Come strumento di studio è stato scelto il software di modellazione e simulazione Solidworks (versione 2016). Tramite questo software è possibile non solo realizzare il modello CAD del pezzo in esame, ma anche condurre degli studi di simulazione su tale modello, i quali risultano fondamentali per fornire un'analisi completa delle sollecitazioni in gioco.

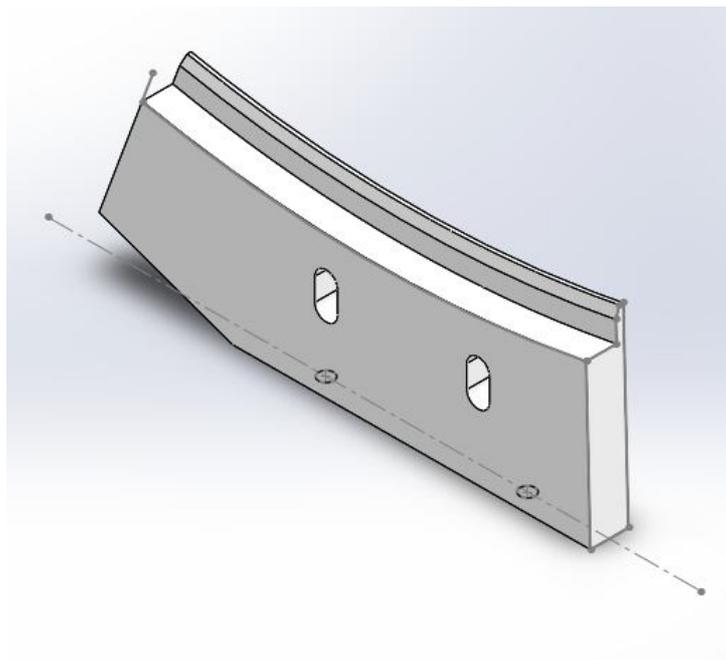


Figura 24: Modello CAD spondina

In Figura 24 è possibile osservare il modello CAD utilizzato. Il modello è stato ottenuto tramite un processo di *retroengineering* del pezzo, basando dunque la modellazione sulle misure prese sul pezzo fisico. Tramite esso si è in grado di riprodurre fedelmente le caratteristiche del componente sia in termine di dimensioni che di materiali.

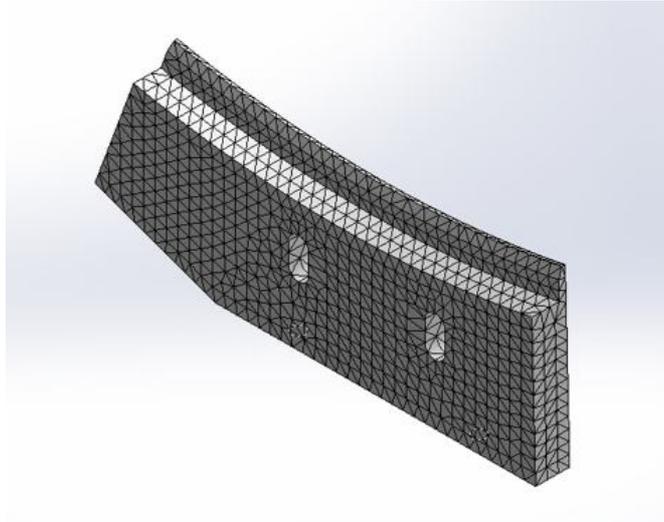


Figura 25: Modello spondina. Grafico della mesh.

In Figura 25 è invece possibile osservare il grafico della mesh relativo al modello della spondina. La mesh utilizzata è una mesh standard con 16301 nodi totali e 9954 elementi totali.

6.2.4 Batch: Caso 1

Il primo caso considerato per quanto riguarda il Batch di analisi delle sollecitazioni sulla spondina, è il caso base rappresentante dunque il sistema di montaggio che si ha precedentemente alla modifica. La spondina è posta in pressione mediante l'azione di 3 molle. Le molle selezionate presentano caratteristiche analoghe a quelle già illustrate nel paragrafo 6.1. Per quanto riguarda la compressione della molla, essa è dipendente da come viene effettuato il montaggio e dunque risulta variabile da spondina a spondina. Da rilevazioni effettuate in area produttiva, si è adottato come valore attendibile della compressione 6 mm.

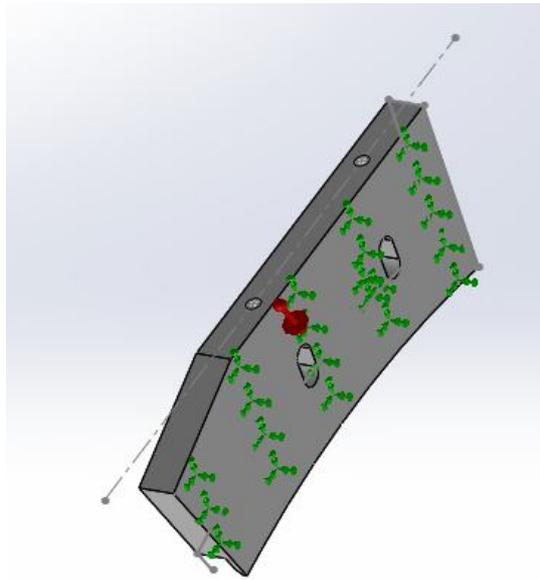


Figura 26: Vincoli e carico gravitazionale sul modello

Il modello CAD deve fornire una rappresentazione realistica della sollecitazione sul componente: è necessario dunque applicare tutti gli opportuni carichi e vincoli sullo stesso. Le frecce verdi indicano l'applicazione del vincolo “Fisso” sulla superficie in esame, rappresentante l'aderenza del componente sul macchinario a fluido a cui risulta accoppiato. Con la freccia rossa è invece rappresentata la forza di gravità.

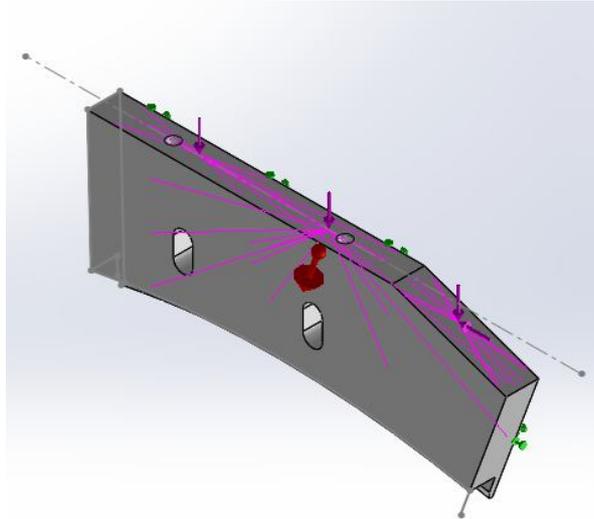


Figura 27: Carichi caso 1

I carichi da considerare nel caso 1 sono quelli relativi alla forza delle molle. Esse sono applicate nei 3 punti visibili in Fig.27, tutti e 3 con direzione ortogonale alla superficie. In particolare, per simulare una forza ortogonale agente sulla superficie più corta, sono state introdotte una forza orizzontale ed una forza verticale, la cui risultante è ortogonale alla superficie e della corretta entità.

L'intensità della forza è stata determinata adottando il modello di molla lineare e dunque:

$$F = k x \quad (11)$$

k: rigidezza della molla;

x: compressione della molla.

Nel nostro caso essendo:

- $k = 8 \text{ N/mm}$
- $x = 6 \text{ mm}$

Si ottiene:

- $F = 48 \text{ N}$

Applicati i carichi, è semplice risalire al profilo di sollecitazioni agenti sulla spondina. Il risultato di tale analisi è sintetizzato graficamente da una deformata che riproduce in un determinato nodo una deformazione fittizia della struttura direttamente proporzionale alla sollecitazione in tale nodo. Contestualmente, la sollecitazione è rappresentata anche da un codice-colore che rappresenta l'entità delle sollecitazioni, dalle più basse alle più alte, passando da tonalità blu a tonalità rosse.

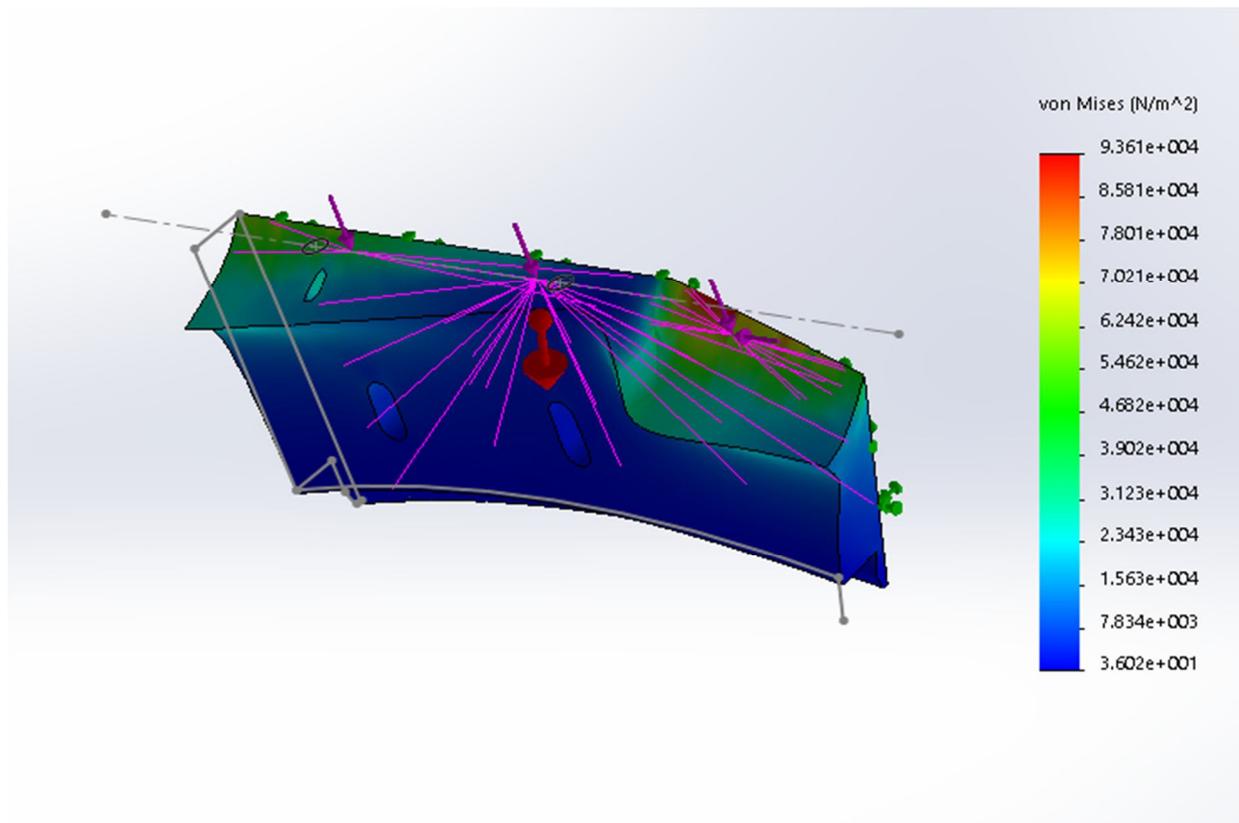


Figura 28: Deformata caso 1. Vista isometrica

Dalla legenda a fianco è possibile anche quantificare a che valori numerici di tensione di Von Mises (in N/m²) corrispondono i colori visibili sulla struttura. La tensione di Von Mises di picco risulta essere pari a circa $90000 \frac{N}{m^2}$.

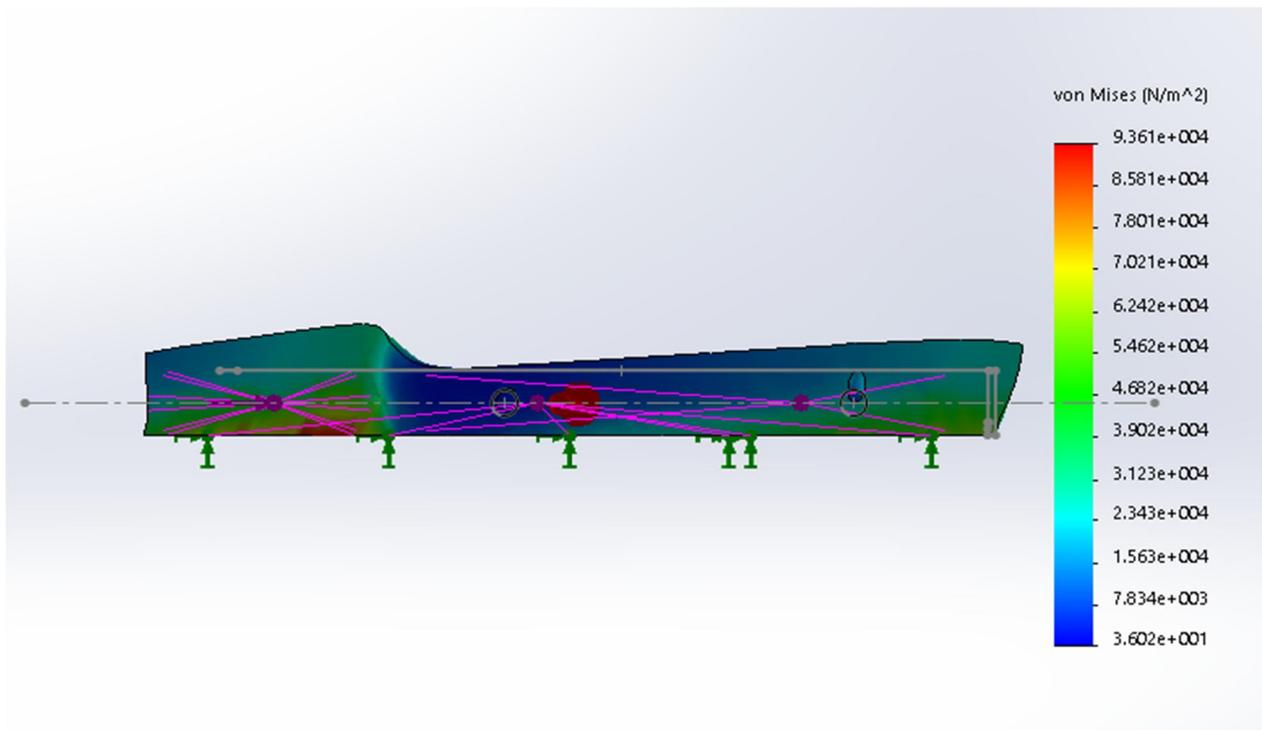


Figura 29: Deformata caso 1. Vista dall'alto.

Interessanti considerazioni possono essere fatte dall'analisi dell'immagine in Fig.29. Con una vista dall'alto riusciamo a visualizzare la situazione direttamente sulla superficie di applicazione della forza delle molle: la distribuzione di sollecitazioni a livello di tale superficie è direttamente correlata all'usura che si verifica sullo spigolo della spondina. Da ciò consegue che, essendo l'obiettivo quello di ottenere un'usura il più possibile uniforme su tale spigolo, si dovrà procedere con una soluzione la cui distribuzione di sollecitazioni sia altrettanto omogenea.

Nel caso 1, rappresentativo della condizione base, si vede chiaramente come tale distribuzione non sia omogenea. Il "lato corto" risulta mediamente più sollecitato del "lato lungo", che raggiunge valori di sollecitazione confrontabili solo in corrispondenza dell'estremità. Dunque, imponendo alle tre molle la stessa compressione, si introduce una disuniformità di sollecitazione che si rifletterà su una disuniformità di usura sullo smusso della spondina.

6.2.5 Batch: Caso 2

Dal secondo caso del Batch in poi, l'analisi è riferita all'implementazione di un sistema di messa in pressione della spondina tramite attuatori pneumatici. Lo scopo è di comprendere quale sia la collocazione ottimale dei pistoni al fine di ottenere una sollecitazione omogenea sulla superficie della spondina.

Come ipotesi di studio si assume che la forza verticale necessaria per porre in pressione la spondina non vari fra il caso delle molle e il caso del pistone.

Dunque:

$$3 F_m = 2F_p \quad (12)$$

F_m : forza singola molla;

F_p : forza singolo pistone.

Secondo tale ipotesi dunque, la forza associata al singolo pistone dovrà essere pari a 72 N.

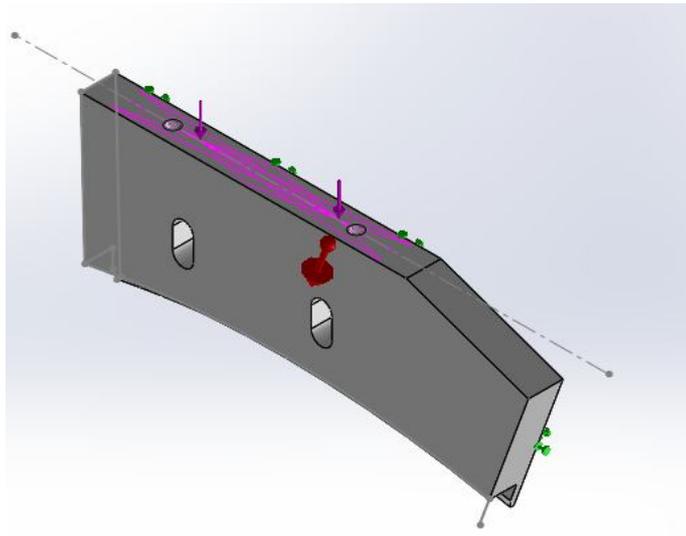


Figura 30: Carichi caso 2

In Fig. 30 è possibile osservare il sistema di carichi e vincoli agenti sulla spondina. Il sistema di vincoli non varia mentre a variare sono i punti di applicazione delle forze, ancora perpendicolari alla superficie. Come ipotesi di studio, in questo caso si è considerata l'applicazione delle forze sulla superficie superiore in due punti situati allo stesso livello delle due asole. L'applicazione di questa soluzione sarebbe ideale in quanto a livello costruttivo e di ingombri sarebbe molto semplice agire con due pistoni paralleli sul "lato lungo" della spondina.

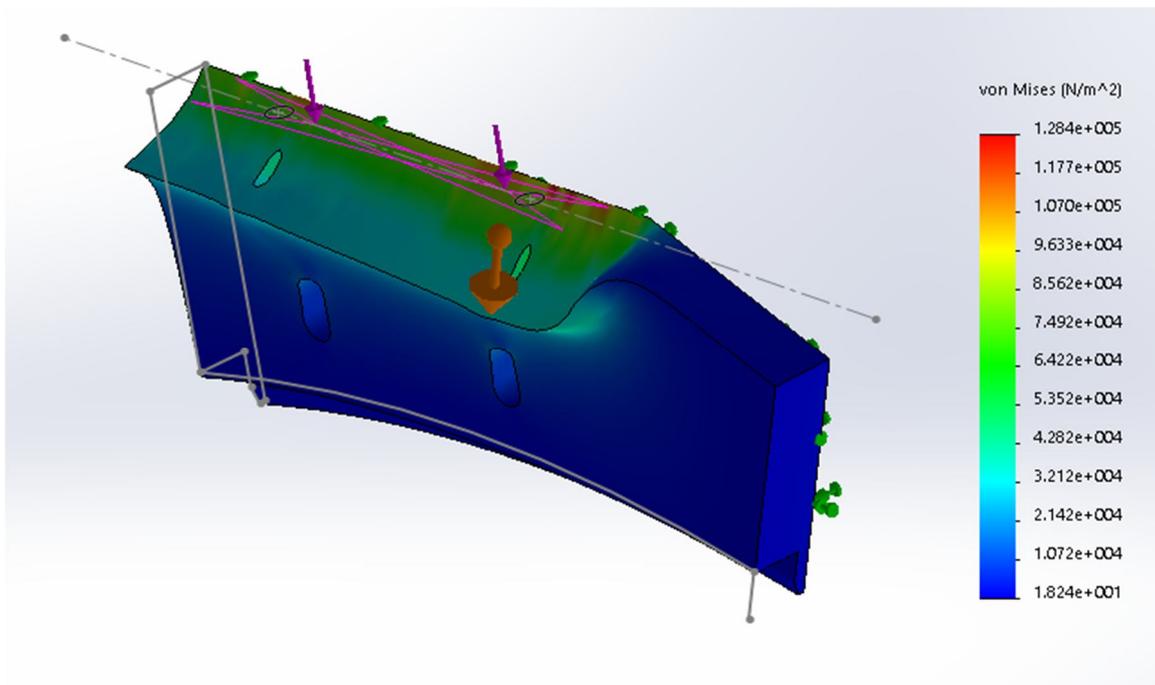


Figura 31: Deformata caso 2. Vista isometrica

Osservando la deformata si nota come il componente venga sollecitato in maniera molto diversa rispetto al caso precedente. La tensione di Von Mises di picco si attesta attorno ai $120000 \frac{N}{m^2}$, dunque risulta incrementata di circa il 30% rispetto a quella del caso 1.

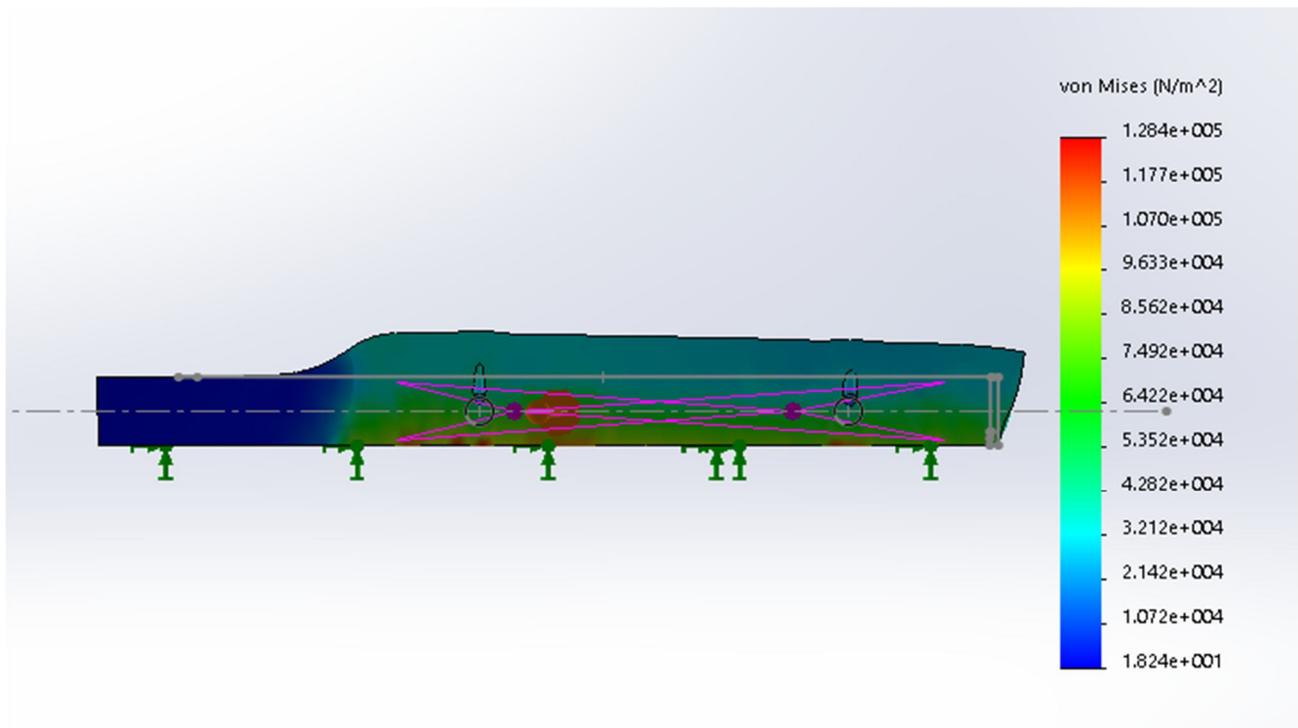


Figura 32: Deformata caso 2. Vista dall'alto

La distribuzione delle sollecitazioni sulla superficie di applicazione può essere osservata attraverso la vista dall'alto. Si nota come la soluzione del caso 2 porti ad una distribuzione delle sollecitazioni altamente disomogenea ed in particolare, con un “lato lungo” nettamente più sollecitato del “lato corto”. Ciò si rifletterebbe in maniera diretta sull'usura dello smusso inferiore della spondina, che andrebbe ad usurarsi molto più rapidamente nella zona corrispondente al “lato lungo”. La soluzione esaminata nel caso 2 non è dunque da prendere in considerazione.

6.2.6 Batch: Caso 3

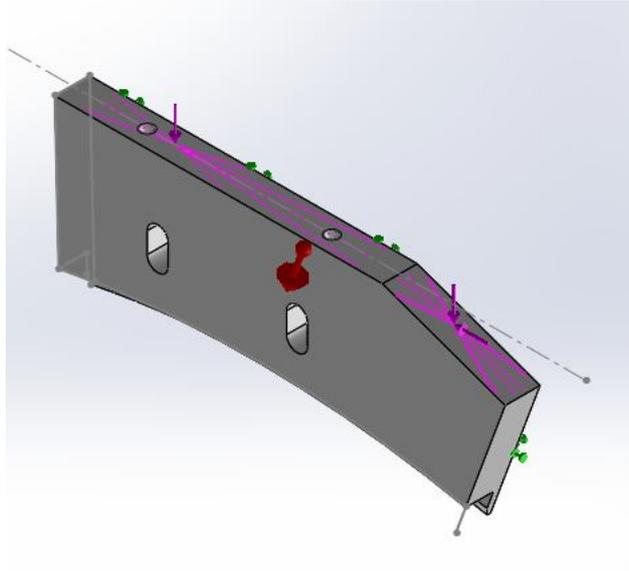


Figura 33: Carichi caso 3

In Fig. 33 è possibile osservare il sistema di carichi e vincoli agenti sulla spondina nel caso 3. Il sistema di vincoli non varia mentre a variare sono i punti di applicazione delle forze, ancora perpendicolari alla superficie. Come ipotesi di studio, si è considerata in questo caso l'applicazione dei pistoni sempre perpendicolare alle superfici, con uno applicato sulla superficie del "lato lungo" all'altezza della prima asola e l'altro applicato sulla superficie del "lato corto" all'altezza di circa metà del tratto.

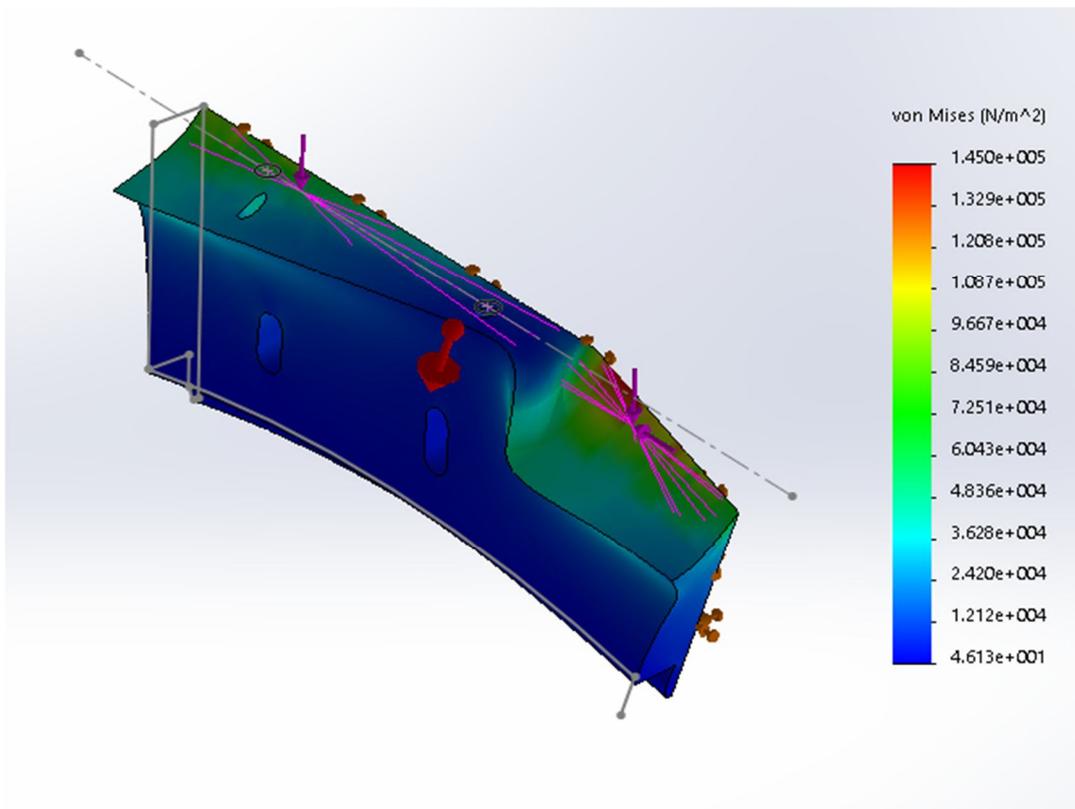


Figura 34: Deformata caso 3. Vista isometrica

Osservando la deformata si nota come il componente venga sollecitato in maniera molto diversa rispetto al caso precedente. La tensione di Von Mises di picco si attesta attorno ai $145000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, dunque risulta incrementata di circa il 20% rispetto a quella del caso 2 ed è la più alta fra i casi esaminati finora.

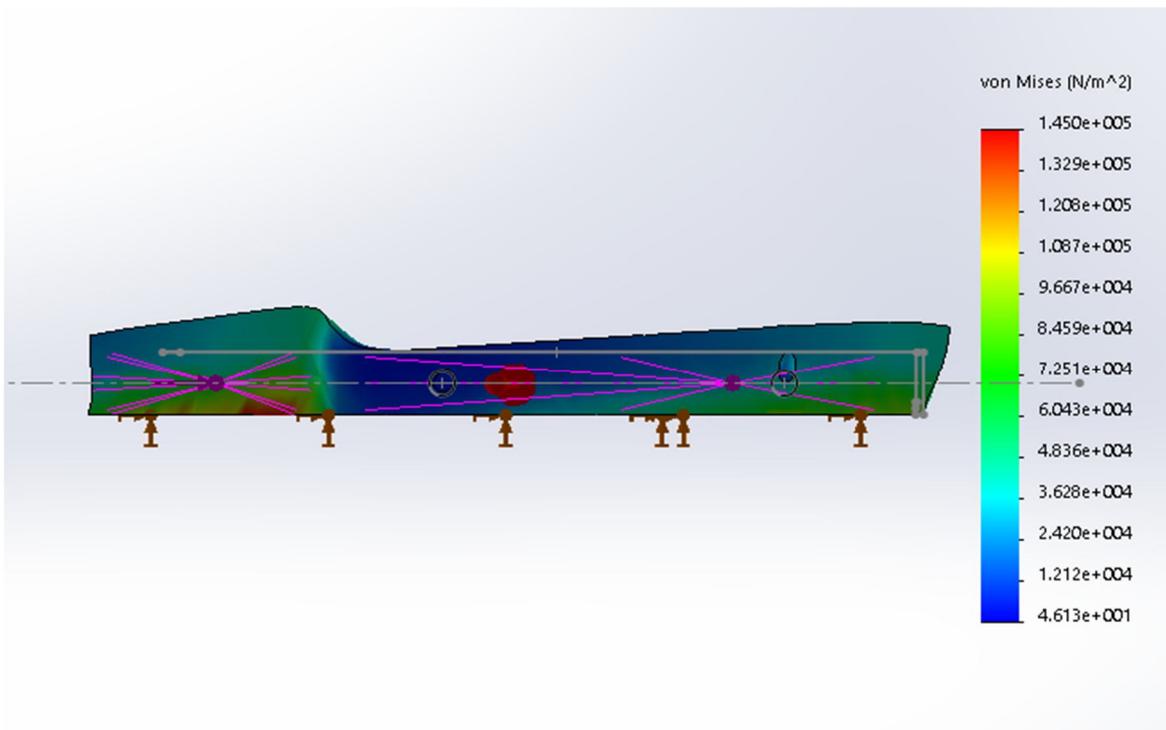


Figura 35: Deformata caso 3. Vista dall'alto

La distribuzione delle sollecitazioni sulla superficie di applicazione può essere osservata attraverso la vista dall'alto. Si nota come la soluzione del caso 3 porti ad una distribuzione delle sollecitazioni ancora disomogenea e molto simile a quella del caso base, osservabile in Fig.29. La soluzione esaminata nel caso 3 non è dunque da prendere in considerazione, in quanto presenta gli stessi problemi di disuniformità di sollecitazione presenti nel caso base, introducendo anche delle sollecitazioni di picco più elevate dovute alla maggiore forza puntuale esercitata dal pistone.

6.2.7 Batch: Caso 4

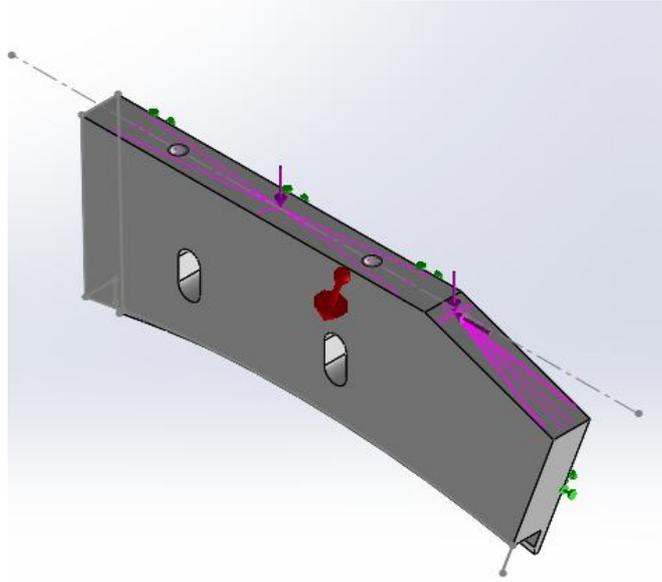


Figura 36: Carichi caso 4

In Fig. 36 è possibile osservare il sistema di carichi e vincoli agenti sulla spondina nel caso 4. Il sistema di vincoli non varia mentre a variare sono i punti di applicazione delle forze, ancora perpendicolari alla superficie. Come ipotesi di studio, si è considerata in questo caso l'applicazione dei pistoni sempre perpendicolare alle superfici, con uno applicato sulla superficie del "lato lungo" all'altezza all'incirca della metà del tratto e l'altro applicato sulla superficie del "lato corto" nei pressi dello spigolo che divide il "lato lungo" dal "lato corto".

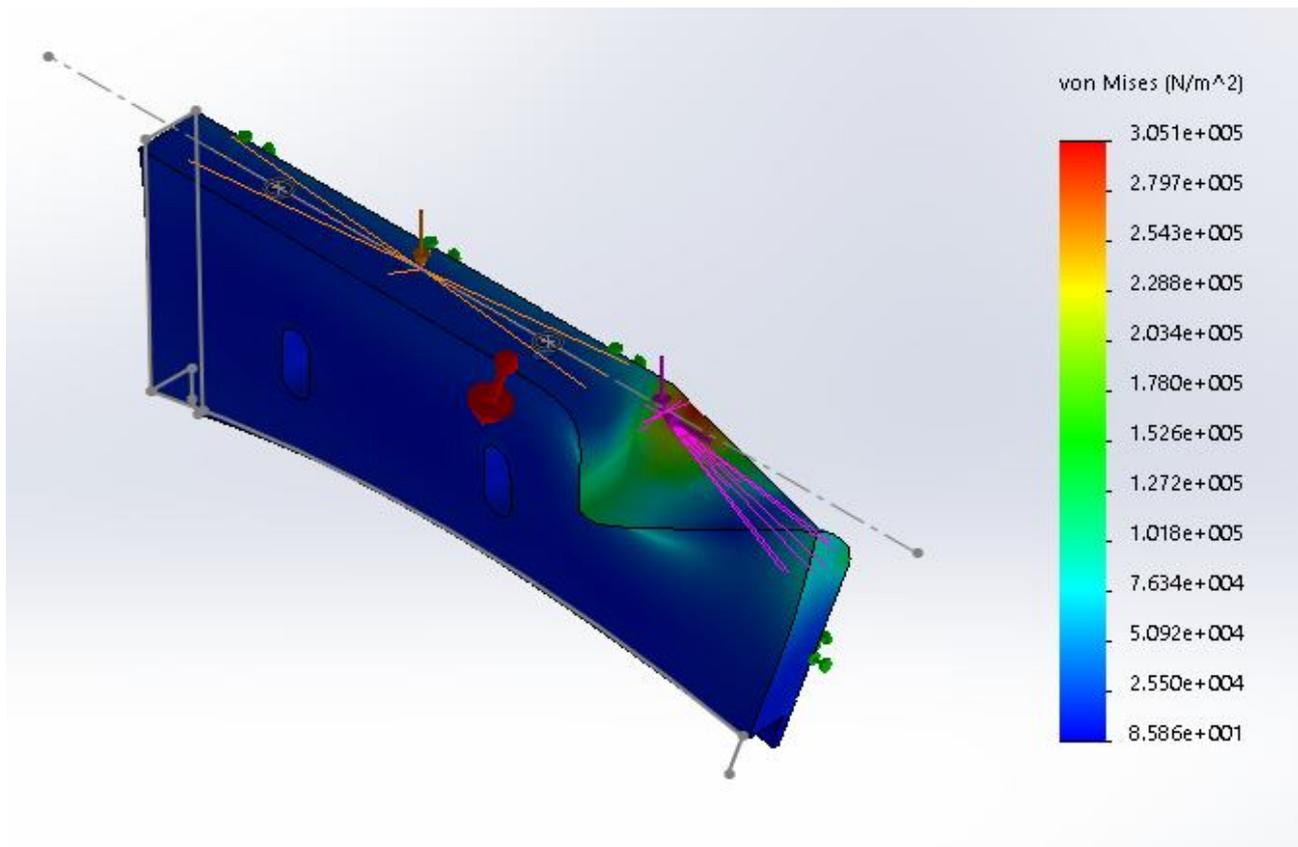


Figura 37: Deformata caso 4. Vista isometrica

Osservando la deformata si nota come il componente venga sollecitato in maniera diversa rispetto al caso precedente. La tensione di Von Mises di picco si attesta attorno ai $300000 \frac{N}{m^2}$, dunque risulta incrementata di circa del 100% rispetto a quella del caso 3 ed è dunque di gran lunga la più alta fra i casi esaminati finora.

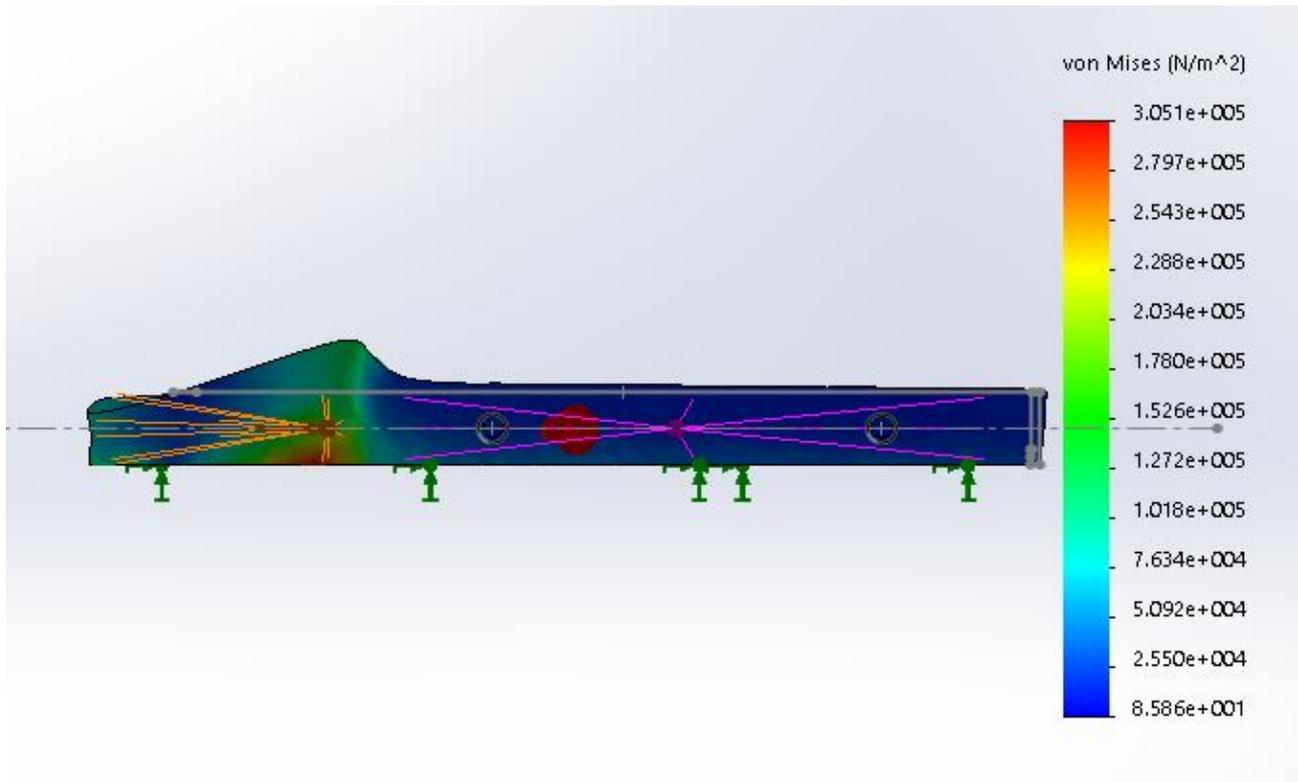


Figura 38: Deformata caso 4. Vista dall'alto

La distribuzione delle sollecitazioni sulla superficie di applicazione può essere osservata attraverso la vista dall'alto. Si nota come la soluzione del caso 4 porti ad una distribuzione delle sollecitazioni altamente disomogenea. Anche qui si trova una sollecitazione superiore a livello del "lato corto" come nei casi 1 e 3, tuttavia il picco risulta molto più alto in questo caso e la disomogeneità risulta dunque incrementata. Ciò è sicuramente legato al fatto che applicare un carico in prossimità di un intaglio come uno spigolo porta ad un notevole incremento delle tensioni locali. La soluzione esaminata nel caso 4 non è dunque da prendere in considerazione, in quanto presenta incrementati problemi di disuniformità di sollecitazione rispetto al caso base, introducendo anche delle sollecitazioni di picco più elevate dovute alla maggiore forza puntuale esercitata dal pistone.

6.2.8 Batch: Caso 5

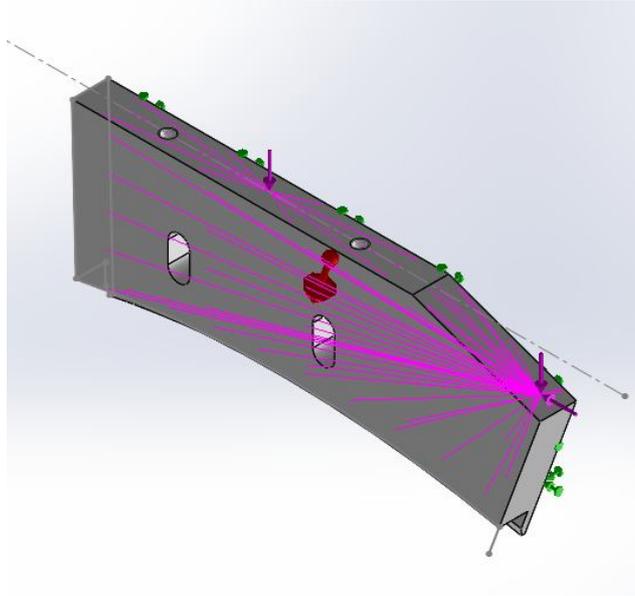


Figura 39: Carichi caso 5

In Fig. 39 è possibile osservare il sistema di carichi e vincoli agenti sulla spondina nel caso 5. Il sistema di vincoli non varia mentre a variare sono i punti di applicazione delle forze, ancora perpendicolari alla superficie. Come ipotesi di studio, si è considerata in questo caso l'applicazione dei pistoni sempre perpendicolare alle superfici, con uno applicato sulla superficie del "lato lungo" all'altezza all'incirca della metà del tratto e l'altro applicato sulla superficie del "lato corto" nei pressi dell'estremità terminale della spondina.

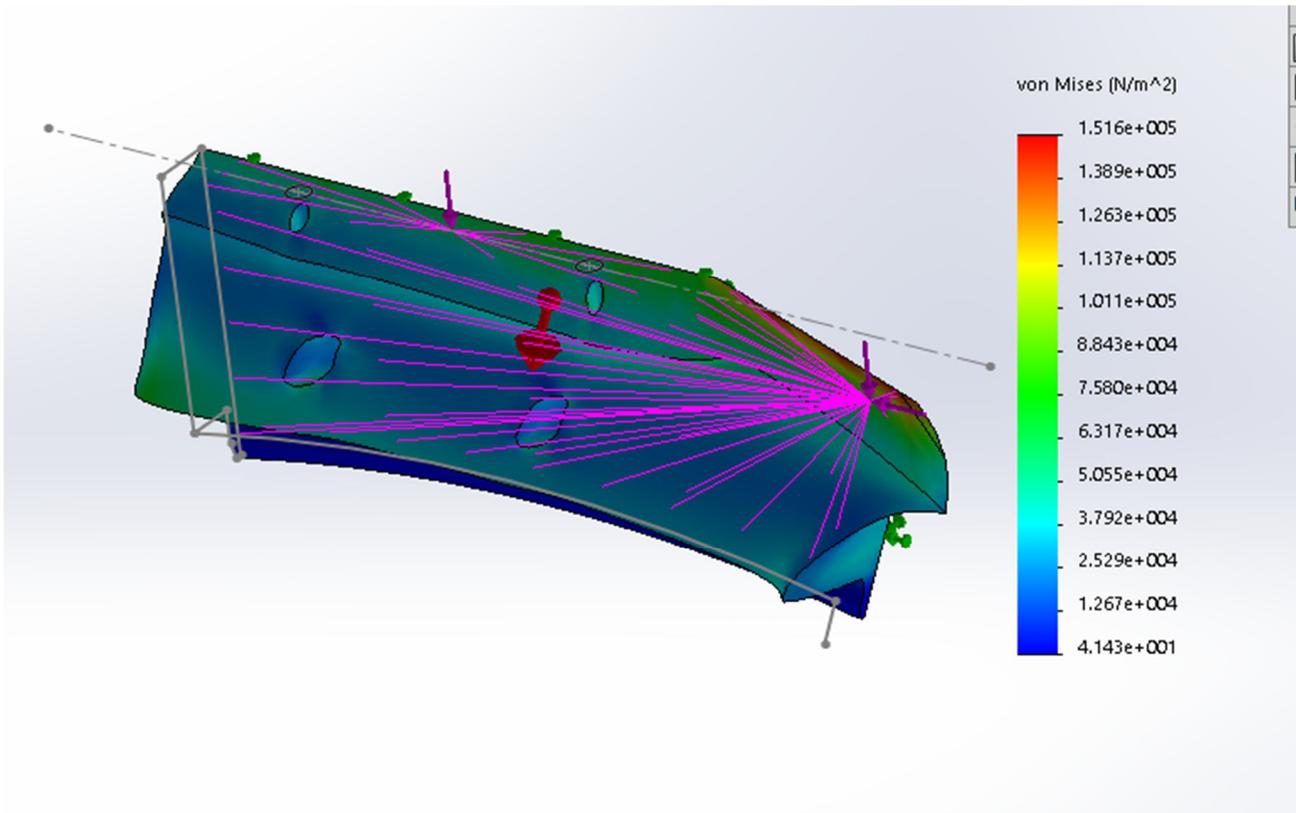


Figura 40: Deformata caso 5. Vista isometrica

Osservando la deformata si nota come il componente venga sollecitato in maniera diversa rispetto al caso precedente. La tensione di Von Mises di picco si attesta attorno ai $150000 \frac{N}{m^2}$, dunque risulta dimezzata rispetto a quella del caso 4 ed ha un valore confrontabile con quelle dei casi 2 e 3. Rispetto ai casi precedenti si può notare come vengano introdotte delle sollecitazioni anche a livello della superficie frontale, seppur non di elevatissima entità.

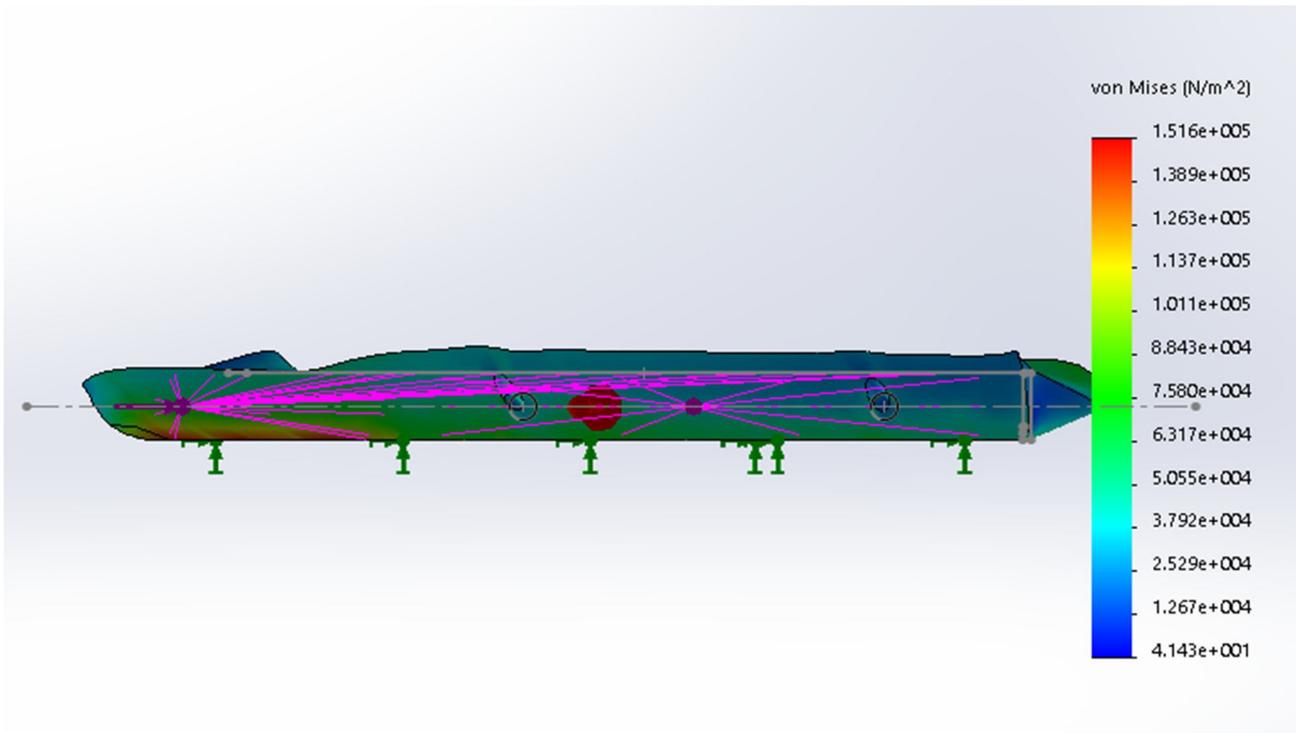


Figura 41: Deformata caso 5. Vista dall'alto

La distribuzione delle sollecitazioni sulla superficie di applicazione può essere osservata attraverso la vista dall'alto. Si nota come la soluzione del caso 5 porti ad una distribuzione delle sollecitazioni che, al contrario dei casi precedenti, risulta decisamente omogenea. La soluzione esaminata nel caso 5 è dunque da prendere in considerazione, in quanto risolve i problemi di disuniformità di sollecitazione rispetto al caso base. Dalla Fig.41 si nota come la sollecitazione media dei nodi sulla superficie sia più alta rispetto ai casi precedenti. Questo punto verrà approfondito più avanti nell'analisi della sollecitazione media nodale e sarà decisivo per valutare la bontà di questa soluzione.

6.2.9 Batch: Caso 6

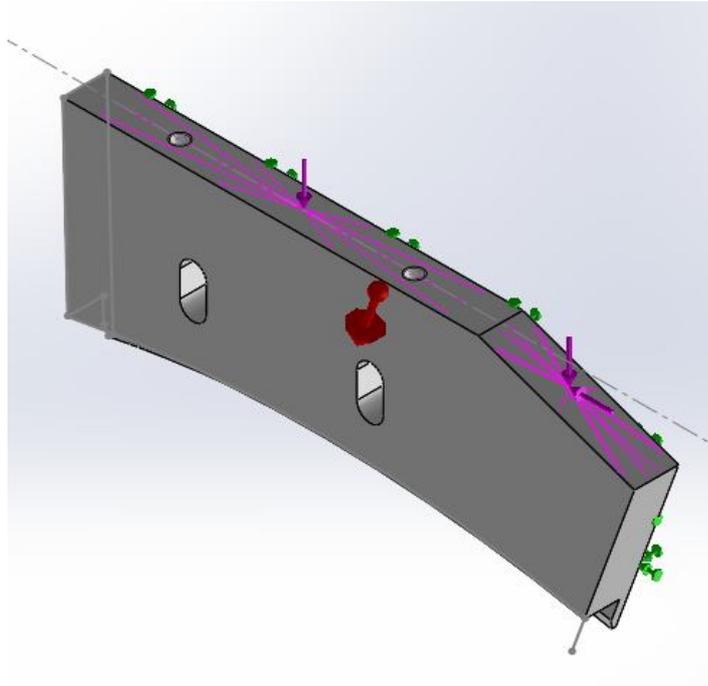


Figura 42: Carichi caso 6

In Fig. 42 è possibile osservare il sistema di carichi e vincoli agenti sulla spondina nel caso 6. Il sistema di vincoli non varia mentre a variare sono i punti di applicazione delle forze, ancora perpendicolari alla superficie. Come ipotesi di studio, si è considerata in questo caso l'applicazione dei pistoni sempre perpendicolare alle superfici, con uno applicato sulla superficie del "lato lungo" all'altezza all'incirca della metà del tratto e l'altro applicato sulla superficie del "lato corto" anche qui all'altezza all'incirca della metà del tratto.

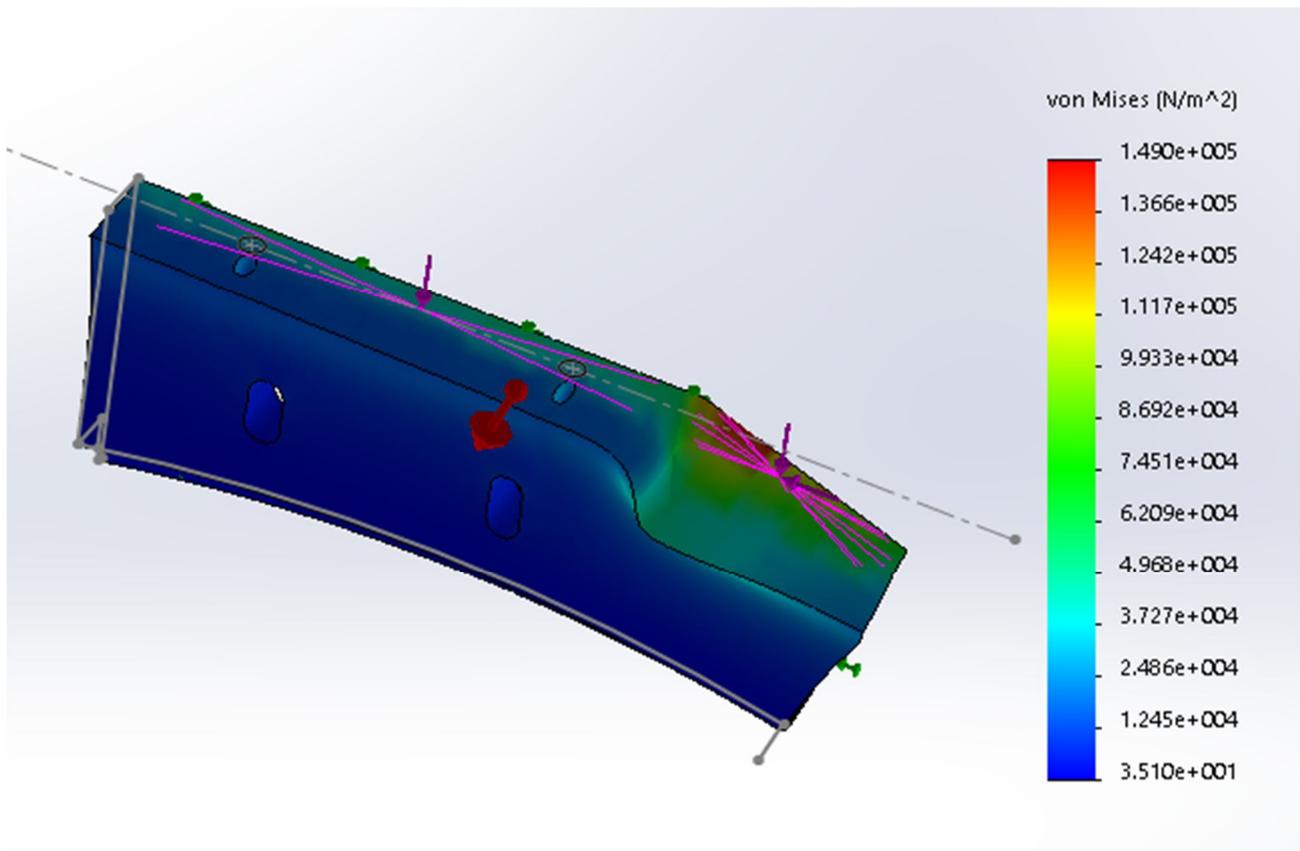


Figura 43: Deformata caso 6. Vista isometrica

Osservando la deformata si nota come il componente venga sollecitato in maniera diversa rispetto al caso precedente. La tensione di Von Mises di picco si attesta attorno ai $150000 \frac{N}{m^2}$, dunque risulta dimezzata rispetto a quella del caso 4 ed ha un valore confrontabile con quelle dei casi 2, 3 e 5.

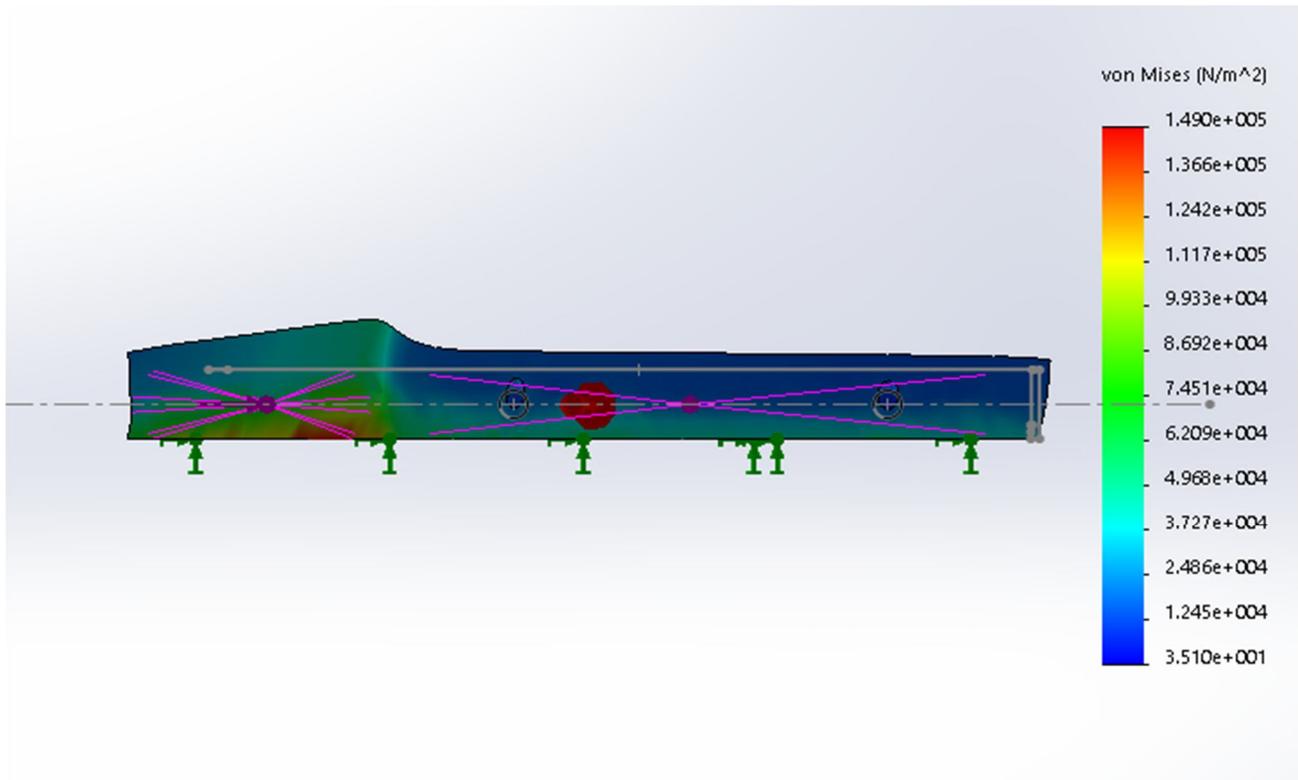


Figura 44: Deformata caso 6. Vista dall'alto

La distribuzione delle sollecitazioni sulla superficie di applicazione può essere osservata attraverso la vista dall'alto. Si nota come la soluzione del caso 6 porti ad una distribuzione delle sollecitazioni che presenta ancora una disomogeneità che ricorda i casi 1 e 3 ma più moderata. La soluzione esaminata nel caso 6 è dunque meno critica relativamente ai problemi di disuniformità di sollecitazione rispetto al caso base e dunque può essere considerata come la più valida alternativa dopo il caso 5.

6.3 Analisi delle sollecitazioni nodali

L'analisi della distribuzione delle sollecitazioni è finora stata condotta semplicemente dal punto di vista grafico, tramite il confronto visivo delle sollecitazioni reso possibile dalla configurazione deformata della struttura. Per ottenere un supporto anche numerico alle conclusioni che si sono delineate dal punto di vista grafico, si è resa necessaria una ulteriore analisi che prendesse in esame i valori numerici delle sollecitazioni dei singoli nodi sulle superfici del “lato lungo” e del “lato corto”. Una volta ottenuti i valori numerici di tensione per ciascun nodo delle due superfici, sono stati individuati il valore massimo e il valore medio di tensione per i nodi di ciascuna delle due superfici. Il rapporto fra i valori di tensione massima e i valori di tensione media dei nodi delle due superfici è stato preso come valore di riferimento per caratterizzare il livello di omogeneità di sollecitazione che si riscontra sulla superficie su cui agiscono i pistoni. Più tali rapporti risultano vicini ad 1, più la soluzione che ha prodotto tali rapporti è da considerarsi valida.

I rapporti vengono definiti tramite l'ausilio di due coefficienti:

$$R_max = \frac{\sigma_{MAX,LC}}{\sigma_{MAX,LL}} \quad (13)$$

$$R_av = \frac{\sigma_{av,LC}}{\sigma_{av,LL}} \quad (14)$$

Con:

- $\sigma_{MAX,LC}$: Tensione nodale massima sul “lato corto”;
- $\sigma_{MAX,LL}$: Tensione nodale massima sul “lato lungo”;
- $\sigma_{av,LC}$: Tensione nodale media sul “lato corto”;
- $\sigma_{av,LL}$: Tensione nodale media sul “lato lungo”;

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
R_max	2,12	0,09	2,13	3,24	1,87	2,32
R_av	1,38	0,47	1,38	1,24	1,34	1,20

Tabella 14: R_max e R_av per i diversi casi di studio

Come si vede dalla Tabella 14, il caso base presenta valori di R_max e R_av di 2,12 e 1,38 rispettivamente. Tali valori saranno quelli da prendere come riferimento in quanto gli altri casi di

studio dovranno presentare coefficienti migliori (più vicini all'unità) per poter essere presi in considerazione come soluzioni migliorative.

Nel caso 2, i coefficienti definiti sono rispettivamente di 0,09 e 0,47. Il rapporto fra le tensioni massime conferma ciò che già si era intuito in fase di analisi grafica delle sollecitazioni: la grandissima disomogeneità di sollecitazione che era emersa precedentemente viene confermata dal fatto che la tensione massima nodale sul lato lungo è circa 10 volte superiore rispetto a quella sul lato corto e quindi il secondo caso non è risolutivo.

Il caso 3 rappresenta un sistema di montaggio che sollecita il componente con un livello di uniformità molto simile a quello che avveniva nel caso 1, tanto da produrre coefficienti pressoché identici. Dunque, il caso 3 non apparirebbe migliorativo rispetto al caso 1.

Il caso 4 presenta un coefficiente R_{av} leggermente migliore rispetto al caso base ma peggiora notevolmente il coefficiente R_{max} , per i motivi già discussi nel paragrafo precedente.

Il caso 5 presenta dei coefficienti decisamente migliori rispetto al caso base, soprattutto rispetto al coefficiente R_{max} che si riduce del 12 % rispetto quello del caso base. Per quanto riguarda il coefficiente R_{av} si hanno dei miglioramenti seppur molto piccoli (attorno al 3%).

Per quanto riguarda il caso 6 esso presenta, rispetto al caso base, un aumento del 9 % rispetto al caso 1 di R_{max} , mentre si registra un abbassamento di R_{av} più cospicuo rispetto a quanto non avvenga per il caso 5 (si parla in questo caso del 13 %).

Alla luce di questi dati la soluzione migliorativa sotto tutti i punti di vista appare essere quella del caso 5. Sebbene dal punto di vista numerico i miglioramenti possano sembrare non così importanti va anche ricordato che implementando una soluzione con attuatori pneumatici, si sceglie un sistema di montaggio che elimina la variabilità dovuta al montaggio manuale in quanto in questo nuovo scenario i meccanici dovranno limitarsi ad applicare il valore di pressione prescritto e valutato mediante calcolo.

7. Realizzazione costruttiva

Il passo successivo è la realizzazione costruttiva della soluzione appena identificata. Il problema non è di banale risoluzione in quanto gli ingombri dei pistoni e i limitati spazi a disposizione per il montaggio degli stessi sulla macchina costituiscono dei vincoli strutturali di cui non si può fare a meno di tener conto in ambito di scelta della soluzione finale. Come si può notare osservando la Fig.40, la soluzione ottimale scelta prevede l'applicazione di forze tramite due attuatori pneumatici, agenti perpendicolarmente rispetto alla struttura in punti ben precisi e situati rispettivamente a metà del "lato lungo" e nei pressi dell'estremità terminale del "lato corto". L'applicazione di quest'ultima forza in particolare risulta molto complicata visto il ridottissimo spazio presente nei pressi del punto di applicazione della forza desiderato.

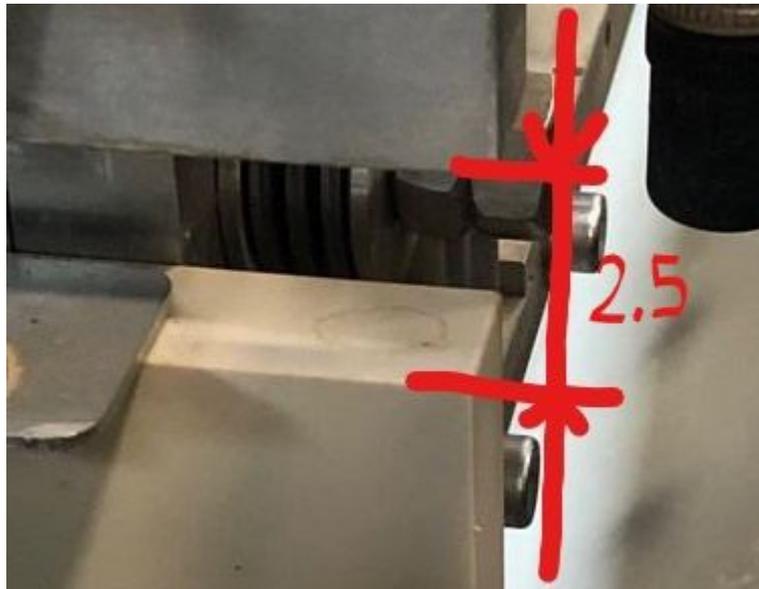


Figura 45: Spazio disponibile sul lato corto spondina

Come si può vedere dalla Fig.45, lo spazio a disposizione al di sopra del "lato corto" della spondina corrisponde a 2.5 cm dunque non sufficiente per il montaggio di un attuttore pneumatico che possa incidere perpendicolarmente su tale superficie.

Per ovviare a tale problema sono state ideate tre possibili soluzioni che sfruttano altre aree comprese nello spazio al di sopra della spondina per riuscire a incidere sul "lato corto" della stessa.



Figura 46: Spazio disponibile per l'azione dei pistoni

In Fig. 46 si può notare, delimitata dal contorno rosso, l'area al di sopra della spondina che è disponibile per l'azione dei pistoni. Le prime due soluzioni prese in esame sfrutteranno proprio tale spazio per esercitare l'azione di pressione necessaria sul "lato corto" della spondina.

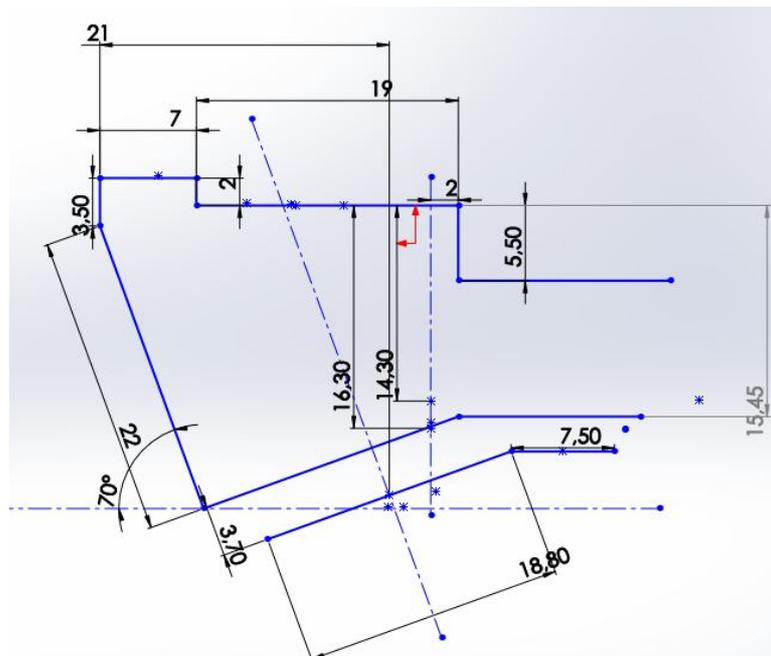


Figura 47: Spazio disponibile in 2D

In Fig.47, è riportato lo spazio fisico sopra la spondina con le relative quote. Il tool utilizzato per portare a termine l'analisi è Solidworks 2016. Attraverso il disegno 2D quotato è possibile determinare in maniera semplice e immediata la fattibilità dimensionale delle soluzioni scelte.

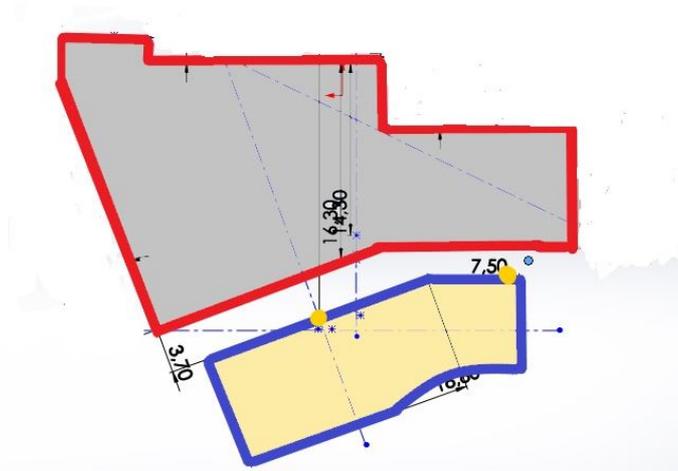


Figura 48: Rappresentazione grafica spondina e spazio sopra spondina

Dalla Fig.48 si ha una rappresentazione grafica chiara dello spazio a disposizione al di sopra della spondina, indicato in grigio con contorno rosso. La spondina è invece rappresentata dalla figura gialla con contorno blu. Con i pallini gialli in particolare, si indicano i punti in cui si intende applicare la forza attraverso i pistoni. Essendo dunque da aggirare il problema relativo ai ridottissimi ingombri nella zona immediatamente superiore il “lato corto” della spondina, sono state ideate delle soluzioni operative che utilizzano leve o differenti tipologie di pistoni per riuscire ad imprimere la forza desiderata sul profilo della spondina.

7.1 Soluzione α : Leva a V

La prima soluzione che si intende studiare è la soluzione α . Tale soluzione riesce ad aggirare il problema degli scarsi ingombri al di sopra della spondina sfruttando l'azione di una leva a V. Infatti, mentre la forza sul "lato lungo" viene applicata semplicemente grazie al montaggio di un attuatore che incide perpendicolarmente alla superficie della spondina, la forza sul "lato corto" viene trasmessa proprio attraverso l'intermediazione di una leva a V.

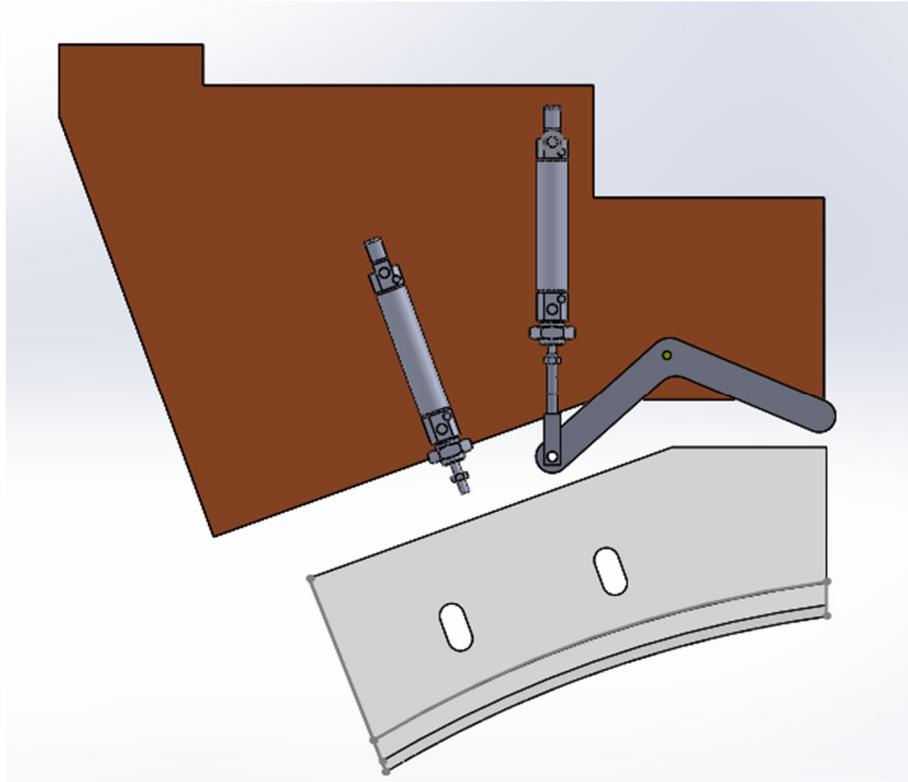


Figura 49: Soluzione α . Stato di non contatto.

La Fig.49 rappresenta schematicamente ed in modo semplificato il funzionamento del sistema nello stato di non contatto. Essendo l'area in marrone la figura rappresentante lo spazio disponibile al di sopra della spondina si nota come la zona soprastante il "lato lungo" risulta essere molto più ampia di quella sopra il "lato corto" e dunque si ritiene opportuno sfruttare tale spazio anche per il secondo pistone.

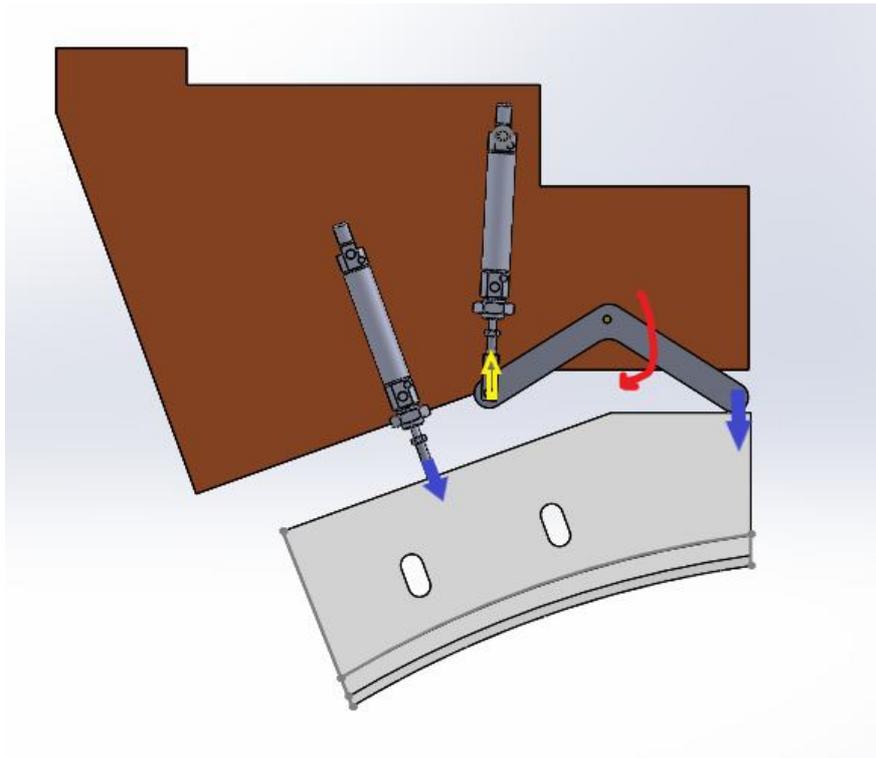


Figura 50: Soluzione a. Stato di contatto

La “leva a V”, realizzata in alluminio, è fissata tramite una cerniera alla struttura retrostante ed ha dunque facoltà di ruotare. Quando il pistone sulla destra è nella fase di corsa dal basso verso l’alto, essendo il pistone vincolato alla leva stessa, viene generata una rotazione oraria della leva. Tale rotazione porta dunque la leva a contatto con la spondina, consentendole di trasmettere la forza richiesta. Essendo i bracci della leva di uguale lunghezza, la forza trasmessa dalla leva alla spondina sarà la stessa trasmessa dal pistone: regolando la corsa del pistone è dunque possibile selezionare con precisione la forza trasmessa al pistone stesso.

Il pistone di sinistra viene alimentato in modo da avere una corsa in direzione opposta rispetto al pistone di destra in modo che i due sistemi facciano contemporaneamente pressione. Dunque l’azione dei due pistoni è alternata: mentre uno “tira” l’altro dovrà “spingere”.

Risulta sicuramente opportuno sottolineare come, per consentire il funzionamento di questo tipo di sistema, occorra fissare l’attuatore di destra con un vincolo che consenta la rotazione, altrimenti risulterebbe impedita la rotazione dell’estremo della leva collegato a tale pistone.

7.2 Soluzione β : leva diritta

La seconda soluzione che può essere studiata è chiamata soluzione β . Anche questa soluzione riesce ad aggirare il problema degli scarsi ingombri al di sopra della spondina sfruttando l'azione di una leva. Tuttavia, in questo caso, si cerca di utilizzare una leva di forma diritta anziché “a V”.

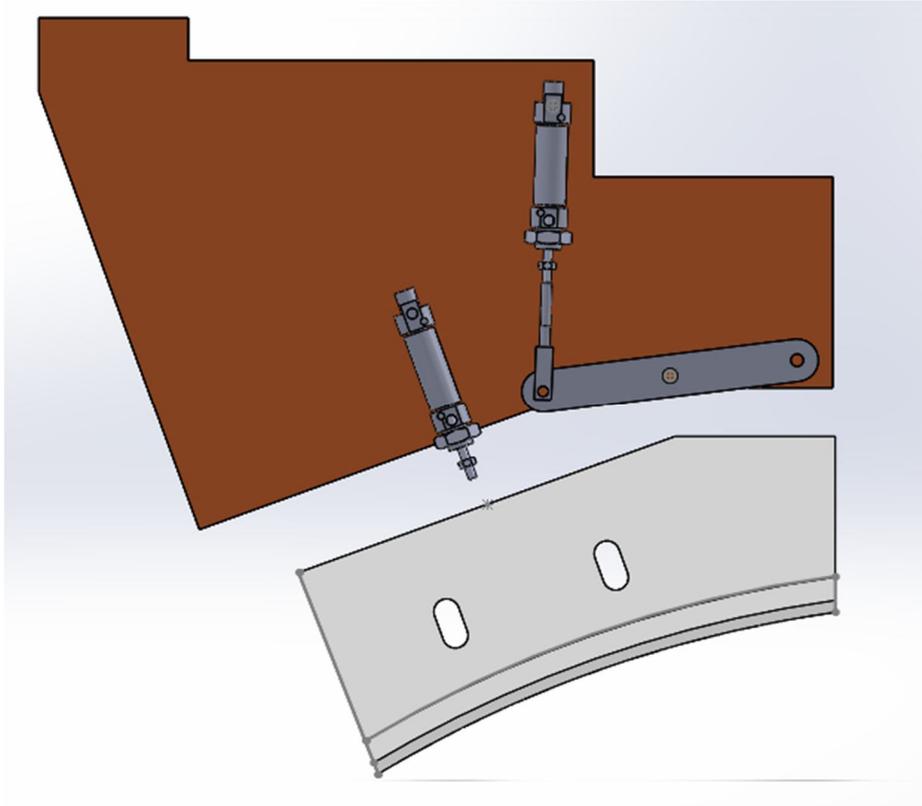


Figura 51: Soluzione β . Stato di non contatto.

Dalla Fig.51 si nota un'ulteriore differenza introdotta da quest'ultima soluzione: per rendere utilizzabile questa seconda soluzione è anche qui necessario vincolare la leva alla struttura retrostante. Per questione di ingombri il funzionamento della presente soluzione è subordinato all'adozione di un modello di pistone più corto di circa 3 cm. La realizzazione di questa tipologia di pistone può essere ottenuta da fornitori o officine convenzionate.

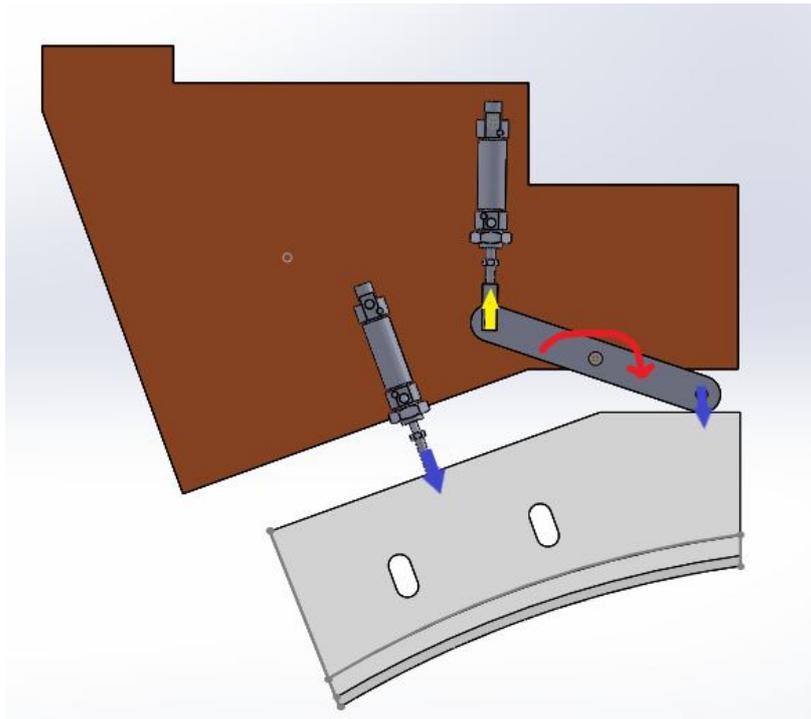


Figura 52: Soluzione β . Stato di contatto.

Il principio di funzionamento è analogo a quello del precedente sistema. La leva, questa volta dritta, realizzata in alluminio, è anche qui fissata tramite una cerniera alla struttura retrostante ed ha dunque facoltà di ruotare. Quando il pistone sulla destra è nella fase di corsa dal basso verso l'alto, essendo il pistone vincolato alla leva stessa, viene generata una rotazione oraria della leva. Tale rotazione porta dunque la leva a contatto con la spondina, consentendole di trasmettere la forza richiesta. Essendo i bracci della leva di uguale lunghezza, la forza trasmessa dalla leva alla spondina sarà la stessa trasmessa dal pistone: regolando la corsa del pistone è dunque possibile selezionare con precisione la forza trasmessa al pistone stesso, analogamente a quanto avviene nella soluzione α .

Il pistone di sinistra viene alimentato in modo da avere una corsa in direzione opposta rispetto al pistone di destra in modo che i due sistemi facciano contemporaneamente pressione. Dunque l'azione dei due pistoni è alternata: mentre uno "tira" l'altro dovrà "spingere".

Ovviamente, il funzionamento è anche qui subordinato al fissaggio del pistone di destra con un vincolo che consenta la rotazione.

7.3 Soluzione γ : pistone compatto con montaggio laterale

L'ultima soluzione investigata parte da una considerazione derivante dalla soluzione β . Come specificato nel precedente paragrafo, l'implementazione della soluzione β richiede l'utilizzo di un pistone compatto. Essendovi dunque l'opportunità di realizzazione ed implementazione di un pistone compatto e dunque dalle dimensioni ridottissime, si può pensare ad una soluzione, chiamata γ , nella quale uno di questi pistoni viene montato direttamente nella zona soprastante il "lato corto" della spondina. Tale soluzione richiederebbe l'adozione di un pistone che abbia un ingombro complessivo (comprensivo della corsa) di massimo 12,5 cm.

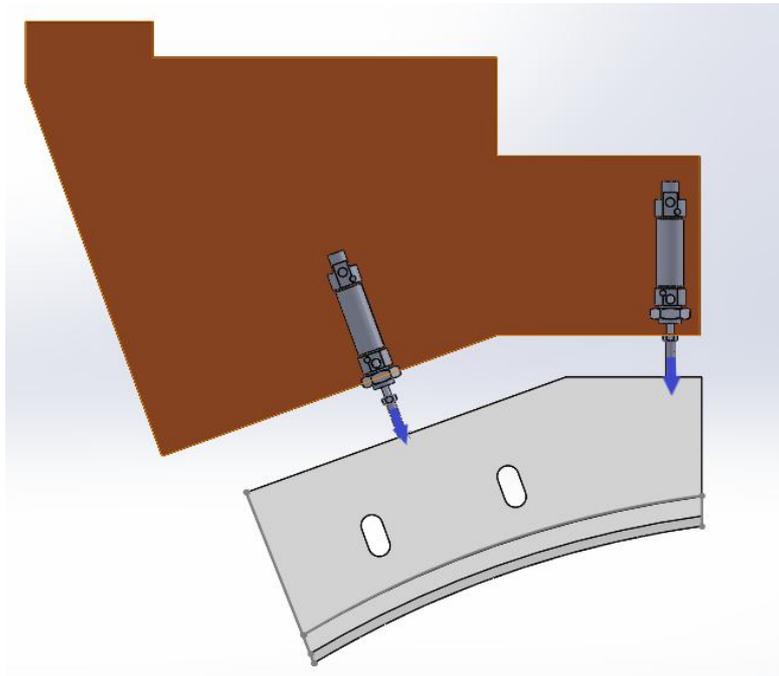


Figura 53: Soluzione γ

Come si vede in Fig.53, l'effetto dei due pistoni in questo caso non è alternato ma sincrono. I due pistoni dunque "spingono" in contemporanea.

7.4 Valutazione delle ipotesi e scelta della soluzione

Alla luce delle nuove ipotetiche soluzioni di montaggio è possibile stilare i pro e i contro di ciascuna di esse e delineare qual è la più efficace fra esse. Partendo dal presupposto che ciascuna delle ipotesi proposte riesca a trasmettere con la stessa efficacia la forza necessaria sulla spondina (presupposto da validare con successivi test sul campo), è evidente come la soluzione vincente debba essere scelta in nome della semplicità.

La soluzione α è quella che consente l'impiego di attuatori più convenzionali e commerciali. Tuttavia, sia la α sia la soluzione β richiedono l'aggiunta di un componente extra al sistema di montaggio, ovvero una leva che comunque rappresenta oggettivamente un'ulteriore complicazione dal punto di vista pratico.

La soluzione γ è l'unica fra tali soluzioni a non richiedere l'implementazione di tale componente ed è dunque sicuramente la migliore dal punto di vista della semplicità. L'impiego di un pistone non convenzionale e compatto potrebbe teoricamente rappresentare un ostacolo ma tramite il coinvolgimento di fornitori interni all'azienda si è accertato come l'accessibilità di tale componente sia semplice e immediata.

La soluzione γ è dunque la prescelta. Per applicare una forza di 72 N, su una superficie del pistone di circa 220 mm, sarà necessario applicare una pressione di 3,6 bar.

8. Risultati attesi e Follow-up actions

Come si evince dagli obiettivi che ci si erano preposti inizialmente per questo caso di studio fra i risultati attesi ci sono:

- Aumento dell'MTBF legato alla spondina;
- Inserimento della manutenzione della spondina nelle manutenzioni preventive.

Il grafico ideale dell'MTBF a seguito di questo intervento è quello sotto riportato:

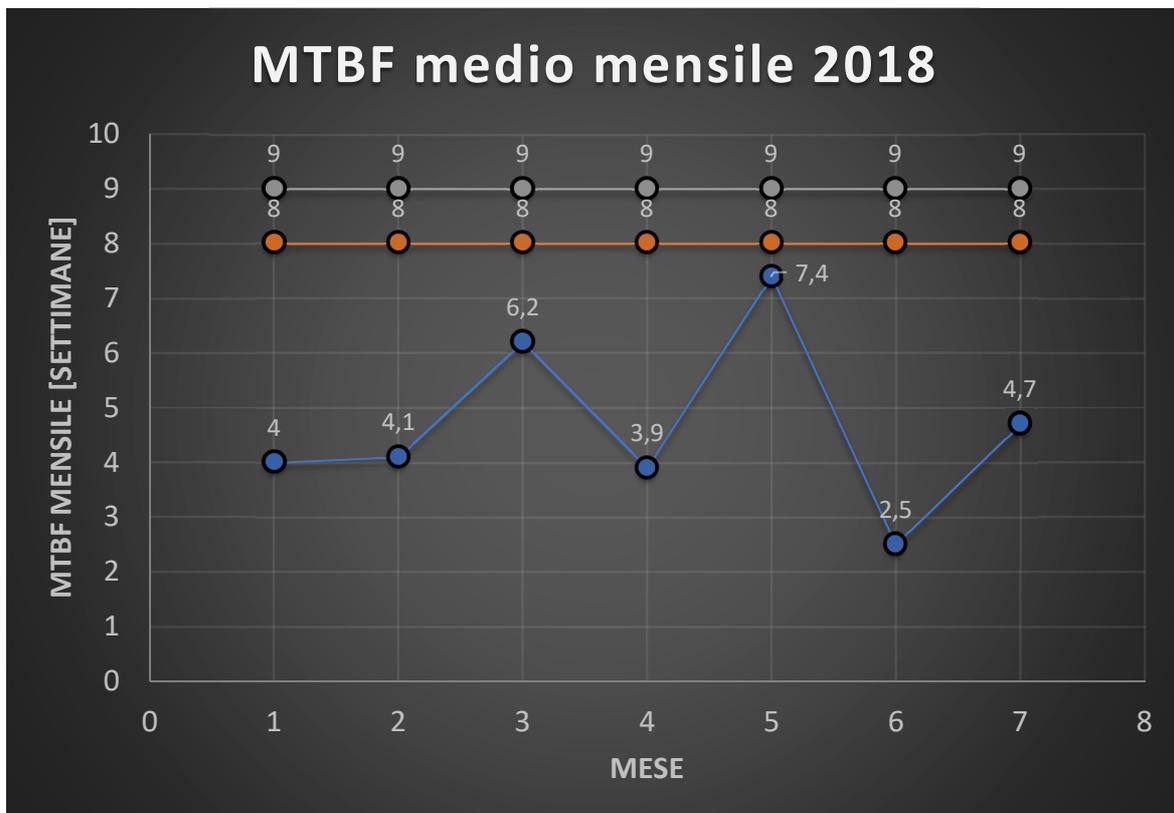


Figura 54: MTBF caso ideale

La Fig.54 permette di apprezzare a pieno i vantaggi della nuova soluzione implementata per le spondine, sia in termini di durata che in termini di affidabilità.

L'MTBF atteso a valle dell'applicazione del nuovo sistema di montaggio va dalle 8 alle 9 settimane, a seconda dell'uptime della linea, con un miglioramento di almeno il 60% rispetto al valore di MTBF medio attuale.

Per quanto riguarda il secondo punto il risultato è definito "ideale" in quanto la linea costante dell'MTBF sarebbe il risultato dell'ottenimento di una perfetta ripetibilità nella sostituzione della spondina. A valle della sperimentazione pratica in campo della soluzione implementata infatti, si

otterrebbe un dato fondamentale, ovvero quello del nuovo MTBF reale legato alla spondina, dato accompagnato fra l'altro da un'altissima ripetibilità stando alle premesse legate alle caratteristiche del nuovo meccanismo di serraggio.

Tali risultati vengono ottenuti implementando un semplice intervento migliorativo relativo al sistema di montaggio del componente, caratterizzato da un ROI inferiore alle 2 settimane.

Come follow-up action a valle di questo studio vi è dunque sicuramente la definizione di un affidabile valore di MTBF reale. L'affidabilità di tale valore risulta cruciale in quanto l'attività immediatamente successiva è la definizione del suddetto valore come frequenza di regolazione/sostituzione della spondina, permettendo a tale attività di poter rientrare a tutti gli effetti fra le attività di manutenzione preventiva.

L'esecuzione di una regolazione o sostituzione di una spondina sarebbe dunque effettuata rispettando con una tolleranza del 25% la frequenza determinata come precedentemente discusso. Sarebbe dunque in tal modo raggiunto il secondo obiettivo del lavoro di tesi: regolare o sostituire una spondina non è più un'attività accidentale la cui esecuzione richiede un apposito fermo delle macchine, ma un'attività da svolgere in maniera periodica e sistematica, sfruttando i fermi programmati della macchina per anticipare il guasto.

Tale risultato è importantissimo in quanto risulta applicazione concreta della tesi iniziale, ovvero la necessità di eliminare progressivamente laddove possibile le tipologie di manutenzione "a guasto" a favore delle manutenzioni preventive, realizzando indubbiamente un considerevole vantaggio economico.

9. Conclusioni

Alla luce delle analisi effettuate e dei risultati ottenuti è possibile fare alcune considerazioni conclusive relative al presente lavoro di tesi.

Come già argomentato nella parte introduttiva, l'applicazione di pratiche di manutenzione "a guasto" non può trovare spazio in un contesto produttivo già proiettato verso le logiche dell'Industry 4.0 ed è dunque necessaria l'eliminazione di situazioni sconvenienti di malfunzionamento individuabili solo a guasto avvenuto.

Fra queste situazioni figura sicuramente quella legata al malfunzionamento della spondina, individuabile attualmente solo a seguito di conseguenze evidenti sulla qualità del prodotto. Per rendere la manutenzione di tale componente preventiva è stato dapprima necessario trovare una nuova condizione di lavoro che risultasse migliorativa rispetto alla precedente ed in secondo luogo rendere tale condizione di lavoro realizzabile nella pratica e foriera di omogeneità e ripetitività nel processo di usura del componente.

In definitiva si può affermare che:

- Attraverso l'impiego di strumenti avanzati come la sensoristica o la modellazione CAD, è possibile raccogliere grandi quantità di dati relativi al modello e alle sue condizioni di lavoro oppure riuscire a simulare numerosissimi differenti scenari operativi per il componente al fine di individuare quello in cui esso dà il migliore contributo in termini di prestazioni, affidabilità ed usura;
- Individuata la soluzione dal punto di vista teorico, è poi necessario fornire una soluzione tecnica che rifletta nella pratica le condizioni di lavoro ottime individuate. Tale soluzione dovrà dunque tenere conto di problemi pratici come misure, materiali ed ingombri. Importantissimo oltre a questo che la soluzione tecnica individuata sia in grado di assicurare l'omogeneità di usura del componente, portando lo stesso a consumarsi con ripetibilità ed agevolando dunque il passaggio all'applicazione di manutenzioni preventive a spese di quelle che precedentemente erano "a guasto".

Con il presente lavoro di tesi non si mira dunque semplicemente alla risoluzione del problema delle spondine, ma si mira a proporre un metodo standard all'azienda che le permetta di analizzare nel dettaglio e risolvere casi simili a quello proposto, applicando così in maniera estesa una strategia di manutenzione preventiva all'intero modello produttivo.

Bibliografia

- [1] *Delibera OCSE*, 1963.
- [2] A. Topi, «Il processo di definizione di politiche di manutenzione predittiva di una linea di produzione. Il caso Philip Morris MTB».
- [3] C. Galasso, «Generalità sul servizio manutenzione,» in *Appunti di Impianti Industriali*.
- [4] *UNI 9910*, 1991.
- [5] F. M. Cominoli, *La manutenzione si può anche fare*, Pitagora, 2006.
- [6] F. Martini, *Analisi comparata delle tecniche innovative di manutenzione degli impianti industriali*.
- [7] L. Higgins e K. Mobley, *Maintenance Engineering Handbook*, Mc Graw-Hill Education, 2002.
- [8] K. Mobley, *Plant Engineer's Handbook*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [9] M. Bengtsson e M. Jackson, «Important aspects to take into consideration when deciding to implement Condition Based Maintenance».
- [10] K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth-Heinemann/Elsevier Science, 2002.
- [11] B. Mitchell e R. Murry, «Predictive Maintenance Program Evolution-Lesson Learned,» *1995 PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium*, pp. 7-10, 1995.
- [12] J. Kotter, «Leading Change,» *Harvard Business School Press*, 1996.
- [13] T. Plante, A. Nejadpak e C. X. Yang, «Faults detection and failures prediction using vibration analysis,» 2015.
- [14] R. Bogue, «Sensors for condition monitoring: a review of technologies and applications,» *Sensor Review*, vol. 33, n. 4, 2013.
- [15] D. Edwards, G. Holt e F. Harris, «Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 4, n. 1, 1998.
- [16] Hoffman, «Coverting tribology principles into measurable maintenance improvements at Sishen Iron Ore Mine,» *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 54, n. 5, 2002.
- [17] G. Newell, «Oil analysis cost-effective machine condition monitoring technique,» *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 51, n. 3, 1999.
- [18] M. Kumar, P. S. Mukherjee e N. M. Misra, «Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: a review,» *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 65, n. 1, 2013.
- [19] M. Al-Haboubi e S. Selim, «Noise change as an indicator of maintenance requirement,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 6, n. 1, 2000.

- [20] C. Santulli, «Qualità e manutenzione predittiva mediante il controllo non distruttivo in campo navale,» in *Le nuove tecnologie dei materiali e le loro applicazioni in campo navale*, Livorno, 1995.
- [21] G. Della Vecchia e A. Galli, «Un approccio semplificato per la valutazione delle strategie di manutenzione delle infrastrutture ferroviarie,» 2017.
- [22] R. Horner, «Building maintenance strategy:a new management approach,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 3, n. 4, pp. 273-280, 1997.
- [23] P. De Groote, «Maintenance performance analysis: a practical approach,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 1, n. 2, pp. 4-24, 1995.
- [24] C. Fragassa, «Manutenzione centralizzata in una fonderia di media grandezza,» luglio 2005.
- [25] D. Richet, N. Cotaina e O. Kenneth, «Guide TOMAS, Rapport de fin de projet,» Paris, 1992.
- [26] C. Randieri, «Tavola Rotonda "Predire...in manutenzione",» *Fieldbus & Networks*, vol. 84, 2015.
- [27] R. C. Parpala e R. Iacob, «Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment,» Bucharest, 2017.
- [28] M. Zarnik, F. Novak e G. Papa, «Sensors in proactive maintenance-A case of LTCC pressure sensors,» *Maintenance and Reliability*, 2018.
- [29] «Heatnotburn,» [Online]. Available: <https://heatnotburn.co.uk/iqos-update-inside-heet/>.
- [30] «SMC pneumatics,» [Online]. Available: <http://www.smc-pneumatics.com/pdfs/C85.pdf>.
- [31] *Delibera OCSE*, 1963.

Ringraziamenti

Sarò breve perché fra mezz'ora devo essere in tipografia a stampare.

Il ringraziamento più grande va di sicuro ai miei genitori, senza i quali nulla di tutto questo sarebbe stato possibile. Senza di loro sarei un David Trezeguet senza Del Piero e Nedved. Grazie a loro sono stato capace di esprimere le mie potenzialità, e nonostante il mio caratteraccio e il mio non avere mai tempo mi hanno sempre sopportato e sostenuto moralmente ed economicamente. I migliori.

Mi sento in dovere di ringraziare i miei relatori accademici, ossia i Prof. Alessandro Salmi e la Prof.ssa Laura Maria Vergani, il cui contributo è stato decisivo per rendere il mio lavoro più completo e all'altezza della conclusione di questo percorso. Senza di loro il mio lavoro sarebbe stato molto più superficiale e a loro riconosco il merito di avermi fornito un aiuto concreto.

Ringrazio di cuore i miei Tutor aziendale Francesco Tozzi e Alex Claudio e tutta la famiglia di Philip Morris. Ho ricevuto quasi da tutti nei miei pochi mesi trascorsi a lavoro grande rispetto, simpatia e cordialità e a loro tutti (in particolare a Maksim Deromemaj) va riconosciuto il merito di aver perso del tempo per provare a insegnare qualcosina a un caso perso come me.

Un grazie enorme anche al resto della mia vera famiglia, a partire da Maurizio, Fabio e Lucia e alla famiglia allargata composta dai miei amici di Andria Edmondo, Kosta, Lele e Mattia. Ciascuno di loro ha saputo restare al mio fianco per tutto questo tempo nonostante ci vedessimo poco e a volte fossi talmente preso dallo studio e da altro da non dedicare loro il tempo che meritavano.

Un ringraziamento particolare va a Marco Salamina, che è l'amico più grande che abbia avuto la fortuna di conoscere a Torino e che mi ha accompagnato quasi quotidianamente negli ultimi 5 anni in questo percorso, spesso regalando più attenzioni a me che alla sua ragazza (il che mi ha sempre preoccupato non poco se devo essere sincero). Sei un fratello.

Un grazie sentito a Daniele Strazzulla, Luca, Salvo e Valeria e tutti i compagni di lezione che hanno avuto la sfiga di vivermi quotidianamente sui banchi fra lezioni, esami e progetti. La vostra simpatia, intelligenza e caparbia mi hanno insegnato tanto e il sano spirito di competizione che ne è nato mi ha aiutato a puntare sempre in alto. Vi ringrazio e spero di non avervi umiliato troppo in questi anni.

Ultimi ma solo cronologicamente sono gli amici di Bologna Alessandro, Daniele Guerra, Davide Niccolò e Riccardo. È incredibile come da ciascuno di voi sono sempre stato trattato come fossimo amici da una vita, nonostante in realtà ci conosciamo da poco. Grazie a voi mi sono sentito a Bologna come se fossi a casa e se non ho passato tutto il tempo libero a casa a fare la Tesi è colpa vostra.

Un grazie a chi mi ha accompagnato anche solo per un tratto, ma oggi non è qui perché le nostre strade si sono divise. Siete state persone molto importanti per me e sarebbe ingiusto non citarvi.

Il tempo è scaduto e sono in ritardo, ho dimenticato un botto di persone fra gli amici di Torino, Bologna e Andria e i ragazzi dell'ASP, tutte persone fantastiche e importanti ognuna a suo modo.

Spero mi perdoniate ma la Tesi va stampata. Vi voglio bene.