

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
In Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Metodologie e algoritmi di
diagnostica predittiva applicata a
sollevatori telescopici.**



Relatore

Prof. Aurelio Somà

Correlatore

Ing. Federico Fraccarollo

Candidato

Martina Pagano

A.A. 2022-2023

Sommario

1. Introduzione	3
1.1. Obiettivo	3
2. Architettura della macchina Merlo.....	12
2.2. Movimatica - LOCALIZZAZIONE GPS SU RETE MOBILE	13
2.3. Merlomobility	15
2.4. I prodotti di Merlo Spa	16
3. Analisi data set di monitoraggio dei telescopici Merlo	28
4. Analisi bibliografica di algoritmi di diagnostica predittiva: sottosistemi analizzati, tipologia, valenza e applicabilità	31
4.1. Articolo 1- A Scalable Digital Twin Framework Based on a Novel Adaptive Ensemble Surrogate Model	31
4.2. Articolo 2 - ANALISI BUCKLING DI UN SOLLEVATORE TELESCOPICO: VALIDAZIONE TEORICA E NUMERICA	40
5. Applicazione degli algoritmi al data set per effettuare diagnostica predittiva.....	47
6. Esempi applicativi di verifica del modello	63
7. Applicazione del modello per diagnostica su telescopico Merlo TF 42.7 -Risultati	70

1. Introduzione

1.1. Obiettivo

Il tema dell'industria 4.0 non è più un puro e semplice approccio tecnologico, ma è diventato strategico per il suo collegamento diretto con la sicurezza di lavoratori ed i costi della gestione.

Si può parlare anche della manutenzione preventiva che è un approccio che mira a prevenire i guasti prima che si verifichino eseguendo controlli regolari sulle apparecchiature, perciò, la sfida importante è determinare quando fare la manutenzione. Quando non si conosce il momento probabile di fallimento, si consiglia di essere attento nella pianificazione, soprattutto se si utilizzano apparecchiature critiche per la sicurezza. Però programmando la manutenzione molto presto, si rischia di non sfruttare la vita residua del macchinario e questo errore fa aumentare i costi. Ed infine, contrariamente alla manutenzione preventiva, esiste un tipo di manutenzione che rappresenta una rivoluzione tecnologica nell'ingegneria della manutenzione nell'automazione 4.0 chiamato manutenzione predittiva.

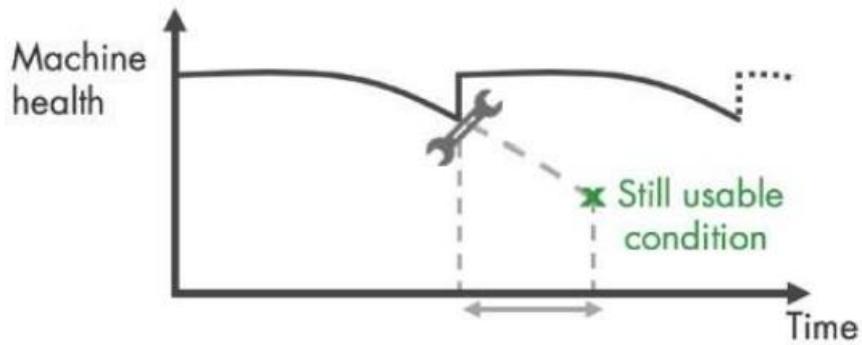


Fig. 1: Manutenzione preventiva

La manutenzione predittiva consente di stimare il tempo di guasto di una qualsiasi macchina permettendo di trovare il momento ottimale per programmare la manutenzione delle attrezzature. Di più', questa tipologia della manutenzione prevede non solo un futuro fallimento, ma individua anche i problemi nel complesso di macchinari identificando quali parti della macchina che devono essere riparati. Grazie a quest'approccio, gli interventi di manutenzione vengono svolti in caso di effettiva necessità piuttosto che secondo piani programmati come alla manutenzione preventiva.

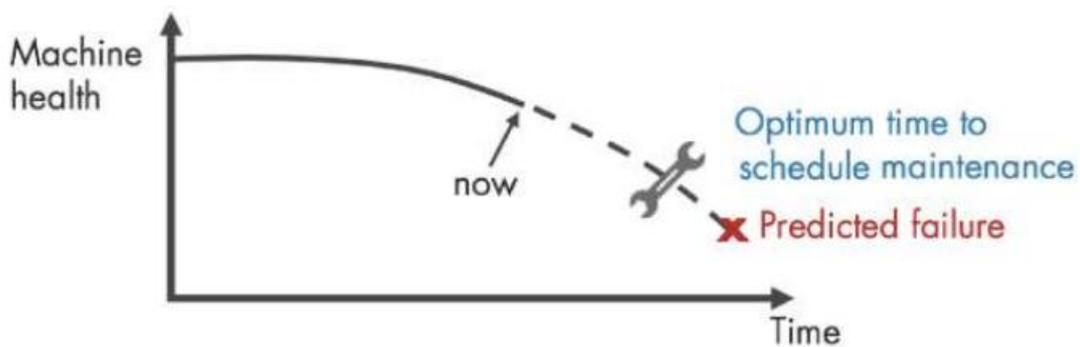


Fig. 2: Manutenzione predittiva

In questa tesi si cerca di definire e di approfondire il concetto di manutenzione predittiva analizzando un caso applicativo in un sollevatore telescopico. Inoltre, si cerca di spiegare in dettaglio le fasi di sviluppo degli algoritmi.

L'obiettivo della tesi è lo studio di diagnostica da remoto e di diagnostica predittiva di macchine telescopiche e movimento terra mediante l'analisi sistematica dell'albero dei guasti e della interazione meccanica fra i diversi sottosistemi (trazione, motore, sistema di sollevamento) permette la creazione di regole e metodi per il monitoraggio della macchina. L'utilizzo di dati provenienti da data base in Cluod relativi al monitoraggio di veicoli reali consente la realizzazione di modelli di previsione guasto sulla base di modelli e simulazioni Matlab o con eventuale utilizzo di strumenti software Multi body.

1.2. Metodiche di ricerca e diagnostica dei guasti

L'analisi del guasto è un processo di raccolta e analisi dei dati finalizzato a determinare le cause di guasto. Nel quadro di riferimento normativo UNI la manutenzione predittiva si definisce come la manutenzione effettuata a seguito dell'individuazione e della misurazione di uno o più parametri e dell'estrapolazione secondo i modelli appropriati nel tempo residuo prima del guasto. Obiettivo principale della manutenzione predittiva è dunque quello di evitare che si verifichino inattesi malfunzionamenti e predire possibili guasti.

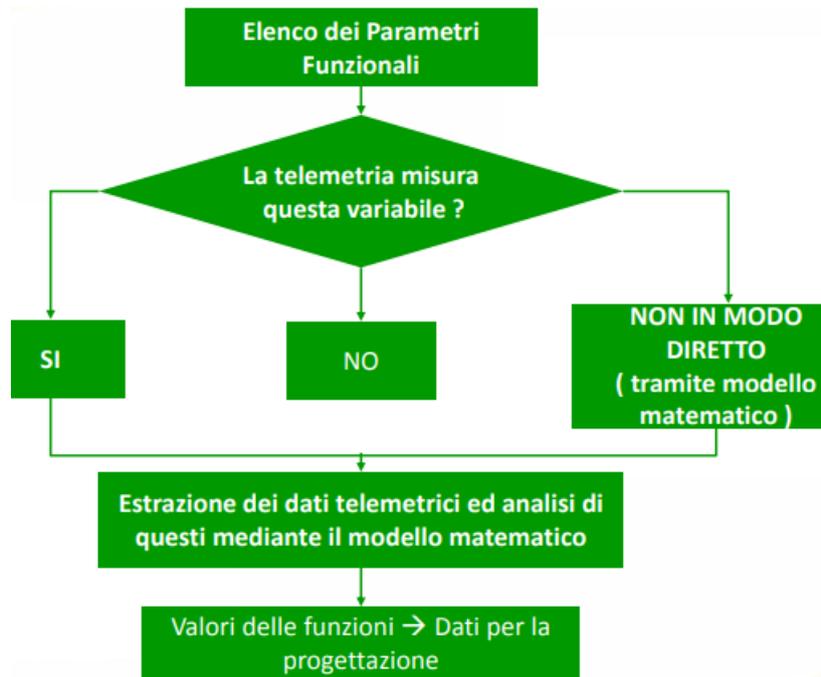


Fig. 3: Diagramma di flusso per la progettazione

Ogni sforzo mirato a realizzare una gestione predittiva della manutenzione richiede di seguire una procedura che comprende la definizione e la creazione di un modello del comportamento e dell'ambiente circostante (come l'impianto o le risorse coinvolte). È fondamentale condurre un periodo iniziale di analisi e prototipazione in ogni caso. L'attuazione di un progetto di Manutenzione Predittiva implica principalmente tre fasi distinte:

- **Monitoraggio:** In questa fase, si effettua un monitoraggio costante per registrare in tempo reale il funzionamento dei dispositivi e gli eventi temporali correlati. L'obiettivo principale è raccogliere una vasta gamma di informazioni che descrivono il comportamento delle apparecchiature, al fine di essere pronti a reagire a eventuali situazioni anomale. Questo livello si concentra sull'osservazione dettagliata e sulla documentazione completa, inclusa l'indagine delle ragioni alla base di comportamenti non standard. Il monitoraggio si concentra principalmente sulla raccolta di dati attuali.

- Avviso Anticipato (Early Warning): Questa fase implica il rilevamento in tempo quasi reale di segnali premonitori di comportamenti anomali delle apparecchiature mentre sono ancora in funzione. Si mira a identificare cambiamenti significativi o un deterioramento delle prestazioni prima che si verifichi una situazione di guasto imminente. L'obiettivo principale è individuare e segnalare le anomalie il prima possibile. L'analisi in questa fase si basa sui dati attuali, utilizzando tecniche come l'analisi delle tendenze, l'applicazione di soglie di riferimento, l'uso di algoritmi avanzati e il costante miglioramento del processo.
- Manutenzione Predittiva: Questo stadio rappresenta il livello più avanzato di Manutenzione Predittiva, in cui il sistema è in grado di prevedere il comportamento futuro delle macchine, compreso il potenziale momento di guasto. Qui, l'analisi si basa su dati sia attuali che storici, consentendo una visione più completa delle prestazioni delle apparecchiature nel tempo.

Il successo del percorso di Manutenzione Predittiva è essenzialmente vincolato alla disponibilità dei dati e, come in ogni sistema predittivo, i risultati ottenuti dipendono dalla precisione con cui questi dati sono stati raccolti (precisione da tenere in considerazione nella valutazione del rischio). Tuttavia, in tempi attuali, la crescente presenza di tecnologie abilitanti e sistemi sempre più intelligenti e interconnessi, l'ampia diffusione di apparecchiature avanzate e l'impiego dell'intelligenza artificiale consentono una sinergia proficua tra Tecnologia dell'Informazione (IT) e Tecnologia Operativa (OT). Questo facilita lo sviluppo di modelli predittivi in grado di collegare domini di conoscenza anche molto distanti tra loro.

I vantaggi non si faranno attendere:

- Rilevazione predittiva di andamenti anomali.
- Definizione di procedure manutentive ottimali.
- Riduzione dei tempi di fermo non programmati.
- Programmazione efficiente delle operazioni manutentive.
- Ottimizzazione degli intervalli di manutenzione.

- Massimizzazione della disponibilità di impianti e attrezzature.

1.3. Vantaggi di manutenzione predittiva

L'approccio della Manutenzione Predittiva offre vantaggi significativi sia ai costruttori di macchine che agli utenti finali. Questi benefici si manifestano innanzitutto attraverso il miglioramento dei livelli di sicurezza nei luoghi di lavoro, poiché è possibile prevedere e prevenire guasti potenzialmente pericolosi. In secondo luogo, grazie ai modelli di Manutenzione Predittiva, si riduce il tempo di fermo delle apparecchiature, portando a una riduzione dei costi operativi e ad un aumento della produttività.

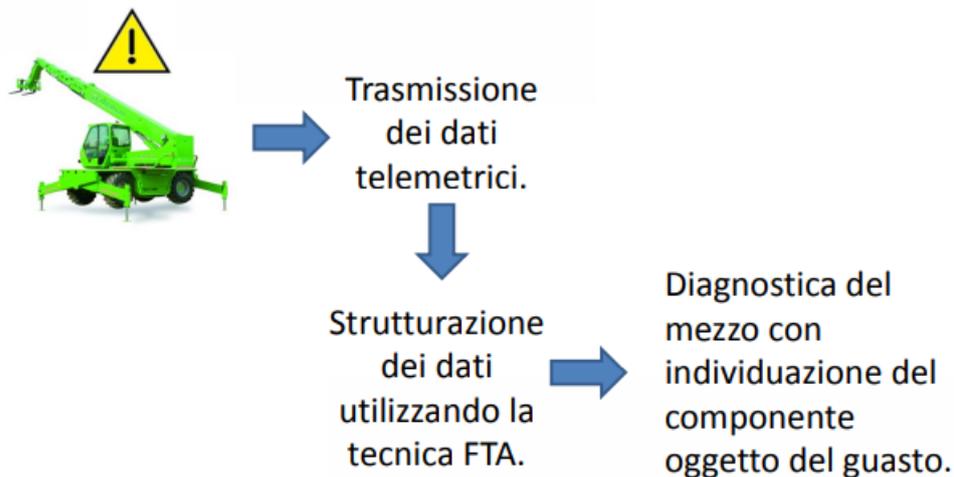


Fig. 4: Diagramma delle fasi per la diagnostica

Infine, quando si dispone di un modello di simulazione, diventa possibile effettuare simulazioni di scenari di manutenzione e di interventi, consentendo di valutarne l'efficacia. Questo processo migliora notevolmente la gestione degli impianti,

consentendo l'implementazione di strategie innovative per la pianificazione delle attività di manutenzione e l'ottimizzazione delle risorse disponibili. In sintesi, la Manutenzione Predittiva, in poche parole, contribuisce a monitorare attentamente il funzionamento delle apparecchiature, garantendo una vita utile più lunga ai nostri macchinari e, di conseguenza, comportando maggiore efficienza e una riduzione dei rischi dannosi.

1.4. FTA (Fault Tree Analysis, Analisi degli Alberi di Guasto)

La Fault Tree Analysis (FTA) è un metodo grafico e logico utilizzato per collegare i guasti dei componenti di un sistema. L'obiettivo principale della FTA non è tanto quello di individuare direttamente le cause dei guasti, ma piuttosto, a partire da un guasto nel sistema (che rappresenta un evento indesiderato), di stabilire le relazioni funzionali con i guasti dei componenti (eventi base). Questa tecnica è di natura deduttiva e si concentra su un incidente rilevante chiamato "Top Event," fornendo un metodo per identificare le possibili cause che hanno contribuito a tale evento.

L'albero dei guasti è un modello grafico che visualizza in modo esplicito le connessioni logiche tra gli eventi di guasto e gli errori umani concomitanti che possono verificarsi all'interno di un sistema. In sostanza, serve a rappresentare in modo organizzato e visuale come i guasti dei componenti e gli errori umani possono contribuire a un evento indesiderato o a un guasto critico nel sistema, consentendo di analizzare le relazioni causa-effetto e di identificare le potenziali aree di miglioramento per prevenire futuri problemi.

1.5. Soluzioni ai problemi tipici della manutenzione predittiva

La disponibilità di dati di alta qualità è fondamentale per il successo della Manutenzione Predittiva basata su algoritmi di machine learning. Ecco alcune considerazioni sui problemi legati ai dati nella Manutenzione Predittiva e sulle strategie per affrontarli:

- Scarsità di dati: Può essere un problema comune, specialmente quando si implementa la Manutenzione Predittiva su macchinari o sistemi meno recenti che potrebbero non essere dotati di sensori avanzati. In tal caso, è possibile considerare l'installazione di nuovi sensori o l'aggiornamento dei sistemi esistenti per raccogliere dati rilevanti.
- Modalità limitata di registrazione dei dati: Alcuni macchinari potrebbero registrare dati solo periodicamente o in determinate condizioni. È importante valutare attentamente come e quando vengono acquisiti i dati e se è necessario implementare una registrazione più frequente o condizioni di monitoraggio specifiche per raccogliere informazioni più dettagliate.
- Diversi formati di dati: I dati provenienti da sensori possono essere in diversi formati e potrebbero richiedere un'adeguata standardizzazione e preelaborazione prima di poter essere utilizzati per l'addestramento di modelli. È importante disporre di strumenti e procedure per gestire questa varietà di dati.
- Accesso ai dati: Garantire un accesso affidabile e sicuro ai dati è essenziale. Inoltre, è importante considerare come i dati vengono archiviati e gestiti per garantire la loro disponibilità a lungo termine.

Per affrontare questi problemi, è possibile sviluppare strategie di raccolta dati mirate, migliorare l'infrastruttura dei sensori, implementare soluzioni di data pre-processing e utilizzare tecniche di machine learning che siano in grado di gestire dati mancanti o rumore nei dati. Inoltre, la collaborazione tra team di manutenzione e team di data

scienze è fondamentale per identificare le fonti di dati più importanti e creare modelli predittivi efficaci.

Le soluzioni proposte per affrontare il problema dell'insufficienza di informazioni nella Manutenzione Predittiva sono molto valide e possono contribuire in modo significativo a migliorare la qualità dei dati e l'efficacia dei modelli predittivi. Ecco un'espansione su ciascuna delle soluzioni:

- Analisi attenta dell'elenco delle fonti dei dati disponibili: Questa strategia implica una valutazione dettagliata di tutte le possibili fonti di dati, sia interne che esterne al sistema. Questo potrebbe includere la combinazione di dati provenienti da diverse risorse, come sensori esistenti, registri di manutenzione, dati meteorologici, o altre fonti correlate. L'obiettivo è massimizzare l'uso dei dati disponibili e migliorare la qualità delle informazioni acquisite attraverso tecniche di fusione dati.
- Modifica della modalità di acquisizione dei dati: Qui si mira a modificare il modo in cui i dati vengono raccolti. Questo potrebbe comportare la registrazione di dati rilevanti anche prima che si verifichino guasti, il che potrebbe richiedere l'aggiunta di nuovi sensori o la riconfigurazione dei dispositivi esistenti. L'uso di flotte di prova è un approccio valido per raccogliere dati significativi quando i dati di produzione sono limitati o insufficienti.
- Utilizzo di strumenti di simulazione per la sintesi di dati: L'utilizzo di strumenti di simulazione è un modo intelligente per generare dati di prova e testare algoritmi di Manutenzione Predittiva. Questi strumenti possono creare scenari di guasto virtuali e generare dati sintetici che possono essere combinati con dati reali per addestrare e convalidare i modelli. Questo approccio consente di ottenere una quantità sufficiente di dati anche in situazioni in cui i dati reali sono scarsi.

Queste soluzioni sono complementari e possono essere integrate per affrontare con successo il problema dell'insufficienza di dati nella Manutenzione Predittiva, contribuendo a migliorare la precisione e l'efficacia dei modelli di predizione.

2. Architettura della macchina Merlo

2.1. Presentazione azienda

La Merlo Spa è un'organizzazione privata che opera su scala globale, conta all'incirca 1300 dipendenti e registra un fatturato di circa 400 milioni di Euro, con un utile di circa 28 milioni di Euro. L'azienda non quotata, opera nel settore metalmeccanico e si dedica alla produzione di macchinari rivolti ai settori delle costruzioni, dell'agricoltura, dell'industria, dell'industria e della silvicoltura. La nascita della società risale al 1964, la società è maturata e cresciuta fortemente negli anni ed infatti oggi conta sei filiali: Francia, Germania, Inghilterra, Spagna, Polonia e Australia. Aspetto fondamentale che evidenzia la diffusione internazionale è che la maggior parte della produzione, che avviene totalmente nella sede di Cuneo (CN), uno stabilimento che ricopre i 180 mila

metri quadrati, è esportata. I continui investimenti in ricerca e sviluppo hanno consentito l'aumento dell'espansione della società che ha richiesto un ampliamento della rete distributiva e di assistenza all'estero. Si può affermare che la presenza di oltre 50 importatori e 600 concessionari in grado di offrire una copertura a livello di vendita, assistenza e ricambi rende la posizione del Gruppo Merlo a livello mondiale molto forte.



Fig. 5: Logo Merlo Spa

Ad oggi l'azienda fa parte di un gruppo più ampio, Merlo Group, da cui prende il nome principale, di cui fanno parte altre 6 aziende: Project, Tecno, CFRM, Rent, Movimatica, TreEmme. La produzione dell'azienda si occupa principalmente di sollevatori telescopici fissi e rotanti ma il suo mercato presenta anche altri tipi di macchinari come trattori forestali, betoniere auto-caricanti, piattaforme semoventi e mezzi cingolati.

Il successo del Gruppo Merlo è garantito da uno stretto contatto con il cliente e da una continua ricerca di soluzioni innovative che consentono di offrire soluzioni durature nel massimo rispetto dell'ambiente e la massima efficienza.

2.2. Movimatica - LOCALIZZAZIONE GPS SU RETE MOBILE

Movimatica è una società che fa parte del Merlo Group che offre prodotti e servizi mirati allo sviluppo di applicazioni innovative sulla telematica di logistica per il controllo della mobilità delle macchine da lavoro, da quelle più tradizionali ai veicoli di ultima generazione. L'azienda fornisce anche diagnostica e monitoraggio da remoto di ultima

generazione che utilizzano le nuove tecnologie satellitari e GPS, fornendo soluzioni personalizzate per ogni tipo di esigenza di monitoraggio. Ad oggi Movimatica fornisce servizi di logistica ad una vasta clientela, sia pubblica che privata, offrendo soluzioni innovative in grado di soddisfare i diversi requisiti di monitoraggio e controllo. La filosofia aziendale di Movimatica si basa sull'innovazione tecnologica, sull'elevata qualità dei servizi offerti e sulla creazione di soluzioni su misura. La filosofia aziendale si basa sull'obiettivo di fornire servizi all'avanguardia, flessibili e adattabili per rispondere a differenti necessità aziendali con costi moderati.



Fig. 6: Logo aziendale

Le mappe sono fornite sotto licenze "Enterprise" dai principali leader del settore delle cartografie:

- PTV, Azienda che sviluppa tecnologie applicative (xServer e Ajax) sui database di Navteq e TeleAtlas
- Google Maps, Leader nei servizi di geolocalizzazione satellitare in modalità "ibrida"



Fig. 7: Servizio di geolocalizzazione

Il protocollo di comunicazione è proprietario ed è stato ottimizzato per ridurre al minimo il traffico ed il costo sulla rete wireless GSM/GPRS/UMTS.

il sistema e la sua rappresentazione visuale possono essere adattati in base alle preferenze del Cliente, in modo da soddisfare le specifiche esigenze dell'applicazione desiderata.

Alcuni esempi di applicazioni già realizzate:

- Infomobilità RSU per la raccolta differenziata dei rifiuti nei comuni
- Gestione delle macchine spazzatrici delle strade
- Gestione inventario, noleggio e diagnostica macchine movimento terra
- Gestione parco automezzi
- Gestione flotte di autobus e altri mezzi pubblici

2.3. Merlomobility

MerloMobility 4.0 è il servizio che Movimatica ha sviluppato per il Gruppo Merlo in esclusiva. Questa soluzione supervisiona e traccia la flotta di veicoli attraverso un sistema

intuitivo. Questa piattaforma permette di eseguire il monitoraggio GPS in tempo reale di una pluralità di veicoli, consentendo la gestione dei parametri chiave, la ricezione e l'amministrazione di segnalazioni di allarme, nonché l'invio di istruzioni per la gestione delle situazioni operative. L'accesso ai dati rilevati si effettua in modo semplificato attraverso il browser senza la necessità di installare alcun browser. Il cliente accede a MerloMobility con le proprie credenziali e ottiene istantaneamente tutte le informazioni necessarie. Questo consente di monitorare in tempo reale le posizioni delle macchine e valutare le condizioni operative da un unico schermo.



Fig. 8: Schema di flusso dei dati

2.4. I prodotti di Merlo Spa

L'azienda Merlo Spa è stata la prima azienda in Europa a specializzarsi nella produzione di sollevatori telescopici con torretta girevole e nei sollevatori con trasmissione

idrostatica. A seconda delle caratteristiche del macchinario, si possono avere: telescopici compatti, telescopici di media capacità, telescopici ad alta capacità, telescopici stabilizzanti, telescopici rotativi e trattori telescopici. La vasta produzione è raggruppata in quattro grandi famiglie di cui ogni modello è definito con la sigla che rappresenta l'iniziale del tipo di macchinario, la portata in quintali e la massima altezza raggiungibile in metri. Le quattro famiglie di macchine sono: Turbofarmer (TF), Multifarmer (MF), Panoramic (P) e Roto (R). Ad esempio, in questa tesi si analizza un modello TF42.7 che indica una macchina Turbofarmer con una portata massima di 42 quintali e un'altezza del braccio massima di raggiungibile di 7 metri.

Oltre alle macchine qui presentate l'azienda produce anche:

- Tecno: veicoli per la raccolta e la compattazione di rifiuti. Una famiglia in grado di soddisfare diverse esigenze che comprende grandi mezzi per la raccolta e la compattazione con capacità fino ai 30 metri cubi ai piccoli mezzi satellite da 2 metri cubi di capacità.
- Autobetoniere autocaricanti MERLO (DBM): mezzi di ultima generazione, efficaci nel produrre, trasportare e gettare il calcestruzzo mantenendo costi contenuti.
- Macchine destinate alla forestale, alla manutenzione di bordi stradali e dei canali e in silvicoltura e per la rimozione della neve (Tre Emme).
- Oltre a questi, vengono prodotti altri macchinari, mezzi cingolati (Cingo) di vario genere e di dimensioni molto più contenute, adatti per piccole lavorazioni e piattaforme semoventi (MRP).

2.4.1. Turbofarmer

I modelli della linea Turbofarmer sono studiati per soddisfare le operazioni del mondo dell'agricoltura, caratterizzato da omologazione europea al telaio per trainare fino a 20 tonnellate ad elevate velocità rimorchi su strada. Le dimensioni e il peso ridotto

consentono una maggiore maneggevolezza e minori consumi. Sono incluse opzioni aggiuntive come il franco da terra elevato per poter lavorare anche su terreni difficili e la traslazione laterale del braccio che ne aumentano le prestazioni.



Fig. 9: Il modello Turbo Farmer (TF)

Sono caratterizzati da:

- Sopportano portate da 3400 a 5000 kg e altezze fino ai 10 metri
- Potenza motore da 100 a 156 cavalli
- Trasmissione idrostatica a gestione elettronica EPD (EcoPowerDrive)
- Cambio a variazione continua MCVTronic
- Sistema Load Sensing per massimizzare le prestazioni minimizzando costi e consumi

2.4.2. Multifarmer

Merlo è stata l'azienda pioniera nel mercato nell'ideazione e nel brevetto del Multifarmer una proposta innovativa nata dall'unione delle caratteristiche di un tradizionale telescopico agricolo con quelle di un trattore. Da questa soluzione derivano

veicoli con elevate prestazioni in grado di effettuare operazioni tipiche dei trattori convenzionali, sollevamenti, trasporto di carichi e attivazione di strumenti ed eccellente rendimento nelle operazioni di lavorazione del terreno e traino tipica dei trattori convenzionali.



Fig. 10: Il modello Multifarmer (MF)

Le caratteristiche principali sono:

- Sistema di antibaltamento M CDC (Controllo Dinamico del Carico)
- Sistema EPD di riduzione del consumo di gasolio
- Attacco a 3 punti posteriore presa di forza meccanica nella parte posteriore
- Sistema Tack Lock che velocizza le operazioni di aggancio e sgancio delle attrezzature

2.4.3. Panoramic

La linea Panoramic dei sollevatori telescopici sono progettati per il settore edile e industriale e presentano caratteristiche tecniche e progettuali uniche che hanno reso in poco tempo l'azienda leader indiscusso nel settore. È possibile, infatti, equipaggiarle con

piedi stabilizzatori per migliorare le prestazioni e il rivoluzionario sistema di sicurezza Merlo CDC (Controllo Dinamico del Carico) che innalza ulteriormente il livello di sicurezza senza compromettere le prestazioni.



Fig. 11: Il modello Panoramic (P)

Le caratteristiche rilevanti sono:

- Spaziano portate fino a 40 quintali e altezze di sollevamento che vanno dai 7 ai 17 metri
- Le diverse dimensioni dei modelli permettono di operare su spazi stretti e nei grandi cantieri
- Velocità massima raggiungibile 40 km/h
- Cintura in acciaio che distribuisce il peso ed elimina il contrappeso posteriore

2.4.4. ROTO

La gamma Roto dei sollevatori telescopici Merlo rappresenta un nuovo modello di riferimento per il mercato del settore Costruzione, poiché questa è una macchina dotata di torretta girevole che consente un raggio di azione maggiore rispetto ad un telescopico

classico, offre di operare a 360° consentendo minori spostamenti da parte della vettura da un punto ad un altro del campo di azione. I nuovi modello ROTO si distinguono per l'impiego di tecnologie evolute che incrementano l'offerta prodotto con nuovi contenuti, adeguandosi alle diverse esigenze degli utilizzatori con soluzioni intuitive e dalla manutenzione semplificata.



Fig. 12: Il modello Roto (R)

Le caratteristiche sono:

- Trasmissione idrostatica: garantisce elevata precisione nei movimenti della macchina e nel posizionamento del carico
- Struttura compatta e leggera: consentono di ridurre gli spazi di manovra e l'impatto sul suolo
- Silenziosa: la cabina montata su Silent-block riduce drasticamente le vibrazioni e garantisce il massimo comfort

2.4.5. DBM

La progettazione e fabbricazione di betoniere auto-caricanti è ormai consolidata dall'esperienza nel settore di Merlo. L'azienda, infatti, propone una vasta selezione ad elevate prestazioni e compatta ideali per luoghi di lavoro caratterizzati da suolo

difficilmente percorribile dai mezzi tradizionali o per chi richiede la produzione di calcestruzzo di varia tipologia nella quantità richiesta e direttamente in cantiere, risolvendo innumerevoli problematiche che comporta l'utilizzo del calcestruzzo preconfezionato.



Fig. 13: Il modello DBM

Le caratteristiche sono:

- Peso e dimensioni ridotti per minori consumi
- Cisterna da 900 litri
- Rotazione della botte di 180°
- Velocità massima di 40 km/h

2.4.6. MPR

Le piattaforme aeree semoventi serie MPR sono un prodotto che mette insieme tre requisiti: la specializzazione di un sistema semovente tradizionale, lo spostamento fuori strada rispetto i veicoli tradizionali e la velocità di trasferimento raggiunta caratteristica

di una piattaforma u autocarro. Questo sistema permette di accedere ad aree caratterizzate dalle più svariate condizioni operative con elevate prestazioni ed ottima sicurezza.



Fig. 14: Il modello MPR

La nuova gamma conforme alle normative europee consente:

- Altezze operative oltre i 30 metri e portate di 225 kg
- Motore omologato Euro 3 e 4 cilindri da 102 CV
- Telaio semovente con torretta girevole con rotazione totale 400° e cabina di guida
- Sospensioni idropneumatiche con livellamento automatico del telaio

2.4.7. Cingo

I Cingo sono trasportatori cingolati polivalenti Merlo caratterizzati dal sistema di aggancio attrezzature brevettato consente una rapida e semplice sostituzione dell'attrezzatura montata sul carro base consentendo in poche mosse di soddisfare differenti requisiti in un'unica macchina. La struttura stabile e robusta della macchina è

arricchita da rulli oscillanti che consentono di percorrere suoli bruschi e di ridurre le vibrazioni al minimo.



Fig. 15: Il modello CINGO

Le diverse soluzioni consentono di:

- Sollevare portate da 500 a 1200 kg
- Sistema multifunzione brevettato
- Motore con potenza fino a 33 CV
- Velocità massima fino a 5 km/h

2.5. Sottosistemi macchina

I principali componenti delle macchine Merlo sono:

1. Telaio
2. Cabina
3. Motore

4. Braccio telescopico
5. Assale

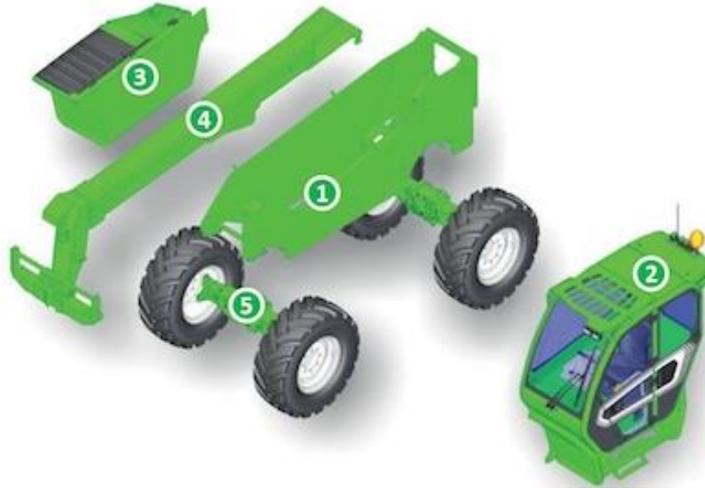


Fig. 16: Componenti della macchina Turbo Farmer

2.5.1. Telaio

Rispetto le altre macchine in commercio, le dimensioni contenute del telaio consentono di semplificare le manovre e di minimizzare gli ingombri. La struttura presenta un'elevata resistenza agli urti in condizioni off road grazie alla copertura in lamiera di acciaio della sottoscocca, posizionato per massimizzare la robustezza e resistenza strutturale. La parte esterna è invece rafforzata dalla presenza di un cinturone d'acciaio

2.5.2. Cabina

Le cabine Merlo sono isolate rispetto al telaio mediante sistemi attivi e un sistema di dispositivi e i comandi per le diverse funzioni sono raggruppati in un design strategico mirato alla massimizzazione del confort e della funzionalità dell'operatore. Un inedito lavoro di ricerca di sistemi e materiali innovativi ha permesso di garantire anche confort

acustico e termico. Grazie alla pressurizzazione della cabina è impedito l'ingresso di polveri. I sedili omologati poggiano su molle idropneumatiche che garantiscono l'isolamento dalle vibrazioni provocate da terreni irregolari mentre i comandi offrono la possibilità di operare con uno o due joystick di differenti versioni per massimizzare l'ergonomia in base al cliente.

2.5.3. Motore

I motori Merlo sono caratterizzati da una trasmissione idrostatica con quattro ruote motrici sempre in presa, motorizzazioni in grado di erogare potenze da 75 a 170CV e velocità massima fino a 40km/h. Esclusiva disposizione del motore laterale e longitudinale. Il propulsore consente di raggiungere velocità elevate strada sterrata grazie alla separazione del circuito dell'olio delle trasmissioni idrostatiche rispetto quello del braccio che consente di minimizzare i consumi. Una maggiore produttività ed efficienza è garantita dalla presenza di una trasmissione a variazione continua che comporta anche un risparmio energetico. Una moderata riduzione dei consumi è consentita dal sistema EPD (Eco Power Drive) che regola e controlla autonomamente il regime motore in base alle condizioni del suolo.

2.5.4. Braccio

Il braccio raggiunge diverse altezze con portate variabili a seconda dei modelli, è realizzato in acciaio alto-resistente da una doppia sezione a C, le quali sono saldate lungo l'asse neutro di flessione. La realizzazione dei pattini a scorrimento in materiale composito riduce l'usura e migliora lo scorrimento. L'inserimento all'interno del braccio dei cablaggi elettrici e delle tubazioni idrauliche semplifica la manutenzione e la protezione contro le vibrazioni. La combinazione di tali sistemi consente di raggiungere prestazioni elevate in grado di soddisfare assenza di deformazione della struttura sottoposta a continui sforzi, massima precisione nei movimenti, elevata resistenza agli urti e alle vibrazioni dei componenti.



Fig. 17: Sistema di sicurezza ASCS

L'esclusivo sistema di sicurezza ASCS (Adaptive Stability Control System) è in grado di controllare la macchina da un eventuale ribaltamento frontale nella fase operativa di sollevamento del carico. Il sistema consente di aumentare la sicurezza del veicolo, infatti, nel momento in cui riconosce una condizione critica operativa, riduce la velocità del braccio fino a bloccare il movimento.

Il sistema come output regola il range degli spostamenti e la velocità massima considerando tre parametri come input:

- Carico sollevato in kg
- Sfilo del braccio e angolo di rotazione della zattera
- Attrezzo in uso

Il ripristino del movimento in condizioni di sicurezza viene raggiunto dalla macchina in modo automatico al fine di assicurare la protezione anche gli operatori meno esperti. Inoltre, la presenza di un display digitale consente ai clienti di verificare che tutti i parametri di funzionamento rientrino nei valori di sicurezza fissati.

Un'opzione unica sul mercato offerta dai telai Merlo è la presenza di un sistema integrato che consente di raggiungere elevata precisione del posizionamento del braccio in breve tempo e con poche manovre grazie alla movimentazione laterale del braccio telescopico. Questo meccanismo consente di migliorare le prestazioni della macchina in modo facile ed intuitivo grazie il comando posto sul joystick.

2.5.5. Assale

Il Gruppo Merlo produce due tipi di assali in base alla funzione che si preferisce soddisfare:

- gli assali che possiedono riduttori a portale consentono di aumentare il livello di luminosità del suolo
- quelli con riduttori epicicloidali che consentono di ridurre le dimensioni della macchina, aumentandone la compattezza per facilitare la movimentazione nei terreni agricoli

In generale gli assali Merlo hanno l'obiettivo di fornire il massimo risparmio dei consumi della macchina raggiungendo un'elevata coppia frenante ed efficienza. Le sospensioni idropneumatiche forniscono massima sicurezza e comfort dell'utente.

3. Analisi data set di monitoraggio dei telescopici Merlo

3.1 La centralina

MerloMobility informatizza, gestisce e localizza la flotta di mezzi privati e aziendali con un sistema semplice, economico e completamente personalizzabile. Le centraline elettroniche garantiscono la massima flessibilità e sono di facile installazione su qualunque mezzo o sistema. La collaborazione tra la centralina per il monitoraggio e la telemetria consentono il controllo dei parametri delle macchine a distanza.



Fig. 18: Sistema di gestione MerloMobility

3.2. I dati monitorati

Questa tecnologia consente di effettuare il controllo della posizione di più mezzi o veicoli durante le ore lavorative tramite radio-localizzazione GPS in tempo reale visualizzabili su mappe stradali, satellitari 3D. Sono consultabili attraverso report anche le percorrenze chilometriche, le ore di lavoro e i tempi di riposo effettuati dai veicoli durante la giornata. Il sistema dispone di un insieme di sensori che azionano l'allarme dovuto a movimenti delle macchine in fasce orarie non consentite, superamento di aree geografiche e limiti di velocità. La creazione di avvisi automatici in base ai parametri disponibili in telemetria facilita la gestione della manutenzione. Il cliente può richiedere anche opzioni aggiuntive, come un lettore RFID (Identificazione a Radio Frequenza), un'interfaccia CAN BUS (Rete di Controllo dell'Area) per l'acquisizione e l'invio di dati dai veicoli al centro

operativo per un miglioramento della pianificazione della manutenzione preventiva e un'interfaccia per l'interazione con l'utilizzatore.

3.3. Metodologia di salvataggio dati e trasmissione

Il sistema di trasmissione dei dati alla Centrale Operativa può operare sia in tempo reale o in modalità differita. Nel secondo caso, le informazioni sono memorizzate e successivamente sincronizzate, seguendo intervalli programmati o in risposta a richieste dell'utente. Tutte le funzionalità che offre il sistema sono accessibili attraverso un comune browser da tablet o cellulare grazie al sistema di trasmissione dati usato da Movimatica. Questa tecnologia usa la rete wireless Gsm/Gprs/Umts e la rete Internet per la trasmissione dei dati. Questo modulo di connessione dati è un sistema di comunicazione di tipo bi-direzionale capace di ricevere un numero elevato di comandi ed eseguirli mentre rileva e trasmette altre informazioni rendendo minimo il traffico sulla rete. I servizi di Movimatica sono caratterizzati da estrema flessibilità poiché sviluppati prevalentemente in linguaggio Java, un linguaggio di programmazione che consente di soddisfare le diverse esigenze dei clienti.

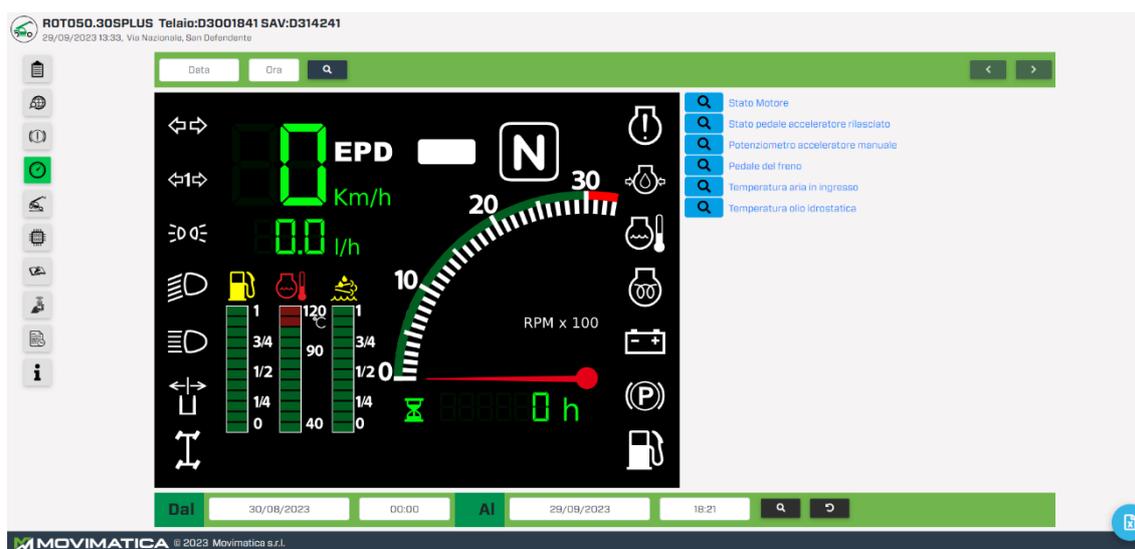


Fig. m: Pannello remotizzazione cruscotto - Telemetria

I dati di telemetria sono forniti circa ogni minuto ed hanno varie finalità. Un numero di sensori installato sulla macchina consente di accedere alle condizioni operative del veicolo: ad esempio lo stato del cambio, la velocità della macchina e l'angolo del braccio. Le spie definiscono attraverso la condizione di on/off se si raggiungono valori stabili durante il funzionamento oppure la condizione di un componente della macchina che non può essere espressa con un valore numerico. Inoltre, i dati consentono di valutare se e quando la macchina è accesa, per verificare le ore di lavoro totali oppure possibili azionamenti durante ore di lavoro non previsto.

Ai fini dell'analisi oggetto di questa tesi, i dati utilizzati, disponibili in telemetria, sono:

- Angolo del braccio (deg)
- Peso sul braccio (kg)
- Sfilo del braccio (mm)

4. Analisi bibliografica di algoritmi di diagnostica predittiva: sottosistemi analizzati, tipologia, valenza e applicabilità

4.1. Articolo 1- A Scalable Digital Twin Framework Based on a Novel Adaptive Ensemble Surrogate Model

Il digital twin in scala di un sollevatore telescopico comprende tre parti, lo spazio fisico, lo spazio digitale e il modulo di comunicazione. È possibile osservare che nello spazio fisico, il braccio del sollevatore telescopico è munito di forche per il pallet, le quali sono il centro dell'analisi per dimostrare la validità del processo di digital twin in scala. Lo spazio fisico è composto da sollevatore telescopico e dai molteplici sensori (ad esempio, un inclinometro triassiale, un sensore di spostamento e uno di pressione).

I parametri geometrici di riferimento sono:

- α : angolo braccio
- l : lunghezza del braccio del telescopio
- m : massa del carico sollevato

L'inclinometro triassiale e il sensore di spostamento sono usati rispettivamente per monitorare l'angolo di sollevamento α e la lunghezza del braccio del braccio telescopico l . Il sensore di pressione è usato per misurare la massa m del carico sollevato. La funzione del modulo di comunicazione è di trasmettere i dati acquisiti dai sensori nella zona di lavoro al cloud del server.

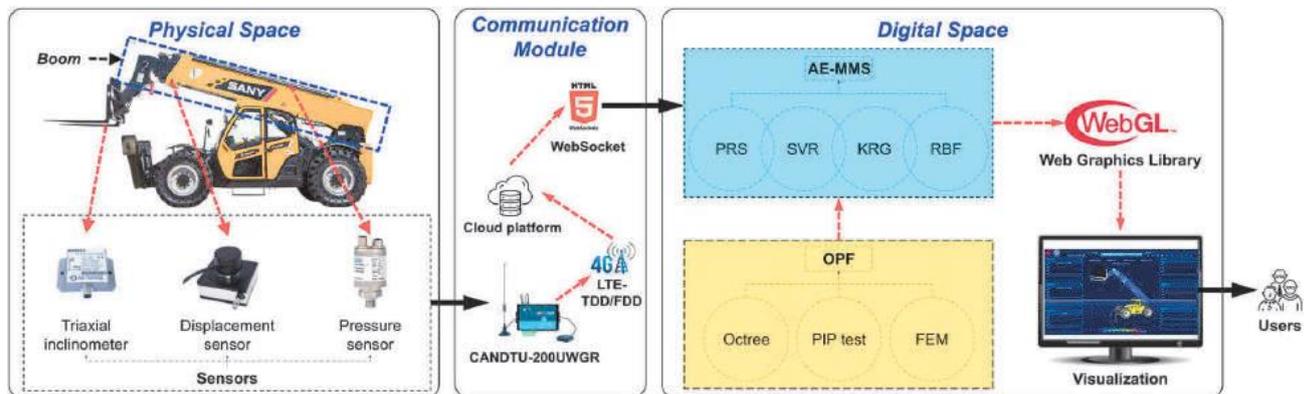


Fig. 19: Architettura di un digital twin in scala di un sollevatore telescopico

OPF è utilizzato per generare i dati geometrici e le performance dei dati (ad esempio, sollecitazioni e spostamenti), del braccio telescopico. I dati geometrici sono utilizzati per modellare il modello digitale 3D del braccio telescopico, mentre le performance dei dati

sono utilizzati come dati di prova per l'AE-MMS. Utilizzando i dati dei sensori in tempo reale, il AE-MMS è in grado di prevedere il campo di sollecitazioni o deformazioni in ciascun nodo, e con WebGL è possibile controllare il campo di sollecitazioni o le deformazioni del braccio telescopico. I dati nello spazio digitale sono presentati ricorrendo ad una visualizzazione 3D disponibile all'osservatore per monitorare lo stato del telescopio in tempo reale.

4.1.1. Riarrangiamento dei nodi del braccio telescopico basato sul metodo Power Flow ottimizzato

Un'accurata precisione geometrica del modello digitale del digital twin richiede un numero elevato di nodi e quindi costi computazionali elevati. Il braccio telescopico è stato discretizzato in mesh da 10 mm (rappresentata da M_o) e da 60 mm (rappresentata da M_t) caratterizzata da elementi tetraedrici, si ricavano poi le sollecitazioni e le deformazioni con FEA. In M_t ci sono troppi pochi nodi, la soluzione non converge, e, quindi, non è possibile ricavare le sollecitazioni e le deformazioni. Perciò, si ricorre al metodo OPF (Fig. 20), in cui i risultati dell'analisi di M_o sono mappati rispetto M_t per mantenere l'accuratezza riducendo il numero dei nodi.

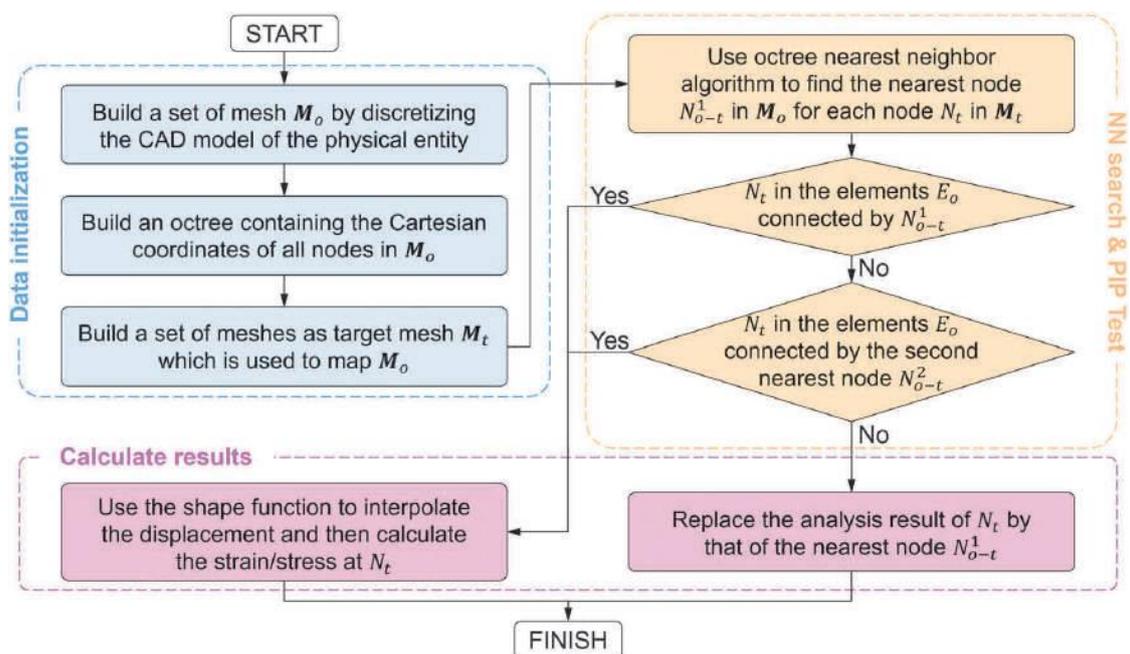


Fig. 20: Diagramma di flusso del metodo OPF

Per facilitare il confronto dei risultati delle analisi ottenuti da diverse mesh, come mostra la Fig.21, si selezionano i risultati delle analisi rispetto i nodi della superficie superiore, laterale destra e inferiore del braccio telescopico.

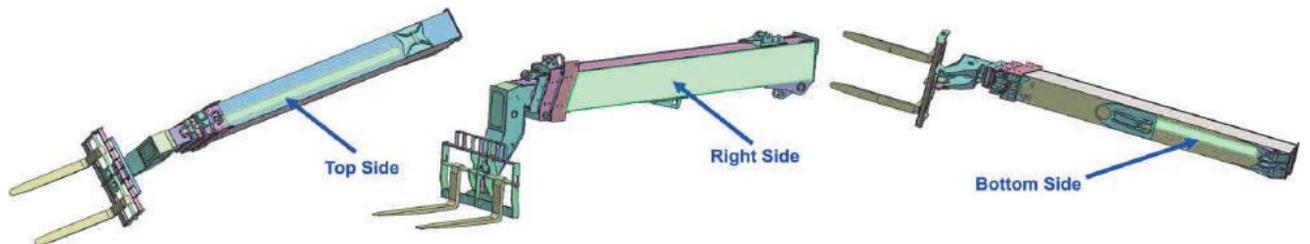


Fig. 21: Braccio telescopico di un sollevatore telescopico e le tre superfici selezionate

I nodi sono selezionati da M_t e definiti N_{t-all} . Si può notare che la maggior parte dei nodi di N_{t-all} non sono inclusi in M_o . Per effettuare il confronto sugli stessi nodi selezionati, il braccio telescopico è discretizzato in un'ulteriore mesh di 10 mm, che contiene N_{t-all} e definita come M_v . I risultati delle analisi di N_{t-all} ottenuti da M_v sono considerati valori reali. Nel FEA del braccio telescopico, le tre variabili α_l , d_e e m_l sono misurate dai sensori e utilizzati come condizioni al contorno. Nel confronto si fissano a:

- $\alpha_l = 3.3$ deg;
- $d_e = 64$ mm;
- $m_l = 907$ kg.

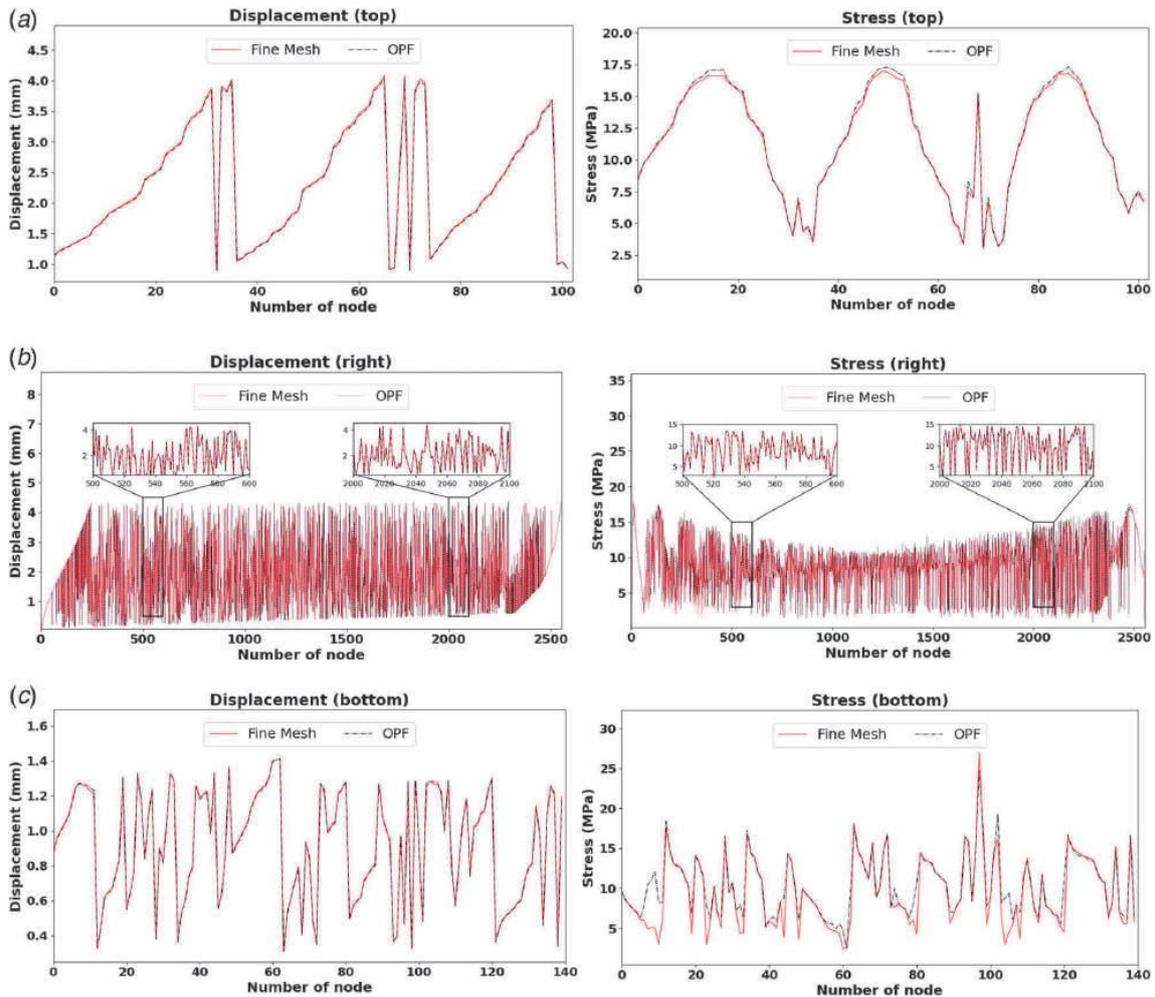


Fig. 22: Confronto tra valori reali e i valori ottenuti da OPF: (a) nodi superiori, (b) nodi laterali e (c) nodi inferiori

Si osserva dalla *Tabella 1* e dalla *Fig.22* che, i risultati ottenuti dalle analisi OPF sono confrontati con i valori reali, inoltre, sono forniti anche NRMSE e R^2 . I risultati mostrano che i valori delle analisi OPF sono significativamente vicini ai valori reali. Nel caso del braccio telescopico, il numero dei nodi in Mo e Mt è rispettivamente 1,022,244 e 81,252. Utilizzando il metodo OPF, il numero dei nodi si riduce al 7.948%. questo significa che il costo computazionale si riduce del 92.052% con la premessa di conservare l'accuratezza dei risultati.

4.1.2. Costruzione dell'AE-MMS per il braccio telescopico

Il braccio telescopico è definito da quattro sezioni, di cui la prima sezione è equipaggiata da un cilindro idraulico per il brandeggio. Per verificare l'accuratezza del comportamento predittivo del digital twin in scala in tempo reale, sei estensimetri sono installati sulle superfici superiori, laterale destra e inferiore del braccio telescopico, come si mostra in Fig.22 (a). Il sollevatore telescopico sostiene con le forche un carico di 2494 kg e realizza degli spostamenti mostrati in Fig. 22 (b) e (c).

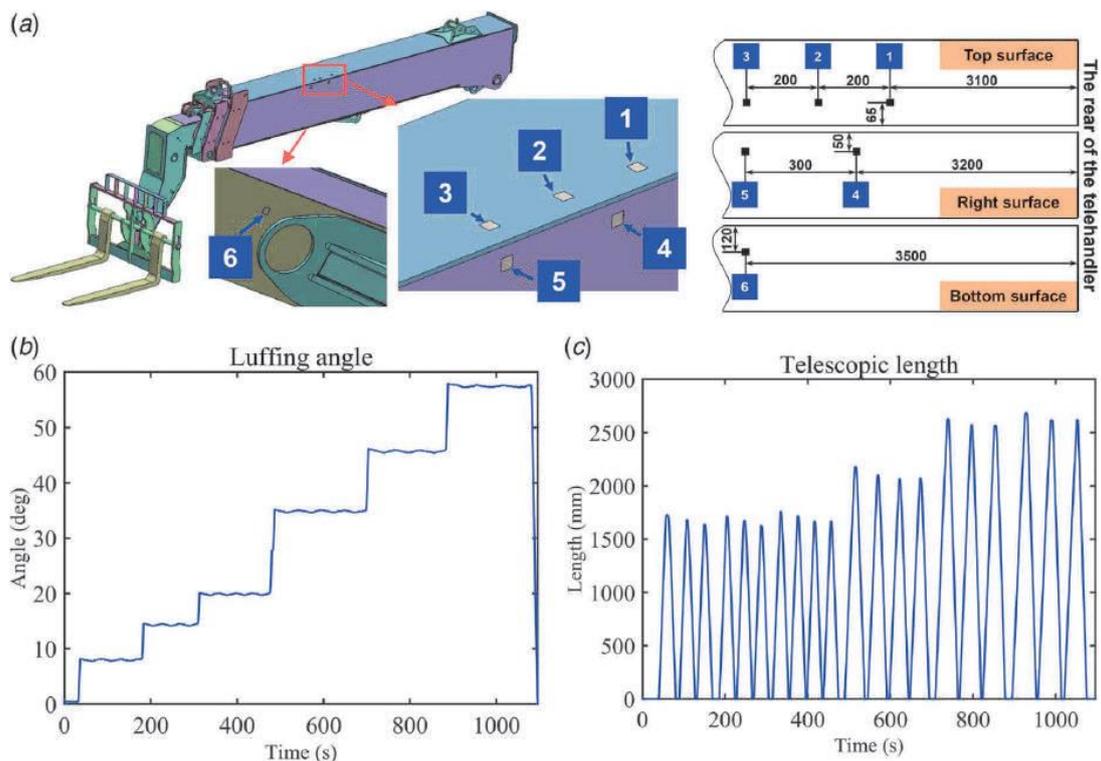


Fig. 23: Risultati analisi

La Tabella 1 elenca il confronto dei risultati tra le sollecitazioni previste da diversi modelli surrogati valutate nei sei punti scelti e i valori misurati dai sei estensimetri, e il numero in grassetto indica il miglior valore per ciascuna colonna.

Method	The serial numbers of the measuring points						Mean	Std
	1	2	3	4	5	6		
AE-MMS	0.847	0.956	0.956	0.959	0.953	0.939	0.935	0.04
BestPRESS	0.572	0.956	0.282	0.834	0.953	0.939	0.756	0.251
PWS	0.52	0.398	0.803	0.712	0.833	0.888	0.692	0.177
OWSdiag	0.659	0.562	0.878	0.847	0.925	0.958	0.805	0.144
LST-C	0.844	0.825	0.851	0.928	0.931	0.949	0.888	0.049
LSINF-C	-0.133	0.745	0.282	0.905	0.875	0.957	0.605	0.399
SP2	0.402	0.425	0.751	0.478	0.664	0.724	0.574	0.143
SP4	-3.032	-2.108	-1.768	-1.813	-1.078	-0.256	-1.676	0.859
E-AHF	0.57	0.684	0.802	0.695	0.877	0.841	0.745	0.105
AES-MSI	0.682	0.925	0.762	0.819	0.952	0.952	0.849	0.103
KRG-G	-0.123	-0.169	0.11	-0.01	0.053	0.015	-0.021	0.097
KRG-M	-0.205	-0.375	-0.026	-0.09	-0.025	-0.187	-0.151	0.122
KRG-E	0.688	0.698	0.853	0.834	0.871	0.889	0.806	0.081
PRS-1	0.7	0.582	0.867	0.822	0.882	0.848	0.784	0.108
PRS-2	0.89	0.956	0.949	0.918	0.911	0.979	0.934	0.03
PRS-3	0.811	0.633	0.863	0.827	0.953	0.939	0.838	0.106
RBF-M	-0.087	-0.141	0.2	0.095	0.295	0.215	0.096	0.16
RBF-G	-4.487	-5.366	-5.327	-4.005	-2.88	-4.181	-4.374	0.848
RBF-T	0.572	0.493	0.282	0.645	0.689	0.66	0.557	0.139
RBF-L	-0.133	-0.21	0.211	0.09	0.328	0.064	0.058	0.185
RBF-I	-0.515	-0.682	-0.097	-0.24	0.085	-0.252	-0.284	0.254
SVR-P	-0.194	-0.637	0.059	-0.038	0.291	-0.571	-0.182	0.332
SVR-G	-0.517	-0.772	0.128	-0.186	0.097	-0.198	-0.241	0.32

Note: The numbers in bold indicate the best value in each column.

Tabella 1: Confronto tra le sollecitazioni predette e quelle misurate basate su R^2

La Std e mean di R^2 dei AE-MMS sono primi e secondi nella lista, questo è il risultato che l'AE-MMS ha più vantaggi rispetto gli altri modello surrogati.

Method	Time cost of training	Time cost of predicting	Time cost of the monitoring in the scalable digital twin
AE-MMS	20.298	0.162	0.026
BestPRESS	15.488	0.085	0.014
PWS	20.279	1.316	0.215
OWSdiag	20.279	1.316	0.215
LST-C	24.604	1.316	0.215
LSINF-C	22.582	1.316	0.215
SP2	20.294	23.217	3.799
SP4	20.294	23.541	3.852
E-AHF	20.261	2.473	0.405
AES-MSI	20.327	2.292	0.375

Tabella 2: Costi computazionali di un digital twin basato su diversi esempi [unità di misura: secondi]

La Tabella 2 elenca i costi computazionali per costruire il digital twin basato su diversi modelli surrogati. I risultati mostrano che il tempo di AE-MMS è 0.162 s, il quale è il modello migliore tra quelli proposti.

Si può definire, per concludere, che considerando sia l'accuratezza che il costo computazionale, l'AE-MMS ha vantaggi significativi rispetto gli altri modelli.

4.1.3. Visualizzazione del digital twin in scala di un sollevatore telescopico

La Figura 24 mostra lo spazio fisico e lo spazio digitale del digital twin in scala.



Fig. 24: Visualizzazione del digital twin in scala di un sollevatore telescopico usando WebGL

Si fornisce una vista assometrica del sollevatore telescopico, e può essere usata per osservare i movimenti e la distribuzione delle sollecitazioni e delle deformazioni del braccio telescopico in tempo reale. I dati dai diversi tipi di sensori e gli spostamenti/sollecitazioni previste in una determinata posizione del braccio telescopico può essere mostrata in sincrono in una tabella. La visualizzazione del digital twin in scala rende il monitoraggio del sollevatore telescopico più intuitivo.

4.1.4. Conclusioni

Per migliorare l'efficienza computazionale e l'accuratezza del digital twin usato per il monitoraggio della struttura e la previsione di equipaggiamenti complessi, è proposto in questo studio la descrizione di un digital twin in scala basato su un nuovo adattato modello surrogato. Questo modello, non solo prevede una robusta approssimazione, ma riduce anche i costi computazionali riducendo il numero di ISMs che partecipano al modello. Inoltre, basandosi sulle caratteristiche del metodo FE, è proposto un metodo di riarrangiamento dei nodi, il quale fornisce l'effetto scala per la costruzione del modello digitale. La distribuzione e il numero dei nodi possono essere modificati, non solo per mitigare i costi computazionali, ma anche per ottenere le informazioni nei punti chiave modificando la postazione dei nodi. Sono stati sviluppati esperimenti numerici per verificare la performance del modello proposto e del metodo di riarrangiamento dei nodi. Si ricorre ad un sollevatore telescopico come esempio su cui costruire un digital twin e fornire la praticità e validità del modello. L'esperimento mostra che il modello proposto consente effettivamente di risolvere i problemi di compromessi tra accuratezza ed efficienza computazionale attraverso un digital twin basato su FE. Bisogna comunque considerare che tale modello ha delle limitazioni. Per esempio, la simulazione è limitata alle analisi strutturali nelle condizioni elastiche.

4.1.5. Dati input

Per il modello

Dati geometrici del braccio per creare il modello digitale 3D su cui effettuare la mesh. I dati della performance sono usati come dati di prova per il AE-MMS. Si usano i dati dei sensori in tempo reale come input per l'AE-MMS.

Sensori per:

- α : angolo inclinazione del braccio
- l : lunghezza del telescopio
- m : massa del carico sollevato

4.2. Articolo 2 - ANALISI BUCKLING DI UN SOLLEVATORE TELESCOPICO: VALIDAZIONE TEORICA E NUMERICA

In questo articolo, attraverso un approccio numerico e codice numerico Ansys è verificata la stabilità e la resistenza del braccio di un sollevatore telescopico nelle reali condizioni di carico e vincoli. È stato verificato che i valori di sollecitazione sono inferiori al limite elastico del materiale, tranne per alcune zone di contatto dove è necessario installare sistemi per evitare la rottura. Inoltre, un'analisi superiori al le peggiori condizioni operative, confermando la stabilità della struttura. Infine, l'analisi di simulazione FEM permette di raggiungere risultati più velocemente.

4.2.1. Introduzione

La possibilità di scegliere materiali per la costruzione con elevata resistenza ha permesso di creare sezioni molto sottili per ridurre il peso del sistema, ciò però comporta la problematica del fenomeno di instabilità dovuta al carico di punta (o buckling). L'andamento del diagramma carico- deformazione ha un andamento convenzionale fino ad un determinato valore del carico (comportamento elasto-plastico) ma appena raggiunge un valore critico si evidenzia una modifica della curva che comporta uno spostamento teoricamente infinito che porta la struttura ad un rapido collasso. Incrementando la lunghezza del componente diventa cruciale garantirne la resistenza.

4.2.2. Modello e ipotesi

Il sistema analizzato è un particolare sollevatore telescopico disponibile nel mercato con l'obiettivo di migliorarne le proprietà meccaniche attraverso il dimensionamento. In generale l'obiettivo di questa analisi è una migliore comprensione della resistenza e della stabilità della struttura.

Il sistema complesso che unisce le parti del telescopio si considera la parte più critica della struttura, nell'analisi si considera costituito da due pattini scorrevoli.

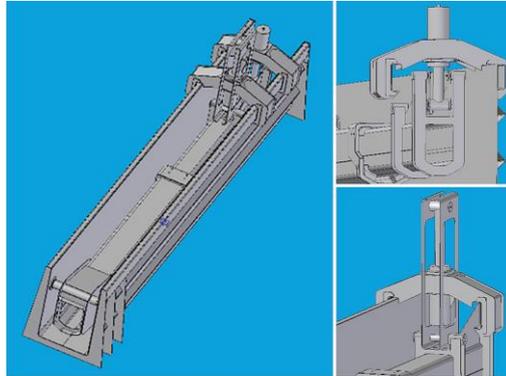


Fig. 25: Braccio telescopico e struttura per il test

Una semplificazione del modello ha consentito il calcolo teorico delle forze e dei momenti della struttura. Il modello più semplice in grado di avere risultati attendibili e che permette di individuare le aree più critiche è quello che segue la teoria di Saint Venant:

- una trave con incastro in un'estremità e libera nell'altra
- materiale lineare elastico
- forze di volume nulle, forze di superficie agenti solo sulle basi
- trave sottile con sezione sottile prevalente in una direzione rispetto le altre

La geometria della trave è nota:

- sezione rettangolare a doppia C con spessore di 5 mm
- tre sezioni con aree e momenti di inerzia variabili del braccio

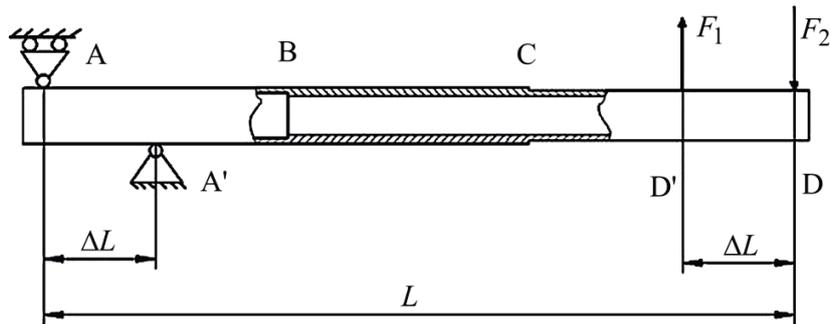


Fig. 26: Modello delle forze e delle condizioni al contorno

Per la determinazione delle tensioni secondo il problema di Saint Venant bisogna individuare:

- Momento di inerzia (asse neutro) delle tre sezioni
- Forze di reazione
- Diagramma di taglio e momento flettente
- Tensioni normali
- Tensioni di taglio (seguendo il modello di Jourawski per sezioni chiuse sottili)
- Tensioni equivalenti (seguendo il criterio di Von Mises)

Da questo modello le sollecitazioni analizzate si limitano prevalentemente ai momenti flettenti, i quali presentano un andamento lineare crescente (relativi alle diverse sezioni) con valori quasi costanti e valore massimo nella zona centrale.

	A	A'-	A'+	B	B+	C-	C+	D'-	D'+	D
Force, kN	-328	342	342	0	0	0	0	0	246	260
Shear, kN	-328	-328	14	14	14	14	14	14	260	260
Moment, kN·m	0	-328	-328	-308	-308	-282	-282	260	260	0
σ , MPa	0	132	132	124	12	11	223	206	206	0
τ , MPa	33	33	1	1	0	0	2	2	39	39
σ_{eq} , MPa	67	148	132	124	12	11	223	206	220	78

Fig. 27: Analisi teorica delle tensioni-deformazioni

4.2.3. Simulazione numerica

4.2.3.1. Modello discreto

Le successive analisi si basano su un modello più complesso del primo per avere una rappresentazione della geometria e condizioni più simili alla realtà. La discretizzazione è stata effettuata con Elementi Finiti tetraedrici con 10 nodi per garantire il giusto compromesso tra accuratezza dei risultati e tempi computazionali. L'analisi agli elementi finiti rende la soluzione numerica veloce e precisa.

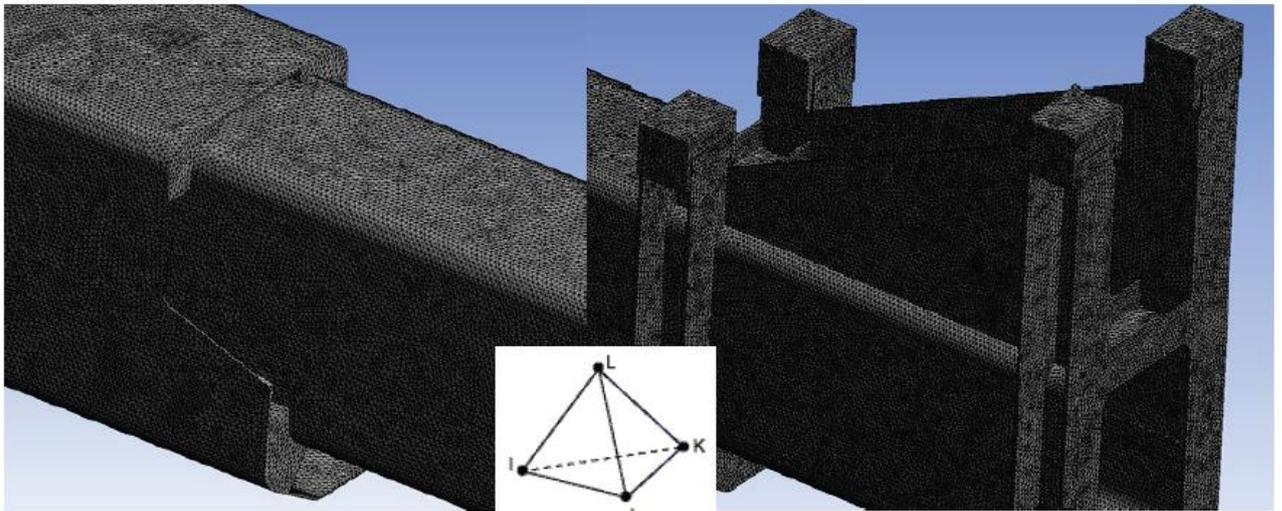


Fig. 28: Modello discreto

4.2.3.2. Modello semplificato

Per una soluzione numerica veloce ed efficace si assume un modello semplificato che considera tutte le parti del braccio telescopico assemblate, single model, costituite dallo stesso materiale, l'acciaio. Questo modello consente di verificare che sollecitazioni e deformazioni sono coerenti con la valutazione teorica e che il sistema è distante dalla condizione di snervamento.

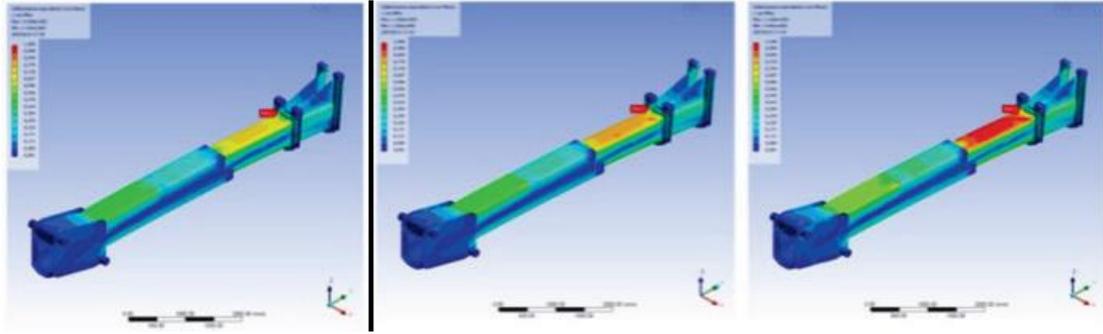


Fig. 29: Risposta della struttura all'aumento del carico

4.2.3.3. Modello complesso

I risultati del modello semplificato sono validi solo per considerazioni che riguardano l'intera struttura, infatti, i pattini scorrevoli sono considerati come parti in acciaio e che reagiscono in tutte le direzioni, nella realtà questi attivano sforzi solo di compressione e non si considerano le aree di contatto. Per questi motivi si sviluppa un modello più dettagliato. Precedentemente i risultati teorici e sperimentali non hanno considerato la deformazione elastoplastica, né quella viscoelastica, né le forze trasmesse nelle zone di contatto. Una volta aggiunte queste modifiche al modello, si analizza la zona di contatto attraverso una simulazione. Successivamente si analizza anche l'instabilità, con il modello di buckling, per valutare la differenza di risposta della teoria con ciò che accade nella realtà, definire un fattore di utilizzo.

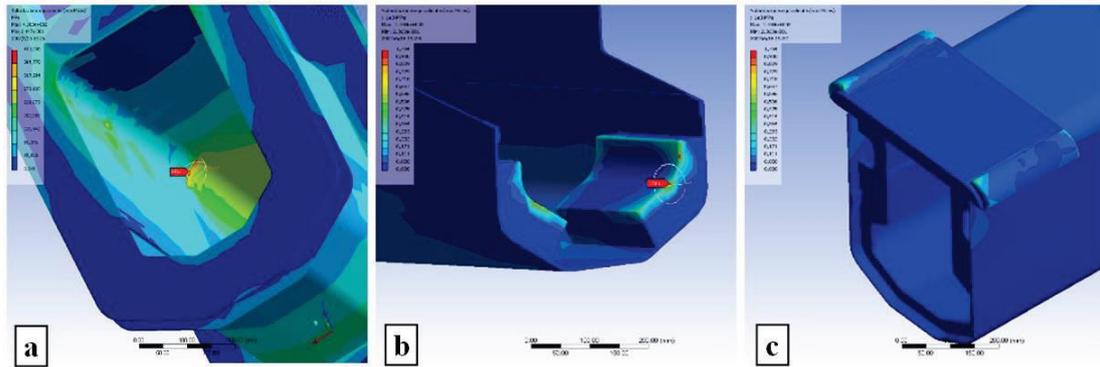


Fig. 30: Dettagli della zona di contatto: a) l'area con la massima sollecitazione del telescopio; b) pattino scorrevole inferiore e c) superiore

Con i risultati della simulazione numerica si verifica che il valore della sollecitazione massima è simile a quello stimato per vie teoriche e anche in questo caso lontano dal valore dello snervamento.

Il modello poi raggiunge risultati ancora più accurati correggendo il modello, infatti, si considera la asimmetria della sezione nella zona di contatto. Anche stavolta le sollecitazioni sono in campo elastico e la struttura è in sicurezza. All'aumento del carico, le sollecitazioni raggiungono lo snervamento e la loro redistribuzione nella zona di contatto abbassa il valore massimo.

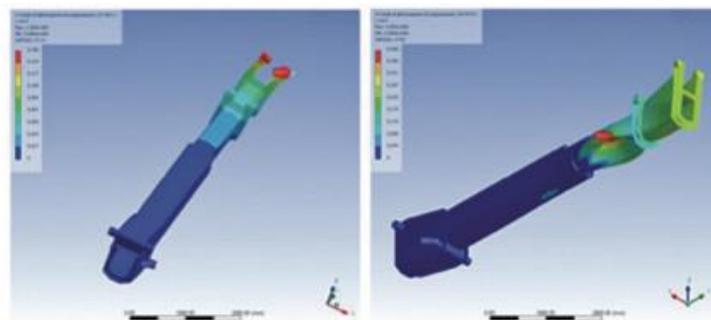


Fig. 31: Esempi dei modi di buckling

Dai risultati si osserva che la posizione del picco varia al variare del materiale e, di conseguenza, dal modulo elastico. Per quanto riguarda invece l'analisi buckling, i risultati dagli elementi finiti sul single body dimostrano che l'instabilità si verifica per carichi molto più elevati. Nel caso del modello assemblato, in cui il campo delle sollecitazioni aumenta, nel peggiore dei casi il valore massimo del carico raggiunge condizioni che portano alla rottura della struttura. Quindi è possibile affermare che casi di instabilità si verificano solo per valori di sollecitazione maggiore di quelli dello snervamento, che sono anche quattro volte maggiori dei carichi a cui la struttura è solitamente sottoposta.

4.2.4. Conclusioni

Attraverso un'analisi teorica e agli elementi finiti è stato possibile validare la stabilità del sollevatore telescopico. In particolare, tramite gli elementi finiti è stato possibile validare che durante il normale funzionamento il carico di punta non compromette la sicurezza del sistema. Combinando teoria e più di 50 simulazioni numeriche si prova che il sistema è stato dimensionato per sostenere carichi 3 volte maggiori rispetto quelli nelle condizioni nominali. Dalla sequenza di queste operazioni è stato possibile creare una metodologia per una veloce validazione delle capacità del sistema progettato. Inoltre, le simulazioni numeriche si sono mostrate valide per verificare strutture complesse, come quella analizzata nell'articolo, riducendo la necessità di effettuare test sperimentali complessi. Test sperimentali sarebbero utili per la validazione del modello, a ciò rappresenta lo step successivo della ricerca.

5. Applicazione degli algoritmi al data set per effettuare diagnostica predittiva

In questo elaborato si prende in esame un tipo di sollevatore telescopico che ha subito una sostituzione del secondo braccio. Il modello è TURBOFER 42.7 e poiché la sostituzione è avvenuta nell'intorno delle 2497 OdL si decidono di analizzare tutte le condizioni operative della macchina antecedente la rottura.

5.1. Caratteristiche tecniche della macchina

5.1.1. Gamma Telescopici media capacità

La gamma di sollevatori telescopici Media Capacità rappresenta il punto centrale delle gamme di sollevatori telescopici prodotte dalla Merlo. L'architettura progettuale, applicata a questi modelli, crea delle macchine uniche in termini di versatilità, prestazioni e semplicità di utilizzo. Sfruttando le caratteristiche delle prestazioni telescopiche, di velocità nell'esecuzione dei lavori, di maneggevolezza e di agilità le

macchine trovano applicazione in tutti i settori di utilizzo: dall'industria alle miniere; dal movimento terra all'allevamento; dalle costruzioni all'agricoltura. Questi modelli sono dei veri e propri tuttofare in grado di supportarti nel lavoro di tutti i giorni, dalla logistica, alla movimentazione passando per lo stoccaggio; offrendo, inoltre, la possibilità di trainare rimorchi di elevate portate anche su strada pubblica.

Le principali caratteristiche sono:

- Modelli dalle dimensioni compatte e dall'elevata manovrabilità
- Capacità di sollevamento fino a 4.200 kg
- Altezza di sollevamento fino a 10 metri
- Interfaccia Merlo per l'uso di oltre 40 attrezzature.



Fig. 32: Modello di telescopico a media capacità

La gamma di telescopici "Media capacità" è composta da modelli con portate comprese tra 3.300 kg e i 4.200 kg e altezze di sollevamento fino a 10 m. Il punto di forza di questa gamma è l'ampia offerta di prodotto, che consente di scegliere tra versioni differenti con contenuti tecnologici esclusivi, come la cabina sospesa, la traslazione laterale del braccio e il cambio a variazione continua, rispondendo, così, alle diverse esigenze operative degli utilizzatori finali.

La gamma si compone di due linee di prodotto differenti:

- TF33.9 – TF35.7
- TF38.10 – TF42.7

Il modello che si vuole analizzare è il sollevatore telescopico **TF 42.7**. Questo tipo di macchina è sviluppata per offrire maggiori prestazioni telescopiche.



Fig. 33: Modello TF42.7

Gli assali a portale permettono di incrementare l'altezza da terra favorendo la maneggevolezza della macchina in condizioni di fuori strada. La cabina è posizionata più in alto al fine di assicurare una migliore visibilità dell'operatore.

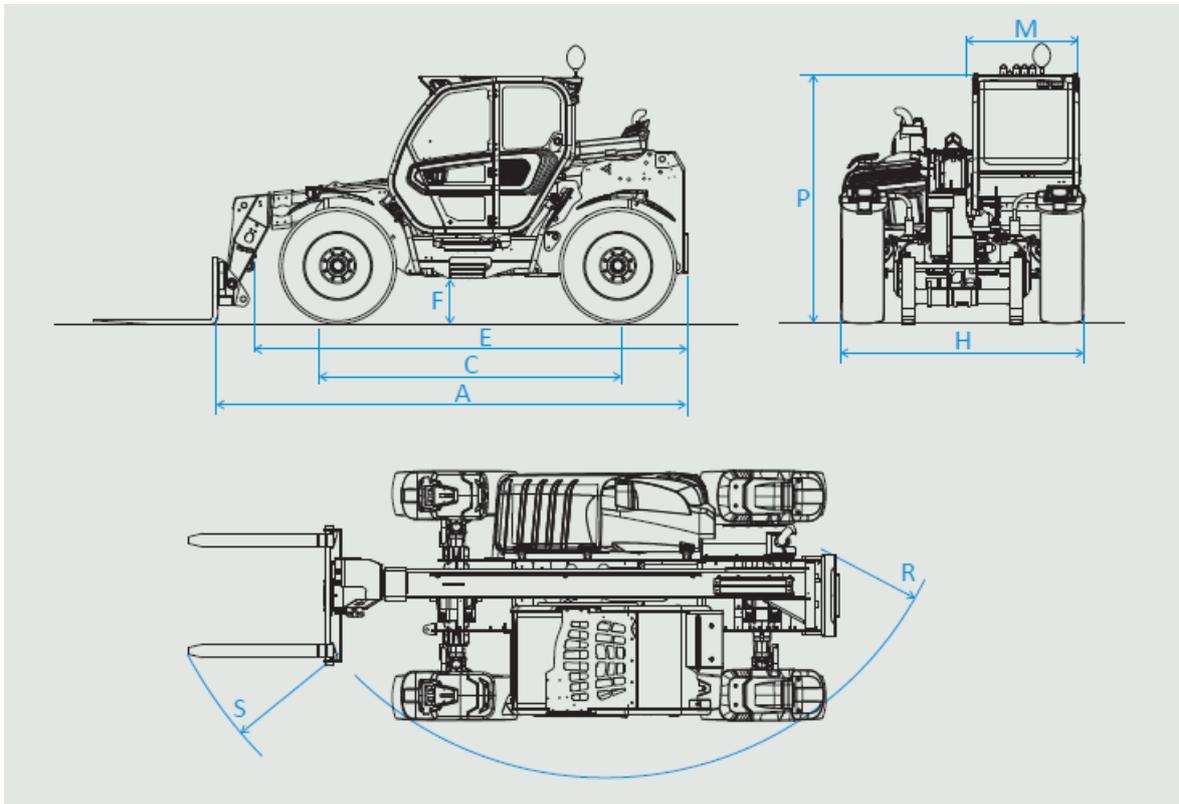
Le caratteristiche distintive di questi modelli sono:

- Idraulica da 150 l/min con tecnologia Load Sensing e Flow Sharing
- Trasmissione EPD con velocità massima di 40 km/h
- Motore termico da 105 kW/143 CV
- Disponibili le tecnologie "CS", "TT" e MCVTronic.

In sollevatore telescopico Merlo, modello **TURBO TF 42.7** con caratteristiche:

- Portata massima: 4200kg

- Altezza massima di sollevamento: 7m



	Dimensioni	A	C	E	F	H	M	P	R	S
TF 43.7	mm	4730	2810	4104	460	2310	1010	2530	3985	4800

Modello	TF42.7-145
Prestazioni	
Massa totale a vuoto (kg)	7800
Massima portata (kg)	4200
Altezza di sollevamento (m)	7
Massimo sbraccio (m)	3,8
Traslazione laterale del braccio (mm)	-
Livellamento del telaio (%)	-

5.1.2. Definizione del modello per sollevamento e carichi a flessione del braccio

5.1.3. Analisi spostamenti

Per calcolare le deformazioni sul braccio del sollevatore telescopico si utilizza l'analisi strutturale di struttura poiché consente un'analisi rapida e accurata di strutture anche complesse sottoposte a carichi sia statici che dinamici.

Esso si basa sul concetto di considerare la struttura reale con un modello equivalente costituito da elementi strutturali discreti aventi proprietà elastiche ed inerziali (E) noto ed esprimibili sotto forma di matrici. Il calcolo in campo elastico delle strutture è generalmente riconducibile ad una sequenza di operazioni matriciali. Se con il metodo delle forze le incognite primarie del problema sono le reazioni iperstatiche di una struttura, nel metodo degli spostamenti, le incognite primarie del problema sono le componenti di movimento (spostamento e rotazioni) dei nodi della struttura.

Quando si vuole automatizzare il processo, è preferibile il metodo degli spostamenti. Esso non richiede infatti alcuna scelta delle incognite, poiché fissate in maniera univoca

dallo schema della struttura considerata. Il metodo dell'analisi matriciale si basa infatti sul metodo degli spostamenti.

Il modello discreto è necessario allo scopo di avere un sistema con un numero finito di gradi di libertà da poter essere studiato con il metodo dell'analisi matriciale. Per certi tipi di strutture, quelle costituite da elementi strutturali collegati da nodi discreti, come le strutture reticolari e i telai, il modello discreto consente la soluzione esatta del problema.

È possibile considerare il braccio del sollevatore telescopico come un telaio con nodi rigidi, in questa analisi si considerano due nodi, ciascuno su un estremo del braccio. Le interazioni tra gli elementi strutturali in un telaio si rappresentano come forze nodali. In questo caso, si considera l'interazione del braccio con la struttura completa come un incastro, da consentire di arrivare direttamente alla formulazione matriciale attraverso le teorie elementari di flessione e torsione.

Matrice di rigidezza dell'elemento TRAVE:

$$[K] = \frac{E}{L} \cdot \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline Ac^2 + \frac{12J}{L^2}s^2 & \left(A - \frac{12J}{L^2}\right)sc & -\frac{6J}{L}s & -Ac^2 - \frac{12J}{L^2}s^2 & \left(-A + \frac{12J}{L^2}\right)sc & -\frac{6J}{L}s \\ \hline \left(A - \frac{12J}{L^2}\right)sc & As^2 + \frac{12J}{L^2}c^2 & \frac{6J}{L}c & \left(-A + \frac{12J}{L^2}\right)sc & -As^2 - \frac{12J}{L^2}c^2 & \frac{6J}{L}c \\ \hline -\frac{6J}{L}s & \frac{6J}{L}c & 4J & \frac{6J}{L}s & -\frac{6J}{L}c & 2J \\ \hline -Ac^2 - \frac{12J}{L^2}s^2 & \left(-A + \frac{12J}{L^2}\right)sc & \frac{6J}{L}s & Ac^2 + \frac{12J}{L^2}s^2 & \left(A - \frac{12J}{L^2}\right)sc & \frac{6J}{L}s \\ \hline \left(-A + \frac{12J}{L^2}\right)sc & -As^2 - \frac{12J}{L^2}c^2 & -\frac{6J}{L}c & \left(A - \frac{12J}{L^2}\right)sc & As^2 + \frac{12J}{L^2}c^2 & -\frac{6J}{L}c \\ \hline -\frac{6J}{L}s & \frac{6J}{L}c & 2J & \frac{6J}{L}s & -\frac{6J}{L}c & 4J \\ \hline \end{array}$$



Fig. 34: Immagine degli spostamenti ammissibili

Per considerare l'inclinazione del braccio è necessario che la matrice di rigidezza passi dal sistema di riferimento locale a quello globale, utilizzando la matrice di rotazione, R .

5.1.4. Analisi sollecitazioni

Si considera il braccio del sollevatore telescopico come un solido elastico, lineare, isotropo e si considera come una trave un'asta incastrata con una forza concentrata sull'estremità. Di fondamentale importanza è il problema di Saint Venant, questo metodo di soluzione è un metodo 'semi-inverso'. Si assumono a priori alcune proprietà della soluzione e si affida alle equazioni del problema elastico la sua determinazione completa. In tali termini si articola il procedimento originale di Saint Venant.

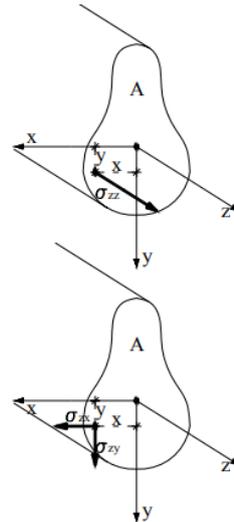
Dato un cilindro:

- Elastico, lineare, omogeneo, isotropo;
- Non vincolato;
- Caricato sulle basi;

Il problema di Saint Venant, fatta l'ipotesi $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0$ consente di determinare le altre tensioni, le deformazioni e gli spostamenti. In particolare, il problema fornisce relazioni fra tensione, deformazione, spostamento in un punto di una generica sezione e le caratteristiche di sollecitazione in quella sezione. Questo risultato è fondamentale per le applicazioni. Infatti, tali relazioni si estrapolano alle travi vincolate e caricate nel volume e sulla superficie laterale. Si considerano le relazioni tra forze e momenti risultanti delle tensioni:

$$N = \int_A \sigma_{zz} dA; \quad T_x = \int_A \sigma_{zx} dA; \quad T_y = \int_A \sigma_{zy} dA$$

$$M_x = \int_A \sigma_{zz} y dA; \quad M_y = - \int_A \sigma_{zz} x dA; \quad M_z = \int_A (\sigma_{zy} x - \sigma_{zx} y) dA$$



Si considera un caso generale in cui si suppone che nella generica sezione A agiscono forze normale N e momenti flettenti M_x , M_y . Dalla soluzione del problema di Saint Venant si ricava che l'unica componente di tensione non nulla è σ_{zz} , che varia nella sezione con legge lineare:

$$\sigma_{zz} = a_0 + a_1 x + a_2 y; \quad \text{con } a_0, a_1, a_2 \text{ costanti}$$

Per ottenere le relazioni fra σ_{zz} e N, M_x , M_y , si impone:

$$\int_A \sigma_{zz} dA = N; \quad \int_A \sigma_{zz} y dA = M_x; \quad \int_A \sigma_{zz} x dA = -M_y;$$

Da cui:

$$\begin{aligned} a_0 A + a_1 \int_A x dA + a_2 \int_A y dA &= N \\ a_0 \int_A y dA + a_1 \int_A x y dA + a_2 \int_A y^2 dA &= M_x \\ a_0 \int_A x dA + a_1 \int_A x^2 dA + a_2 \int_A x y dA &= -M_y \end{aligned}$$

Ma poiché x e y sono assi baricentrici e principali di inerzia della sezione:

$$\int_A x dA = \int_A y dA = \int_A x y dA = 0; \quad \int_A y^2 dA = J_x; \quad \int_A x^2 dA = J_y$$

J_x, J_y , momenti di inerzia della sezione rispetto a x e y , per cui:

$$a_0 A = N \quad \rightarrow \quad a_0 = \frac{N}{A}$$

$$a_2 J_x = M_x \quad \rightarrow \quad a_2 = \frac{M_x}{J_x}$$

$$a_1 J_y = -M_y \quad \rightarrow \quad a_1 = -\frac{M_y}{J_y}$$

E si definisce:

$$\sigma_{zz} = \frac{N}{A} - \frac{M_y}{J_y} x + \frac{M_x}{J_x} y$$

5.1.5. Il calcolo automatico

Si vuole definire un algoritmo per il calcolo degli spostamenti e delle tensioni nelle travi con sezione sottile chiusa. L'algoritmo, quindi, permette di ottenere i valori dello spostamento lungo la direzione y e σ_{zz} lungo la trave, le cui proprietà geometriche sono supposte note.

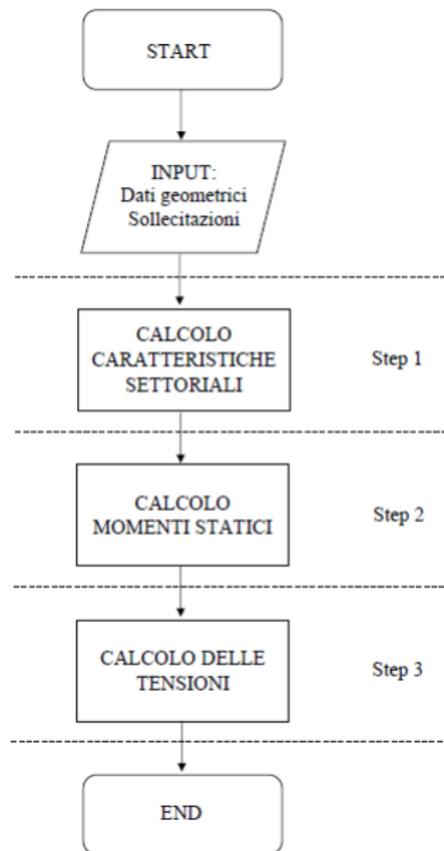


Fig. 35: Diagramma di flusso dell'algoritmo per il calcolo delle tensioni

5.1.6. Gli input dell'algoritmo

5.1.6.1. Acquisizione dati

La progettazione di algoritmi di manutenzione predittiva inizia con la fase di acquisizione di una grande quantità di dati misurati da sensori e memorizzati in registri di multipli

macchine che funzionano in condizioni operative normali e difettosi. Tali dati vengono generalmente memorizzati come dati di segnali o serie temporali in registri di manutenzione che possono essere manifestati in file con diverse estensioni. In molti casi, i dati sui guasti dalle macchine non sono disponibili oppure i set di dati relativi alle condizioni difettosi sono limitati a causa della regolare manutenzione in corso e per superare questo problema, i dati di errore possono essere generati da relativi modelli di simulazione che rappresentano il funzionamento del sistema in diverse condizioni di errore.

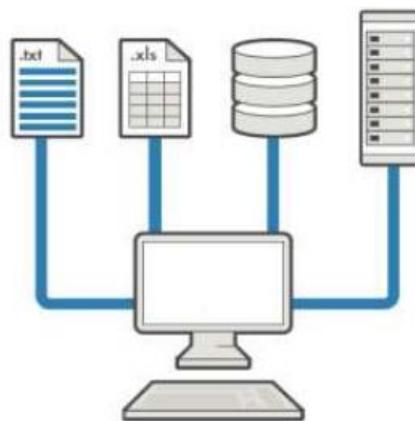


Fig. 36: Acquisizione dati in manutenzione predittiva

5.1.6.2. Pre-elaborazione dati

La fase di pre-elaborazione è spesso necessaria per convertire i dati in una forma da cui gli indicatori di condizione possono essere facilmente estratti. La preelaborazione di dati può includere:

- Una rimozione di valori anomali e di valore mancante, rimozione di offset e detrending
- Una riduzione del rumore, come filtraggio o smoothing

Inoltre, comprendere la macchina ed il tipo di dati disponibili è un fattore importantissimo per determinare quali metodi di preelaborazione utilizzare.

Un passo fondamentale nello sviluppo dell'algoritmo di manutenzione predittiva è l'identificazione di indicatori di condizione (feature). In pratica, un utile indicatore di condizione raggruppa gli stati di sistema simili e distingue il funzionamento normale da quello difettoso.

Nel caso in esame, i dati relativi alle condizioni operative della macchina sono reperibili da telemetria ogni minuto. Considerando il gran numero di dati disponibili è stata effettuata una selezione dei dati, considerando solo i dati di input necessari alla realizzazione del modello.

Per la definizione del modello su Matlab si considerano come input i dati reperibili da telemetria:

- Peso sollevato [kg];
- Angolo di rotazione del braccio [°];
- Sfilo del braccio [dL];

La geometria della sezione della trave è nota.

Bisogna considerare che i sensori rilevano alcuni dati che non hanno una validità; infatti, nei valori disponibili in telemetria, i range che si considerano relativi alle capacità della macchina sono:

$$P < 42000 \text{ kg}$$

$$i = 0 - 80^\circ \text{ C}$$

- Si effettua un'ulteriore considerazione rispetto all'acquisizione dei dati relativi a P (carico – kg): si considerano solo i valori positivi. Questa scelta è stata effettuata sempre in funzione dell'efficienza del modello sviluppato e della validità della simulazione.

$$P = 0 - 42000 \text{ kg}$$

5.1.7. Definizione della geometria

Per quanto riguarda, invece, la geometria della sezione della trave è nota. Il modello deve tenere in considerazione che la macchina che si sta analizzando è caratterizzata da un braccio con sezioni di sfilo variabili, quindi, la sezione resistente del braccio sarà impostata come sezione media in funzione del valore di l (lunghezza di sfilo braccio).

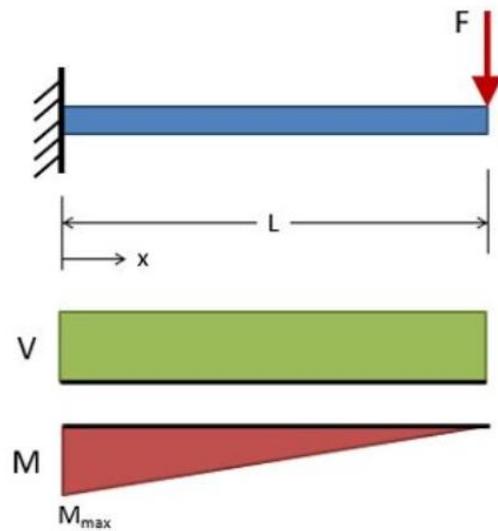
5.1.8. Determinazione del diagramma settoriale

Secondo l'ipotesi semplificativa del problema di Saint Venant non è possibile assegnare liberamente le forze in ogni punto delle basi, ma si possono prescrivere liberamente solo la risultante rispetto il baricentro. Infatti, come afferma il postulato, "sistemi di forze applicati sulle basi che, pur essendo diversi, siano staticamente equivalenti (e cioè abbiano la stessa risultante e lo stesso momento risultante) producono effetti la cui differenza diviene trascurabile allontanandosi dall'immediata vicinanza delle basi ". Si passa, in questo modo, dalle forze sulla struttura a quelle equivalenti ad una generica sezione.

5.1.9. Determinazione delle tensioni

Il passaggio finale consente la determinazione delle sollecitazioni della sezione grazie alla formula definita del problema di Saint Venant.

Nel caso in esame, la trave vincolata a sbalzo è sottoposta ad una forza lungo l'asse y nell'estremità, quindi si esamina la sezione nei pressi della forza, la quale è sottoposta ad un momento lungo y . Per questo la formula si semplifica come:



$$\sigma, bend = \frac{M * x}{I}$$

- M= momento flessionale rispetto all'asse neutro della sezione;
- y = distanza perpendicolare dall'asse neutro ad un punto della sezione;
- I= momento di inerzia della sezione rispetto l'asse neutro;

5.2. Definizione del modello per carichi di punta

Una trave con una dimensione prevalente rispetto le altre soggetta ad un carico di compressione deve essere dimensionata a carico di punta. L'instabilità a compressione o buckling è una modalità di dimensionamento che tutela il collasso della struttura dovuta ad un carico critico P di tipo assiale.

5.2.1. Il fenomeno dell'instabilità

Con fenomeno di instabilità o buckling si intende una condizione in cui un elemento strutturale, un'asta o una trave, sollecitato a compressione, subisce una leggera

inflexione laterale e si genera un momento flettente. Il carico non agisce, quindi, in senso rigorosamente assiale e porta allo sviluppo di un nuovo stato tensionale all'interno della struttura. Il problema che questo fenomeno causa durante la progettazione è che a un livello di carico più basso di quello consentito dal limite di snervamento del materiale porta il cedimento del sistema. Si riferisce a instabilità globale quando il fenomeno riguarda localmente l'elemento, invece, in componenti con pareti sottili, è localizzato è infatti si tratta di instabilità locale.

L'esempio più classico è quello di un'asta sottoposta ad un carico di compressione. È possibile individuare una condizione di variazione del comportamento dell'asta: se il carico P è inferiore ad un valore critico non ci sono spostamenti nella direzione perpendicolare all'asse e l'asta rimane dritta in condizioni di equilibrio stabile. Se il carico P assume un valore superiore a quello critico, una qualsiasi perturbazione porta l'asta ad inflettersi e la configurazione diventa instabile. La condizione di carico critico rappresenta uno stato di stabilità indifferente.

Questo accade in condizioni ideali, nella realtà le inevitabili imperfezioni presenti nella struttura forniscono da innesco, l'instabilità non si verifica in modo così netto e compare da subito.

5.2.2. Modello di Eulero

Uno dei principali modelli teorici per il calcolo del valore critico di aste compresse è quello di Eulero, nato nel 1744. È il modello più utilizzato per l'analisi di trave snelle e ne è riconosciuta la validità. Si basa sulle ipotesi che la trave è appoggiata agli estremi ed è valida la legge di Hooke. Si definisce una lunghezza libera di inflessione in funzione della configurazione di vincolo, poiché questa influenza l'eccentricità della trave.

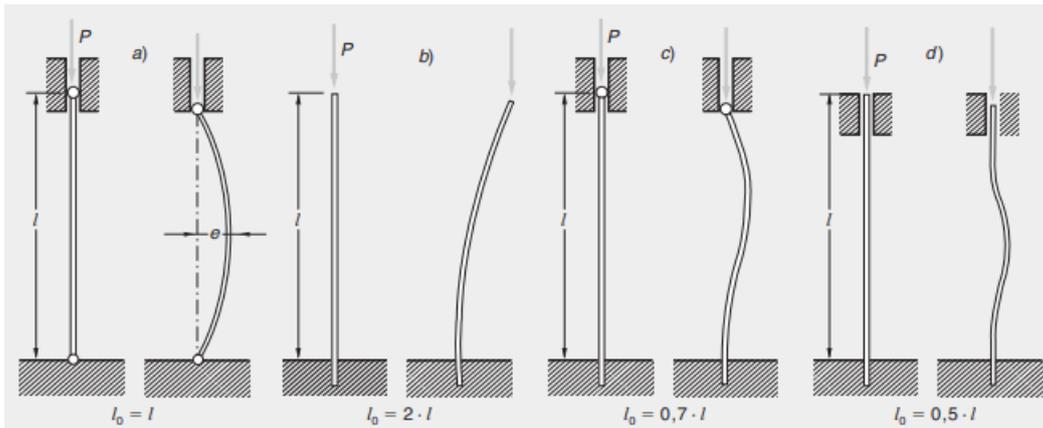


Fig. 37: Valore di l_0 in funzione delle condizioni di vincolo

Questo modello si applica alle travi snelle, perciò si definisce un parametro che indica se la struttura necessita un dimensionamento a carico di punta: il rapporto di snellezza, λ . Si indica con ρ_{\min} il raggio di inerzia minore della sezione della trave e si calcola λ con la formula:

$$\lambda = \frac{l_0}{\rho, \min}$$

La trave si deve dimensionare a carico di punta se il valore di λ è elevato.

La formula che definisce il carico critico che compromette la stabilità della struttura è:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_0^2}$$

Quindi il carico che la trave può sostenere senza insorgere in instabilità, con CS come grado di sicurezza, è:

$$P = \frac{\pi^2 E I}{CS l_0^2}$$

La formula di Eulero può essere utilizzata come base per la progettazione o come calcolo per la verifica.

Se si ragiona rispetto le tensioni, quella critica è definita dalla formula:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{S} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Dalla formulazione di Eulero si osserva che le caratteristiche di una trave per resistere al carico di punta sono:

- Evitare di usare materiali costosi con elevata resistenza, poiché la condizione critica dipende da E, non dal carico di rottura
- Sezioni cave per avere alti momenti d'inerzia con modeste sezioni

6. Esempi applicativi di verifica del modello

6.1. L'importanza della validazione

L'attività di validazione dei modelli di calcolo è da considerarsi come parte integrante del processo progettuale. Validare il modello di calcolo implica riuscire a stabilire che i risultati ottenuti hanno coerenza e aderenza alle ipotesi in un intervallo ingegneristicamente accettabile della realtà. Un progetto deve essere valido nella sua globalità, deve dimostrare che è stato considerato ogni fattore, non solo nel rispetto di quanto previsto dalla normativa.

Validare il modello di calcolo implica valutare la fascia di comportamento ovvero avere una misura del margine di errore che abbiamo rispetto alla realtà fisica che abbiamo voluto rappresentare.

Nonostante la sempre maggiore potenza di calcolo, numerose sono le variabili che influenzano la qualità del calcolo, indipendentemente dalla modalità di risoluzione delle equazioni. Risolto a mano o risolto meccanicamente un modello computazionale rimane di fatto in una fascia ampia di comportamento assolutamente ineliminabile.

Una ampia fascia di comportamento è sintomo di importanti incertezze sui dati alla base del calcolo (carichi e destinazioni d'uso, qualità dei materiali e dell'esecuzione, ecc.) o sul modello di calcolo (difficoltà di rappresentare numericamente la variazione di una grandezza).

Una struttura è purtroppo un oggetto unico. Il progettista ha la possibilità di comparare il risultato rispetto ad altre strutture simili a quella in esame ma comunque diverse. L'attività sopra illustrata costituisce la fase finale di un processo piuttosto articolato.

La prima stabilisce il grado di complessità che avrà il nostro modello di calcolo. Tanto più si riesce (grazie all'esperienza progettuale e soprattutto computazionale) a ponderare il livello di complessità da esaminare tanto più consapevole sarà la scelta degli opportuni metodi (di solito quello agli elementi finiti) di risoluzione. La conoscenza metodologica non è solo limitata ai concetti della Scienza e della Tecnica delle Costruzioni ma deve anche comprendere nozioni e metodologie nei confronti di algoritmi di calcolo in ambito dinamico e nei confronti degli schemi di analisi iterativi non lineari. Tra l'altro, la tematica delle analisi in ambito non lineare per materiale (tipiche delle strutture esistenti) è delicata in quanto si tratta di argomenti complessi dal punto di vista metodologico ed in parte ancora di ricerca, in merito ai quali la normativa propone indicazioni inevitabilmente non esaustive. La maggior parte degli errori nella simulazione strutturale spesso risiede in questa fase del lavoro.

Il risultato si traduce in modelli con un elevatissimo numero di elementi finiti in cui la finissima discretizzazione piuttosto che cautelare l'analista e proteggerlo dalla sua poca competenza diviene una fonte di problemi spesso insormontabili. La conoscenza metodologica costituisce un ponte tra la capacità di analisi della realtà fisica da simulare e la corretta scelta degli algoritmi risolutivi.

La consapevolezza nei confronti degli errori numerici va affrontata attraverso un'adeguata sequenza di esempi numerici (casi test) attraverso i quali l'utente simula casi semplici ritrovando le soluzioni spesso disponibili in forma chiusa. La confidenza da raggiungere non è solo il risultato in sé ma anche l'interpretazione dei messaggi evidenziati durante la fase di soluzione del solutore (una soluzione corretta non avviene solo quando un solutore termina un calcolo; potrebbe completarlo ma a seguito di segnalazioni di anomalie o possibili non convergenze di alcuni casi di carico). È necessario eseguire una dettagliata lista di controlli. L'utente deve poter estrarre, con facilità, tutti i dati di input, i principali dati riassuntivi, i parametri di massa, la tipologia di elementi finiti usata, i rapporti dimensionali presenti nelle mesh, le distorsioni angolari degli elementi shell, ecc. A valle delle calcolazioni si dovranno desumere i valori dei periodi di vibrazione, le percentuali di massa coinvolte per ogni modo, la ripartizione dei tagli di piano distinguendo tra elementi colonna ed elementi setto, ecc.

Altre operazioni utili per completare questa fase sono in realtà da svolgere nelle primissime fasi di utilizzo di un codice di calcolo commerciale. Tra queste il confronto dei risultati ottenuti tra l'esecuzione di verifiche a campione per controllare i risultati del software e acquisire confidenza con esso.

La problematica relativa alla ricerca e soluzione degli errori non è solo di competenza di chi utilizza il software. È parimenti un'attività a carico del produttore del software. I software sono inevitabilmente soggetti ad errore. Un codice commerciale deve essere sviluppato facendo riferimento a procedure matematiche consolidate rispetto alle quali è possibile stabilire una ampia casistica di casi prova.

6.1.1. Validazione - Articolo 1

Si confrontano i risultati ottenuti dall'articolo e quelli ottenuti con l'ausilio del codice di calcolo, si considerano, quindi, i dati di input dell'articolo:

Carico	907	kg
Angolo	3,3	°
Sfilo	64	mm

Si ricavano i risultati dello spostamento del braccio del sollevatore telescopico nel modello Matlab utilizzando come dati di input quelli dell'articolo.

Il risultato è:

Spostamento max	4,32	mm
-----------------	------	----

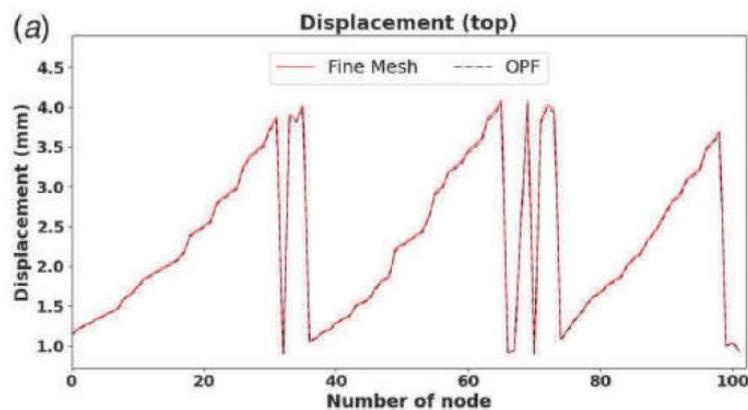


Fig. 38: Spostamento lungo il braccio con dati di input dell'articolo

È possibile osservare lo spostamento massimo è pari a circa 4,4 mm in accordo con i risultati dell'articolo.

6.1.2. Validazione – Articolo 2 – Buckling

Con lo scopo di evidenziare la potenzialità del codice proposto per l'analisi del calcolo delle sollecitazioni dovute a carico di punta, si vuole effettuare la validazione attraverso alcuni esempi di calcolo tensionale su travi snelle. Anche in questo caso si individuano i

dati utilizzati nell'articolo preso da letteratura "Analisi buckling di un sollevatore telescopico" e si inseriscono come input nel modello implementato su MATLAB per l'analisi delle sollecitazioni dovute a carico di punta. Infine, si confrontano i risultati del modello sviluppato con quelli dell'articolo e si valuta se sono congruenti.

I dati di input per la validazione del modello sono:

Carico	5000	kN
Angolo	0	°
Sfilo	0	mm

Inserendo i seguenti input nel modello sviluppato, il valore della sollecitazione risulta pari a 424 Mpa.

Invece, nell'analisi effettuata dall'articolo si osserva che, nonostante i limiti legati all'uso del modello semplificato, il sistema (il braccio del sollevatore telescopico) è già dimensionato per sostenere carichi molto più elevati, infatti, non raggiunge il limite di snervamento del materiale. Dai risultati ottenuti in termini di sollecitazioni dovute all'aumento dell'intensità del carico si osserva dalla figura m, che per i valori di input considerati ai fini della validazione, cioè per valore del carico pari a 500 kN la sollecitazione assume valori coerenti con il modello sviluppato.

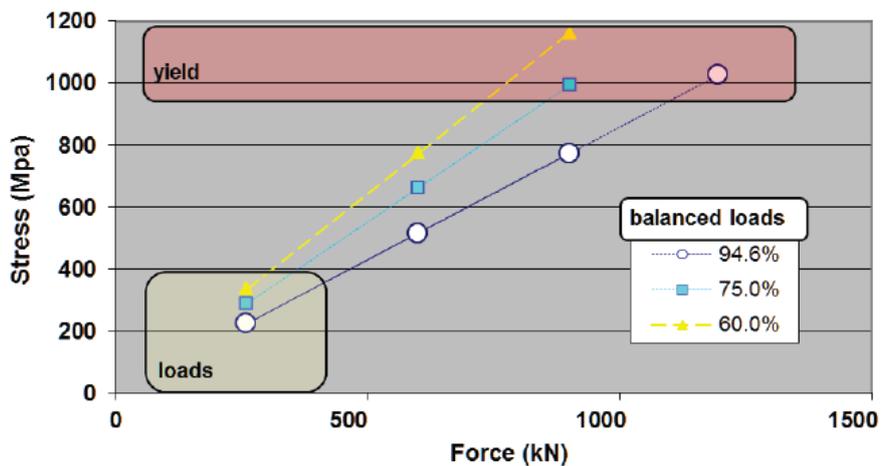


Fig. 39: Effetti in termini di sollecitazione dovute all'aumento dell'intensità del carico

Per rendere la validazione più consistente, lo stesso procedimento viene effettuato con un altro articolo, "Finite Element Analysis of Inner Boom for 3Tonn Telescopic Forklift".

L'oggetto di studio dell'articolo considerato è il miglioramento della visibilità dalla seduta del conducente e minimizzare il costo totale di assemblaggio del braccio mantenendo le sollecitazioni che agiscono sulla struttura, dovute alle condizioni di carico, inferiore al limite di snervamento. Un modello 3D viene implementato ed importato su Ansys Workbench per un'analisi agli elementi finiti. Come procedura generale per la FEA il modello è discretizzato con una mesh con dimensione 15mm con elementi tetraedrici.

I dati di input sono:

Carico	3000	kg
Angolo	0	°
Sfilo	0	mm

La figura m mostra i risultati delle sollecitazioni per i dati di input considerati.

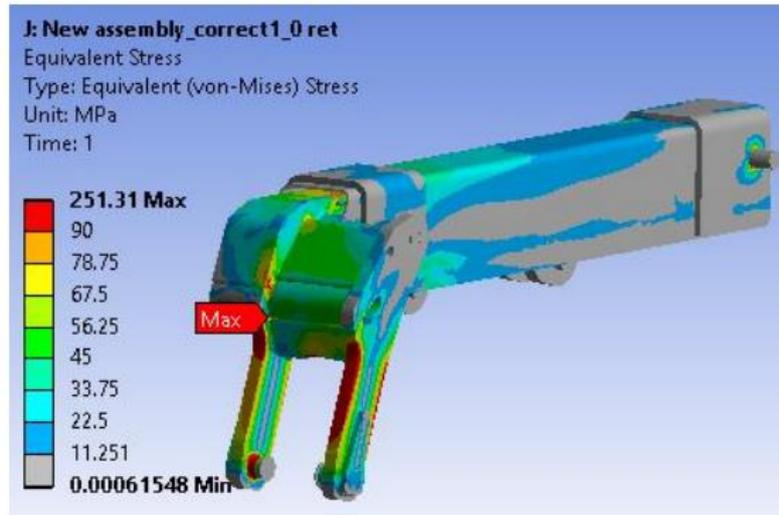


Fig. 40: Risultati delle sollecitazioni

Questi dati di input vengono inseriti successivamente nel modello di partenza in cui il calcolo è stato eseguito alla base dell'elemento oggetto di studio, dove le tensioni assumono il valore massimo. La sollecitazione risultante è pari a 207 Mpa, quindi, i risultati si possono ritenere ancora una volta coerenti e quindi il modello considerato efficace.

7. Applicazione del modello per diagnostica su telescopico Merlo TF 42.7-Risultati

7.1. Indici di utilizzo operativo del sollevatore telescopico

L'obiettivo è quello di individuare gli istanti di tempo in cui si verificano condizioni operative critiche del sollevatore telescopico preso in esame.

L'individuazione delle condizioni di utilizzo mediante il metodo classico implica la necessità di definire il tipo ed il valore numerico del fattore di utilizzo che si verifica. In generale le normative non impongono l'uso di un particolare metodo per la determinazione del fattore di utilizzo né stabiliscono un specifico valore limite assegnato e pertanto, per la valutazione di tale valore limite, si fa riferimento alla pratica corrente ed alle indicazioni fornite in letteratura. Sono stati analizzati, nel caso in esame, i valori di fattore di utilizzo in tutti gli istanti (ogni minuto, ovvero il tempo in cui sono presentati i dati in telemetria) di tempo precedente la sostituzione del braccio. Le varie condizioni vengono definite al variare dell'angolo compreso tra il braccio ed il suolo, la lunghezza dello sfilo e il carico sollevato, le entità del fattore di utilizzo, valutati secondo le procedure usuali, vengono poste in relazione con i limiti imposti dal diagramma di carico prescritti dal costruttore.

Da catalogo, come mostra la figura 6, sono osservabili le condizioni di sicurezza dei tre parametri che si stanno analizzando, messi in relazione tra loro. Tale diagramma di carico definisce il valore massimo di carico per ciascuna zona in funzione degli altri due parametri in esame.

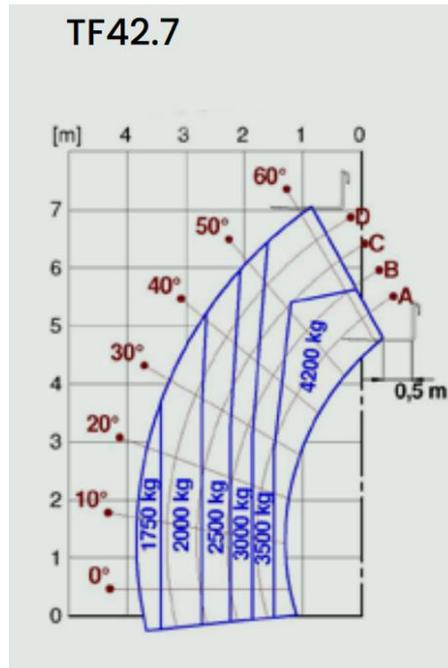


Fig. 41: Diagramma di carico di un modello TF 42.7

I metodi tradizionali, con cui si impongono generalmente fattore di utilizzo globali non permettono di scindere le incertezze derivanti dalla scelta dei parametri da quelle legate al modello di calcolo utilizzato. Inoltre, non risulta sempre agevole individuare quale sia la scelta più opportuna dei parametri in tale analisi si deve, quindi, tenere conto delle incertezze legate al modello di calcolo.

7.2. Concetto

Il significato tradizionale che viene attribuito all'indice massimo di utilizzo è legato a condizioni di lavoro compresi nei limiti imposti dal Costruttore. Il metodo che richiama il fattore di utilizzo si basa sull'idea di controllare che, in presenza dei valori nominali delle azioni, in nessun punto della membratura lo stato tensionale σ superi un valore limite, detto ammissibile, nettamente inferiore a quello di rottura.

I valori ammissibili delle tensioni sono ottenuti da quelli di crisi dividendoli per un opportuno fattore di utilizzo γ , che dipende dal materiale stesso.

La verifica è soddisfatta se risulta verificata la relazione:

$$\sigma \leq \bar{\sigma} = \frac{\sigma_R}{\gamma}$$

7.3. Casi esaminati

Per definire gli istanti di tempo in cui si verificano condizione di criticità per valutare quali sono i parametri che hanno causato la rottura si calcolano i valori del fattore di utilizzo nel tempo operativo precedente la sostituzione del braccio. Nei casi in cui la combinazione dei parametri analizzati comporta un valore del fattore maggiore dell'unità, quella condizione di carico è considerata come critica.

Il modello precedentemente descritto è stato sviluppato e poi eseguito attraverso il linguaggio di programmazione creato su Matlab. La quantità di dati disponibili da telemetria è numerosa, poiché la sostituzione del braccio è avvenuta intorno le 2497 OdL e questi vengono rilevati circa ogni minuto di funzionamento. Per non appesantire il programma e non avere tempi computazionali elevati, si effettua l'analisi ad intervalli di 100 OdL, per un totale di 25 simulazioni.

7.4. Analisi dei risultati

Sono riportati i casi che hanno rilevato condizioni di criticità della struttura, ovvero quando la combinazione dei parametri operativi che si stanno analizzando genera un valore del fattore di utilizzo maggiore dell'unità.

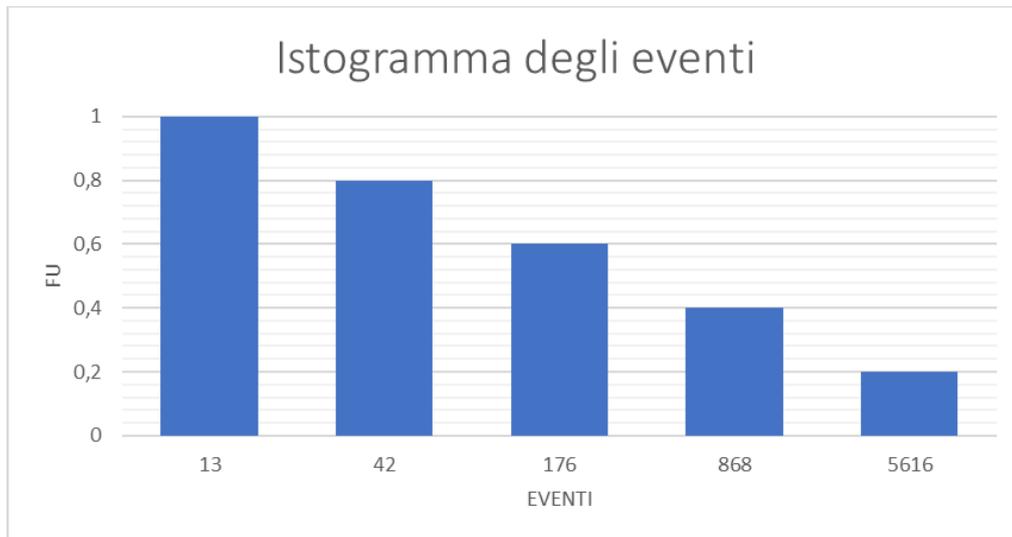


Fig. 42: FU dalle 897 alle 996 OdL

Il grafico riporta il numero di eventi per cui si verifica un valore del fattore di utilizzo (FU), il quale può assumere valori compresi tra 0 e 1. Per eventi invece si intende il numero di istanti di tempo in cui è stato registrato un dato in telemetria nell'intervallo lavorativo considerato.

L'obiettivo delle cinque barre che formano l'istogramma è di mettere in evidenza il numero delle volte in cui il fattore di utilizzo compreso tra:

- 0-0,2
- 0,2-0,4
- 0,4-0,6
- 0,6-0,8
- 0,8-1



Fig. 43: FU dalle 1797 a 1896 OdL



Fig. 44: FU dalle 2097 a 2196 OdL

Dai risultati ottenuti è possibile notare che il numero degli eventi per cui si verificano condizioni di criticità è un valore trascurabile rispetto il tempo lavorativo considerato.

Quindi, si giunge alla conclusione che la causa del guasto del braccio telescopico non è determinata dalle sollecitazioni di tipo flessionale.

Poiché le analisi precedenti si sono svolte attraverso 25 simulazioni differenti, è possibile creare un unico grafico che consente di definire un andamento generale riguardo il funzionamento del braccio durante le ore complessive precedenti il guasto, consentendo così di non avere 25 grafici differenti.

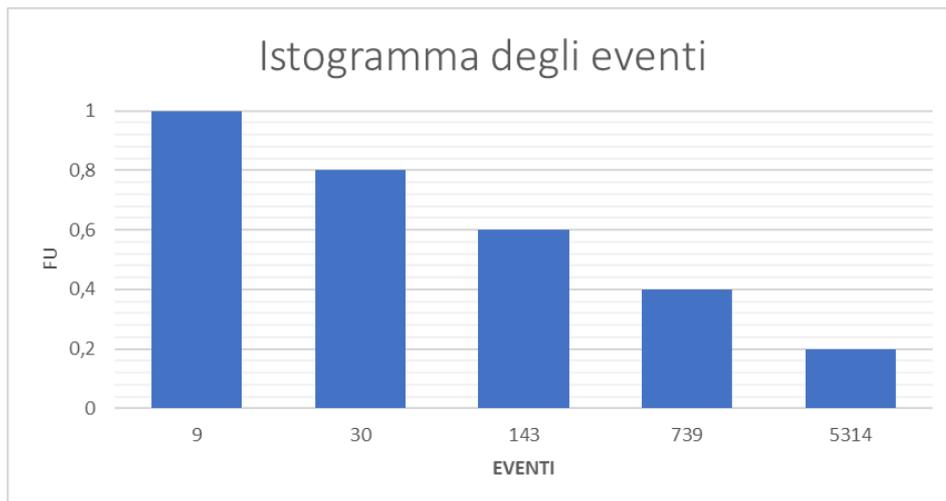


Fig. 45: Grafico degli eventi medio

7.5. Componente carico di punta

Successivamente si è effettuata un'analisi sulla telemetria e l'utilizzo della macchina poiché fondamentale per l'identificazione di guasti e rottura. L'attività principale di utilizzo della macchina è rappresentata da lavoro con la pala o con lo scavo, come mostra la figura 46.



Fig. 46: Attività principale del braccio in esame

Quindi, le analisi da effettuare per definire la causa del guasto sono:

- Sollevamento e carico a flessione del braccio (precedentemente effettuata)
- Carico di punta durante la fase di spinta nel lavoro di pala

Si vuole analizzare il comportamento del sistema rispetto gli effetti di instabilità dovuta al carico di punta. Per verificare che la struttura non raggiunga condizioni critiche di carico, si ricorre al modello simile a quello sviluppato nel “Articolo 2”. Si assume il semplice schema ‘single body’ caratterizzato da una trave incastrata in un’estremità e libera nell’altra e si analizza il fattore di utilizzo rispetto le condizioni critiche di carico di punta nello 100 OdL precedenti la sostituzione del braccio telescopico. Come nell’analisi a flessione, se il fattore di utilizzo ha valore prossimo dell’unità la struttura si può considerare in condizioni critiche e collassare alla minima perturbazione.

Il fattore di utilizzo è definito secondo il modello di Eulero come:

$$FU = \frac{P}{P_{cr}}$$

7.5.1. Analisi dei risultati

Dei risultati ottenuti tramite il codice Matlab si osserva che le considerazioni iniziali che prevedevano la causa del guasto del braccio telescopico dovuta alla fase di spinta nel lavoro di pala erano corrette. Infatti, in questa analisi, rispetto a quella sulle sollecitazioni flessionali, dall'istogramma degli eventi si osserva che le condizioni in cui il fattore di utilizzo assume valori critici, ovvero prossimo all'unità, si verifica un numero di eventi pari a 425. L'analisi è stata sviluppata sulle 100 OdL precedenti alla sostituzione del braccio, ovvero nell'intervallo 2397-2497 OdL, i dati disponibili in telemetria rilevano i valori circa ogni minuto e in totale, nell'intervallo di tempo di interesse, sono disponibili 6067 dati, che si considerano singole analisi statiche rappresentabili come eventi.

Quindi, le condizioni con indice di fattore di utilizzo pari all'unità si verificano un numero di volte, o di eventi, non trascurabile ed è possibile affermare che le sollecitazioni dovute all'effetto del carico di punta hanno causato il guasto del braccio e quindi la necessità di sostituzione di quest'ultimo.

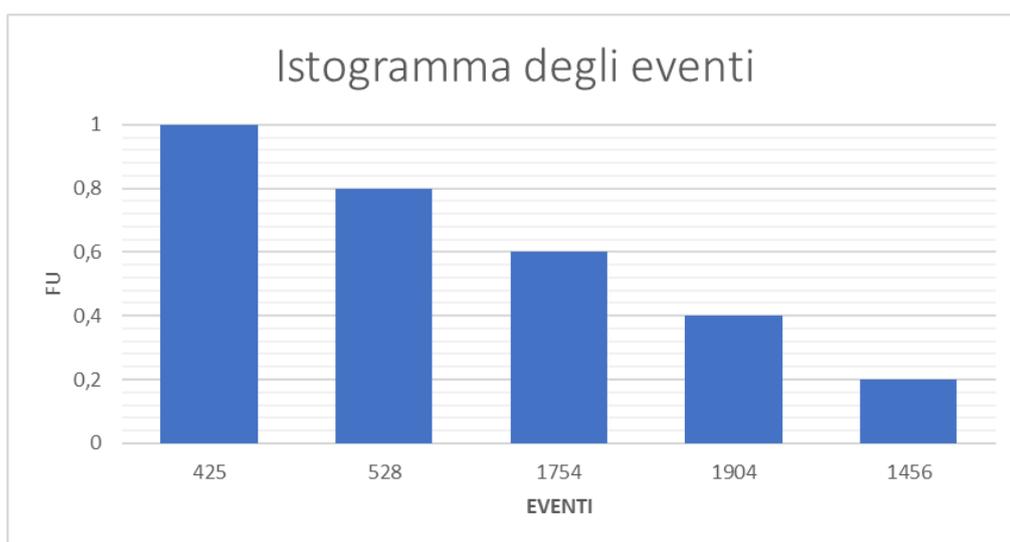


Fig. 47: Valore di FU nelle 100 OdL precedenti la sostituzione del braccio

7.6. Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è di sviluppare algoritmi di diagnostica predittiva da applicare ai sollevatori telescopici. Partendo dalla ricerca e analisi bibliografica di algoritmi di diagnostica predittiva si vuole sviluppare un modello simulativo attraverso un codice di calcolo, in questo caso Matlab, che consenta di risalire alle cause di danneggiamento di un braccio di un sollevatore telescopico che è stato sostituito intorno le 2497 OdL. In base alle condizioni di funzionamento del braccio telescopico in esame si sviluppando due differenti tipologie di analisi, una sulle sollecitazioni flessionali e l'altra sui carichi di punta. Per entrambe le analisi, una volta definite le ipotesi del modello e la geometria, si inseriscono i valori di input disponibili da telemetria e si verificano gli output con i risultati disponibili da modelli presenti in letteratura precedentemente validati. L'analisi dei risultati consente di definire che il basso numero di condizioni critiche dovute ai carichi flessionali è trascurabile rispetto il totale delle ore lavorative e quindi non può comportare il guasto del braccio.

Dall'analisi dei carichi di punta invece si riscontra un numero di eventi che presentano condizioni di utilizzo molto più significative in termini di sollecitazioni. Questi risultati possono ritenersi validi poiché tutti i modelli realizzati sono stati validati con altri presenti in letteratura.

Bibliografija

- [1] Xiaonan Lai, Xiwang He, Yong Pang, Fan Zhang, Dongcai Zhou, Wei Sun, Xueguan Song - A Scalable Digital Twin Framework Based on a Novel Adaptive Ensemble Surrogate Model (2022)
- [2] Justin Činkelj, Roman Kamnik, Peter Čepon, Matjaž Mihelj, Marko Munih - Closed-loop control of hydraulic telescopic handler (2010)
- [3] Ana Pavlovic, Cristiano Fragassa, Giangiacomo Minak - Buckling analysis of telescopic boom: theoretical and numerical verification of sliding pads (2018)
- [4] Vilas Randive, Prof. D.P.Kamble, Prof. Ashish Pawar - Finite Element Analysis of Inner Boom for 3Tonn Telescopic Forklift (2018)
- [5] S. P. Timoshenko. Theory of bending, torsion and buckling of thin-walled members of open cross section. Journal of the Franklin Institute, 239(5):343–361, 1945.
- [6] www.mathworks.com/content/dam/mathworks/ebook/predictive-maintenance-ebook-part1.pdf
- [7] www.movimatica.com
- [8] www.merlo.com