



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.A. 2020/2021

Sessione di Laurea dicembre 2021

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi analitico-sperimentale di soffietti per la trazione di autoveicoli e creazione algoritmo, in Python, per il calcolo della cinematica dell'unità flessibile.

Relatore

Prof. Mura Andrea

Candidato

Cazzola Livio

Sommario

Astratto.....	4
Introduzione	5
1. Storia dell'azienda	7
2. Condizioni operatività flessibile	8
2.1 Il motore automobilistico.....	8
2.2 I sistemi di trattamento dei fumi	14
2.2.1 I motori ad accensione comandata.....	14
2.2.1 I motori ad accensione per compressione.....	20
3. Progettazione e realizzazione prodotto	25
3.1 La struttura del flessibile	25
3.2 Il processo produttivo	28
4. Fase testing.....	30
4.1 Sistema di Acquisizione dati.....	31
4.2 Il circuito di test.....	36
4.3 Codici post-processing	38
4.3.1 La cinematica robotica	38
4.3.2 Il codice di Wang	48
4.3.3 Il codice di Mura.....	53
4.3.4 Il codice di FAI.....	59
4.3.5 Confronto codici.....	61
5. Conversione codice	68
5.1 Python	69
5.2 Coding.....	74
5.2.1 Tkinter	75
5.2.2 Pandas.....	78

5.2.3	Numpy.....	78
5.2.4	Os	79
5.2.5	Matplotlib/seaborn.....	79
5.2.6	PyInstaller.....	80
6.	Progettazione a fatica	89
7.	Fase miglorie future	99
	Bibliografia e riferimenti esterni	104
	Ringraziamenti.....	105

Astratto

Il disaccoppiatore è un elemento fondamentale per il funzionamento corretto di un motore automobilistico a combustione interna poiché collega fisicamente lo stesso alla tubazione di scarico dei fumi, mantenendo un disaccoppiamento dei movimenti relativi. La difficoltà di progettazione, relativa alle sollecitazioni meccaniche e termiche che il flessibile deve sopportare, deve essere supportata da un'adeguata attività di testing, fondamentale per scoprire e sopperire eventuali mancanze durante la progettazione.

Quest'aspetto richiede una particolare precisione durante l'installazione e calibrazione dei sensori, nonché un'accurata fase di post processing dei dati generati. In questa fase assume una particolare importanza la struttura dell'algoritmo risolutore, nonché le formulazioni teoriche su cui esso è basato. Queste possono provenire da nozioni alla base molto diverse ma che devono portare ad un'individuazione dell'obiettivo ricercato, pena un errore che può influenzare le performance del costruito.

Fondamentale avere così una corretta analisi della geometria sensoriale e dello script utilizzato, in una logica di autoapprendimento e automiglioramento aziendale continuo. Fase importante è la conversione del codice utilizzato, portato così in un ambiente opensource per una più libera revisione e comprensione.

Introduzione

La seguente trattazione scritta ha lo scopo di elencare tutte le attività necessarie per lo sviluppo corretto dell'attività di testing per mantenere alti standard di qualità nella produzione di disaccoppiatori per la trazione automobilistica. L'elemento in questione è interamente ideato, sviluppato e testato dall'azienda Flexider Automotive Italy Srl, partner con cui si è realizzato questo scritto. Quest'impresa all'avanguardia si occupa dell'intero ciclo di produzione e vendita dell'elemento flessibile, dall'acquisto della commessa dal cliente, alla consegna del prodotto finito finale. Importante fornitore di numerosi marchi automobilistici, l'azienda è riuscita nel corso degli anni a essere partner di brand come Ferrari, McLaren, Volkswagen e del neonato gruppo Stellantis. La fase di progettazione è lo step successivo e interessa la simulazione del prodotto utilizzando numerosi software di analisi ad elementi finiti, rimanendo negli standard di qualità imposti dal cliente.

Realizzato il progetto preliminare, l'elemento viene realizzato nel reparto produttivo che Flexider possiede in Polonia, per poi essere testato negli uffici torinesi, prima della consegna al cliente. Quest'ultima avrà un ruolo rilevante sia nell'attività aziendale, considerata dai quadri fondamentale per il controllo della catena produttiva e consegna di elementi di qualità ai clienti. Lo studio del comportamento ciclico ideale vedrà coinvolti numerose figure professionali, poiché prevede un lavoro certosino che vede collaborare numerosi lavoratori provenienti da ambiti diversi. Vi è un'installazione del sistema di sensori a bordo vettura, operazione non certo agevole a causa degli scarsi ingombri. La fase successiva vede la calibrazione del sistema e la successiva messa in strada dell'autoveicolo, operata da tecnici specializzati su tracciati a norma di legge, chiusi al traffico. Ultima, ma non meno importante, è lo step di post processamento dei dati in arrivo dal sistema sensoristico, operazione non semplice dato il sistema ideato da collaboratori esterni all'impresa.

Dopo una breve presentazione dell'azienda e del prodotto, si vuole evidenziare l'ultima fase elencata, soffermandosi ed analizzando tutte le procedure che rendono questa così complicata per questo elemento. Una parte rilevante di questa tesi di laurea la vuole avere la comparazione dei numerosi script utilizzati dalla società, analizzandone le teorie ingegneristiche che essi hanno alla base ed evidenziandone pregi/difetti applicativi al caso preso in esame. L'algoritmo ritenuto più adatto all'applicazione voluta vedrà la sua conversione da un ambiente Matlab ad uno

opensource come Python. L'ultima sezione di questo elaborato evidenzierà le modalità di analisi ad elementi finiti ed a fatica che caratterizzano la fase di progettazione del flessibile, prima della realizzazione dello stesso.

1. Storia dell'azienda



In questo paragrafo viene descritta in breve la storia dell'azienda in cui è stato svolto questo lavoro di tesi. Flexider Automotive Italy srl ha radici storiche nella storia del settore industriale italiano. Nel 1921, il visionario fondatore Rodolfo De Benedetti avviò la Compagni Italiana Tubi Metallici Flessibili. Nel 1972, l'azienda assunse l'attuale denominazione di FLEXIDER. Diventa parte del Gruppo Gilardini nel 1976 il Gruppo Gilardini viene ceduto al Gruppo Fiat, con la quale incomincia una sempre più stretta collaborazione come distributore ufficiale di prodotti per le automobili del gruppo.

Nel 1980 inizia ufficialmente la produzione di elementi flessibili per sistemi di scarico delle autovetture; il primo in assoluto fu ideato e realizzato per la Fiat Lancia integrale. Il grande successo dei prodotti ne fa crescere il fatturato e ne salda sempre più indissolubilmente il nome con quello dell'azienda piemontese di automobili. Seguiranno anni di forte sinergia, specie quella indirizzata all'espansione nei mercati esteri e in special modo per l'est Europa. È nel 1999 l'apertura di un immenso stabilimento Fiat in Polonia, nella quale la moderna

Flexider ne assume una parte importante all'interno dello stesso comprensorio. Negli anni successivi vi è una cessione di alcuni rami d'azienda dapprima ad una controllante americana IMCU (Industrial Manufacturing Company International) intenta a ristrutturare e dividere il business dell'azienda. È nel 2002 la decisione di scindere i percorsi di sviluppo dei rami Automotive, Aerospace ed Industrial.

Seguirono anni complicati, in cui l'azienda passò di mano molte volte, vantando alterne fortune e risultati altalenanti. Nel 2012 e 2014 venne ampliata la capacità produttiva con nuovi stabilimenti in Cina e Polonia, ma nel 2016 la situazione economica ne obbligò la cessione ad un gruppo di investimento cinese, con base ad Hong Kong. Qui vide la luce per la prima volta la Flexider Automotive Italy srl. Con Tenglong come azionista (gruppo cinese leader mondiale nella produzione di realizzati metallici), l'impresa ebbe nuova linfa, generando utili e tornando ad espandersi nei mercati internazionali, aprendo sedi in Germania, Polonia, Cina ed infine in Italia a Torino, sede del lavoro di tesi.

2. Condizioni operatività flessibile

In questo paragrafo vi sarà la presentazione del prodotto studiato in questo progetto di tesi magistrale di ingegneria meccanica. L'elemento meccanico protagonista di questo scritto è un disaccoppiatore meccanico installato lungo la tubazione di scarico delle autovetture con motore termico. Si tratta di un componente flessibile, che interconnette due estremità tra loro molto diverse del condotto, ovvero il blocco motore, soggetto alle caratteristiche vibrazioni e movimenti dovuti al moto, alla parte conclusiva dello stesso, posizionata al di sotto dello chassis dell'auto, fissata con appositi sostegni.

Ridurre le vibrazioni tra il blocco motore ed il resto del sistema è una prerogativa dell'elemento flessibile, che deve essere in grado di convogliare efficacemente anche i fumi proveniente dalla camera di combustione fin al silenziatore del sistema di scarico. Risulta importante avere una piena comprensione delle caratteristiche degli elementi per poter avere le conoscenze tecniche necessarie alla costruzione di un elemento così importante e altresì difficile da progettare.

2.1 Il motore automobilistico

Il motore termico ha portato una rivoluzione nella storia umana. Ideato nella seconda metà dell'800 da due lucchesi e migliorato e brevettato dall'ingegnere tedesco Nikolaus Augustus Otto, si tratta di un sistema di propulsione per veicoli che ha portato l'umanità in una nuova fase della storia: quella della mobilità. Il motore termico per applicazioni automobilistiche vedrà una sua sempre più grande applicazione ed utilizzo, grazie alle caratteristiche di robustezza, semplicità costruttiva e basso costo che lo contraddistinguono.

La struttura del sistema ha subito numerose migliorie nel corso dei decenni, dovute ai numerosi studi che susseguirono sulla dinamica dei veicoli e sull'impatto che questi hanno sull'ambiente circostante. Il motore automobilistico si distingue in base alla miscela di idrocarburi che esso brucia durante la locomozione del mezzo. Le caratteristiche degli stessi ne

identificheranno le caratteristiche costruttive. Le due principali tipologie riguardano l'innesco di queste catene di idrocarburi, ed in particolare:

- Accensione comandata;
- Accensione per compressione.

La prima categoria utilizza combustibili a bassa reattività (qui ci si riferisce alla probabilità che le reazioni avvengano una volta raggiunte le condizioni ottimali di pressione e temperatura in camera di combustione), dovute a molecole a corta catena. La compattezza delle molecole di idrocarburi non permette urti tra le molecole stesse (almeno in numero statisticamente rilevante) non permettendo l'inizio della combustione delle stesse. Esempi di combustibili di tale tipo sono il metano, l'etanolo, l'isooctano (benzine) e GPL (miscela di metano e butano). Per far dunque avvenire la combustione è necessario un innesco, un evento esterno capace di innescare il processo chimico.

Nelle autovetture con questa tipologia di motore, esso è identificabile in un arco elettrico dato dalla candela in camera di combustione. Alimentato e gestito dalla centralina, essa crea un arco elettrico tra i suoi elettrodi, permettendo di arrivare in fase di estrema compressione ad avere temperature locali di diecimila gradi Kelvin, che attiva il processo di combustione e lo fa propagare a tutta la camera.

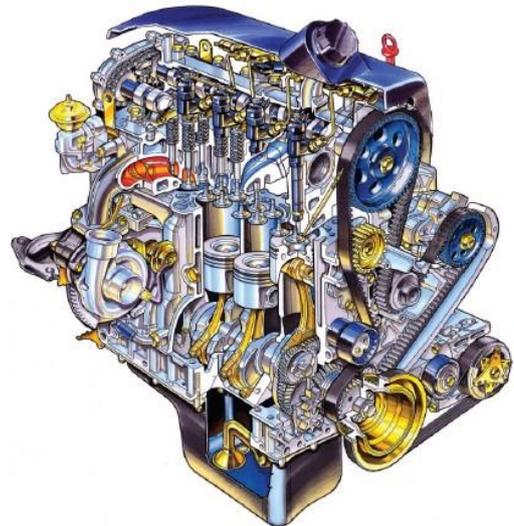


Figura 1: Rappresentazione motore automobilistico

Il secondo tipo di sistema presenta una combustione di molecole ad alta reattività relativa, a catena lunga e flessibile, che permettono la reazione di auto-ossidazione del combustibile. Per questa combustione, il combustibile viene immesso in camera nebulizzato al termine della compressione dell'aria nel cilindro. Le condizioni di temperatura (circa 900 gradi Kelvin) e pressione (circa 50 Bar) faranno sì che questo si auto-accenderà.

La struttura motoristica che dovrà creare questo evento risulterà essere chiaramente diversificata a seconda della tipologia appena descritta. Per realizzare la combustione del combustibile, è necessario inserire in camera anche il comburente, normalmente aria ambiente.

Per cui i progettisti costruiscono il sistema portando i due fluidi in camera di combustione come elencato successivamente. Il combustibile, inserito nel serbatoio della vettura è condotto in camera attraverso un sistema di pressurizzazione composto da pompe e iniettori.

L'aria comburente è prelevata dall'esterno e, dopo una serie di filtrazioni, è immessa in un condotto di aspirazione. Nei motori ad accensione programmata, la miscelazione di aria e benzina può essere effettuata sia nel port di aspirazione, a monte della valvola, sia internamente alla camera stessa, dopo attenta progettazione del sistema che gestisce il timing di aspirazione ed iniezione per evitare fughe di combustibile. La miscelazione tra i due elementi, il più possibile riconducibile ad una concentrazione stechiometrica tra i due elementi, è così immessa nella camera attraverso l'apertura della valvola di aspirazione, progettata per ridurre al minimo le problematiche legate a perdite fluidodinamiche.

La necessità di avere tempi di combustione molto ristretti costringe i progettisti ad avere un'entrata della miscela in camera di scoppio vorticoso, per propagare nel più breve tempo possibile la combustione a tutta la miscela ed

evitare sia perdite per mancata accensione, sia la produzione di scorie dannose per l'ambiente.

È così comprensibile come la progettazione del condotto di aspirazione e delle valvole risulta importante per l'intero sistema. Nei motori Diesel, la corrente fluida è immessa e compressa e l'aggiunta del combustibile avviene solamente nel momento di massima pressione della miscela, poiché dopo un breve ritardo (dovuto a nature chimiche e fisiche del combustibile) esso si auto ossiderà.

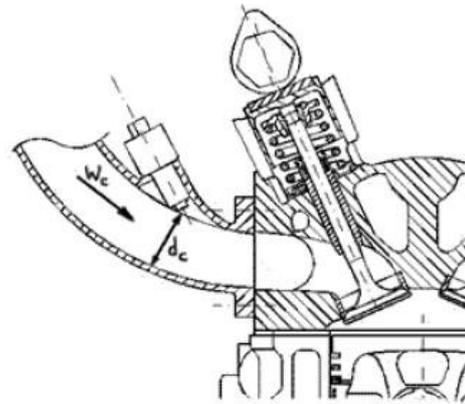


Figura 2: Condotto di aspirazione

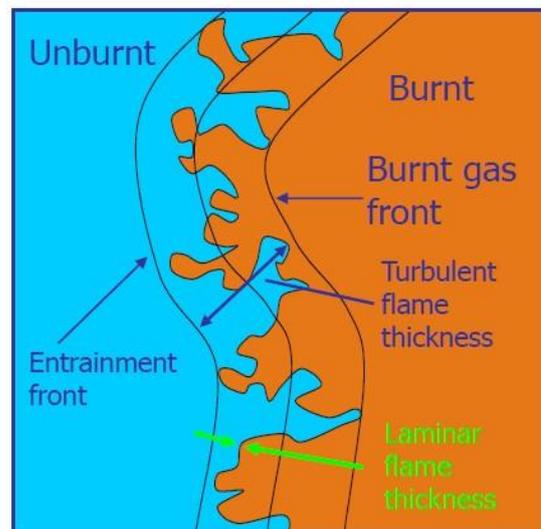


Figura 3: Struttura fronte di fiamma

La combustione è la parte fondamentale del funzionamento dei motori termici. Sfruttare l'energia chimica del combustibile è la missione richiesta ai tecnici che si occupano di costruzione motoristica. L'ossidazione della miscela non può essere isocora, poiché non riusciremo a creare un picco di pressione (dovuto alla completezza della combustione) nel momento in cui essa si genera. Questo si traduce in una differenza di coppia estraibile dal sistema meccanico, rispetto a quella ideale, non permettendo di sfruttare adeguatamente la sovrappressione.

Per avere una combustione più veloce e completa possibile, si creano dei moti turbolenti in camera, accresciuti durante la fase di compressione della carica. Questa vorticosità faciliterà gli scambi termici tra inner layer e un-burned gas, ed unita ad un

anticipo di accensione della miscela, permetterà di avere una erogazione di coppia ben più elevata. L'anticipo della spark ignition ottimale è circa di 20° di rotazione, del manovellismo, precedenti al punto morto superiore dello stantuffo, per avere poi oltre il 50% della massa bruciata (MFB) di circa 8/10° dopo il PMS.

Nei motori ad accensione per compressione il meccanismo è radicalmente diverso, poiché sfrutta le diverse proprietà del combustibile utilizzato. In questi engines, aspiro aria a temperatura ambiente, e dopo una compressione violenta (fino a circa 100 Bar) in cui incremento la vorticosità della corrente fluida, inietto a pressioni elevatissime il combustibile.

Esso entrerà in forma liquida in camera di combustione, cominciando ad interagire con l'aria circostante.

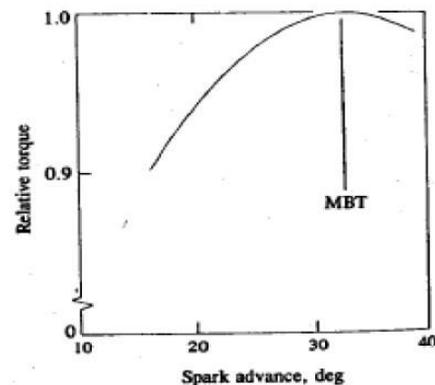


Figura 4: Effetti anticipo di accensione miscela

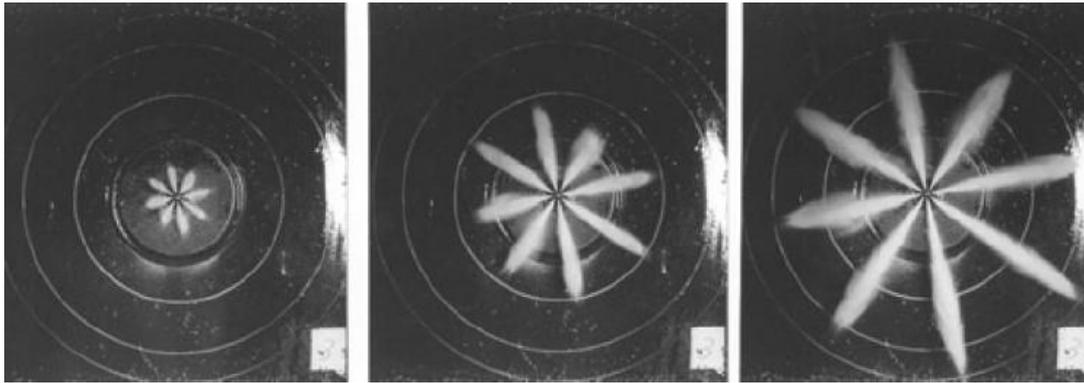


Figura 5: Iniezione carburante in un motore ad accensione per compressione

Essendo questa a temperature elevate (circa 950°K in seguito alla compressione) e fortemente vorticoso, avverrà un'interazione tra le diverse molecole portando a due fenomeni distinti:

- La diversa pressione dei due fluidi porterà la colonna di liquido infiammabile ad atomizzarsi in gocce sempre più piccole e a miscelarsi con l'aria circostante;
- La diversa temperatura genererà dei fenomeni di riscaldamento del combustibile di tipo conduttivo, fino a farlo evaporare.

Se venisse utilizzata una distribuzione assiale lungo il percorso del getto liquido dall'iniettore alla camera, osserveremo una prima fase di interazione liquido/gas, nel quale avvengono le reazioni descritte precedentemente. Completata questa fase, il combustibile evaporato, sotto l'effetto di questi scambi termici, vedrà l'inizio di una serie di reazioni di natura chimica, fino alla autoaccensione del combustibile evaporato, responsabile così dell'accensione dell'intero getto (anche liquido) in camera ormai raggiunte le condizioni di combustione.

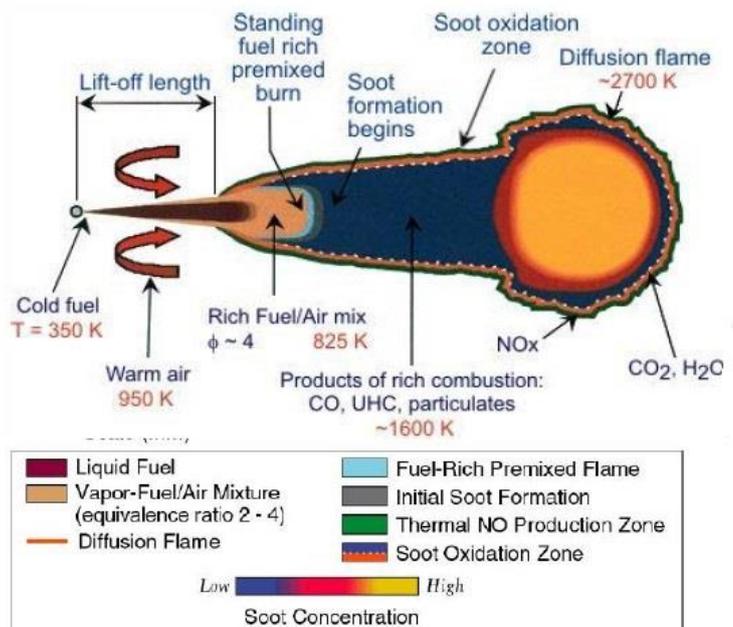


Figura 6: Struttura getto

Il ritardo di accensione appena descritto, detto ignition delay, racchiude queste due nature diverse del processo. Problematiche relative al picco di pressione sviluppato in camera hanno portato i tecnici a sviluppare iniezioni successive.

Infatti, la auto accensione dell'intera colonna di diesel iniettato, porta a un picco di pressione molto pronunciato; sebbene questo è traducibile ad una combustione quasi isocora, ottimo per il rendimento della compressione, esso può dare problematiche di tenuta ed usura dei materiali presenti nel motore, nonché ad una difficoltà nel trasferire una coppia costante alle ruote. Un impatto del picco di pressione è sicuramente anche sull'aumento della rumorosità del veicolo, ritenuta importante per motivi di comfort del pilota e dei passeggeri.

Durante la corsa di espansione avviene la conversione dell'energia da chimica a meccanica, tramite il movimento del pistone. In questa fase, possono avvenire dei processi che fanno perdere di efficacia all'intero motore, elencati successivamente. Durante la discesa dello stantuffo, circa il 10% della miscela non ha una totale ossidazione, a causa delle crevice, zone di tenuta tra stantuffo e camera. Parte della carica esplosa, si infila in questi volumi interstiziali non partecipando alla propagazione del fronte di fiamma. Solamente in una seconda parte del processo, in seguito ad un differenziale di pressione tra i fluidi, queste porzioni intrappolate verranno "rilasciate" dai segmenti raschia olio; l'ambiente in camera di combustione presenterà temperature e moti vorticosi molto inferiori rispetto alla fase iniziale, non consentendo una totale ossidazione del composto, fonte così di perdita di efficienza e creazione di molecole inquinanti. Un'altra problematica riguarda le perdite per scambi termici della fiamma con le pareti.

La differenza di temperatura tra fiamma e pareti genera un flusso termico intenso, che sottrarrà energia fondamentale all'ossidazione della carica rimanente in camera. Questo fenomeno è strettamente legato sia alla velocità di rotazione del motore sia al carico cui esso è soggetto. Un'ultima problematica riguardano le fughe di combustibile attraverso il gioco presente tra stantuffo e pareti della camera; parte del combustibile, inversamente proporzionale all'aumentare della velocità del motore, trafiggerà verso il carter, impedendo di sfruttare la sua energia chimica. La fase successiva riguarda lo scarico della carica esausta al termine dell'espansione del cilindro.

Qui vi sarà l'apertura della valvola preposta allo scarico dei gas combusti che sfrutterà la sovrappressione che la camera avrà con l'ambiente a valle per permettere lo scarico spontaneo e forzato dei prodotti della combustione. L'incrocio valvole, identificato in quel settore angolare in

cui le due valvole (scarico e aspirazione) compiono i movimenti inversi, segna la chiusura del ciclo di lavoro precedente ed inizio del successivo.

2.2 I sistemi di trattamento dei fumi

La combustione è il processo di ossidazione del combustibile in camera di combustione. L'intero processo comporta la creazione di anidride carbonica, vapore acqueo e dei sottoprodotti della reazione stessa, molecole inquinanti contenute nei gas combusti. Le tipologie, la quantità e percentuale con cui essi sono prodotti dipendono strettamente dal tipo di sostanza immessa nel motore, quindi ogni tipologia di carburante è responsabile dell'emissione in atmosfera di sostanze diverse. In questo paragrafo si descriveranno le sostanze formatesi in seguito alla combustione, in relazione alla tipologia di motore, e si analizzeranno le tecniche di rimozione delle stesse per poter conoscere esattamente le condizioni termiche e chimiche in cui è installato il disaccoppiatore meccanico.

2.2.1 I motori ad accensione comandata

Nei motori ad accensione comandata, durante la combustione avviene la formazione degli ossidi di azoto. Gli Nox trovano luogo grazie a tre meccanismi diversi che avvengono nei 60° di manovella nei quali la combustione ha luogo. Sono composti fortemente irritanti per le mucose umane ed animali, nonché è responsabile della formazione dello smog fotochimico e di pericolosi inquinanti secondari come ozono o acido nitrico (partecipa alla formazione delle piogge acide). Assicurata una adeguata presenza di radicali di ossigeno e alte temperature dovute alla fiamma, possiamo osservare che essi si formano per:

- Meccanismo termico: meccanismo di formazione degli ossidi di azoto, favorito dalle alte temperature in camera di combustione. Tramite delle relazioni tra l'azoto (presente nella carica fresca aspirata dall'ambiente, e l'ossigeno (presente sia nell'aria aspirata sia come radicali dovuti alla combustione) studiate da Zelcovitch si formano questi composti. Una parte di essi viene naturalmente decomposta in azoto ed ossigeno normali, sfruttando il fatto che il diminuire della temperatura subentra la reazione inversa.

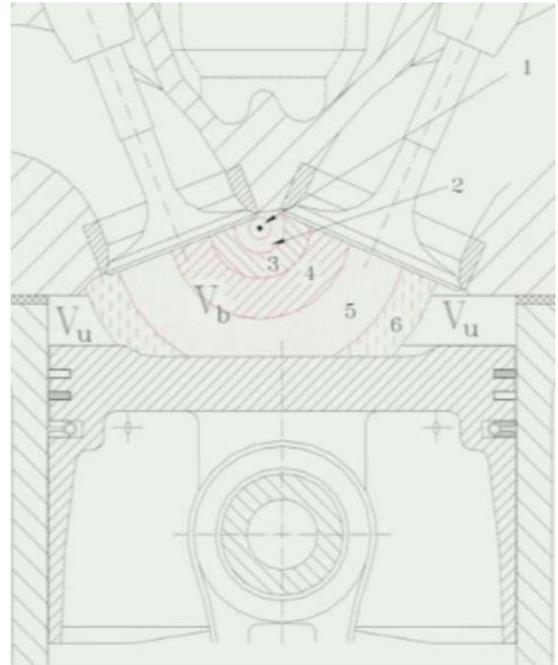


Figura 7: Suddivisione a zone della camera di combustione

Tuttavia, questo ha un impatto molto limitato, poiché il drop della stessa è talmente veloce che non permette alla reazione di dissociazione di completarsi. Il meccanismo termico è regolato dalla temperatura di attivazione della reazione di ossidazione dell'azoto, strettamente legata alla temperatura, ma anche in funzione della dosatura della miscela immessa e bruciata.

Un'ulteriore osservazione è necessario farla sulla dinamica della combustione stessa. Per studiarla è necessario avere un modello di cinematica chimica del composto e lo stato termodinamico della miscela. Zelcovitch studiò la propagazione del fronte di fiamma nel volume considerato ed osservò come l'onda di sovrappressione, dovuta al passaggio dell'inner layer e alla successiva ossidazione della miscela, si propagasse in tutta la camera avendo un impatto diretto sull'espansione delle zone interessate dal processo e relativa compressione delle altre zone (con innalzamento della T). Considerando questi due aspetti, riuscii a definire, attraverso delle equazioni differenziali, il modello di formazione di questi composti, in funzione del tempo, delle velocità di formazione degli Nox e di tutti i parametri che essi influenzano.

È stato così possibile modellare un calcolo della formazione di ossidi in funzione della rotazione del motore e della posizione della carica al momento della sua combustione

- Meccanismo prompt: meccanismo di formazione che prevede la reazione diretta del combustibile con l'azoto presente nella carica, formando composti idrogenati, i quali, in seguito a dissoluzione per effetto di interazione con altri composti e a loro post-ossidazione, formano Nox;
- Meccanismo fuel: meccanismo raro che si verifica solamente se l'azoto è contenuto direttamente nel combustibile.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2 \left\{ 1 - \left(\frac{[\text{NO}]}{[\text{NO}]_e} \right)^2 \right\} \left(\frac{R_1}{1 + \frac{[\text{NO}]}{[\text{NO}]_e} \frac{R_1}{R_2 + R_3}} + \frac{R_6}{1 + \frac{R_6}{R_4 + R_5}} \right)$$

EZM
N₂O

Un altro inquinante che si forma in motori a benzina è l'idrocarburo incombusto, molecola formatasi in seguito a parziale ossidazione della carica. Elementi che possiamo distinguere in metanici e non metanici, a seconda della loro composizione ma anche della loro reattività in atmosfera. Infatti, la loro reattività comporterà a reazioni con la luce solare, formando composti secondari inquinanti e potenzialmente cancerogeni se ingeriti in organismi viventi. I non metanici inoltre sono responsabili della formazione di ozono troposferico e partecipano all'effetto serra. La formazione di questi idrocarburi incombusti può avvenire per numerose cause:

- Intrappolamento interstiziale: durante la fase di compressione e combustione, una parte della carica non partecipa al processo, ed essendo rilasciata in un secondo momento subisce una parziale ossidazione. Questo poiché essa trova rifugio nei segmenti raschia olio, nelle giunzioni testa/cilindro, tra gli elettrodi della candela, ecc.;
- Intrappolamento in olio lubrificante: durante la compressione l'olio assorbe, grazie alla sua diversa pressione parziale, parte di combustibile. Questo processo è dovuto alla diversa pressione parziale in camera dei due elementi, regolata da precise leggi chimiche (costante di Henry) e temperatura e pressione durante il processo. Nella fase

di espansione il processo si inverte, rilasciando gli idrocarburi, che però non verranno totalmente ossidati;

- Intrappolamento in depositi carboniosi: parte della carica viene intrappolata per diffusione in depositi carboniosi presenti in alcuni interstizi della struttura;
- Trafilamento valvola di scarico: se il motore è particolarmente datato ed usurato, possono esserci delle mancate chiusure ermetiche effettuate dalla valvola di scarico, permettendo così a porzioni di carica di passare direttamente allo scarico e ossidarsi, non totalmente, grazie alle temperature elevate dei condotti;
- Spegnimento fronte di fiamma: la forte differenza di temperatura tra inner layer e pareti della camera genera un flusso termico verso queste ultime, facendo perdere rapidamente energia al processo di combustione. Se il flusso diventa troppo intenso, si osserva come la temperatura della fiamma decresce e, a lungo andare, non avrà più la possibilità di avere sufficiente energia per completare le semi reazioni di combustione, comportando uno spegnimento della fiamma stessa. Questo, avvenendo, crea sia una mancata ossidazione totale di composti in fase di combustione, sia ossidazione della carica ancora presente negli un-burned gas.

Un ulteriore evento che può verificarsi è quando il fronte di fiamma, a causa della turbolenza del flusso interno alla camera di combustione, possiede al suo interno sacche di un-burned gas. La combustione di queste porzioni, ed il flusso termico verso l'esterno, può portare ad una perdita di energia da parte del fronte di fiamma, che unita alla mancanza di ossigeno dovuta all'isolamento della zona, non permette l'ossidazione completa degli idrocarburi presenti.

L'ultimo inquinante principale di questa tipologia motoristica è il monossido di carbonio CO. L'ossidazione dell'idrocarburo, dopo la formazione di radicali intermedi, porta alla formazione di questo elemento; una parte di esso in camera può formarsi anche dalla dissociazione della anidride carbonica presente in seguito alle alte temperature (sufficientemente alte da superare la temperatura di attivazione della reazione).

Essendo dipendente dalla temperatura e dalla concentrazione di ossigeno, è possibile utilizzare nuovamente un modello termochimico di calcolo, anch'esso basato su equazioni

differenziali e divisione a “zone” della camera di combustione. Da non trascurare, specie nei motori ad iniezione diretta, è la formazione di SOOT, agglomerati carboniosi precursori del particolato, spiegati con precisione nella sezione relativa ai motori diesel.

La tipologia di gas combusti appena descritta è caratterizzata dalla presenza di questi tre composti nocivi, da eliminare attraverso l'utilizzo di un elemento posizionato a valle del blocco motore: il catalizzatore a tre vie. Questo dispositivo catalitico promuove post-ossidazioni di CO e HC e a promuovere la riduzione di Nox. L'efficienza di rimozione è costantemente mantenuta al di sopra dell'80%, mantenendo la dosatura del motore nell'intorno dello stechiometrico. Questo significa mantenere un rapporto tra moli di aria e di benzina immesse in camera circa 14 a 1, permettendo così di avere un equilibrio tra i fluidi e garantire la più alta efficienza di

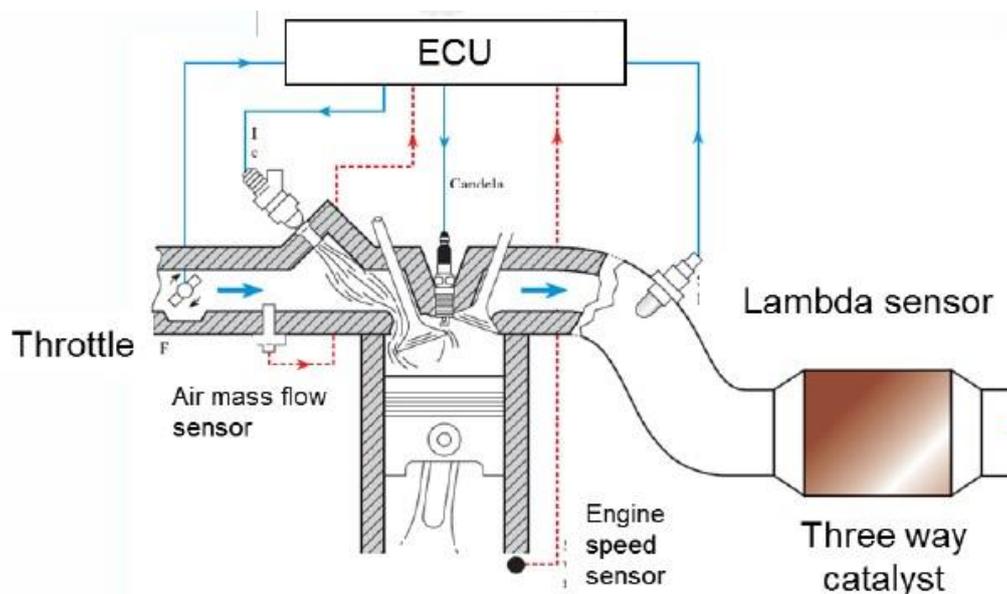


Figura 8:Struttura TWC

ossidazione della miscela. Questo è possibile attraverso l'utilizzo di particolari sonde, dette sonde lambda, posizionate nel condotto di scarico. Sono sensori che inviano un segnale, in tensione, alla centralina in funzione del livello di ossigeno presente nei gas di scarico così da poter intervenire attraverso l'iniezione di combustibile nel motore. L'importanza di questo elemento è fondamentale, poiché si osserva che a diversi livelli di ossigeno durante la combustione, avrà la diversa quantità di inquinanti formati.

Il catalizzatore è una struttura al cui interno sono presenti dei canali in cui i gas combusti transitano, canali progettati per ridurre comunque al minimo la differenza di pressione tra monte e valle dello stesso. Sulla superficie del supporto strutturato è presente una sostanza

porosa, gamma-allumina, utilizzata per aumentare la superficie di intrappolamento degli inquinanti. Su questa sostanza metto gli elementi catalizzanti. L'insieme di allumina (carrier) ed elementi reattivi è detto washcoat. Gli elementi ossidanti/riducenti sono dei metalli particolari, catalizzatori che in particolari condizioni di flusso e temperatura velocizzano le reazioni precedentemente dette. Questo poiché queste sostanze abbassano l'energia di attivazione di particolari tipi di reazione, permettendo che esse possano verificarsi anche in situazioni non possibili in ambiente.

Le reazioni che avvengono sono di tipo di adsorbimento e desorbimento: i reagenti (gli inquinanti) si depositano su questa matrice porosa, vicine al principio catalitico (i metalli utilizzati) ed essi, attraverso le forze di Van Der Waals, allentano i legami molecolari e permettono alle reazioni di avvenire.

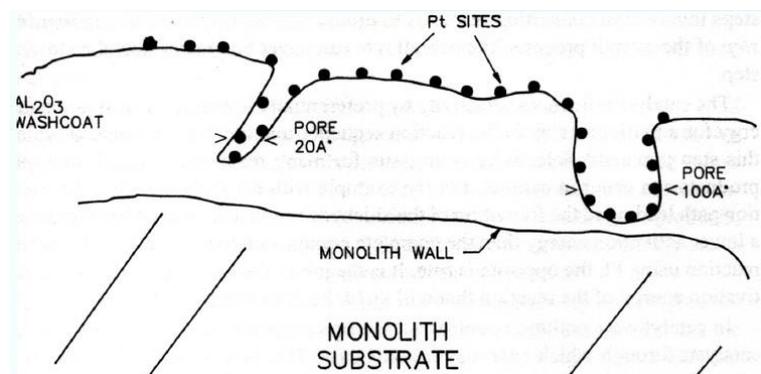


Figura 9: Dettaglio WC

I prodotti vengono successivamente desorbiti nella corrente fluida. Le sostanze utilizzate sono palladio, rodio e platino, dispersi nel wc. Questo sistema ha una finestra di operatività poiché:

- Essendo strettamente legate le reazioni alla cinetica chimica e alla costante di Arrhenius, sappiamo che più la temperatura nel flusso risulta elevata, più la velocità delle reazioni sarà alta- Questo permetterà di realizzare la conversione dei reagenti nel breve tempo in cui questi vengono adsorbiti e desorbiti. La temperatura minima per cui il catalizzatore ha un funzionamento minimo è di 150° (detta temperatura di light-off), temperatura minima al di sotto della quale il sistema non agisce. Questa condizione rappresenta la condizione di partenza a freddo del veicolo;
- Può avvenire una disattivazione termica, ovvero per alte temperature (500-600°C) i metalli presenti nel washcoat migrano, agglomerandosi gli uni vicino agli altri, lasciando così intere zone del sistema senza elementi per le reazioni. Mancando così le reazioni, anche la capacità di rimozione decrescerà repentinamente, permettendo

la liberazione degli inquinanti in atmosfera. Questa è una reazione irreversibile, rallentabile utilizzando particolari sostanze, per cui è da tenere sotto stretta osservazione. Sarà così presente una finestra di operatività del catalizzatore, da mantenere poiché così il catalizzatore ha un'efficacia minima garantita;

- Un ulteriore evento che può succedere è la disattivazione chimica del washcoat, dove elementi terzi (quali zolfo o fosforo) possono andare a posizionarsi sui siti reattivi, impedendo così che questi siano liberi di partecipare alle reazioni volute.

Per cui, in queste condizioni termiche e chimiche è costretto ad operare il disaccoppiatore meccanico nelle motorizzazioni ad accensione programmata. Una menzione a parte è da effettuare per quanto riguarda i motori benzina ad iniezione diretta, poiché questi portano alla formazione, anche se in maniera molto ridotta, di SOOT. Sono presenti delle trappole studiate ad-hoc, descritte in maniera ottimale nella parte seguente.

2.2.1 I motori ad accensione per compressione

Nei motori ad accensione per compressione, la diversa costruzione della fiamma all'interno dello stesso, comporta la creazione di diverse tipologie di inquinanti, ed in diverse quantità rispetto al caso precedente. Anche in questa tecnologia avremo la formazione di inquinanti come gli ossidi di azoto, formati nella regione in cui la fiamma è diffusiva (rapporto stechiometrico). In queste motorizzazioni è presente anche una più elevata concentrazione di NO₂, poiché avendo globalmente una combustione più magra rispetto al caso precedente, le temperature risultano più basse (e a più alta concentrazione di ossigeno) e la reazione di riduzione del biossido di azoto viene fermata più rapidamente.

I meccanismi di Zelcovich, prompt e fuel descritti in precedenza valgono anche in questa tipologia costruttiva. L'elemento di vera diversità rispetto al benzina risulta la formazione di particolato in grandi quantità. Esso è una porzione di materia formata da particelle solide carboniose, ceneri, idrocarburi incombusti, solfati, olio lubrificante ed altri prodotti della combustione, agglomerate nella loro struttura. I PM sono responsabili, se inalati, di problematiche al sistema cardio-vascolare, nonché a problemi relativi a quello respiratorio (tosse, asma, riduzione funzionalità polmonare) e nei casi estremi anche il cancro.

Queste particelle si formano durante la combustione del diesel: l'idrocarburo in camera si de-idrogena e successivamente si agglomera in seguito alla fiamma premiscelata. Successivamente, la fiamma diffusiva, operando in condizioni stechiometriche, ossida completamente la sostanza, ma qualora non fosse possibile, rimarrebbero delle particelle ossidate solo parzialmente, le quali cominciano a sovrapporsi le une sulle altre.

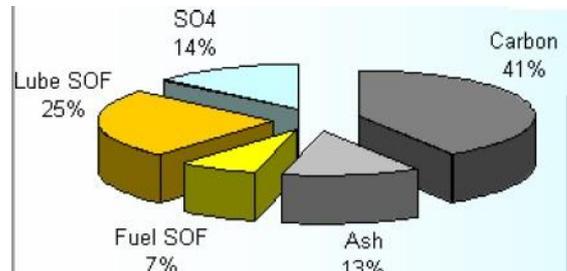


Figura 10: Grafico componenti SOOT

Nelle fasi di scarico, la loro graduale ossidazione prosegue, ma si accresce anche di volume, unendosi con altri scarti della reazione. Nello scarico, la temperatura si abbassa, interrompendo l'ossidazione e condensando particelle inquinanti fino a quel momento rimaste aeriformi, a causa della loro bassa pressione parziale, assorbite da queste sostanze nel solo percorso verso l'ambiente.

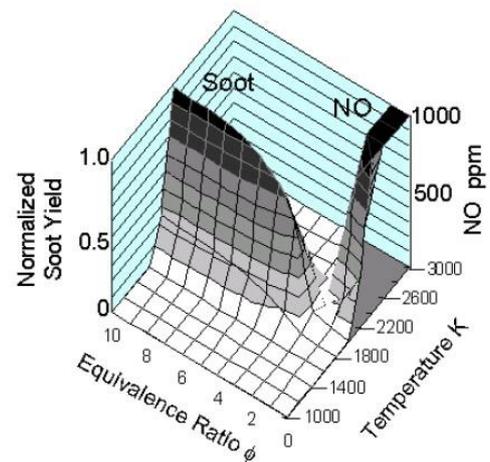


Figura 11: Diagramma Kamimoto-Bae

Nella formazione di questi inquinanti è importante osservare i diagrammi di Kamimoto-Bae, i quali descrivono in maniera semi empirica una mappa delle emissioni di motori ad accensione per compressione, in funzione della dosatura e della temperatura.

I SOOT, precursori del particolato, possono formarsi anche per la combustione a parete di sacche di carica, le quali, una volta esauritesi, non permettono l'ossidazione totale del combustibile.

Altri inquinanti prodotti sono gli idrocarburi incombusti, in seguito a una non completa ossidazione del diesel. Si formano qualora la miscela sia troppo ricca (ho mancanza di ossigeno per far avvenire la reazione) o al contrario se ho una miscela troppo povera di combustibile, che spegne anticipatamente la fiamma.

I sistemi utilizzati per ovviare a queste emissioni sono i seguenti. Il primo in ordine di montaggio a valle della valvola di scarico è il catalizzatore ossidante, sigla DOC.

Questo catalizzatore ha il compito di ossidare gli idrocarburi incombusti e il monossido di carbonio che si crea, nonché ossidare il monossido di azoto, trasformandolo in NO₂, utile per elementi di rimozione successive. Purtroppo, questo elemento promuoverà ossidazioni anche non

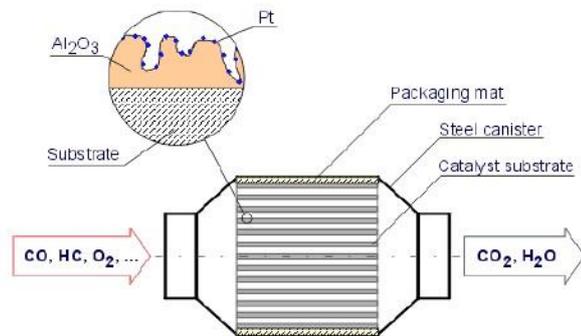


Figura 12: Diesel Oxidation Catalyst

desiderate, come la formazione di acido solforico (effetti corrosivi per le mucose e se ingerito può portare anche ad edemi ed asfissia). La sua struttura, simile a quella del catalizzatore a tre vie, può essere a base mono/bimetallica a seconda delle applicazioni e dall'efficienza che si vuole raggiungere. Normalmente si utilizza un sistema con platino (che abbassa la temperatura di light off per la rimozione degli HC) o palladio (che lo fa per il monossido di carbonio).

Un altro elemento molto importante nella catena di rimozione degli inquinanti è il filtro antiparticolato, o DPF. La cattura avviene con un procedimento diverso dai precedenti: il flusso attraversa delle pareti porose della struttura reticolare del filtro. Rimarranno così intrappolate le particelle più grosse, impedendo così, con il loro depositarsi, il passaggio anche di quelle piccole, che il materiale filtrante non riuscirebbe a bloccare. Si osserva che si creerà una differenza di pressione monte/valle data dalla struttura, dalla matrice porosa e dal SOOT depositato. Ma questo non ha un andamento lineare poiché la produzione del SOOT dipende dal regime di funzionamento del motore, per cui può avere sia un andamento sulla produzione che una consistenza molto variabile.

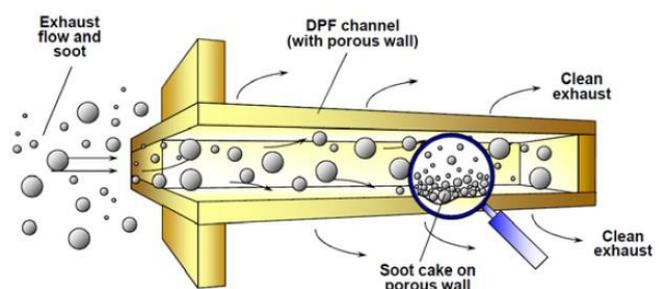


Figura 13: Diesel Particulate Filter

La rigenerazione di questa trappola avviene ossidando tutti i residui presenti, utilizzando sia l'ossigeno (presente in grandi quantità nei gas combusti) che le alte temperature. Queste ultime sono difficili da avere nello scarico di un motore ad accensione per compressione, per cui è necessario utilizzare delle strategie progettuali precise. L'ossidazione può essere continua, se il DPF è posizionato sufficientemente vicino allo scarico così da avere temperature ancora accettabili, oppure forzatamente, utilizzando delle post iniezioni in camera di combustione, che non ossideranno immediatamente ma lo faranno nel collettore di scarico, innalzando le temperature nel DPF. Chiaramente questa versione è più impattante e anche più esigente nei confronti del consumo di combustibile.

La rigenerazione deve tenere conto del delta di pressione tra monte e valle poiché causa un calo di performance, innalzando i consumi, i quali sono chiamati in causa qualora si facesse l'ossidazione e quindi una più frequente procedura alzerebbe i consumi stessi. Per cui è possibile tracciare un andamento relativo alla fuel penalty riferiti ai chilometri percorsi senza rigenerare; si osservano i due casi estremi: rigenerando molto spesso ho un assurdo consumo di combustibile per rigenerare continuamente del poco SOOT la trappola, ma se dovessi farlo dopo molto tempo, potrei andare incontro a temperature richieste così elevate da creare cracking termico nella struttura metallica.

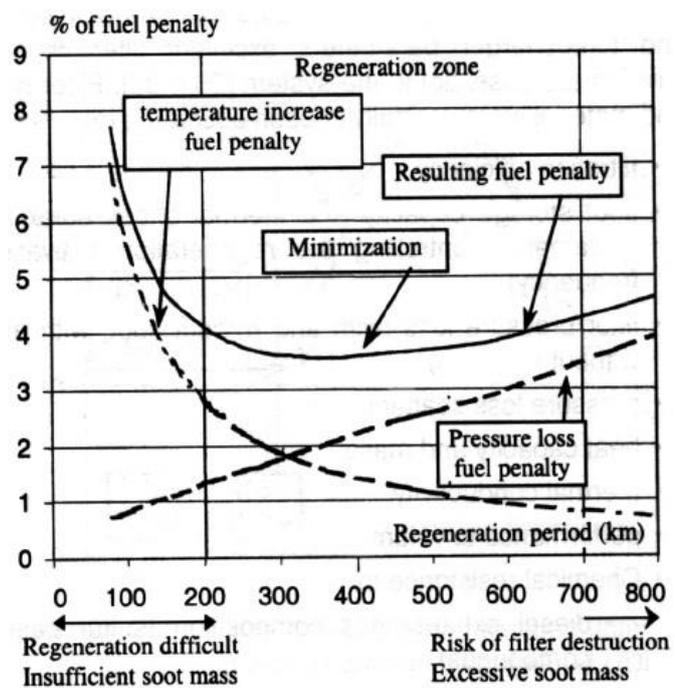


Figura 14: Fuel penalty durante rigenerazione DPF

Un ulteriore elemento di studio per la rimozione degli inquinanti è quello relativo agli ossidi di azoto. Questa potrà essere utilizzando due tipologie di elementi chimici, ovvero l'urea (negli SCR) oppure gli idrocarburi incombusti disciolti (nel DeNOx), entrambi però si trovano underfloor, poiché non richiedono temperature esageratamente elevate. Verranno così

tralasciate dalla trattazione, poiché lo scopo era capire le condizioni termiche e chimiche a cui sono sottoposti i disaccoppiatori meccanici.

Un ulteriore aspetto della nostra trattazione riguardano le sollecitazioni meccaniche che interessano tutti e due le tipologie costruttive di motore. Esso è posizionato all'interno dell'apposito vano, sostenuto attraverso dei supporti al telaio. Durante l'esercizio, il motore compie dei movimenti rispetto alla sua posizione di riposo, dovuta alla trasmissione del moto agli organi meccanici, ma anche dall'inerzia stessa della struttura, che può causare rotazioni e traslazioni anche significative. Si osserva come l'elemento flessibile debba collegare questo con lo scarico underfloor, rigidamente fissato allo chassis della vettura.

Il soffietto deve così sopperire a movimenti rigidi del motore, che si svolgono a bassa frequenza, dovuti a cambi marcia, inerzie (accelerazioni, frenate, curve nel moto) e variazioni di coppia. Ma deve anche resistere a vibrazioni a più alta frequenza, generate da organi rotanti interni allo stesso, come alberi a gomito, bielle, eccetera. In ultima analisi deve essere in grado di disaccoppiare gli elementi nel loro moto durante le sollecitazioni forzanti esercitate dal manto stradale.

3. Progettazione e realizzazione prodotto

In questo paragrafo verranno descritte le componenti che compongono il flessibile per applicazioni automobilistiche e le loro caratteristiche. Compreso il ruolo dell'elemento e le condizioni al contorno relative all'ambiente in cui lavora, è possibile avere una conoscenza profonda dello stato dell'arte. Il disaccoppiatore meccanico è composto da numerosi elementi ingegneristicamente studiati in funzione del motore termico di cui la vettura è dotata.

3.1 La struttura del flessibile

Ulteriori considerazioni in merito alla struttura, ed in particolare alla dimensione, vengono fatti per ragioni economiche, poiché un minor utilizzo di materiali è un elemento da non trascurare in ottica di ottimizzazione dei processi. Analizzando la configurazione più comune è possibile suddividerlo in:

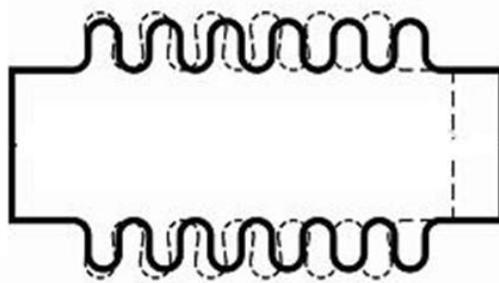
- Soffietto metallico idroformato
- Treccia metallica esterna
- Anelli di fissaggio
- Convogliatore esterno.



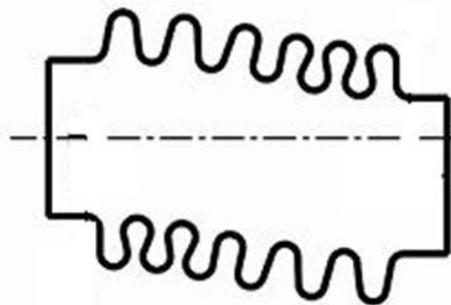
Figura 15: Metal bellows

Il tubo flessibile, definito in inglese come “metal bellow”, rappresenta l’elemento fondamentale e principale dell’intera struttura metallica, capace di disaccoppiare, come descritto precedentemente, i moti differenti del corpo motore e dello scarico. È costituito da un’anima metallica, ottenuta attraverso un processo di deformazione in acqua durante il suo raffreddamento, descritta con dettaglio in seguito nel capitolo. Come descritto, l’elemento è un collegatore tra due estremità in diverso moto, per cui le possibilità di movimento risulteranno essere le seguenti:

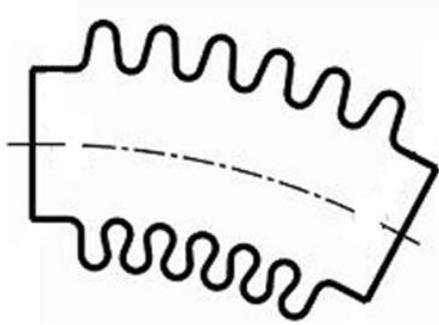
- Sollecitazioni assiali:



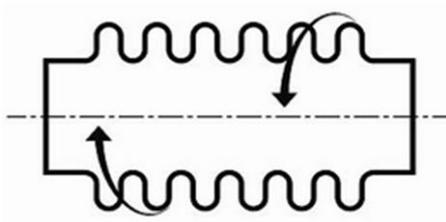
- Sollecitazioni laterali:



- Sollecitazioni rotazionali:



- Sollecitazioni torsionali:



Questo elemento è composto da numerose ondulazioni sulla superficie, composte e realizzate per una diversa distribuzione di tensioni agenti durante l'operatività del bellow, nonché utilizzando delle pre-onde sulla superficie, nella zona più vicina alle estremità. Questa soluzione è stata trovata nel corso del tempo ed è stata fondamentale per un'ulteriore rimodulazione delle tensioni, a tutto vantaggio del life cycle. L'elemento è possibile comporlo da numerose tipologie di Acciai inossidabili o leghe di Nichel, poiché la necessità di resistere sia meccanicamente che chimicamente all'azione dei composti presenti nei gas combustibili è una necessità.

Un ulteriore elemento della struttura è rappresentato dalla treccia metallica, elemento che dona alta rigidità all'intero disaccoppiatore, limitando la corsa durante sollecitazioni a trazione, e anche proteggendo lo strumento da eventuali colpi accidentali provenienti dal manto stradale. Il materiale utilizzato è del tipo AISI 304-321, di diametro variabile a seconda delle prestazioni richieste.

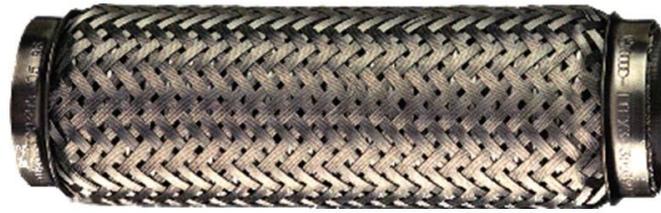


Figura 16:Struttura treccia esterna

Altro componente è costituito dal convogliatore interno, o “liner”. La sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche di lavoro dello strumento a compressione, limitando le escursioni a cui potrebbe essere sottoposto e limitando l’entità delle sollecitazioni a deformazione plastica capaci di creare cricche pericolose. Il convogliatore permette, inoltre, uno smaltimento dei fumi, fornendo una zona di passaggio agli stessi, proteggendo il resto della struttura dalle loro alte temperature.

L’aggraffato è prodotto da elementi di lamiera raccolti in elementi circolari, piegati successivamente per formare elementi di fissaggio tra i vari anelli. Anche qui il materiale utilizzato risulta essere un acciaio, per la precisione del tipo AISI 304-321.



Figura 18: Liner

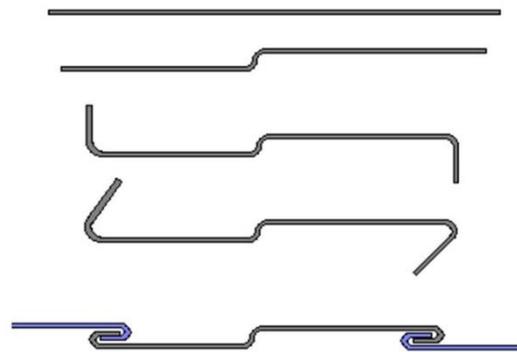


Figura 17:Graffettatura interna

3.2 Il processo produttivo

Il processo che comporta la formazione e realizzazione dell’elemento meccanico in questione è un processo costoso ed altamente automatizzato, in cui la tecnica e l’elevata innovazione aziendale hanno un posto rilevante. Si possono costruire geometrie molto complicate, con applicazioni in numerosi ambiti (dall’aerospazio ad elementi per carrozzeria), utilizzando

l'idroformatura. Partendo da un avvolgimento metallico di elevate dimensioni, esso viene srotolato, formando dei fogli di materiale, i quali vengono inseriti in una canalina di formatura, che curva progressivamente l'acciaio fino a dar la forma desiderata. Dopo la saldatura al tungsteno TIG delle estremità, (effettuata in atmosfere protettive con gas inerte, tra i quali l'Argon), vengono eliminate eventuali impurità dovute alla lavorazione appena effettuata.

Le tubazioni così ottenute vengono dimensionate della grandezza desiderata, con eventuale applicazione di un secondo layer qualora il reparto di ingegneria abbia richiesto questa procedura ulteriore di rafforzamento. L'ultimo passaggio è rappresentato dall'inserimento del soffiutto quasi realizzato, in una macchina idroformante, la quale con l'utilizzo di forme corrugate apposite ed acqua in pressione costruisce l'elemento in toto. Grazie al comportamento non lineare del materiale, vi sarà un addolcimento nelle forme della struttura formata, non seguendo strettamente il profilo dello stampo, per una redistribuzione di piani atomici nella struttura.

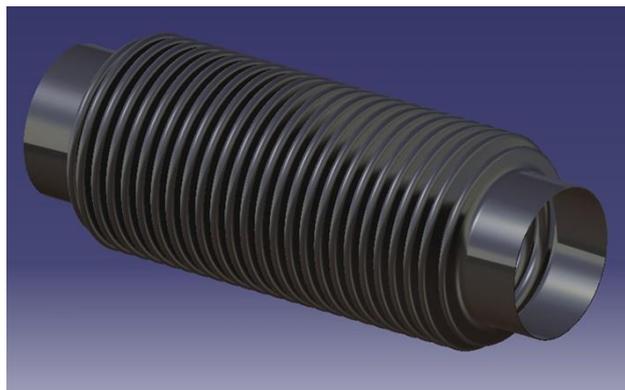


Figura 19: Sviluppo CAD 3D del disaccoppiatore

4. Fase testing

La scrittura dell'elaborato procede con la fase di testing, step fondamentale nel processo di rilascio del prodotto ai clienti. Le procedure operate precedentemente hanno dimostrato come è possibile progettare l'elemento, adattandolo alle richieste più disparate del cliente. Il reparto produttivo situato in Polonia realizzerà con precisione assoluta il disaccoppiatore, rendendolo idoneo al montaggio a bordo vettura, per tutta la durata della vita utile dell'automobile.

Il flessibile vedrà ritorno in sede torinese, dove grazie all'officina meccanica interna alla struttura, è possibile installare l'elemento sulla tubazione di scarico. Questa fase vede l'assemblaggio di due piastre solidali ad esso ed una configurazione di sensori a filo atti a monitorarne i movimenti relativi.

Come descritto ampiamente nel capitolo secondo, il disaccoppiatore è un elemento che rende possibile collegare due sistemi tra di loro in moto relativo, quali quello di scarico (tubazione e silenziatore, con accessori annessi), rigidamente fissato allo chassis, ed il blocco motore, in preda a roto/traslazioni dovute alla trasmissione del moto ai vari organi della vettura.



Figura 20: Esploso di un flessibile

Una volta posizionato il sistema, la vettura verrà trasportata su un circuito prova, tipicamente (essendo i clienti della Flexider clienti Stellantis) si tratta del complesso di Balocco, in provincia di Vercelli. Durante il percorso designato avverrà l'acquisizione dei dati, operata da un sistema ad hoc installato nel vano passeggero dell'autoveicolo. Conclusa la prova, l'intero sistema viene smontato e analizzato, per evitare che possano essere dei malfunzionamenti ad aver condizionato i risultati e scaricati i dati, pronti per il post processamento.

A questo punto verrà la parte più rilevante dell'intero capitolo: la presentazione degli algoritmi imputati a svolgere i calcoli di natura geometrica/robotica, derivanti dai sensori a filo durante la prova, impiegati fino a quel momento in Flexider Automotive Italy. Ne verranno analizzate teorie costitutive, pregi e difetti, vantaggi e svantaggi nell'utilizzo dell'uno o dell'altro in particolari geometrie e applicazioni su macchine CNC o su reali automobili. Lo scritto si concluderà con l'elezione del migliore, elemento fondante del successivo capitolo, ovvero la conversione in ambiente di programmazione Python.

4.1 Sistema di Acquisizione dati

In questo paragrafo verranno descritte le scelte progettuali che hanno portato alla realizzazione del sistema di acquisizione dati sotto vettura. Il problema principale, come può essere facilmente compreso, risulta creare un'infrastruttura in grado di misurare i movimenti compiuti dal flessibile meccanico, per poter effettuare calcoli relativi alla bontà della progettazione. Eventuali test possono essere utilizzati per verificare le prestazioni dell'elemento sotto esercizio, valutando quanto gli sforzi che esso debba sopportare siano importanti e comparabili a quelli ipotizzati nella fase di progettazione con tecnica FEM.

Un ulteriore risvolto positivo può essere controllare la bontà della realizzazione meccanica effettuata attraverso lo stabilimento produttivo polacco, posseduto dalla stessa azienda Italo-Tedesca, nonché compiere calcoli di fatica ciclica, conoscendo gli sforzi cui è sottoposto il pezzo, avendo noti gli spostamenti che esso esegue durante il lavoro sotto la vettura.

Come descritto nel secondo capitolo, il disaccoppiatore permette l'evacuazione dei fumi di combusto derivanti dalla combustione del motore termico; essendo stretto tra due elementi molto diversi tra loro, quali collettore di scarico e condotto, deve essere vincolato alle sue estremità nel compiere movimenti anche molto diversi tra loro. I diversi movimenti relativi delle estremità del flessibile creeranno tensioni all'interno del materiale usurandolo nel tempo di esercizio.

Per calcolare queste forze è stato necessario dotarsi di un sistema sensoristico di ultima generazione, che permettesse l'individuazione delle incognite di questo processo. Dopo una fase di studio, si è pensato di ricorrere ad una struttura di acquisizione dati che facesse riferimento

alle leggi della robotica avanzata, utilizzate per concepire elementi come la piattaforma di Stewart.

La piattaforma è un meccanismo robotico estremamente avanzato. Teorizzato negli ultimi anni del secolo scorso, rappresenta una svolta nel controllo di elementi robotici, svincolando le teorie classiche di manipolazione industriale e creando un elemento flessibile ed utilizzabile in numerosissimi campi. Esso è stato concepito come una piattaforma pesante su cui si regge il peso della struttura, importante per smorzare le vibrazioni che il movimento della piattaforma in condizioni di esercizio creerà.

Sulla piattaforma inferiore si ergono numerosi attuatori meccanici, il cui numero varia a seconda del progetto e della tipologia di esercizio cui essa è soggetta.

Gli attuatori meccanici, azionati ad aria o da un circuito oleodinamico (per le applicazioni più pesanti) sosterranno una piattaforma superiore semovente grazie all'ausilio degli attuatori precedentemente presentati. Sulla parte superiore è posizionato l'utilizzatore, o inserito direttamente l'elemento da controllare meccanicamente.

Sono molteplici gli utilizzi: poiché è possibile controllare il movimento nello spazio tridimensionale tramite attuatori meccanici, dato un sistema di controllo ed un algoritmo capace di movimentare la struttura, è possibile costruire simulatori di ogni tipo, nonché elemento di movimentazione meccanica.

La cinematica ne verrà discussa in seguito. La costruzione, di cui vediamo una rappresentazione di lato, può essere utilizzata nel caso della Flexider per controllare i movimenti della parte in movimento del flessibile, se coadiuvato con un sistema sensoristico adeguato ed un algoritmo di post processamento dei dati.

La logica vedrebbe la costruzione di un sistema in grado di catturare i movimenti del disaccoppiatore mediante sensori, costruendo un sistema simile alla piattaforma di Stewart

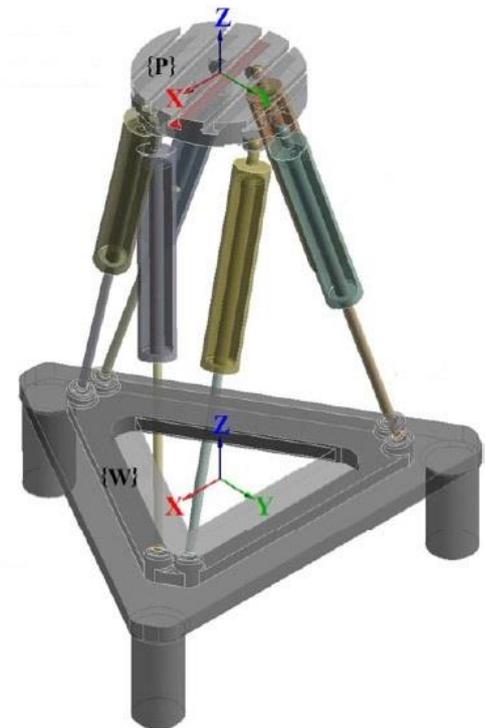


Figura 21:Stewart platform

per sfruttare le sue proprietà di relative alla cinematica. Per quanto riguardano le due piattaforme, il reparto di ingegneria e produzione dell'azienda ha creato due flange meccaniche, da installare agli estremi del flessibile sui quali verranno installati gli estensimetri a filo. Successivamente vi sarà una rappresentazione grafica della struttura finale.

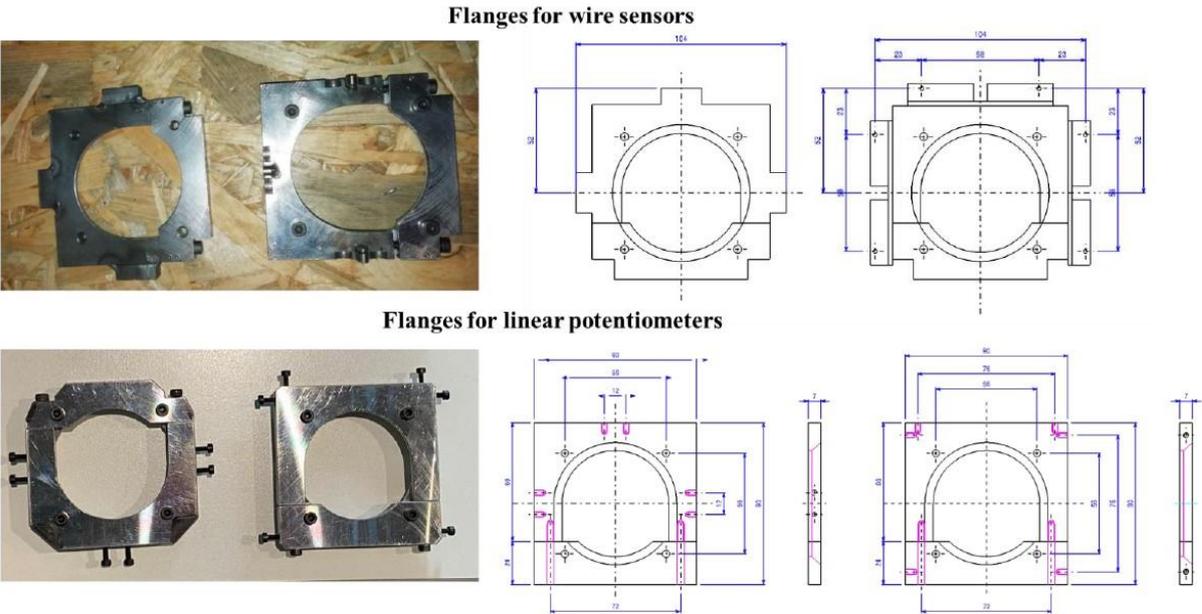


Figura 22: Schema costruttivo flange

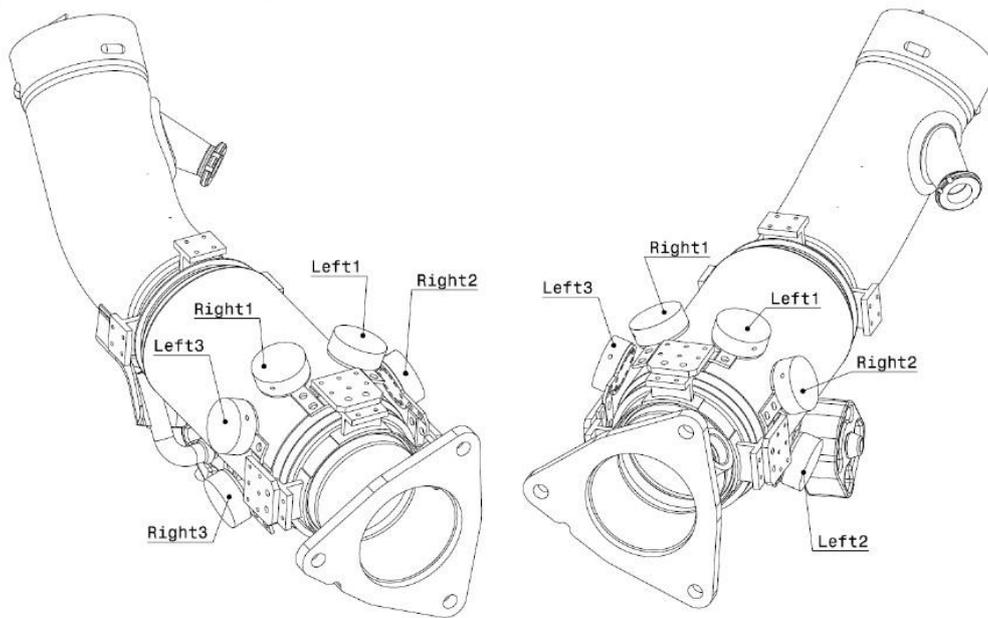


Figura 23: Schema installazione sensori Ferrari



Figura 24: Rappresentazione installazione sensori Ferrari

Costruite le flange che simuleranno le piattaforme superiore ed inferiore, l'analisi procede sui sensori utilizzati in questa applicazione. Le tipologie utilizzate sono tipicamente due, ovvero traduttori lineari o potenziometri a filo. La differenza è che per i primi vi sarà un movimento relativo di uno stelo che, fissato alle due estremità, convertirà il movimento in un segnale in

Volt, pronto per essere analizzato. Il secondo tipo è simile al precedente ma vede l'estensione di un filamento meccanico.

La grande differenza tra le due tipologie sono i campi di applicazione. Purtroppo per quelli a stelo, molto più precisi non è possibile superare gli 80 °C di temperatura di esercizio, pena la fusione di sue parti importanti e relativo malfunzionamento. Date le limitazioni, è impossibile ipotizzare un loro impiego sotto vettura durante i test in circuito, mentre è possibile utilizzarli a temperatura ambiente, per calibrare eventualmente banchi o testare gli algoritmi tramite movimenti su macchine a controllo numerico aziendali.

Diverso è il caso degli estensimetri a filo, i quali possono sopportare temperature operative ben superiori ai 500°C, perfetti per il ruolo che gli viene affidato. La reciproca orientazione e la geometria di installazione viene decisa dallo staff interno che prepara la vettura, a seconda della tipologia di veicolo, degli ingombri sotto la vettura stessa, dalla tipologia di test da affrontare sul tracciato di Balocco (descritto nel prossimo paragrafo) e dalla tipologia di algoritmo risolutore utilizzato. La normale disposizione di sensori risulta essere quella a 90° di reciproca orientazione, per sfruttare il più possibile l'elongazione dell'estensimetro, guadagnando in precisione dello strumento.

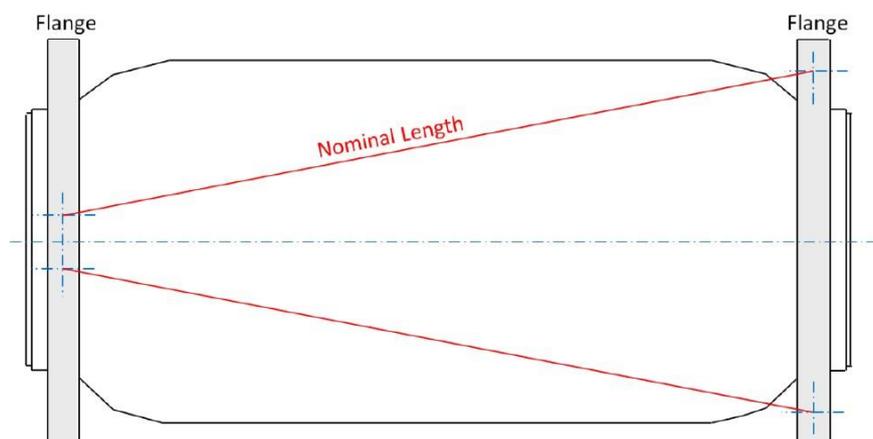


Fig. 13 Schematic showing how to obtain nominal length.

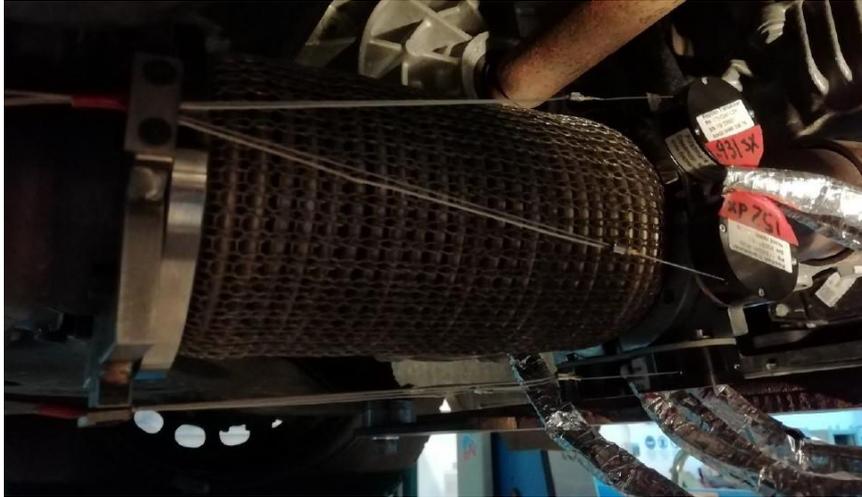


Figura 25: installazione sotto vettura

Le grandezze geometriche e le condizioni iniziali verranno conservate in un documento riassuntivo fondamentale per le formulazioni relative al post processamento dei dati. Un ulteriore accorgimento effettuato dai tecnici dell'azienda riguarda l'applicazione di una guaina protettiva per i sensori qualora si studiassero i movimenti su veicoli di alta potenza che sprigionano potenze, e temperature, importanti. Lo scudo protettivo eviterà che si superino le condizioni operative dei trasduttori, rendendo inutile l'acquisizione dei dati a causa di un loro malfunzionamento durante lo stesso.

4.2 Il circuito di test

In questo paragrafo si tratterà del tracciato utilizzato in molte prove su strada per testare il sistema descritto precedentemente. Installata e calibrata la strumentazione, la vettura è trasportata da addetti specifici nel luogo del test su strada, identificato nel circuito privato di Balocco. Tracciato situato nella provincia piemontese di Vercelli, presenta delle caratteristiche uniche, poiché racchiude diversi tipi di pavimentazione al suo interno, percorsi atipici e di simulazione di ogni condizione stradale e situazione ambientale. Di proprietà di Stellantis, ospita le simulazioni su strada di tutte le vetture del marchio.

La conduzione della vettura è operata da professionisti del settore, in grado di condurre il veicolo in ogni situazione di guida con la massima sicurezza e professionalità. La completezza del centro ne conferisce allo stesso un'importanza strategica nel processo produttivo dell'azienda Italo-Francese. Arrivata la vettura in circuito, avviene un veloce briefing con lo staff incaricato

della misurazione, poiché ogni vettura dovrà condurre un percorso progettato ad hoc, sulla base del quale verranno impostate le successive analisi di fatica degli elementi. Identificato il focus del test, si avvierà la strumentazione e verranno percorsi tutti i metri del singolo percorso, salvando ogni volta le informazioni nell'hard disc del personal computer.



Figura 27: Circuito di Balocco (VC)



Figura 26: Differenti manti stradali

I dati verranno successivamente post-processati dall'algoritmo risolutore ed inseriti in FeSafe per il calcolo della fatica. È importante tenere presente questo passaggio, poiché il singolo percorso verrà ripetuto una singola volta realmente, verrà analizzato il danno che esso provoca

alla struttura e questo verrà moltiplicato per il numero di volte a cui dipendeva il calcolo a fatica, dovendo sempre rispettare valori di danneggiamento minori di un certo valore ($<0,3$). Viene studiato così il processo di propagazione della cricca per sollecitazioni multiple che, non considerando la plasticizzazione ulteriore all'apice del difetto, mantiene volutamente una connotazione meno stretta.

Completata la giornata, che può comprendere simulazioni su più tipologie di percorsi, la vettura viene riportata nella sede torinese della Flexider, per lo smontaggio della strumentazione e per la successiva fase di controllo sensori. Purtroppo, la condizione di installazione, estrema a causa delle alte temperature a cui sono sottoposti, crea numerose problematiche sulla resistenza dei trasduttori, soggetti ad un'usura importante. Qualora la prova in esterna sia andata secondo programma, si passa alla fase successiva dell'analisi e post processamento dei dati, descritta nel prossimo paragrafo di questo capitolo.

4.3 Codici post-processing

Una volta completata l'uscita esterna nel tracciato vercellese, il team interno a Flexider provvederà a scaricare dal sistema di acquisizione dati i parametri fondamentali per il calcolo delle torsioni e traslazioni occorse al disaccoppiatore metallico. I dati verranno ordinati in una tabella Excel, ottenuti da diversi settaggi imposti dal software del sistema di acquisizione.

Il file verrà così importato nei computer dell'area ingegneria pronti per calcolare il danno occorso alla manichetta durante l'uso su quei determinati percorsi. Qui si esplicheranno le differenze tra i diversi codici in uso all'azienda, elencandone pregi e difetti nonché capacità di sopperire alle mancanze fisiche costruttive della struttura, eleggendone quello più adatto a questo scopo. La fase successiva riguarderà così la produzione di quello stesso algoritmo su un linguaggio di programmazione opensource, per il libero utilizzo in ambito aziendale.

4.3.1 La cinematica robotica

Molti codici trattati successivamente intendono utilizzare la struttura esapodale dei sensori a filo descritta precedentemente utilizzando teorie di cinematica robotica. Come descritto in

precedenza, la struttura composta da flange, sensori e flessibile può essere ricondotta ad un robot a sei gradi di libertà e più precisamente ad una piattaforma di Stewart; essa è uno strumento di incredibile utilizzo in numerosissimi e diversissimi ambiti, dalla simulazione, all'intrattenimento. La struttura in studio è composta da:

- Una piattaforma inferiore, posizionata sul terreno e dotata di una notevole massa. La struttura ampia e pesante permette alla creazione di Stewart di poter reagire a variazioni molto piccole di grandezza dei suoi attuatori, nonché sopportare carichi elevati con la piattaforma superiore;
- Piattaforma superiore: come descritto nel paragrafo precedente, questa è la parte semovente della struttura, che opera rotazioni intorno al proprio asse grazie a cerniere posizionate nei sei punti cardini alle sue estremità e gli attuatori meccanici;
- Gli attuatori meccanici, che permettono un corretto movimento di roto/traslazione tra le due, poiché hanno la possibilità di estendersi e contrarsi se movimentati esternamente.

L'intero sistema è controllato da un computer, che controlla lo stato degli attuatori, ne può variare la dimensione specifica per eseguire i movimenti desiderati. Un sistema di controllo è inoltre importante per evitare derive che possano compromettere l'integrità sia della struttura, sia della massa posizionata sulla piattaforma superiore.

Questi sistemi informatizzati possono utilizzare diverse logiche di controllo, per il movimento dell'intera struttura. Algoritmi che possono spaziare da logiche robotiche a geometriche, conservando validità e precisione durante l'utilizzo. La

logica che va approfondita inizialmente è quella che è alla base della cinematica robotica. Un robot è per definizione un automa, operatore meccanico automatico controllato da un cervello elettronico, con particolare riferimento agli apparecchi programmabili usati in alcuni settori dell'industria e della ricerca scientifica per operazioni seriali e in automatico. Queste operazioni



Figura 28:Modello CAD 3D robot articolato

successive sono molto utilizzate in ambito industriale, dove i robot hanno sostituito/affiancato operatori umani nei lavori più complessi, usuranti e ripetitivi.

Esse sono strutture flessibili, con una precisione assoluta non così elevata, a causa della loro struttura mobile e soggetta così a rigidzze non così elevate, suggerite per tutte le lavorazioni meccaniche. Esso è un elemento manipolatore, riprogrammabile per adattarlo meglio a tutte le possibili e disparate applicazioni. Il robot riprende la struttura fisica umana, per un lato sociologico di maggior capacità di accettazione e empatia da parte degli altri utenti; esso possiede sei gradi di libertà nello spazio e sono:

- Le coordinate x, y e z, imputabili di traslazioni nello spazio (3 g.d.l.);
- Altri 3 g.d.l. nel polso, che comportano rotazione nei 3 assi nello spazio

Per raggiungere completamente tutti i punti dello spazio, mi devo servire di una struttura complessa, che dia stabilità e mobilità all'attrezzo, e precisamente è così descritta:

- Basamento: elemento più massivo e a contatto con il suolo. Fornisce stabilità all'intera struttura, specie per il complicato transitorio del movimento, dove possono innestarsi vibrazioni dannose per il processo che esso sta conducendo;
- Spalla: prima articolazione;
- Corpo
- Braccio
- Polso: fine utile della struttura; è il luogo dove viene installato uno strumento utensile utilizzato durante le operazioni di lavoro. Questo può essere definito come mano, se si tratta di un organo di presa, e se presenta organi mobili, esse sono definite come dita.

A seconda della struttura intrinseca dei semoventi, della diversa installazione dei particolari appena elencati e del ruolo e carico di lavoro che deve sopportare, vi sono numerose suddivisioni in categorie. La struttura ne identifica le caratteristiche meccaniche, in particolar modo quelle relative a precisione e velocità del movimento, in opposta correlazione tra di loro. Può essere operato un breve elenco di diverse tipologie di robot, elencati dal più stabile e indicato per i lavori pesanti, al più versatile, ovvero:

- Robot cartesiani;
- Robot cilindrici;

- Robot sferici;
- Robot antropomorfo;
- SCARA.

Gli ultimi tre gradi di libertà sono identificati con il movimento del polso, ottenuti a seconda che gli assi del polso siano tra loro sfasati o paralleli (diverse particolarità costruttive). La mano, end effector dell'elemento, è una struttura che può essere di presa o incastrare un utensile di esercizio, ma non comprende utensili riconducibili a frese, poiché le vibrazioni che subirebbe la struttura andrebbero a impattare sulla precisione dell'operazione. Per l'azionamento bisogna essere provvisti di PLC, programmatore logico controllabile, con il quale inserire i movimenti da eseguire; diventa così fondamentale conoscere la sua cinematica.

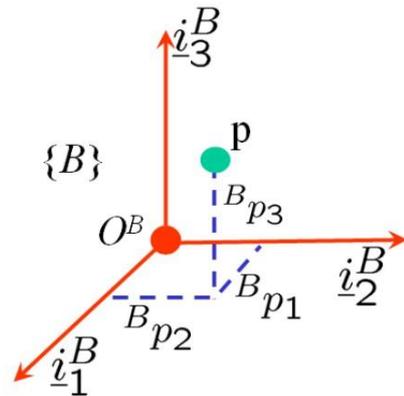
Esistono due tipologie di calcolo, il primo dei quali è chiamato "metodo diretto": in questo caso l'utente conoscerà lo spostamento del robot, avendo dati sui suoi spostamenti e con un elaboratore andrà a calcolarsi la posizione che l'utensile dello stesso avrà raggiunto. Il secondo è definito come "metodo indiretto" ed è replicabile come il contrario. L'utente avrà noti il punto finale dell'utensile e dovrà calcolarsi il diverso valore di elongazione degli attuatori che hanno portato la struttura a posizionarsi in quella porzione di spazio. In questo caso, l'intero sistema sensoristico farà riferimento alla struttura di Stewart descritta in precedenza.

Per comprendere appieno la difficoltà di descrivere la cinematica di ogni struttura, è necessario fare un leggero ripasso della teoria che ne è alla base. Consideriamo uno spazio vettoriale in \mathbb{R}^3 , nel quale siano presenti due vettori, \underline{v} e \underline{w} , appartenenti a quello spazio vettoriale e nel quale possano essere definite somma e prodotto con le seguenti caratteristiche:

$$\begin{aligned}
 \underline{v} + \underline{w} &\in \mathbb{R}^3, & \underline{v}, \underline{w} &\in \mathbb{R}^3 \\
 \alpha \underline{v} &\in \mathbb{R}^3, & \alpha &\in \mathbb{R} \\
 \alpha(\underline{v} + \underline{w}) &= \alpha \underline{v} + \alpha \underline{w}, \\
 (\alpha + \beta)\underline{v} &= \alpha \underline{v} + \beta \underline{v}, & \beta &\in \mathbb{R}
 \end{aligned}$$

Vengono inoltre fissate altre operazioni fondamentali come il prodotto scalare, per uno scalare e vettoriale tra i due, con direzione di quest'ultimo perpendicolare alla direzione di \underline{v} e \underline{w} , determinato dalla regola della mano destra. Un altro elemento teorico che ci servirà nella nostra trattazione riguarda un sistema di riferimento cartesiano, di origine O e dai versori dei

suoi assi coordinati come $\underline{i}_1, \underline{i}_2, \underline{i}_3$. Data una terna $\{B\}$ è così opportuno utilizzare la denominazione corretta, più semplicemente con $(O, x, y, z)^B$. A questo punto è importante capire come i vettori stessi possano essere rappresentabili da una terna di numeri reali, dipendenti dalla terna cartesiana appena descritta. Ogni elemento della terna del vettore, sarà dipendente da un asse della terna B, come nell' esempio seguente:

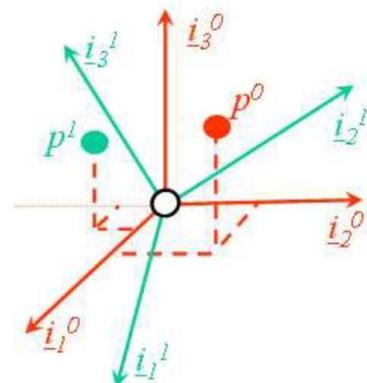


$$\underline{v}^B = (\underline{v}_1, \underline{v}_2, \underline{v}_3)^T$$

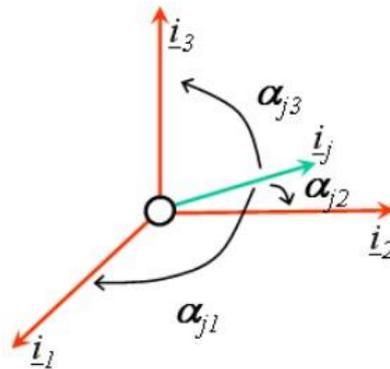
E anche in questo caso rimarranno valide le ipotesi prese in precedenza, su prodotto per uno scalare, prodotto scalare e prodotto vettoriale tra diversi tipi di vettori appartenenti a quella terna di riferimento B. Risulta così facile riferire qualsiasi luogo dello spazio tridimensionale a quell'origine degli assi. L'ultimo concetto che deve essere studiato rappresenta il movimento che quel sistema può effettuare, che sia intorno ad uno dei suoi assi, sotto forma di Rotazione, sia di traslazione rigida dello stesso sistema.

Analizzando la prima, si tratta di una rotazione rigida intorno al centro O. Avremo così una diversità di posizione rispetto all'istante iniziale, occorsa proprio per questa rotazione ipotetica ed arbitraria. Ipotizzando un punto solidale con la terna, è possibile definirne la posizione reciproca rispetto al centro sia che si tratti di posizione al tempo iniziale p_0 che a rotazione ultimata p_1 .

$$\begin{cases} p^0 = p_1 \underline{i}_1^0 + p_2 \underline{i}_2^0 + p_3 \underline{i}_3^0 \\ p^1 = p_1 \underline{i}_1^1 + p_2 \underline{i}_2^1 + p_3 \underline{i}_3^1 \end{cases}$$



Dove le coordinate dei rispettivi sistemi di riferimento sono elencati successivamente, identificando facilmente la correlazione tra i vettori e la rotazione in atto (dai rispettivi coseni direttori).



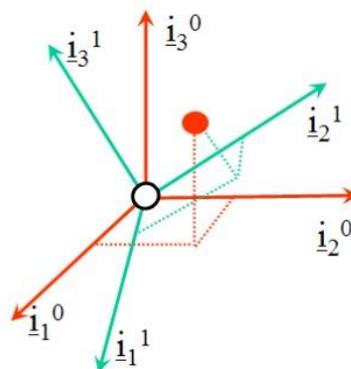
$${}^0\underline{i}_1^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} \\ \cos \alpha_{12} \\ \cos \alpha_{13} \end{bmatrix}, \quad {}^0\underline{i}_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{21} \\ \cos \alpha_{22} \\ \cos \alpha_{23} \end{bmatrix}, \quad {}^0\underline{i}_3^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{31} \\ \cos \alpha_{32} \\ \cos \alpha_{33} \end{bmatrix}.$$

Risulta così elementare riscrivere il punto in configurazione finale p_1 in coordinate $\{0\}$, come:

$${}^0p^1 = p_1 {}^0\underline{i}_1^1 + p_2 {}^0\underline{i}_2^1 + p_3 {}^0\underline{i}_3^1 = \left[{}^0\underline{i}_1^1 \mid {}^0\underline{i}_2^1 \mid {}^0\underline{i}_3^1 \right] \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = {}^0R^{(1 \leftarrow 0)} {}^0p^0.$$

E così definire la matrice di rotazione tra le configurazioni $\{0\}$ ed $\{1\}$, che ne definisce un cambiamento relativo di coordinate. Ogni matrice è costituita da nove parametri, 3x3, non indipendenti tra di loro.

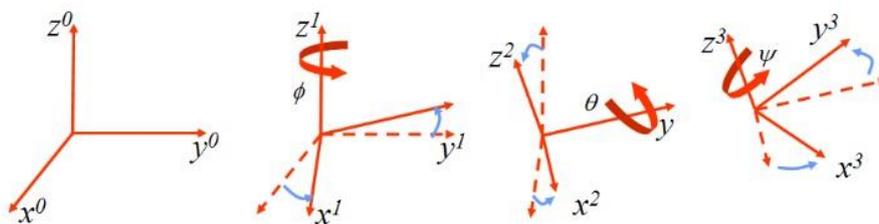
$$\begin{aligned} {}^0p &= \begin{bmatrix} {}^0\underline{i}_1^T ({}^1\underline{i}_1^1 p_1 + {}^1\underline{i}_2^1 p_2 + {}^1\underline{i}_3^1 p_3) \\ {}^0\underline{i}_2^T ({}^1\underline{i}_1^1 p_1 + {}^1\underline{i}_2^1 p_2 + {}^1\underline{i}_3^1 p_3) \\ {}^0\underline{i}_3^T ({}^1\underline{i}_1^1 p_1 + {}^1\underline{i}_2^1 p_2 + {}^1\underline{i}_3^1 p_3) \end{bmatrix} \\ &= {}^0R_1 {}^1p = \begin{bmatrix} {}^0\underline{i}_1^1 & {}^0\underline{i}_2^1 & {}^0\underline{i}_3^1 \end{bmatrix} {}^1p \end{aligned}$$



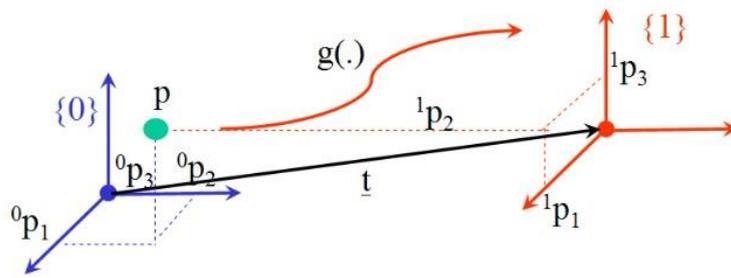
È così possibile definire delle rotazioni elementari, ognuna delle quali vedrà la composizione della propria matrice di rotazione R ; queste si ottengono imponendo una variazione arbitraria di un angolo ϕ . Si può arrivare così a definire una composizione di rotazioni, considerando più rotazioni elementari eseguite in modo successivo. Risulta importante non solo riferire la rotazione successiva rispetto alla terna corrente (rispetto a quella iniziale) e successivamente snellire la trattazione algebrica, utilizzando per descrivere la suddetta matrice gli angoli di Eulero.

Si otterrà così una trattazione in cui posso riferire ogni movimento del sistema rispetto alla posizione che esso aveva prima del movimento stesso, utilizzando il metodo della post moltiplicazione per unire le n rotazioni occorse alla terna. Si è studiato come è possibile raggiungere ogni punto dello spazio intorno al sistema di riferimento, utilizzando solamente tre rotazioni successive, a patto che non siano sequenti due operazioni lungo lo stesso asse. Non è possibile utilizzare una sequenza X-Y-Y, mentre è permesso utilizzarne una come la Y-X-Z.

Designata la sequenza di rotazioni da far eseguire al nostro sistema di riferimento, verrà costruita una matrice di rotazione relativa alle rotazioni stesse esercitate su uno degli assi, mantenendolo fisso, ottenendo una struttura 3X3 funzione dei seni e coseni degli angoli di rotazione.



Penultimo elemento di questa trattazione riguarda la traslazione rigida dell'intero sistema di riferimento, operata se applicata una trasformazione del tipo $g(p) = p + \underline{m}$, tale per la quale il generico punto relativo al nostro sistema risulta variato della quantità $p_1 = p_0 + \underline{m}$. La trasformazione di coordinate avverrà simultaneamente su tutti i punti appartenenti a quello spazio, soggetto così ad un trasporto rigido.



Le equazioni algebriche ci permettono di eseguire concatenazioni tra le due logiche di spostamento, permettendo di creare delle rappresentazioni di rotazioni e traslazioni successive, per conoscere ogni possibile movimento che la terna è in grado di effettuare nello spazio. Il risultato è ottenibile attraverso un cambiamento di coordinate del sistema, come somma di rotazioni e traslazioni di due stadi successivi, come $p_0 = R_{10} * p_1 + d_{01}$. Utilizzando la notazione matriciale, è possibile definire una matrice di rototraslazione, 4x4 ottenuta con una di rotazione, un vettore di posizione dovuta allo spostamento rigido da ottemperare ed un vettore riga da tre zeri, nonché un numero, in questo caso l'1, che indica che la trattazione si riferisce ad un vettore posizione.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \tau_x \\ 0 & 1 & 0 & \tau_y \\ 0 & 0 & 1 & \tau_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = T \cdot R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & \tau_x \\ n_y & o_y & a_y & \tau_y \\ n_z & o_z & a_z & \tau_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H^T \neq H^{-1}$$

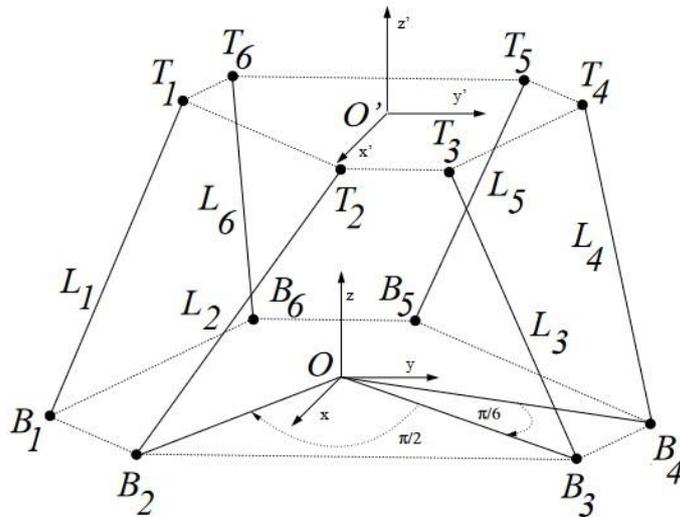
A questo punto risulta più semplice concepire l'applicazione della teoria algebrica con la sua applicazione fisica nel sistema sensoristico di Flexider. La struttura ideata dall'azienda di origine

italiana prevede di utilizzare due flange solidali al disaccoppiatore, sulle quali installare rigidamente sia i sensori a filo sia i rinvii dei sensori stessi, andando a rilevare, in base alla diversa lunghezza degli stessi durante l'utilizzo, la traslazione e rotazioni reciproche.

Facendo riferimento alla Stewart Platform, la base inferiore sarà scelta (così come la superiore) in funzione degli ingombri che la vettura presenterà, tipicamente la base inferiore è idealizzata con la parte del flessibile solidale al sistema di scappamento fumi fisso. Il movimento degli attuatori meccanici sarà riconducibile alla diversità di elongazione dei fili dei sensori stessi. I rispettivi centri delle terne di riferimento ideali saranno posizionati nel centro delle due piastre, così da legarle da relazioni di rototraslazione successive, facendo così in modo di essere il tutto sempre riconducibile all'impostazione sia precedente, sia iniziale.

Qui la cinematica segue due strade inverse, come descritto in precedenza: la prima è quella della cinematica inversa (dove le lunghezze sono funzione della posizione del sistema di riferimento mobile) mentre la seconda è quella diretta (che si lega in modo migliore al nostro caso). Per semplicità di argomentazione vengono discusse entrambe, per una migliore costruzione linguistica e per poter capire a fondo i problemi dei successivi algoritmi risolutori.

La cinematica inversa considera i sei gradi di rotazione della struttura come le variabili x, y, z e gli angoli intorno agli stessi assi di riferimento, identificabili come pitch, roll e yaw. A questo punto è noto la costruzione geometrica iniziale della piattaforma sotto vettura, dove le distanze iniziali dei due sistemi sono note (altezza della manichetta), nonché la posizione nello spazio (rispetto al sistema di riferimento della base) dei sensori in coordinate x, y e z . Ne abbiamo una breve rappresentazione nella seguente immagine:



Nella raffigurazione, avremo che O ed O' sono i due sistemi di riferimento idealmente posizionati sulle piastre solidali al disaccoppiatore, distanti tra di loro di una variabile h. Con le lettere B_i si definiscono le posizioni del corpo dei sensori, mentre con T_i si identifica la posizione del rinvio dei cablaggi. Nella nostra applicazione, i punti superiori sono uniti a due a due, per una maggior distanza possibile dei sensori nella base inferiore e poter fornire misure il più possibile accurate, essendo i sensori sistemi molto sensibili a variazioni anche minime. In ultima analisi, con L_i vanno intese tutte le lunghezze dei fili che corrono a bordo manichetta. Si può passare all'utilizzo delle relazioni matriciali definite precedentemente, descrivendo quella di rototraslazione come relazione degli angoli di beccheggio, rollio ed imbardata e le nuove posizioni della flangia superiore.

$$\begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \cos \psi \cos \theta & \frac{2}{3} [\cos \phi \sin \psi - \cos \psi \sin \theta \sin \phi] & -\frac{2}{3} [\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta] & x \\ -\frac{2}{3} \cos \theta \sin \psi & -\frac{2}{3} [\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi] & \frac{2}{3} [\cos \psi \sin \phi - \cos \phi \sin \psi \sin \theta] & y \\ -\frac{2}{3} \sin \theta & \frac{2}{3} \cos \theta \sin \phi & \frac{2}{3} \cos \theta \cos \phi & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La formulazione finale vedrà la definizione di un unico punto nello spazio tridimensionale, punto risultante della rototraslazione avvenuta sulla struttura ed identificata con la nuova posizione del

sistema di riferimento mobile O' . Definito ciò, si passa all'identificazione unica delle sei lunghezze dei sensori, attraverso delle formulazioni di specifico legame tra le variabili.

La cinematica diretta si utilizza quando si vuole risolvere il problema in modo inverso a come è stato presentato nella cinematica inversa; si vuole avere una relazione diretta tra la le lunghezze degli attuatori, ora note, e la posizione raggiunta a seguito di quelle modifiche, per poter calcolare così facilmente gli aspetti desiderati, come le traslazioni e rotazioni occorse alla struttura.

La generazione matriciale presenterebbe la generazione di numerose equazioni non lineari con più di una soluzione ammessa. È un problema molto complesso, che non prevede una semplice inversione delle espressioni precedentemente esplicate, poiché oltre ad essere un problema che computazionalmente è esigente (richiede un computer con una elevata potenza di calcolo) è possibile ritrovarsi come con risultati che possono trarre in inganno.

L'algoritmo può consegnare, a parità di lunghezza degli attuatori nell' i-esimo stadio della trasformazione, diverse posizioni nello spazio della manichetta, ognuna delle quali può essere matematicamente accettata, ma non nella realtà. Per risolvere queste ambiguità è possibile utilizzare molteplici strade algebriche, utilizzando delle scorciatoie nell'algoritmo (posizionando delle assunzioni che ne limitano la generazione di molteplici posizioni) o cambiando totalmente strategia teorica e costruttiva dello stesso. Nei paragrafi seguenti sarà enunciato come questa problematica è stata affrontata dai creatori degli script per Flexider.

4.3.2 Il codice di Wang

Il codice appena enunciato proviene dalla sapiente conoscenza del professor Zhijun Wang, professore di robotica e collaboratore esterno per Flexider Automotive Italy srl. Il suo programma, codificato nel lontano 2001, ricerca la posizione finale del centro della flangia superiore, solidale al disaccoppiatore meccanico. È scritto in ambiente Octave, un linguaggio free-for-all basato sulla sintassi di Matlab per la misura del movimento di strutture a sei gradi di libertà. La directory inviata all'azienda dal professore cinese prevede sette differenti file, che andremo a presentare nel corso di questa trattazione. I primi due rappresentano il nucleo fondante dell'intero programma risolutivo dove:

- MotioncptGENc.m, rappresenta lo script di calcolo per una struttura di misura composta da RLDA a 6 gradi di libertà;
- MotioncptGENa.m, è una sub-routine del file precedente, funzione da richiamare ogni volta va calcolata la posizione di O'. Il fulcro funzionale del programma è racchiuso in questo file Matlab.

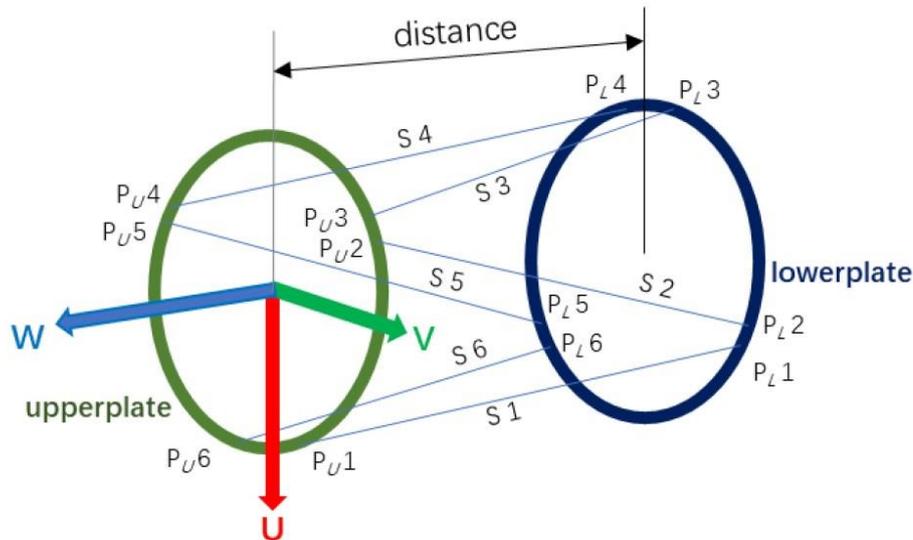


Figura 29: Sistema di riferimento di Wang

Per essere eseguito il programma ha bisogno di un programma di lancio, chiamata "Main.m". In esso vengono inizializzati in memoria due file, uno contenente la geometria costruttiva del sistema sensoristico mentre il secondo contenente i dati delle misurazioni rilevate in tracciato. I due elementi devono essere organizzati secondo una struttura, che troveremo anche nei successivi tipi di script, organizzata come segue. Il primo file rappresenta le caratteristiche fisiche del sistema ed è nominato "sensordata", puntualmente generato in ambiente Excel. Nelle sue celle ha informazioni riferite a:

- Posizioni dei sensori rispetto al centro della flangia meccanica. Secondo una terna di assi di riferimento idealmente posizionata al centro del flessibile, saranno elencate le posizioni, in millimetri, di distanza che i sensori avranno dal centro. Questo insieme di dati verrà suddiviso a seconda che si riferisca all'asse v od u , identato come lowerplate all'interno del programma;

- Posizioni dell'arrivo dei sensori sulla piastra superiore. Queste posizioni, inizialmente nate come punto di arrivo di sensori RLDA, o sensori a stelo, hanno subito una variazione a causa del fatto che le alte temperature di esercizio dello scarico automobilistico ne hanno impedito l'utilizzo su strada.

Al loro posto è stato necessario operare con sensori a filo, per cui quelle posizioni segnano il rinvio dei cavi dei sensori, fissati in quel punto per una misurazione ottimale durante i test. Anche in questo caso vi sarà una suddivisione secondo quella coppia di assi cartesiani, identati questa volta sotto il nome di upperplate, differenziando così le due flange in quella mobile e quella solidale con lo scarico finale;

- Distanza delle due estremità iniziale, ovvero la dimensione iniziale del disaccoppiatore meccanico ad inizio test, dopo montaggio dei sensori;

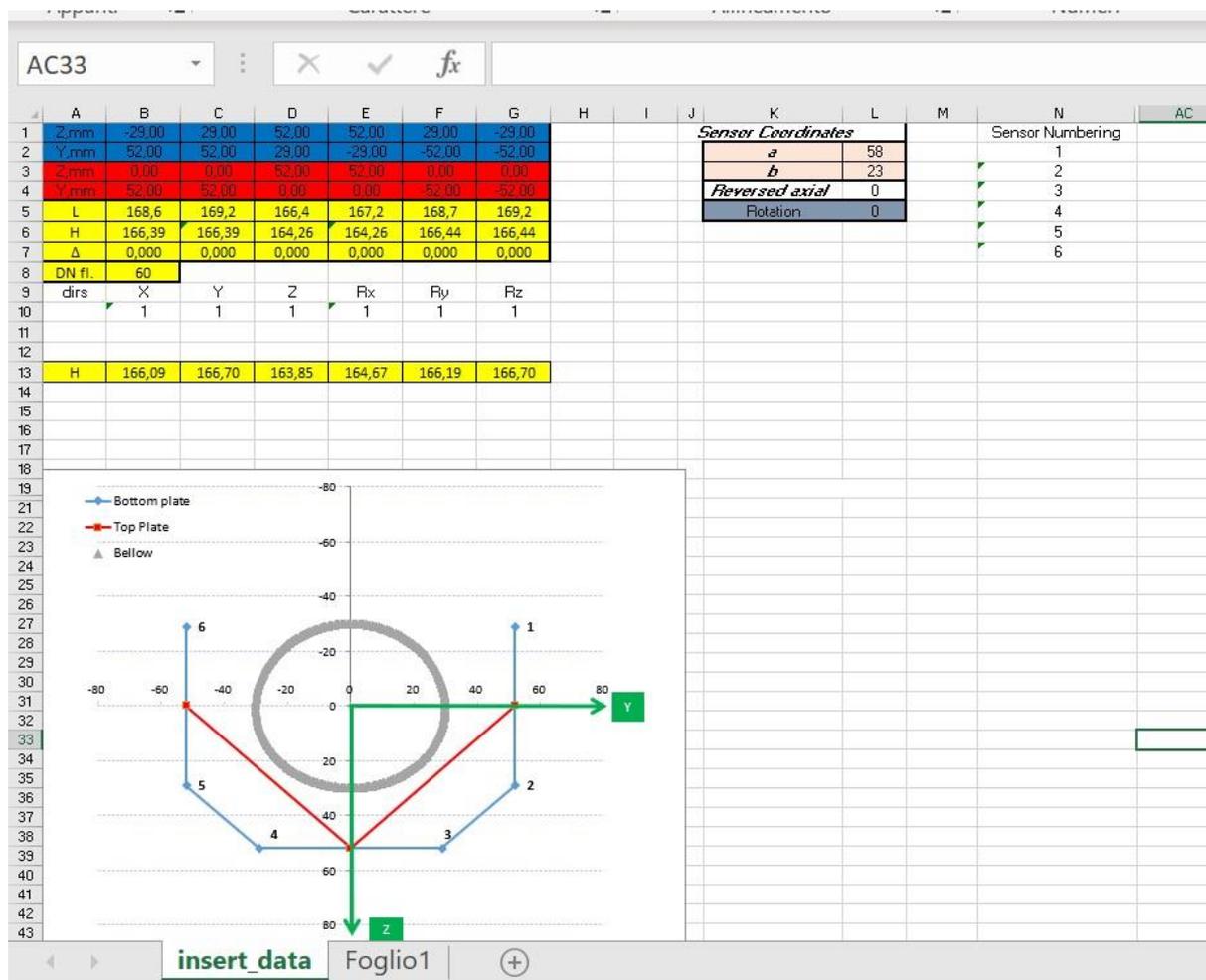


Figura 30: Sensordata

- Voltzero identifica il vettore con cui si impostano le lunghezze iniziali dei vari sensori, per poter così calcolare ogni volta le differenze di lunghezza e utilizzare le equazioni di motioncptGENa;

Il secondo file è nominato come il nome del test effettuato nel circuito vercellese dai guidatori ed è organizzato secondo una struttura, sempre organizzata in ambiente Excel, tabellare, le cui sette colonne rappresentano sia il tempo globale della prova, sia i movimenti relativi dei sei sensori, campionati durante la prova dalla strumentazione.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0,001	-0,68456	-0,64388	-0,52244	-0,81183	-0,67773	-0,64214		
2	0,003	-0,68456	-0,64388	-0,52244	-0,81183	-0,67773	-0,64214		
3	0,005	-0,68456	-0,64388	-0,52244	-0,81183	-0,67773	-0,64214		
4	0,007	-0,68456	-0,64388	-0,52244	-0,81183	-0,67773	-0,64214		
5	0,009	-0,68456	-0,64858	-0,52244	-0,81652	-0,67773	-0,64682		
6	0,011	-0,68925	-0,64858	-0,52711	-0,8259	-0,67773	-0,65151		
7	0,013	-0,68925	-0,64858	-0,53177	-0,8306	-0,67773	-0,65151		
8	0,015	-0,68925	-0,64858	-0,53644	-0,8259	-0,67773	-0,6562		
9	0,017	-0,68925	-0,64858	-0,53644	-0,8259	-0,67773	-0,6562		
10	0,019	-0,68456	-0,64858	-0,53644	-0,8259	-0,67773	-0,6562		
11	0,021	-0,68456	-0,64858	-0,53644	-0,8259	-0,67773	-0,6562		
12	0,023	-0,68456	-0,64858	-0,53177	-0,8259	-0,67773	-0,6562		
13	0,025	-0,68456	-0,64858	-0,53177	-0,81652	-0,67773	-0,6562		
14	0,027	-0,68456	-0,64858	-0,53177	-0,81652	-0,67773	-0,6562		
15	0,029	-0,68456	-0,64858	-0,53177	-0,81183	-0,67773	-0,6562		
16	0,031	-0,68456	-0,64858	-0,53177	-0,80244	-0,67773	-0,6562		
17	0,033	-0,68456	-0,64858	-0,52244	-0,80244	-0,67773	-0,6562		
18	0,035	-0,68456	-0,64858	-0,52244	-0,79306	-0,67773	-0,6562		
19	0,037	-0,68456	-0,64388	-0,51311	-0,78836	-0,67773	-0,6562		
20	0,039	-0,68456	-0,64388	-0,51311	-0,78836	-0,67773	-0,6562		
21	0,041	-0,68456	-0,64388	-0,51311	-0,78836	-0,67773	-0,6562		

Figura 31:Foglio di calcolo di test

Il codice, scritto dal professor Wang, implementerà tutte queste informazioni all'interno del calcolatore e si propone di raggiungere gli obiettivi aziendali di calcolo delle sollecitazioni dell'azienda. Il suo funzionamento prevede un ciclo while, grazie al quale il programma può elaborare informazioni finchè non saranno stati processati tutti i dati della prova. Il ciclo,

annidato dentro il file MotioncptGENa.m, estrapolerà la lunghezza delle componenti variabili dei sensori (mutevole ogni intervallo di tempo considerato) importata precedentemente; successivamente costruirà la sua matrice di rototraslazione, inserendo al suo interno i dati relativi agli angoli di roll, pitch e yaw calcolati ogni volta, eseguendo quelle che prima sono state definite come rotazioni successive.

Partendo dalla condizione iniziale, in cui i relativi angoli sono nulli, completo la matrice di rotazione secondo una serie di rotazioni successive del tipo Y-Z-Y, lo script crea una matrice 6x6 ed un vettore di termini noti, relativi alla geometria dei punti esterni della piattaforma. Il rapporto tra le due mi genera un vettore di sei componenti, le cui prime tre componenti saranno riferite alle tre traslazioni, mentre le rimanenti risulteranno essere le tre rotazioni specifiche. Queste informazioni saranno doppiamente importanti, poiché andranno sia a formare un file Excel di output, che ad alimentare il proseguo del calcolo. Infatti, le nuove informazioni permetteranno di calcolare la nuova posizione del centro O' rispetto alla terna di riferimento della piattaforma inferiore, fornendo così le informazioni necessarie per il calcolo della nuova posizione dopo il successivo tempo di campionamento. Ultimo elemento dello script permette di salvare le informazioni delle rototraslazioni in un file in formato Excel, utilizzato per le successive analisi a fatica.

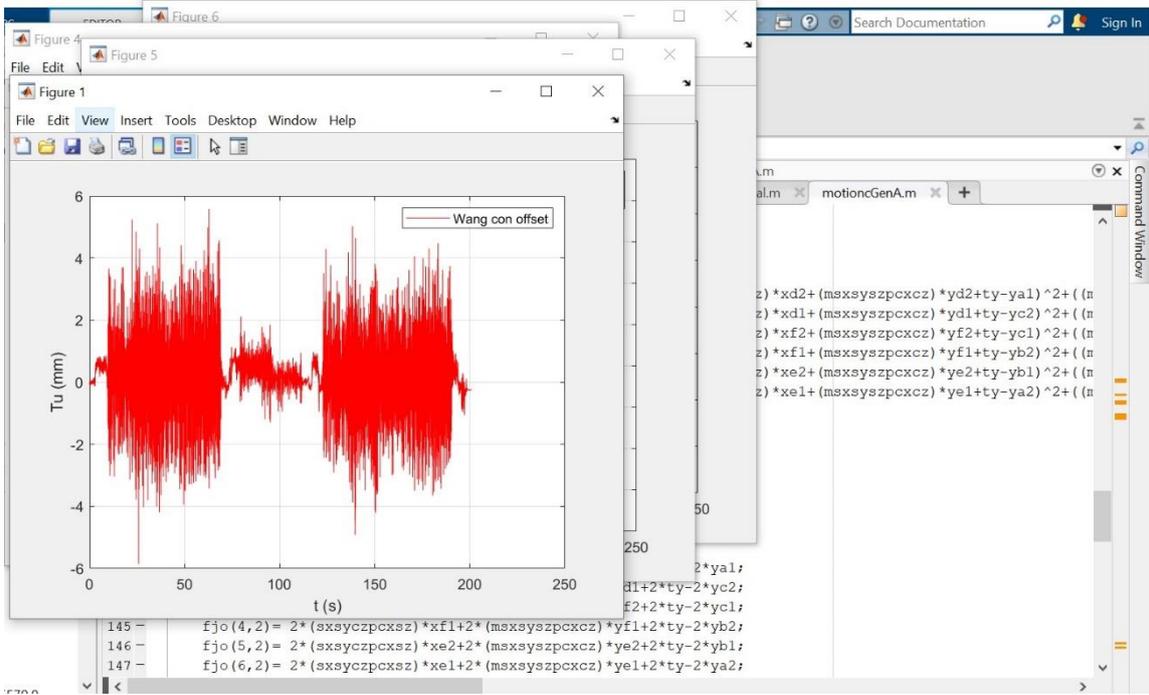


Figura 32: Risultati codice Wang

La sua struttura è simile a quella rappresentata precedentemente, con la prima colonna che identifica il tempo trascorso, mentre le colonne successive saranno a tre a tre utilizzate per le traslazioni e rotazioni lungo gli assi di riferimento. L'applicativo non presenta una schermata GUI, (grafic user interface) ma dà la possibilità di visualizzare graficamente i grafici delle grandezze analizzate.

Un'ulteriore funzionalità dello script è il controllo preliminare della geometria strumentale, per evitare di commettere errori nel lato testing che non siano imputabili ad errori del software ma svarioni strumentali operati in fase di montaggio della strumentazione. Questa opzione è particolarmente utilizzata quando la geometria dello chassis della vettura è particolarmente articolata e non permette una calibrazione ottimale su banco della strumentazione. Questa sub routine del codice del professore cinese analizza la geometria iniziale della struttura, importata come esplicito nelle pagine precedenti, e importa le lunghezze iniziali delle parti mobili dei vari sensori.

Lo script effettua una maggiorazione delle lunghezze iniziali dei fili, variando la struttura e va a calcolarsi le distorsioni del reticolo che essa ha creato. Se queste dovessero superare dei valori limite, segnala un'anomalia all'utente, permettendo di risparmiare all'operatore sia il tempo del processamento dei file, sia il tempo di analisi dell'errore. Queste limitazioni sono state imposte da Wang e devono essere rispettate. Esse riguardano le traslazioni, limitate a 0.8 mm, e alle rotazioni, obbligatoriamente minori di 0.2 gradi. L'intera analisi genera una tabella riassuntiva facile da osservare ed analizzare.

4.3.3 Il codice di Mura

Il codice successivo utilizza una logica di calcolo completamente diversa dal precedente. Lo script è stato progettato dal professor Andrea Mura, professore ordinario del Politecnico di Torino e brillante conoscitore della progettazione meccanica. Flexider contattò il professore nel corso del 2011, qualche anno dopo l'adozione in fase produttiva del codice di Wang. Ereditò una situazione complicata dell'azienda, che lamentava imprecisioni dal precedente codice, specialmente per quanto riguardava la precisione nel calcolo delle rotazioni della struttura. Il

problema riscontrato di questo tipo di strutture riguarda lo studio della cinematica e della dinamica, che risulta essere estremamente complesso.

Sebbene in letteratura sia possibile trovare numerosi studi che affrontano l'argomento utilizzando diversi metodi, la complessità delle equazioni a cui si giunge, sia per quanto riguarda il numero delle equazioni sia per le forti non linearità presenti nelle stesse, richiede un elevato sforzo computazionale.

Nell'applicazione del dispositivo parallelo ideato in questo lavoro, è indispensabile scrivere e risolvere le equazioni della cinematica diretta del meccanismo, in modo da poter trasformare le lunghezze lette dai sei trasduttori negli spostamenti relativi fra piastra e base e quindi nelle deformazioni del flessibile. Pertanto, l'architettura è stata studiata in modo da garantire il montaggio del dispositivo stesso al flessibile e nel contempo rendere le equazioni della cinematica diretta il più semplici possibili.

È possibile così trovare una continuità di progettazione con l'applicazione precedente, confermando la bontà dell'intuizione. Ciò che caratterizzò il professore del Politecnico fu l'idea di utilizzare un sistema sensoristico come quello rappresentato in figura, con i sensori posizionati con una reciproca orientazione di circa 90° a due a due e concentrando gli arrivi degli estensimetri a filo in un solo punto della piattaforma superiore.



Figura 33: Schema installazione sensori

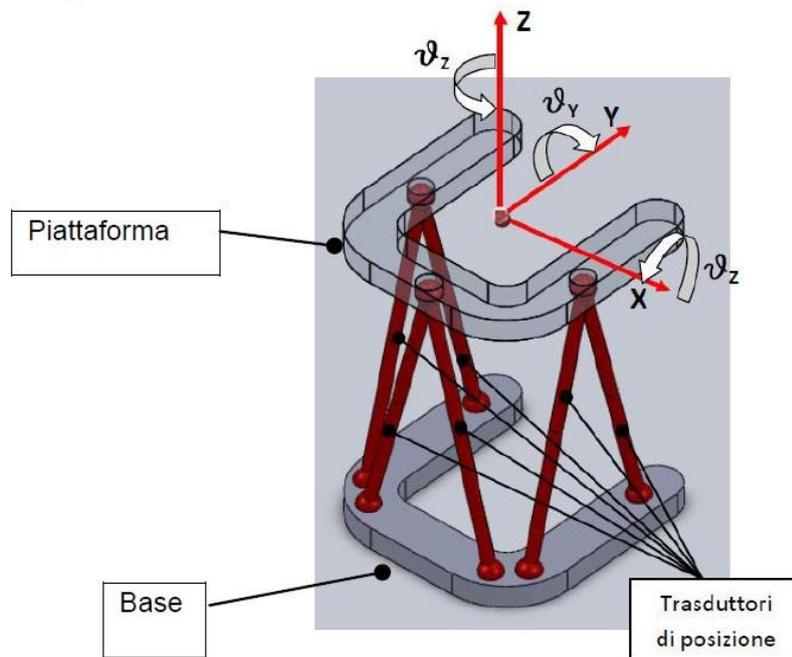


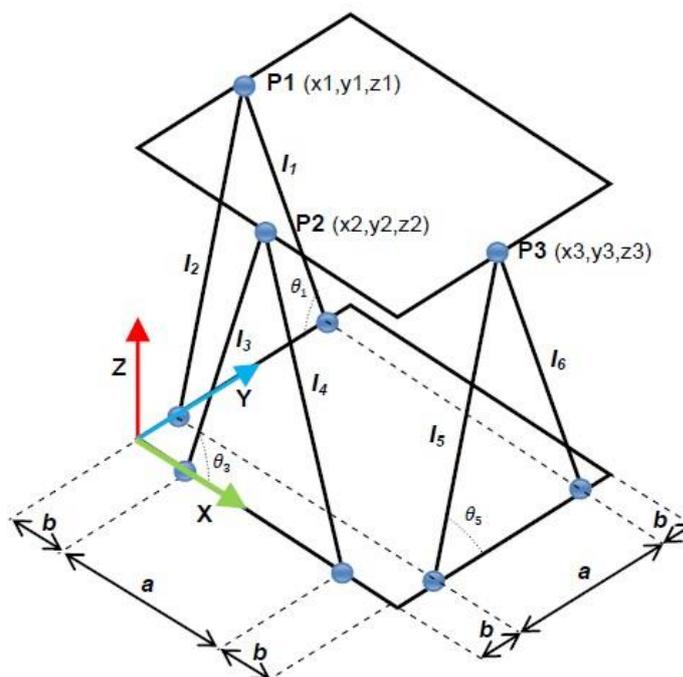
Figura 34: Schema piattaforma di Stewart

Questa ipotesi venne dalla profonda conoscenza che Mura possiede nelle piattaforme di Stewart, elementi robotici a sei gradi di libertà. Le strutture come quelle sono di dimensioni considerevoli, di ben un ordine di grandezza superiore rispetto ad applicazioni come questa. In quel caso la lunghezza degli attuatori meccanici è considerevole, così da avere una grande precisione per quanto riguarda i movimenti dello stesso, anche quelli considerati minimi. In spazi di manovra così angusti, in cui sono presenti numerose vibrazioni che possono essere considerate come segnali di disturbo e impattare sulla misurazione.

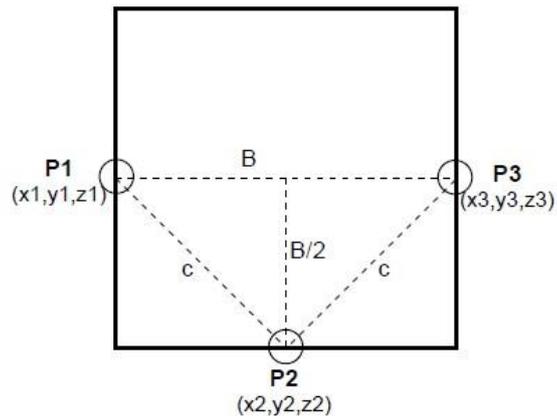
Ricorrendo ad una struttura come la precedente, vengono ampliati il più possibile le distanze che gli estensimetri devono percorrere, aumentando così la precisione recettiva dell'intero sistema. Oltre al tipo di applicazione, risulta originale anche la geometria dell'invenzione rispetto ad una piattaforma di Stewart "tradizionale". Le differenze sono sostanzialmente le seguenti, ovvero: nella soluzione proposta gli estremi degli elementi che collegano la base alla piastra convergono a due a due sulla piattaforma formando tre triangoli e gli elementi di collegamento non sono disposti secondo una simmetria circolare. Queste due caratteristiche, che per un utilizzo come attuatore potrebbero creare problemi di rigidità della struttura e di realizzazione pratica dei giunti, sono invece molto importanti per l'invenzione proposta.

Infatti, questa geometria presenta due vantaggi. Il primo riguarda la non simmetria circolare, che consente di avere un vano di introduzione del flessibile. Il secondo è rappresentato dalla tipologia di geometria, che consente di ricavare una soluzione semi-numerica relativamente semplice, a dispetto delle geometrie classiche che richiedono complesse soluzioni numeriche per la cinematica diretta. Infatti, il programma di calcolo per ricavare la cinematica diretta dell'invenzione consiste in un algoritmo che calcola iterativamente solo una delle nove incognite del problema, mentre le altre vengono ricavate analiticamente a seguito del calcolo numerico della prima incognita.

La cinematica proposta dal professore intende svolgere un sistema di equazioni puramente geometriche, basandosi sulle informazioni ricavate dalle misurazioni nell'officina meccanica della sede torinese della Flexider. Note le posizioni di sensori e punti di arrivo della parte finali degli estensimetri a filo (rispettivamente i punti sulla piattaforma di base e P_1, P_2, P_3) e le lunghezze l_i dei vari sensori a filo. Un altro elemento di nostra conoscenza è la distanza iniziale delle due flange, nonché la geometria della stessa, come le dimensioni costruttive, come a e b .



Risulta semplice scrivere le equazioni per il calcolo degli angoli che descrivono l'inclinazione degli estensimetri, nonché delle posizioni in X, Y e Z di tutte le componenti, sfruttando la conoscenza geometrica della piattaforma semovente superiore.



Le ultime equazioni utilizzate arrivano dalla scomposizione spaziale della lunghezza del sensore a filo l_i , idealizzato come segmento nello spazio di componenti da calcolare. Si formerà così un sistema di nove equazioni e nove incognite, per cui perfettamente risolvibile da un calcolatore elettronico. Ricavate così le coordinate dei tre punti appartenenti alla flangia superiore, sarà possibile calcolare le deformazioni subite dal flessibile durante il lavoro. Tali deformazioni nello spazio risultano essere le traslazioni e le rotazioni dell'intera struttura. IL codice è stato implementato in ambiente matlab e a differenza del precedente, presenta una GUI semplice ed intuitiva, che permette di inserire agevolmente i dati preposti e controllare lo stato del processo in modo confortevole.



Figura 35:GUI codice Mura

Il programma richiede di inserire due file di testo, nei quali sono presenti:

- Le lunghezze iniziali degli estensimetri a filo;
- I parametri geometrici costruttivi delle flange metalliche a e b;
- L' altezza del flessibile in condizioni nominali;
- Un file in cui sono contenenti tutte le informazioni relative alla prova sul tracciato di Balocco.

I file di output saranno otto file di testo e conterranno le rotazioni e traslazioni, ognuno per ogni asse, le coordinate finali e un file riassuntivo in cui sono raccolti i sei file precedenti (come il codice precedente) per agevolare l'operatore nella raccolta dati per FeSave ed il caoclo di fatica ciclica sul materiale.

4.3.4 Il codice di FAI

Il paragrafo intende discutere le funzionalità dell'intimo codice in uso nella Flexider Automotive Italy srl (FAI). IL significato dell'acronimo simboleggia la natura dello script stesso, ovvero nato all'interno dell'azienda stessa generato e modificato da un ingegnere assunto direttamente dall'impresa italo-tedesca. La necessità di un terzo codice di analisi nasce dalla necessità di eliminare errori di calcolo presenti nei due codici precedenti in particolari tipologie di applicazioni, cercando di rendere il tutto il più universale possibile. Scritto in ambiente Matlab, rappresenta l'incontro delle diverse soluzioni precedenti, leggermente modificate dall'incaricato, in una GUI particolarmente semplice e completa.

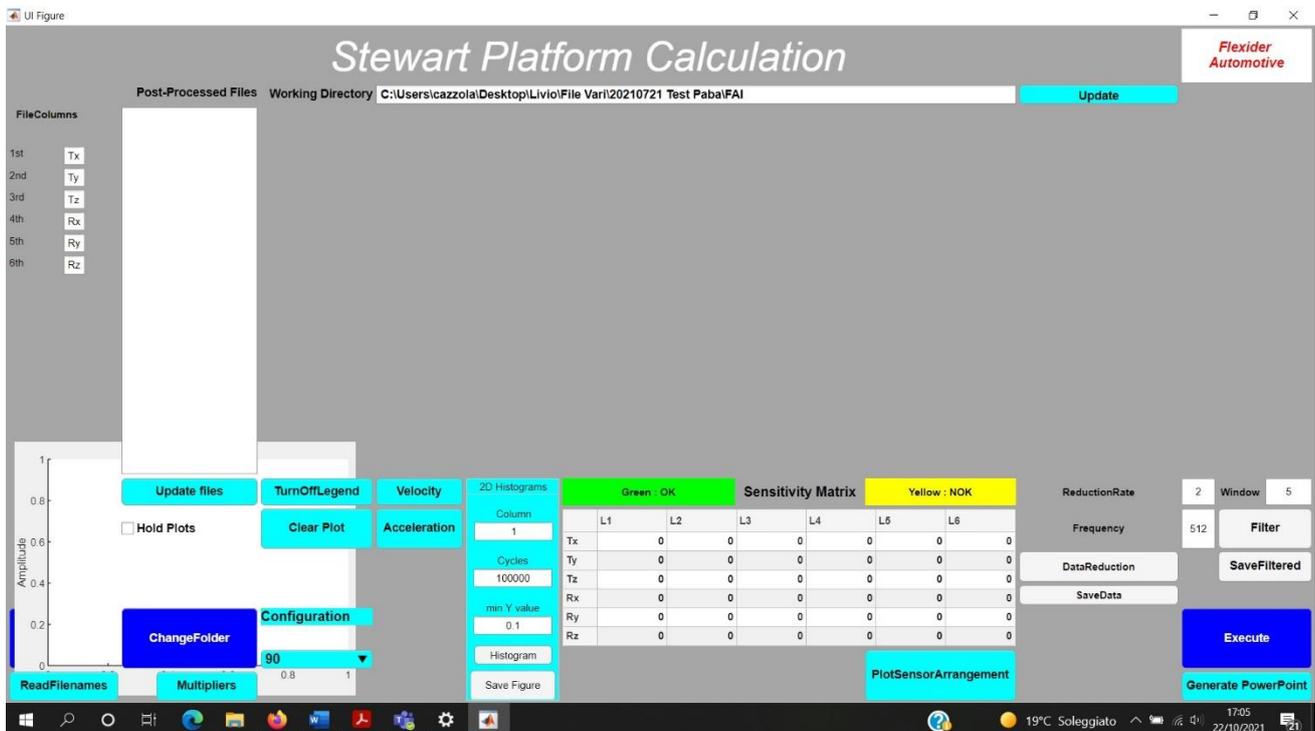


Figura 36:GUI codice FAI

Il codice sfrutta una delle numerose funzionalità di Matlab. Il software statunitense dà la possibilità all'utente di creare piccole applicazioni che, pur essendo create dal programma e operando utilizzando il suo codice e la sua logica, possono funzionare in completa autonomia, persino in personal computer dove non è installato il software sorgente. Questa possibilità ha portato alla creazione di questo elemento, uno dei cui difetti risulta essere quello di essere così post-generato e non più modificabile dall'esterno se questo dovesse essere difettoso. L'utilizzo

risulta però essere molto semplice, poiché basta scegliere la cartella in cui sono presenti i sensordata e i test in formato Excel (riprende la logica di importazione di Wang) ed il programma seleziona automaticamente i dati e le variabili necessarie. Un ulteriore aspetto è la possibilità di scelta che offre in tema di configurazione sensoriale. In base all'orientazione reciproca dei sensori, del tipo di veicolo e applicazione studiata è possibile modificare attraverso un menù a tendina lo script che analizza i miei dati. Sono presenti il codice di Wang, il codice di Mura, un codice generato e modificato da un ingegnere interno all'azienda e l'analisi di sensitività, proiettata a schermata nella matrice preposta.

Dopo una breve attesa dovuta al post processamento dei dati, il codice genererà in automatico numerose directory, ognuna funzionale alla produzione di successivi report per i clienti o creando grafici funzionali ad essi, nonché file che verranno utilizzati nella successiva analisi di fatica della struttura meccanica. Una importante funzionalità riguarda l'utilizzo della funzione rainflow di Matlab, che fornisce un valore grafico, facile ed intuibile per l'utente, in relazione al numero di cicli e al loro range che hanno avuto durante la prova. Si tratta di un importante strumento per le successive analisi.

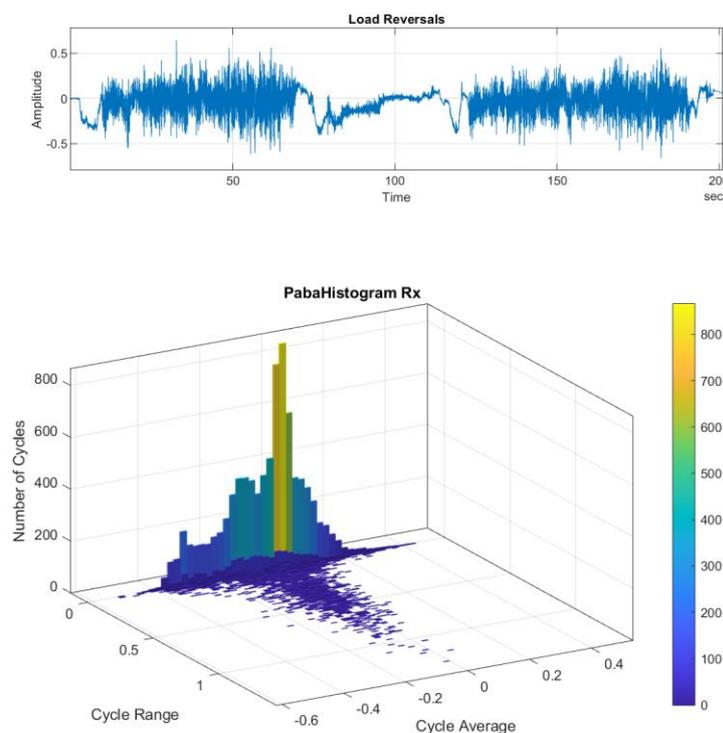


Figura 37: Esempio post-processato codice FAI

4.3.5 Confronto codici

L'ultimo paragrafo del quarto capitolo parlerà del confronto dei codici fin qui presentati, poiché è necessario scegliere quello da convertire in ambiente Python, trattato successivamente. Nel corso del loro utilizzo, tutti gli script hanno dimostrato delle limitazioni, lacune dovute sia alla progettazione, sia alla teoria che hanno alla loro base, sia al tipo di software utilizzato per crearli, cambiato di molto nel corso delle release rilasciate negli anni. Basti pensare che il primo codice di Wang risale a quasi 21 anni fa, mentre quello del professor Andrea Mura a quasi 11; essendo stati generati da vecchie versioni di software questi hanno subito una decisa limitazione dal punto di vista delle funzionalità operabili al loro algoritmo.

Per quanto riguarda il codice del professore cinese, un'altra fonte di errata analisi dei dati viene registrata nella impostazione fisica che vede il rinvio dei fili dei sensori sulla piattaforma superiore non congiungente. Questo, come scritto in precedenza, fornisce una mancata possibilità di aumento della precisione stessa dello strumento, potendo incrementare la corsa che lo stesso compie. Inoltre, l'utilizzo di algoritmi che sfruttano la cinematica diretta della robotica necessitano di strumenti particolari di analisi algebrica (vedi capitolo finale) o di assunzioni semplificative, che snelliscono sia il codice, limitando le iterazioni e dunque il tempo di attesa, sia restituendo solamente una delle n soluzioni possibili.

Il codice del professor Mura presenta una solidità ed una precisione elevata, sebbene produca una gran mole di iterazioni che ne limitano l'utilizzo. Basti pensare che il tempo trascorso per il processamento dei dati relativi al test effettuato sulla pista vercellese, eseguito dai tre codici distinti, vede quello del professore universitario più lento di ore. È stato misurato come i due codici (Fai e Wang) ci impieghino qualche minuto, mentre il suo circa tre ore. Si tratta di una lentezza che in termini aziendali non è indifferente, poiché ogni giorno devono essere analizzati numerosi codici, da durate diverse, anche più elevate di quello in analisi.

Un ulteriore elemento di sfiducia riguarda una assunzione iniziale, una definizione delle condizioni iniziali particolare. La corretta geometria impostata dovrebbe essere quella identificata nella raffigurazione successiva, ovvero con i sensori perfettamente perpendicolari alla struttura. Essi formano un angolo retto con la superficie della flangia inferiore, evidenziando

come essi debbano essere paralleli alla struttura del disaccoppiatore meccanico durante il montaggio sotto la vettura. Dovrò aspettarmi una struttura perfettamente estesa del soffiello, senza deviazioni alcune se non nella direzione assiale.

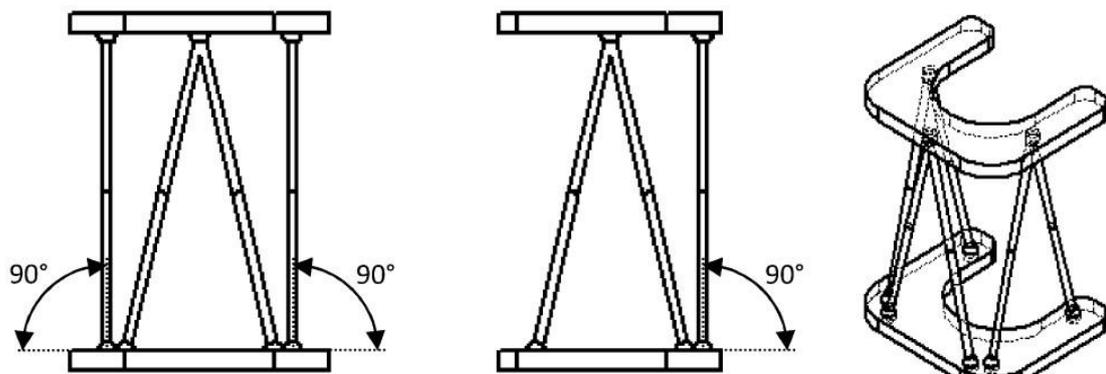


Figura 38: Limitazione nell'applicazione codice

Purtroppo, a causa della geometria dello scarico e degli altri elementi dell'avantreno e dell'impossibilità di concordare progettualità comuni con le aziende che fabbricano i vari componenti è limitato il numero di veicoli che possano essere dotati di questa soluzione. L'inclinazione e distorsione ne rendono di fatto complicata l'utilizzo in campi reali della fase di testing della Flexider. L'impossibilità di un eventuale calibrazione esterna, dovuta alla impossibilità di smontare la tubazione su e calibrare su banco la strumentazione ne termina l'utilizzo. Nonostante ciò, se utilizzato nelle condizioni iniziali descritte dal professore italiano, il codice risulta essere robusto e con una precisione molto elevata.

È il caso di simulazioni su banco, dove tutti i dati possono essere facilmente effettuate; l'algoritmo diventa così importante nella calibrazione degli strumenti e degli altri algoritmi utilizzando una macchina a controllo numerico in uso all'azienda. Può essere fondamentale per trovare errori negli altri codici, diventando così un punto focale con cui effettuare le proprie analisi. Le analisi sull'ultimo codice verranno effettuate nelle seguenti righe, poiché esso è un prodotto non visualizzabile dall'esterno, senza documentazione tecnica che presenta una riscrittura dei due codici precedenti, più un terzo strutturato, come detto, da un interno aziendale.

Le ultime analisi sono state condotte utilizzando il macchinario CNC in uso alla Flexider, per cercare di notare delle differenze tra i codici trattati. Sono stati effettuati test di trazione assiale della manichetta, limitata a 10 millimetri, effettuati utilizzando sia sensori a filo, sia trasduttori RLDA per differenziare ed evidenziare problematiche relative allo strumento fisico. I dati verranno successivamente post processati dai due tipi di script ancora utilizzabili, come quello di Wang ed il FAI. Di seguito verranno rappresentate le tipologie di installazione ed i risultati ottenuti.

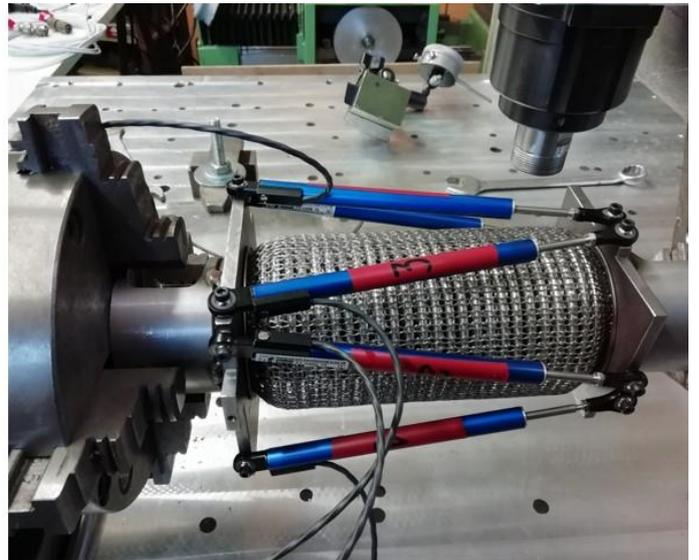
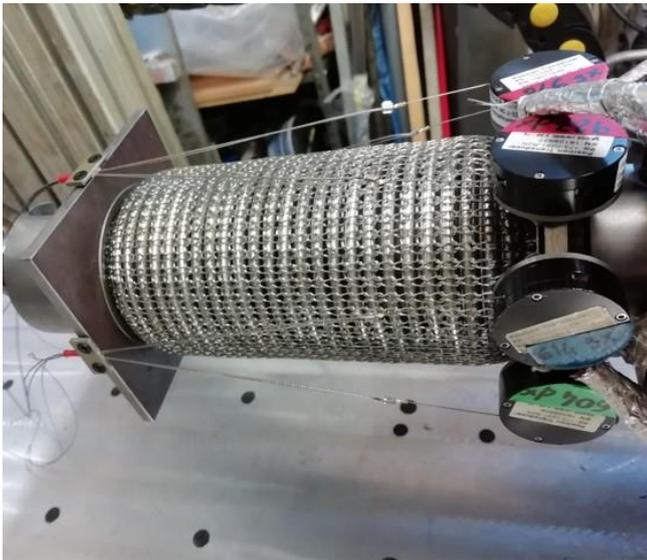
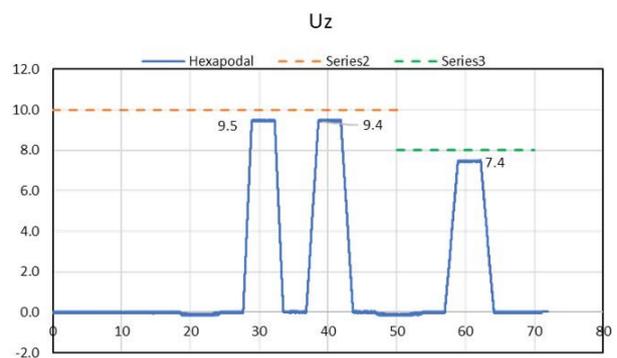
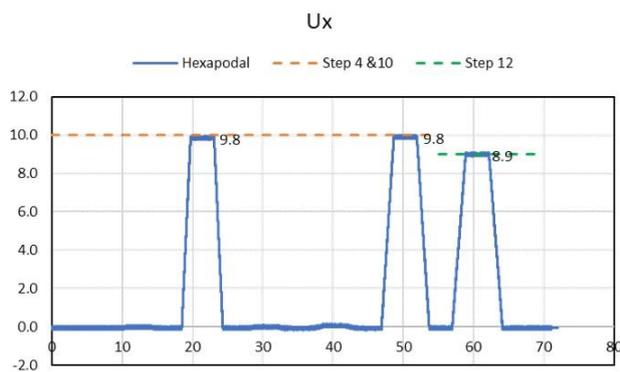
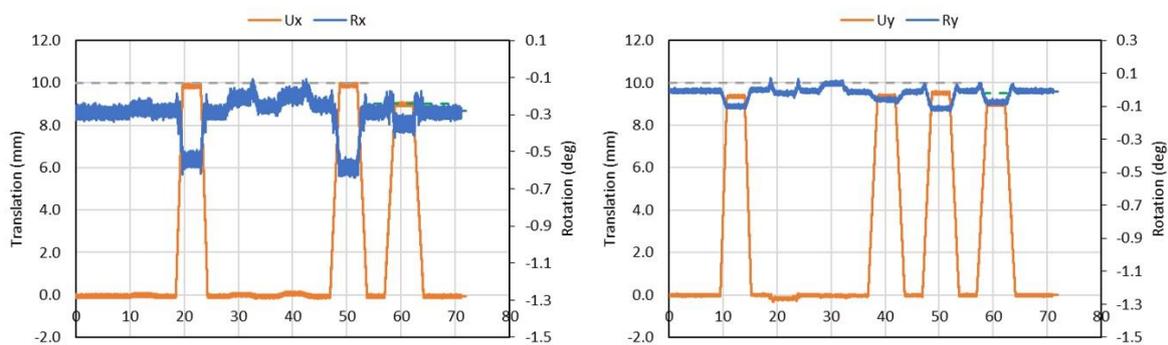


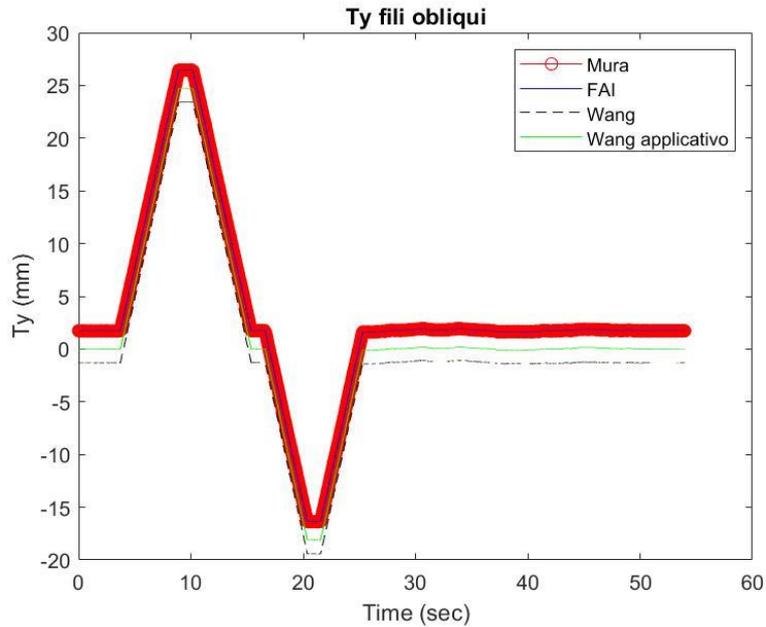
Figura 39: Test condotti sul sistema sensoristico



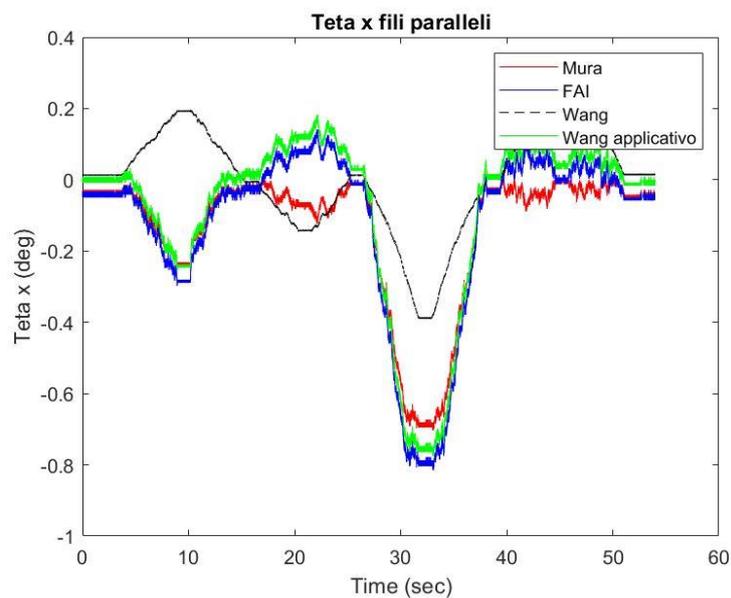
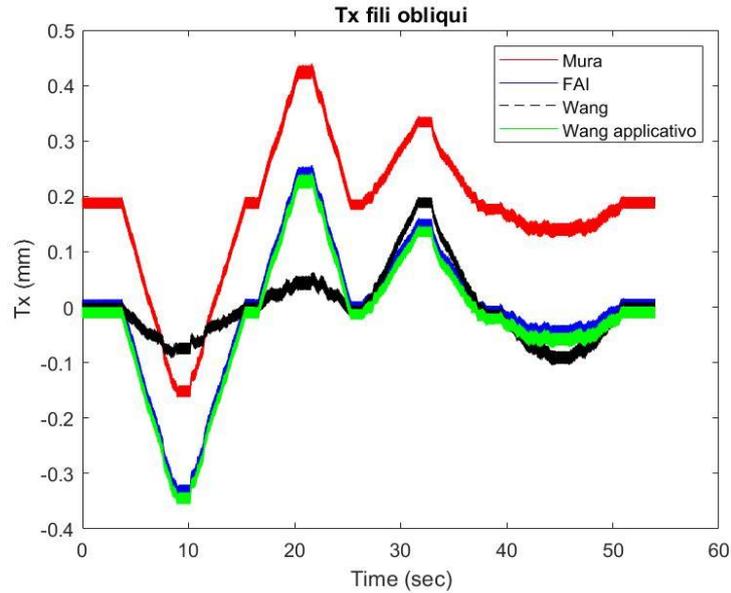
Come è possibile notare dalle raffigurazioni precedenti, i test hanno fornito numerosi spunti di riflessione. Si nota che a seguito di una traslazione fissa operata da una macchina a controllo numerico, l'errore effettuato dall'algoritmo per il calcolo è minimo; infatti, rientra nel limite di tolleranza richiesta per questo genere di applicazioni. Questo per qualunque dei due codici si analizzi. Un discorso diverso è da fare per l'analisi delle rotazioni condotte. Infatti, dato che la macchina è stata comandata per effettuare una sola traslazione lungo l'asse, l'algoritmo non avrebbe dovuto interpolare e generare rotazioni su quello stesso asse, rotazioni di entità variabile, ma sicuramente non trascurabile (arrivate persino a mezzo grado di anomalia).



Questa fase è importante, poiché capire come migliorare l'intero sistema è vitale, poiché basti pensare che quell'errore ricalca un dato non trascurabile intrinseco del prodotto. Esso ha un punto di rottura a sollecitazioni che ne permetterebbero la torsione a 1,5 gradi di rotazione assiale; quindi, avere il 30% del valore come errore specifico è sicuramente preoccupante per lo sviluppo delle formulazioni e dei calcoli a fatica. Sono stati condotti test successivi, variando l'entità di carico impostata e utilizzando l'intera platea degli algoritmi a disposizione della Flexider. È stato costruito un codice Matlab di confronto generale, utile per questa operazione di automiglioramento aziendale, i cui risultati sono elencati successivamente.



È stata imposta una traslazione lungo l'asse di flessione della manichetta, ipostata a 25 millimetri, quindi un valore nettamente più alto del precedente. Le differenze di risultati sulle traslazioni non risultano essere significative, poiché tutti gli script generano errori percentuali molto bassi. Le differenze grafiche si riferiscono a diverse impostazioni del codice stesso, che utilizzano, o meno, internamente una riga di eliminazione degli offset iniziali. Un discorso molto più complicato riguarda le traslazioni lungo altri assi non interessati dal movimento della macchina a controllo numerico, nonché a rotazioni fornite dai risultati. Va ricordato come la macchina CNC è stata programmata per effettuare solamente traslazioni lungo un asse. I risultati sono riassunti nei seguenti grafici.



È possibile notare come ci siano delle errate generazioni di traslazioni e rotazioni all'interno dei risultati stessi, anche quando questi non sono stati effettuati realmente. Inoltre si può osservare che, se per le traslazioni il valore risulta comunque mediamente basso, in linea con un errore molto limitato (l'errore percentuale massimo risulta essere dell' 1,6%), per le rotazioni il dato assume contorni preoccupanti e diversi a seconda del codice usato per il calcolo. Si nota come i peggiori siano quelli generati dall'applicativo della Flexider, modificato dall'ingegnere interno, e come i codici "Wang" e "Wang applicativo" che dovrebbero essere uguali (poiché nell'applicativo Matlab doveva essere stato solo copiato il codice di Wang), in realtà questi non

lo sono. È stato operato una plateale alterazione dell'algoritmo analizzante, poiché è evidente come i due diano risultati comunque diversi tra di loro.

L'assenza di documentazione tecnica, a cui si aggiunge un errore percentuale più alto in tutte le prove fa sì che anche questo codice venga scartato nella decisiva fase di conversione in Python. La scelta ricade sul codice di Wang, il quale avendo delle limitazioni ben documentate e facili da riscontrare nel codice originale, possedendo errori percentuali più bassi della concorrenza e fornendo possibilità di comunicazione diretta con l'autore dà la possibilità di automiglioramento continuo, necessario per una logica realizzativa in un ambiente opensource cui Python appartiene. Sarà così più semplice risolvere successivamente eventuali problemi relativi alla teoria su cui esso si fonda, nonché aumentare funzionalità importanti per l'utente ed implementare funzioni per l'automiglioramento continuo dell'algoritmo.

5. Conversione codice

In questo capitolo diamo risalto al lavoro eseguito durante la conversione d'ambiente di programmazione dell'algoritmo. L'algoritmo migliore, come esplicitato nel capitolo precedente, risulta essere quello ideato dal prof. Wang. La sua idea di utilizzare teorie di cinematica robotica, legando i movimenti relativi delle due estremità del soffietto è risultata la più efficace di quelle presentate. Inoltre, questa tipologia di formulazioni trova un semplice codifica in un linguaggio come MATLAB, molto utilizzato sia in ambito accademico che professionale per svolgere calcoli di natura matriciale. Il software ideato da Matworks, presenta una struttura in C, che ne conferisce una notevole velocità agli script grazie alla tipica allocazione dei dati in memoria, riuscendo ad essere più veloce rispetto ad algoritmi programmati in altri linguaggi, anche di ordini di grandezza.

È un software versatile nelle applicazioni ingegneristiche, utilizzato da centinaia di migliaia di aziende in tutto il mondo, capace di calcoli anche molto complicati, come analisi ad elementi e differenze finite e simulazioni di prestazioni di materiali. Presenta la possibilità, inoltre, di creare applicativi che, seppur operano con la logica della casa madre, sono svincolati dal programma stesso e possono esistere anche su computer senza la presenza del software originale, come vere e proprie app. Purtroppo gli anelli deboli del programma sono la struttura chiusa e la poca versatilità del tipo di codice, nonché un costo di esercizio e di abbonamento molto elevati.

L'azienda ha così deciso di svincolarsi dalle dipendenze della casa di software americana, convertendo l'applicativo di cui ha bisogno in fase di testing, portandolo in un ambiente opensource e facilmente modificabile ed implementabile in futuro. La dirigenza ha scelto Python e nel paragrafo successivo ne verranno elencate le caratteristiche tecniche di funzionamento.

5.1 Python

Python è un linguaggio di programmazione estremamente flessibile, utilizzato in svariati campi, tra i quali possiamo citare la programmazione ad oggetti, la possibilità di sviluppare applicazioni distribuibili all'utenza, simulazione e computazione numerica. Di non poco conto risulta essere la capacità di creare interfacce grafiche di qualsiasi tipo in modo semplice, potendosi così adattare a tutte le tipologie di utente. I suoi script variano dagli utilizzi nei campi più disparati, come quello per lo sviluppo di elementi per il web.



Figura 40: Logo Python

Un'ulteriore applicazione degna di nota è la capacità di esercitare data science e machine learning sfruttando questo linguaggio di programmazione. L'importanza di queste funzioni sta dando molto risalto a Python, poiché il maneggiare e poter studiare una enorme mole di dati classificandola come utente decide è implementabile in numerosi ambiti della nostra vita. Basti pensare che algoritmi di data science e machine learning

sono alla base delle nostre scelte quotidiane, da cosa possiamo comprare sul web nei siti di e-commerce, ai film e serie tv suggerite sulle piattaforme di entertainment, fino ad utilizzi nell'ambito banking, sulla concessione o meno di prestiti, mutui, ecc.

Tipiche dei suoi script sono le variabili non indicizzate ad una solamente ma a più di esse (enorme differenza con il linguaggio proveniente da Matworks) e la possibilità di aggiornamento continuo, operato tramite librerie. È infatti possibile aggiornare le proprie capacità di programmazione, e di qui le proprie possibilità di creare i più svariati programmi, tramite l'implementazione di librerie preimpostate, scaricabili facilmente tramite il DOS del sistema operativo. Queste sono dei pacchetti installabili, creati dalla community online dello stesso sistema, creando così una logica di aggiornamento e miglioramento continuo di Python. Questo costante aggiornamento del sistema, è possibile riscontrarlo nelle moltissime release del programma rilasciate da quando è sul web, ognuna migliorata rispetto alla precedente; siamo così arrivati alla terza generazione e alla decima release (rilasciata a maggio 2021). In questo

paragrafo verranno così elencati tutti i passaggi che hanno portato a trascrivere il codice precedentemente presentato, partendo dall'implementazione delle funzioni più semplici fino alla costruzione dell'interfaccia grafica.

La prima fase prevede di scaricare ed installare gli strumenti base dal sito originale, identificando la corretta versione per la tipologia del proprio sistema operativo. Verranno importati nel nostro PC INDLE, che è un primo sistema per cominciare a codificare in linguaggio Python, PIP, il sistema per installare le varie librerie ed arricchire la nostra esperienza di coder, nonché la documentazione necessaria ad iniziare. Una volta completata l'installazione, può cominciare il viaggio nell'esperienza Python.



Figura 41: Installazione Python

Inizializzare l'INDLE permette di avere tutto il necessario per cominciare a codificare. È di uso comune, non appoggiarsi a questo programma, ma utilizzare piattaforme di coding che si basano sulla sua logica, utilizzate poiché presentano sistemi di correzione automatica degli errori dell'utente, molto utili per gli utilizzatori alle prime armi. Sistemi come quello appena descritto ce ne sono molteplici come:

- Anaconda (utilizzato in questo caso)
- Jupiter

- Visual studio code
- Molti altri...

Installata Anaconda, ed in particolare Spyder (elemento della piattaforma che ci permetterà di codificare) si è pronti ad iniziare.

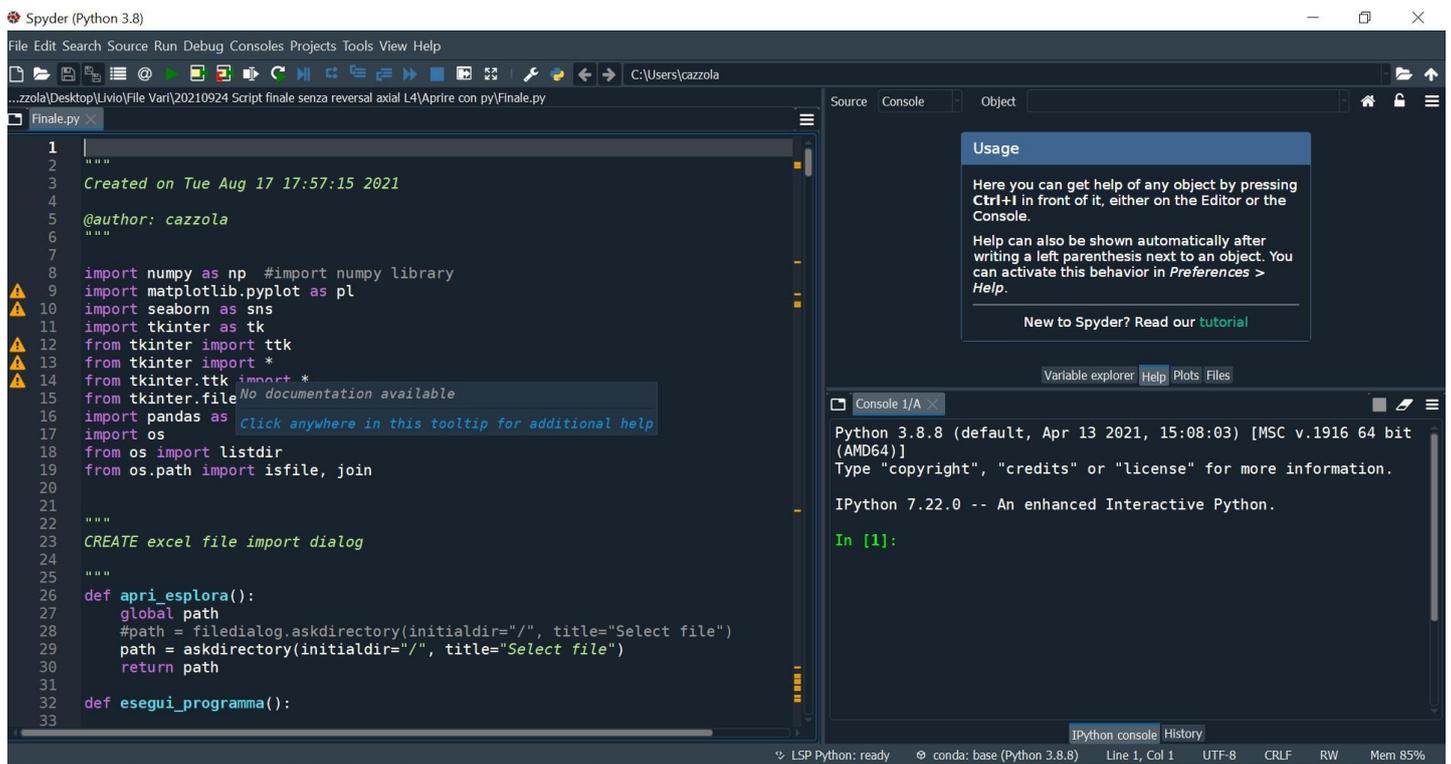


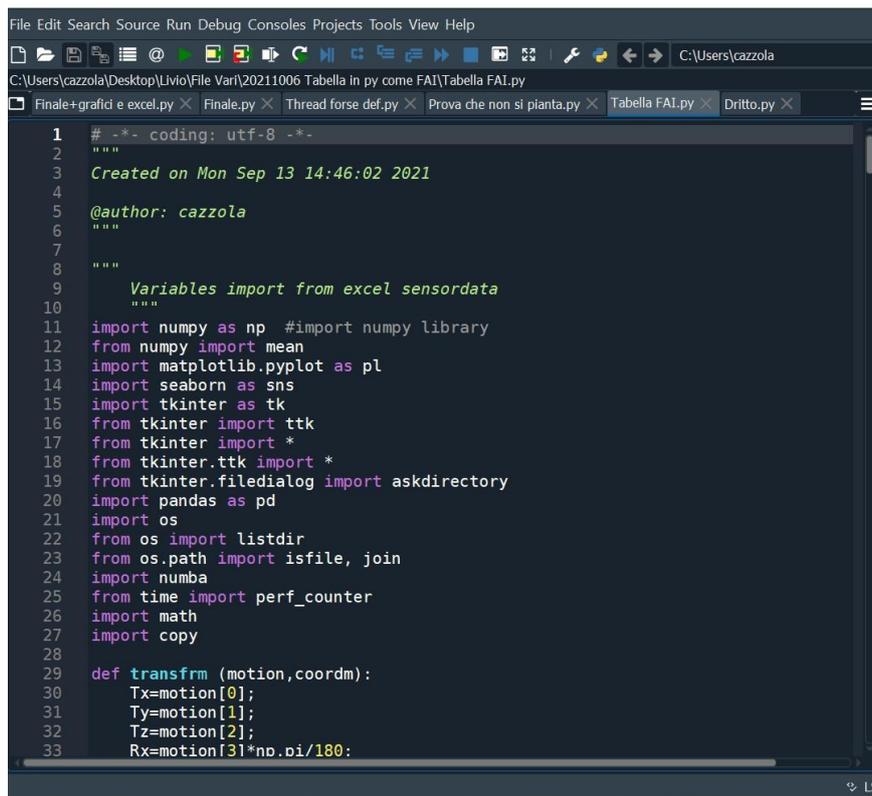
Figura 42: Schermata Spyder

Spyder è un IDE ovvero interactive development enviroment, nel quale sono presenti:

1. Un editor, ovvero è la porzione di programma dove il codice in Python vero e proprio viene scritto. Particolarmente utile risulta la funzione del completamento della scrittura, ovvero il software andrà ad interpolare ciò che stiamo digitando con le variabili/funzioni/librerie richiamabili dall'utente, per una velocità della stesura dello script amplificata. Un'ulteriore funzione è quella di segnalare eventuali errori che l'utente sta svolgendo, evidenziati con triangoli di segnalazione o linee colorate di giallo o rosso. I primi si rendono necessari quando il sistema non riconosce dei passaggi operati dal programmatore, che non costituiscono necessariamente degli errori. Un classico esempio può essere quello di variabili ancora da assegnare, ma già richiamate, oppure l'utilizzo di variabili costruite

utilizzando librerie non ancora richiamate, nonché librerie importate ma non usate nello script.

2. La seconda parte è costituita dalla console, un elemento virtuale dove è possibile monitorare il codice mentre è in run, visualizzandone il corretto completamento oppure visualizzando non solo l'errore, ma a che riga è presente e di che tipologia esso è. Questa implementazione permette di migliorare la capacità di scrittura, poiché è possibile così prevedere ulteriori errori nella stesura del testo.



```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Mon Sep 13 14:46:02 2021
4
5 @author: cazzola
6 """
7
8 """
9     Variables import from excel sensordata
10 """
11 import numpy as np #import numpy library
12 from numpy import mean
13 import matplotlib.pyplot as pl
14 import seaborn as sns
15 import tkinter as tk
16 from tkinter import ttk
17 from tkinter import *
18 from tkinter.ttk import *
19 from tkinter.filedialog import askdirectory
20 import pandas as pd
21 import os
22 from os import listdir
23 from os.path import isfile, join
24 import numba
25 from time import perf_counter
26 import math
27 import copy
28
29 def transform (motion, coordm):
30     Tx=motion[0];
31     Ty=motion[1];
32     Tz=motion[2];
33     Rx=motion[3]*np.pi/180;
```

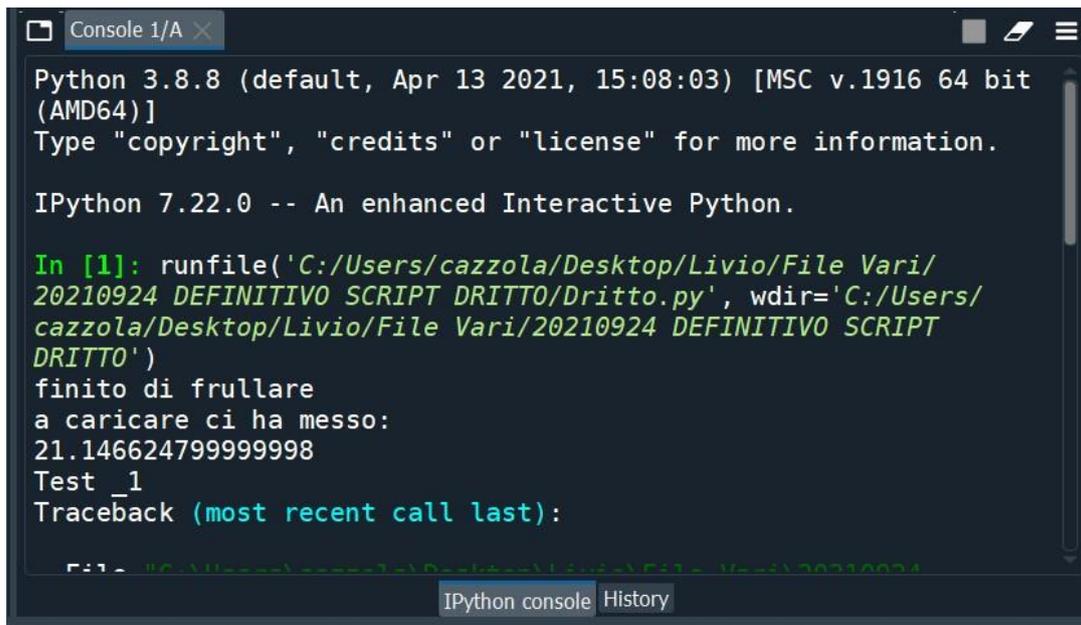
Figura 43: Console Spyder

3. Il Variable explorer ci permette di monitorare le variabili generate dal nostro programma, visualizzandone non solo l'entità, ma anche il tipo, l'allocazione in memoria e la dimensione. Operando con calcoli matriciali, questo pannello è molto utile, specie in fase di controllo errori, poiché permette di monitorare la dimensione di vettori creati, in questo linguaggio di programmazione, molto meno intuitivo rispetto a Matlab.

Name	Type	Size	Value
a	int	1	5
c	float	1	0.0
cip	float	1	37.842366
column	int	1	7
cosrx	Array of float64 (1,)		[0.99999999]
cosrxmcosrymcosrz	Array of float64 (1,)		[0.99999999]
cosrxmcosrymcosrz	Array of float64 (1,)		[0.99999999]

Figura 44: Variable explorer

4. In rapida successione in sequenza al variable explorer vi è l'help (strumento molto importante per quanto riguarda l'utilizzo di determinate funzioni, poiché permette di capirne il funzionamento e l'implementazione), la funzione di plot (per visualizzare gli eventuali grafici formati tramite il programma scritto) e la sezione file (che vede la visualizzazione del file utilizzato in quel momento ed il percorso in cui è installato python e le sue librerie utilizzate).
5. Ulteriori due implementazioni di particolare importanza sono il code analyzer, algoritmo interno al programma che interpreta la scrittura dello script in atto e prova a dare consigli utili per una sua incorporazione più semplice ed efficace, nonché l'history panel, dove vengono visualizzati i comandi operati dall'operatore e visualizzati eventuali messaggi di errore/print editati nello script.



```
Python 3.8.8 (default, Apr 13 2021, 15:08:03) [MSC v.1916 64 bit (AMD64)]
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.

IPython 7.22.0 -- An enhanced Interactive Python.

In [1]: runfile('C:/Users/cazzola/Desktop/Livio/File Vari/20210924 DEFINITIVO SCRIPT DRITTO/Dritto.py', wdir='C:/Users/cazzola/Desktop/Livio/File Vari/20210924 DEFINITIVO SCRIPT DRITTO')
finito di frullare
a caricare ci ha messo:
21.146624799999998
Test _1
Traceback (most recent call last):
File "C:\Users\cazzola\Desktop\Livio\File Vari\20210924
```

Figura 45: Console Spyder

Una volta a conoscenza del funzionamento, è possibile cominciare la stesura del programma.

5.2 Coding

Il successivo paragrafo si addenterà nella logica utilizzata nel convertire il programma. Verranno così elencate le principali caratteristiche che il codice deve utilizzare ed avere per un corretto funzionamento, passando così ad evidenziare in che modo esse vengono utilizzate. Come precedentemente spiegato, Python lavora utilizzando librerie preimpostate, quindi ogni singola funzione che il nostro software dovrà compiere sarà subordinato al download ed implementazione delle stesse. Si rende così necessario capire come queste lavorino per poter conoscere a fondo questa sintassi così particolare.

L'obiettivo è realizzare un software che, essendo staccato da ogni logica di programma Python, si può eseguire su ogni computer, senza quindi aver necessariamente installato nessun compiler. Questa applicazione dovrà essere auto-estraente, installandosi nella cartella designata dall'utente. Una volta completata quest'operazione, deve poter aprire una finestra in cui è possibile eseguire delle operazioni o banalmente leggere un documento in formato .PDF in cui ne è spiegato il funzionamento. Qualora l'utente sia già stato addestrato sul suo funzionamento, deve poter

selezionare i test da processare. Si ricorda che i test derivano da acquisizioni di prove su strada relative al movimento del soffierto elaborato grazie a sensori a filo posizionati sotto la vettura; questi verranno salvati in formato .XLSX e posizionati in una cartella identata come "Maneuvers" ed una volta selezionata dovrà essere eseguito il programma tramite l'apposito bottone sull'interfaccia.

Il programma elaborerà i dati secondo l'algoritmo robotico precedentemente descritto ed analizzato, per poi salvare i risultati in diversi formati. Una parte dei risultati, dovranno essere salvati in formato .TXT per una analisi tramite il software di calcolo a fatica FeSafe, descritto nel successivo capitolo, mentre un'altra parte in formato .XLSX. L'insieme di queste operazioni completa la nuova applicazione codificata, creata durante il mio periodo di tesi in Flexider Automotive Italy. Nei successivi paragrafi vi sarà una presentazione delle librerie e della logica di programmazione alla base dello script depositato nel database dell'azienda tedesca.

5.2.1 Tkinter

La prima libreria di cui si parlerà è quella sopra citata: Tkinter. Essa è un modulo scaricabile dal server online di Python, che permette la creazione di interfacce grafiche di qualsiasi dimensione e caratteristica. Per realizzare una corretta GUI (grafical user interface) è fondamentale creare una finestra interattiva, creata dal codice, con cui l'utente finale può confrontarsi, senza che debba operare sullo script stesso. Questa operazione genererebbe difficoltà cognitive ai meno esperti, nonché una più probabile fonte di errori e perdita di dati. Tkinter non è l'unica libreria che permette la codifica di interfacce grafiche: come quella appena descritta vi è PyQt5, creata per il Qt framework, permette una incredibile varietà di variazioni per la nostra finestra di dialogo, e molte altre (le cito brevemente poiché non hanno una completezza come le due precedenti) come PySide2, Libavg, ecc.

Le prima due sono le più complete, ma con differenze abissali per quanto riguarda la diversità nella programmazione (PyQt5 richiede uno script molto più articolato, specifico per quella libreria e diverso da tutte le altre in Python) e cura dei dettagli della GUI, dove in questo caso la seconda è nettamente più user friendly. Un ulteriore dettaglio non sottovalutabile è la diversità di reazione a script in cui sono presenti cicli iterativi:

- Tkinter ha dei problemi di fluidità, in quanto l'attesa della risoluzione di lunghi cicli iterativi va a freeze la finestra creata, rendendo impossibile lo svolgimento contemporaneo di questi calcoli lunghi e complicati e del mantenimento dell'interfaccia grafica sullo stesso processore del PC;
- PyQt5 ha una struttura diversa, che permette una diversa allocazione dei bit in memoria, rendendo fluido l'intero processo.

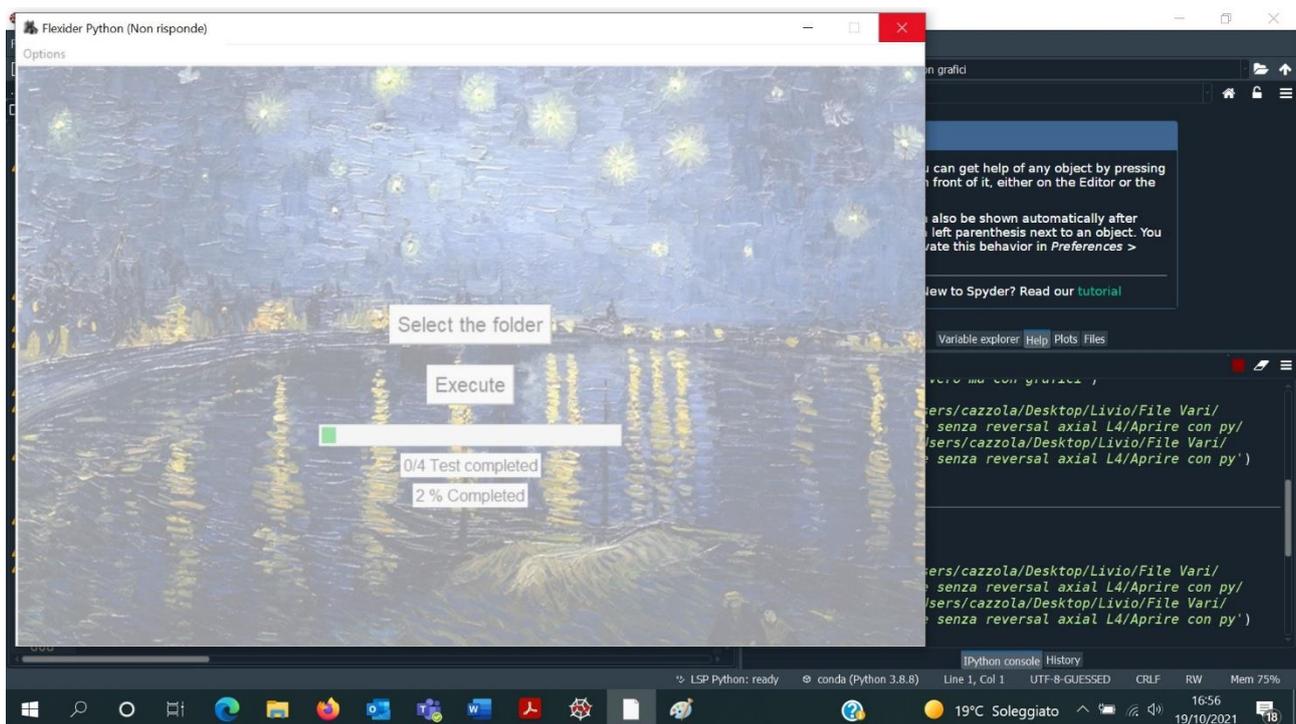
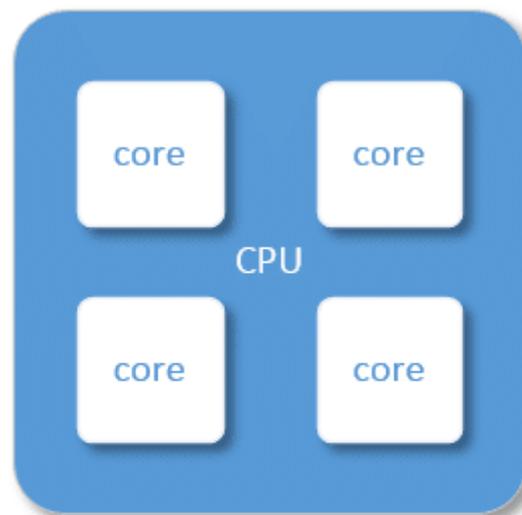


Figura 46: Errore GUI Python

La scelta per quanto riguarda la progettazione della GUI è ricaduta sulla libreria Tkinter, grazie alla sua semplicità nel coding. L'aspetto di maggiore tensione appena descritto ha rappresentato un aspetto di studio approfondito, a causa della, questa sì, difficile implementazione sullo script principale. A causa dell'utilizzo di cicli while nella parte successiva del codice, si è scelto di utilizzare il Multi-Threading. Questo è un sistema per un diverso utilizzo della CPU durante lo svolgimento di un processo dato dallo script. Per avere un'idea corretta dei problemi trattati va spiegata la struttura della CPU e come questa agisce durante un qualunque processo dato da un sistema operativo.

La CPU (central processing unit) è un elemento fondamentale del nostro computer, che risolve tutte le computazioni che il nostro sistema richiede. Le operazioni sono svolte dai Core della CPU, ovvero unità fondamentali della stessa, che la formano. I Pc moderni possono possedere processori mono core, così come multicore. Il numero di core all'interno della CPU determina quante operazioni può svolgere il processore contemporaneamente. Se esso è single core può farne una, se è dual core, due, e così via. Intel, brand numero 1 a livello mondiale di microprocessori, ha appena lanciato i nuovi dispositivi da 6 core. Un ulteriore parametro importante per indicare le prestazioni è la frequenza di clock, ovvero il numero di cicli di calcolo operati dalla CPU ogni secondo. Più questo risulta elevato, più elaborazioni riuscirebbe a fare nell'unità di tempo; per cui per un processore ad alte performance vorrei avere il numero di core e numero di clock più alti possibile, per avere la possibilità di fare più operazioni contemporaneamente e più velocemente possibile.



Quad-core CPU

Figura 47: Schema suddivisione CPU

Analizzando nel dettaglio un core, inserendo un thread nel nostro programma lo suddivideremo in due azioni di calcolo che il nostro processore deve operare, slegandolo dal dover eseguire tutto lo script dall'inizio alla fine. Questo permette di salvaguardare la parte grafica da eccessivi rallentamenti che ne comprometterebbero la fluidità. Infatti, nel nostro caso inserendo un thread nella parte di calcolo, prevedendo essa dei lunghi cicli iterativi, permettiamo alla CPU di processare a poco a poco quelle matrici, così come di aggiornare la posizione della GUI. Esso non prevede di

spostare le operazioni da core a core, ma eseguire diverse funzioni successive, senza aspettare necessariamente che siano finite.

Come evidenziato dalle illustrazioni, il thread è stato posizionato una volta eseguito il comando di esecuzione, permetto così di svincolare la parte grafica dal calcolo in corso. Completando il posizionamento del thread nel codice, la restante parte prevede l'implementazione di label di interlocuzione con l'utente e pulsanti di comando, nonché un progress bar che evidenzia lo stato del post processing in atto.

5.2.2 Pandas

Pandas è una libreria di Python, specificatamente precostruita per i suoi utenti per la manipolazione di dati, tabelle, serie numeriche. Nel nostro caso è un potente mezzo per la costruzione di dataframe, ovvero vettori di oggetti da poter così importare dall'esterno e manipolare in ambiente di programmazione. È di fondamentale importanza l'utilizzo di librerie come quella appena descritta poiché permette l'utilizzo di file excel in cui sono presenti i dati relativi ai sensori utilizzati durante la prova, nonché il salvataggio esterno in file per l'analisi a fatica.

5.2.3 Numpy

Numpy è un altro elemento utilizzato nello script prodotto. Si occupa di processare vettori e matrici di elevate dimensioni, sia come numero di elementi inglobati, sia appartenenti ad R^3 . NumPy si rivolge all'implementazione di riferimento CPython di Python, che è un interprete di bytecode non ottimizzante. Gli algoritmi matematici scritti per questa versione di Python spesso vengono eseguiti molto più lentamente degli equivalenti compilati. NumPy affronta il problema della lentezza in parte fornendo array multidimensionali e funzioni e operatori che operano in modo efficiente sugli array; l'utilizzo di questi richiede la riscrittura del codice, principalmente loop interni, utilizzando NumPy. Come esplicitato, python ha degli evidenti limiti di velocità raggiungibili rispetto ad altri linguaggi di programmazione, a causa della sua natura non unicamente improntata a calcoli matriciali.

Va inoltre osservata una diversa allocazione dei dati in memoria, con un utilizzo più marcato di bit e dunque un rallentamento intrinseco della capacità di calcolo del processore. Importante è anche la gestione delle variabili da parte di Python e di conseguenza come vengono richiamate utilizzando questa libreria. A differenza di Matlab, l'uguaglianza tra due elementi costituiva che il secondo prendeva il valore del primo. In uno script di questo genere, l'uguaglianza vale sia per il valore che per la tipologia (stringa, tupla, array, numero intero/decimale) ma crea un legame tra le due, dove se dovessi andare a modificare il contenuto di una, andrei a modificare anche quella con cui ha avuto l'uguaglianza. È necessario tenerlo in considerazione poiché è facile commettere sviste che portino a errori nella programmazione ed implicitamente nel post-processato.

5.2.4 Os

Os è una libreria che mette in interconnessione la nostra applicazione con gli altri elementi del sistema operativo in cui stiamo operando. Letteralmente operating system, permette di identificare tutti quei percorsi file necessari allo script, di creare/interagire/cancellare directory presenti nel computer e molto altro.

5.2.5 Matplotlib/seaborn

Queste due librerie sono presenti nel linguaggio python per permettere agli utenti di creare grafici di ogni tipologia e caratteristica. I plot generati possono essere successivamente salvati in ogni tipologia di formato, conservando così l'istantanea dei dati processati in quel momento. Selezionando un insieme di dati per ogni asse a disposizione, è possibile costruire agilmente in legame tra diversi tipi di dati; nel nostro caso si è utilizzato una relazione tra il tempo e le traslazioni/rotazioni a cui il componente è sottoposto durante l'esercizio del test sulla ista privata a Balocco. Una differenza degna di nota tra i due sistemi riguarda la diversa sintassi che porta ad avere grafici di diversa qualità (più alta nel caso di seaborn) e processati e salvati in minor tempo assoluto. Spesso però, la semplicità del primo vince sulla precisione della seconda libreria elencata.

5.2.6 PyInstaller

Ultimo ma non per importanza vi è l'utilizzo della libreria sopra citata. PyInstaller è un tool di Python che permette di creare, tramite il DOS del sistema operativo installato, un file eseguibile .EXE con cui lanciare lo script da qualunque computer, senza che esso abbia in memoria lo stesso linguaggio di programmazione. È uno strumento molto utile per poter utilizzare in un ambiente di lavoro un codice intercambiabile tra i dispositivi e facilmente modificabile. Un ulteriore elemento di analisi può ricadere nella scelta di semplificare ulteriormente il passaggio di dati tra computer aziendali. La libreria descritta prevede di formare numerose directory in cui mettere elementi funzionali all'esercizio dello script in solitaria, ma difficilmente analizzabili e compresi da un utente non esperto. Per ovviare a questa opzione, è possibile creare un archivio autoestraente, anch'esso .exe, tramite la applicazione gratuita NSIS. È un programma che permette la creazione di un suddetto archivio da una cartella compressa precedentemente formata. Avremo così cura di creare, tramite la libreria tutto il necessario per avere un file Python autonomo, comprimere la cartella in cui è presente il file, e dopo azionamento di NSIS, avremo il risultato comodo nella cartella di sistema selezionata.

Una volta compreso appieno il funzionamento degli elementi fondamentali utilizzati nello script, si descrive brevemente le funzioni implementate in esso grazie alle librerie installate. Una volta cliccata l'icona del programma, è aperta una finestra in cui sono presenti delle label di benvenuto, una tabella e dei pulsanti interattivi, interamente progettati con la libreria Tkinter.

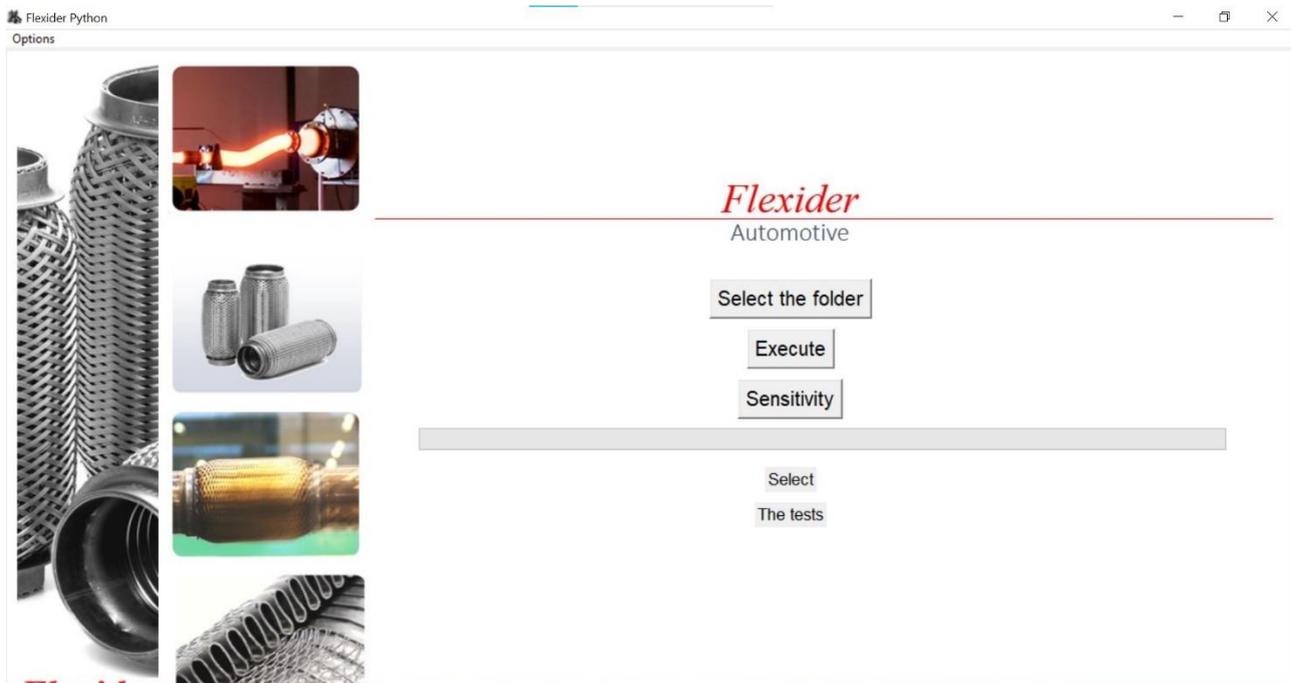


Figura 48:GUI applicativo

```

576
577 #Window creation
578 finestra = Tk()
579
580
581 finestra.title("Flexider Python")
582 finestra.iconbitmap('favicon.ico')
583
584 #instert background
585 finestra.geometry("900x600")
586 canvas=Canvas(width=900,height=600)
587 bg=tk.PhotoImage(file="sfondo2.png")
588 canvas.create_image(0,0,image=bg, anchor=NW)
589 canvas.place(anchor = NW)
590
591
592 text=StringVar()
593 perc=StringVar()
594 #buttons creation
595 b1=tk.Button(finestra, text='Select the folder',command=apri_esplora,font=("Ari
596 b1.place(anchor = CENTER,relx = 0.5, rely = 0.5,y=-30)
597
598

```

Figura 49:Script di creazione GUI

Lo sfondo e l'icona del programma sono stati anch'essi preselezionati ed implementati tramite Canvas, funzione specifica di Tkinter per manipolare file .jpg. Premuto il pulsante di selezione dati, è necessario andar nella directory del file cui si intende processare e selezionare la cartella "Maneuvers", folder standardizzata per ogni test. Al suo interno saranno presenti almeno due file excel:

- Un sensordata: file excel contenente tutte le informazioni relative ai sensori. Le informazioni riguardano la geometria scelta per la prova, ovvero la reciproca orientazione nello spazio degli stessi. Scelta la direzione di propagazione dei sensori a filo, è presente una sezione contenente le lunghezze rispettive dei collegamenti nonché la distanza tra le due flange metalliche, misurata in sede di montaggio da un tecnico specializzato.
- Test: ci saranno tutti i test eseguiti nella prova in esterna eseguita nel circuito privato di Balocco (NO) da un team aziendale di guidatore/acquisitore esperti. I dati, acquisiti come definito precedentemente, sono condensati in file excel formati da sette colonne corrispondenti alle diverse lunghezze dei sei sensori durante la prova. La prima colonna rappresenta invece il tempo complessivo della prova, sezionato nelle caselle a seconda della frequenza di campionamento della strumentazione.

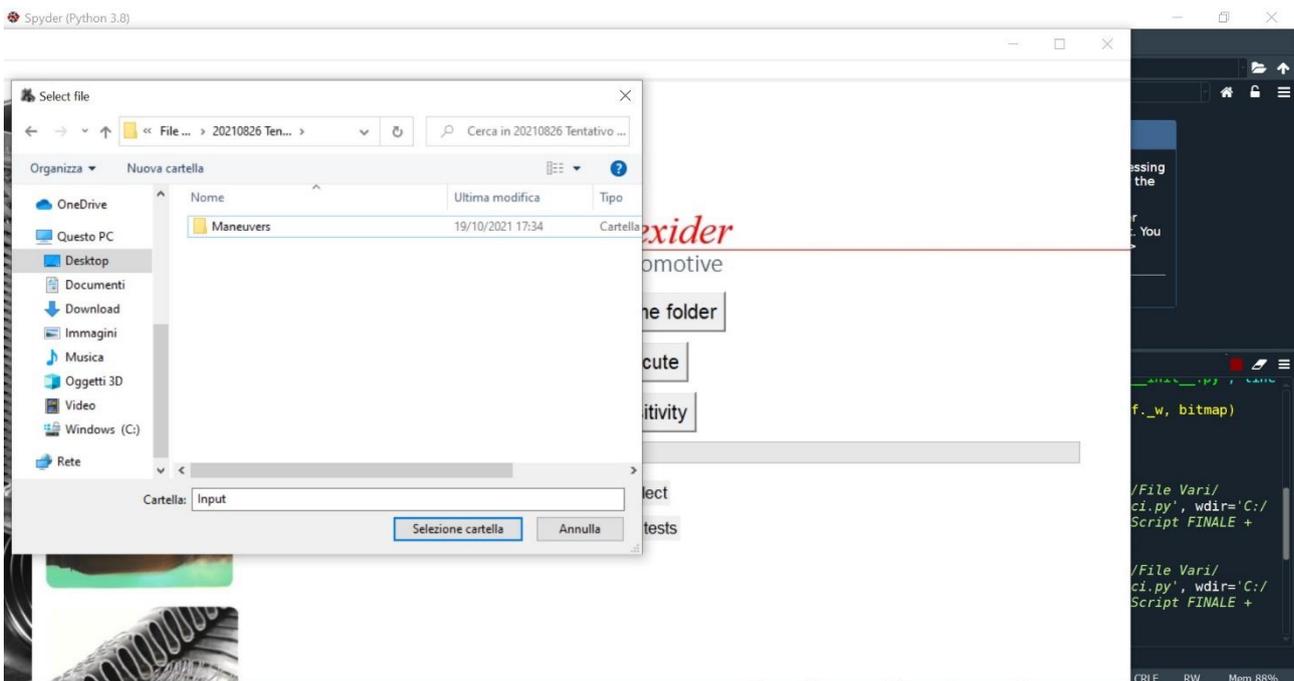


Figura 50:Selezione cartella test

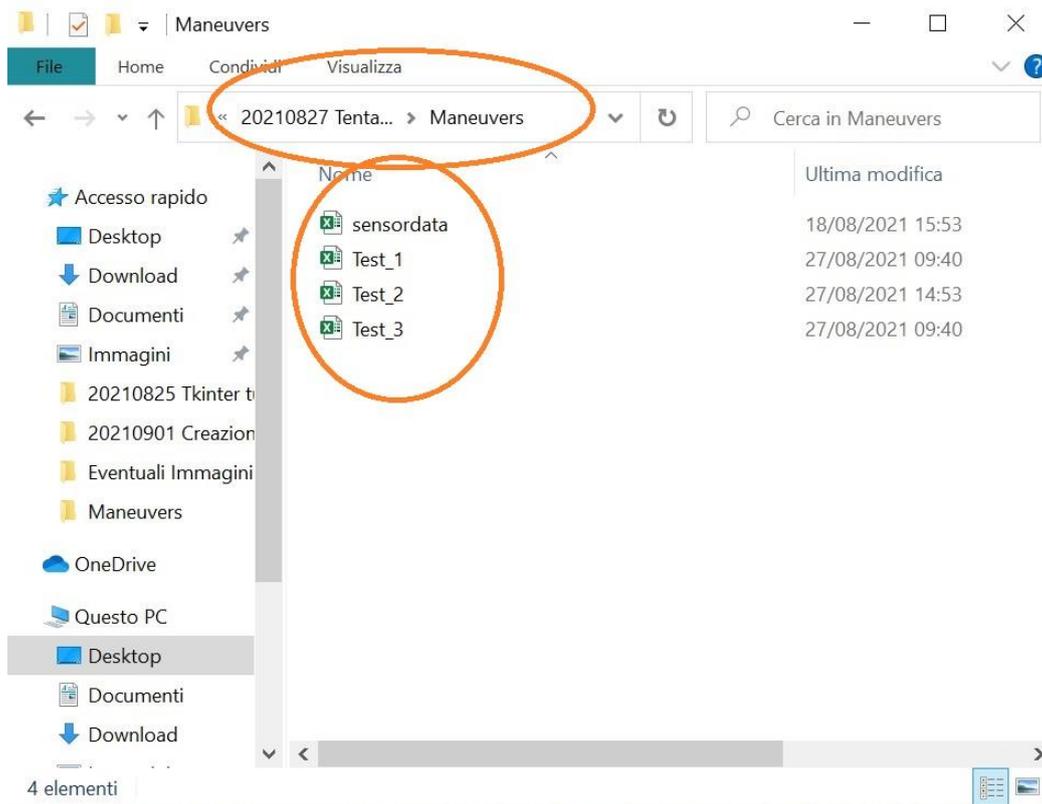


Figura 51:Elementi presenti nella cartella selezionata

La sequenza di azioni appena descritta è fondamentale per un proseguo corretto. Essendo un algoritmo un qualcosa che ripete costantemente le azioni identate nel suo script, l'utente deve ricreare delle situazioni sempre ripetibili in cui il sistema possa ritrovarsi ogni volta e ripetere facilmente le operazioni designate. Per questo motivo, non importa quale sia il nome dei test operati, ma per la corretta funzionalità, deve esserci un sensordata corretto ed aggiornato che, insieme con le prove da analizzare, sia in questa cartella nominata "Maneuvers".

Discorso analogo può essere fatto per la struttura del file da analizzare, le cui colonne (ed i loro relativi significati fisici) dovranno essere sempre posizionati nello stesso ordine. Anche per il file con i dati dei sensori, è fondamentale che le celle interessate dal calcolo siano fisse e costanti, poiché l'algoritmo accederà al valore delle stesse con puntualità. Un cambiamento di ognuno degli elementi descritti comporterà un errore a livello di post-produzione e relativo problema per le successive analisi a fatica.

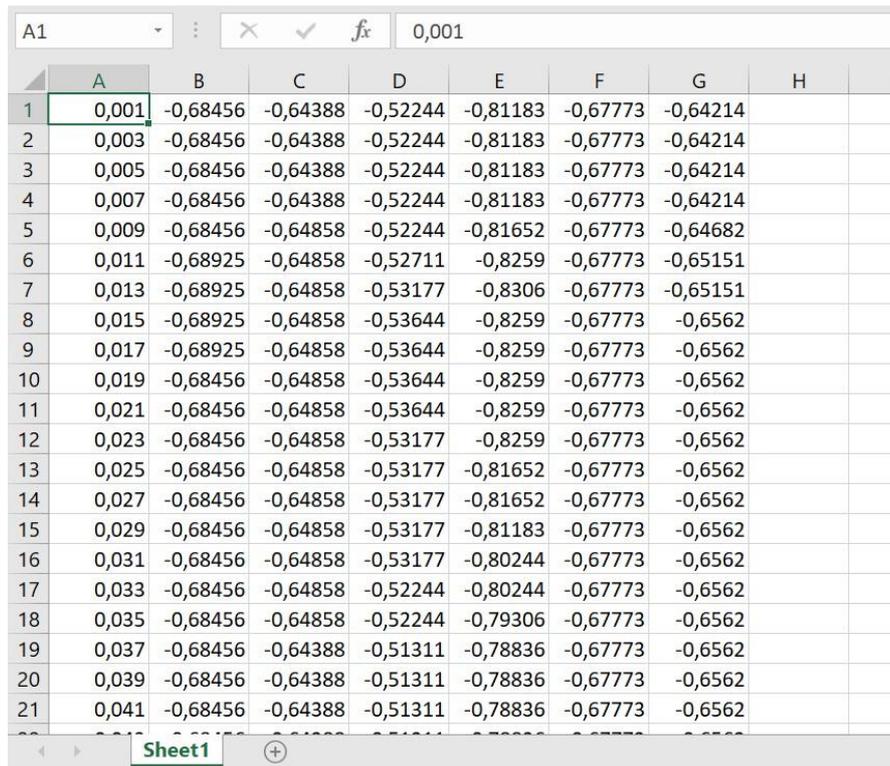


Figura 52:Struttura file di test

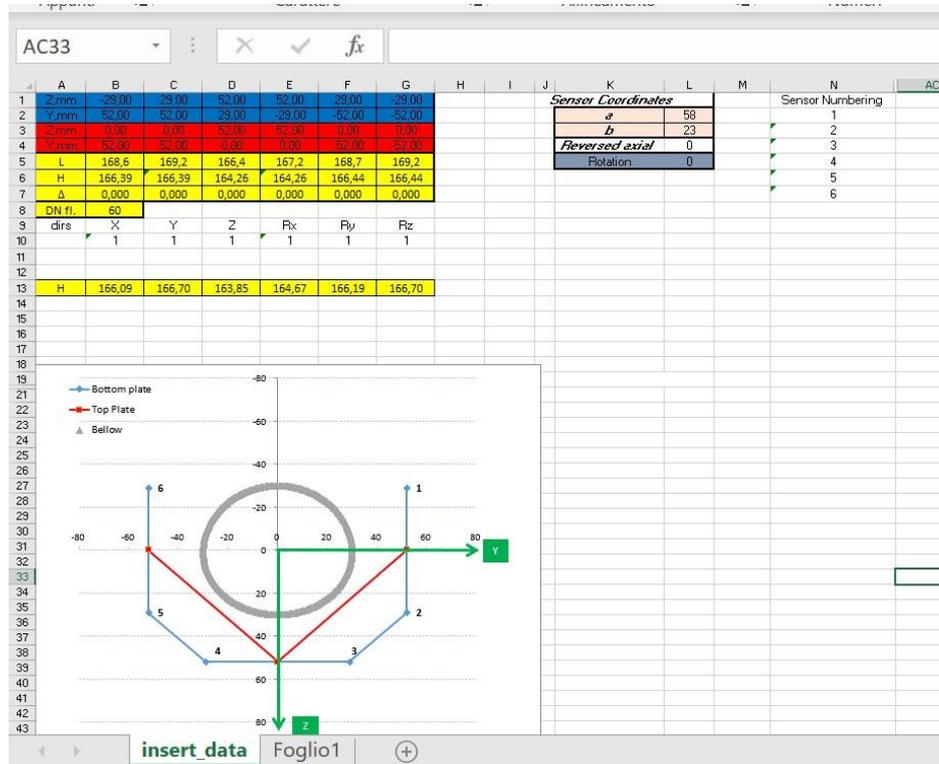


Figura 53:Struttura Sensordata

A questo punto è possibile operare due possibili operazioni possibili: eseguire il programma di post-processamento o quello di controllo della sensibilità dei dati di partenza. Per quanto riguarda il codice relativo al post processing dei dati, avverrà in salvataggio interno al programma del sensordata e dei successivi test, nonché una creazione delle successive cartelle di file, dove verranno successivamente immesse le documentazioni relative ai risultati. I file verranno così estrapolati, verranno salvate le lunghezze relative ai vari fili, completata la matrice di rotazione e, tramite un calcolo secondo la cinematica inversa della robotica, completato un vettore di sei componenti in cui sono presenti le tre rotazioni e le tre traslazioni dovute a quella diversità di lunghezze riferite all'offset iniziale.

Una volta completato per tutto il test, si passerà a quello successivo e così via. Verranno esportati in file formato excel i valori significativi di ogni test (massimo, minimo, media) e i valori globali del test, a cui vanno aggiunti dei file di test in cui vengono semplicemente elencati rispettivamente rotazioni e traslazioni per ogni tempo di campionamento del test. L'ordine e la pulizia di questa fase sono fondamentali per poter operare con semplicità nella fase successiva, quella del calcolo a fatica e stesura del report finale per il cliente.

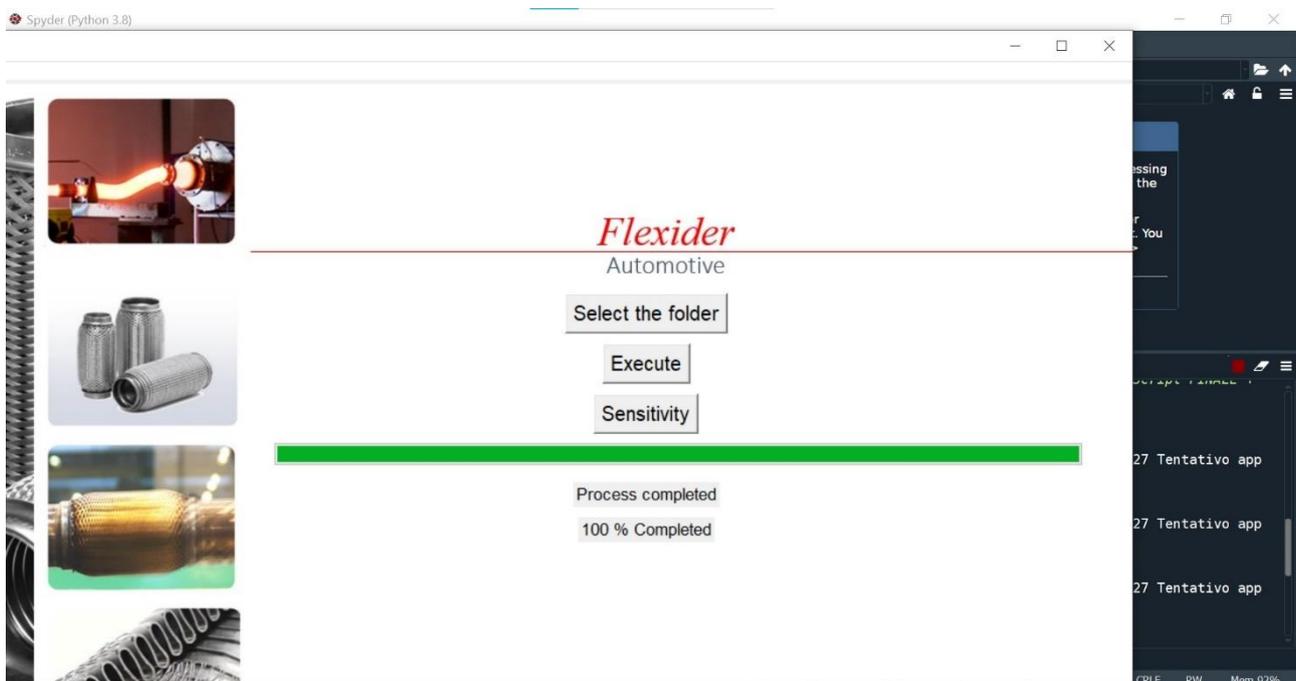


Figura 54: Processo Completato

Nome	Ultima modifica	Tipo
Input	19/10/2021 17:47	Cartella di file
Maneuvers	19/10/2021 17:46	Cartella di file
Results	19/10/2021 17:47	Cartella di file
TXT_file	19/10/2021 17:47	Cartella di file
xlsx Results	19/10/2021 17:47	Cartella di file

Figura 55: Risultati nella cartella preselezionata

Un'ulteriore scelta per l'utente, non alternativa alla precedente, riguarda l'analisi della sensitività della geometria dei sensori posizionati sotto vettura durante i test. È stato compilato uno script ad hoc che salva internamente all'ambiente Python queste numerazioni e, considerando anche le lunghezze iniziali dei sensori a filo e la distanza tra le flange solidali al soffiutto, analizza se le traslazioni e rotazioni, modificate volutamente di 0,05 mm potevano influire sul post processamento effettuato nell'altro script. Tramite funzioni di trasformazione e matrici di rotazione si plotteranno i risultati nella tabella presentata nella finestra generale di funzionamento del programma. La colorazione delle celle sarà diversa a differenza che i valori siano sopra (rosso) o al di sotto (verde) di valori specifici di rotazione e traslazione. Essi sono stati contabilizzati come errori non invasivi se le prime traslazioni sono al di sotto di 0,8 mm e le rotazioni siano inferiori a 0,2 mm. Una volta completato il procedimento, è possibile scegliere se processare altri test, selezionando la cartella con l'apposito pulsante, oppure se uscire, utilizzando il menù a tendina per chiudere il programma.

L'ultima operazione da effettuare prima di deliberare l'algoritmo in modalità autonoma sui Pc aziendali è quella di creare l'oggetto auto-estraente, con l'apposita libreria descritta in precedenza. Formata una cartella in cui sono presenti non solo lo script, ma anche tutti i file che esso richiama (icone, immagini, file di ogni tipologia, ecc.), si lancia il DOS del sistema operativo interessato, selezionando la directory corrente e eseguendo il semplice comando: "pyinstaller --onefile -w Nomefile.py".

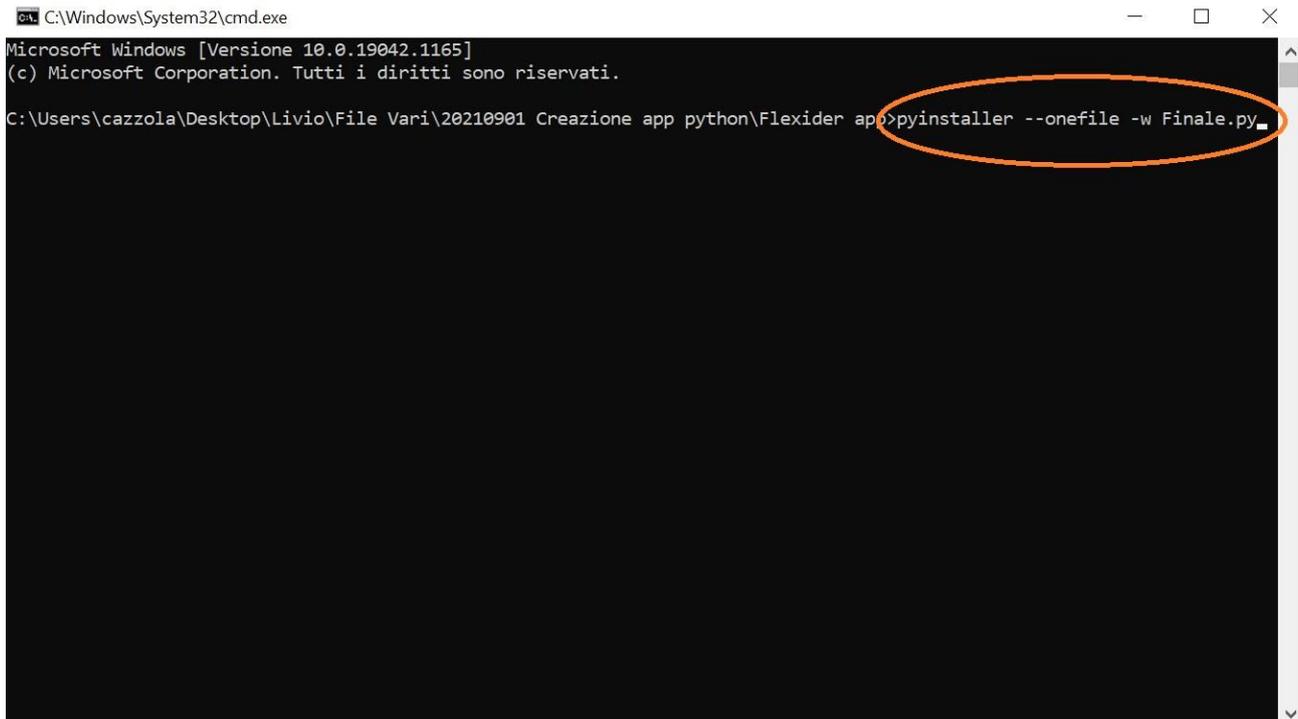


Figura 56:Utilizzo libreria Pyinstaller

Nella frase appena digitata, la prima parola rappresenta la libreria richiamata, la seconda il fatto che devo mettere tutto all'interno di un solo file di scrittura ("-w") e l'ultimo è il nome dello script interessato. Generato il file è possibile convertirlo in un'applicazione autoestraente tramite il software NSIS; basta creare una cartella compressa e azionare l'apposita funzionalità del software per avere così un file .EXE pronto per l'uso. Nelle immagini successive è rappresentato il procedimento in sintesi.

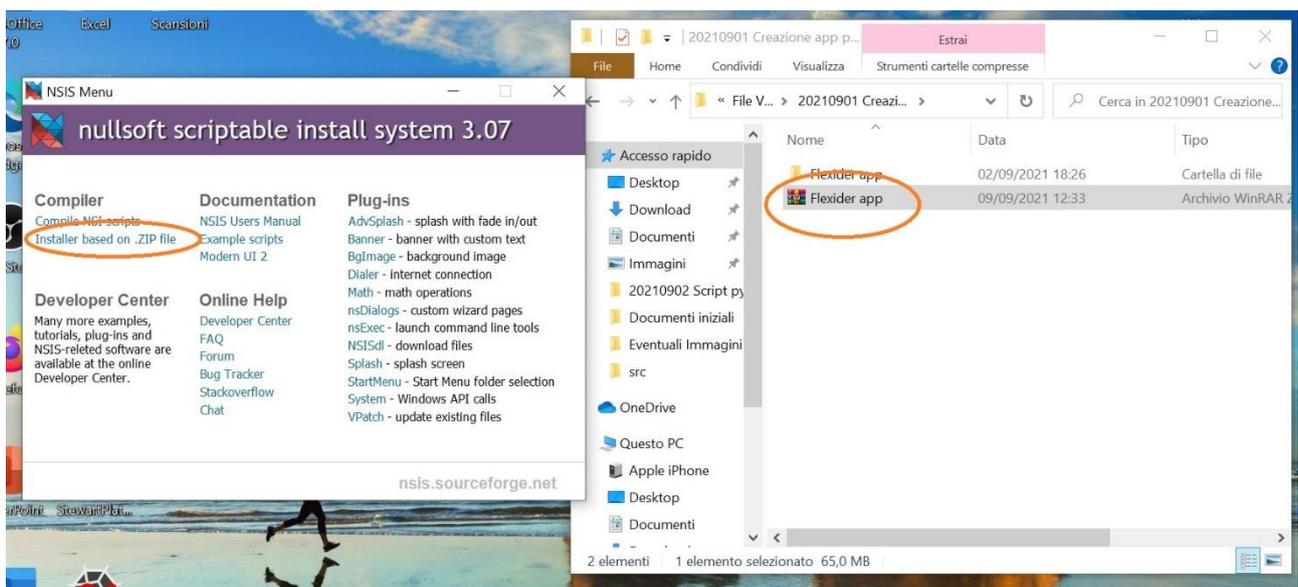


Figura 57:Utilizzo NSIS

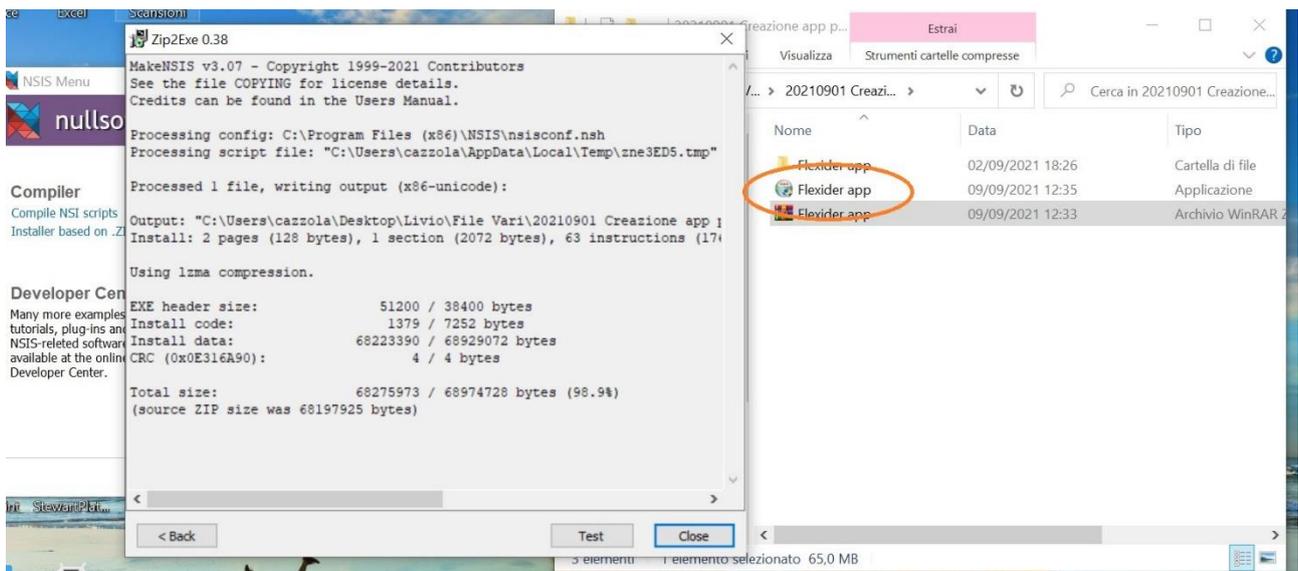


Figura 58: Creazione Applicazione.exe

6. Progettazione a fatica

L'ultima sezione di questo elaborato riguarda l'analisi dei dati post processati, utilizzata per consolidare la conoscenza sul prodotto e sulle sue prestazioni, nonché fornire al cliente un report aggiornato sul prodotto concordato in fase di acquisizione commessa. Questa ultima parte risulta fondamentale per il mantenimento di alti standard di produzione e di customer care, alla base della filosofia di lavoro dell'azienda. Il modus operandi che percorrerà questo settore lavorativo si incentra sull'analisi dei dati provenienti dalle prove descritte in precedenza. La prima parte consisterà nell'analisi e processamento dei dati relativi alla prova su strada, nella quale alcuni dettagli descrittivi delle prove sono, come verrà descritto, fondamentali nella fase di costruzione del report al cliente.

Questi dati verranno successivamente trattati utilizzando l'algoritmo in Python appena descritto, dal quale è possibile ottenere le rotazioni e traslazioni della struttura durante l'arco della prova. L'ultima fase di questo processo riguarda la costruzione di un modello FEM, nel quale andremo a simulare la vita residua del flessibile.

La raccolta dei dati rappresenta una parte rilevante del lavoro da compiere. Come descritto nel capitolo 4, è cura dei tecnici specializzati dell'azienda l'applicazione del sistema sensoristico a bordo vettura, rispettando tutte le tolleranze e le connessioni tra gli elementi meccanici ed elettrici. Si utilizza IMC STUDIO, ambiente software modulare, integrato e flessibile per gli ingegneri del test & measurement. Supporta da semplici e rapidi compiti di acquisizione dati a prove automatizzate di lunga durata; è basato su oltre 20 anni di esperienza, con in mente il traguardo di voler migliorare i tempi di test e di sperimentazione. In particolare, nella prima fase di testing, si utilizza un suo prodotto, ovvero IMC WAVE, estensione dell'ambiente software imc STUDIO, pensata per un approccio integrato alla sperimentazione NVH; raccoglie gli standard industriali e internazionali della misura, dell'analisi del Rumore e delle Vibrazioni.

Impostato il sistema di flange e sensori sotto la vettura e collegati tutti i cablaggi CAN nella strumentazione è possibile dirigersi verso il circuito prestabilito per la prova. Come già descritto in precedenza, la destinazione cambia a seconda della vettura cliente; in generale le prove si conducono sul tracciato di Balocco, nella provincia di Vercelli, una città piemontese.

Una volta all'interno del circuito, vengono selezionati i percorsi da effettuare con il veicolo il cui soffietto è sotto analisi e ne vengono indicate le caratteristiche del manto stradale/percorso, nonché le ripetizioni riferite al percorso stesso. Questa operazione è fondamentale per correlare in fase di report finale il danno elaborato sulla manichetta ed il valore limite imposto dal costruttore su quella tipologia di situazione stradale. Molti dati importanti vengono registrati nel report della prova, quale la lunghezza di offset degli estensimetri, impossibile registrarli inizialmente tutti con la stessa lunghezza, e la loro geometria applicativa sotto vettura.

Laboratorio/Testing



Special grounds

Onda lunga 50+Cunette 50 (2 rip) Ripetizioni:300	✓
Onda lunga Dx 50+onda lunga Sx 50 (2 rip) Ripetizioni:300	✓
Buche Chrysler Ripetizioni:300	✓
Traversine 10 – 30 Ripetizioni:300	✓
Lastroni Ripetizioni: 300	✓

Figura 59:Sezione report dedicata ai percorsi

Effettuata la prova in loco, i dati vengono scaricati dal drive di IMC ed utilizzati in un altro software della casa americana: IMC Famos. L'utilizzo di questo programma consentirà la creazione del file Excel da post- processare con gli applicativi descritti nei precedenti capitoli, suddiviso in sette colonne, la prima delle quali è rappresentata dal tempo di campionamento e le successive dagli spostamenti occorsi ai sensori a filo.

Questa operazione di legame tra i canali dell'acquisitore e le lunghezze degli estensimetri è operata manualmente dall'utente o in modo automatizzato, tramite l'utilizzo di codici preimpostati per il software.

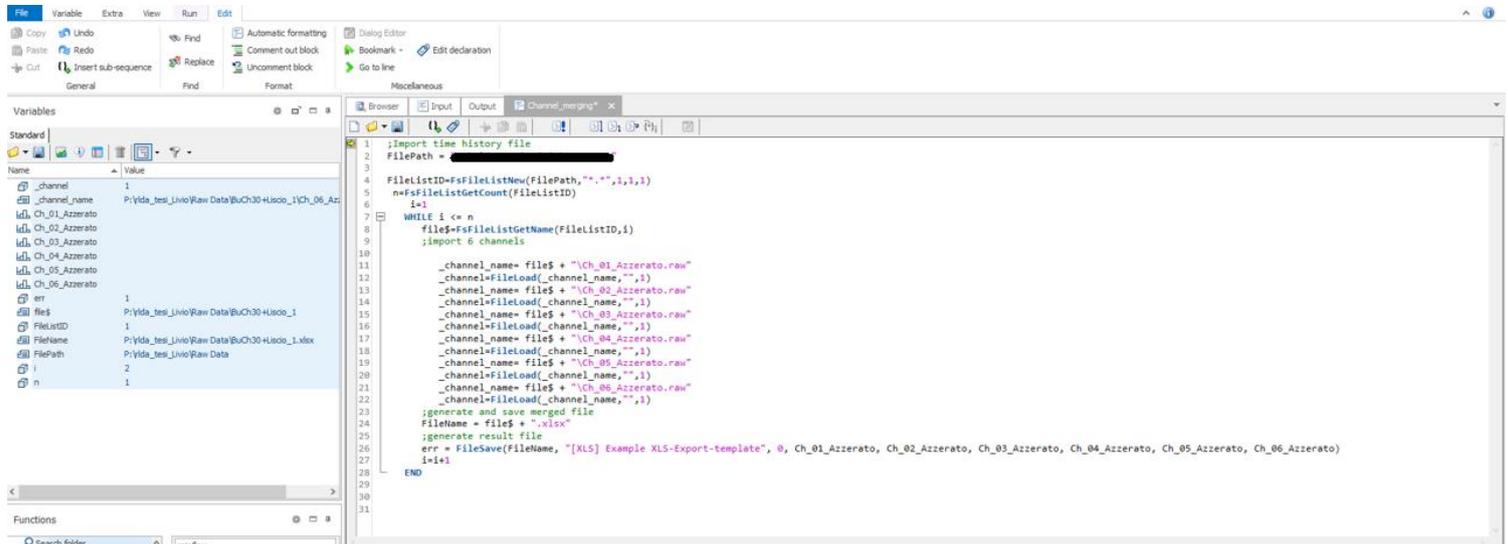


Figura 60:Struttura IMC Famos

In questa fase è costruito anche il sensordata, elemento fondamentale per la comprensione geometrica della struttura installata sul soffietto e base per i calcoli dell'algoritmo utilizzato. A questo punto, è utilizzato l'applicativo Python per il processamento dei dati, che produrrà un file Excel con le sollecitazioni sopportate dell'elemento flessibile durante il test.

La fase successiva rappresenta il cuore dell'attività di verifica a fatica delle prestazioni del flessibile. Verranno interpolati i dati costruttivi iniziali del prodotto, relazionati in report tecnici e disegni progettuali, utilizzando le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati. Il tool utilizzato è stato distribuito da EJMA, expansion joint manufacturers organization.

Si tratta di un'associazione referente alla quasi totalità dei costruttori di soffietti meccanici, fondata nella metà degli anni '50, per dare uno standard nella costruzione e progettazione di questi elementi. L'applicativo fornito ai membri prevede la possibilità di correlare le caratteristiche fisiche dell'elemento e meccaniche del materiale che lo utilizza.

Flexider AUTOMOTIVE **EJMA Calculations**

Revision # 13 Date of Revision 06/10/2021 Issued by Engineering

RESET ALL DATA

Select from the drop-down menu or enter value

BELLOW GEOMETRICAL PARAMETERS

DN	AWA1	A2	A3	b	e	R1	R2	R3	plf thickness	n. plies	tot. Length	Convolution s. N.	Mat.	Dwg	Gas Passage	comp. pitch	pitch after helioid	x compat.	stRad. Elong.	bellow's weight (g)	QW	QBT
Central Ball N.	L.A.	R1	R2																		0.25	0.00

Data calculated from input parameters of bellow

Load Profile

Temperature [°C] 20

FEM

Stiffness Calibration Load Thickness

Modal Movements Fe-Safe

Load FEM Pictures

*Stiffness Calibration needs to be executed first

Testing Order	MOVEMENTS		Select displacement of kinematic	
	1 Due to displacement	2 Due to displacement	1 Kinematic	2 Kinematic
Order Num.	Forward	Backward	Forward	Backward
1	st. (mm)			
Required Cycles	lat. Y (mm)			
50000	lat. Z (mm)			
Step	s. (deg)			
	Rt (deg)			

For testing order, execute 50 K and 500 K cycles first

Local Bellow coordinate system

GLOBAL Coordinate system for kinematics

Rock Angle > 0
Rock Angle < 0

Bellow Movements

— Forward — Backward

Figura 61: Schermata EJMA

DATI SOFFIETTO DIS. N° : DN x Sp. x C.

A0= A1= A2= A3= R0= R1= R2= R3= RI0= RI1= RI2= RI3= b= c= s= T= N° onde= L.Tot.Comp=

Incremento sviluppo per onda teorico / pratico

Sviluppo sft. doppio = Non è possibile la formatura doppia

Sviluppo sft. singolo =	Passo 3 =
Lungh. tot. sft. singolo =	Passo 2 =
Lungh. pacco onde =	Passo 1 =
Peso sft. singolo (Kg) =	Passo 0 =
% di compattatura =	Passo comp. =

Figura 62: Dati tecnici soffietto

Il foglio di calcolo richiede la raccolta delle informazioni costruttive del disaccoppiatore, descritte ed appositamente nascoste nell'immagine precedente per motivi di segretezza aziendale. La struttura del disaccoppiatore meccanico prevede due layer di materiali gli uni sugli altri, opzione che il software di calcolo FEM prevede ma la cui costruzione risulterebbe complessa. Le indagini delle prestazioni devono però prevedere una tale struttura, per non produrre dati erronei al cliente finale. Una volta compilato il form e precisata la temperatura di 20°C, è possibile passare alla generazione del modello FEM. La temperatura precedente è scelta poiché, nonostante non sia la

temperatura operativa del disaccoppiatore meccanico, è considerabile come standard per tutte le tipologie di vetture su cui Flexider lavora, poiché esse hanno range operativi diversi, delle quali dobbiamo calcolarci la rigidità dell'elemento.

Il preparato, processato da ANSYS, creerà una mesh virtuale dell'elemento, la quale presenterà lo spessore equivalente che ha il modello di flessibile che stiamo calcolando, con la stessa rigidità del nostro caso con un by-layer, fornendoci ulteriori parametri, come la rigidità assiale e laterale. Dopo qualche minuto di iterazioni, il programma ci fornirà un dato da dover importare nuovamente su EJMA.

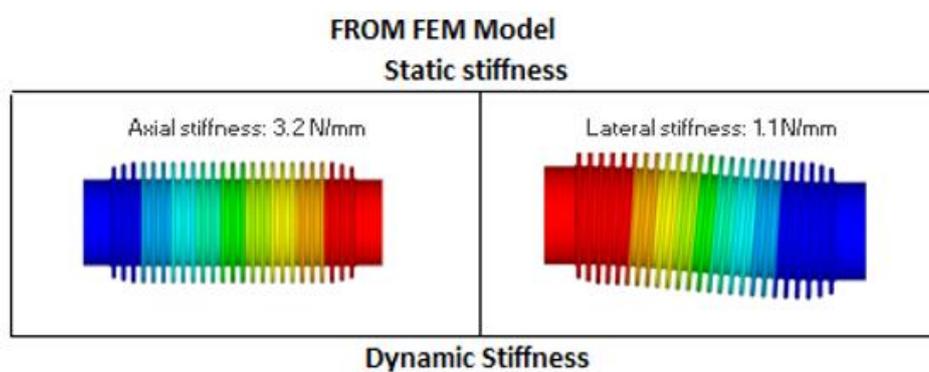


Figura 63: Risultati analisi Ansys

Importati i dati generati, è necessario utilizzare nuovamente il software della casa americana per definire quali siano i gradi di libertà della struttura ed impostare le sollecitazioni unitarie che l'elemento è sottoposto. Questa operazione è necessaria perché nella fase successiva andrà analizzato il comportamento della struttura una volta applicati i carichi reali (con le loro differenti entità nel tempo) per cui una simulazione precedente con carichi unitari ed indipendenti gli uni dagli altri (sollecitazioni uniche per ogni simulazione) rende il nostro modello capace di simulare appieno i test. L'importazione di questo modello è fatta utilizzando le curve di sollecitazione a 500°C, considerando un caso reale di tensione deformazione.

La curva di Woeler utilizzata è a quella temperatura operativa poiché Flexider l'ha calcolata e testata con prove a banco nello stabilimento in Polonia. Il risultato finale verrà importato su Fe-Safe, software di simulazione per calcoli di fatica ciclica-oligociclica.

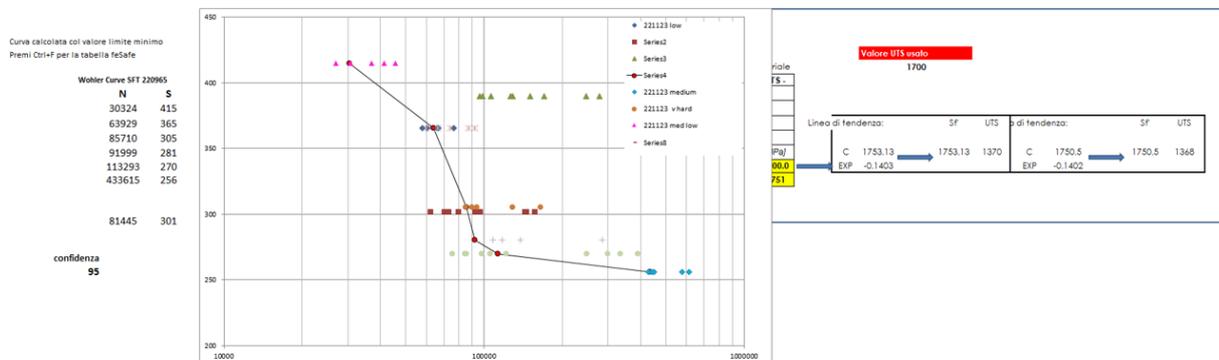


Figura 64: Curva utilizzata nei calcoli

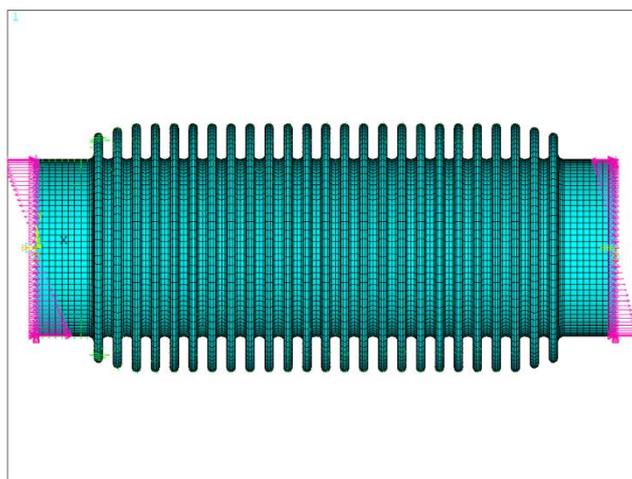


Figura 65: Rappresentazione carichi unitari applicati al bellow in Ansys

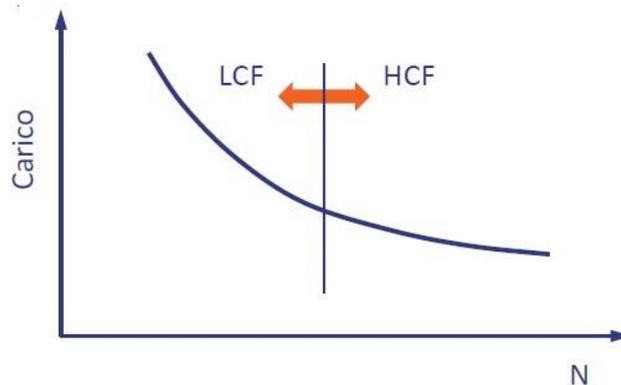
Importate le caratteristiche del materiale utilizzato, le caratteristiche della mesh per applicazione di sollecitazioni nei differenti g.d.l. e le sollecitazioni stesse provenienti dal file post-processato è possibile ricostruire il modello finale su Fe-Safe. Importato il modello della manichetta (appena costruito in FEM), vanno aggiunte le caratteristiche del materiale utilizzato (rigidezza, tensione di snervamento, eccetera) e le sollecitazioni provenienti dal post-processato in Python possiamo proseguire nel calcolo.

La teoria della fatica ciclica dei materiali ha radici di studio relativamente recenti. La fatica si presenta quando il componente è soggetto a carico ciclico, sia esso meccanico che termico. L'applicazione del carico porta alla prima formazione di cricche superficiali, a causa degli sforzi ciclici di taglio agenti sulla superficie del pezzo, creando così zone a tensione (locale) più elevate

della tensione di snervamento del materiale. Questo crea uno scorrimento di piani negli atomi, accentuato nel corso del tempo e all'aumentare del carico, che crea un movimento di dislocazioni nel materiale verso la superficie. Si formano così intrusioni ed estrusioni e queste cricche cominciano ad avanzare nella direzione in cui lo sforzo di taglio è massimo.

Queste crescono fino alla rottura del componente. A seconda del livello di intensità della tensione applicata, la durata del provino sottoposto a carico varia; tracciando un grafico tensione-durata, è possibile distinguere due zone ben definite:

- La zona HCF (high fatigue cycle), ovvero la zona ad alto numero di cicli, nella quale le tensioni applicate sono inferiori alla tensione di snervamento del materiale;
- La zona LCF (low fatigue cycle) dove avviene il contrario e le leggi fisiche che legiferano le zone cambiano.



Wholer produsse un modello che relazionò la tensione applicata al numero di cicli rimanenti al provino prima della rottura, corretto da Goodman che implementò il calcolo anche per tensioni alternate non simmetriche (il nostro caso di applicazione).

Vanno ora abbinati gli spostamenti simulati nel modello su Ansys con i canali delle sollecitazioni provenienti dall'Excel con le roto/traslazioni. Il materiale prescelto per la simulazione conterrà importati elementi, come il coefficiente di Poisson, il modulo elastico e il numero di cicli massimo oltre il quale quel materiale può considerarsi a vita infinita (particolare importante per le nostre

analisi, considerato il limite a dieci milioni di cicli). La particolarità di Fe-Safe è che considera modelli di snervamento dell'elemento (caratteristiche tensione-deformazione) lineari, per cui con caratteristiche di deformazione non reali. Parametri come questi vanno ad influenzare la correzione di Goodman per carichi non simmetrici.

Flexider utilizza il metodo di Miner lineare per il calcolo del danno relativo a prove cicliche. Applicato un carico S al provino, esso dopo un certo numero di cicli N andrà a rottura; è possibile calcolare il danno ad un certo numero di cicli n, con la relazione:

$$D = \frac{n}{N} \quad \begin{array}{l} n=0 \text{ means no damage} \\ n=N \text{ means the part is failed} \end{array}$$

Con n=N se il pezzo si è rotto a seguito del numero n di cicli imposti, portando il danno D=1. Data una serie di sollecitazioni S_i, il danno che avremo sarà la somma nel tempo dei danni prodotti dagli n cicli precedenti:

$$D_T = \sum_1^K D_i = \sum_1^K \frac{n_i}{N_i} \quad i=1, 2, 3, \dots, K$$

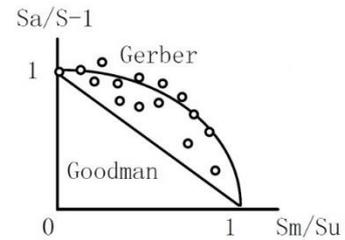
Relazione questa conservativa, poiché la propagazione del difetto nel reale non seguirà una legge lineare. All'apice del difetto avremo una zona plasticizzata di dimensioni proporzionali alla dimensione stessa del difetto. Questa zona impedirà la normale propagazione della cricca qualora l'energia dello sforzo a cui il provino è sottoposto risulti inferiore; per cui in una serie di carichi ciclici successivi, può non essere sempre possibile che il carico successivo superi il surplus di energia richiesto per la prosecuzione del difetto. Quest'ipotesi risulta quindi conservativa, consentendo un coefficiente di sicurezza alle analisi dell'azienda. Nel calcolo della vita, un'importanza relativa è data dall'applicazione e dall'ampiezza della tensione stessa. Esistono relazioni (come quella di Goodman) che relazionano questi due elementi, per una correzione della tensione applicata qualora lo stress non sia simmetrico.

Goodman equation

$$\frac{S_a}{S_{-1}} + \frac{S_m}{S_u} = 1$$

Gerber equation

$$\frac{S_a}{S_{-1}} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1$$



Eseguita la simulazione, il programma restituirà un dato relativo al danno che esso avrà se la simulazione verrà effettuata in un determinato percorso, ad un determinato numero di cicli (definito dal cliente come prova limite da superare) riferito ad un numero di cicli limite da non superare.

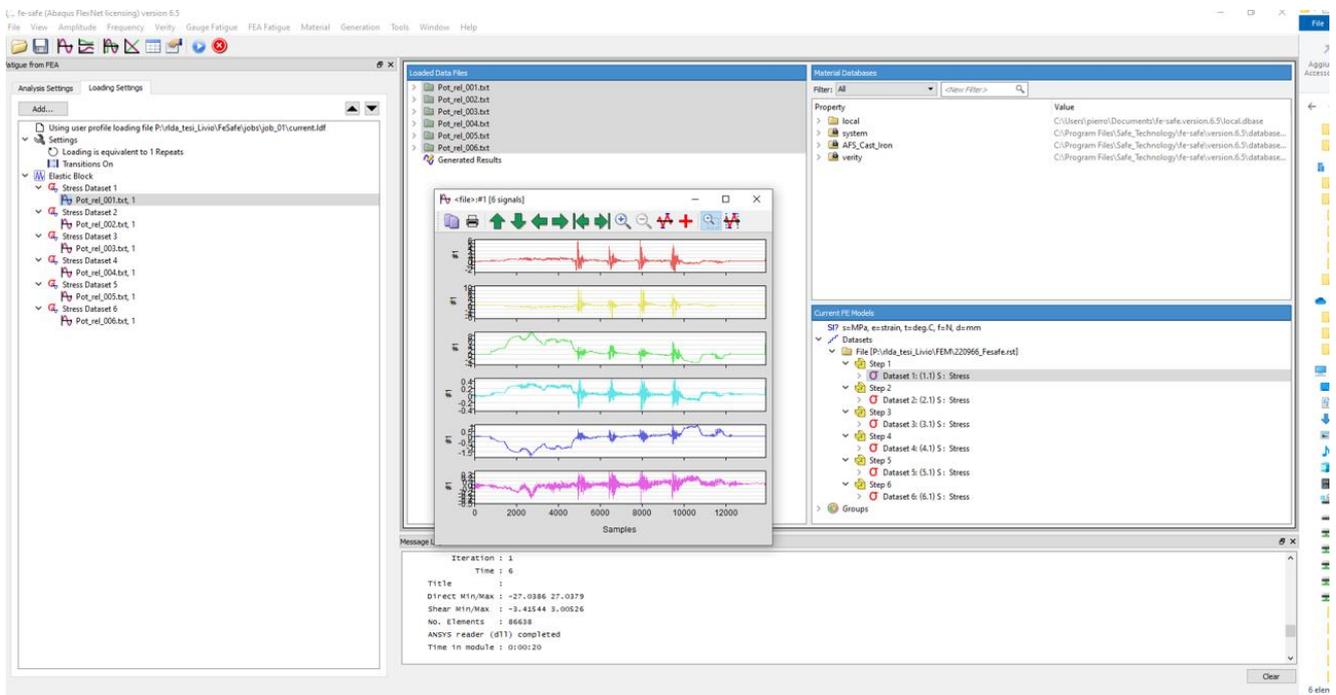


Figura 66: Post-processato in Fe-Safe

Questa procedura sarà ripetuta per tutti i test registrati nella giornata in esterna sul circuito di Balocco e calcolato il danno cumulato finale per il report al cliente. Si vedrà una cumulazione delle prove e dei danni relativi a ciascun test, riassunti efficacemente da un grafico a torta che evidenzierà quale percorso produrrà più danno all'interno del test.

SXV					Curva 220966		
N°	MANOVRA	Coeff	Fattori di Ripetizione Originali	Fattori di Ripetizione	N° Cicli	Danno	
1	Onda lunga +50+ Cunette 50+ lastroni 30	2	432	216	1.0E+07	0.002%	3%
2	Nidi di gallina	2	432	216	1.0E+07	0.002%	3%
3	Onda lunga 50 + cunette 80+ Lastroni 30	2	432	216	1.0E+07	0.002%	3% x
4	Traversine	3	432	144	1.0E+07	0.001%	2%
5	Onda breve 10-30 + Procaccini 30-60	3	615	205	1.0E+07	0.002%	3%
6	Onda lunga 50 Dx + Sx	2	171	86	1.0E+07	0.001%	1%
7	Liscio 50	1	432	432	1.0E+07	0.004%	6%
8	Buche Chrysler 30 + Liscio 50	1	432	432	1.0E+07	0.004%	6%
9	Pave ita- svi 60 + Procaccini 50	2	1842	921	1.0E+07	0.009%	14%
10	Rampa 13%	1	54	54	1.0E+07	0.001%	1%
11	Rampa 16%	1	108	108	1.0E+07	0.001%	2%
12	Strada bianca	2	1350	675	1.0E+07	0.007%	10%
13	Paba	2	2460	1230	8.3E+06	0.015%	22%
14	Potholes 40	1	54	54	1.0E+07	0.001%	1%
15	Mistino	1	1111	1111	1.0E+07	0.011%	16%
16	Langhe	1	420	420	1.0E+07	0.004%	6%

#DIV/0!
#DIV/0!

Tot. Damage **0.07%**

Figura 67: Risultati processamento tests

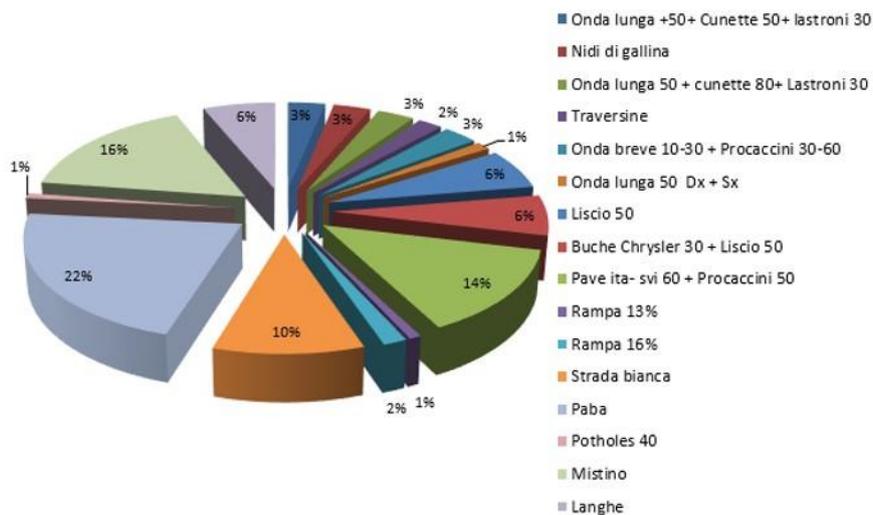


Figura 68: Grafico a torta sui tests più impattanti

7. Fase miglorie future

Questo è il capitolo finale di questo scritto ed è ormai chiaro come tutto questo processo di eccellenza nella costruzione di elementi motoristici comprenda ormai un campo multidisciplinare. La ricerca e sviluppo aziendali hanno prodotto enormi risultati in termini di efficienza e sicurezza che permettono così di realizzare disaccoppiatori meccanici all'avanguardia, in grado di sostenere sforzi sempre più elevati, mantenendo gli stessi standard di resilienza e vita utile. Questi risultati sono il frutto di costanti collaborazioni tra i diversi reparti produttivi, con un interscambio di informazioni costante e fondamentale per un processo di automiglioramento interno all'azienda. In questa fase di espansione verso altri mercati, spinti dal successo ottenuto nella produzione di questi anni, non viene meno l'impegno di migliorare ogni ambito della produzione di soffietti automobilistici.

Un focus importante rimane sulla parte del testing e sui limiti dimostrati nei paragrafi precedenti, per offrire performance sempre più elevate ai clienti e poter combattere la concorrenza con armi sempre più affilate. In questo ambito la direzione ha avviato lavori per la modifica dei vari algoritmi, confrontandosi dapprima con i vari responsabili interni e successivamente contattando risorse esterne.

È stato individuato una modalità di modifica della struttura esapodale di analisi, nonché delle modifiche da poter operare alla teoria alla base dell'algoritmo. Le ipotesi verranno riassunte nel seguente capitolo, nelle successive righe della trattazione.

La prima modifica prevede la costruzione di una nuova piattaforma per l'analisi dei movimenti relativi, costruita sulla base della piattaforma di Stewart. La precedente struttura di piattaforme fisse e mobili prevedeva la loro costruzione secondo una geometria a ferro di cavallo, che

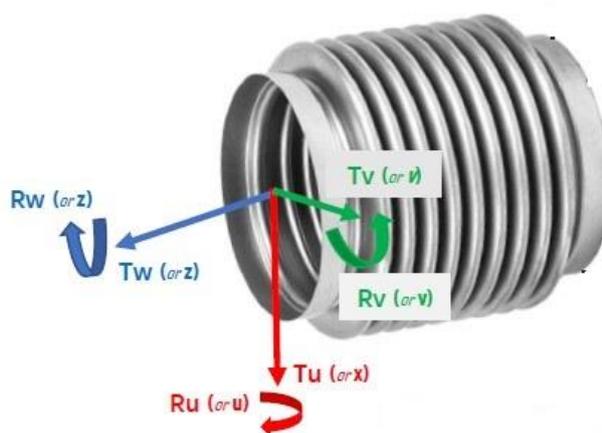


Figura 69: Sistema di riferimento nuovo codice

potesse facilmente legarsi rigidamente alla struttura sotto vettura. Questa soluzione ottimale per gli ingombri, lasciava spazio ad errori dovuti all'errata posizione dei sensori, nonché dell'elongazione minima che essi potevano raggiungere. È stata studiata un'altra struttura, capace di avvolgere in modo più efficace il flessibile, permettendo una diversa combinazione sia dei sensori, posizionati a 120° l'uno rispetto all'altro, ma anche permettendo di compiere ai trasduttori di posizione un percorso più lungo, avendo così una precisione maggiore sulle misurazioni.

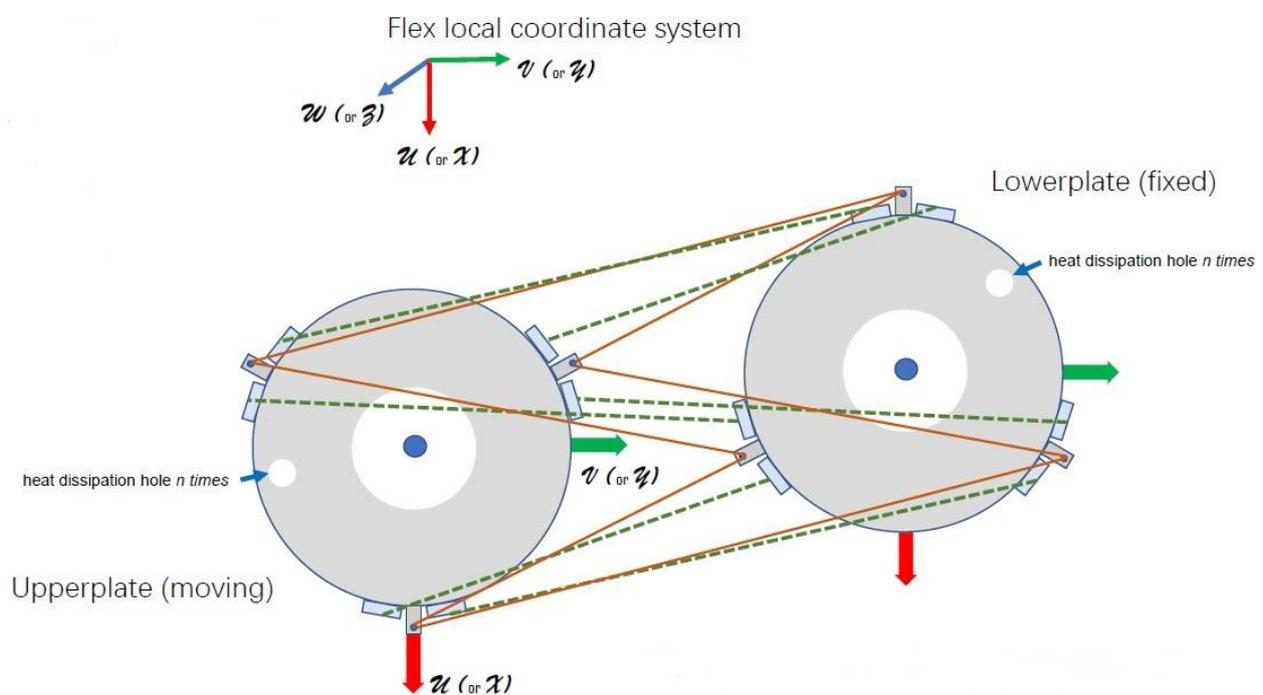


Figura 70: Modifiche alle flange suggerite da Wang

La soluzione appena proposta è stata ideata dall'inventore dell'algoritmo costruito nel 2001, ovvero Zhijun Wang. Dovrà vedere prima una fase di progettazione delle componenti, per poi essere dapprima testato su banco e poi sotto una vettura cliente come apparecchiatura ufficiale di testing. Purtroppo, i percorsi dei fili dei trasduttori appaiono molto più articolati del caso precedente, nonché una struttura che accerchia la manichetta ne genera dei problemi nel rispetto degli ingombri del veicolo. Avendo una tolleranza minima nei confronti dell'inclinazione delle proprie componenti, risulta impossibile permettere ai fili di percorrere quell'orbita semi circolare intorno al flessibile, perlomeno con le dimensioni attuali delle flange. Questo

significherebbe ampliare la dimensione delle stesse, per permettere una più agevole redistribuzione della sensoristica, andando però ad avere problematiche per quanto riguarda il posizionamento sotto gli autoveicoli da testare. Dalle prime analisi è emerso che è necessario allargare le piattaforme di qualche centimetro, contro l'ingombro sotto molti veicoli limitato, in cui rimanevano pochi millimetri già nel caso di installazione della struttura attuale. Bisognerà quindi monitorare la situazione, valutando se questa soluzione può essere intesa come realizzabile sotto che percentuale di veicoli clienti da testare e quanto invece rimarrà una struttura da laboratorio, utilizzata per calcoli diversificati e basati sulla comprensione dell'attuale algoritmo.

Il secondo ambito di studio riguarda uno studio più approfondito sulla cinematica robotica della struttura di Stewart che simula il funzionamento della manichetta. Per ovviare a complessità dovute alla cinematica diretta è stato ipotizzato di riscrivere l'algoritmo, basando lo studio sui quaternioni. I quaternioni forniscono una notazione matematica conveniente per la rappresentazione di orientamenti e rotazioni di oggetti in tre dimensioni. In confronto agli angoli di Eulero presentano funzioni più semplici da comporre e confrontati con le matrici di rotazione essi sono più stabili numericamente e forse più efficienti. Quando vengono usati per rappresentare le rotazioni, i quaternioni vengono anche chiamati versori o quaternioni di rotazione, quando invece vengono usati per rappresentare le direzioni sono chiamati quaternioni di orientamento. Questi strumenti matematici consentono di svolgere più efficacemente calcoli riferiti alla rototraslazione della struttura, i cui unici dati noti e certi sono le lunghezze degli estensimetri.

La relazione con gli angoli di Eulero che identificano la rotazione della piattaforma superiore (pitch, roll e yaw) può essere convertita in una relazione utilizzando questi artifici matematici, descritta nelle seguenti formulazioni:

$$\begin{aligned}\phi &= \arctan \left(\frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \right), \\ \theta &= \arcsin (2(q_0q_2 - q_3q_1)), \\ \psi &= \arctan \left(\frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \right),\end{aligned}$$

Dove il quaternione appare come:

$$\mathbf{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3),$$

$$\mathbf{q}^T \mathbf{q} = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1.$$

La matrice di rotazione verrà dunque ricompilata secondo la seguente struttura:

$$R = \begin{pmatrix} 2q_0^2 - 1 + 2q_1^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_0^2 - 1 + 2q_2^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_0q_1 + 2q_2q_3 & 2q_0^2 - 1 + 2q_3^2 \end{pmatrix}.$$

A questo punto può essere costruito un legame tra la base della struttura, in cui vi è idealmente posizionata la terna di riferimento O , la flangia superiore, sede del sistema di riferimento O' , e la lunghezza dei fili degli estensimetri, unico dato noto. L'equazione seguente, $L_i = T_i - B_i$, crea un legame tra i punti in cui ho il posizionamento dei sensori nella piattaforma sottostante (B =bottom) e i punti della piattaforma superiore in cui arriva il rinvio dei cablaggi (T =top) tramite le lunghezze l_i dei sensori a filo. La trattazione seguirà un legame tra le grandezze sopra citate, creando il calcolo della posizione del nuovo centro O' , posizione nello spazio e soluzione unica per la disposizione in atto da parte delle lunghezze degli estensimetri della piattaforma di Stewart. Ulteriori prospettive future riguardano la costruzione di un differente tipologia di flange meccaniche, per il possibile utilizzo di sensori a stelo per il calcolo del movimento relativo del disaccoppiatore meccanico.

La maggior facilità di installazione e precisione degli LVDT li fa preferire agli estensimetri a filo, ma la loro differente tolleranza alle alte temperature potrebbe danneggiare la loro struttura e così la possibilità di



Figura 71: Nuova struttura con boccole da 4mm

aver dati precisi per le successive prove. La struttura presenterà delle boccole rigide esterne, di spessore di 4 mm, che faciliteranno lo scambio termico convettivo ed il minor surriscaldamento della struttura sensoristica. Un ulteriore apporto di pozzo potrebbe essere fornito da un circuito interno di raffreddamento delle flange, attualmente in fase di costruzione e di test interno a Flexider.

Ultimo elemento, ma non per importanza, riguarda l'applicazione all'algoritmo trascritto in ambiente Python di logiche relative al machine learning e data science. Questo linguaggio di programmazione dà la possibilità di studiare queste due pratiche soluzioni di trattamento di grandi moli di dati, con soluzioni predittive che riguardano l'utilizzo di algoritmi ben strutturati.

Queste logiche, ben indirizzate da un sapiente operatore, possono essere utilizzate per dare previsioni anche nell'ambito del testing, legando le variabili costruttive dell'elemento a quelle del test operato su strada a Balocco, fornendo previsioni statistiche sull'effetto che queste hanno sulla manichetta. Può essere una strada da approfondire per il risparmio di costi e di tempo computazionale, nonché capace di indirizzare meglio le ore/uomo dell'azienda, facendone acquisire valore ed evitandone inutili sprechi.

Fattibilità e creazione di successivi algoritmi riguarderanno il futuro del ramo R&D della Flexider Automotive Italy S.R.L.

Bibliografia e riferimenti esterni

- “Six d.o.f. displacement measuring device based on a modified Stewart platform”, Mura, 2011.
- “Stiffness analysis and kinematics modelinf of Stewart platform for machining application”, Kumar, Bikshapathi, Nagarijan, Srinivasa, 2005.
- Stiffness modelling of a Stewart platform based milling machine”, Zhang, Clinton, 2001.
- “A study on vibration of stewart Platform based machine tool table”Khani, Mahboubkhah, Pedrammehr, 2012.
- “Metal bellows manual”, Witzenmann.
- “Kinematic analysis, dynamic analysis and static balancing of a planar and spartial parallel mechanism or manipulators with revolute actuators”, Wang, 1997.
- “The stewart platform manipulator: a review”, Dasgupta, Mruthyunjaya, 1998.
- “Fondamenti di programmazione”, Uniroma.
- Documentazione Python, <https://www.python.it/doc/>.
- “Detecting singularities of Stewart platform”, Charters, Enguica, Freitas, 2009.
- “The mathematics of the Stewart platform”, UniBO.
- “Algebraic elimination based real time forward kinematics of the 6-6 Platform with planar base and platform”, Lee, shim, 2001.
- “Propulsori termici”, F.Millo, Politecnico di Torino.
- “Controllo emissione di inquinanti”, E.Spessa, Politecnico di Torino.
- Images from SAE 1999-01-0509.
- “Costruzioni di macchine”, G.Belingardi, Politecnico di Torino.
- “Machine learning”, <https://www.udemy.com/course/machinelearning/>
- “Data science”, <https://www.udemy.com/course/data-science-con-python>
- Manuali soffiETTO ed idroformatura interni a Flexider.

Ringraziamenti

Ultima, ma non per importanza, è la pagina relativa ai ringraziamenti. Ci sono molti pensieri che mi affiorano alla mente in questo momento, ripercorrendo tutti questi anni di questa avventura personale. Completare il Poli è sicuramente un'emozione grande, non meno di tutte quelle provate durante questo viaggio. Un primo segmento di questo percorso è stata la triennale in ingegneria energetica. Dalla tensione del primo esame (inizialmente avevo passato solo il test di analisi 1) alle delusioni cocenti (come lungo tutto il secondo anno della triennale) fino alle liberazioni più grandi (come quando lessi il voto di Nucleare). Un ricordo importante va agli esami più impostati/interessanti che abbia fino a quel momento studiato. Fondamenti di ingegneria nucleare, dei mitici Ravetto e Zanino, UOSIE di cui ricordo con piacere la Gerboni, quello di sicurezza (che non ricordo il nome) e energetica dell'edificio, con Tronville. Quelli sono stati gli anni in cui mossi i primi passi all'interno dell'aula studio, conobbi un sacco di bravissime persone, nonché conobbi anche ragazzi fortissimi nel mio corso di studio. La compagnia dei vari Chiadò, Bergamin, Vector, ecc, mi fece capire quanto fossi un cuccio in confronto a loro.

Quei tre anni sono stati per me fondamentali poiché, oltre ad interfacciarmi con una realtà completamente diversa dalle superiori (nelle quali eravamo ancora "accuditi") e a scontrarmi con il bisogno di una mia organizzazione mentale più elevata, mi hanno permesso di legare con moltissime persone, molte delle quali le trovo ancora adesso al mio fianco. Mi hanno fatto imparare a collaborare con gli altri, a studiare fino alle 2 di notte e a godermi la presenza di persone sconosciute, entrate successivamente nella mia vita. Una menzione di ringraziamento va fatta per l'aula studio OPERA, per le mille ore passate insieme, ormai considerata porto sicuro. La magistrale è cominciata con patimenti interni, dovuta alla scelta del percorso, e proseguita con esami tutt'altro che facili, capaci di forgiare chiunque attraversi quei periodi didattici. Menzione particolare va fatta per Macchine di Dongiovanni e Costruzioni di macchine (CDM per gli amici) di Belingardi, per la loro complessità, ma anche Propulsori termici di Millo e CEI di Spessa, compagni di studio durante la prima ondata covid. Devo anche "ringraziare" gli elementi in cui mi sono imbattuto durante il periodo di studio relativo allo scorso anno, che mi hanno fatto capire come sia necessario lavorare duro e non mollare davanti a niente.

Chi c'è sempre stato durante questi anni sono stati i miei genitori, mamma e papà, a cui devo tutto poiché mi hanno lasciato crescere, fallire, emergere e conquistare sto pezzo di carta, senza mai smettere di supportarmi. Capisco non sia stato facile avere a che fare con me, perennemente in giro per lezioni e amici (durante l'anno accademico) e stressato e nottambulo (per l'opera) durante le sessioni esami. Il vostro supporto silenzioso mi ha davvero fatto crescere e mi ha dato molto più di quanto non sia riuscito a trasmettere a parole.

Chi mi ha anche supportato durante questi anni sono stati tutti gli amici, tutte le persone a me vicine che ho incontrato e con cui ho condiviso momenti belli e momenti meno belli. Sono fortunato perché non ho mai vissuto momenti brutti. Dalla compagnia di Miraflower, alla gente dell'aula studio nella quale abbiamo sempre fatto un casino pazzesco, dal gruppo di Carignano, Bruino, Catania, Salerno e Chivasso agli amici di Roma e a quelli sparsi in giro per l'Italia/mondo. Non menziono nessuno perché sennò dovrei farlo con tutti, siete stati ugualmente importanti. Ma alcune persone ho promesso che debbano essere menzionate come Mentori del futuro ing. Cazzola, e queste si sono distinte nell'aiutarmi in momenti accademici complicati.

- Andrea Bergamin: conosciuto mentre giocava a poker online durante un ora di termodinamica applicata di Torchio al secondo anno. Chiunque sappia di cosa sto parlando, sa anche come fare ciò durante le sue ore fosse un suicidio poiché precludeva il passaggio all'esame. Berga prese 30, facile, io segato. Ma di lui verrà raccontato ai posteri quando in aula studio mi diede una mano durante termofluidodinamica, di Malandrone e Savoldi, spiegandomi fino allo sfinimento i Lift e Drag, con quello scemo di Acuto che rideva di fianco a me.
- Donato Grassi: conosciuto come lo stupido sexy Donny; noi ci conoscemmo una volta usciti prematuramente dall'esame di edificio, poiché Paolino Tronville ci stampò dopo i test e lui in preda al panico (segato anche di nuculare) ci rivolse la parola nell'atrio. Dove andammo dopo è storia e non è trascrivibile in una tesi di laurea, forse. Il mio mentore di quel periodo mi salvò nella preparazione di Nucleare, spiegandomi in due giorni all'opera ed uno nelle 12 del poli, i segreti della fissione in un reattore nucleare. Mi spiacque DAVVERO quando lui prese 18 al preappello ed io 27 al primo.
- Davide Polito: Detto poli. Qua ci addentriamo in un momento di insulti ad un professore che considero altamente competente ma completamente inadatto al ruolo di insegnante. Basti pensare che sia l'unico a non aver ricevuto l'applauso degli

studenti di fine corso, prassi nella normalità degli altri 30 e passa esami. Poli si armò di santa pazienza e mi spiegò i principi fondamentali della fatica meccanica nei materiali e tutt'oggi tutto quello che so è merito suo. Chiaramente compagno di mille serate e anche mille paranoie fuori dall'opera, ma questa è un'altra storia.

- Giacomo Della Pietra: fidanzato di Giulia, ha avuto un ruolo fondamentale nella materia di cui si parlava nel punto precedente. Con una pazienza incredibile mi ha dato una mano enorme nel progetto di realizzazione del riduttore, realizzando buona parte di tutto il cad conclusivo e quindi entra di diritto nei miei mentori universitari.
- Gianmarco Stirpe: compagno di classe nell'avventura con Millo, madonna se mi hai aiutato durante tutto il percorso nella materia, facendoti carico delle esercitazioni su Matlab e aiutandomi in ogni mio dubbio anche più piccolo.
- Alessandro Acuto: non merita di entrare in questa menzione, poiché non ha fatto niente di rilevante per aiutarmi nella carriera universitaria, anche se millanta di avermi fatto passare analisi 2 (mai vero) e dato una mano un pomeriggio in logistica (ha detto cose che già sapevo e che ci manca che non sappia un gestionale finto come lui). Si merita un riconoscimento ad Honorem, poiché è stato compagno di rotture di palle/condivisione paranoie e vacanze, nonché conoscenze fatte al di fuori del poli. Tra tutte ne posso citare due in particolare, come Otta (dove ha fatto proprio lui da pacere) e Michela Bregamo (e Monica che sennò si offende, compagne ormai de due anni di mille storie e avventure, meno di quanto mi piacerebbe fare in realtà). Per questo merita di essere quasi considerato pari ruolo rispetto agli altri.

Siano cronologicamente quasi alla fine, per cui va ringraziata un'altra persona. Una di quelle che si è imbattuta nella mia strada e che mi ha sparigliato le carte. Sto parlando di Marta, ovviamente. Conosciuta anni fa durante un corso di salsa, nella quale era iscritta normalmente ma che a tutti dicevo (e dirò) che era una delle maestre. Inizialmente, considerandola tale e poco meno di 30enne avevo un timore reverenziale, anche perché la salsa mi respinge naturalmente e sono molto lontano dall'essere bravo. Piano piano ci siamo avvicinati (gennaio 2020) e dopo un inizio bello, la pandemia complicò i nostri piani. Per pura combinazione il tutto ricominciò il settembre successivo, per non smettere più. Le devo dire grazie, per l'enorme pazienza avuta durante il periodo via, perché mi ha dato tutto il supporto di cui avevo bisogno, sia nel quotidiano rapporto con dottorando e relatore, sia nel gettarsi come me in una convivenza a

Cascais. Non sono un carattere facile, e lei mi ha restituito tutto ciò che io ho provato a darle in questo periodo. Se oggi sono qui a ritirare sto pezzo di carta è anche grazie a lei. Non chiedo di meglio.

Difficile trovare una frase che permetta una degna conclusione di sta pappardella. Vorrei concludere con la parola più scontata ma anche quella più sottostimata: GRAZIE.

