

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA**

**PROGETTAZIONE MECCANICA E MODELLAZIONE**

**TESI DI LAUREA in**

**Sperimentazione e calibrazione motori a combustione interna M**

**SVILUPPO DI UNA RONDELLA PIEZOELETTRICA  
PER LA STIMA DELLA PRESSIONE NEL CILINDRO**

**Federico Gentile**

**Relatore:**

Prof. Ing. Nicolò Cavina

**Correlatori:**

Prof. Ing. Enrico Corti

Prof. Ing. Fabrizio Ponti

Ing. Paolo Bovicelli

Anno Accademico 2018/2019

Sessione III



# Abstract

In-cylinder pressure measurement allows for the obtainment of fundamental information for the reduction of pollutant emissions and for the control of the combustion process, especially in applications characterized by unstable combustion such as LTC (Low Temperature Combustion), where an on-board combustion monitoring system is required.

The aim of this thesis was the development of a piezoelectric sensor installed under the spark plug, which would allow to perceive a variation of the forces acting on the surfaces of the piezoelectric material due to the pressure variations inside the cylinder, generating a measurable voltage signal. The most convenient solution has been developed, with the miniaturization of the sensor as much as possible without compromising its functionality.

The tests carried out with the first prototypes showed a significant correlation with the reference pressure sensor but also showed issues affecting the accuracy of measurement. Such issues are most likely caused by thermic stress both of the assembly and the piezoelectric element, which lead to a non-linear transmission of forces and a variation of piezoelectric properties. For this reason, a new algorithm has been proposed, which is capable of compensating for potential errors in the evaluation of combustion indexes.



# Indice

Introduzione .....	8
1 Segnale di pressione in camera .....	10
1.1 Indici derivati .....	10
1.1.1 Picco di pressione.....	11
1.1.2 Curva di rilascio calore .....	12
1.1.3 Frazione di massa bruciata .....	15
1.1.4 Livello di detonazione.....	16
1.1.5 Coppia indicata e PMI.....	18
1.2 Stato dell'arte .....	21
1.2.1 Sensori per misura diretta della pressione.....	22
1.2.2 Sensori per misura indiretta della pressione.....	24
1.3 Piezoelettricità.....	29
1.3.1 Materiali Piezoelettrici .....	32
1.3.2 Coefficienti caratteristici .....	36
1.4 Metodologia proposta.....	39
1.4.1 Realizzazione primo prototipo .....	39
2 Modellazione sperimentale .....	43
2.1 Modellazione elemento sensibile .....	46
2.1.1 Ingombro assiale piezoelettrico.....	46
2.1.2 Ingombro radiale piezoelettrico .....	47
2.1.3 Realizzazione PCB.....	48
2.1.4 Scelta del filo.....	50
2.2 Modellazione case.....	51

2.2.1 Ingombro assiale case .....	51
2.2.2 Ingombro radiale case .....	52
2.2.3 Serraggio case .....	54
2.3 Modello 3D finale proposto .....	58
2.4 Chiave di montaggio .....	60
2.5 Soluzione alternativa.....	62
2.6 Sollecitazione termica filetto.....	66
3 Realizzazione prototipi.....	76
3.1 Realizzazione rondella strumentata.....	76
3.2 Realizzazione case .....	78
3.3 Assemblaggio sensore.....	80
4 Analisi dati acquisiti.....	85
4.1 Analisi catena di misura .....	87
4.2 Caratteristiche segnale .....	92
4.3 Correzione Gain .....	97
4.3.1 Valutazione gain reale rondella strumentata .....	102
4.3.2 Implementazione modello di correzione gain .....	104
4.3.3 Risultati ottenuti gain modellato .....	109
Conclusioni .....	115
Bibliografia .....	117



# Introduzione

Negli ultimi anni è fortemente aumentata la necessità di ridurre al minimo le emissioni e, nello stesso tempo, controllare la combustione, soprattutto in applicazioni caratterizzate da combustioni instabili come quelle LTC (Low Temperature Combustion), dove sta diventando ormai obbligatorio fornire un sistema di monitoraggio della combustione on-board, costringendo i produttori ad introdurre tecnologie innovative (sensori di pressione in camera, centraline che integrano la funzionalità di analisi combustione). Il metodo più efficace per indagare la combustione nei motori endotermici alternativi è sicuramente quello di utilizzare il segnale di pressione in camera. Ricercatori e costruttori infatti vedono nell'impiego del segnale di pressione all'interno del cilindro l'opportunità di gestire il rilascio di energia per un efficace controllo del motore, ottimizzare prestazioni ed efficienza, limitando al contempo le emissioni inquinanti, e garantendo la necessaria affidabilità. I sensori di pressione sono stati utilizzati soprattutto per le fasi di sviluppo e calibrazione, ma la continua evoluzione dei nuovi motori sta rendendo obbligatorio l'analisi della combustione in applicazioni on-board. Fino ad oggi però, l'utilizzo in motori di serie è stato ostacolato da una mancanza di una soluzione economicamente conveniente oltre che affidabile e durevole.

L'attività svolta durante il tirocinio semestrale presso l'azienda **Alma Automotive s.r.l.** a Bologna, è stata incentrata sullo sviluppo di un sensore piezoelettrico da applicare sotto la candela del motore, al posto della rondella di tenuta standard. In questa applicazione la pressione all'interno del cilindro porta ad una variazione della forza agente sulle superfici del quarzo piezoelettrico, previamente precaricate con la coppia di serraggio della candela stessa, generando una tensione tra le due superfici.

Questo approccio sembra infatti essere il più conveniente tra tutte le tecnologie di misura indiretta della pressione soprattutto in termini di qualità del risultato ottenuto. L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi era, innanzitutto, quello di sviluppare e progettare il sensore, individuando sia la geometria dell'elemento



sensibile che ottimizzasse affidabilità e semplicità di montaggio, che il case di protezione per far fronte a stress termici e meccanici. Terminata questa attività, il passo successivo è stato quello di realizzare i primi prototipi da testare sperimentalmente, analizzando i dati acquisiti con l'obiettivo di massimizzare la correlazione con i parametri di combustione rilevati tramite trasduttori di riferimento.

Attraverso l'utilizzo del software CAD 3D Creo Parametric V3, si è modellata la soluzione più conveniente, risolvendo tutte quelle problematiche che riguardano gli ingombri e la fase di montaggio del sensore. L'attività svolta è portata alla realizzazione dei primi prototipi, i quali sono stati successivamente testati per verificare l'effettiva funzionalità, sia in termini di qualità del segnale che di durabilità.

# Capitolo 1

## Segnale di pressione in camera

Negli ultimi anni i requisiti dei motori a combustione interna sono cambiati per adattarsi alle richieste degli utilizzatori (prestazioni, consumi, affidabilità) e alle richieste delle normative di omologazione. Al giorno d'oggi l'attenzione è indirizzata per lo più al problema ambientale, in particolare alla continua riduzione delle emissioni inquinanti allo scarico e alla contestuale richiesta di una maggiore efficienza (minore emissioni di CO<sub>2</sub>).

Le normative sulle emissioni stanno diventando sempre più rigorose e rimangono un problema cruciale per i produttori di veicoli. Numerosi sottosistemi e tecnologie di controllo sono stati introdotti per soddisfare le esigenze di questi regolamenti.

Per questo motivo le case automobilistiche hanno effettuato ingenti investimenti nella ricerca in campo motoristico, perseguendo l'obiettivo fondamentale di aumentare l'efficienza dei motori.

In questo senso l'analisi della combustione ricopre un ruolo centrale. La combustione è infatti il processo chimico-fisico più importante che avviene all'interno di un motore a combustione interna. Comprendere come essa si sviluppi, riuscire ad analizzarla e controllarla al meglio significa in ultima analisi poter controllare le prestazioni e l'efficienza del motore.

### 1.1 Indici derivati

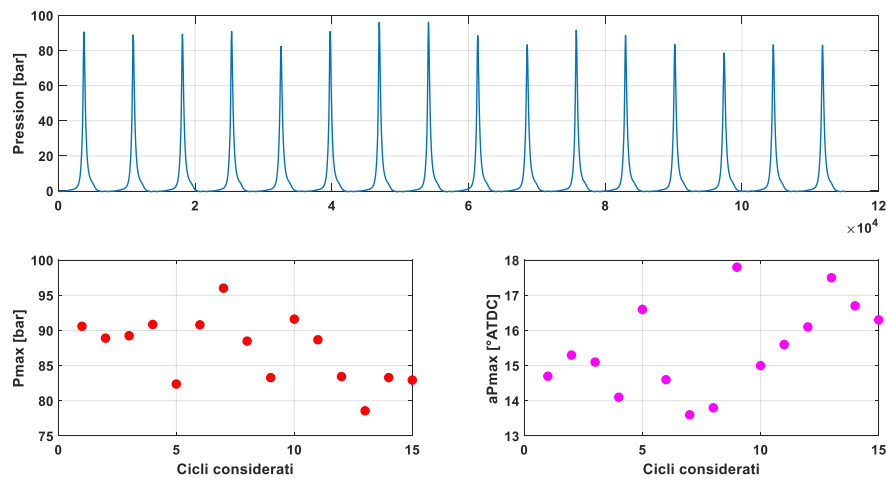
Attraverso un trattamento opportuno del segnale di pressione in camera di combustione, è possibile ricavare diversi indici che descrivono il funzionamento del motore come la pressione massima, la curva di rilascio calore, indici relativi alla detonazione, coppia indicata e molti altri.

### 1.1.1 Picco di pressione

Con riferimento ai motori ad accensione comandata, essendo la combustione regolata da fenomeni stocastici (incubazione e propagazione laminare del fronte di fiamma), combustioni relative a cicli ottenuti nelle stesse condizioni di funzionamento possono avere caratteristiche (fase, pressione massima, intensità di detonazione, ecc.) anche molto diverse tra loro. Questa variabilità ciclica è generalmente imputata a diverse cause (moto della carica, miscelamento dei gas residui o ricircolati con la carica fresca, differenze nella qualità d'aria combustibile e gas ricircolati inviati sullo stesso cilindro ciclo dopo ciclo ecc.) determinate dalle caratteristiche geometriche del motore e dalle condizioni di funzionamento.

Dall'andamento della pressione in camera è possibile risalire a questo grado di irregolarità della combustione stessa, ovvero la variabilità ciclica, così da limitarla con una serie di azioni sia a livello progettuale che di controllo minimizzandone gli effetti negativi. Nella Figura 1.1 viene infatti mostrato come cicli consecutivi siano caratterizzati da una diversificazione relativamente elevata di alcuni parametri caratteristici.

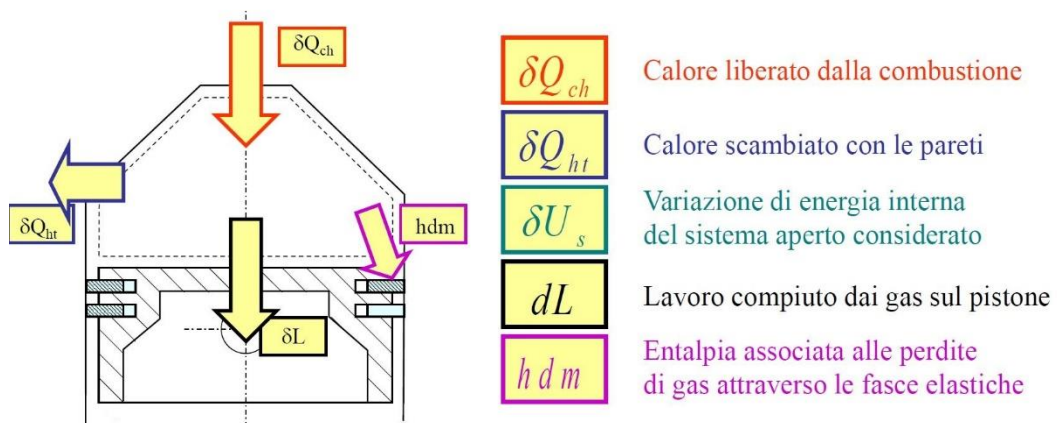
Due di questi parametri del segnale che testimoniano maggiormente questo effetto sono la pressione massima raggiunta in camera e l'angolo di manovella corrispondente alla pressione massima. Mentre il picco di pressione riesce a dare informazioni riguardo la qualità della combustione, al grado di invecchiamento del motore e al misfire, l'angolo relativo al picco di pressione è utile per monitorare il posizionamento, ovvero la fase, della combustione stessa. Entrambi vengono semplicemente ottenute dopo aver opportunamente filtrato il segnale con un passa-basso.



*Figura 1.1 - Variabilità ciclica*

## 1.1.2 Curva di rilascio calore

Possiamo inoltre ricavare dati su come avviene la combustione, per esempio la curva di rilascio calore con la quale è possibile mettere in luce come la combustione si sviluppi nel dominio angolare, permettendo di valutare, ad esempio, parametri come MFB10/50/90, o il ritardo di accensione. Si può banalmente dimostrare come si riesce a risalire al rilascio di calore partendo dal segnale di pressione.



*Figura 1.2 – Bilancio energetico camera di combustione*

Si mostra come sia possibile calcolare il calore netto, ovvero l'energia termica rilasciata dalla combustione, a meno delle perdite a parete e di altri termini di

minore importanza. L'analisi parte da un bilancio energetico in camera di combustione (ipotizzando che le valvole siano chiuse) come viene mostrato in Figura 1.2. Se facciamo riferimento alla figura, possiamo scrivere:

$$\delta Q_{comb} = dU_s + \delta Q_{wall} + dL + h dm$$

Sapendo che la variazione di energia interna  $dU_s$  è data da una variazione di temperatura e da una fuga di massa del sistema (ritenuta positiva uscente):

$$dU_s = d(m u(T)) = mc_v dT - u(T) dm$$

e sapendo che il lavoro del pistone è:

$$dL = p dV$$

possiamo quindi scrivere

$$\delta Q_{comb} = mc_v dT + p dV + \delta Q_{wall} + (h - u) dm$$

Abbiamo quindi esplicitato  $\delta Q_{comb}$ , ovvero l'energia termica che stiamo fornendo e che quindi diventa energia interna del gas  $mc_v dT$ , lavoro  $p dV$ , perdite a parete  $\delta Q_{wall}$  ed eventualmente fuga di energia  $(h - u) dm$ , la quale ha un effetto negativo sul ciclo termodinamico.

In altre parole, il calore lordo che abbiamo introdotto è  $\delta Q_{comb}$ , cioè il calore totale introdotto che in parte andrà in un calore netto, che effettivamente i gas ricevono, e in parte in effetti dissipativi. Possiamo quindi scrivere:

$$\delta Q_N = \delta Q_{comb} - \delta Q_{wall} - (h - u) dm = mc_v dT + p dV$$

Questa è una quantità che è possibile misurare, cioè si può misurare direttamente l'effetto utile sui gas da una misura di pressione. In questo modo si può ricavare la funzione di *Wiebe*, ma in riferimento al calore netto  $\delta Q_N$  e non a quello realmente introdotto  $\delta Q_{comb}$ .

A questo punto, non sapendo calcolare direttamente la Temperatura, è necessario esplicitare l'espressione trovata.

Applicando l'equazione di stato dei gas perfetti (considerando costante la massa nel cilindro):

$$pV = mRT \quad \rightarrow \quad T = \frac{1}{mR}pV \quad \rightarrow \quad dT = \frac{1}{mR}(pdV + Vdp)$$

quindi:

$$\delta Q_N = mc_v dT + pdV = \left(\frac{c_v}{R}\right)(pdV + Vdp) + pdV = \left(\frac{c_v}{R}\right)Vdp + \left(\frac{c_v}{R} + 1\right)pdV$$

dove  $R = c_p - c_v$  e  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$

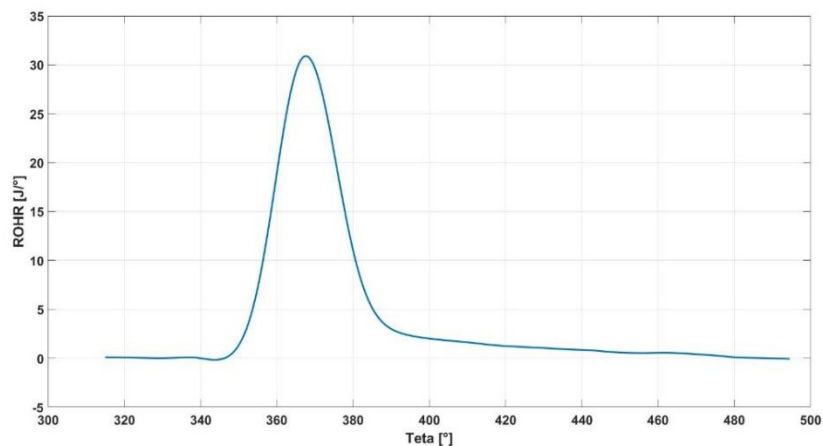
Si ottiene infine la seguente espressione:

$$\delta Q_N = \frac{1}{\gamma - 1}Vdp + \frac{\gamma}{\gamma - 1}pdV$$

Attraverso l'utilizzo del segnale di pressione, la legge di volume e  $\gamma$  si calcola quindi il rilascio di calore netto.

Considerando adesso il generico angolo infinitesimo  $\delta\theta$  si ottiene l'espressione del **ROHR** (*Rate Of Heat Release*), che esprime la velocità (espressa in J/°CA) con cui viene introdotto calore nel sistema attraverso il processo di ossidazione del combustibile (Figura 1.3).

$$ROHR = \frac{1}{\gamma - 1}V \frac{\delta p}{\delta\theta} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}p \frac{\delta V}{\delta\theta}$$



**Figura 1.3** – Andamento ROHR (*Rate of Heat Release*) [20]

Successivamente effettuando l'integrale del ROHR si ottiene l'andamento del calore totale rilasciato (netto), chiamato **CHR** (*Cumulative Heat Release*), mostrato in Figura 1.4.

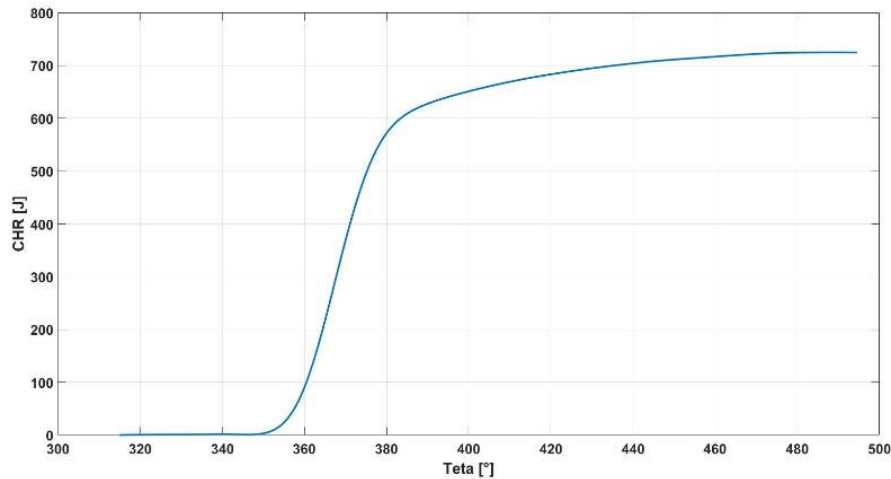


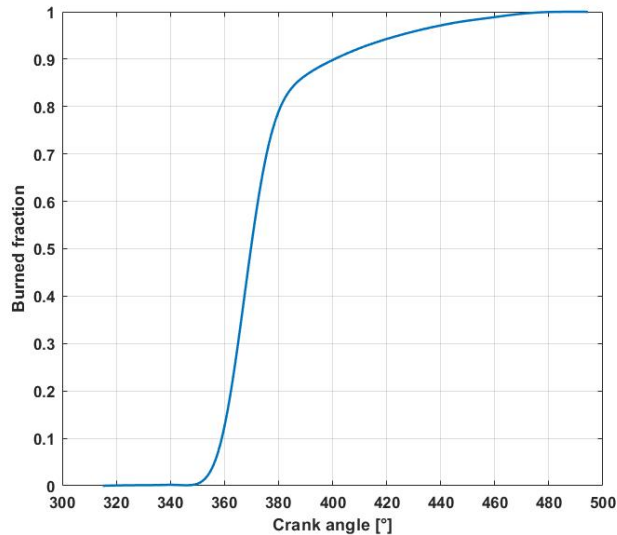
Figura 1.4 – Andamento CHR (*Cumulative Heat Release*) [20]

### 1.1.3 Frazione di massa bruciata

L'espressione del CHR, ovvero dell'integrale del ROHR, non è altro che l'energia sviluppata dalla combustione in un ciclo. Si può quindi pensare che questa energia sia direttamente correlata con la massa di combustibile bruciata.

Uno dei parametri utilizzati in questo caso è l'**MFB** (*Mass Fraction Burnt*) ovvero la frazione di massa bruciata facendo riferimento alla curva di calore totale rilasciato netto **CHR**, che a meno del potere calorifico inferiore rappresenta di fatto l'andamento della massa bruciata. Quindi normalizzando la curva di CHR rispetto al valore massimo raggiunto, è possibile andare ad individuare gli angoli corrispondenti al 5% 50% 90% della massa bruciata (Figura 1.5). Questi valori vengono di solito scelti per rappresentare l'inizio, il baricentro e la conclusione della combustione. Inoltre, la posizione del 50% MFB, ovvero MFB50, viene

spesso usata per gestire delle strategie avanzate di controllo motore, con l'obiettivo di ottenere un MFB50 target, in modo da ottenere le prestazioni desiderate.



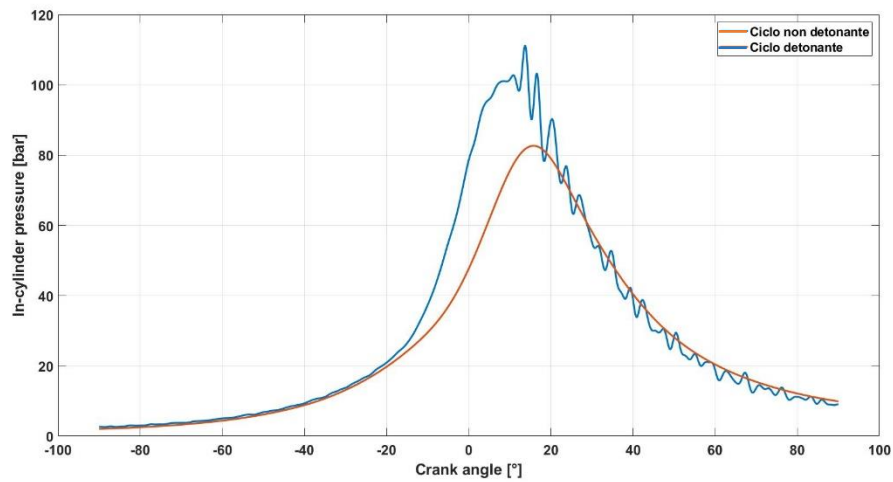
*Figura 1.5 – Frazione di massa bruciata [20]*

## 1.1.4 Livello di detonazione

La detonazione è una modalità anomala di combustione, per la quale la “limitata” energia immessa in camera, in certe condizioni, viene rilasciata in modo veloce liberando una elevata potenza termica che determina alte temperature e pressioni. Attraverso il segnale di pressione è possibile misurare gli indici che ci forniscono il livello di detonazione, poiché oggi non si è interessati alla diagnosi, ovvero se c'è o non c'è detonazione, ma si vuole controllare il livello di detonazione in quanto si vuole cercare di gestire e controllare al meglio le condizioni di pieno carico con massima efficienza.

Quando il motore è soggetto a detonazione, i diagrammi della pressione in camera di combustione, in funzione dell'angolo di manovella, mostrano quindi tipiche oscillazioni di frequenze elevate fino a 50 kHz, come viene mostrato nella Figura 1.6, dove vengono posti a confronto due cicli, uno detonante ed uno normale.



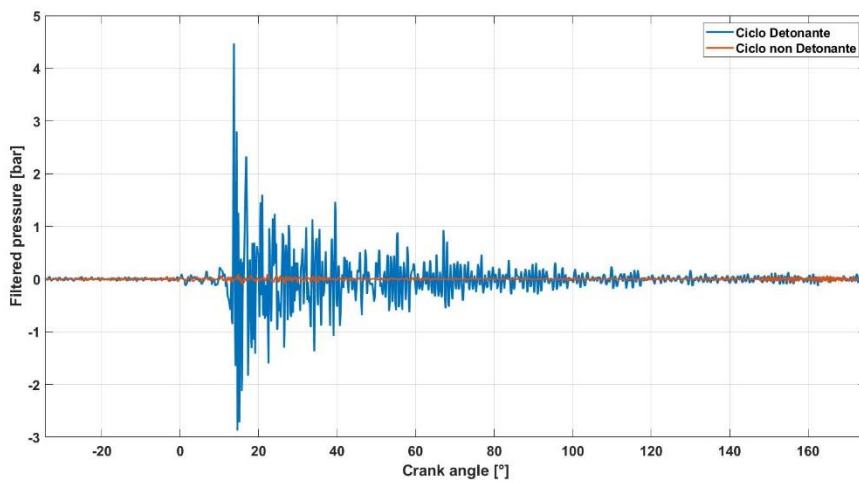


**Figura 1.6** – Confronto ciclo detonante e ciclo non detonante

Per questo motivo il segnale di pressione in camera viene filtrato passa-alto e trattato successivamente per calcolare diversi indici di detonazione.

L'indice utilizzato più frequentemente per lo studio del fenomeno della detonazione, è l'indice **MAPO** (*Maximum Amplitude Pressure Oscillation*), che consente di individuare il massimo valore raggiunto dal segnale di pressione filtrato (Figura 1.7) cioè:

$$MAPO = \max(|P_{filt}|)$$



**Figura 1.7** – Confronto cicli di pressione filtrati passa-alto

## 1.1.5 Coppia indicata e PMI

La Coppia Indicata non è altro che la coppia che otterremmo all'albero per effetto di quell'energia scambiata tra gas e pistone. Successivamente una parte di questa verrà persa per esempio per gli effetti dell'attrito.

La PMI invece, può dare informazioni che indicano il lavoro meccanico e soprattutto il rendimento organico (confrontando la PMI con la PME).

Si può dimostrare quale è la relazione esistente tra la Coppia Indicata e la pressione interna ai cilindri [20].

In generale il lavoro che un gas compie su un pistone che si muove sarà:

$$dL_{ind} = F dx$$

Dove, con il pedice *ind* si intendono tutti quegli effetti che derivano dalla camera di combustione. Sapendo che:

$$F = P\Omega \quad \rightarrow \quad dL_{ind} = P\Omega dx$$

La forza agente sul pistone dipende dalla pressione netta che agisce sull'area (quindi pressione in camera meno pressione del carter) e quindi è una pressione relativa.

Per definizione si avrà che:

$$dL_{ind} = C_{ind} d\theta \quad \rightarrow \quad C_{ind} = \frac{dL_{ind}}{d\theta} \quad \rightarrow \quad C_{ind} = P\Omega \frac{dx}{d\theta}$$

La coppia indicata quindi non dipende solo dalla forza ma anche dalla velocità in base angolo del pistone  $\frac{dx}{d\theta}$  che viene esplicitata qui di seguito.

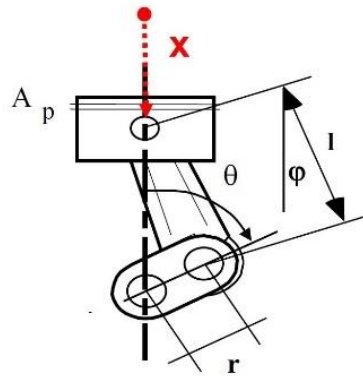


Figura 1.8 – Schema manovellismo

Facendo riferimento alla Figura 1.8 si ricava facilmente che:

$$x = l + r - (l \cos \beta + r \cos \theta)$$

Volendo però esprimere  $x$  rispetto all'angolo  $\theta$ :

$$l \sin \beta = r \sin \theta \rightarrow \sin \beta = \frac{r}{l} \sin \theta$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin \theta\right)^2}$$

Quindi l'espressione di  $x$  diventa:

$$x = l + r - \left( l \sqrt{1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2 \theta} + r \cos \theta \right)$$

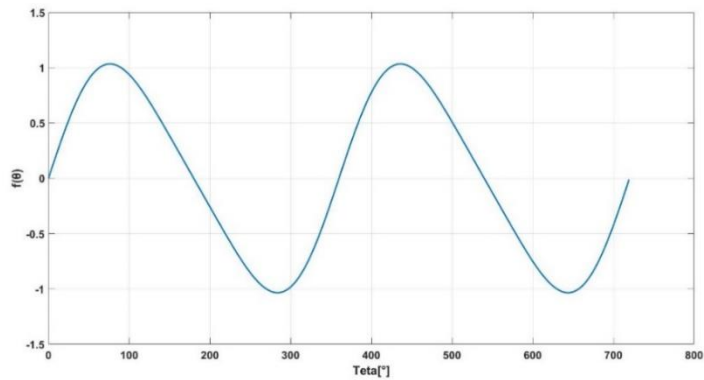
Chiamando  $\lambda = \frac{r}{l}$  si ottiene la cosiddetta *Funzione di manovellismo*  $f(\theta)$ :

$$\frac{dx}{d\theta} = r \left[ \sin \theta + \frac{\lambda \sin 2\theta}{2\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}} \right]$$

In questo modo la Coppia indicata diventerà:

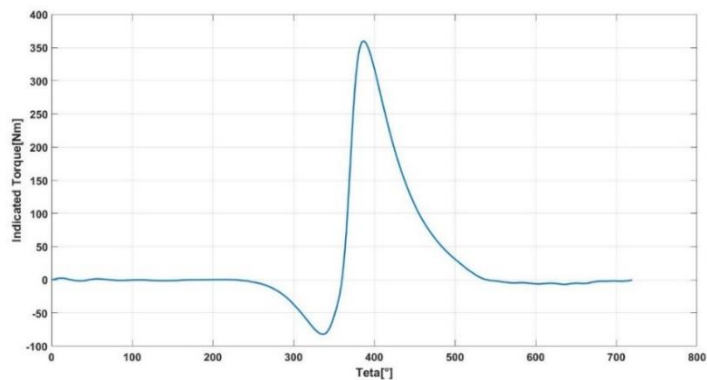
$$C_{ind} = P(\theta) \Omega r \left[ \sin \theta + \frac{\lambda \sin 2\theta}{2\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}} \right]$$

$$C_{ind}(\theta) = P(\theta) \Omega r f(\theta)$$



*Figura 1.9 – Funzione manovellismo*

avendo definito la funzione di manovellismo  $f(\theta)$  cioè quella funzione che modula il braccio rispetto al quale agisce la forza rispetto al braccio massimo (andamento mostrato in Figura 1.9). Sia dal punto di vista analitico sia da quello fisico si può notare che la coppia indicata sarà nulla in determinate posizioni angolari che corrispondono rispettivamente al punto morto superiore e al punto morto inferiore poiché il braccio è nullo (Figura 1.10).



*Figura 1.10 – Andamento Coppia indicata*

Uno degli indici più importanti per l'analisi combustione è la **PMI** (*Pressione media Indicata*), che ci permette anche di confrontare le prestazioni di diversi motori. Questa mi rappresenta il lavoro specifico lordo, ovvero quello che non tiene in considerazione perdite meccaniche. Viene rappresentata come il lavoro indicato nel ciclo e quindi dalla seguente espressione:

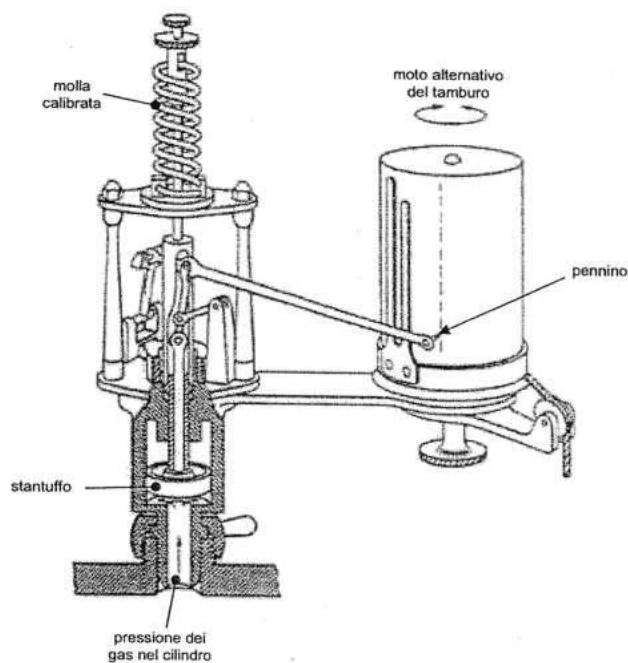
$$IMEP = \frac{1}{V_C} \oint p dV$$

## 1.2 Stato dell'arte

Attraverso il monitoraggio in tempo reale del segnale di pressione in camera del cilindro, affiancato a diverse tecniche di controllo, si riesce a migliorare sensibilmente l'affidabilità del motore, con un aumento delle prestazioni e soprattutto un calo della produzione di sostanze inquinanti.

In generale il problema di misurare la pressione in camera è molto complesso perché si deve riuscire ad apprezzare variazioni di decine e centinaia di bar in millisecondi (nei motori a combustione interna di oggi) a cui si accompagnano variazioni di temperatura di migliaia di gradi. Da questo si deduce chiaramente che è un problema tecnologico molto complesso.

Il primo sistema di misura fu l'*Indicatore di Watt* (Figura 1.11), ideato da James Watt nel 1796 per macchine motrici a vapore (le misure associate vengono chiamate indicate proprio perché derivano da questo nome).



*Figura 1.11 – Schema Indicatore di Watt*

Sulla testa del motore si praticava un foro, si metteva un collegamento con tale cilindro nel quale agisce uno stantuffo collegato ad una molla, quindi, per effetto della pressione in camera e dell'equilibrio tra la forza elastica e la forza dovuta alla pressione, si aveva la movimentazione di un pennino che *indicava* (graffiava) l'andamento della pressione sopra di un rullo che girava ad una velocità sincrona con quella del motore. Non era un sensore ideale in quanto l'uscita non variava proporzionalmente all'ingresso ma era caratterizzato da una dinamica del 2° ordine perché non era altro che un sistema massa-molla-smorzatore che causava una forte azione di disturbo nel segnale. Era quindi un segnale analogico che agiva, in pratica, come un filtro passa-basso poiché non riusciva a trasferire variazioni veloci di pressione, cioè alte frequenze.

Al giorno d'oggi vengono utilizzate diverse tipologie di sensori [1-13] che possono però essere suddivisi in due macrogruppi, cioè sensori per misura *Diretta* e *Indiretta* della pressione nel cilindro .

### 1.2.1 Sensori per misura diretta della pressione

Una misura Diretta implica che l'elemento sensibile è in diretto contatto con la pressione all'interno del cilindro. Naturalmente non è una soluzione banale in quanto occorre considerare le rigide condizioni all'interno della camera (alte temperature e alte pressioni).

Oggi i sensori migliori sono quelli piezoelettrici, che si basano su quarzi, cioè dei cristalli, che, quando vengono deformati, generano un accumulo di cariche di segno opposto sulle superfici che possiamo usare per trasdurre le informazioni di pressione da informazioni di tipo elettrico e quindi digitalizzabili.

I sensori piezoelettrici hanno un elemento sensibile piccolissimo, cioè una membrana che va ad agire su un elemento di quarzo e questo fa sì che la sua dinamica sia molto veloce, non ci sono masse in gioco sostanzialmente, ci sono piccole deformazioni e non ci sono giochi (a differenza dell'Indicatore di Watt).

Per questo motivo sono di solito la prima scelta per la misura diretta di piccole variazioni di pressione (pulsazioni) e garantiscono una misura a lungo termine con

un'alta risoluzione, un eccellente rapporto signal-to-noise e un range di frequenze che arriva oltre i 100 kHz.

Questi sensori però generano cariche piccolissime (sensibilità intorno ai 10 pC/bar) e quindi si ottiene un segnale estremamente debole che necessita di essere amplificato per essere poi digitalizzato ed elaborato.

Sono sensori con i quali si ottiene la maggior precisione nella misura della pressione anche perché vengono collocati il più vicino possibile alla camera e quindi alla grandezza che si vuole misurare.

Il problema è che il sensore è esposto ad alte temperature e pressioni che possono generare delle dilatazioni che inducono delle tensioni non volute perché verranno convertite in pressioni sulla membrana che rendono la misura non accurata.

Dal punto di vista tecnologico, oggi sono disponibili sensori non raffreddati o raffreddati (maggior qualità e accuratezza), mostrati nella Figura 1.12. Questi ultimi richiedono però un montaggio particolare perché vengono affacciati in camera attraversando le camicie di raffreddamento intorno ai cilindri e inoltre è complicato fare tenuta e portare il raffreddamento al singolo sensore.



**Figura 1.12** – Sensori per misura Diretta non raffreddati (sinistra) e raffreddati (destra)

Il difetto più grande quindi è che per avere una misura diretta occorre una modifica della testa del motore (foratura e fresatura) per l'installazione del sensore, aumentando considerevolmente i prezzi. Questo, inoltre, non è sempre fattibile in quanto alcuni motori non dispongono dello spazio per effettuare le lavorazioni necessarie per l'installazione, costringendoci all'utilizzo di sensori che misurano indirettamente la pressione.

## 1.2.2 Sensori per misura indiretta della pressione

Basandosi sull'effetto usato per la stima della pressione, si possono elencare 4 diverse categorie di sensori per una misura indiretta.

### - EMISSIONI ACUSTICHE

Le emissioni acustiche generate durante la fase di combustione sono un buon indicatore del fenomeno considerato. Il layout tipico consiste nell'installazione di *Microfoni* nella testa del motore. Purtroppo, il sensore, durante il funzionamento, può generare emissioni acustiche che possono portare ad errori nella stima della pressione, dovuti ad esempio alla chiusura delle valvole o al moto turbolento del gas all'interno del cilindro. Per questo motivo sono in genere richiesti degli algoritmi pre-processing per isolare il contenuto del segnale che vogliamo dal rumore di background.

### - VIBRAZIONI DEL BLOCCO MOTORE

Sono misurate grazie all'utilizzo di un *Accelerometro* posizionato sul cilindro. Questi sensori riescono a raccogliere informazioni abbastanza accurate dell'andamento della pressione ma, sfortunatamente, solo per alte frequenze non riuscendo quindi a determinare tutto l'andamento della campana di pressione. Si possono però ricavare dati come l'intensità di detonazione,  $a_{Pmax}$  e MFB50.

Inoltre, come per i microfoni, sono di solito affetti da vibrazioni non dovute alla pressione in camera come sbilanciamenti meccanici, impatto delle valvole e altre forze stocastiche che determinano un basso rapporto signal-to-noise, rendendo necessario l'implementazione di algoritmi pre-processing.



#### - FLUTTUAZIONI VELOCITA' ALBERO A GOMITI

Per misurare la variazione di velocità dell'albero a gomiti vengono utilizzati sensori come *ruote foniche* (disponibili in ogni motore moderno) o *encoder ottici*.

Durante ogni ciclo termodinamico del motore, la velocità dell'albero a gomiti cambia grazie alla variazione di pressione: quando la pressione all'interno del cilindro aumenta, la coppia aumenta, generando una accelerazione temporanea dell'albero. Viceversa, durante la compressione, la coppia diminuisce causando una decelerazione temporanea. Quindi si possono ricavare informazioni come MFB50 e Coppia Indicata.

Questo approccio però ha delle limitazioni che possono essere risolte solo modellando accuratamente la linea di trasmissione della potenza dal motore alla ruota.

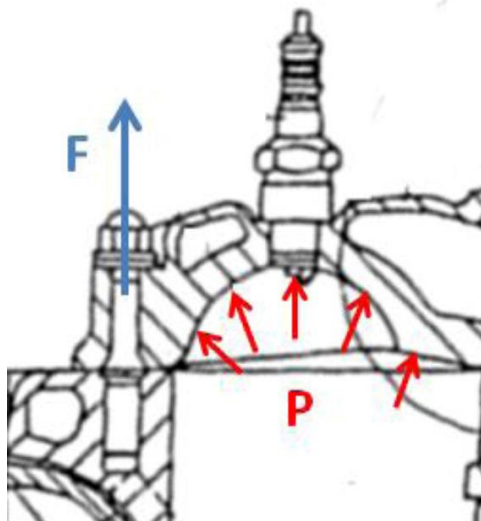
#### - TRASDUTTORI DI FORZA

La variazione di pressione all'interno del cilindro può essere stimata anche sfruttando le forze agenti sulla testa del motore che, almeno in parte, possono essere correlate alla pressione dei gas. In questo caso possiamo distinguere due diverse soluzioni: strumentando le teste delle viti prigioniere che fissano la testata sul basamento, utilizzando delle candele strumentate oppure impiegando delle rondelle piezoelettriche che vengono di solito applicate sotto la candela.

In entrambi i casi la misura è sicuramente più "diretta" rispetto le soluzioni precedentemente esposte, ma presentano comunque diversi inconvenienti.

*Viti prigioniere strumentate [7-11]*

La pressione agente sulla superficie della camera di combustione genera delle forze che vengono trasferite elasticamente dalla testa del cilindro alle prigioniere fissate (Figura 1.13).



*Figura 1.13 – Schema semplificato forze agenti nel cilindro e nella prigioniera [8]*

Il vantaggio maggiore di questa applicazione è sicuramente la facilità nel montaggio in quanto, normalmente, le teste delle prigioniere sono accessibili senza problemi. Questo setup permette quindi di evitare modifiche della testa del motore e quindi abbattere i costi, che si limiterebbero solo all'utilizzo di prigioniere più lunghe per compensare lo spessore del sensore.

L'inconveniente maggiore però è che, data la posizione delle viti prigioniere nei motori, la forza misurata dal sensore non è strettamente correlata alla variazione di pressione di un determinato cilindro. In altri termini, la forza agente sul sensore è affetta dalla pressione di ogni cilindro e, per questo motivo, questa applicazione richiede degli algoritmi di disaccoppiamento per cercare di isolare tali effetti.

#### *Candele strumentate*

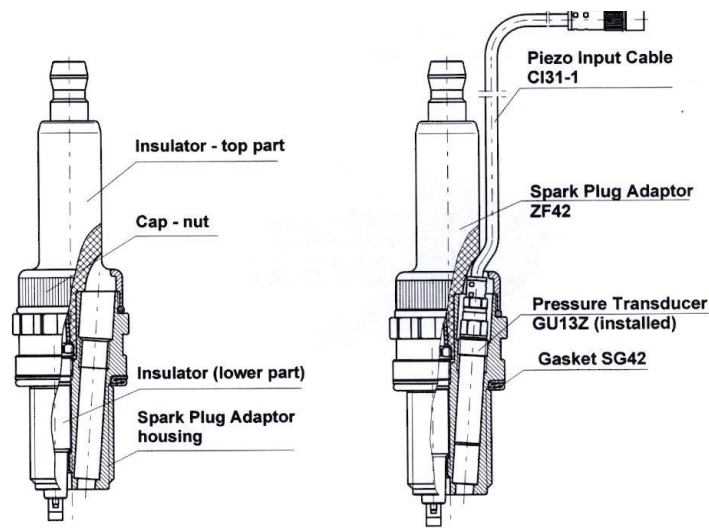
L'idea di oggi è quella di portare il sensore il più vicino possibile al punto di misura, cioè la camera di combustione, cercando di miniaturizzarlo il più possibile.

L'altra esigenza però è quella di cercare di sviluppare nuove soluzioni che permettano di evitare il più possibile lavorazioni aggiuntive ai componenti del motore, in particolare la testata del motore con la realizzazione di sedi apposite per il sensore che richiederebbe costi decisamente elevati.

Nei motori ad accensione comandata, uno degli organi meccanici più vicini alla camera di combustione è senza dubbio la candela.

Una soluzione può essere quindi quella di strumentare la candela, cioè inserire al suo interno il trasduttore. In questo caso il sensore piezoelettrico è collegato alla camera di combustione tramite un tubicino inserito nella candela.

Lo spazio richiesto per l'installazione del sensore è creato grazie ad una leggera eccentricità della ceramica della candela (all'incirca 2 mm). Una estremità del tubicino è a diretto contatto con la camera di combustione del motore ad accensione comandata, mentre sull'altra estremità è posizionato il piezoelettrico (Figura 1.14).

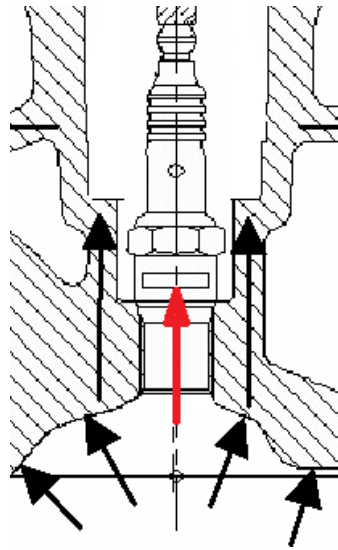


*Figura 1.14 – Candela strumentata*

La presenza del tubicino però influenza il risultato della misura, perché le rapide variazioni di pressione vengono attenuate nell'attraversarlo. Inoltre, questo tubicino può introdurre una risonanza addizionale, tipicamente ad una frequenza più bassa di quella del quarzo piezoelettrico. Per questo la lunghezza deve essere la più piccola possibile per lasciare la frequenza di risonanza del sistema adeguatamente elevata.

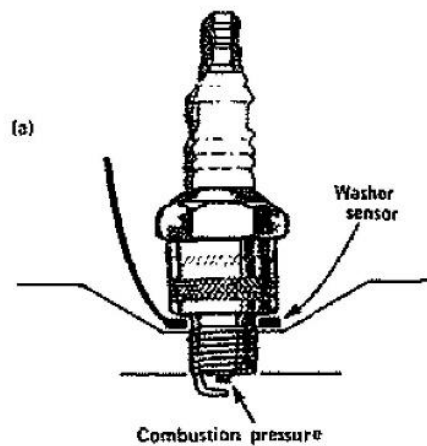
*Rondelle strumentate* [1-4,13, 19]

Un'altra soluzione può essere quella di sfruttare le forze che agiscono nella sede della candela. Durante ogni ciclo termodinamico, all'interno del cilindro si generano delle forze su tutte le superfici, compresa la sezione della candela affacciata direttamente in camera, che tendono a sollevare la candela alleggerendo il suo precarico, come viene mostrato nella Figura 1.15.



*Figura 1.15 – Schema semplificato forze agenti nel cilindro e nella candela*

L'idea di base quindi consiste nel mettere una rondella di materiale piezoelettrico sotto la candela, cioè al posto della rondella di tenuta, come viene mostrato in Figura 1.16.



*Figura 1.16 – Sensore rondella sotto candela* [13]

Il sensore viene precaricato in fase di montaggio con la coppia di serraggio della candela e subisce, durante il funzionamento, una variazione della forza di compressione, così da generare un accumulo di cariche di segno opposto sulle superfici, correlato direttamente alla variazione di pressione in camera.

Questa soluzione permette una misura più “diretta” rispetto a tutte le altre poiché l’output del sensore può essere facilmente correlato all’andamento della pressione, in quanto il carico sulla candela causato dalla combustione è decisamente maggiore rispetto a quelli causati da “disturbi” esterni, rendendo il post-processing dei dati relativamente semplice.

Dall’altra parte, se si sceglie questa soluzione per la misura della pressione in camera, bisogna tenere conto di una serie di accorgimenti.

Il più grande svantaggio è che il sensore, per poter essere inserito correttamente nella sede della candela, deve essere miniaturizzato il più possibile. A volte infatti, l’unica soluzione è quella di lavorare la testa del motore, asportando materiale dal pozzetto, per ottenere lo spazio necessario, rendendo ovviamente questa applicazione non del tutto conveniente.

Inoltre, l’installazione della rondella piezoelettrica può causare una protrusione differente dell’elettrodo della candela all’interno della camera di combustione, generando una variazione della propagazione del fronte di fiamma e quindi una combustione diversa da quella che si vuole ottenere.

## 1.3 Piezoelettricità

Una buona parte dei sensori utilizzati per misurare la pressione all’interno della camera di combustione si basa sull’effetto piezoelettrico.

La piezoelettricità è una proprietà particolare di alcuni materiali cristallini di sviluppare cariche elettriche nella loro superficie se sottoposti a forze meccaniche (effetto piezoelettrico diretto) e, viceversa, di presentare una deformazione meccanica se sottoposti ad un campo elettrico (effetto piezoelettrico inverso).

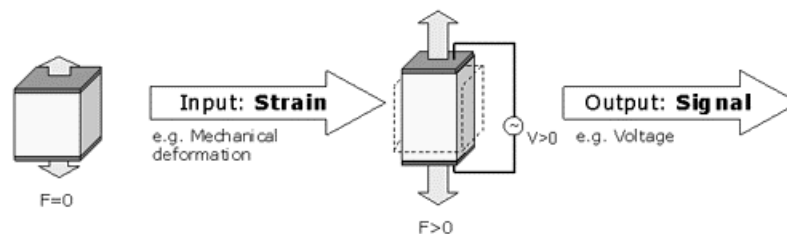
L'effetto piezoelettrico si basa sull'interazione lineare tra quantità meccaniche ed elettriche. Una deformazione meccanica di questi materiali dovuta ad una forza applicata genera un cambiamento macroscopico della polarizzazione elettrica.

Se vengono disposti propriamente degli elettrodi sul materiale, è possibile misurare la tensione o le cariche elettriche che sono direttamente correlate alla deformazione meccanica. Dall'altra parte, applicando una tensione sugli elettrodi otteniamo una deformazione meccanica del materiale. Entrambe le conversioni sono possibili, cioè, da un input meccanico ad un output elettrico o, viceversa, da un input elettrico ad un output meccanico.

Questa capacità dei materiali piezoelettrici di trasformare energia elettrica in meccanica e viceversa dipende dalla loro struttura cristallina. La condizione necessaria perché avvenga l'effetto piezoelettrico è l'assenza di un centro di simmetria nel cristallo, che è responsabile della separazione di carica fra ioni positivi e negativi.

#### EFFETTO DIRETTO

Applicando uno stress di trazione o di compressione a questi materiali riusciamo ad alterare la distanza tra i siti contenenti le cariche positive e negative in ogni cella elementare, portando ad una polarizzazione netta sulle superfici esterne del cristallo. L'effetto è praticamente lineare, ovvero la polarizzazione indotta varia proporzionalmente con lo stress applicato, ed è anche dipendente dalla direzione; secondo questo principio, stress di compressione o di trazione generano campi elettrici, e quindi tensioni, di opposta polarità.



$$D = d * \sigma_M$$

$D$  Spostamento elettrico o densità di carica

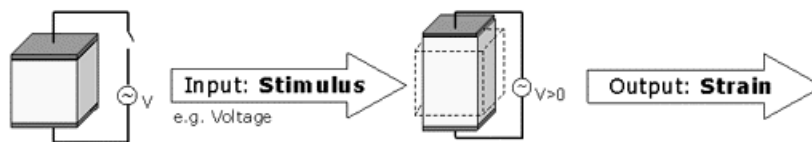
$\sigma_M$  Sforzo meccanico applicato

$d$  Costante di deformazione piezoelettrica

## EFFETTO INDIRETTO

Come già detto, il fenomeno è anche reciproco, così lo stesso cristallo, se invece di essere sottoposto ad una forza è esposto ad un campo elettrico, subirà una deformazione elastica che provoca un incremento o una riduzione della sua lunghezza, in accordo con la polarità del campo applicato.

Infatti, in questo caso, le cariche generano uno sbilanciamento elettrico che viene compensato da un momento di dipolo all'interno del materiale. Quindi i centri delle cariche positivi e negativi devono essere diversi geometricamente, implicando una deformazione meccanica del materiale piezoelettrico.



$$\varepsilon_M = d' * E$$

$\varepsilon_M$  Deformazione meccanica

$E$  Intensità del campo applicato

$d'$  Costante di deformazione piezoelettrica

Alcuni materiali in natura possiedono tale proprietà (quarzo, tormalina) ma nei moderni dispositivi si utilizzano cristalli artificiali (sale di Rochelle, solfato di litio) e i piezoceramici (titanato di bario, titanato di piombo, PZT), dapprima sottoposti ad un processo di polarizzazione.

### 1.3.1 Materiali Piezoelettrici

I materiali piezoelettrici sono caratterizzati da una struttura cristallina oppure da diverse aree con una struttura simile a quella cristallina. In generale un cristallo è caratterizzato da una ripetizione periodica delle cosiddette celle, ossia della struttura atomica, in tutte le direzioni dello spazio. In base a come sono disposte queste celle e alle loro proprietà di simmetria, possiamo distinguere 32 diversi tipi di cristalli di cui 20 sono caratterizzati da proprietà piezoelettriche poiché la struttura della cella è asimmetrica (cioè non hanno un centro di simmetria). Avendo questa ampia disponibilità di materiali diversi, la scelta del materiale piezoelettrico da utilizzare dipende sempre dall'applicazione. Alcuni di questi materiali sono adatti per alcune applicazioni ma non per altre.

In generale però è possibile distinguere due macrocategorie di materiali con proprietà molto differenti: i cristalli singoli e i ceramici policristallini.

#### CRISTALLI SINGOLI

Esistono molti tipi diversi di cristalli singoli piezoelettrici però, in generale, possono essere divisi in naturali (come il quarzo) o sintetici (come il niobato di litio).

Il quarzo (Figura 1.17) è uno dei cristalli più utilizzati per applicazioni piezoelettriche (soprattutto sensori) perché offre una rigidità meccanica molto elevata ed una alta resistenza di isolamento elettrico. Questo materiale inoltre è caratterizzato da un comportamento quasi perfettamente lineare in quanto non presenta isteresi. Viene comunque spesso utilizzato per la sua resistenza alla temperatura: i parametri del materiale non cambiano in un ampio range di temperatura.

Lo svantaggio più grande del quarzo però, è che rispetto ad altri materiali ha coefficiente di carica ridotto.





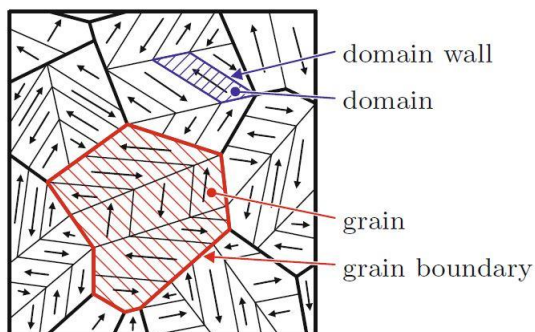
*Figura 1.17 – Cristallo di quarzo*

Per quanto riguarda i cristalli singoli sintetici invece, uno dei più conosciuti è il Niobato di litio, caratterizzato da elevatissima temperatura di Curie (intorno ai 1200 °C) e quindi utilizzato frequentemente per applicazioni dove si raggiungono alte temperature. Ha inoltre dei coefficienti di carica migliori rispetto quelli del quarzo.

#### CERAMICI POLICRISTALLINI

Il processo di produzione convenzionale dei piezoceramici consiste nella miscelazione di ossidi metallici, calcinazione, macinazione per ottenere una predeterminata dimensione di particelle, formatura tramite pressatura a secco, o pressatura isostatica o slip casting e sinterizzazione. Dopo la sinterizzazione il ceramico piezoelettrico è lavorato per ottenere le dimensioni finali e lappato.

Dopo quest'ultima fase, il piezoceramico policristallino è caratterizzato da un numero enorme di dipoli orientati casualmente, come mostra la Figura 1.18.



*Figura 1.18 – Schema dipoli piezoceramico*

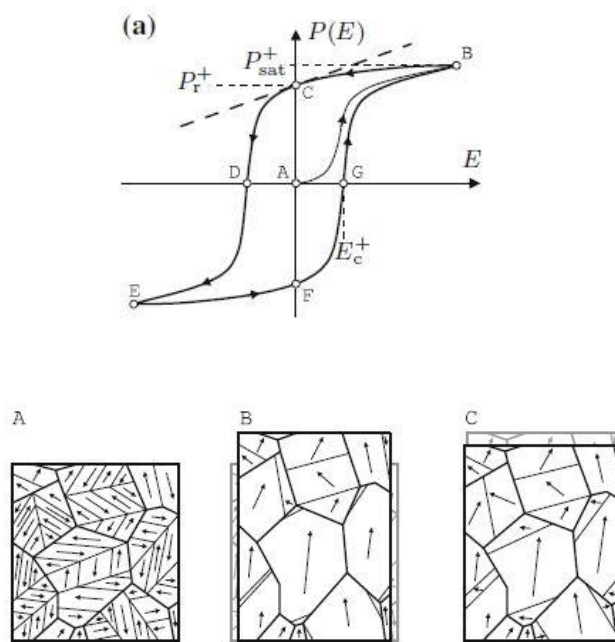
Materiali piezoceramici come il titanato di bario o il PZT sono formati da celle cristalline caratterizzate dalla cosiddetta struttura perovskitica. In generale questi materiali possono essere descritti semplicemente con la formula chimica  $ABO_3$ . Mentre A e B sono due cationi di dimensioni diverse,  $O_3$  è un anione che lega entrambi. Il catione A più grande si dispone negli angoli della cella mentre l'ossigeno  $O_3$  nel centro delle facce. Dipendentemente dallo stato della cella, il catione piccolo B si dispone o al centro o vicino al centro.

L'insieme di più celle caratterizzate dalla stessa direzione di disposizione dei cationi più piccoli (e quindi stessa direzione di polarizzazione elettrica spontanea), viene chiamato dominio. A sua volta più domini formano i grani delimitati dai bordi.

Dato che ogni sistema chiuso tende a minimizzare la propria energia libera, le celle unitarie si allineano in modo casuale che permette di portare l'energia elettrica e meccanica al minimo possibile.

Quindi a causa dell'orientazione casuale dei domini all'interno del materiale, la polarità risultante in un ceramico risulta nulla. Per questo motivo in questi materiali isotropi la piezoelettricità è indotta tramite un processo di polarizzazione (poling), consistente nell'applicazione di un forte campo elettrico in determinate condizioni (temperatura e tempo di polarizzazione), che allinea i dipoli molecolari nella stessa direzione del campo applicato dando origine ad un dipolo netto totale (e quindi una polarità) non più nulla [14-17].

Nel caso dei materiali piezoceramici, la polarizzazione in funzione del campo applicato presenta il ciclo di isteresi classico dei materiali ferroelettrici (Figura 1.19).



**Figura 1.19** – Ciclo di isteresi per polarizzazione materiale

Si definisce infatti ferroelectricità la capacità di un cristallo polare di invertire reversibilmente il proprio dipolo elettrico sotto l'applicazione di un campo elettrico di intensità opportuna.

Osservando la Figura 1.19 del ciclo di isteresi nel diagramma campo elettrico - polarizzazione indotta, si deduce che il campo da applicare al materiale per avere una polarizzazione ottimale è quello corrispondente alla polarizzazione di saturazione  $P_{sat}$  (punto B) in corrispondenza della quale non si ha ulteriore aumento di  $P$  per incrementi del campo esterno applicato  $E$ . Applicando un campo elettrico inferiore, il materiale si polarizza solo in parte e, di conseguenza, le sue proprietà piezoelettriche risultano inferiori.

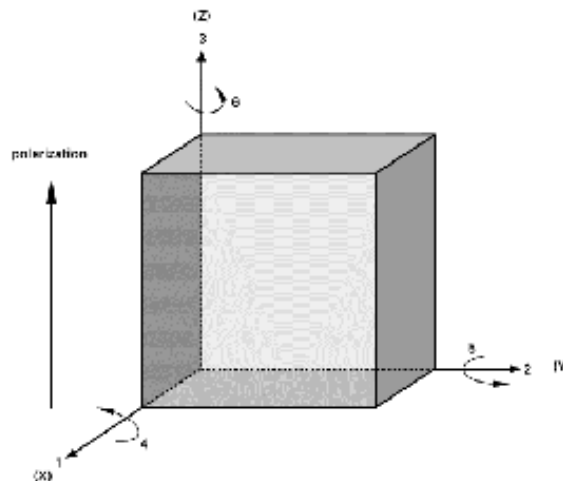
Una volta provocato l'allineamento dei domini per un dato tempo, viene rimosso il campo elettrico esterno, così da ottenere una polarizzazione residua  $P_r$  (punto C) come si nota nel ciclo di isteresi del materiale ottenendo dei domini non perfettamente allineati.

A questo punto il materiale ceramico policristallino è assimilabile, agli effetti del comportamento elettrico, ad un cristallo piezoelettrico.

### 1.3.2 Coefficienti caratteristici

Per comprendere le proprietà dei singoli elementi piezoelettrici e comparare i diversi materiali possibili, sono stati introdotti diversi coefficienti correlati tra loro.

A causa della natura anisotropa dei piezoceramici, tutte le loro costanti fisiche sono quantità di tipo tensoriale cioè gli effetti dipendono fortemente dall'orientamento rispetto all'asse polarizzato. Quest'ultimo rappresenta la direzione di polarizzazione e generalmente è indicato come l'asse z di un sistema cristallografico ortogonale. Gli assi x, y e z sono rappresentati rispettivamente come le direzioni 1, 2 e 3 e le direzioni di taglio intorno a questi assi sono rappresentate come 4, 5 e 6 (Figura 1.20).



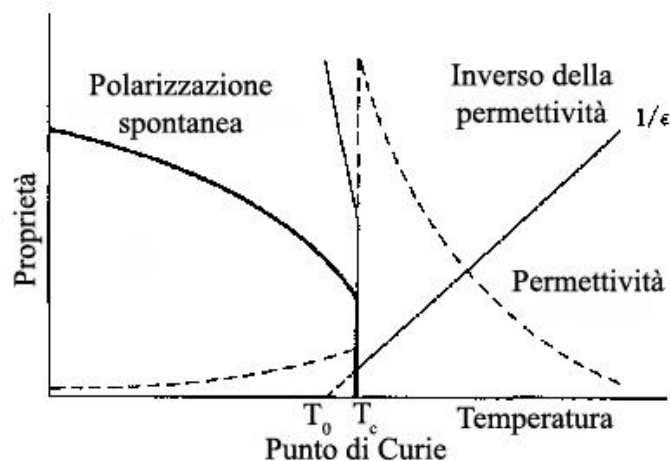
*Figura 1.20 – Direzioni caratteristiche materiale piezoelettrico*

Per correlare quantità elettriche e meccaniche, sono stati introdotti doppi pedici (per esempio  $d_{ij}$ ). Il primo pedice dà la direzione del campo elettrico associato alla tensione applicata o alla carica prodotta. Il secondo pedice dà la direzione della sollecitazione meccanica o della deformazione.

In generale, sono diversi i coefficienti che descrivono e rappresentano un materiale piezoelettrico ma, in questo lavoro di tesi, si è fatto riferimento solo a quelli relativi alle reali condizioni operative del sensore.

- *Temperatura di Curie*

È la temperatura critica al di sopra del quale il materiale diventa paraelettrico e perde tutte le sue proprietà piezoelettriche. La struttura del cristallo cambia da una forma non-simmetrica (piezoelettrica) ad una forma simmetrica (non-piezoelettrica).



*Figura 1.21 – Effetto Temperatura di Curie*

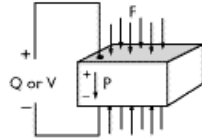
Come viene mostrato in Figura 1.21 al raggiungimento della  $T_c$  avviene il passaggio di fase tra la fase ferroelettrica e quella paraelettrica, nella quale è nulla la polarizzazione permanente.

- *Coefficiente di carica (o Deformazione)  $d$*

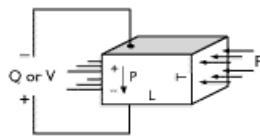
Esprime la polarizzazione elettrica generata in un materiale per unità di stress meccanico applicato (effetto piezoelettrico diretto); viceversa, essa può indicare anche la deformazione meccanica esibita dal materiale per unità di campo elettrico applicato (effetto piezoelettrico inverso).

Si possono ottenere diversi coefficienti  $d$  in base ai modi con cui la deformazione può essere applicata:

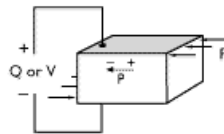
- $d_{33}$  (d diretto) è il coefficiente determinato dalla forza applicata nella direzione 3 (z) ed è impressa sulla stessa superficie su cui è raccolta la carica.



- $d_{31}$  (d trasversale) è il coefficiente determinato dalla forza applicata in direzione perpendicolare alla superficie su cui è impressa la carica.



- $d_{15}$  (d di taglio) è il coefficiente determinato dalla forza di taglio applicata su una superficie perpendicolare a quella originale di polarizzazione.



- *Coefficiente di accoppiamento elettromeccanico k*

Questo coefficiente può fornire una misura globale dell'entità dell'effetto piezoelettrico e rappresenta, dato un campo elettrico applicato, la conversione di energia da elettrica a meccanica (o viceversa) per effetto piezoelettrico.

## 1.4 Metodologia proposta

Il presente studio si è focalizzato sull'ultima tipologia di misura indiretta descritta, ovvero lo sviluppo di un sensore piezoelettrico da posizionare sotto la candela, con l'ipotesi di sostituire la rondella di tenuta originale con quella strumentata.

Si è scelta questa metodologia poiché lo strumento di misura si trova in prossimità della camera di combustione e quindi otteniamo una misura più "diretta" rispetto alle altre e quindi più correlata alla variazione di pressione interna al cilindro. Inoltre, dal punto di vista tecnologico, considerando anche il rapporto tra qualità del segnale acquisito e costo potenziale, è una soluzione decisamente più conveniente.

### 1.4.1 Realizzazione primo prototipo

Per questo motivo sono stati sviluppati diversi prototipi compatibili con candele con filettatura M12 con l'intento di verificare se effettivamente questa soluzione fosse veramente adatta al nostro scopo.

L'elemento sensibile del sensore è una rondella di materiale piezoceramico (caratteristiche principali nella Tabella 1) di Diametro interno 12 mm, diametro esterno 16 mm e spessore 2 mm.

<b>Physical properties</b>		
Density	$\rho$	$7.8 \text{ g/cm}^3$
Curie temperature	$T_C$	$350 \text{ }^\circ\text{C}$
<b>Electromechanical properties</b>		
Piezoelectric charge coefficient	$d_{33}$	$400 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$
Coupling Factor	$k_{33}$	0.69
<b>Mechanical properties</b>		
Elastic Compliance Coefficients	$s_{33}$	$20.7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Static Compressive Strength	$\sigma_C$	$600 \text{ MPa}$

*Tabella 1 – Caratteristiche materiale piezoelettrico utilizzato*

Per realizzare i contatti elettrici sono stati realizzati appositamente due tipologie di PCB (*Printed Circuit Boards*), uno per la superficie di polarizzazione superiore ed uno per quella inferiore (Figura 1.22). Uno dei due caratterizzato da due facce di rame, collegate elettricamente, e all'interno vetroresina, mentre l'altro con una sola faccia di rame. Il primo viene incollato con un apposito adesivo epossidico conduttivo alla faccia superiore del quarzo, in modo che il collegamento elettrico che verrà effettuato con il filo sarà a massa con la candela dove poggierà il sensore. Il PCB ad una sola faccia viene invece incollato nella superficie inferiore del piezoelettrico così da avere lo strato che poggia sulla sede della candela completamente isolato. Entrambi i PCB inoltre sono caratterizzati da un piedino per il collegamento, al quale è stato aggiunto uno strato di *Solder Mask* per evitare che lo stagno si propaghi radialmente all'interno durante la realizzazione dei contatti.

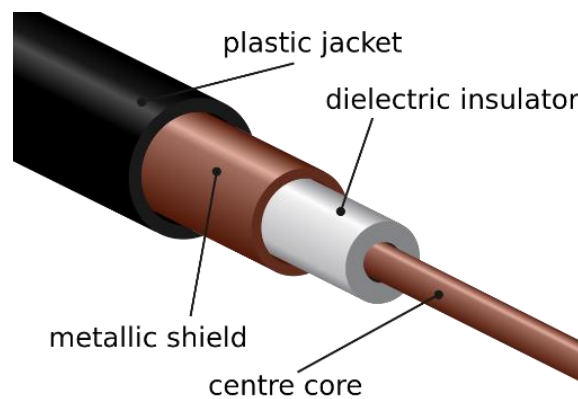


**Figura 1.22** – PCB per candela M10 (sopra) e candele M12 (sotto)



Oltre ad essere utilizzati come contatti elettrici, i PCB servono inoltre per conferire una miglior resistenza al sensore stesso essendo il materiale piezoelettrico decisamente fragile.

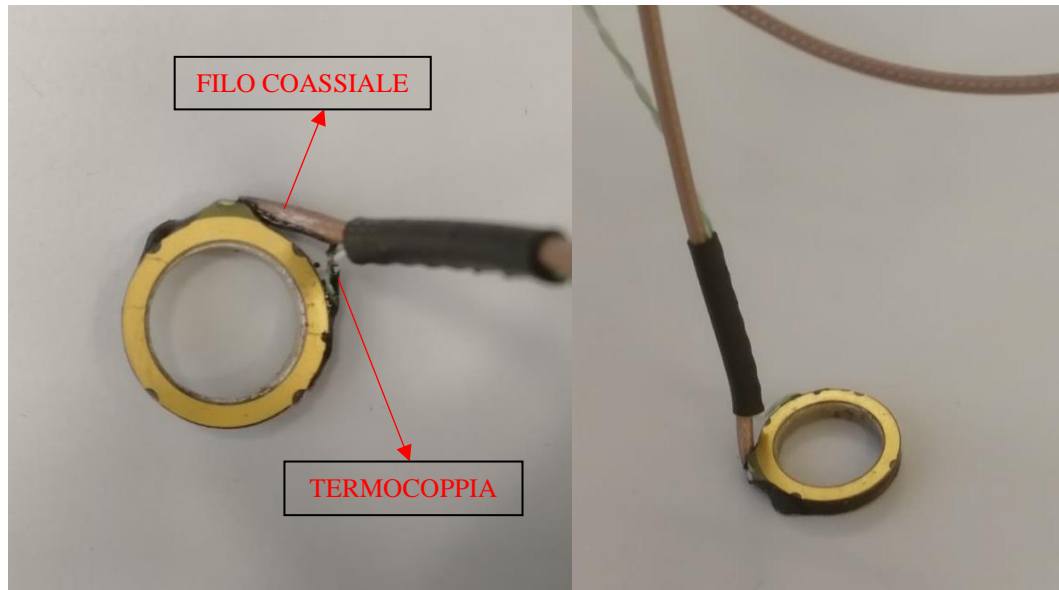
In questo caso il contatto elettrico è stato effettuato mediante un filo coassiale, caratterizzato quindi da due conduttori, uno interno e l'altro coassiale (nucleo e camicia), separati da un isolante la cui resistenza è dell'ordine di parecchie migliaia di  $M\Omega$  (Figura 1.23). Per questo, un conduttore è stato saldato al PCB superiore e l'altro al PCB inferiore. In particolare, in questo caso, è stato utilizzato un filo conduttore di diametro esterno 1.8 mm e caratterizzato da una temperatura di esercizio massima intorno ai 200 °C.



*Figura 1.23 – Schema filo coassiale*

Infine, è stata applicata della resina epossidica adesiva nella parete esterna della rondella strumentata, isolando le due facce e conferendo inoltre maggior compattezza e resistenza al sensore.

Nei primi prototipi è stata inoltre connessa una termocoppia per valutare nelle prime prove l'effettiva temperatura di esercizio del sensore. L'immagine del primo prototipo realizzato viene mostrata nella Figura 1.24.



*Figura 1.24 – Primo prototipo realizzato*

Ovviamente, data la fragilità del materiale utilizzato e dei contatti elettrici stessi, si è cercato, in questo lavoro di tesi, di sviluppare, oltre all'elemento sensibile stesso, un case, ovvero una scatola di protezione. Questo è utile, inoltre, per limitare il carico termico agente sul sensore, in quanto, essendo vicino alla camera di combustione, si raggiungono temperature fino ai 150°C che possono determinare una variazione delle caratteristiche piezoelettriche.

Racchiudendo l'elemento sensibile all'interno di un case, si riesce anche ad evitare che, ad una eventuale rottura della rondella piezoelettrica, pezzi di materiale entrino nella camera di combustione.

Di seguito vengono espone una ad una le soluzioni scelte in modo da risolvere tutte le problematiche pervenute, cercando di individuare una geometria, sia dell'elemento sensibile che del case, che ottimizzasse affidabilità e semplicità di montaggio, rendendo questa tecnologia la più standard possibile.

## Capitolo 2

### Modellazione sperimentale

In ottica di ottimizzare il più possibile la tecnologia proposta, soprattutto dal punto di vista tecnologico, il sensore è stato modellato sul CAD 3D Creo Parametric 3.0, cercando di trovare la soluzione più conveniente sia dal punto di vista di affidabilità della misura che dal punto di vista economico.

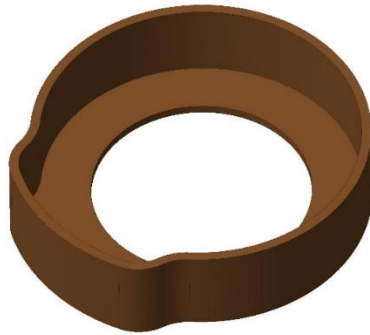
Per prima cosa si è modellato il prototipo descritto precedentemente, costituito quindi da materiale piezoelettrico, due strati di PCB, resina adesiva epossidica e filo coassiale (Figura 2.1).



*Figura 2.1 – Modellazione 3D prototipo*

Facendo riferimento alla vista dall'alto si nota facilmente che l'ingombro radiale massimo non è dato dal diametro esterno dell'elemento sensibile ( $D_e=16\text{mm}$ ), ma dalla fuoriuscita dei contatti dei due PCB e del filo coassiale che, in questo caso, come già è stato detto, ha un diametro di 1.8mm.

Per cercare di rivestire il sensore con un case di protezione si è modellata una prima versione del case, cercando di seguire la geometria e gli ingombri radiali come mostrato in Figura 2.2.



*Figura 2.2 – Prima versione del case*

Si è scelto per la prima versione uno spessore di parete di 0.5 mm e si sono verificate le misure e l'effettiva funzionalità effettuando una prima Stampa 3D FDM con materiale polimerico (Figura 2.3).



*Figura 2.3 – Verifica case con stampa 3D FDM*

Successivamente è stato realizzato un prototipo con Stampa 3D in acciaio inox con tecnologia SLM (Selective Laser Melting) comprovando la funzionalità del case prodotto (Figura 2.4).



*Figura 2.4 – Verifica case con stampa 3D SLM*

Dopo aver verificato la geometria esterna, sono state successivamente svolte diverse modifiche, sia del case che dell'elemento sensibile stesso, per far fronte a diverse problematiche che verranno ampiamente discusse qui di seguito.

## 2.1 Modellazione elemento sensibile

Pur avendo già disponibile il prototipo spiegato precedentemente, si è voluto, in questo lavoro di tesi, trovare una nuova geometria per limitare il più possibile tutte le problematiche che sorgono nell'utilizzo di questa tecnologia. Per questo motivo, si è scelto di partire da zero, impiegando ovviamente gli stessi principi utilizzati per la realizzazione del prototipo, al fine di ottenere la soluzione ottimale.

### 2.1.1 Ingombro assiale piezoelettrico

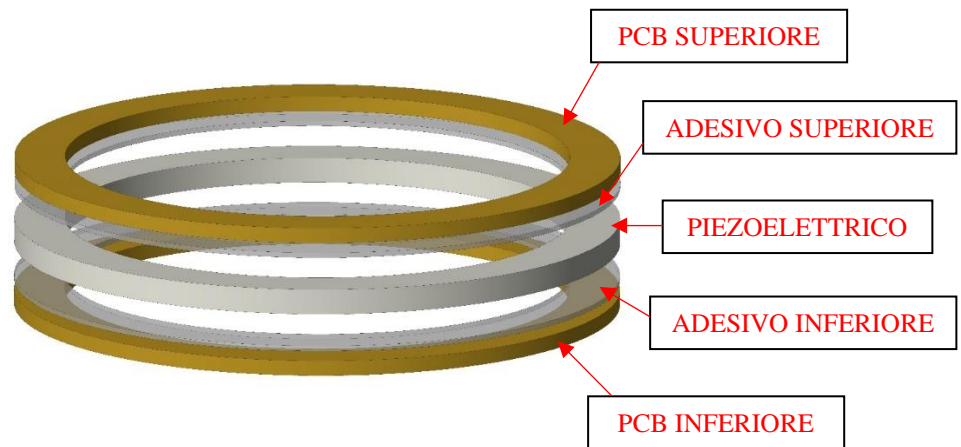
Ogni candela è caratterizzata da una rondella standard di tenuta, di solito di spessore 1.5 mm, dimensionata in modo che l'elettrodo si trovi in una determinata posizione all'interno della camera di combustione per favorire ad ogni ciclo termodinamico la corretta propagazione del fronte di fiamma.

Utilizzando quindi un sensore piezoelettrico al posto della rondella standard, otterremo inevitabilmente una variazione della protrusione dell'elettrodo in camera, ovvero avremo un allontanamento di questo dalla posizione ottimale in quanto lo spessore totale del sensore (piezoceramico + case) è solitamente maggiore di quello della rondella.

La situazione ideale verrebbe raggiunta nel momento in cui i due spessori fossero gli stessi ma, sfortunatamente, queste dimensioni sono difficili da realizzare, soprattutto per limitazioni tecnologiche.

Si è cercato quindi di limitare e abbassare, per quanto possibile, l'ingombro assiale di tutto il sensore per avvicinarsi allo spessore della rondella standard, così da ottenere una combustione simile a quella ottimale.

Per far questo si sono considerate diverse geometrie dell'elemento sensibile. La via più ovvia è quella di diminuire lo spessore assiale del materiale piezoelettrico fino ad arrivare ad un ingombro minimo di 0.5 mm. Sono stati considerati, anche in questo caso, i due PCB per il contatto elettrico caratterizzati da uno spessore di 0.3 mm l'uno. Aggiungendo infine lo spessore della resina epossidica conduttiva di 0.1 mm per superficie, si raggiunge un ingombro assiale minimo dell'elemento sensibile di 1.3 mm (Figura 2.5).

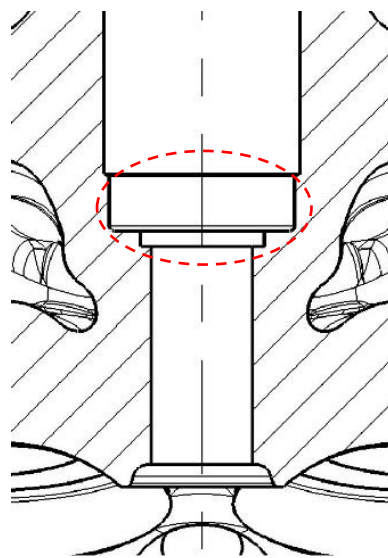


*Figura 2.5 – Ingombri assiali elemento sensibile*

## 2.1.2 Ingombro radiale piezoelettrico

Un'altra considerazione da fare è quella sull'ingombro radiale in quanto, data la considerevole variabilità geometrica dei motori a combustione interna, è opportuno ridurre e miniaturizzare il sensore il più possibile, permettendo così un corretto montaggio senza interferenze all'interno della sede della candela.

In alcune applicazioni accade che la sezione trasversale del pozzetto dove si trova la candela dispone di un gradino finale che limita ulteriormente il corretto inserimento del sensore come mostrato in Figura 2.6.



*Figura 2.6 – Gradino sede candela*

Per prima cosa quindi si può pensare di ridurre il diametro esterno del piezoceramico. Nel prototipo iniziale per una candela M12, le dimensioni erano: diametro interno  $D_i=12$  mm e diametro esterno  $D_e=16$  mm.

Con l'ottica di montare il sensore in una candela con filettatura M10 si è scelto un diametro interno di 10 mm, mentre il diametro esterno ridotto ad un minimo, per ragioni tecnologiche, di 12 mm.

Tutte queste scelte sono state ponderatamente valutate considerando che le dimensioni in sé influiscono sulla realizzazione e ovviamente sul costo del materiale più che altro per via delle criticità indotte sul processo di produzione e quindi sul tasso di mortalità durante le varie fasi. In questo caso infatti lo spessore di parete molto ridotto ( $D_e-D_i$ ) associato ad un diametro proporzionalmente "grande" porta ad alcune complessità, da cui costi più elevati. Inoltre, più lo spessore è sottile e più è complicata la realizzazione, specialmente in fase di polarizzazione dove si hanno gli stress maggiori sul materiale piezoelettrico.

Avendo considerato quindi queste problematiche, si è arrivati infine alle seguenti misure del materiale piezoelettrico per una candela con filettatura M10:

- SPESSORE 0.5 mm
- DIAMETRO ESTERNO 12 mm
- DIAMETRO INTERNO 10 mm

### 2.1.3 Realizzazione PCB

Come è stato spiegato precedentemente, per la realizzazione del primo prototipo è stato modellato e realizzato il PCB, sia per la faccia superiore che quella inferiore dell'anello piezoelettrico.

Anche in questo caso, dato che è stata cambiata la geometria, è necessario modellarlo appositamente. Si è prestata però maggiore attenzione nella realizzazione della zona dove avviene l'effettivo contatto elettrico, in quanto le altre dimensioni principali, ovvero diametro interno ed esterno, erano ovviamente uguali a quelle del materiale piezoelettrico utilizzato.



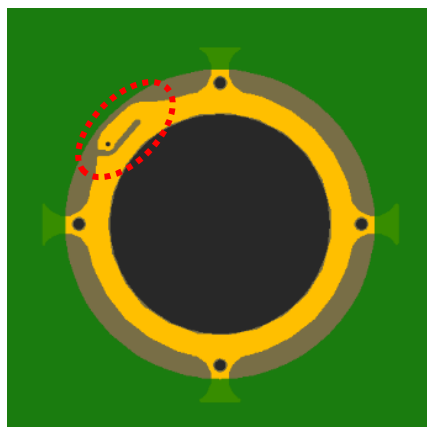
Per ridurre al minimo l'ingombro radiale si è scelto quindi di realizzare un piedino per il contatto elettrico di soli 0.8 mm rispetto al diametro esterno del piezoelettrico di 12 mm, nel quale verrà saldato il filo (Figura 2.7).



*Figura 2.7 – Modellazione al CAD del PCB*

Come nel primo prototipo, si è scelto di realizzare sia PCB a doppia faccia (tutto rame con via tra top e bottom) che PCB a singola faccia (solo rame).

Date le dimensioni ridotte è stato impossibile aggiungere uno strato di Solder Mask, come era stato fatto per il primo prototipo. Per questo motivo, per evitare che, durante la saldatura del filo, lo stagno si propaghi oltre la zona effettiva di contatto e quindi dentro il materiale piezoelettrico, si è scelto di aggiungere un piccolo scasso, che sarà riempito di vetroresina (Figura 2.8).



*Figura 2.8 – File gerber finale del PCB con scasso*

## 2.1.4 Scelta del filo

Facendo riferimento alla vista dall'alto dell'elemento sensibile (Figura 2.1), si deduce che l'ingombro massimo radiale non è semplicemente dato dal diametro esterno del materiale piezoelettrico. Bisogna infatti tenere conto dell'ingombro aggiuntivo generato dai contatti elettrici del PCB e, inoltre, da quello generato dal filo coassiale di 1.8 mm di diametro.

Considerando che i contatti elettrici del PCB, come è stato spiegato precedentemente, sono stati potati ad un minimo di 0.8 mm, è opportuno valutare anche il filo che, inevitabilmente, crea un ingombro radiale aggiuntivo.

Si è pensato quindi di cambiare la modalità con la quale venivano effettuati i contatti elettrici: piuttosto che utilizzare un filo coassiale saldando il nucleo conduttore interno e la camicia ai due PCB, vengono utilizzati due fili conduttori identici più piccoli saldati ognuno ai rispettivi PCB.

Per questa nuova impostazione è stato scelto quindi un filo conduttore ThermoThin a trefoli, di diametro nominale esterno di 0.51 mm e temperatura di esercizio massima di 300°C. In questo modo, facendo uscire i due fili parallelamente all'esterno, si ottiene una riduzione dell'ingombro radiale massimo dell'elemento sensibile di 1.2 mm circa. La Figura 2.9 mostra il modello 3D finale realizzato dell'elemento sensibile.



*Figura 2.9 – Modellazione finale dell'elemento sensibile*

## 2.2 Modellazione case

Uno degli obiettivi principali prefissati nel presente lavoro di tesi era quello di sviluppare e realizzare un case di protezione per il sensore piezoelettrico. La scelta della realizzazione del case è dipesa dal fatto che questo offre diversi vantaggi:

- Protegge l'elemento sensibile dalle alte temperature che si hanno nella sede della candela durante il funzionamento del motore (fino ai 150 °C), evitando quindi una variazione delle caratteristiche dell'elemento piezoelettrico e quindi evitando, almeno in parte, l'effetto della deriva termica nel segnale
- Permette una maggiore uniformità nella distribuzione del carico nel piezoelettrico;
- Isola l'ambiente interno da campi elettrostatici che possono formarsi esternamente (in altre parole può essere considerato una gabbia di Faraday);
- Modellato correttamente, può permettere la trasmissione del momento di serraggio durante il montaggio o lo smontaggio, per evitare che il materiale piezoelettrico fragile subisca dei carichi torsionali sulle superfici.
- Evita la caduta di frammenti di materiale piezoelettrico in caso di rottura;

### 2.2.1 Ingombro assiale case

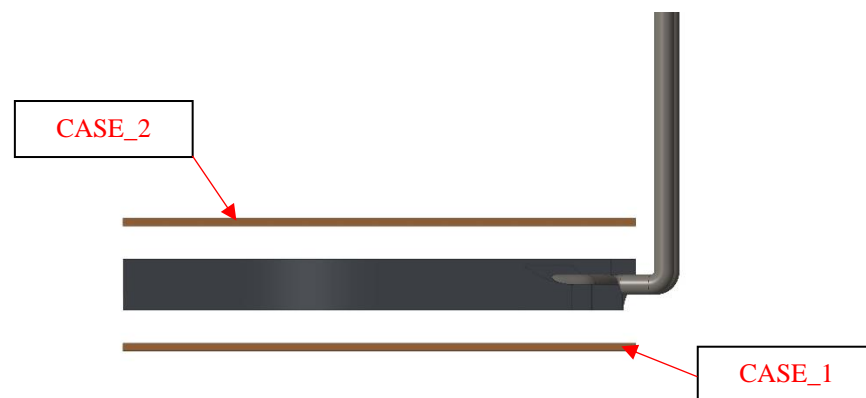
Oltre a cercare di limitare le dimensioni dell'anello piezoelettrico, è opportuno modellare il case in modo da occupare il minor spazio possibile, senza però compromettere la sua funzionalità.

Per ricoprire completamente il componente piezoelettrico si è deciso quindi di separare il case in due parti differenti: una inferiore, che chiameremo case\_1, ed una superiore, che chiameremo case\_2.

Data l'elevata temperatura che viene raggiunta nella sede del sensore ad ogni ciclo termodinamico, si è scelto di utilizzare come materiale l' AISI 304, un acciaio inox austenitico amagnetico. Ovviamente si è modellato il case in modo da tenere conto delle limitazioni tecnologiche per questo materiale e, allo stesso tempo, tenere contenuto il più possibile il costo della realizzazione.

Il limite minimo raggiunto per lo spessore del case è di 0.2 mm, sia per il case\_1 che per il case\_2, avendo scelto lavorazioni in lamiera come taglio, piegatura e imbutitura.

Si è arrivati in questo modo ad un ingombro minimo assiale di 1.7 mm di tutto il sensore (elemento sensibile+case\_1+case\_2) e quindi solo 0.2 mm circa più grande della rondella standard della candela, determinando una sporgenza dell'elettrodo della candela all'interno della camera di combustione di poco minore rispetto a quella ottimale (Figura 2.10). Per semplificare la fase di montaggio e smontaggio inoltre, si può pensare di incollare la rondella al case, tenendo in considerazione però che sulla superficie inferiore deve essere applicata una resina isolante mentre su quella superiore una resina conduttiva poiché il PCB deve necessariamente essere messo a massa con la base della candela.



*Figura 2.10 – Ingombro assiale case*

## 2.2.2 Ingombro radiale case

La variabilità geometrica delle sedi delle canele nei motori a combustione interna ci impongono di limitare la dimensione radiale del sensore. La parete del case, che ha lo scopo di proteggere esternamente l'elemento sensibile, causa un aumento dell'ingombro radiale e, per questo motivo, occorre tenersi il più possibile vicini alle dimensioni della rondella standard della candela.

Ovviamente, la scelta fatta per l'ingombro assiale di 0.2 mm si ripercuote nel caso ora considerato. Quindi, partendo da questo dato, è stato modellato il case facendo riferimento alla sezione trasversale dell'elemento sensibile e naturalmente

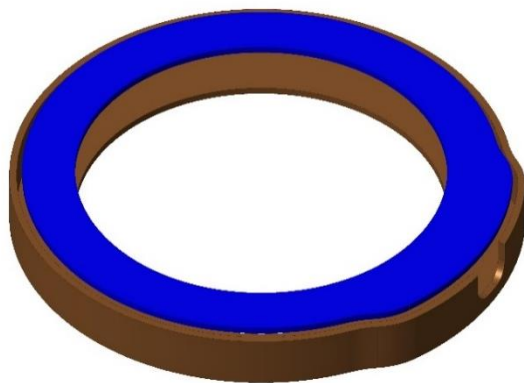
aggiungendo un margine di una certa tolleranza, affinché venga permesso un suo corretto inserimento all'interno senza nessuna interferenza.



*Figura 2.11 – Prima modellazione case\_1*

Per permettere la fuoriuscita dei due fili conduttori è stata successivamente creata una sezione di passaggio esterna come mostrato in Figura 2.11.

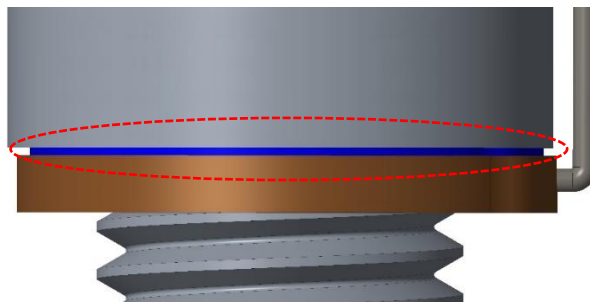
Per quanto riguarda il case\_2, non si ottiene un aumento dell'ingombro radiale ma solo di quello assiale come già spiegato precedentemente, in quanto il diametro massimo è minore di quello del case\_1, come viene mostrato nella Figura 2.12.



*Figura 2.12 – Assieme case\_1 e case\_2*

Per il corretto funzionamento del sensore è opportuno dimensionare il case in modo che la pressione agente sull'elemento sensibile (sia quella di precarico che quella di esercizio) agisca effettivamente su di esso e non si scarichi sulle pareti verticali.

La parete esterna del case\_1 è stata quindi modellata in modo che esista un margine con la superficie inferiore della candela. In questo modo, durante il montaggio e durante il funzionamento, la candela eserciterà una pressione sul case\_2 che verrà trasferita uniformemente su tutta la superficie superiore del piezoelettrico (Figura 2.13).



*Figura 2.13 – Vista laterale assieme sensore e candela*

### 2.2.3 Serraggio case

Una fase critica che occorre decisamente considerare è la fase di serraggio della candela. In generale la candela viene montata con una coppia di serraggio che dipende dal diametro del filetto. Per una candela con sede piatta e filettatura M10 si ha solitamente una coppia di serraggio di 10-15Nm.

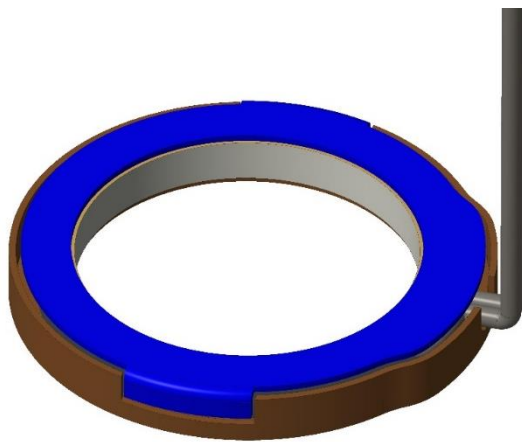
Questa fa ruotare il sensore che però tende a rimanere fermo per effetto dell'attrito con la sede del pozzetto. In questo modo vengono generate delle componenti torsionali sulla superficie del case, che vengono trasferite all'elemento sensibile.

Essendo il materiale piezoelettrico decisamente fragile, può succedere che un carico torsionale di queste entità porti a rottura del materiale oppure ad uno scollamento del PCB, compromettendo il funzionamento del sensore.

Per evitare queste criticità è opportuno fare in modo che, durante la fase di montaggio e smontaggio, il sensore ruoti insieme alla candela.

Essendo il sensore composto da tre parti separate, si deve fare in modo, per prima cosa, che tutte ruotino insieme durante le fasi di montaggio e smontaggio della candela.

Per questo si è pensato di modificare la parete esterna del case\_1, asportando del materiale in zone specifiche e modificando il case\_2 inserendo delle linguette che permettono la trasmissione del moto dall'uno all'altro, come viene mostrato in Figura 2.14.



*Figura 2.14 – Sistema per la trasmissione della coppia case\_1-case\_2*

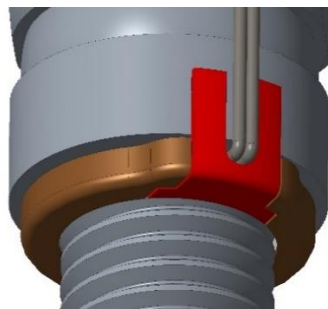
Il passo successivo però è quello di fare in modo che il sensore ruoti contemporaneamente con la candela.

Ovviamente esistono molteplici soluzioni per risolvere questo problema ma, in questo progetto, si è cercato di sviluppare quella che limitava il più possibile gli ingombri radiali e assiali del sensore.

Un modo potrebbe essere quello di incollare il case\_2 con la superficie inferiore della candela, soluzione semplice ed efficace. Il problema è che, in questo modo, aumenterebbe l'ingombro assiale complessivo di una quantità pari allo spessore dell'adesivo utilizzato, generando quindi un allontanamento dell'elettrodo della candela in camera di combustione dalla posizione ottimale. Inoltre, un ulteriore

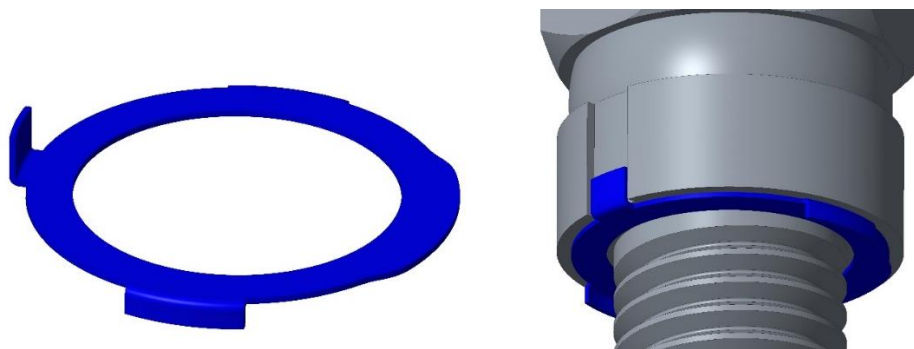
inconveniente sarebbe quello di non poter riutilizzare lo stesso sensore con una candela diversa, non potendo separare agevolmente le due parti incollate.

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di modificare il case\_1 separandolo in due parti, una delle quali da incollare o, eventualmente, da saldare nella candela (Figura 2.15). In questo caso però aumenterebbe l'ingombro radiale del sensore e, come con l'adesivo, non si riuscirebbe ad utilizzare di nuovo lo stesso sensore in una diversa applicazione.



*Figura 2.15 – Possibile sistema per trasmissione coppia candela-case*

Tenendo conto di queste considerazioni, come soluzione più opportuna, si è pensato di aggiungere semplicemente un'ulteriore linguetta nel case\_2, che andrà ad inserirsi in un'apposita scanalatura lavorata nella candela, come viene mostrato in Figura 2.16. In questo modo il moto viene trasmesso dalla candela a tutto il sensore e, inoltre, non vengono aggiunti ulteriori ingombri assiali o radiali che potrebbero limitare l'utilizzo di questa tecnologia in alcune applicazioni.



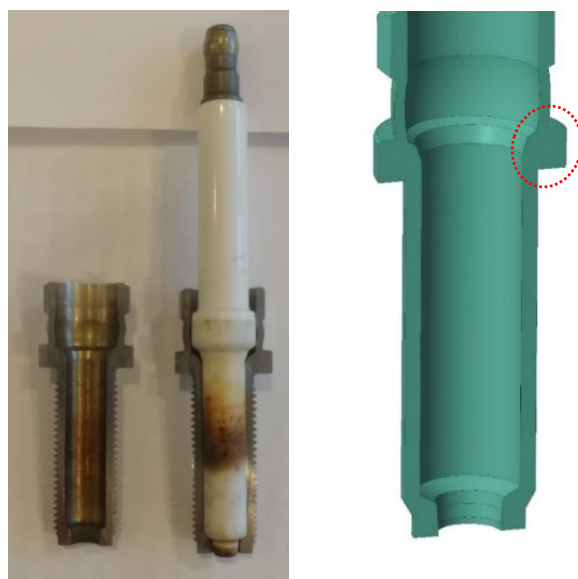
*Figura 2.16 – Sistema utilizzato per per trasmissione coppia candela-case*



L'unico inconveniente di questa metodologia è di dover lavorare la candela per ottenere la scanalatura, che però può essere realizzata utilizzando una semplice fresatrice con un utensile di piccole dimensioni.

Prima di giungere a questa soluzione sono state sezionate diverse candele con filettatura M10 e M12 con lo scopo di verificare se effettivamente fosse realizzabile la scanalatura. La candela infatti è caratterizzata da una parte interna in ceramica fragile che non può essere modificata, mentre la parte esterna può essere lavorata entro certi limiti.

Una prima analisi visiva delle sezioni effettuate mostrava che nella parte cilindrica della candela è possibile asportare del materiale. Sono state comunque modellate opportunatamente al CAD 3D che ha confermato quanto ipotizzato precedentemente, provando quindi la possibile realizzazione dell'intaglio (Figura 2.17). Dal modello della candela sezionata si è inoltre verificato che è possibile asportare del materiale lungo la direzione assiale, ovvero, ponendo la candela in un tornio, può essere lavorato il cilindro alla base fino ad un massimo, in questo caso, di 1.4 mm, potendo così inserire un sensore con ingombro assiale maggiore.

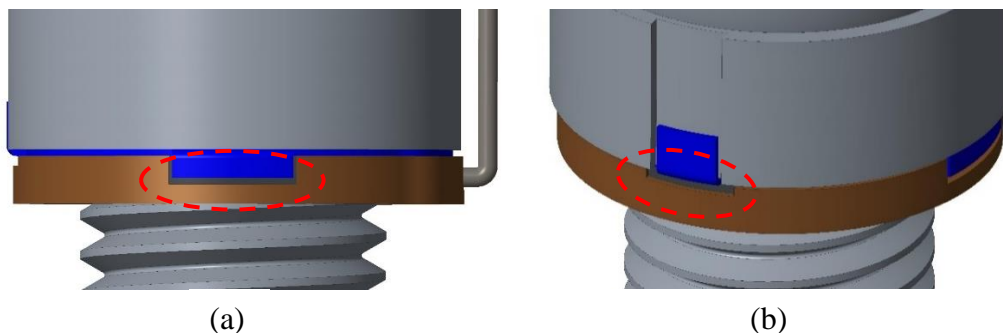


*Figura 2.17 –Candela M10 sezionata (sinistra) e sua modellazione al CAD 3D (destra)*

Una volta scelta questa modalità per la trasmissione del moto dalla candela al sensore durante il montaggio e lo smontaggio, è opportuno effettuare delle precisazioni per tenere conto di inconvenienti che potrebbero compromettere il corretto rilevamento della pressione durante il funzionamento.

Occorre essere sicuri che l'elemento sensibile venga effettivamente compresso, sia dal precarico dato dalla coppia di serraggio che durante il funzionamento, in modo da sentire la variazione di pressione sulle superfici polarizzate. Si deve evitare quindi che le forze si scarichino sul case piuttosto che sull'elemento sensibile.

Per questo motivo è stato opportunamente lasciato del gioco tra le linguette del case\_2 e l'intaglio del case\_1 (Figura 2.18a). Lo stesso criterio è stato utilizzato per la linguetta che viene inserita nella scanalatura della candela, rimuovendo del materiale dal case\_1 (Figura 2.18b).



*Figura 2.18 – Visione giochi per corretto funzionamento*

## 2.3 Modello 3D finale proposto

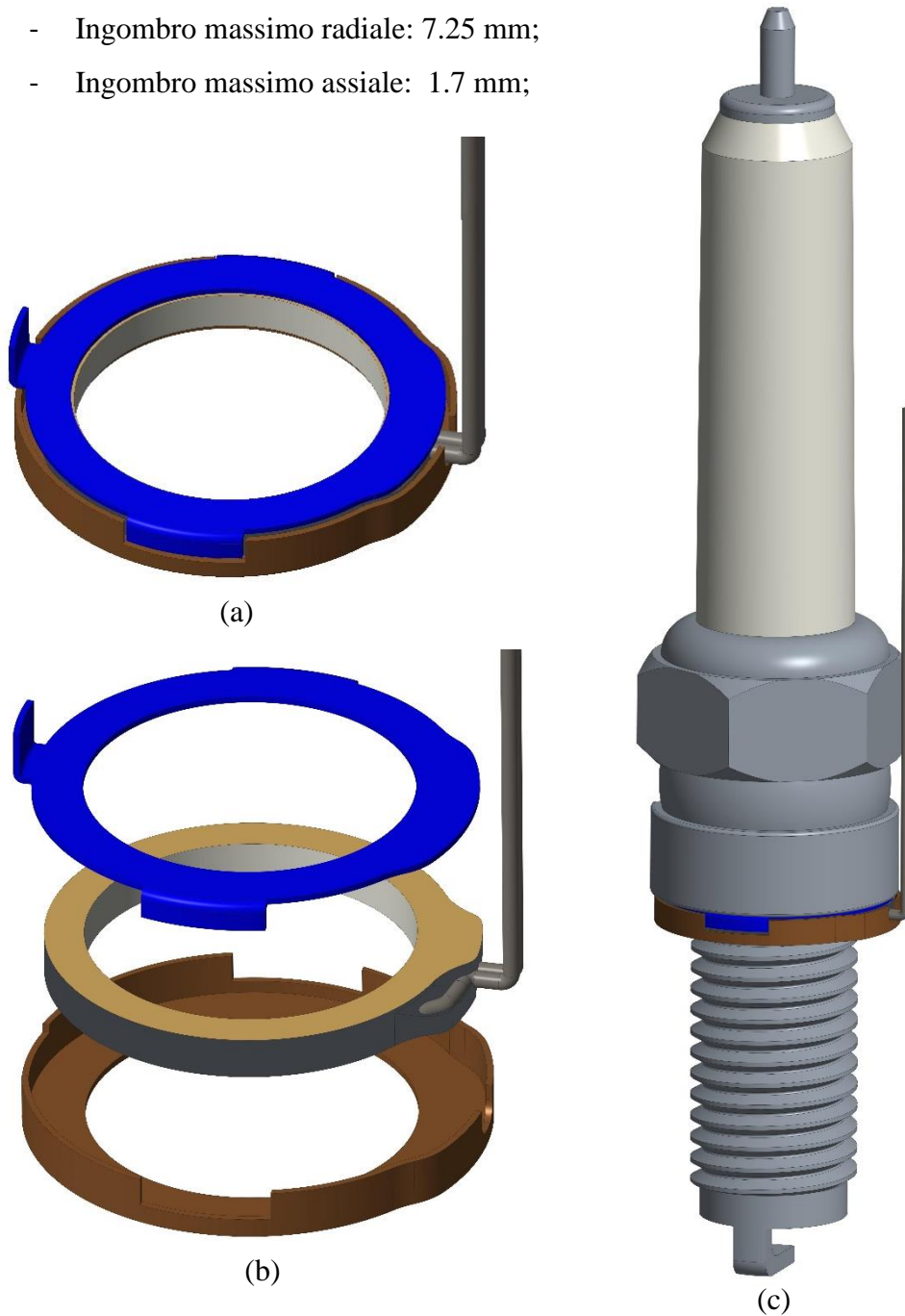
Seguendo tutti questi procedimenti si è giunti all'ultima versione del sensore (Figura 2.19) le cui caratteristiche principali vengono riassunte qui di seguito:

- Elemento sensibile costituito da una rondella di materiale piezoelettrico ( $D_i=10\text{mm}$ ,  $D_e=12\text{mm}$ ,  $s=0.5\text{ mm}$ );
- PCB inferiore singola faccia in rame di spessore 0.3 mm;
- PCB superiore doppia faccia in rame di spessore 0.3 mm;

- Due fili conduttori con diametro nominale esterno di 0.51 mm e temperatura di esercizio massima di 300°C;
- Case\_1 e case\_2 di spessore 0.2 mm e materiale acciaio inox;

Per quanto riguarda gli ingombri massimi raggiunti si avrà:

- Ingombro massimo radiale: 7.25 mm;
- Ingombro massimo assiale: 1.7 mm;

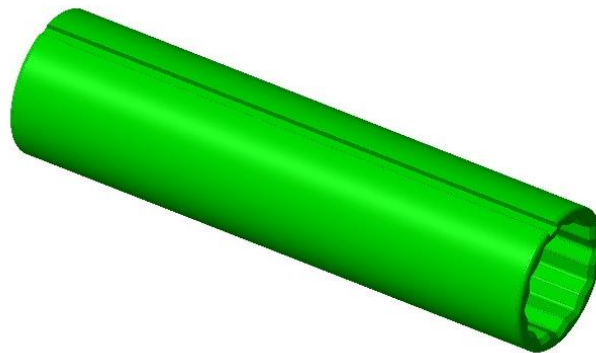


**Figura 2.19** – Sensore finale (a), esploso sensore (b), assieme sensore-candela (c)

## 2.4 Chiave di montaggio

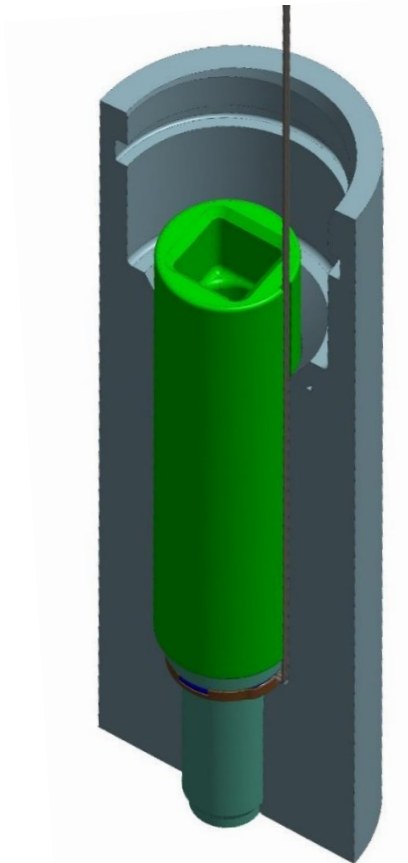
Durante la fase di montaggio, in alcune applicazioni, bisogna considerare anche la fuoriuscita del filo in quanto lo spazio disponibile è così ridotto che si hanno solo pochi decimi di millimetri tra il pozzetto e la chiave necessaria per serrare la candela. I due fili coassiali infatti devono avere la possibilità di ruotare insieme al sensore e la candela, altrimenti si rischierebbe una rottura o dei contatti o del filo stesso, essendo di diametro nominale esterno di 0.51 mm e di conseguenza poco resistente.

Per questo motivo, in questi casi, la soluzione più semplice è quella di lavorare direttamente la chiave, effettuando una cava passante longitudinale dentro la quale va inserito il filo (Figura 2.20). Essendo quest'ultimo di dimensioni ridotte, la cava è stata dimensionata in modo che sia caratterizzata da una profondità di 0.4 mm e una larghezza di 1.2 mm.



*Figura 2.20 – Cava passante chiave di montaggio*

I due fili conduttori paralleli verranno quindi inseriti all'interno della cava durante la fase di montaggio e quella di smontaggio, permettendo una loro rotazione coassiale con sensore e candela, come viene mostrato nella Figura 2.21.

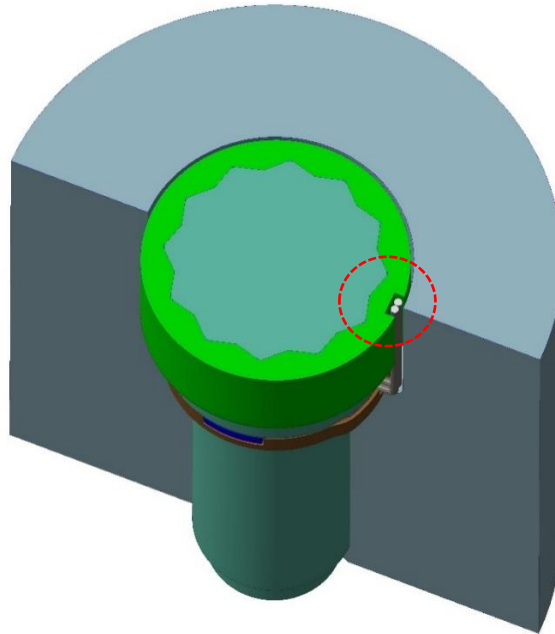


*Figura 2.21 – Visione assieme durante montaggio/smontaggio candela*

Ovviamente anche qui occorre tenere conto di tutti gli eventuali problemi che possono insorgere. Uno di questi è la lavorazione stessa della chiave che prevede una complicazione in più e un aumento dei costi di applicazione. Questa però è l'unica soluzione plausibile in quanto la lavorazione è decisamente più semplice e meno costosa di una eventuale lavorazione del pozzetto stesso.

Occorre inoltre considerare la resistenza della chiave in quanto una cava passante lungo la sezione longitudinale può causare criticità, soprattutto nella sezione finale di attacco con la candela, dove la quantità di materiale nella direzione radiale è minore. In alcuni casi si può raggiungere addirittura un'apertura, e quindi rottura, della sezione finale della chiave dopo pochi utilizzi. Le sollecitazioni maggiori si hanno di solito nelle chiavi di serraggio per candele a sezione poligonale in quanto sono caratterizzate da spessori più sottili. Per questo motivo il posizionamento della

cava non può essere casuale, ma occorre effettuare la lavorazione nella zona in cui si trova più materiale, così da evitare il più possibile questo effetto (Figura 2.22).



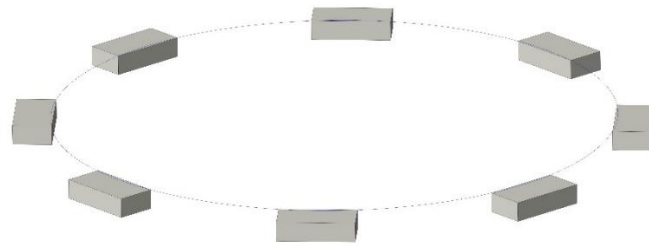
*Figura 2.22 – Sezione trasversale chiave e candela*

## 2.5 Soluzione alternativa

Una rondella piezoelettrica caratterizzata da un rapporto  $\frac{De-Di}{s}$  molto piccolo, come nel caso descritto fino ad ora, è molto fragile e inoltre, nella maggior parte dei casi, deve essere fatta su misura in quanto non è disponibile tra i pezzi standard che si producono generalmente. Il prezzo quindi aumenta considerevolmente, soprattutto perché si hanno delle criticità in alcune fasi della lavorazione, come nella polarizzazione, dove si hanno le sollecitazioni maggiori.

Si può pensare quindi di utilizzare la stessa tecnologia, con un sensore sotto candela, ma utilizzando piccoli elementi sensibili di materiale piezoelettrico piuttosto che una rondella.

In questo senso, si è scelto di modellare una rondella “a pezzi”, ovvero una rondella in  $\Delta\theta$ , utilizzando quindi dei *plates* di materiale piezoelettrico. Per limitare, come nel caso precedente, gli ingombri assiale e radiale del sensore, sono stati scelti plates da 1 mm di larghezza, 2 mm di lunghezza e 0.5 mm di spessore, che verranno disposti lungo una circonferenza per ricreare, in qualche modo, la rondella (Figura 2.23).



*Figura 2.23 – Disposizione plates piezoelettrici*

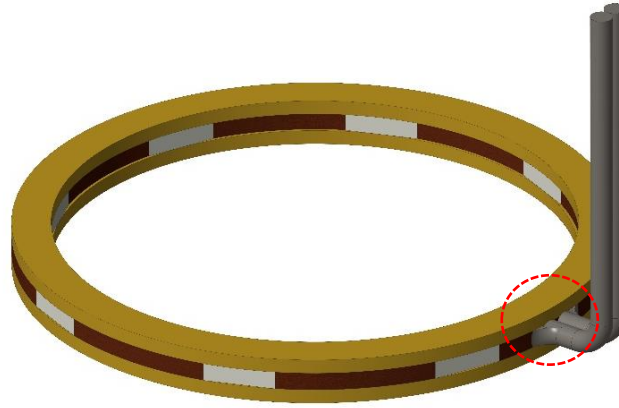
Anche qui i collegamenti elettrici saranno effettuati mediante due PCB, uno nella superficie inferiore (PCB a singola faccia) ed uno in quella superiore (PCB a doppia faccia) mentre, per equi spaziare i diversi plates viene utilizzata una semplice resina epossidica non conduttiva (Figura 2.24). In questo caso però, la resina che distanzia i vari plates deve essere disposta in modo che non assorba il carico che deve essere distribuito il più uniformemente possibile lungo le facce polarizzate degli elementini.



*Figura 2.24 – Elemento sensibile con 8 plates*

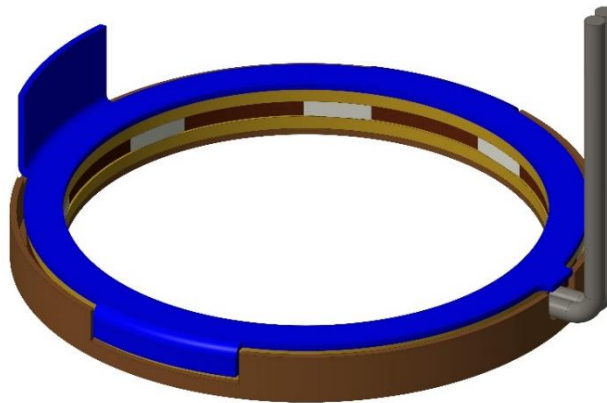
In questo caso però può essere sfruttato lo spazio vuoto tra due plates successivi dove, piuttosto che inserire la resina, è possibile saldare internamente i due fili

conduttori da 0.51 mm di diametro, uno nel PCB superiore ed uno in quello inferiore, così da non avere l'ingombro radiale aggiuntivo che si otteneva nel sensore con rondella intera (Figura 2.25).



*Figura 2.25 – Realizzazione contatti*

Per quanto riguarda la modellazione del case, si sono seguiti gli stessi passaggi spiegati precedentemente, con l'ideazione quindi del case\_1 e del case\_2 e quindi con la realizzazione delle linguette che permettono il corretto montaggio e smontaggio del sensore, come mostra la figura 2.26.

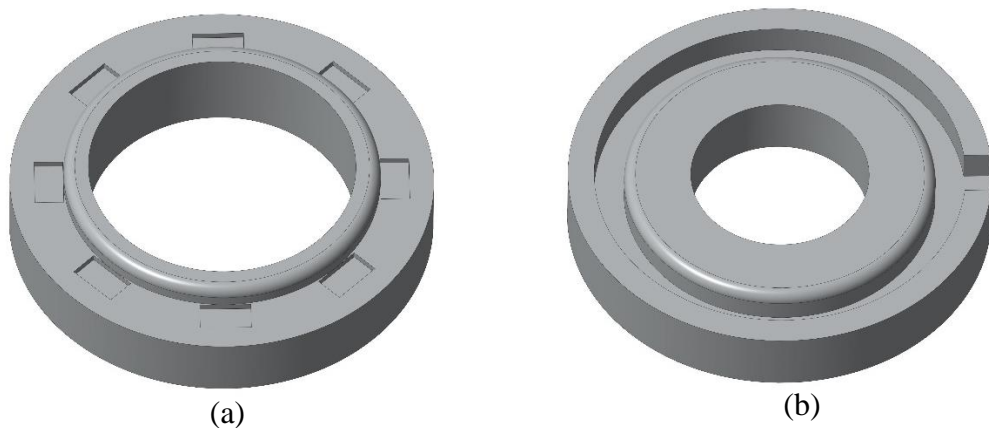


*Figura 2.26 – Sensore alternativo con plates piezoelettrici*



La realizzazione di questo sensore però non è così banale come sembra. Si sta parlando infatti di plates di piccolissime dimensioni che devono essere distanziati uniformemente a formare una circonferenza. Sono quindi lavorazioni e passaggi decisamente delicati.

A tal proposito si è ideato uno strumento che facilita enormemente il lavoro per la realizzazione. Sono due stampi (Stampo A e Stampo B). Lo stampo A (Figura 2.27a) è costituito da cave che riproducono in negativo i plates ma con una profondità minore rispetto allo spessore degli elementini piezoelettrici. Lo stampo B (Figura 2.27b) invece non è altro che il negativo del sensore stesso, con una cava radiale per permettere il corretto inserimento del filo.



*Figura 2.27 – Strumento per montaggio sensore con Stampo A (a) e Stampo B (b)*

Qui di seguito vengono spiegati tutti i passaggi da seguire per il corretto montaggio:

- I plates (in questo caso 8) vengono disposti nello stampo A, così da essere automaticamente uniformemente distanziati;
- Viene disposto il PCB inferiore nello stampo B e viene saldato il filo conduttore, creando così il primo contatto elettrico;
- Con i plates ancora nello stampo A viene incollato il PCB inferiore;
- Il pezzo, costituito da PCB inferiore, plates e filo conduttore, viene capovolto e inserito nello stampo B, dove viene inserita la resina epossidica tra gli elementi piezoelettrici, che verrà così limitata esternamente dallo stampo stesso;

- Separatamente viene realizzato il secondo contatto saldando il secondo filo conduttore al PCB superiore;
- Con il pezzo ancora dentro lo stampo B, viene infine incollato il PCB superiore con una resina adesiva, realizzando così il sensore.

I vantaggi di questa tipologia di sensore sono prima di tutto un costo ridotto, in quanto tutti gli elementi piezoelettrici sono di dimensioni standard e quindi facilmente reperibili. Inoltre, viene ridotto l'ingombro radiale di un certo margine dato dalla possibilità di poter effettuare i contatti elettrici nella parte interna, tra un PCB e l'altro. Infine, con l'utilizzo di plates piuttosto che una rondella intera, è possibile realizzare facilmente sensori di dimensioni diverse, disponendo i vari elementi piezoelettrici sempre in una circonferenza, ma di diametro diverso.

## 2.6 Sollecitazione termica filetto

La scelta di un sensore piezoelettrico sotto candela per il rilevamento della pressione in camera ha i suoi pregi ed i suoi difetti. Come abbiamo già ampiamente discusso, in questo caso, la variazione della forza agente sulle due facce polarizzate dell'elemento sensibile è strettamente correlata alla variazione di pressione all'interno della camera di combustione. Questo ovviamente accade perché il sensore viene collocato in una posizione decisamente vicina alla zona di interesse.

Con l'utilizzo di questo sensore però si presenta un inconveniente di cui non abbiamo ancora discusso. Infatti, da una prima analisi dei dati ricavati dal primo prototipo (senza l'utilizzo del case di protezione), si nota un effetto indesiderato. Confrontando i risultati ottenuti con un normale sensore di pressione Kistler come riferimento, si riscontra nell'uscita del segnale del sensore sotto candela una deriva che genera una parziale discrepanza con i valori desiderati.

Questo effetto, molto probabilmente, è causato da due motivi:

- Il piezoelettrico è un materiale le cui caratteristiche variano in relazione alla temperatura (ovviamente questa variazione dipende dal piezoelettrico scelto);
- La presenza del filetto della candela genera una non linearità nella risposta del sensore in quanto, scaldandosi, può determinare una variazione della forza agente sull'elemento sensibile.

Il materiale scelto per questa applicazione è caratterizzato da una variazione delle caratteristiche piezoelettriche principali (*Coefficiente di accoppiamento elettromeccanico  $k$*  e *Coefficiente di carica  $d$* ) limitata, con un massimo del 3% alle temperature di esercizio.

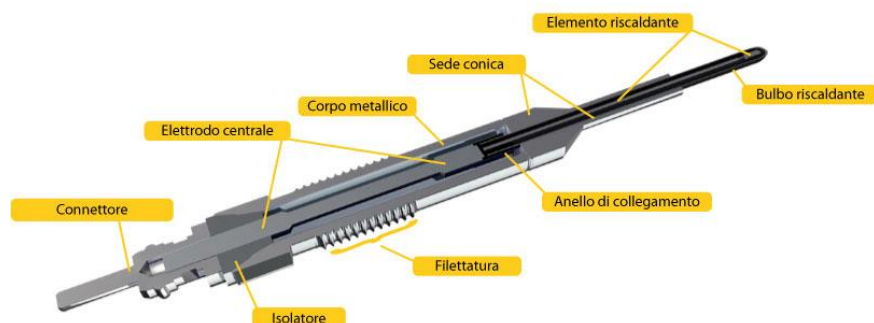
Per questo motivo l'effetto di deriva del segnale è da imputare principalmente alla seconda causa, cioè alla presenza del filetto della candela vicino la camera di combustione.

L'ideale quindi sarebbe trovare delle applicazioni dove utilizzare sempre un sensore piezoelettrico ma in posizioni differenti, dove la correlazione tra pressione in camera e forza agente sulle superfici dell'elemento sensibile sia la più lineare possibile e soprattutto dove il filetto non comprometta il segnale, in modo da confermare o confutare questa seconda ipotesi.

Un organo dove si possono ottenere tutte queste caratteristiche è la candele nei motori Diesel. Questa, come la candela nei motori ad accensione comandata, viene collocata parzialmente all'interno della camera di combustione con lo scopo però di scaldare una zona limitata della camera quando il motore è freddo, favorendo l'accensione.

Le candele hanno dunque la funzione di facilitare la combustione spontanea del combustibile solo in periodi limitati di tutto il campo di funzionamento del motore.

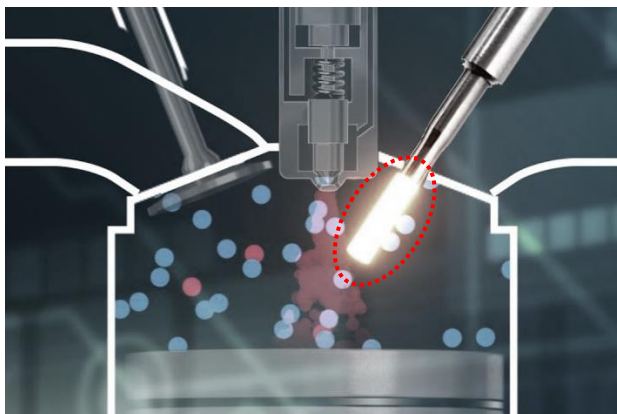
Sono caratterizzate da un bulbo, che può essere di metallo o ceramica, all'interno del quale c'è una resistenza che si scalda in pochi secondi, come mostra la Figura 2.28.



*Figura 2.28 – Sezione longitudinale candelezza*

Il bulbo entra all'interno della camera di combustione e viene collocato in prossimità dell'iniettore per riscaldare velocemente l'aria ed il combustibile. Essendo affacciata direttamente in camera, può essere utilizzata, come è stato fatto con la candela, così da ottenere una misura quasi diretta della pressione. Mentre per la candela la filettatura si trovava sottoposta ad un flusso termico rilevante, in questo caso, essendo lontana, in genere, di almeno 60 mm dalla camera, l'effetto dello stress termico sulla misura dovrebbe essere molto più limitato. Non essendo un organo essenziale durante tutto il campo di funzionamento del motore, si può pensare di modificarla per trasformarla in un sensore di pressione. In questo caso la sede di tenuta non può essere utilizzata come per la candela nei motori ad accensione comandata, in quanto conica. Inoltre, non si può nemmeno pensare di inserire un sensore tra candelezza e pozzetto in quanto lo spazio disponibile non lo permette.

L'unico modo di sfruttare questo organo è quindi di inserire appositamente al suo interno un sensore compromettendo però la sua funzionalità.



*Figura 2.29 – Protrusione bulbo in camera*

Come mostrato nella Figura 2.29, il bulbo della candeletta entra per una buona parte all'interno della camera di combustione. Quindi una sua rimozione comporterebbe una variazione significativa del volume effettivo di riempimento del cilindro e quindi dei parametri ottimali di combustione per il quale è stato progettato il motore.

Questo significa che, volendo trasformare la candeletta in un trasduttore, è essenziale lasciare la parte finale, ovvero il bulbo di riscaldamento, all'interno della camera, anche se non svolge la sua funzione.

Prima di ideare e modellare il nuovo sensore, è stata esaminata una candeletta di un motore Diesel MultiJet (Figura 2.30).



*Figura 2.30 – Candelella motore Diesel MultiJet*

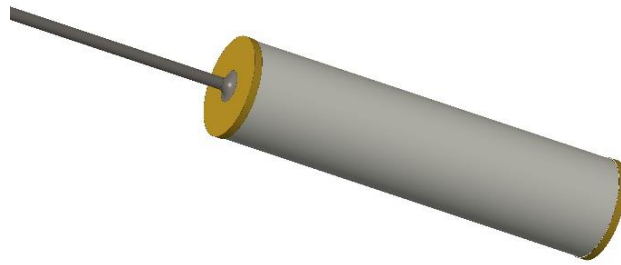
Successivamente è stata sezionata trasversalmente per analizzare il suo interno. Con delle semplici lavorazioni al connettore, è stato possibile anche asportare l'elettrodo interno superiore, mentre il bulbo riscaldante è stato lasciato intatto per ovvi motivi (Figura 2.31).



*Figura 2.31 – Candele MultiJet sezionata trasversalmente*

Avendo quindi la libertà di scegliere, entro i limiti dimensionali, come deve essere fatto l'interno della candele, si è optato per l'utilizzo di un semplice cilindro piezoelettrico di dimensioni standard (e quindi con un costo decisamente ridotto) da inserire al suo interno.

Per ottenere una sensibilità elevata nella misura, si è scelto un cilindro di diametro esterno 5 mm e altezza 20 mm, con l'applicazione di due PCB nelle due superfici polarizzate ed un solo filo conduttore con diametro esterno di 0.51 mm da saldare nella faccia superiore (Figura 2.32). Viene omesso invece per motivi tecnologici, il filo conduttore nel PCB inferiore, ponendo però il potenziale di riferimento in un punto esterno.

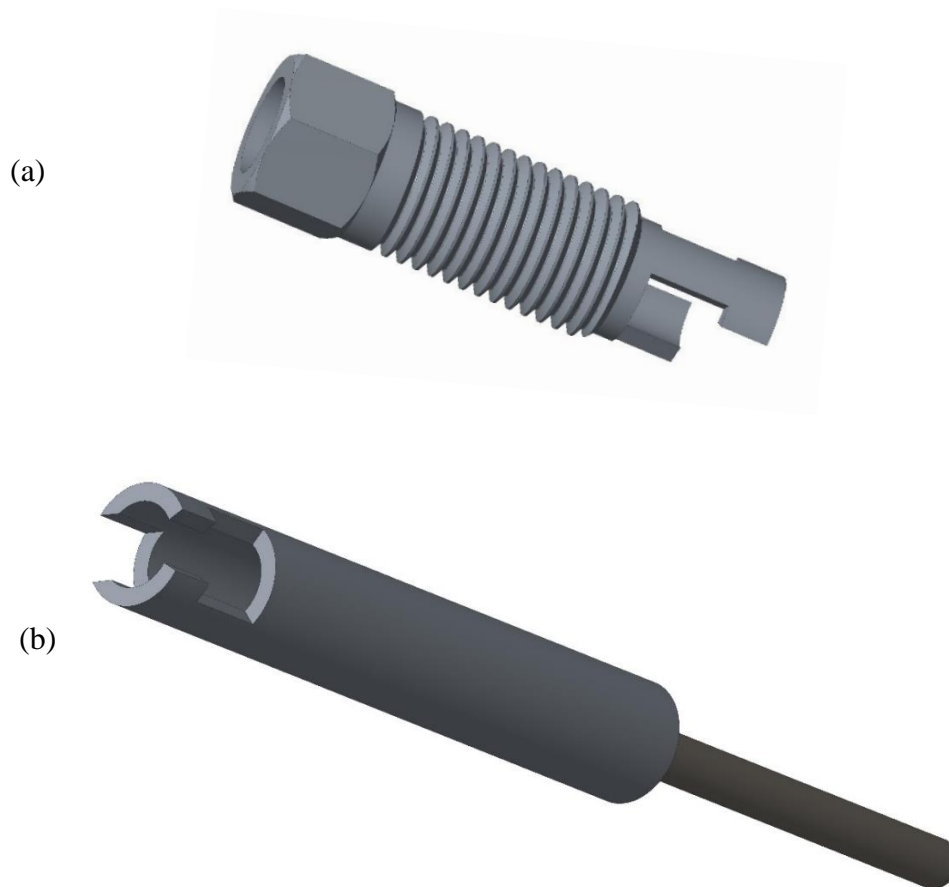


*Figura 2.32 – Elemento sensibile sensore candele*

Ovviamente le due superfici polarizzate del cilindro devono risentire in qualche modo della pressione agente all'interno della camera di combustione. In altre parole, l'elemento sensibile deve essere precaricato e fissato in modo da sentire la sollecitazione data dal movimento del bulbo in camera.

L'idea più banale potrebbe essere quella di frapparlo tra le due parti della candele sezionata (che chiameremo *testa* e *corpo*) utilizzando la sezione superiore filettata per precaricarlo, ma si sarebbe riscontrato un problema nel far ruotare tutte le parti (candele e sensore) insieme, durante la fase di montaggio, per non avere sollecitazioni di torsione nel piezoelettrico. Inoltre, sarebbe difficile tenere il sensore perfettamente coassiale sia nel montaggio che durante il funzionamento. Infine, nella fase di smontaggio, il corpo della candele sarebbe rimasto all'interno del pozzetto.

Per evitare questi problemi si è pensato di lavorare entrambe le parti della candele: prima di tutto viene allargato il foro interno per il posizionamento corretto del sensore; inoltre vengono modificate le sezioni della testa e del corpo in modo che formino un incastro che blocchi sia la rotazione relativa tra le parti che la traslazione verticale (Figura 2.33). Con questa modalità, durante la fase di montaggio e smontaggio, ruota tutto contemporaneamente e, durante la rimozione, fuoriesce tutta la candele.



*Figura 2.33 – Modellazione testa (a) e corpo (b) candele*

Per questo motivo sono stati modellati due incastri:

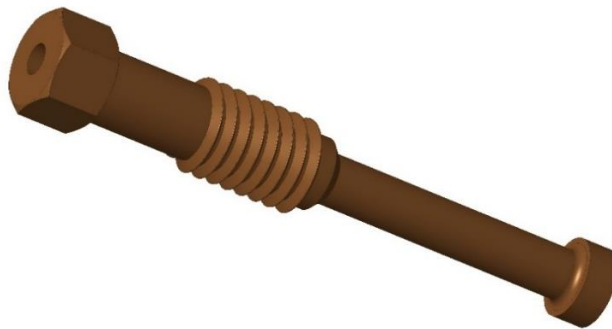
- Il primo blocca la rotazione e la traslazione verticale
- Il secondo blocca solo la traslazione verticale e serve per aiutare a trasmettere la coppia durante la fase di montaggio e smontaggio

In questo modo il cilindro piezoelettrico viene prima inserito nel corpo della candele, il filo viene fatto passare all'interno della testa che, successivamente, viene inserita lateralmente, così da formare un unico pezzo.

Con questa configurazione però, il precarico del cilindro piezoelettrico non viene effettuato mediante il filetto della testa della candele, che servirà quindi solamente come fissaggio come avveniva precedentemente.



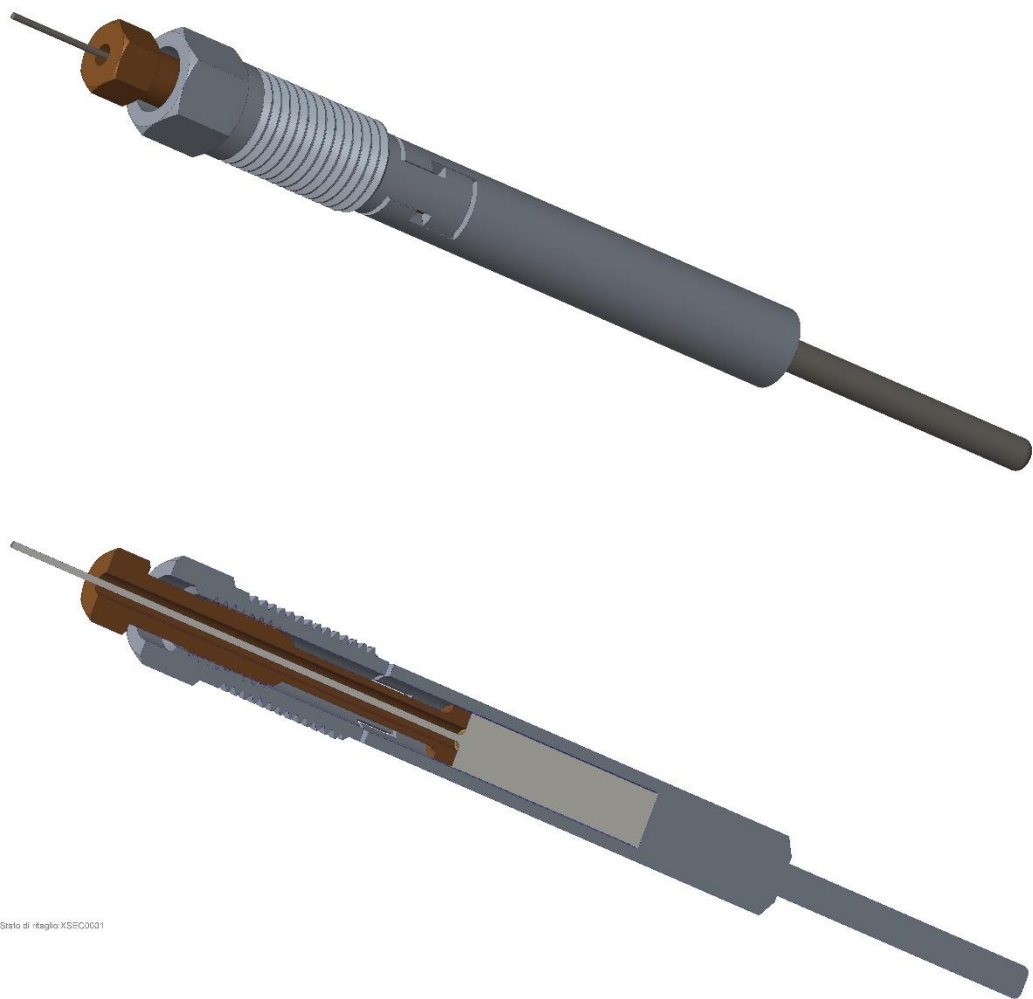
Occorre quindi inserire un organo che realizzi questa funzione. A tal proposito è stata modellata una vite di precarico (Figura 2.34) da inserire nella testa della candeletta all'interno della quale viene effettuata appositamente una filettatura.



*Figura 2.34 – Vite di precarico*

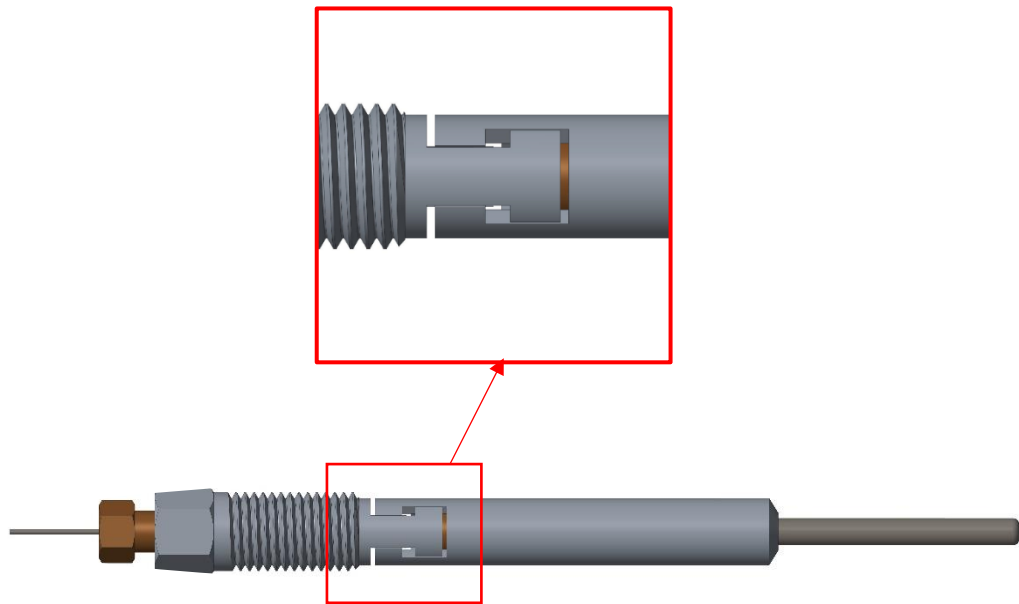
Questa sarà caratterizzata da un foro passante interno per il passaggio del filo conduttore e da un dado mediante il quale può essere calibrato il precarico per ogni applicazione. Il foro sarà il più piccolo possibile in modo da ottenere una elevata superficie di appoggio con il PCB superiore per ottenere una distribuzione del carico più omogenea sull'elemento sensibile.

Nella Figura 2.35 viene mostrato infine l'assieme del sensore e la sua sezione. Si può notare inoltre che il sensore è stato posto volutamente lontano dalla camera di combustione così che le alte temperature durante il funzionamento non causino una variazione delle costanti caratteristiche piezoelettriche.



**Figura 2.35** – *Assieme sensore candele e sua sezione*

Ovviamente il sensore, per svolgere correttamente la sua funzione, deve sentire una variazione di carico sulle sue superfici. Per questo motivo viene lasciato un gioco tra la testa e il corpo della candele, in modo che, mentre la testa rimane fissata, il corpo è libero di muoversi assialmente entro certi limiti (Figura 2.36). In questo modo la pressione all'interno del cilindro agirà sulla superficie del bulbo affacciata alla camera trasmettendo una forza che tenderà a far salire il corpo della candele. Questa forza verrà così trasferita al cilindro piezoelettrico, precedentemente precaricato e fissato.



*Figura 2.36 – Gioco per permettere la corretta trasmissione delle forze nel piezoelettrico*

Con questo strumento quindi, rimuovendo solamente la candelella nel campo di funzionamento del motore, possiamo ottenere verosimilmente una misura quasi diretta della pressione in camera di combustione ciclo per ciclo, con una sensibilità elevata, in quanto il cilindro piezoelettrico ha un volume decisamente maggiore rispetto i classici sensori piezoelettrici.

Inoltre, il segnale non verrà influenzato dalla presenza del filetto vicino la camera che, scaldandosi, causava una non linearità dell'uscita, come accade nel sensore sotto candela.

# Capitolo 3

## Realizzazione prototipi

Dopo la modellazione al CAD 3D del sensore piezoelettrico, il passo successivo è stato quello di realizzare i primi prototipi da testare. Il grande interesse suscitato da parte di alcune aziende esterne di questo progetto di tesi ha determinato, in qualche modo, la realizzazione di un sensore per candela M12 con apposito case e rondella piezoelettrica di diametro interno 12 mm, diametro esterno 16 mm e spessore 2 mm;

Per questo motivo, è stata utilizzata la sessa rondella piezoelettrica precedentemente utilizzata per il primo prototipo (Capitolo 1, paragrafo 1.4.1) con conseguenti modifiche per il case e per il filo che verranno ampiamente discusse di seguito.

### 3.1 Realizzazione rondella strumentata

Questo sensore è stato realizzato per essere testato su un motore a benzina V8 biturbo ad iniezione diretta. Dovendo montare candele M12 si è scelto di utilizzare la rondella piezoelettrica che già era disponibile, dopo aver naturalmente confermato che da parte dell'azienda interessata non fosse problematica una variazione relativamente grande della protrusione dell'elettrodo in camera.

Come per il primo prototipo, sono stati utilizzati gli stessi PCB, uno a singola faccia ed uno a doppia faccia, per la realizzazione dei contatti elettrici che però, in questo caso, verranno effettuati con due fili conduttori da 0.51 mm di diametro nominale esterno, piuttosto che un unico filo coassiale da 1.8 mm, al fine di ridurre l'ingombro radiale.

Per prima cosa sono stati incollati con una resina epossidica conduttiva i due PCB, uno sulla superficie inferiore del piezoelettrico (PCB ad una faccia) ed uno su quella

superiore (PCB a due facce) per la messa a massa sulla candela. Successivamente sono stati realizzati i contatti elettrici saldando i due fili (Figura 3.1).



*Figura 3.1 – Realizzazione sensore candela M12 - Saldatura*

A questo punto si è aggiunta nella parete esterna una resina epossidica non conduttiva per conferire una maggiore resistenza all'elemento sensibile (Figura 3.2), concludendo così la realizzazione della rondella strumentata (Figura 3.3).



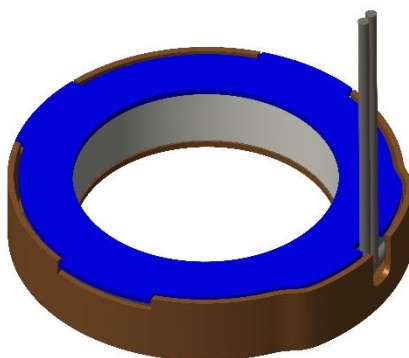
*Figura 3.2 – Realizzazione sensore candela M12 – Applicazione resina*



*Figura 3.3 - Rondella strumentata per candela M12*

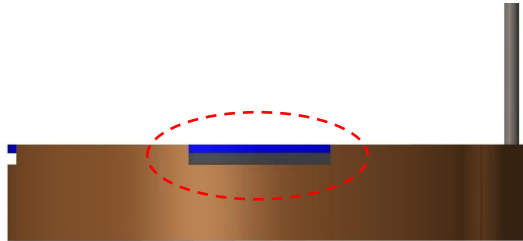
## 3.2 Realizzazione case

Per quanto riguarda il case si è optato per una versione leggermente differente rispetto a quella spiegata precedentemente soprattutto per ragioni di tempistica per la realizzazione. Anche in questo caso viene diviso in due parti diverse (case\_1 e case\_2), ma con la modellazione di tre semplici sporgenze nel case\_2 che si inseriranno in apposite sezioni nel case\_1, come viene mostrato in Figura 3.4.



*Figura 3.4 – Modello sensore candela M12*

Anche in questo caso le sezioni del case\_1 sono state modellate in modo che esista un margine che permetta l'effettiva compressione del materiale piezoelettrico, evitando quindi che le forze si scarichino nella parete esterna del sensore (Figura 3.5).



*Figura 3.5 – Vista laterale modello sensore candela M12*

Entrambi i pezzi sono stati realizzati in acciaio inox mediante stampa 3D SLM (*Selective Laser Melting*) dove un letto di polvere metallica viene raggiunto da un laser che scioglie le particelle di metallo strato per strato. Date le limitazioni tecnologiche di questa lavorazione si è scelto di realizzare il case con pareti da 0.3 mm (Figura 3.6).



*Figura 3.6 – Case\_1 (sinistra) e case\_2 (destra) realizzati mediante stampa 3D SLM*

### 3.3 Assemblaggio sensore

Dopo la realizzazione del case, è stato assemblato il sensore (Figura 3.7) per verificare che le dimensioni fossero opportune e soprattutto per vedere se il case\_2 riuscisse a comprimere effettivamente il piezoelettrico. Successivamente è stato effettuato un primo test per verificare il corretto funzionamento.



*Figura 3.7 – Primo assemblaggio rondella strumentata e case*

Per questo motivo le rondelle assemblate sono state collegate ad un amplificatore di carica mASTRO e un oscilloscopio. In particolare, sono state testate tutte le rondelle inserendole in uno stampo di un pozzetto motore con corrispondente candela M12, simulando in qualche modo le condizioni di funzionamento. Colpendo la testa della candela si è effettivamente riscontrato un segnale di output sensato nell'oscilloscopio (Figura 3.8).



*Figura 3.8 – Primo test verifica funzionalità sensore*



Durante il test però si è riscontrato che a volte si otteneva un corto circuito in quanto i piedini del PCB superiore ed inferiore toccavano contemporaneamente la parete interna del case. Quindi il passo successivo è stato quello di isolare elettricamente l'interno del case. Per prima cosa è stato effettuato per due volte un trattamento di conformal coating sulle pareti, ovvero verniciatura protettiva trasparente e isolante a base silicone e si è fatto asciugare in forno per circa tre ore (Figura 3.9). Questo trattamento inoltre, conferisce una resistenza maggiore ai cicli termici, proteggendo quindi il materiale piezoelettrico.



*Figura 3.9 – Applicazione conformal coating sul case*

Dopo aver verificato che le pareti interne fossero adeguatamente isolate, è stata applicata la resina epossidica non conduttiva all'interno del case per incollare l'elemento sensibile precedentemente realizzato nella posizione opportuna. In questo modo, oltre ad isolare ulteriormente le pareti interne del case, viene assicurato un montaggio e smontaggio decisamente più semplice e standard (Figura 3.10).



*Figura 3.10 – Applicazione resina isolante all'interno del case*

Con l'obiettivo di pressare e far asciugare adeguatamente la resina applicata, è stato infine inserito il sensore all'interno di una vite M12 e precaricata ottenendo così anche la coassialità richiesta (Figura 3.11) e, infine posto in forno per 20 minuti a 80°C.



*Figura 3.11 – Metodo applicato per fissaggio rondella su case*

Lo stesso trattamento è stato effettuato per il case\_2, incollandolo alla superficie superiore dell'elemento sensibile ma, in questo caso, con resina adesiva conduttiva, in quanto la superficie superiore deve essere messa a massa con la candela.

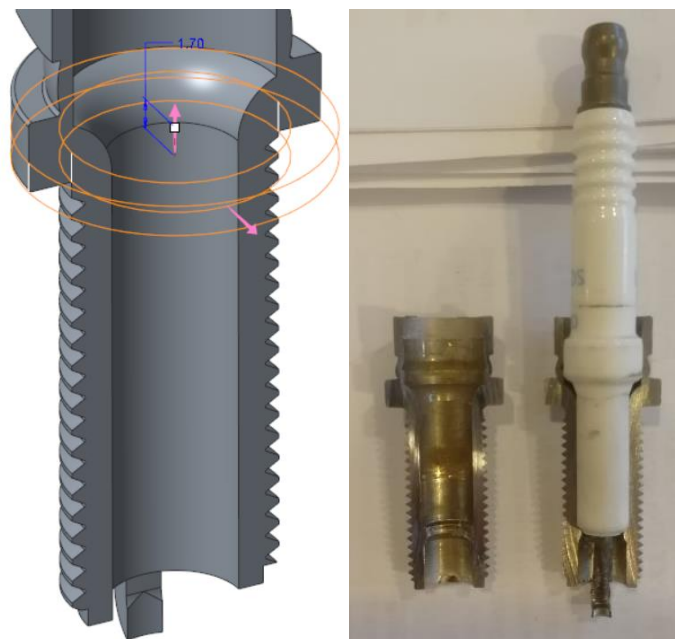
L'ultimo passaggio è stato quello di effettuare il coating con verniciatura isolante sulla superficie interna del sensore (evitando di isolare il case\_2) per evitare che la filettatura della candela crei un cortocircuito toccando contemporaneamente le due facce di PCB. Terminata la realizzazione del prototipo (Figura 3.12), si è effettuato un nuovo e ultimo test ponendo il sensore nella candela M12 e mantandolo nello stampo del pozzetto per comprovare la sua funzionalità.



*Figura 3.12 – Prototipo finale sensore M12*

Una verifica dimensionale del prototipo ha comprovato che le misure e gli ingombri previsti erano adeguati, pur essendo maggiorati di all'incirca 0.2 mm a causa della lavorazione per la realizzazione del case (Stampa 3D SLM). Realizzando invece il case mediante una semplice lavorazione per lamiera otterremmo sicuramente spessori ridotti e quindi in tolleranza con quelli modellati.

Nel caso in cui la variazione della protrusione dell'elettrodo fosse eccessiva (maggiorazione di circa 2 mm), si può lavorare la candela asportando del materiale nel cilindro di appoggio, come è stato già verificato precedentemente per una candela M10 (Figura 2.17). Anche in questo caso infatti, è stata sezionata la candela M12 e modellata, verificando che è possibile asportare all'incirca 1.7 mm in direzione assiale (Figura 3.13).



**Figura 3.13** – Modello assieme sensore-candela (sinistra) e realizzazione (destra)

Nella Figura 3.14 viene infine mostrato infine l'assieme candela M12 e prototipo sensore, sia con la modellazione 3D con Creo Parametric che nell'effettiva realizzazione.

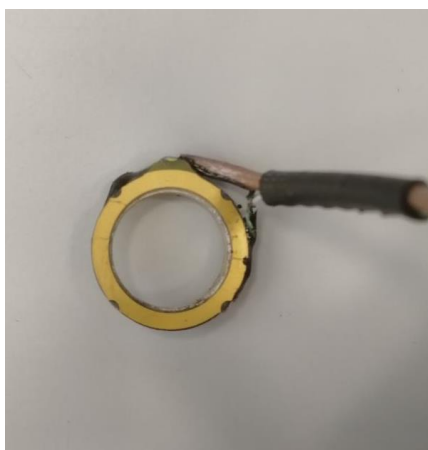


*Figura 3.14 – Modello assieme sensore-candela (sinistra) e realizzazione (destra)*

# Capitolo 4

## Analisi dati acquisiti

Per comprovare l'effettiva efficacia e utilità di questa tecnologia, è stato testato il primo prototipo di sensore per una candela M12, ovvero con un sensore caratterizzato da una rondella piezoelettrica di diametro interno 12, diametro esterno 16 mm e spessore 2 mm. Come è già stato spiegato, il primo prototipo era caratterizzato da due PCB ed un filo coassiale di diametro nominale 1.8 mm (Figura 4.1).



*Figura 4.1 - Rondella strumentata utilizzata per test*

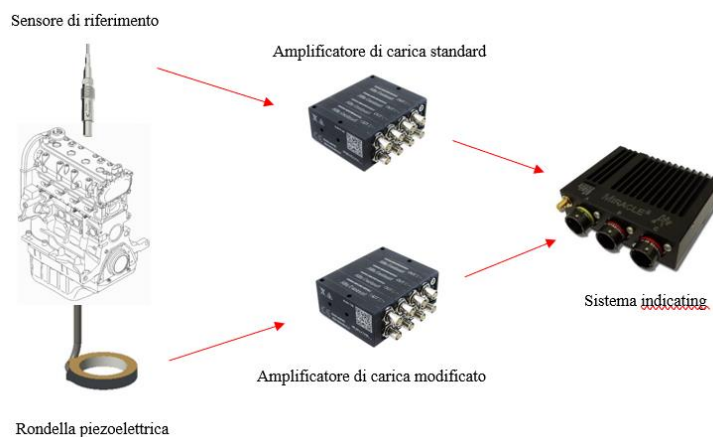
Per essere montato nell'apposito motore, è stata semplicemente sostituita la rondella standard della candela M12 con quella piezoelettrica, evitando quindi qualsiasi lavorazione aggiuntiva o della candela o della testata. In questo caso non è stato montato il case di protezione in quanto ancora non disponibile. Ovviamente, per verificare la validità di questa tecnologia, è stato utilizzato come riferimento un Kistler 6052A, sensore di misura diretta della pressione che quindi prevede un foro nel cilindro per il suo inserimento.

Entrambi i sensori sono stati successivamente collegati a due amplificatori di carica. L'output dei due segnali infatti è caratterizzato da un segnale che viene convertito in tensione prima della conversione analogico digitale. In questo caso però sono stati utilizzati due amplificatori diversi in quanto la sensibilità dei due sensori erano decisamente diverse: mentre per il Kistler si ottenevano all'incirca 18 pC/bar, per la rondella si ottenevano 450 pC/bar, quindi occorreva un amplificatore modificato per quest'ultima. La sensibilità della rondella strumentata è stata calcolata effettuando dei test alla pressa, considerando diverse condizioni di precarico, ampiezza e frequenza. Una volta caratterizzato il sensore sono stati effettuati diversi test su un motore V12 naturalmente aspirato (caratteristiche nella Tabella 2).

Strokes for cycle	4
Geometry	V12 cilindri
Type	Benzina PFI Naturalmente aspirato
Displacement ( $cm^3$ )	6465
Stroke ( $mm$ )	76
Bore ( $mm$ )	95
Compression Ratio	10.4:1

*Tabella 2 - Caratteristiche motori prove*

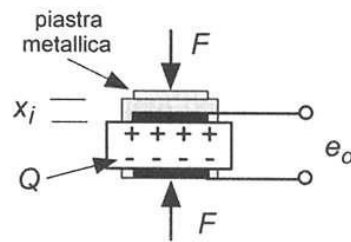
Per quanto riguarda il condizionamento e acquisizione del segnale è stato utilizzato l'amplificatore di carica mASTRO e OBI-M2 come sistema indicating (Figura 4.2).



*Figura 4.2 - Catena di misura prove [19]*

## 4.1 Analisi catena di misura

Prima di mostrare i risultati ottenuti occorre spiegare per quale motivo viene applicato un amplificatore di carica e quali sono i suoi effetti sul segnale di output ottenuto [18].



*Figura 4.3 - Schema sensore piezoelettrico*

Come è stato già spiegato precedentemente, il sensore piezoelettrico, quando viene deformato, genera una tensione in funzione della sua deformazione, accumulando cariche di segno opposto sulle sue superfici (Figura 4.3).

Evidentemente, finché si è in regime elastico, tale deformazione è direttamente proporzionale alla forza che agisce sul sensore e quindi alla pressione in camera di combustione.

Tipicamente però non si è in grado di misurare una carica, ma si riesce a misurare una corrente, ovvero una variazione di carica nel tempo. Per questo motivo una variazione di pressione del cilindro genera una variazione di carica, e quindi una corrente, nel piezoelettrico.

Sostanzialmente il modello del sensore si traduce in un generatore di corrente la cui entità è legata alla derivata della pressione che agisce su di essa. La corrente infatti sarà nulla quando la pressione è costante.

Si può scrivere banalmente:

$$Q = k_q x = k_p p$$

Se sulle superfici si posizionano due piastrine metalliche, la deformazione viene tradotta in una tensione:

$$e_0 = \frac{Q}{C_a} = \frac{k_q x}{C_a} = \frac{k_p p}{C_a}$$

Quindi è possibile scrivere che:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = k_q \frac{dx}{dt} = k_p \frac{dp}{dt} \quad (4.1)$$

Dal punto di vista elettrico il sensore avrà una sua resistenza e una sua capacità  $C_a$  formata dalle piastrine e dal piezoelettrico. La capacità  $C_a$  è dell'ordine di  $10^3$  pF, mentre la resistenza viene di solito posta uguale all'infinito e, quindi, omessa dallo schema.

Data l'energia elettrica in gioco molto ridotta, si deve amplificare l'output del sensore e quindi la tensione in uscita  $e_0(t)$ , collegando il sensore con un Amplificatore di Carica, attraverso un cavo coassiale (o due conduttori separati come in questo lavoro di tesi), come viene mostrato in Figura 4.4.

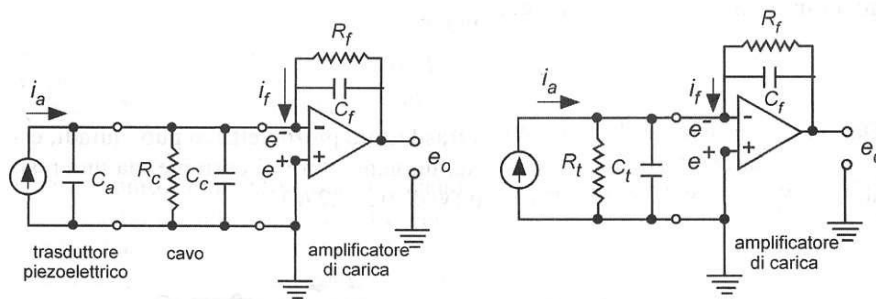


Figura 4.4 - Schema catena di misura (sinistra) e prima semplificazione (destra)

Il cavo avrà le sue caratteristiche tipicamente modellabili come una capacità  $C_c$ , dell'ordine di  $10^2$  pF/m ed una resistenza  $R_c$ , dell'ordine di migliaia di  $M\Omega$ . È chiaro quindi che lo schema può essere semplificato come in figura ponendo che:

$$R_t = \frac{R_a R_c}{R_a + R_c} \quad e \quad C_t = C_a + C_c$$



L'amplificatore di carica è caratterizzato da un amplificatore operazionale a circuito chiuso, con un ramo di retroazione che comprende una resistenza  $R_f$  e una capacità  $C_f$ . Nell'amplificatore operazionale però i morsetti in ingresso invertente  $e^-$  e non invertente  $e^+$  hanno lo stesso potenziale, generando la condizione di "cortocircuito virtuale". Si avranno quindi correnti nulle che circolano su  $R_t$  e  $C_t$ , rendendo possibile una ulteriore semplificazione dello schema (Figura 4.5).

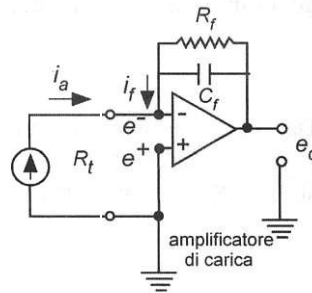


Figura 4.5 -Semplificazione finale schema catena di misura

Applicando la legge di Kirchhoff all'ingresso invertente  $e^-$  si ottiene:

$$i_a(t) = k_p \frac{dp(t)}{dt} = i_f(t) = i_R(t) + i_C(t) = \frac{e_0(t)}{R_f} + \frac{dQ_C(t)}{dt} = \frac{e_0(t)}{R_f} + C_f \frac{de_0(t)}{dt} \quad (4.2)$$

Esplicitando la pressione

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{e_0(t)}{k_p R_f} + \frac{C_f}{k_p} \frac{de_0(t)}{dt}$$

Integrando questa relazione da 0 a t estrapolo la pressione:

$$\int_0^t \frac{dp(t)}{dt} dt = \int_0^t \left( \frac{e_0(t)}{k_p R_f} + \frac{C_f}{k_p} \frac{de_0(t)}{dt} \right) dt$$

$$p(t) = \frac{C_f}{k_p} e_0(t) + \frac{1}{k_p R_f} \int_0^t e_0(t) dt + p(0) \quad (4.3)$$

Il primo termine indica il fattore di amplificazione del segnale, ovvero il guadagno, il secondo termine la distorsione del segnale, mentre l'ultimo termine il valore medio del segnale.

Questo modello quindi dice che una volta misurata la tensione in uscita è possibile ottenere un'informazione parziale sul segnale di pressione, poiché non si riesce ad ottenere un dato essenziale, cioè il valore medio di pressione.

Questa catena di misura si comporta solo in parte idealmente, poiché applica un guadagno (primo termine), ma distorce il segnale (secondo termine) e taglia la componente media (terzo termine). Essendo il segnale di pressione un segnale fondamentalmente periodico, è possibile esprimerlo come somma di seni e coseni, applicando la trasformata di Fourier. Analizzando quindi il comportamento dell'amplificatore nel *dominio della frequenza* e facendo riferimento alla (4.3):

$$P(j\omega) = \frac{C_f}{k_p} E_0(j\omega) + \frac{1}{k_p R_f j\omega} E_0(j\omega)$$

$$P(j\omega) = \frac{C_f}{k_p} \left( \frac{R_f C_f j\omega + 1}{R_f C_f j\omega} \right) E_0(j\omega)$$

La relazione tra ingresso  $E_0(j\omega)$  ed uscita  $P(j\omega)$  sarà quindi:

$$\frac{E_0(j\omega)}{P(j\omega)} = G(j\omega) = \frac{R_f C_f j\omega}{R_f C_f j\omega + 1}$$

Avendo definito  $G(j\omega)$  *Funzione di risposta in frequenza* cioè la funzione di trasferimento che, in questo caso, è quella tipica di un filtro passa-alto con costante di tempo  $\tau_f = R_f C_f$  e frequenza di taglio  $f_T = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$ .

L'amplificatore di carica quindi, agendo come un filtro passa-alto, distorce le basse frequenze, ovvero quelle al di sotto della frequenza di taglio  $f_T$ , ma, da un punto di vista tecnologico, si ottiene distorsione solo per frequenze decisamente basse che non disturbano eccessivamente il segnale.

Viene analizzato ora il comportamento dell'amplificatore di carico nel *dominio del tempo*. Partendo dalla (4.2):

$$i_a(t) = i_R(t) + i_C(t)$$

Dove la corrente  $i_C(t)$  che attraversa il condensatore si ottiene dalla relazione che la lega con la tensione alle sue piastre, cioè:

$$e_0(t) = \frac{1}{C_f} \int_0^t i_C(t') dt' + e_{in}$$

Dove  $e_{in}$  è la tensione iniziale, che viene considerata nulla. Derivando si ottiene che:

$$\dot{e}_0(t) = \frac{1}{C_f} i_C(t)$$

Quindi la corrente che attraversa il condensatore sarà:

$$i_C(t) = C_f \dot{e}_0(t)$$

La corrente  $i_R(t)$  che attraversa la resistenza  $R_f$  sarà invece:

$$i_R(t) = \frac{e_0(t)}{R_f}$$

Sapendo che la corrente del piezoelettrico è espressa dalla (4.1), è possibile scrivere che:

$$k_q \frac{dx(t)}{dt} = C_f \dot{e}_0(t) + \frac{e_0(t)}{R_f}$$

Definendo prima la costante  $k_f = \frac{k_q}{C_f}$  e la costante di tempo  $\tau_f = R_f C_f$  si ottiene:

$$k_f \tau_f \dot{x}(t) = \tau_f \dot{e}_0(t) + e_0(t)$$

che esprime il comportamento di un sistema del primo ordine che sarà quindi caratterizzato da una soluzione data dalla somma di una equazione omogenea  $e_0^{om}(t)$  e una particolare  $e_0^p(t)$ :

$$e_0(t) = e_0^{om}(t) + e_0^p(t)$$

La soluzione omogenea sarà data dall'equazione:

$$e_0^{om}(t) = c e^{-\frac{t}{\tau_f}}$$

Quanto  $t$  tende all'infinito questa soluzione tenderà ad annullarsi e quindi risulterà che  $e_0(t)$  tenderà alla soluzione particolare  $e_0^p(t)$  che è funzione dell'andamento temporale di  $x(t)$ . Per questo motivo, se  $\tau_f$  è piccolo, la soluzione tenderà rapidamente a quella particolare.

Quindi una variazione della costante di tempo, ovvero una variazione dei parametri dell'amplificatore di carica che sono la resistenza  $R_f$  e la capacità  $C_f$ , causa due effetti contrastanti. Infatti, più  $\tau_f$  è piccolo, più rapidamente l'amplificatore si adegua all'andamento dello spostamento poiché la soluzione omogenea tende a zero velocemente. Dall'altra parte però, diminuendo  $\tau_f$ , aumenta la frequenza di taglio  $f_T = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$ , eliminando quindi tutte le frequenze caratteristiche del segnale in ingresso al di sotto di essa. Per questo motivo occorre impostare la costante di tempo dell'amplificatore in modo da bilanciare il più possibile questi due effetti [18].

Agendo quindi come un filtro passa-alto, viene tagliata ovviamente anche la risposta a frequenza nulla che corrisponde alla componente media del segnale di pressione, che deve essere necessariamente recuperata con opportune metodologie.

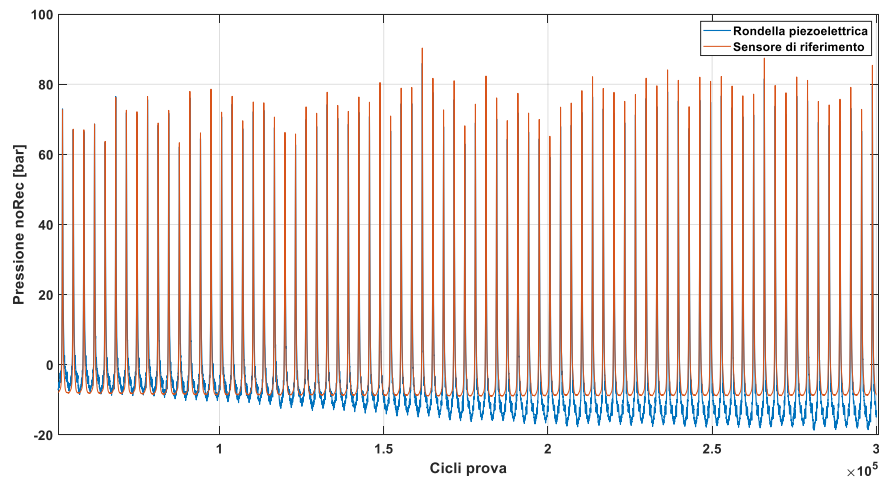
## 4.2 Caratteristiche segnale

Prima di effettuare qualsiasi operazione in grado di calcolare o determinare indici caratteristici derivati dal segnale di pressione della rondella strumentata, si è cercato di valutare e analizzare il segnale di output, ovvero in uscita dall'amplificatore di carica ad esso collegato.

Dai primi test effettuati si è notato immediatamente un problema nel segnale del sensore: questo era caratterizzato da una elevata deriva (o *drift*) che determinava, dopo alcuni cicli, il cosiddetto *clipping* del segnale, ovvero una distorsione nel

quale veniva troncato in ampiezza alla tensione massima di alimentazione (10V). Per cercare di risolvere questo problema, per prima cosa, si è abbassata la costante di tempo  $\tau_f$  dell'amplificatore di carica al minimo, ovvero a 470 ms, a differenza di quella del sensore di pressione Kistler 6052A di riferimento lasciata alle opzioni di base. A livello operativo quindi si è modificato un canale di mASTRO agendo sulla resistenza  $R_f$  del circuito. Come è stato spiegato nel paragrafo precedente, il cambiamento della costante di tempo genera due effetti: da una parte aumenta la frequenza di taglio  $f_T$  del filtro passa alto (effetto utile) e dall'altra fa in modo che l'amplificatore segua con prontezza le evoluzioni della grandezza in ingresso, ovvero alla deformazione del piezoelettrico. Per questo motivo, aumentando la  $f_T$ , aumenta la banda di basse frequenze eliminate e quindi viene eliminata quella componente media a bassa frequenza che faceva crescere il segnale di uscita fino al clipping.

Una volta rimosso questo inconveniente però, si è evidenziato subito un altro problema, ovvero che con l'aumentare dei cicli durante una prova, il segnale tende a decrescere, ovvero presenta un altro tipo di drift, come mostrato nella Figura 4.6.



*Figura 4.6 - Effetto del drift del segnale della rondella strumentata rispetto al segnale di pressione di riferimento del Kistler*

Essendo un effetto tendenzialmente lento un'ipotesi potrebbe essere quella di collegarla all'innalzamento della temperatura della testata, e quindi anche del sensore, durante il funzionamento. La zona più sollecitata sarà sicuramente il filetto della candela che, scaldandosi, genera una non linearità nella risposta del segnale di pressione poiché causa una lenta variazione del precarico del sensore, ovvero una variazione della forza agente su di esso che quindi verrà convertita in tensione dall'elemento sensibile. In parallelo però, un aumento della temperatura del sensore, provoca una variazione delle caratteristiche del piezoceramico stesso, come è già stato accennato precedentemente. Questo effetto viene chiamato effetto *piroelettrico*. Solitamente infatti un materiale piezoelettrico è anche piroelettrico. In altre parole, la tensione generata dal sensore non è data solamente da una variazione di forza sulle superfici, ma anche da una variazione di temperatura, seppur in piccola parte [1]. Si può scrivere infatti che la variazione di carica elettrica generata è data da due fattori, quello legato alla forza e quello legato alla temperatura:

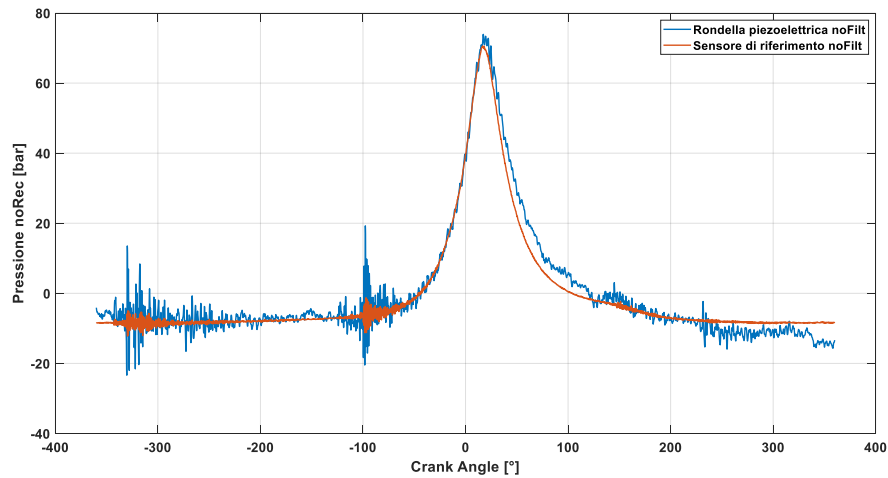
$$dQ = dQ_F + dQ_T = k dF + \lambda dT$$

Dove si è indicato con  $\lambda$  la costante piroelettrica che cambia con il materiale. Esplicitando la corrente otteniamo:

$$i(t) = i_F(t) + i_T(t) = k \frac{dF(t)}{dt} + \lambda \frac{dT(t)}{dt}$$

Per questo motivo, una variazione di temperatura nel tempo genera un contributo aggiuntivo nel segnale di output del sensore che però verrà letto come pressione all'interno del cilindro.

Un altro aspetto notato dai primi test è stato una marcata rumorosità del segnale, rispetto al segnale di riferimento proveniente dal Kistler (Figura 4.7) e quindi il rapporto signal-to-noise della rondella era decisamente più basso. Ovviamente questo era previsto in quanto, dato il posizionamento sotto la candela, la rondella strumentata risente maggiormente di tutte le inerzie e di tutti i disturbi legati alle vibrazioni del motore rispetto ad un normale sensore di pressione in camera, progettato appositamente per smorzare tali effetti e sentire solamente la variazione di pressione all'interno della camera di combustione.

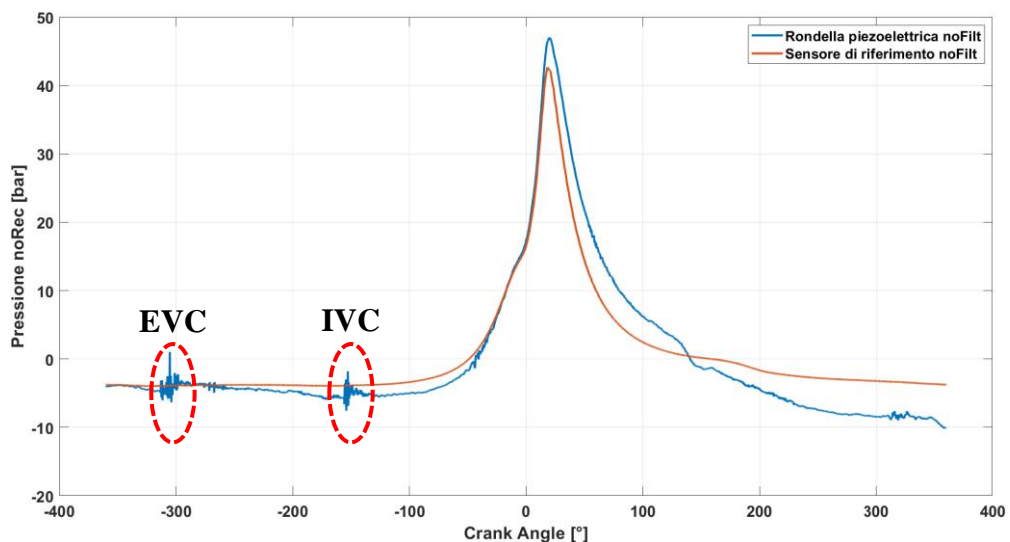


**Figura 4.7** -Confronto campane di pressione Kistler di riferimento e rondella strumentata non filtrate passa-basso e prima del recupero della componente media

Inoltre, il rapporto signal-to-noise ridotto in parte può essere imputato anche al fatto di aver diminuito  $\tau_f$  poiché, come è stato dimostrato precedentemente, il segnale segue più rapidamente la variazione di deformazione del piezoelettrico e quindi sente più facilmente quelle piccole variazioni di pressione (ovvero variazioni di forza sulle superfici polarizzate) non del tutto legate all'andamento della pressione all'interno del cilindro ma anche alle vibrazioni del motore. Avendo inoltre alzato la frequenza di taglio del filtro passa alto (abbassando  $\tau_f$ ) si è modificato la risposta in ampiezza e di fase del filtro, modificando quindi il cosiddetto *group delay*. Il group delay si può interpretare come il ritardo temporale che ciascuna componente spettrale (sinusoidale) in banda passante del segnale subisce quando passa dall'ingresso all'uscita del filtro stesso. Quindi, dire che il group delay è costante (come nei filtri a fase lineare) significa che tutte le componenti spettrali subiscono lo stesso ritardo, il che non crea distorsioni. Se invece il group delay è diverso da componente a componente, allora il segnale in uscita risulta anche profondamente diverso da quello in ingresso. In questo caso, modificando la costante di tempo del

mASTRO, si è in qualche modo modificato il group delay del segnale causando quindi una maggiore distorsione rispetto al Kistler.

In un certo senso, questo aspetto può anche essere sfruttato: confrontando i due segnali di pressione (Figura 4.8), si nota per esempio una maggiore sensibilità della rondella piezoelettrica alla chiusura delle valvole di scarico o **EVC** (*Exhaust Valve Closing*) e aspirazione o **IVC** (*Intake Valve Closing*), legato sicuramente al fatto che l'urto generato dalle valvole sulla testa del cilindro produce delle forze ad alte frequenze che vengono rilevate maggiormente dal sensore sotto la candela, poiché molto vicino ad esse. Ricerche precedenti hanno infatti dimostrato e implementato un algoritmo in grado di calcolare precisamente l'effettivo angolo di chiusura delle valvole di aspirazione [19].



*Figura 4.8 -Confronto campane di pressione Kistler di riferimento e rondella strumentata filtrate passabasso. Evidenziati gli effetti di chiusura valvole [19]*

Dalla Figura 4.8 è facile osservare un ultimo problema del segnale che rende ancor più difficile la corretta individuazione degli indici di combustione: mentre durante la fase di compressione il segnale della rondella e quello di riferimento sono praticamente sovrapposti, più o meno in corrispondenza del punto morto superiore si ha un incremento della pressione della rondella piezoelettrica che si protrae per tutta la fase di espansione. Questo effetto potrebbe essere imputato alle alte



variazioni di temperatura che si hanno durante ogni ciclo e allo scoccare della scintilla nella candela. Quando inizia la combustione con la propagazione del fronte di fiamma aumentano quasi istantaneamente le temperature che, da una parte, scaldano gli organi meccanici e quindi determinano una effettiva variazione di forza nel piezoelettrico, ma dall'altra si convertono in tensioni nel sensore per effetto piroelettrico, come è stato precedentemente analizzato. Il parziale innalzamento della curva di pressione tende infatti a persistere dopo il punto morto superiore (poiché le temperature sono ancora alte in fase di espansione) fino a calare rapidamente all'apertura delle valvole di scarico, ovvero quando le temperature diminuiscono. Per questo motivo quindi, il parziale innalzamento del segnale di output della rondella strumentata è dovuto a due componenti: una dipendente dall'effettiva pressione all'interno del cilindro e l'altra dovuta agli stress termici.

In generale quindi il segnale di pressione del sensore sotto candela è decisamente correlato a quello reale ma è caratterizzato da parziali distorsioni che devono essere corrette o limitate il più possibile, al fine di limitare gli errori che si possono commettere nella determinazione dei coefficienti e degli indici più significativi per l'analisi della combustione.

## 4.3 Correzione Gain

Le analisi precedenti di questo segnale avevano già dimostrato e confermato che con la rondella piezoelettrica è possibile determinare, con un alto grado di accuratezza, l'angolo di chiusura valvole di aspirazione e la determinazione dell'avvenuta detonazione e del MFB50, contro una minore robustezza sulla determinazione della pressione massima, l'angolo di pressione massima e, infine, della pressione media indicata [19].

Lo scopo di questo lavoro di tesi, sotto il punto di vista dell'analisi del segnale di pressione ricavato dalla rondella strumentata progettata, è stato quindi quello di porre rimedio a questi inconvenienti e cercare di rendere il segnale di output il più significativo possibile.

Come è già stato spiegato precedentemente, il segnale della rondella presentava una maggiorazione nell'intorno del punto morto superiore che veniva a protrarsi fino all'apertura della valvola di scarico. Per prima cosa quindi si è voluto vedere se questa maggiorazione rimaneva costante durante tutti i cicli.

Dato che il sensore è collegato ad un amplificatore di carica, il segnale in uscita avrà la caratteristica di essere a media nulla, ovvero viene perduta una parte essenziale per la corretta valutazione della campana di pressione. Infatti, solitamente, le metodologie di analisi combustione si basano sul ciclo indicato e quindi è necessario sapere il valore di pressione assoluta in ogni punto.

Il recupero della componente media può però essere effettuato in diversi modi: il pressure referencing a valore fisso, il pressure referencing con MAP e il metodo della politropica.

Nel pressure referencing con valore fisso si impone il valore di pressione in un determinato punto (di solito 1 bar a fine aspirazione) e di conseguenza tutta la campana di pressione si sposterà di un offset costante per tutti i punti; questo metodo è ovviamente semplice e pratico ma non del tutto affidabile in quanto il valore viene scelto senza essere misurato.

Nel pressure referencing con MAP (*Manifold Pressure*) invece si basa sullo stesso principio del precedente, con l'unica differenza che il valore scelto di pressione è realmente misurato attraverso un sensore di pressione posto nel collettore di aspirazione.

Per ultimo, il metodo della politropica si basa sul principio che durante la compressione a valvole chiuse la legge che lega pressione e volume è di tipo politropico, ovvero si può scrivere:

$$p \cdot V^n = costante$$

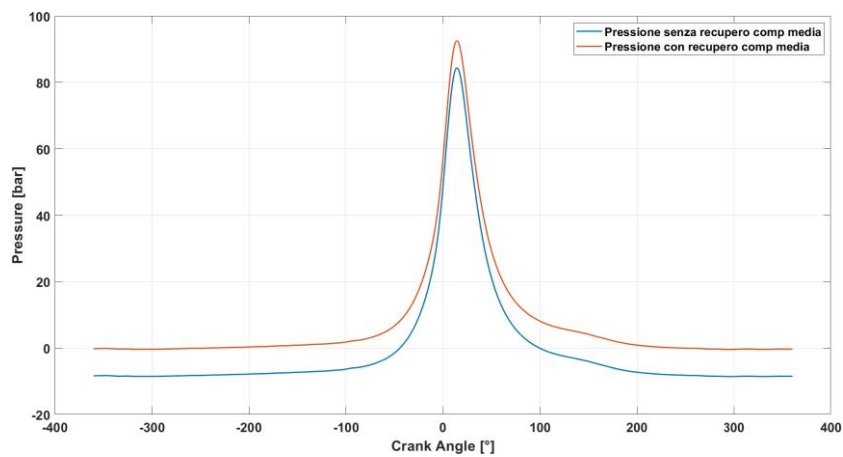
Dove  $n$  è il coefficiente della politropica. L'idea è quindi quella di prendere due valori di pressione misurati (in due punti opportuni della fase di compressione) e considerare che siano affetti da un offset  $\Delta p$  uguale per entrambi. Può essere scritto quindi che:

$$(p_1 + \Delta p) \cdot V_1^n = (p_2 + \Delta p) \cdot V_2^n$$

Da questa si può facilmente ricavare  $\Delta p$  che sarà quindi uguale a:

$$\Delta p = \frac{p_2 \cdot V_2^n - p_1 \cdot V_1^n}{V_1^n - V_2^n}$$

Conoscendo quindi la funzione di variazione del volume e le due pressioni misurate provenienti dal segnale, è possibile ricavare l'offset e quindi recuperare la componente media (Figura 4.9).

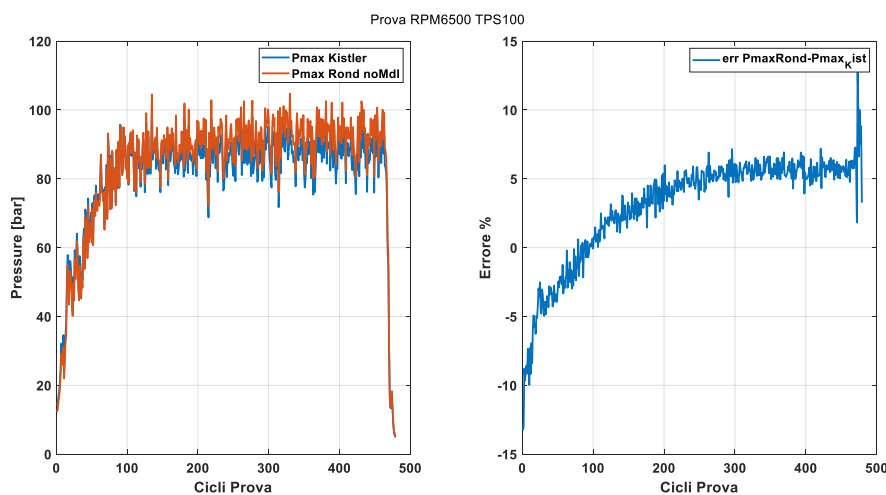


**Figura 4.9** - Confronto campane di pressione Kistler prima e dopo del recupero della componente media

In particolare, quest'ultimo metodo è stato utilizzato per il recupero della componente media del sensore di riferimento Kistler. Per quanto riguarda la rondella strumentata invece questo approccio viene sconsigliato in quanto il segnale in compressione è caratterizzato da un rumore maggiore che quindi determina una maggiore incertezza nel rilevamento delle due pressioni misurate. Viene per questo consigliato un altro metodo come il pressure referencing con MAP. In questo caso, per confrontare inizialmente i due segnali si è effettuato il recupero con politropica per il Kistler, mentre per la rondella strumentata è stato calcolato l'offset ponendo l'uguaglianza della pressione con il segnale di riferimento in un punto corrispondente ad un angolo di manovella significativo, dove il segnale non è particolarmente rumoroso.

Una volta recuperata la componente media, la prima cosa che si è fatta è stata confrontare la pressione massima rilevata dal sensore di riferimento con la pressione massima rilevata dalla rondella piezoelettrica.

L'analisi svolta ha testimoniato che in una prima fase la pressione della rondella sottostimava quella di riferimento, mentre, con l'aumentare dei cicli, questa cresceva sempre di più, coincidendo in un punto, per poi aumentare e quindi sovrastimare quella del Kistler. Nella Figura 4.10 viene mostrata una prova di una rampa fino a 6500 RPM e TPS (*Throttle Position Sensor*) massimo (100%) dove si nota l'errore percentuale tra le due curve, prima minore di zero e, successivamente, maggiore di zero.



**Figura 4.10** -Andamento Pmax del Kistler e Pmax della Rondella (sinistra) e errore percentuale (destra)

Prima di cercare di dare una spiegazione a questo effetto occorre sapere che il segnale proveniente dal sensore piezoelettrico entra nell'amplificatore di carica ed esce da esso moltiplicato per un certo *gain\_fixed*.

Il gain non è altro che un coefficiente moltiplicativo che può essere impostato nel mASTRO e che ha le dimensioni  $\frac{bar}{Volt}$ , ovvero indica che ad un certo numero di Volt in ingresso, si avrà in uscita una certa pressione. Questo valore però, una volta impostato nell'amplificatore di carica, rimane costante e quindi non cambia in tutte le prove (per questo motivo viene qui chiamato *gain\_fixed*).

L'andamento mostrato in Figura 4.10 è quindi il risultato di un segnale in Volt che è stato moltiplicato per un coefficiente per ottenere in uscita i bar, ovvero la pressione.

Per questo motivo, se l'errore percentuale della pressione massima rilevata dalla rondella strumentata rispetto a quella di riferimento del Kistler cresce da valori negativi a valori positivi, significa che il segnale in ingresso in Volt del piezoelettrico aumenta in ampiezza con l'aumentare dei cicli. In altre parole, trascurando la variabilità ciclica e ipotizzando idealmente un'ampiezza costante nei cicli nel segnale di riferimento, noteremmo un'ampiezza picco-picco crescente nel tempo nel segnale della rondella.

Questo sta a significare che il gain *reale* della rondella non è costante, ma c'è un qualcosa che lo fa variare nel tempo. In particolare, in questo caso, dato che l'ampiezza cresce rispetto quella del sensore di riferimento, si può facilmente intuire che l'andamento ideale che dovrebbe avere il gain per ottenere una curva di pressione correlabile in tutti i cicli con quella del Kistler, sarà sicuramente decrescente, con valori inizialmente maggiori del gain\_fixed dell'amplificatore di carica (così da compensare l'errore percentuale negativo iniziale) e successivamente con valori minori.

Una variazione decrescente del gain potrebbe essere spiegata anche dal punto di vista fisico. L'ipotesi più probabile è infatti che questo effetto sia legato alle variazioni di temperatura, sia della candela (in particolare del filetto) che del sensore stesso. Banalmente si può scrivere che:

$$gain = \frac{P(\vartheta)}{V(\vartheta)} = \frac{[bar]}{[Volt]}$$

La tensione totale all'uscita dalla rondella piezoelettrica è data da due contributi: uno che deriva dall'effettiva variazione di pressione in camera  $V_{Press}(\vartheta)$  ed uno che deriva dalle variazioni di temperatura  $V_{Temp}(\vartheta)$ . A sua volta quest'ultima deriva prima di tutto dallo stress termico, in particolare del filetto della candela, che causa un continuo alleggerimento sulle facce del sensore e che sarà convertito di conseguenza in bar come se fosse un contributo di pressione. Dall'altra parte però

ci sarà anche un piccolo contributo legato alla variazione di temperatura del sensore che cambierà, teoricamente in maniera trascurabile, le caratteristiche del materiale piezoelettrico. Possiamo quindi scrivere che:

$$gain = \frac{P(\vartheta)}{V_{Press}(\vartheta) + V_{Temp}(\vartheta)}$$

Supponendo ora che il rapporto  $\frac{P(\vartheta)}{V_{Press}(\vartheta)}$  rimanga costante, all'aumentare dei cicli avremo sicuramente un aumento della temperatura e di conseguenza di  $V_{Temp}(\vartheta)$  che causerà quindi una diminuzione graduale del gain.

### 4.3.1 Valutazione gain reale rondella strumentata

Per dimostrare questa tesi si è ideato un nuovo metodo per il calcolo del gain reale del sensore. L'obiettivo era infatti quello di far coincidere al meglio la campana di pressione della rondella con quella del Kistler. Sapendo che, in generale si può scrivere:

$$P_K(\vartheta) = gain \cdot V_R(\vartheta) + offset$$

Dove  $P_K(\vartheta)$  è la pressione del Kistler di riferimento e  $V_R(\vartheta)$  è il segnale in Volt della rondella strumentata. Questa relazione vale per tutti i punti, cioè per qualsiasi  $\vartheta$ . Per questo motivo, sono stati scelti due punti significativi per i quali si volevano far coincidere le due campane ogni ciclo: uno di questi era sicuramente la pressione massima, mentre l'altro si è scelto nella fase di compressione, subito dopo la chiusura delle valvole di aspirazione, dove il segnale era soggetto a meno rumore, senza però avvicinarsi troppo al punto morto superiore per fare in modo che il recupero fosse più significativo.

Per prima cosa quindi si è diviso il segnale in uscita dall'amplificatore di carica del sensore per il `gain_fixed`, ottenendo quindi i Volt in ingresso:

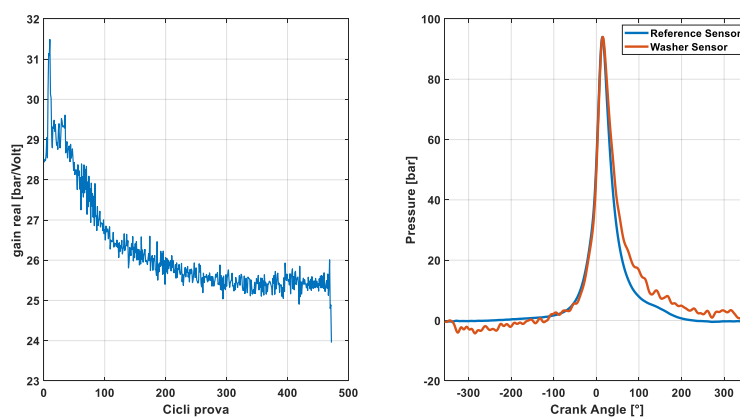
$$V_R(\vartheta) = \frac{P_R(\vartheta)}{gain\_fixed} = \frac{[bar]}{[bar/Volt]} = [Volt]$$

Successivamente è stato calcolato il `gain_reale` del sensore sotto candela, scrivendo:

$$\begin{cases} P_K(\vartheta)|_{\vartheta=\vartheta_{Kmax}} = gain\_real \cdot V_R(\vartheta)|_{\vartheta=\vartheta_{Rmax}} + offset \\ P_K(\vartheta)|_{\vartheta=\bar{\vartheta}} = gain\_real \cdot V_R(\vartheta)|_{\vartheta=\bar{\vartheta}} + offset \end{cases}$$

$$gain\_real = \frac{P_K(\vartheta)|_{\vartheta=\vartheta_{Kmax}} - P_K(\vartheta)|_{\vartheta=\bar{\vartheta}}}{V_R(\vartheta)|_{\vartheta=\vartheta_{Rmax}} - V_R(\vartheta)|_{\vartheta=\bar{\vartheta}}}$$

Avendo definito che  $\vartheta_{Kmax}$  è l'angolo di manovella corrispondente alla pressione massima del Kistler (dopo il recupero della componente media con il metodo della politropica),  $\vartheta_{Rmax}$  è l'angolo di manovella corrispondente alla tensione massima della rondella strumentata e, infine,  $\bar{\vartheta}$  è l'angolo di manovella scelto dopo la chiusura delle valvole di aspirazione. In questo modo risultano quindi due equazioni con due incognite (*gain\_real* e *offset*) ma, riuscendo a compensare facilmente l'offset ciclo per ciclo, l'unica variazione che realmente interessa è il gain. Facendo quindi riferimento alla stessa prova della Figura 4.10 è stato ottenuto il risultato mostrato nella Figura 4.11.

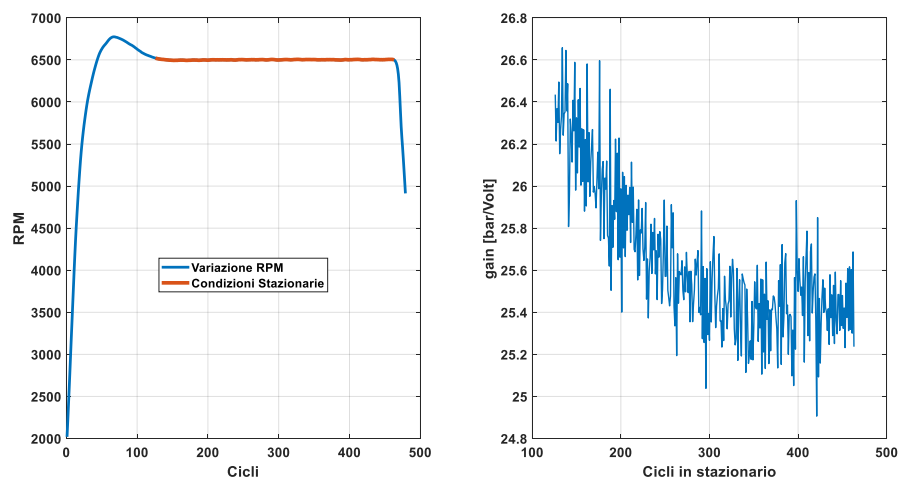


**Figura 4.11** - Prova a RPM 6500 e TPS 100-Variatione gain reale rondella (sinistra) e confronto campane di pressione in un ciclo con il recupero attraverso il gain\_real (destra)

Il *gain\_fixed* impostato sull'amplificatore di carica mASTRO era, in questo caso, 26.9 bar/Volt. Come ci si aspettava, infatti, il valore del gain reale della rondella è maggiore di quello fisso all'incirca per i primi 100 cicli, ovvero lo stesso intervallo di cicli per il quale si otteneva un errore percentuale negativo tra pressione massima calcolata con la rondella e pressione massima calcolata con il Kistler (Figura 4.10). Dopo più o meno i 100 cicli il gain diminuisce in linea con l'errore che aumenta gradualmente con valori maggiori di zero.

### 4.3.2 Implementazione modello di correzione gain

Una volta studiato e interpretato questo effetto, si è cercato di creare un modello che riuscisse a ricreare, con approccio a scatola nera, l'andamento del gain reale del sensore, partendo da un certo segnale di input. Per questo scopo, nel presente lavoro di tesi, sono stati utilizzati Matlab e Simulink come software per la programmazione e la scrittura di codici. Al fine di ottenere dei risultati attendibili è stata presa in considerazione nelle prove effettuate, solo la condizione in stazionario, così da rimuovere tutte quelle parti del segnale anomale che rendevano la variazione del gain non significativa. L'ipotesi di lavorare in stazionario ha comunque senso poiché si vede sempre una decrescita lenta del gain reale della rondella strumentata (Figura 4.12).



*Figura 4.12 -Variazione gain ideale rondella nella prova a RPM 6500 e TPS 100 in condizioni stazionarie*

Dato che il gain reale è semplicemente un coefficiente moltiplicativo che varia ciclo per ciclo e che fa passare dall'ampiezza in Volt al segnale di pressione in bar, si è scelto come input del modello sperimentale proprio questa tensione. In altre parole, una volta trovato l'andamento della tensione (dividendo quindi il segnale di pressione corrispondente per il gain\_fixed dell'amplificatore di carica), si è calcolato per ogni ciclo l'ampiezza massima, ovvero la distanza picco picco:

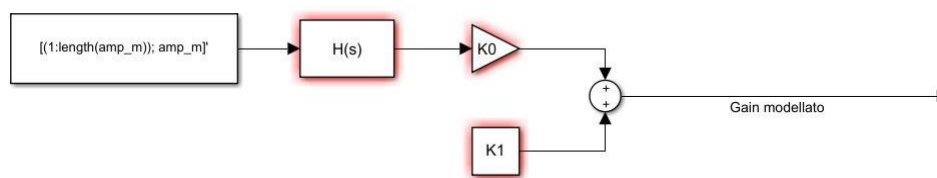
$$amp_R = \max(V_R(\vartheta)) - \min(V_R(\vartheta))$$



Lo scopo quindi era quello di modellare il gain reale (o di riferimento) della rondella strumentata, partendo proprio dalla variazione della distanza picco-picco del segnale di tensione. Questo sistema non è altro che un segnale di ingresso che deve inseguire un riferimento, quindi si può pensare di moltiplicare l'input dell'ampiezza del segnale in Volt per una certa funzione di trasferimento in modo da ottenere come output un gain modellato (*gain\_mdl*) che segua nel miglior modo possibile quello di riferimento (*gain\_real*) calcolato precedentemente. Per descrivere il sistema si utilizza quindi un modello matematico, cioè un insieme di relazioni matematiche che legano i segnali di uscita a quelli di ingresso. In generale sappiamo infatti che, applicando una trasformata nei segnali di ingresso ( $U(s)$ ) ed uscita ( $Y(s)$ ), questi saranno legati mediante una funzione di trasferimento ( $H(s)$ ):

$$Y(s) = H(s) \cdot U(s)$$

In questo lavoro è stato utilizzato Simulink per l'implementazione del modello, dove viene scelta una semplice funzione di trasferimento del 1° ordine che verrà moltiplicata per l'input, ottenendo così il *gain\_mdl*, come viene mostrato nella Figura 4.13.



**Figura 4.13** -Modello Simulink della funzione di trasferimento per il calcolo del *gain\_mdl*

Nel blocco di sinistra è presente il segnale di input, ovvero l'ampiezza in Volt della rondella strumentata, cioè la nostra  $U(s)$ . I tre blocchi rossi invece rappresentano insieme la  $H(s)$  e quindi la funzione di trasferimento, che però viene caratterizzata appositamente mediante 3 parametri diversi:

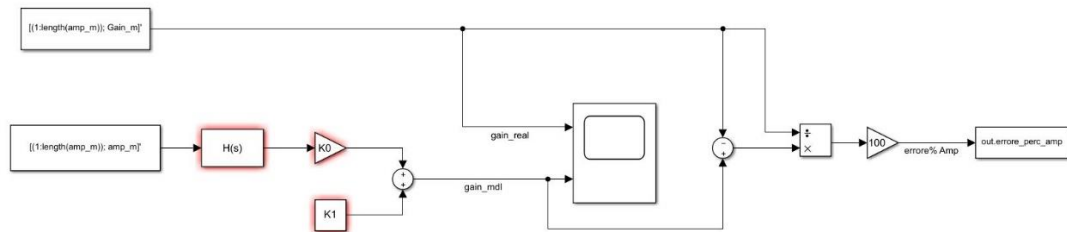
- $H(s)$  è l'effettiva funzione di trasferimento del 1° ordine con guadagno statico unitario:

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

e quindi  $\tau$  è il primo parametro da trovare.

- $K_0$  non è altro che il guadagno di  $H(s)$  e quindi un semplice fattore moltiplicativo;
- $K_1$  è un coefficiente che ha le dimensioni di un gain, che viene sommato al modello e, per questo motivo, può essere considerato un contributo statico (una sorta di offset).

Per verificare la correlazione tra  $gain\_mdl$  e  $gain\_real$  si è calcolato semplicemente l'errore percentuale tra i due, sempre all'interno di Simulink, aggiungendo inoltre un cosiddetto blocco "Scope" per la visualizzazione dei due andamenti considerati (Figura 4.14).



**Figura 4.14** -Modello Simulink implementato per il calcolo del  $gain\_mdl$

Per quanto riguarda i parametri di configurazione di Simulink è stato selezionato un risolutore ode14x(estrappolazione) a step fisso e imponendo come costante temporale il singolo ciclo.

Con l'ottica di voler trovare i tre valori ottimali della funzione di trasferimento ( $K_0$ ,  $K_1$  e  $\tau$ ), in grado di trovare il gain modellato che più si avvicina a quello di riferimento, è stata utilizzato una *function* di Matlab chiamata *fminsearch*. Questa permette di trovare il minimo di una funzione non vincolata di più variabili. In altre parole trova i parametri ottimali che minimizzano la funzione e a il suo valore minimo, procedendo iterazione per iterazione. In questo caso, la funzione che si voleva minimizzare era il *costo* tra il  $gain\_mdl$  e il  $gain\_real$  di riferimento, ovvero l'errore percentuale tra i due andamenti.

In un primo momento questo modello di ottimizzazione è stato lanciato prova per prova per verificare l'effettiva efficacia e robustezza.

Per far questo si è creata appositamente una semplice *function* in Matlab chiamata *gain\_est\_Ampiezza* (gain estimated con input Ampiezza segnale in Volt) nel quale viene lanciato il modello Simulink per la prova ii considerata, calcolando la media dell'errore tra i due segnali partendo da 3 valori iniziali definiti nel codice (Figura 4.15).

```
function Costo=gain_est_Ampiezza(input)

% Determinazione coefficienti di input iniziali
K0=input(1);
K1=input(2);
tau=input(3);

global ii

% Load delle prove di interesse
prove_modello=list_file(fullfile(pwd, '*.mat'), 'prove');
prove_modello=prove_modello(contains(prove_modello, 'modello'));

%%

load(prove_modello{ii})

% RUN di Simulink
options = simset('SrcWorkspace', 'current');
sim('Modello_Ampiezza.slx', [], options);

% Calcolo errore percentuale
Costo=mean(abs(ans.errore_perc_amp.signals.values));
```

**Figura 4.14** -Codice function per il calcolo del costo per la singola prova

Una volta creata la function si è scritto il codice nel quale si è impostato un ciclo *for* per caricare automaticamente le singole prove e lanciare *fminsearch* in grado di trovare i 3 parametri ottimali per minimizzare *gain\_est\_Ampiezza*, ovvero l'errore percentuale commesso. Prima di lanciare l'ottimizzazione sono state impostate delle opzioni aggiuntive come tolleranza e massimo numero di iterazioni (Figura 4.15).

```
options = optimset('Display', 'iter', 'MaxIter', 80, 'TolFun', 2e-4, 'PlotFcns', 'optimplotfval');
[sol, fval]=fminsearch('gain_est_Ampiezza', x0, options)
```

**Figura 4.15** -Run della function *fminsearch* per l'ottimizzazione del modello

Successivamente è stata creata una nuova funzione Matlab per il calcolo dell'errore commesso in tutte le prove con i tre parametri fissi. In altre parole, non si è voluto ottimizzare il modello per ogni prova, calcolando 3 parametri ottimali della funzione di trasferimento nella prova i-esima, ma si è cercato di trovare i 3 parametri fissi della funzione di trasferimento che ottimizzassero tutte le prove.

```
function costo=gain_est_FOR_Ampiezza(input)

% Coefficienti di input iniziali
K0=input(1);
K1=input(2);
tau=input(3);

% Load delle prove di interesse
prove_modello=list_file(fullfile(pwd,'*.mat'),'prove');
prove_modello=prove_modello(contains(prove_modello,'modello'));

for ii=1:length(prove_modello)

    load(fullfile(pwd,prove_modello(ii)))

    % RUN di Simulink
    options = simset('SrcWorkspace','current');
    sim('Modello_Ampiezza.slx',[],options);

    % Calcolo errore percentuale prova ii-esima
    Costo_prova(ii)=mean(abs(ans.errore_perc_amp.signals.values));

end

% Calcolo media totale dei singoli errori delle prove i-esime
Costo=mean(Costo_prova);
```

*Figura 4.16 -Codice function per il calcolo del costo per tutte le prove*

In questo caso quindi, in uscita da `fminsearch` si ottiene l'ottimizzazione, non del costo della singola prova, ma della media dei costi di tutte le prove, tirando fuori solo 3 valori modellati che saranno `K0_mdl`, `K1_mdl` e `tau_mdl`.

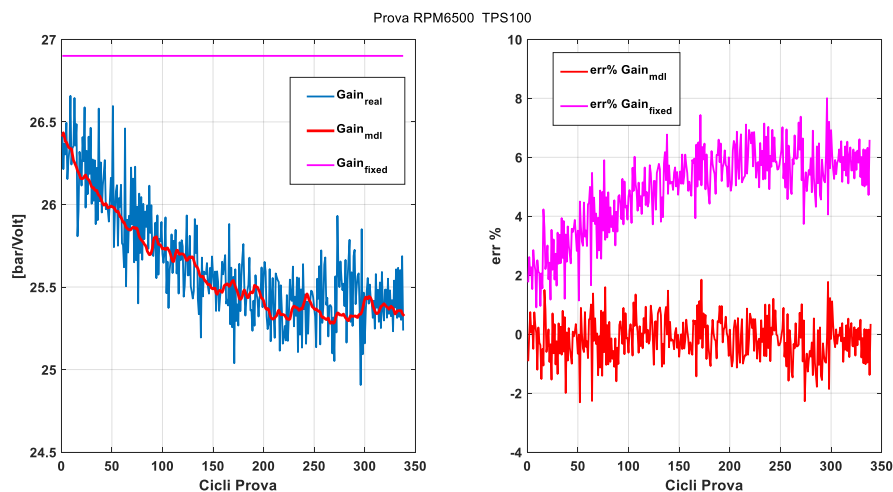
### 4.3.3 Risultati ottenuti gain modellato

Le analisi svolte sono state effettuate su 34 prove diverse come mostrato nella seguente Tabella 3.

PROVA	RPM	TPS	PROVA	RPM	TPS
1	8500	100	18	4250	100
2	8250	100	19	4000	100
3	8000	100	20	8500	75
4	7750	100	21	8000	75
5	7500	100	22	7500	75
6	7250	100	23	7000	75
7	7000	100	24	6500	75
8	6750	100	25	6000	75
9	6500	100	26	5500	75
10	6250	100	27	5000	75
11	6000	100	28	4500	75
12	5750	100	29	4000	75
13	5500	100	30	8500	50
14	5250	100	31	8000	50
15	5000	100	32	7000	100
16	4750	100	33	6500	100
17	4500	100	34	7500	100

*Tabella 3 - Prove analizzate*

Per quanto riguarda l'ottimizzazione del modello per la singola prova, sono stati ottenuti i risultati desiderati. Il gain modellato (gain\_mdl) segue correttamente quello di riferimento (gain\_real) con un costo decisamente basso. Infatti, la media del valore assoluto dell'errore percentuale tra gain\_mdl e gain\_real non supera mai l'1%. Nella Figura 4.17 vengono mostrati per esempio i due andamenti e la variazione dell'errore percentuale della prova a 6500RPM e TPS100.



**Figura 4.17** -Andamento gain\_mdl e gain\_real (sinistra) e errore tra i due ciclo per ciclo (destra)

Quindi per la presente prova, come per tutte le altre, sono stati trovati i tre valori ottimali di  $K_0$ ,  $K_1$  e  $\tau$ . Ovviamente questi tre parametri ottimizzati variano prova per prova, ma si può notare che, comparando i valori ottenuti di  $K_0$  e di  $K_1$  con gli RPM, si ottengono degli andamenti che dimostrano una qualche correlazione. Questo si può verificare plottando per esempio il valore di  $K_0$  con gli RPM dove la TPS rimane costante a 100% e dove la TPS è al 75% (Figura 4.18).

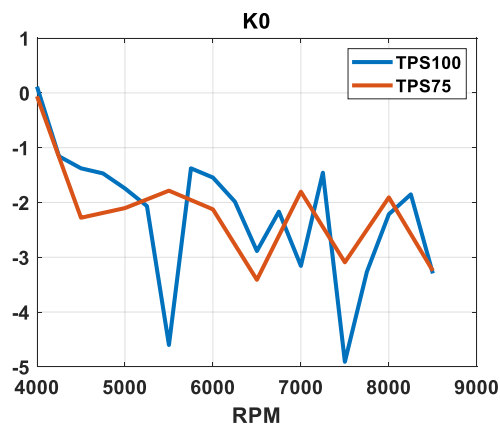


Figura 4.18 -Andamento  $K_0$  calcolato rispetto agli RPM

Trascurando le due prove a 5500 giri e 7500 giri per le prove a TPS100, si intravede infatti una sorta di andamento decrescente. Lo stesso può essere fatto per analizzare l'andamento di  $K_1$  (Figura 4.19) che dimostra invece un andamento leggermente crescente con gli RPM, trascurando sempre le due prove precedenti.

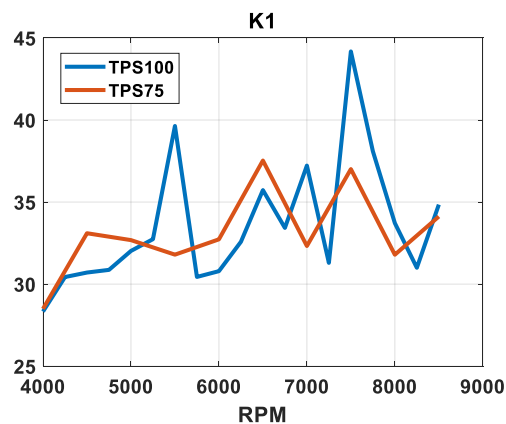


Figura 4.19 -Andamento  $K_1$  calcolato rispetto agli RPM

Una volta trovati ed analizzati questi risultati, si è ottimizzato il modello per tutte le prove, ottenendo quindi solamente tre valori ottimali della funzione di trasferimento. Lanciando la function Matlab *fminsearch* è stato riscontrato un costo totale (dato dalla media dei costi delle singole prove) all'incirca del 2%, come mostra la Figura 4.20.

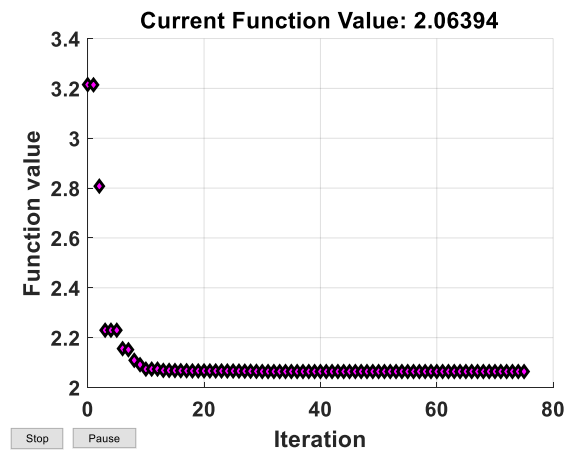


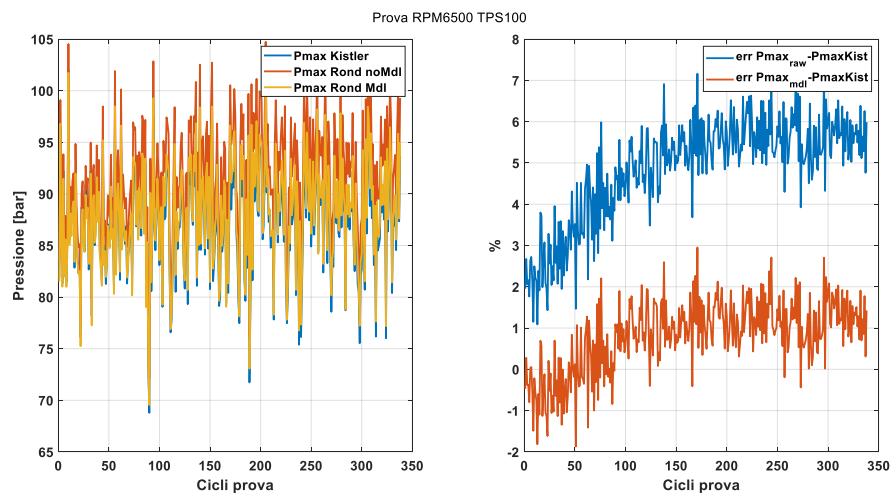
Figura 4.20 -Ottimizzazione modello e calcolo costo con *fminsearch*

Alla 76-esima iterazione la function si è arrestata, secondo le opzioni di risoluzione impostate, trovando i seguenti coefficienti ottimali:

- **K0\_mdl** = -1.4
- **K1\_mdl** = 30.8
- **tau\_mdl** = 17

Essendo però il modello basato su una media dei singoli errori, in alcune prove si sono ottenuti risultati ottimi, mentre per altre dei risultati meno robusti. Per verificarlo infatti sono stati di nuovo calcolati gli errori commessi ma, stavolta, con i valori ottimali della funzione di trasferimento, riscontrando però un errore massimo del 8%. Questo 8% però è decisamente minore rispetto a quello calcolato con il *gain\_fixed* che viene impostato nell'amplificatore di carica. In questo caso infatti vengono raggiunti valori massimi fino al 10%. Inoltre, il *gain\_mdl* segue più

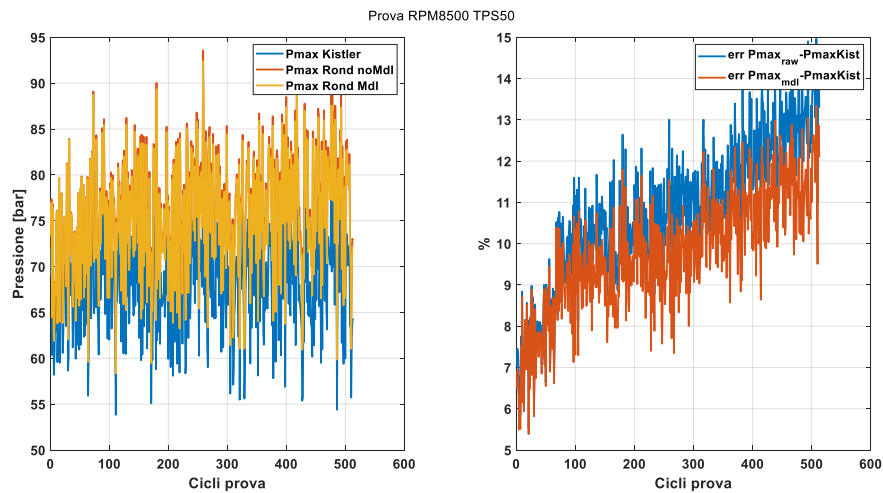
o meno l'andamento di quello reale della rondella piezoelettrica. Per provare che si è arrivati ad un miglioramento nella determinazione degli indici caratteristici della combustione, si è utilizzato il gain modellato per calcolare la pressione massima, in riferimento a quella del Kistler e, ovviamente, con la pressione massima misurata dalla rondella strumentata con il gain\_fixed dell'amplificatore. I risultati hanno comprovato che per la maggior parte delle prove si ha un netto miglioramento in quanto la pressione massima calcolata dal Kistler e rondella con gain modellato è decisamente più affine, come mostra per esempio la prova a 6500 RPM e TPS100 nella Figura 4.21.



**Figura 4.21** -Prova a 6500RPM e TPS100-Confronto errore PmaxKistler con Pmax della rondella strumentata con gain\_fixed e con gain modellato

Inoltre, considerando la prova per la quale si era riscontrato il costo massimo dell' 8%, si ottiene comunque un errore minore, seppur leggermente, tra pressione massima del Kistler e pressione massima rondella piezoelettrica, come mostra la Figura 4.22.





**Figura 4.22** -Prova a 8500RPM e TPS50-Confronto errore  $P_{maxKistler}$  con  $P_{max}$  della rondella strumentata con  $gain_{fixed}$  e con  $gain$  modellato

Si è quindi dimostrato in questo modo che il modello ha funzionato in tutte le prove considerate, con una riduzione dell'errore nel calcolo della pressione massima. Ovviamente i risultati non sono perfetti in quanto comunque persiste l'andamento crescente dell'errore causato dalle sollecitazioni termiche che si hanno durante il funzionamento. In ogni caso, questo effetto viene nettamente limitato nella gran parte delle prove considerate. Questo ci indica che la direzione è quella giusta e quindi si può pensare in qualche modo di modificare e ampliare il modello utilizzato. Dato che i coefficienti  $K_0$  e  $K_1$  sembrano correlati alla variazione di giri nelle singole prove, una strada potrebbe essere quella di aggiungere il vettore RPM all'interno del modello (aggiungendo quindi un ulteriore input) in modo di ottimizzarlo con maggior precisione.



# Conclusioni

L'attività svolta nel presente lavoro di tesi ha portato alla modellazione e realizzazione di un sensore piezoelettrico sotto candela, da utilizzare al posto della rondella standard di tenuta.

Attraverso un attento studio dell'elemento sensibile e delle geometrie effettivamente realizzabili, si è giunti ad una soluzione promettente, caratterizzata da una riduzione massima degli ingombri, senza però compromettere l'affidabilità del sensore stesso. Le scelte del materiale piezoelettrico, del PCB, del filo e del case sono state di cruciale importanza per ottenere una massima miniaturizzazione del sensore, permettendo così una sua installazione nella stragrande maggioranza delle applicazioni, limitando il più possibile lavorazioni aggiuntive del motore economicamente sconvenienti.

La successiva analisi dei test effettuati con la rondella strumentata ha inoltre dimostrato la sua effettiva capacità di monitorare correttamente la variazione della pressione all'interno della camera di combustione, mostrando però una maggiore sensibilità alle vibrazioni del motore ed una tendenza al drift che modifica la componente media del segnale. I dati hanno inoltre documentato una variazione significativa dell'ampiezza, ovvero una variazione del gain reale del segnale, causata da stress termici sia nel filetto della candela, determinando una non linearità nella trasmissione delle forze sulle facce dell'elemento sensibile, che nel sensore stesso, causando una variazione dei coefficienti caratteristici del materiale piezoelettrico. Per questo motivo in questo lavoro è stato proposto un modello di compensazione di questo effetto, in grado di limitare il più possibile gli errori potenziali nell'individuazione degli indici caratteristici della combustione. L'ottimizzazione ha mostrato risultati sicuramente positivi con un netto miglioramento della correlazione degli indici tra rondella strumentata e sensore di pressione di riferimento, ottenendo correlazioni ottime nella maggior parte delle prove considerate.

La continua tendenza del segnale di uscita del sensore a variare al crescere dei giri, fa capire che comunque l'obiettivo di rimuovere questo effetto non è stato completamente raggiunto, ma, sicuramente, la sua netta riduzione testimonia il fatto che si è percorsa la strada giusta. Sviluppi futuri quindi potranno essere incentrati nell'ampliamento del modello implementato, inserendo blocchi aggiuntivi che permettano una sua migliore ottimizzazione. Uno di questi, come è stato discusso precedentemente, potrebbe essere la variazione degli RPM delle singole prove, avendo notato una parziale dipendenza dei coefficienti della funzione di trasferimento dalla velocità di rotazione.

Per concludere, l'attività svolta ha permesso la realizzazione di un sensore innovativo, affidabile e soprattutto economico rispetto ai classici sensori di pressione utilizzati nella calibrazione. Sicuramente occorrono ulteriori studi per quanto riguarda l'acquisizione dei dati in modo da gestire la combustione nel miglior modo possibile, ma l'interesse suscitato da diverse aziende su questo lavoro durante il periodo di tirocinio, testimonia il fatto che è stato realizzato un prodotto potenzialmente conveniente e competitivo sul mercato.

# Bibliografia

- [1] Yuichi Shimasaki, et al, "Study on Engine Management System Using In-cylinder Pressure Sensor Integrated with Spark Plug" SAE paper 2004-01-0519
- [2] Mark C. Sellnau, et al, "Cylinder-Pressure-Based Engine Control Using Pressure-Ratio-Management and Low-Cost Non-Intrusive Cylinder Pressure Sensors" SAE paper 2000-01-0932
- [3] Yuji Yamamoto et al, "Development of Cylinder Pressure Measurement System Using Adaptive Calculation" SAE paper 2008-01-1009
- [4] Y. Hata et al, "Engine control system using a cylinder pressure sensor" IEE PROCEEDINGS, Vol. 136, Pt. D, No. 2, 1989
- [5] Kunifumi Sawamoto, "Individual Cylinder Knock Control by Detecting Cylinder Pressure" SAE paper 871911
- [6] Riccardo Amirante, "Towards the Development of the In-Cylinder Pressure Measurement Based on the Strain Gauge Technique for Internal Combustion Engines", SAE paper 2015-24-2419
- [7] C. Mobley, "Non-Intrusive In-Cylinder Pressure Measurement of Internal Combustion Engines", SAE paper 1999-01-0544
- [8] Luca Romani and Giulio Lenzi, Lorenzo Ferrari, Giovanni Ferrara, "Indirect Estimation of In-Cylinder Pressure through the Stress Analysis of an Engine Stud", SAE paper 2016-01-0814
- [9] Niccolò Fiorini, L. Romani, A. Bellissima, G. Vichi, A. Bianchini, G. Ferrara "An indirect in-cylinder pressure measurement technique based on the estimation of the mechanical strength acting on an engine head screw: development and assessment", ELSEVIER 2018
- [10] L. Romani, A. Bianchini, G. Vichi, A. Bellissima, G. Ferrara "Experimental Assessment of a Methodology for the Indirect in-Cylinder Pressure Evaluation in Four-Stroke Internal Combustion Engines", Energies 2018, 11, 1982; doi:10.3390/en11081982

- [11] Niccolò Fiorini, Luca Romani, Giovanni Ferrara, Alessandro Bianchini, Nicolò Ciuffi, Giovanni Vichi, Alessandro Bellissima, Go Asai, Ryota Minamino, “Application of a Methodology for the Indirect In-cylinder Pressure Measurement to a 4-cylinder Diesel Engine”
- [12] Michael J. Andrie, “Non-Intrusive Low Cost Cylinder Pressure Transducer for Internal Combustion Engine Monitoring and Control”, SAE paper 2009-01-0245
- [13] J. E. Morris, “Intra-Cylinder Combustion Pressure Sensing”, SAE paper 870816 (1987)
- [14] T.M. Kamel, F.X.N.M. Kools, G. de With, “Poling of soft piezoceramic PZT” ELSEVIER 2007
- [15] S. Esslinger, P. Neumeister, A. Schonecker, “Effect of Temperature Path on the Poling of Commercial Hard PZT Ceramics and its Implication for Mass Production” J. Ceram. Sci. Tech., 04[04] 213-216(2013)
- [16] HUANG SHIFENG, CHANG JUN, LIU FUTIAN, LU LINGCHAO, YE ZHENGMAO, CHENG XIN, “Poling process and piezoelectric properties of lead zirconate titanate/sulphoaluminate cement composites” JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 39 (2004)6975–6979
- [17] T.M. Kamel, G. de With, “Poling of hard ferroelectric PZT ceramics” ELSEVIER 2008
- [18] Piero Mario Azzoni, “Strumenti e misure per l’ingegneria meccanica” HOEPLI
- [19] E. Corti, L. Raggini, “The Use of Piezoelectric Washer for Feedback Combustion Control” SAE paper 20PFL-0509
- [20] N. Cavina, Appunti corsi “Sperimentazione e calibrazione di motori a combustione interna m” e “Motori a combustione interna e propulsori ibridi”