



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE MATEMATICHE

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica (D.M. 270/04)

Sviluppo di un banco di trascinamento per la caratterizzazione delle velocità di rotazione istantanee di un albero a camme di una testata Ducati Desmosedici GP

Development of a driving bench for the characterization of instantaneous rotation speed of a dragged Ducati GP Desmosedici's head engine

Relatore: Chiar.mo:

Prof. Paolo Castellini

Tesi di Laurea di:

Federico Sanchioni

A.A. 2019 / 2020

SOMMARIO

0- Prefazione	3
1- Introduzione	4
1.1- Ducati Desmosedici	4
1.2- Distribuzione Desmodromica	5
2- Apparato sperimentale	7
2.1- Generalità	7
2.2- Impianto termoregolatore olio motore	10
2.3- Impianto elettrico di trascinamento dell'albero a camme	12
2.4- Equipaggiamento di misura – sensoristica	13
3- Risultati delle misurazioni: discussione	18
3.1- Misurazione preliminare: alzata valvola	18
3.2- Analisi preliminare: alzata valvola	20
3.3- Analisi frequenze caratteristiche di testa e banco	24
3.4- Analisi frequenze di risonanza rilevate in testa	26
4- Conclusione	30
5- Bibliografia e sitografia	32

0- PREFAZIONE

L'argomento di studio della tesi sperimentale in oggetto è una testata Ducati Desmosedici GP14, della quale si vogliono conoscere le velocità angolari dell'albero a camme. Tale analisi è frutto di un progetto di ricerca e sviluppo iniziato nell'anno 2014 tra l'Università Politecnica delle Marche, il professor Paolo Castellini e Ducati Motor Holding (*di seguito DMH*).

La testata, assemblata di tutti i suoi elementi per il normale funzionamento, è posta in condizioni di trascinamento mediante la realizzazione di un apposito banco prova, al fine di simulare condizioni di utilizzo reali a meno del processo di combustione e delle inerzie derivanti dal moto dei componenti dell'intero motore.

La tesi in esame è stata effettuata sotto “contratto di riservatezza” tra il laureando Federico Sanchioni e DMH a causa dell'elevato lavoro di ricerca e sviluppo inerente il progetto “Ducati Desmosedici GP” da parte di Ducati Corse.

I contenuti sensibili sotto forma di dati tecnici e/o foto saranno dunque secretati durante la reale pubblicazione della tesi di laurea, in conformità con la dichiarazione di riservatezza sottoscritta in data 07-09-2020.

1- INTRODUZIONE

1.1-Ducati Desmosedici

Il progetto Ducati MotoGP nasce agli albori dell'anno 2002 quando videro la luce i nuovi regolamenti della neonata categoria, a seguito del passaggio dalla 500GP. La rivoluzione fu una delle più grandi della storia del motociclismo, imponendo per la prima volta l'impiego di propulsori a quattro tempi, tipici della tradizione e dell'esperienza Ducati. In quegli anni, infatti, la casa di Borgo Panigale era tra le più prestigiose nel Campionato mondiale Superbike, dove ottenne numerosi successi con le sue motociclette equipaggiate da propulsori bicilindrici quattro tempi.

Nel maggio 2001 Ducati annunciò pubblicamente l'intenzione di entrare nella classe regina, quindi a Febbraio 2002 presentò il primo progetto del propulsore, arrivando a debuttare ufficialmente al Gran Premio del Mugello dello stesso anno, partecipando poi ai successivi test collettivi e al suo primo motomondiale l'anno successivo con la "Desmosedici GP3". Già dal primo progetto, poi sviluppato ed incrementato negli anni, la rivoluzione fu immensa: Ducati non decise di schierare un bicilindrico 90° tipico della produzione di serie, quindi del Campionato mondiale Superbike, bensì un motore V4 90° equipaggiato con iniezione elettronica, raffreddamento a liquido e distribuzione desmodromica a doppio albero a camme con quattro valvole per cilindro, da cui la moto prese il nome e lo mantiene tutt'oggi. La ragione del repentino cambiamento del numero dei cilindri fu proprio la filosofia che l'azienda italiana attuò per iniziare a scrivere su carta bianca il suo progetto: *il pilota*. Gli ingegneri partirono, quindi, dall'anatomia e dalle forme base del corpo umano, per scoprire poi che la forma migliore che un propulsore potesse avere per integrarsi con un pilota era quella con i gruppi termici disposti a V. A questo punto seguirono studi sul numero ottimale di cilindri mediante un simulatore di prestazioni che metteva in relazione il numero di cilindri (ascisse) con i tempi sul giro (ordinate). Da tale analisi si ottenne una funzione sempre crescente, la quale però subiva un grande calo di pendenza verso i quattro cilindri: nacque così la Desmosedici GP.

1.2-Distribuzione Desmodromica

La caratteristica del motore Ducati è insita nel suo particolare sistema di distribuzione: la distribuzione desmodromica (dal greco “*desmos*” = vincolo e “*dromos*” = corsa). Dunque con desmodromico si intende un meccanismo a corsa guidata nell'interezza del suo movimento; quest'ultima ha come peculiare caratteristica la capacità di controllare, oltre la corsa di apertura come nei sistemi di distribuzione più frequenti, anche la corsa di chiusura delle valvole. La prima applicazione di tale cinematismo nel settore racing vide la luce con le vetture da competizione Mercedes-Benz “W196” e “300SLR”, con conseguente conquista del Campionato mondiale Formula 1 del 1954 e del successivo nel 1955, oltre alla MilleMiglia sempre nel 1955. In campo motociclistico il sistema desmo è stato per anni studiato dall'ingegnere Ducati Fabio Taglioni, il quale arrivò a farlo divenire la vera e propria icona della casa di Borgo Panigale.

Lo schema cinematico ad oggi utilizzato nella pratica è raffigurato dalla *fig.1*: ogni disco di ciascuna camma coniugata (*conjugate cam*) è in contatto con un bilanciere (*rocker*); i due bilancieri sono, quindi, a contatto con il registro del gioco (*adjuster*) posto sulla punta della valvola. I due dischi delle camme agiscono sul registro mediante i bilancieri, mossi in direzioni opposte. Il sistema attuale utilizza anche una molla (*rocker spring*) che agisce sul bilanciere di chiusura (*negative rocker*), al fine di garantire la perfetta chiusura della valvola a fungo.

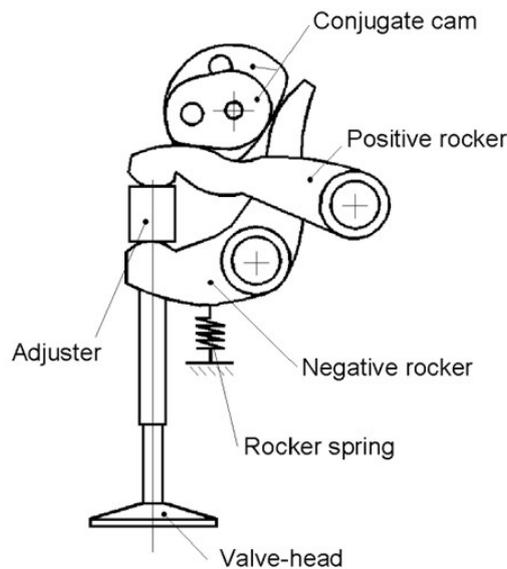


FIG. 1: SCHEMATIZZAZIONE CAMME DESMODROMICO

Rispetto ai più diffusi sistemi di distribuzione a molla, i desmodromici permettono di impartire accelerazioni molto elevate alle valvole, evitando che il sistema di distribuzione vada incontro a fenomeni di “sfarfallamento” a causa degli alti regimi di rotazione (18 000 rpm) di un motore Ducati Desmosedici. Infatti, la complessità meccanica del sistema desmo è applicata soltanto a motori con prestazioni molto elevate e con alte velocità di rotazione, a giustificarne, di contro, gli altissimi costi di progettazione e realizzazione. Al fine di incrementare lo sviluppo tecnologico ed il miglioramento delle prestazioni meccaniche sono, quindi, risultate necessarie accurate misure al cinematismo delle valvole. A tal fine, è stato costruito e sviluppato un banco prova in cooperazione con DMH, avente lo scopo di riprodurre al meglio le condizioni funzionali del desmodromico in trascinato.

2- APPARATO SPERIMENTALE

2.1- Generalità

L'apparato sperimentale con il quale ci troviamo a lavorare include un banco di supporto, una testata Ducati Desmosedici GP14, un motore elettrico per azionare l'albero a camme, un circuito di lubrificazione termoregolatore dell'olio motore e la strumentazione di misura (fig. 2 e 3).

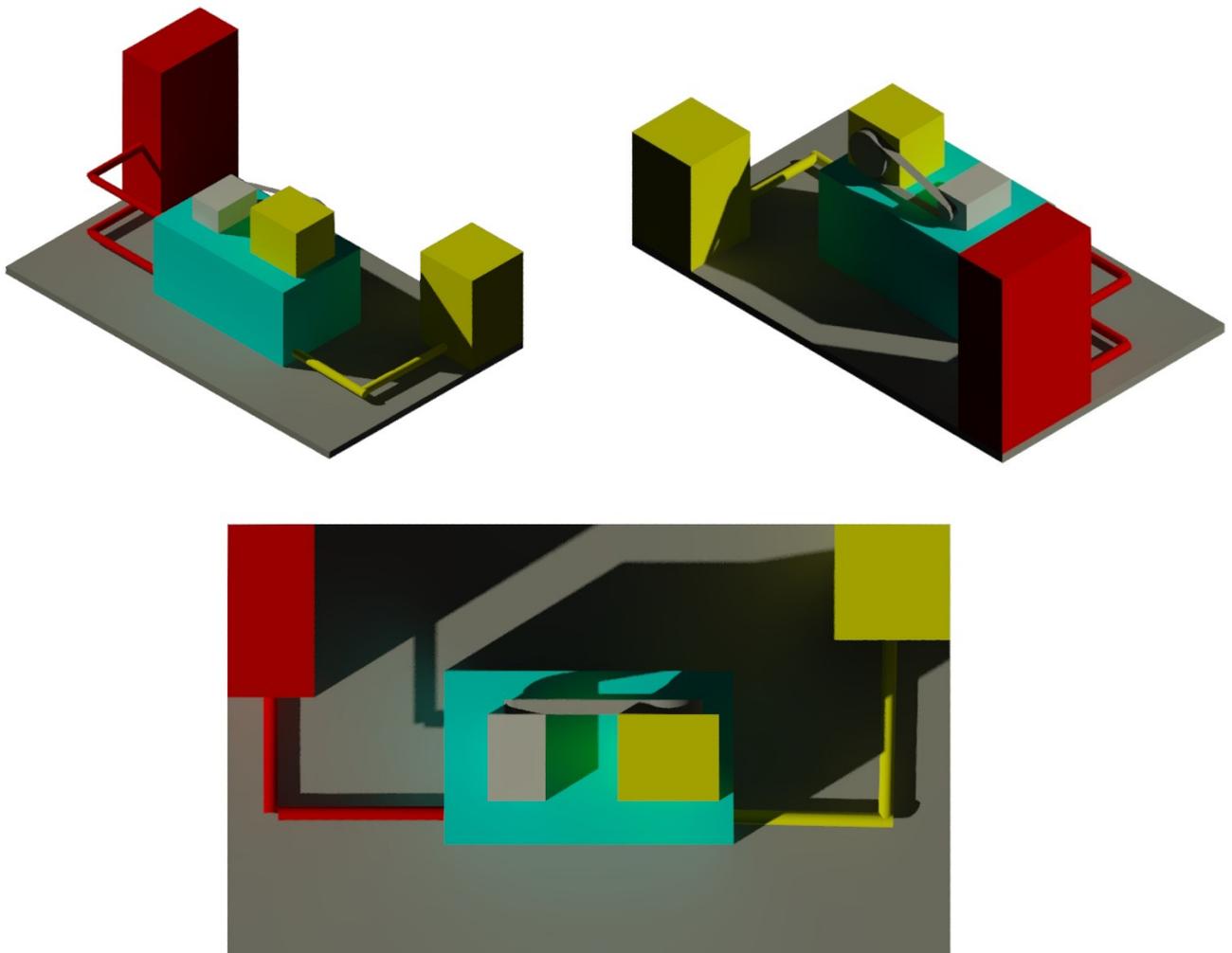


FIG. 2: RENDERING E PIANTA IMPIANTO SPERIMENTALE IN CONDIZIONI DI PROGETTO, COMPRESO DI:
A- BANCO PROVA ●
B- IMPIANTO TERMOREGOLATORE OLIO MOTORE ●
C- IMPIANTO ELETTRICO DI TRASCINAMENTO DELL'ALBERO A CAMME ●
D- TESTATA ●

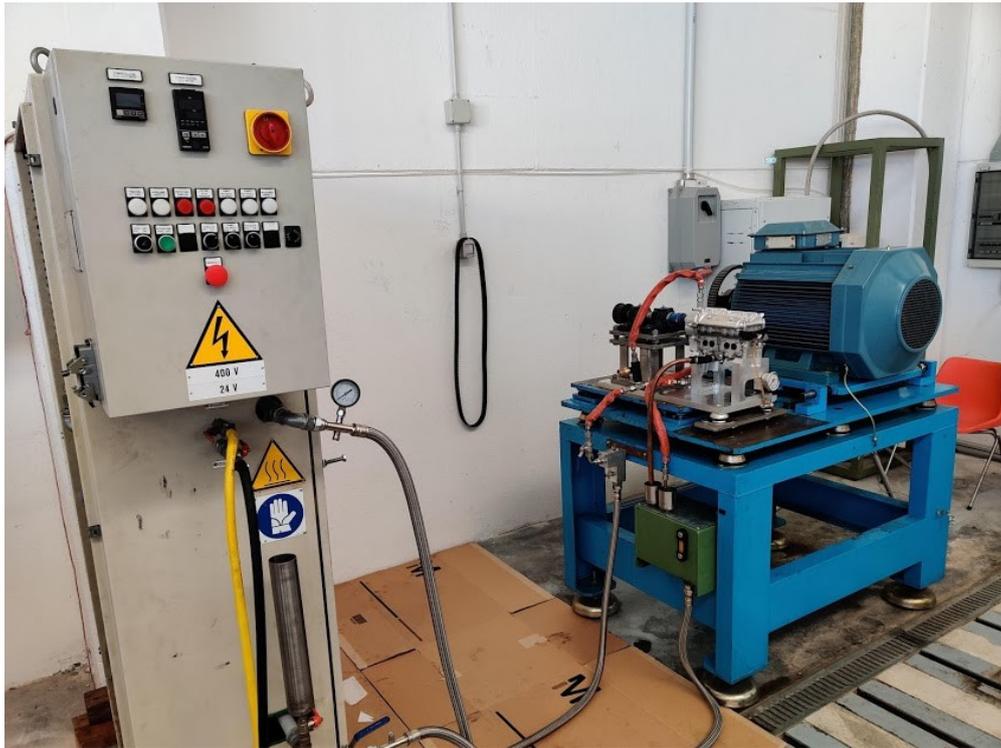


FIG. 3: IMPIANTO SPERIMENTALE IN CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO

In particolare, solo i componenti necessari per il trascinamento della testa (*fig. 4*) sono inclusi nell'impianto oggetto d'esame, escludendo quindi carter basamento motore, albero motore, biella, scatola di trasmissione con cambio Seamless (*particolare tipo di cambio introdotto da Ducati Corse durante la stagione 2011, che consente di avere denti sempre in presa*), pompe per azionamento di fluidi (acqua ed olio), gruppi termici (cilindri e pistoni) e trasmissione finale. Di conseguenza, nel sistema considerato non sono prese in considerazione forze derivanti da gas presenti in camera di scoppio, forze di combustione, vibrazioni ed inerzie relative al moto dell'intero propulsore. Ciò significa che la risposta del sistema è diversa dalle tipiche condizioni operative. Tuttavia, l'inclusione (o esclusione) di forze dovute ai fenomeni meccanici e fluidodinamici trascurati, non compromette la validità dei dati sperimentali. I test richiedono quindi la riproduzione della trasmissione della potenza (normalmente conferita dalla catena di distribuzione) mediante un motore elettrico e un sistema di trasmissione e la lubrificazione di alberi a camme e valvole trascinate in modo simile a quello del motore nel normale uso racing, quindi con regimi di giri variabili fino a 18000 rpm, mediante un impianto termoregolatore per olio motore.

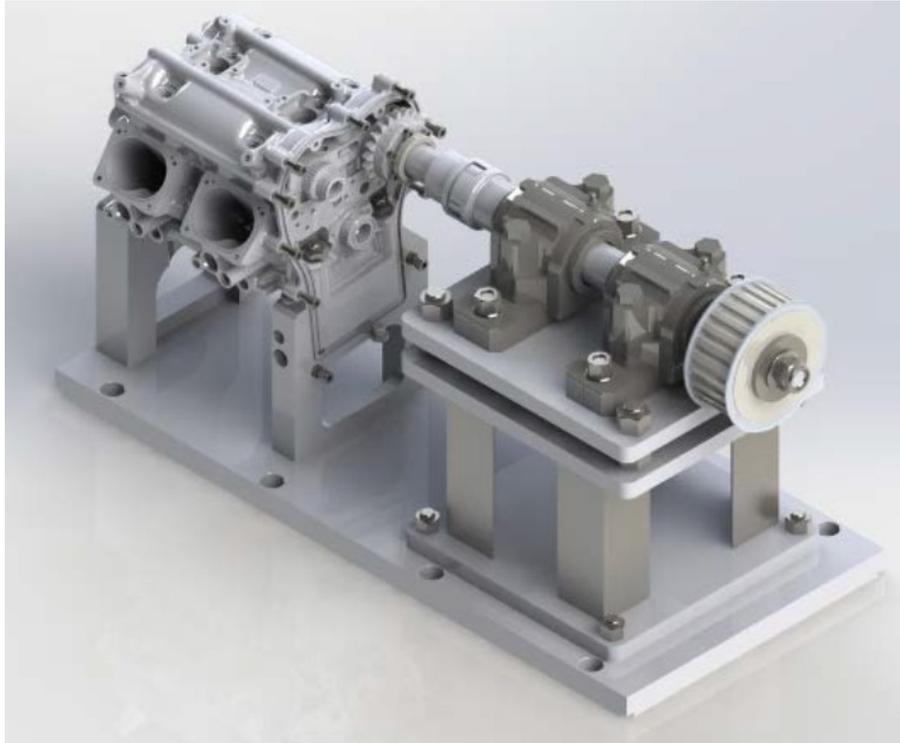


FIG. 4: RENDERING TESTATA DESMOSEDICI GP14 E SISTEMA DI TRASMISSIONE

La piccola massa della valvola e la sua alta velocità non consentono misurazioni a contatto; inoltre l'alta gamma di frequenze e l'elevata temperatura (controllata tra 110 - 130 °C) non consentono l'impiego di trasduttori di prossimità. Le misurazioni del movimento della valvola possono essere influenzate dal movimento (seppur minimo) della testata; pertanto, saranno usati due encoder per misurare la velocità angolare di un albero a camme e posizione di riferimento ("tacca di zero"), collegati direttamente all'albero di trasmissione posti, quindi, prima del giunto tra albero a camme e motore elettrico (*fig. 4*). La parte più importante nel montaggio di tali encoder è proprio il posizionamento del sensore magnetico e del sensore ottico. A tal proposito, sono stati realizzati specifici supporti (*fig. 5*) atti a sopportare non tanto la resistenza meccanica, bensì la flessione, la torsione e le vibrazioni derivanti dall'intero moto di funzionamento del banco prova e della testata trascinata.

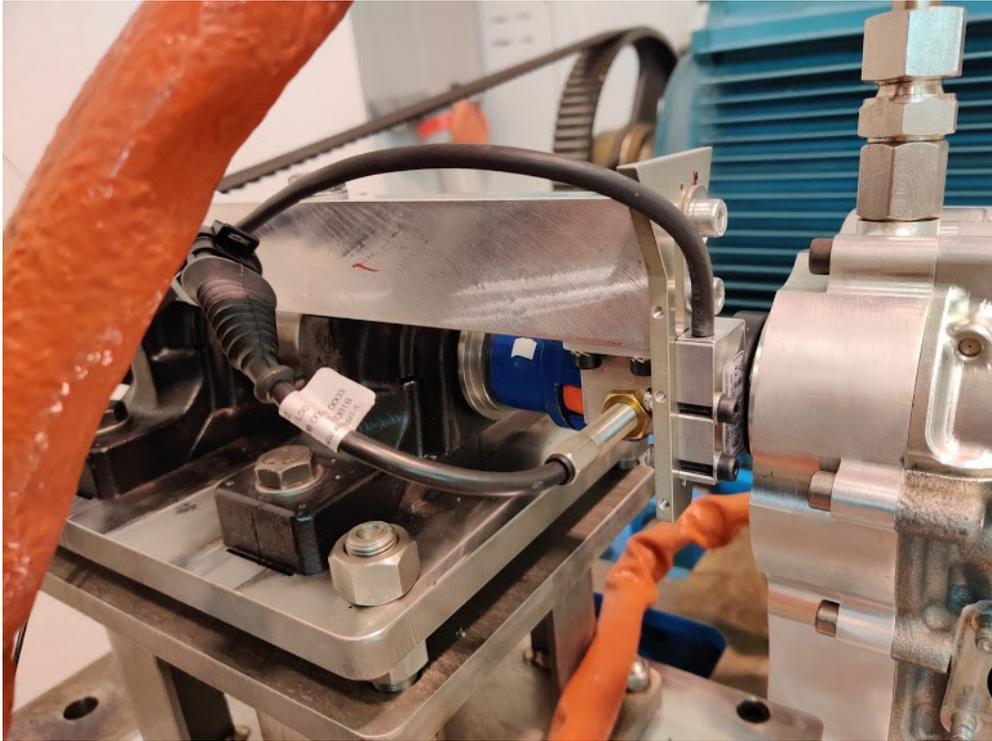


FIG. 5: SUPPORTO SENSORI E MONTAGGIO SENSORI SU BANCO

2.2- Impianto termoregolatore olio motore

Il circuito termoregolatore (di seguito CT, *fig. 6*) è stato fornito da DMH ed è costituito da:

- serbatoio per olio diatermico compreso di resistenza
- due pompe autoadescanti per olio diatermico ed olio motore
- due scambiatori in controcorrente
- tre elettrovalvole
- due controllori Proporzionali Integrali Derivativi (di seguito PID) di controllo temperatura per olio diatermico e per olio motore

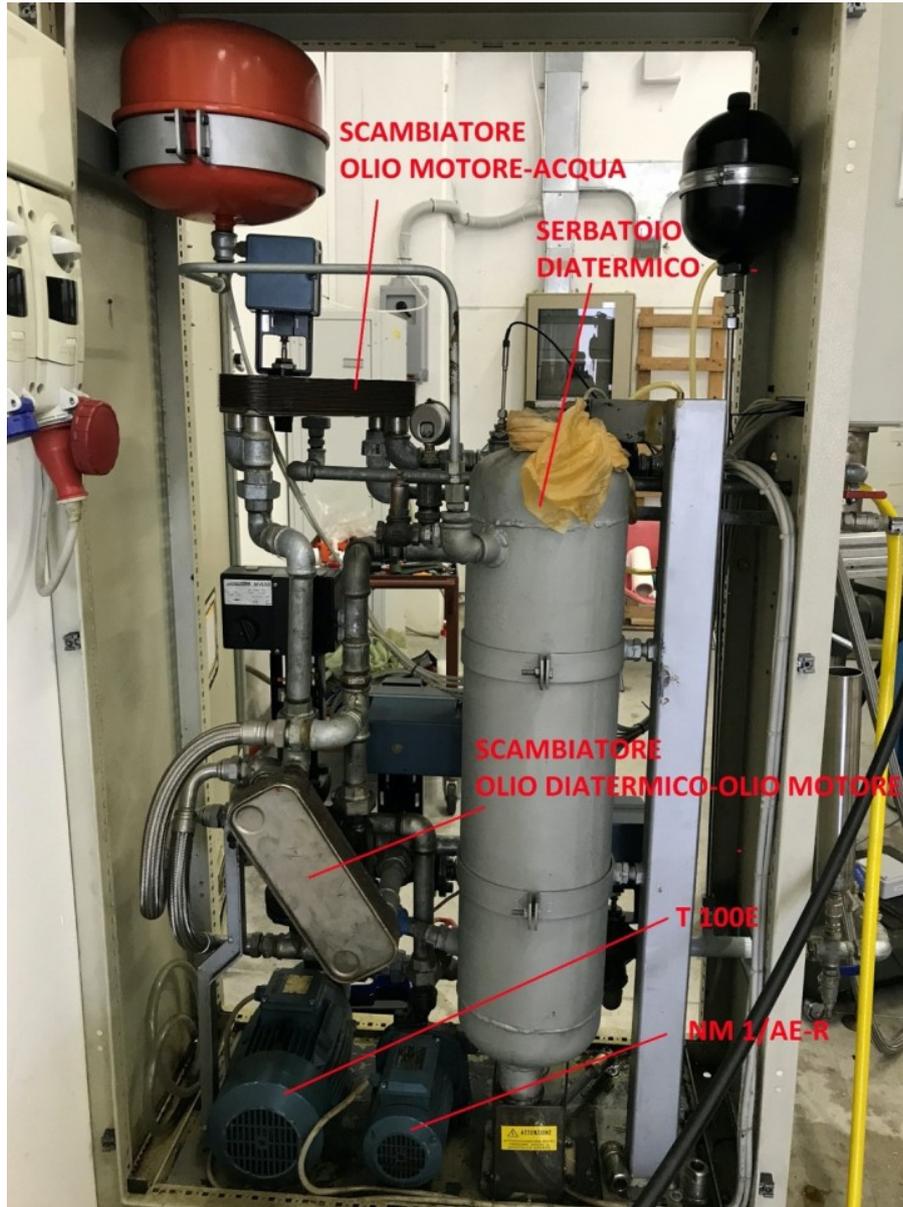


FIG. 6: CIRCUITO TERMOREGOLATORE OLIO MOTORE IN CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO

L'olio diatermico viene preriscaldato dalla resistenza presente nel serbatoio, per poi essere pompato all'interno del primo scambiatore, dove cede calore per conduzione e convezione all'olio motore. Quest'ultimo entra nel secondo scambiatore, dove è raffreddato dall'acqua per uscire, infine, dal circuito termoregolatore. Le due pompe autoadescanti fungono da propulsori per i due oli. I due PID controllano le tre elettrovalvole che servono a garantire il mantenimento della temperatura dell'olio motore da 110 a 130°C (fig.7). L'intero impianto oleodinamico è regolato da un pannello (fig. 8) posto esternamente, mediante il quale è possibile regolare il range di temperatura per ogni olio, così come l'azionamento della pompa di rilancio (atta a scambiare calore tra olio diatermico ed olio motore, facendolo circolare in testa).



FIG. 7: PID DI CONTROLLO TEMPERATURA DI OLIO DIATERMICO (a sinistra) ED OLIO MOTORE (a destra)

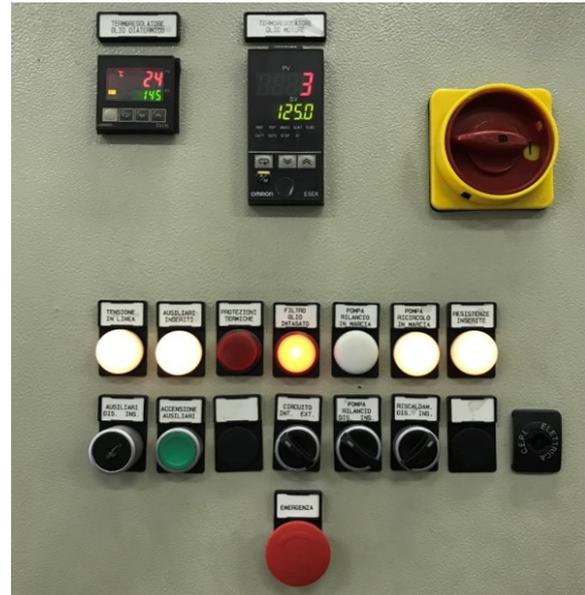


FIG. 8: QUADRO COMANDI CT

2.3- Impianto elettrico di trascinamento dell'albero a camme

L'impianto elettrico, analogamente a quello termoregolatore dell'olio, è stato fornito da DMH ed è composto da:

- un motore elettrico con potenza nominale di 55 kW
- un inverter (ABB ASC600)
- un telecomando di controllo dell'inverter
- una cinghia dentata di trasmissione della potenza

Il motore elettrico è montato su una slitta, con il compito di tensionare la cinghia che collega la puleggia motrice del motore elettrico alla puleggia condotta della trasmissione, alla quale è collegato un apposito albero di trasmissione (fig. 9).



FIG.9: ALBERO DI TRASMISSIONE ASSEMBLATO CON PULEGGIA DENTATA, CUSCINETTI E LABIRINTI

Quest'ultimo viene collegato all'albero a camme mediante un giunto omocinetico, trasferendo così potenza. Il motore elettrico è quindi alimentato da un inverter e lo stesso (per mezzo di un apposito telecomando) permette di variare il numero di giri e, di conseguenza, la potenza conferita alla testata.

2.4- Equipaggiamento di misura - sensoristica

La sensoristica di misura utilizzata per lo studio oggetto della presente tesi è composta da:

- un sensore di giri ad effetto hall "NPN M9x1 TYCO" per la misura di giri o velocità di ruote foniche, al fine di estrarre un segnale di "0" (*fig. 10*)
- un encoder magnetico "Kubler Limes LI20" con risoluzione di 10 μm (*fig. 11*)
- una banda magnetica "Kubler Limes B1" collegata all'albero di trasmissione mediante calettamento albero-mozzo

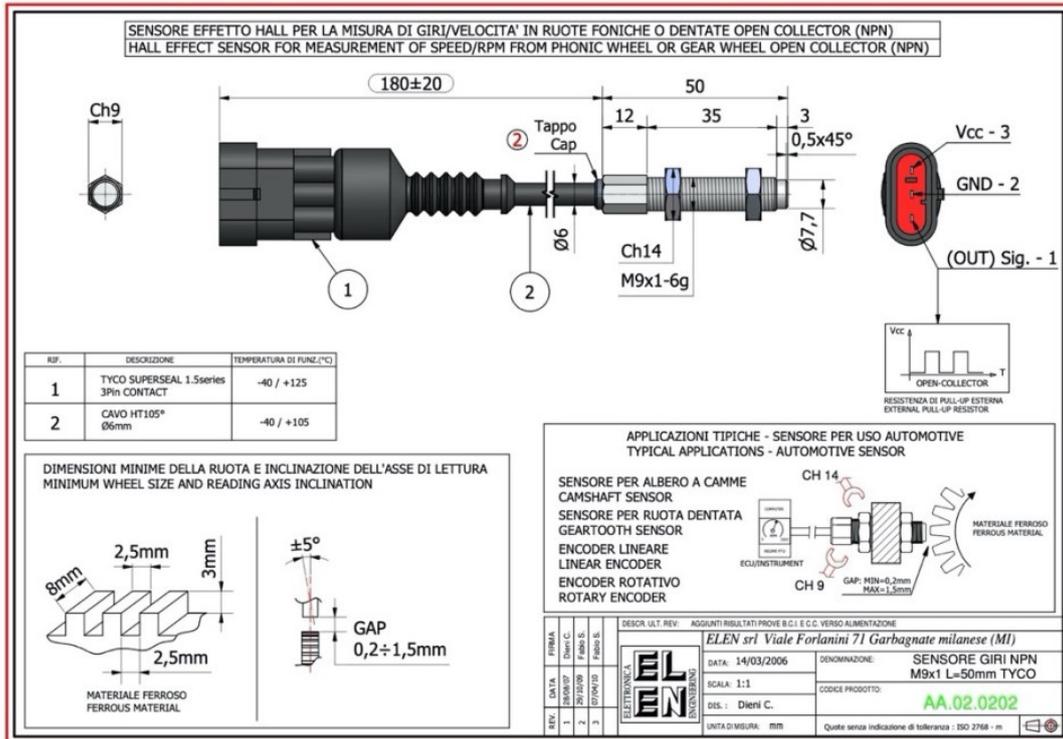


FIG. 10: DATASHEET SENSORE AD EFFETTO HALL PER RUOTA FONICA

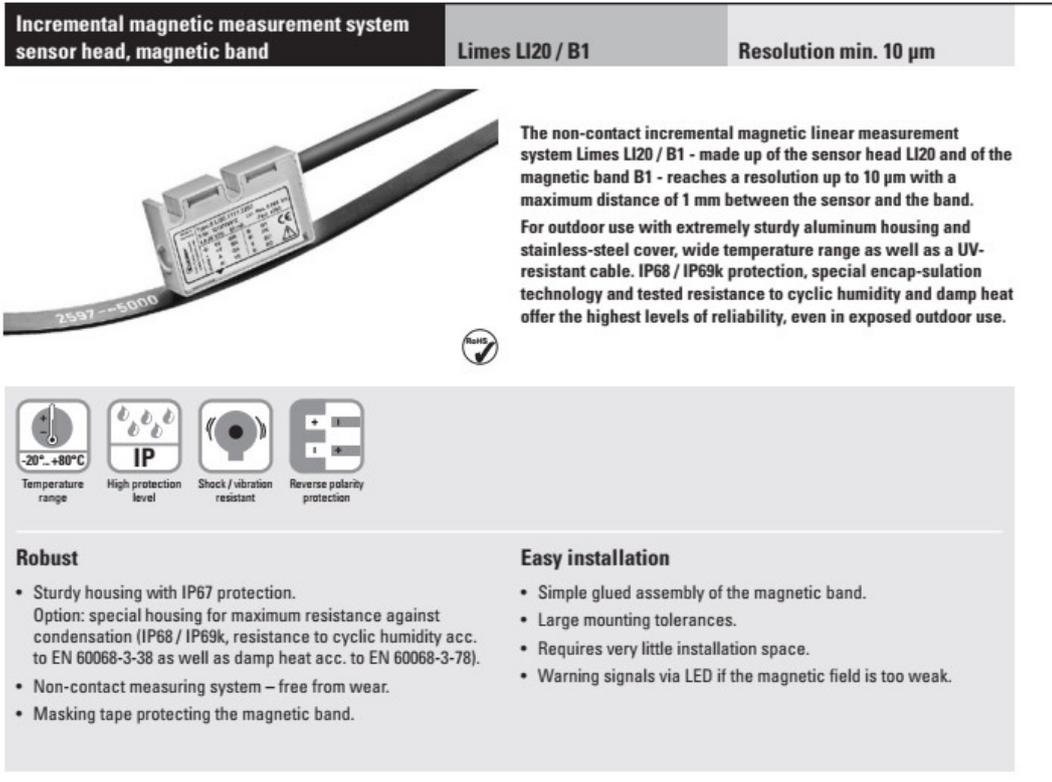
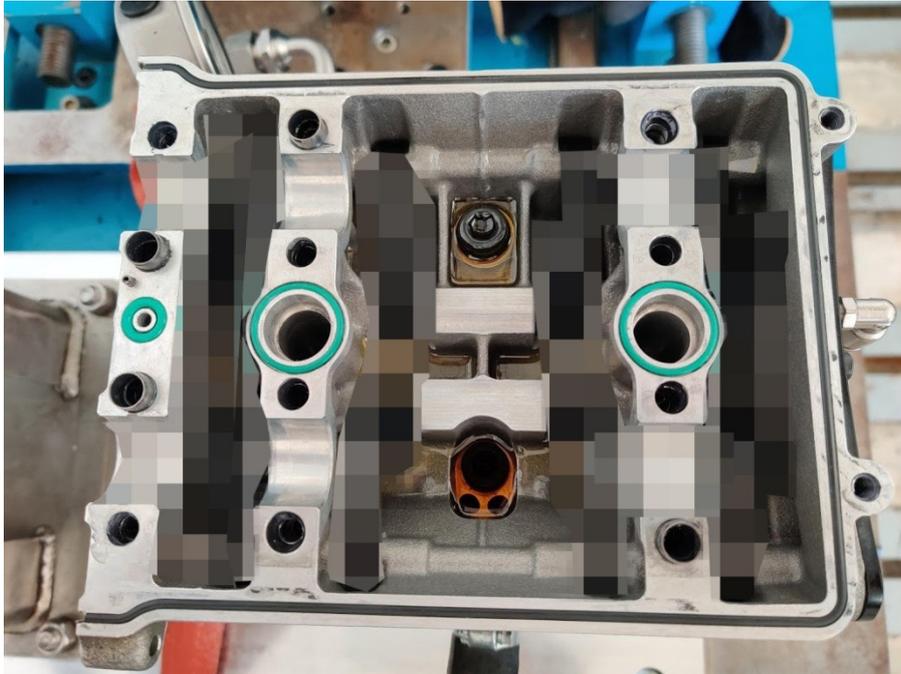
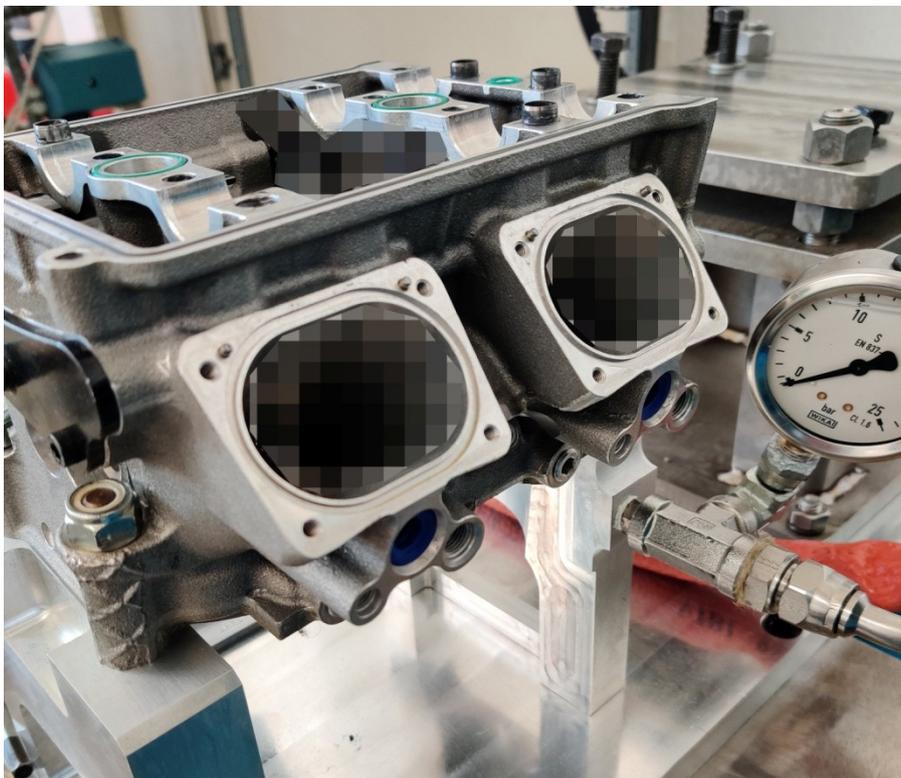


FIG. 11: DATASHEET ENCODER MAGNETICO "KUBLER LIMES LI20"

Il primo passo per eseguire la misura delle velocità di rotazione istantanee dell'albero a camme della testata trascinata è quello del montaggio dei sensori. A tal proposito, si è proceduto al disassemblaggio della testa dal coperchio valvole, dal coperchio distribuzione e dagli alberi a camme (fig. 12). In seguito, è stato tornito l'albero flangiato idoneo a collegare il giunto omocinetico all'albero a camme, per consentire il corretto montaggio della banda magnetica "Kubler Limes B1", solidale all'albero per mezzo di un grano.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 12 (a, b): TESTATA DISASSEMBLATA DA COPERCHIO VALVOLE, COPERCHIO DISTRIBUZIONE E ALBERI A CAMME;
FIG. 12 (c): PARTICOLARE DI ALBERO A CAMME;
FIG. 12 (d): PARTICOLARE DEI BILANCIERI DESMODROMICI IN CONDIZIONE DI CORRETTO POSIZIONAMENTO.

I PARTICOLARI NON VISIBILI SONO STATI SECRETATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.

Particolare attenzione è stata posta nella fasatura durante il rimontaggio della testata, avendo cura che le due ruote dentate degli alberi a camme ingranassero la ruota di collegamento tra le due perfettamente in fase (*fig. 13*), analogamente al normale funzionamento del motore in condizioni racing. Un altro peculiare accorgimento durante l'assemblaggio della testata è stato quello di avere chiare tutte le coppie di serraggio delle viti (da tirare rigorosamente solo con chiavi dinamometriche ad apposite coppie di serraggio), nonché l'applicazione di uno speciale grasso "ROCOL" (*fig. 13*) fornito da DMH. Tale grasso si interpone tra viti e madrevite ed è di fondamentale importanza per evitare il grippaggio delle stesse, avendo viti in titanio accoppiate con madreviti in alluminio.

La fase più delicata per l'estrazione dei dati dal moto della testa e dei relativi alberi a camme è proprio quella derivante dalla realizzazione delle staffe di supporto dei sensori. Questi ultimi sono caratterizzati da tolleranze molto basse; di conseguenza è necessario un posizionamento accurato ed il processo di manifattura dei supporti richiede alti livelli di precisione. I sensori devono dunque essere solidali al banco prova, avendo non tanto resistenza meccanica bensì resistenza a flessione ed a momenti di inerzia derivanti dalla rotazione degli alberi, nonché a vibrazioni derivanti dall'alternato moto di apertura e chiusura delle valvole. Inoltre, è opportuno verificare che i supporti non vadano incontro a fenomeni di risonanza in corrispondenza dei regimi di giri cui s'intende eseguire la raccolta dei dati.

Terminato il montaggio dei sensori sul banco prova, si è passati alla reale fase di raccolta dei dati e di analisi di questi ultimi.



FIG. 13: PARTICOLARE DELLA CORRETTA FASATURA TRA LE RUOTE DEGLI ALBERI A CAMMES E LA RUOTA DENTATA DI COLLEGAMENTO TRA LE DUE. IN FIGURA È POSSIBILE NOTARE ANCHE VITE E MADREVITE ACCOPPIATE MEDIANTE GRASSO "ROCOL" FORNITO DA DMH.

I PARTICOLARI NON VISIBILI SONO STATI SECRETATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.

3- RISULTATI DELLE MISURAZIONI: DISCUSSIONE

3.1- Misurazione preliminare: alzata valvola

A seguito dell'assemblaggio della testata si è proceduto, come da indicazioni di DMH, alla misura dell'alzata delle valvole, allo scopo di verificare che tutti i componenti meccanici della distribuzione Desmodromica fossero stati posizionati in maniera perfetta. Pertanto è stato montato su un treppiede un vibrometro "Polytec RSV-150" (fig. 14) per monitorare lo spostamento assiale della valvola mediante l'ausilio di uno specchio angolato di 45° rispetto al basamento della testa (fig. 15). Lo strumento usato in questa fase è un vibrometro "Laser-Doppler", che attualmente rappresenta il miglior metodo per la misura di spostamento e velocità. Alla base della misurazione è posto il principio fisico dell'effetto doppler, che consiste nel cambiamento apparente (rispetto al valore originale) di frequenza e lunghezza d'onda a seguito del contatto con l'oggetto della misurazione (piattello valvola).



FIG. 14: VIBROMETRO POLYTEC RSV-150, MONTATO SU TREPPIEDE, ALIMENTATO E CORRETTAMENTE ALLINEATO ALLO SPECCHIO POSIZIONATO SOTTO IL BASAMENTO TESTA. EVIDENTE IL BUON LIVELLO DEL SEGNALE DI RITORNO.

Particolare attenzione è stata posta nell'allineamento del vibrometro: raggio emesso e raggio riflesso (mediante uno specchio provvisorio posto sul piattello valvola) devono avere la medesima traiettoria affinché il piattello valvola sia ortogonale al raggio incidente. È opportuno notare che, trattandosi di un vibrometro a infrarossi, la radiazione emessa per la misura non è visibile all'occhio umano, quindi lo strumento è dotato di un emettitore laser (colore verde, *fig. 15*) necessario proprio nella fase di allineamento iniziale.

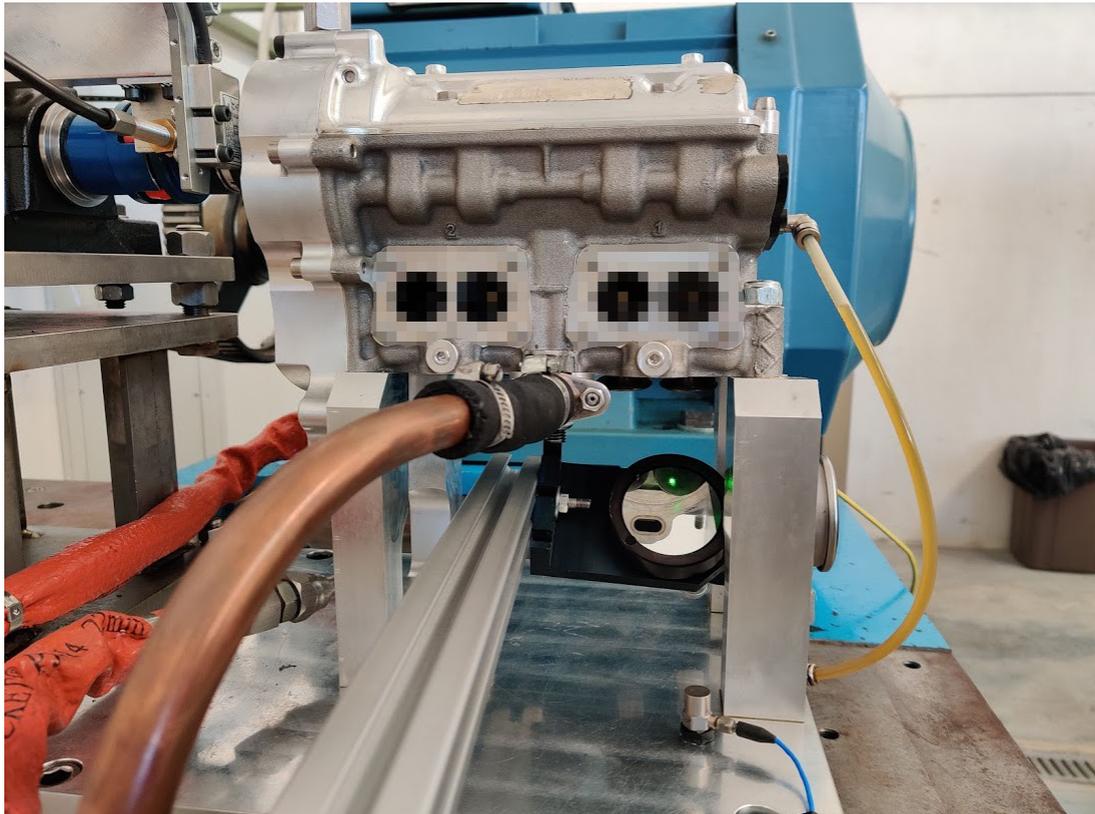


FIG. 15: APPOSITO SPECCHIO OTTICO, ANGOLATO A 45° RISPETTO AL RAGGIO EMESSO, IN MODO DA CONSENTIRE IL CORRETTO PUNTAMENTO DI UNA DELLE 4 VALVOLE DI SCARICO SU CUI SI INTENDE ESEGUIRE LA MISURAZIONE DELL'ALZATA.

I PARTICOLARI NON VISIBILI SONO STATI SECRETATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.

Una volta eseguito montaggio ed allineamento, assicurandosi che le lenti montate (RSV-A-261 + RSV-A-261, *fig. 16*) siano adeguate alla distanza cui si intende eseguire la misurazione, si dà il via al processo di messa a fuoco per ottenere un segnale di ritorno discreto, come evidente dalla *fig. 14*.

Si procede dunque all'acquisizione dati, seguita dalla relativa analisi.

i	Close-up lens or combination of close-up lenses	Working distance ¹ [m]	Available sets of close-up lenses RSV-A-			
			CLS01	CLS02	CLS03	CLS04
	RSV-A-500	5.0...2.5				x
	RSV-A-261	2.5...1.7	x		x	x
	RSV-A-166	1.7...1.25	x	x		x
	RSV-A-261 + RSV-A-261	1.35...1.05			x	
	RSV-A-261 + RSV-A-166	1.05...0.87	x			x
	RSV-A-166 + RSV-A-166	0.87...0.75		x		

FIG. 16: POSSIBILI LENTI DISPONIBILI E DIFFERENTI COMBINAZIONI DI ESSE, AL FINE DI GARANTIRE LA RACCOLTA DI DATI DA 0,75 A 5 m. NELLA NOSTRA CONFIGURAZIONE, L'OGGETTO MISURANDO DEVE ESSERE POSTO TRA 1,35 E 1,05 m.

3.2- Analisi preliminare: alzata valvola

I dati raccolti in questa prima fase saranno fondamentali per garantire di lavorare in sicurezza, in considerazione delle ristrette tolleranze e gli alti regimi cui sono sottoposti i componenti della testa Desmosedici GP.

Grazie al processo di misura, sono state acquisite posizioni e velocità di una delle due valvole di scarico del secondo cilindro nelle seguenti condizioni:

- regime costante - 1000 rpm
- regime costante - 2000 rpm
- regime costante - 3000 rpm
- regime costante - 5000 rpm
- coast down, 500 → 0 rpm
- coast down, 500 → 0 rpm + run up 0 → 500 rpm

Le misurazioni in modalità “coast down” e “run up” sono particolari prove in cui, rispettivamente, si diminuiscono e si aumentano i regimi di rotazione da un valore iniziale ad uno finale. Tali prove sono essenziali per ottenere una misurazione il più reale possibile per ogni diverso regime di rotazione.

La prima fase dell’analisi dati è stata proprio quella di verifica dell’alzata valvola. È stata misurata quindi la differenza di posizione del piattello valvola tra il punto di minimo ed il punto di massimo per ogni regime di rotazione (1000, 2000, 3000 e 5000 rpm), assicurandosi che il valore risultasse costante di x mm (*fig. 17*) in ognuna delle condizioni di misurazione precedentemente elencate.

La misura relativa alla reale alzata è dichiarata di “ x mm” per motivi di privacy, poiché ritenuta dato sensibile. Analogamente, ulteriori dati relativi allo sviluppo tecnologico di DMH sul progetto MotoGP non verranno riportati e saranno secretati dai grafici seguenti.

Nella condizione di maggior sollecitazione misurata (5000 rpm) non risultano anomalie né sulla posizione né sulla velocità della valvola: il profilo di velocità ricavato è tipico di un sistema desmodromico. Presenta, infatti, i seguenti tratti caratteristici contrassegnati in *fig.17*:

- *Condizione iniziale, punto A:*
posizione di zero e velocità iniziale nulla ($v_A = 0$ m/s), la valvola oggetto d’esame è completamente chiusa al punto morto inferiore (battuta su sede valvola).
- *Prima fase di apertura, velocità crescente - tratto AB:*
a partire dalla posizione di zero, la camma coniugata, mediante la sua oliva, impartisce al bilanciere positivo il moto di apertura. Quest’ultimo avviene con una velocità che cresce esponenzialmente fino al raggiungimento del punto B.
- *Seconda fase di apertura, velocità linearmente decrescente - tratto BC*
una volta raggiunta la posizione B, la valvola continua ad aprirsi con velocità linearmente decrescente (decelerazione costante) fino al punto C. Il punto B è quindi punto di massimo del profilo di velocità, che al regime di giri in esame (5000 rpm) raggiunge un valore pari a v_B , non esprimibile per motivi di privacy.
- *Terza ed ultima fase di apertura, velocità decrescente fino a 0 m/s - tratto CD:*
dalla posizione C, la valvola continua ad aprirsi con velocità sempre decrescente: il rapporto incrementale della curva di spostamento decresce fino ad annullarsi nel punto D (punto morto superiore), che rappresenta, infatti, il punto di massima apertura della valvola (x mm). In tale punto

la velocità è nulla per un tempo infinitesimo, quindi il profilo di velocità assume il valore di zero, definito tipico del punto A ($v_D = v_A = 0$ m/s). La camma coniugata è quindi in contatto con il bilanciante positivo nella sua posizione più acuta ed impartisce al bilanciante stesso la massima apertura possibile.

- *Prima fase di chiusura, velocità decrescente - tratto DE:*

partendo dal punto morto superiore con velocità nulla, inizia la fase di chiusura della valvola. Quest'ultima avviene con uno spostamento del tutto speculare alla fase di apertura già descritta, con un profilo di velocità piuttosto simile. A partire dal punto D la velocità, inizialmente nulla, decresce negativamente (cresce in modulo) fino al raggiungimento del punto E. Quest'ultimo rappresenta il punto di minimo del profilo di velocità, che al regime di giri di 5000 rpm assume il valore v_E che, anche in questo caso, non è riportato per motivi di riservatezza.

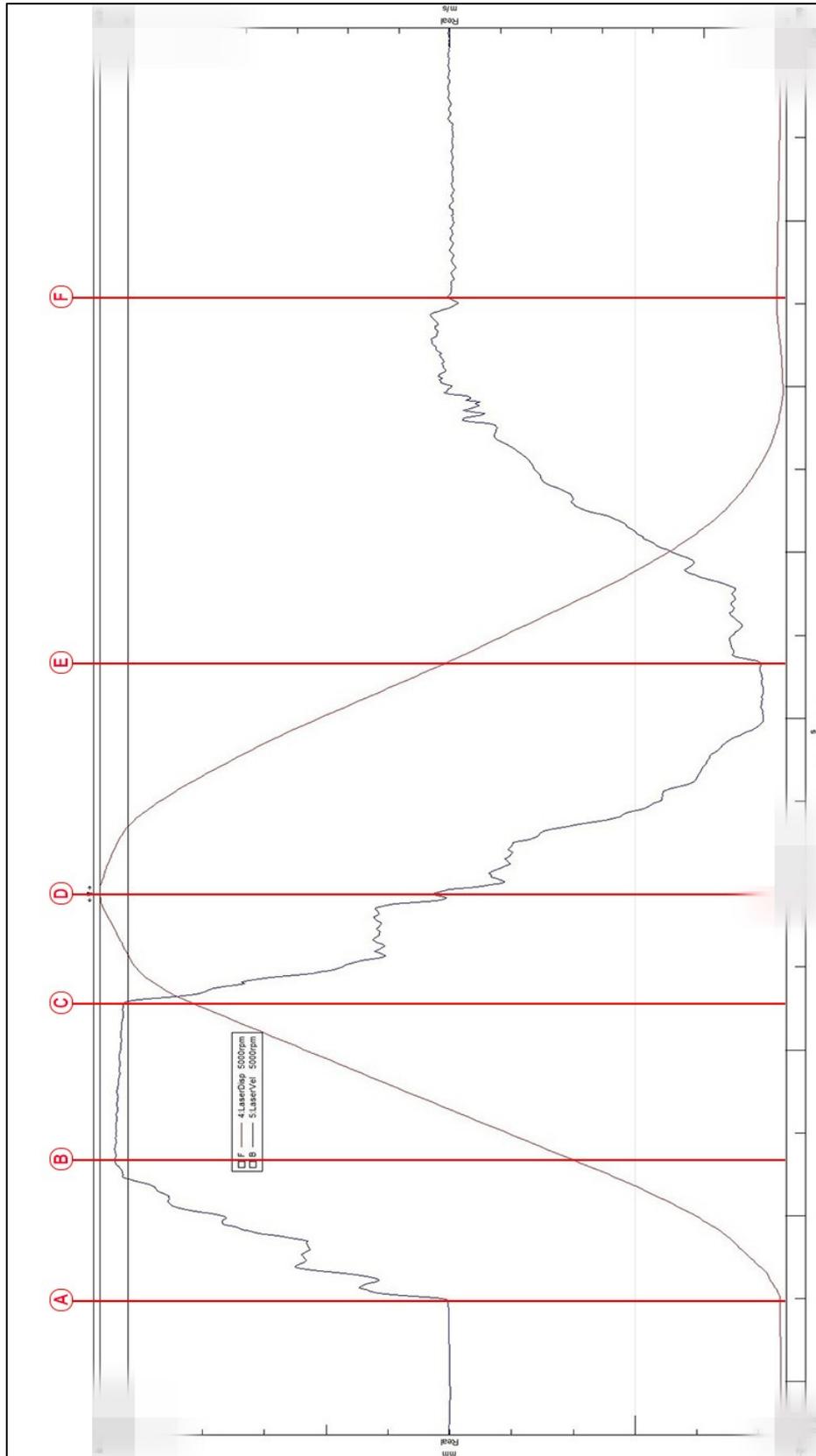
Analizzando il sistema desmodromico, la camma (che nel punto D era nella posizione più acuta) prosegue la sua rotazione, impartendo una chiusura "lineare" della valvola. È importante notare come il profilo della posizione della valvola in fase di chiusura sia del tutto speculare a quello in fase di apertura proprio a causa della simmetria della camma stessa in relazione al suo asse.

- *Ultima fase di chiusura, velocità crescente - tratto EF:*

dal punto E (massima velocità di chiusura v_E , nonché punto di minimo della velocità), inizia un aumento della velocità fino al valore di $v_F = v_A = 0$ m/s. Posizione e velocità del punto F sono quindi analoghe a quelle iniziali. L'intero cinematismo desmodromico è nella stessa posizione di A: valvola completamente chiusa a battuta su sede valvola, con velocità nulla.

FIG. 17: PLOT DI ALZATA VALVOLA E RELATIVA VELOCITÀ IN FUNZIONE DEL TEMPO, AL REGIME DI 5000 RPM, ALLINEATI SULLO STESSO RIFERIMENTO. LA CURVA CHE POSSIEDE IL TIPICO ANDAMENTO GAUSSIANO RAPPRESENTA LA POSIZIONE, L'ALTRA LA VELOCITÀ. I PUNTI RIPORTATI IN ROSSO SONO DESCRITTI IN SEGUITO.

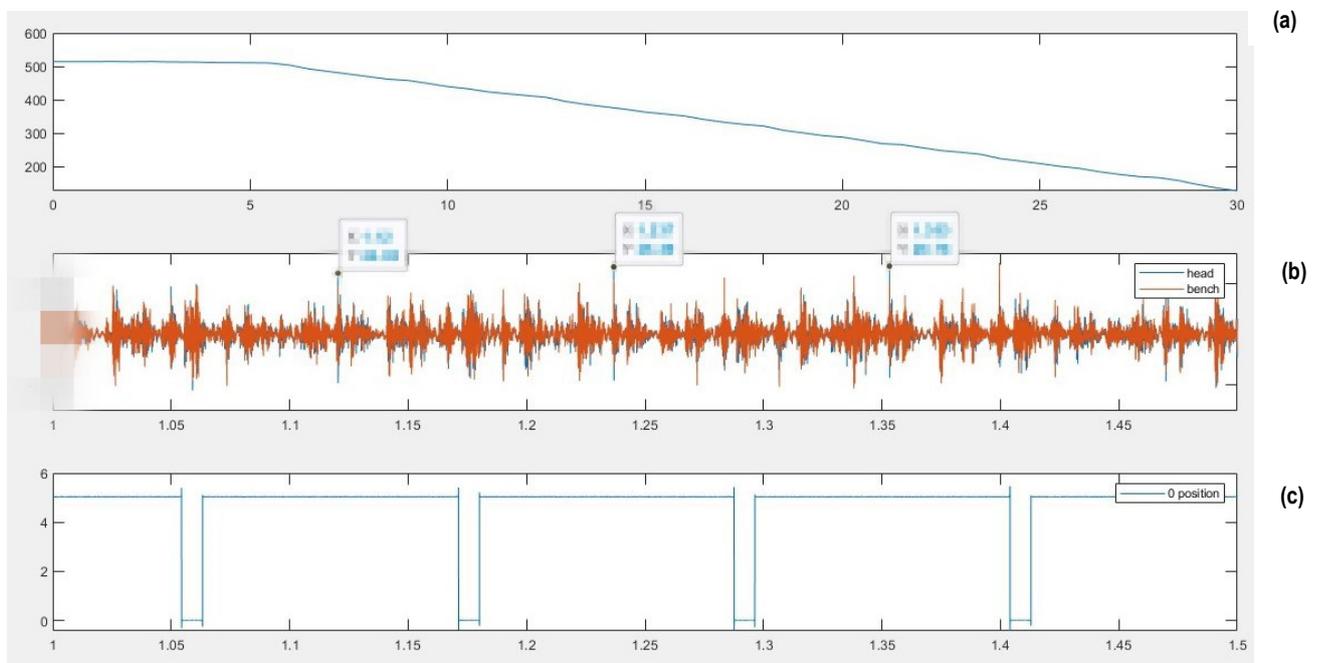
I DATI NON VISIBILI SONO STATI SEGRETTATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.



3.3- Analisi frequenze caratteristiche di testa e banco

Particolare attenzione è stata posta alla definizione della firma del sistema sperimentale “banco – testa”, al fine di fornire una reale spiegazione al numero delle armoniche acquisite. La misurazione di queste ultime è stata possibile grazie all’applicazione di due accelerometri applicati sul basamento del banco e sulla testa stessa (come evidente dalla *fig. 15*, in cui è montato un solo accelerometro sul banco).

Al regime di giri costante di 500 rpm è stata riscontrata una determinata periodicità delle accelerazioni acquisite in relazione alla tacca di zero (*fig. 18*). Per fornire una spiegazione dettagliata al comportamento periodico rilevato, occorre precisare che il sensore della tacca di zero è montato con un sincronismo tale da fornire il segnale nell’istante in cui avviene l’alzata.



**FIG. 18 (a): PLOT DEL NUMERO DI GIRI IN FUNZIONE DEL TEMPO DURANTE LA PROVA DI COAST DOWN;
 FIG. 18 (b): PLOT SEGNALE ACCELEROMETRO DI BASE (ROSSO) E DI TESTA (BLU) IN FUNZIONE DEL TEMPO DURANTE 1,5s DI ACQUISIZIONE A REGIME COSTANTE DI 500 RPM;
 FIG. 18 (c): PLOT SEGNALE TACCA DI ZERO IN FUNZIONE DEL TEMPO DURANTE 1,5 s DI ACQUISIZIONE A REGIME COSTANTE DI 500 RPM;**

I DATI NON VISIBILI SONO STATI SECRETATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.

La natura del comportamento periodico riscontrato risulta pertanto essere insita nel cinematismo desmodromico. Al regime di rotazione di 500 rpm si ripetono consecutivamente 8.33 alzate della valvola nell’unità di tempo di un secondo:

$$f = 8,33 \text{ Hz}$$

Di conseguenza, è facilmente ricavabile il periodo T (intervallo temporale che intercorre tra un'alzata valvola e la seguente) come:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8,33} = 0.12 \text{ s}$$

È così spiegata l'evidenza dei picchi rilevati dagli accelerometri esattamente a metà del periodo, ad una distanza temporale di 0,06 s da ogni alzata della valvola di scarico oggetto d'esame (in fig. 19 "EXHAUST 2").

Le frequenze periodiche rilevate sono proprio in corrispondenza dell'apertura delle altre due valvole presenti sulla testa. Infatti, il cinematismo desmodromico prevede che il moto valvole avvenga secondo il seguente ordine (in relazione alla fig. 19):

INTAKE 1 - EXHAUST 2 → INTAKE 2 - EXHAUST 1

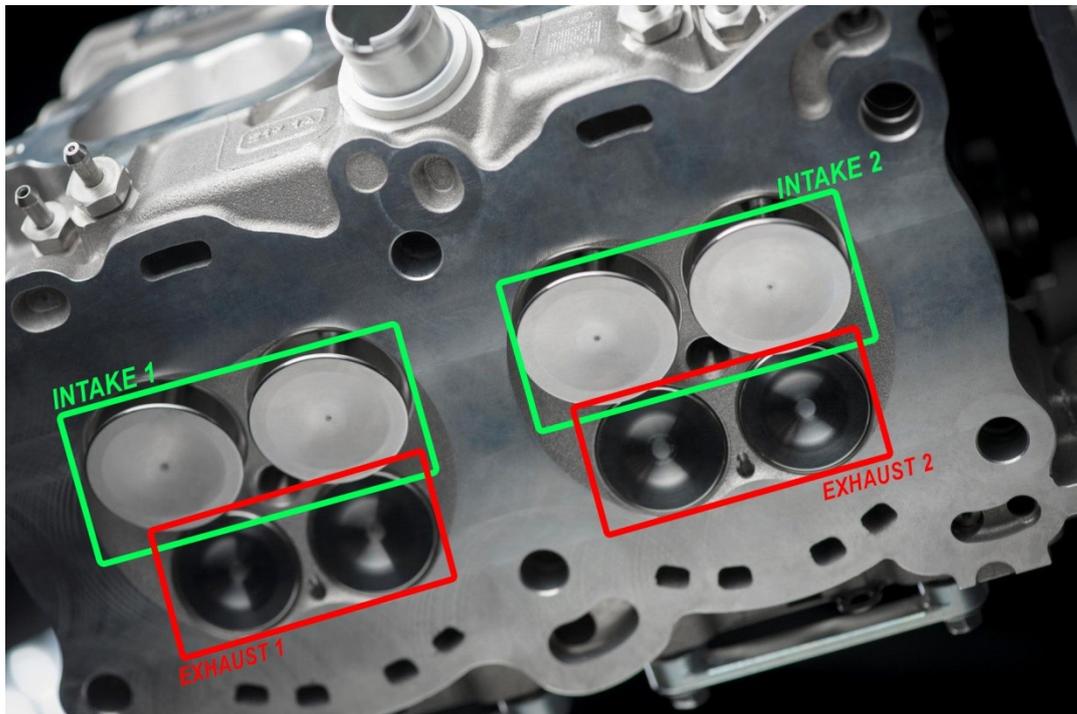


FIG. 19: SCHEMA REALE NOMENCLATURA VALVOLE DI ASPIRAZIONE E SCARICO AL FINE DI DEFINIRE CINEMATISMO DESMODROMICO DEL MOTO VALVOLE.

LA TESTA MOSTRATA IN FIGURA NON È LA DESMOSEDICI GP14 OGGETTO D'ESAME PER MOTIVI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH, BENSÌ UNA TESTATA STOCK EQUIPAGGIATA SU DUCATI PANIGALE V4R.

(FONTE IMMAGINE: ducati.it)

Esattamente a metà tra un'alzata e la successiva avvengono l'alzata della valvola di aspirazione del cilindro 2 (su cui effettuiamo la misurazione) e della valvola di scarico del cilindro 1; ciò dimostra la periodicità del segnale rilevato da entrambi gli accelerometri. Infine, ponendo attenzione ad uno dei picchi acquisiti (fig. 20), risulta esplicito che il segnale acquisito dall'accelerometro di testa ha un valore superiore a quello dell'accelerometro nel basamento, a dimostrazione che l'origine della sollecitazione avviene proprio in testa e non è causata da altri componenti non dipendenti dal banco stesso (motore elettrico, cinghia di trasmissione o altro).

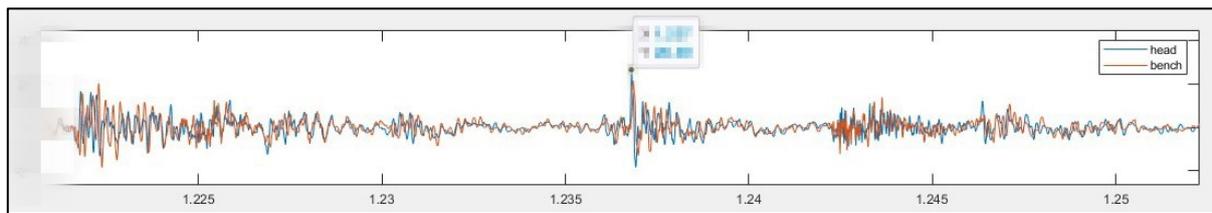


FIG. 20: INGRANDIMENTO DEL GRAFICO MOSTRATO IN FIG. 18 (b), RAPPRESENTANTE LE DIFFERENZE DI SEGNALE AL PICCO TRA ACCELEROMETRO DI TESTA (ROSSO) E DI BASE (BLU). IL SEGNALE ACQUISITO DALL'ACCELEROMETRO IN TESTA RISULTA ESSERE SUPERIORE.

I DATI NON VISIBILI SONO STATI SECRETATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.

3.4- Analisi frequenze di risonanza rilevate in testa

L'ultima analisi utile ai fini della caratterizzazione del sistema sperimentale "banco – testa" è proprio l'analisi delle frequenze cui la testa vibra, considerata *di risonanza* per l'intero sistema.

La risonanza è un fenomeno fisico che si verifica quando un sistema oscillante forzato è sottoposto a sollecitazione periodica di frequenza pari all'oscillazione propria del sistema stesso, con effetto di progressiva amplificazione dell'oscillazione. Di conseguenza, quando la velocità di rotazione è tale da generare delle vibrazioni analoghe a quelle caratteristiche dell'intero sistema banco – testa, quest'ultimo va in risonanza. L'analisi è stata svolta durante la prova di Coast Down (fig. 21) in modo da avere una significativa variazione di giri e, quindi, di frequenze caratteristiche.

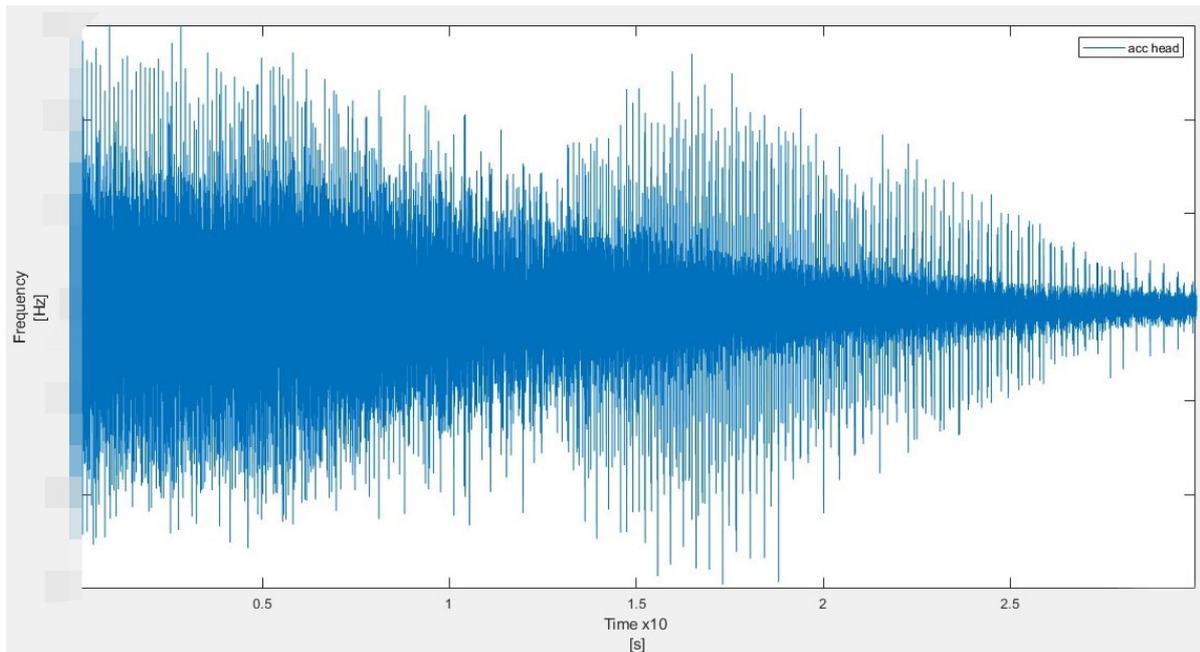


FIG. 21: PLOT DEL SEGNALE ACQUISITO DALL'ACCELEROMETRO IN TESTA IN FUNZIONE DEL TEMPO DURANTE LA PROVA DI COAST DOWN, RIDUCENDO LINEARMENTE LA VELOCITÀ.

I DATI NON VISIBILI SONO STATI SECRETATI PER QUESTIONI DI RISERVATEZZA NEI CONFRONTI DI DMH.

Mediante il software MatLab è stato sviluppato il programma che permette la realizzazione dello spettrogramma (fig. 22) mediante la seguente funzione:

```
s = spectrogram(acc_head,hanning(nsc),nov,nff);
```

dove:

- `acc_head` rappresenta il segnale acquisito dall'accelerometro in testa, indipendentemente da quello posto nel basamento (`acc_bench`);
- `nsc` è definito come arrotondamento all'intero inferiore (`floor`) dell'1% della lunghezza del segnale dell'accelerometro di testa:

```
nsc = floor(Nx/100);    Nx = length(acc_head);
```

- `nov` è definito come arrotondamento all'intero inferiore (`floor`) del 25% di `nsc`:

```
nov = floor(nsc/4);
```

- `nff` fornisce il massimo elemento dell'argomento seguente:

```
nff = max(512,2^nextpow2(nsc)).
```

È quindi realizzato lo spettrogramma mediante la funzione:

```
figure, pcolor(abs(s')), shading interp;
```

ottenendo il grafico mostrato in *fig. 22*, che consente un'analisi qualitativa dello studio in corso.

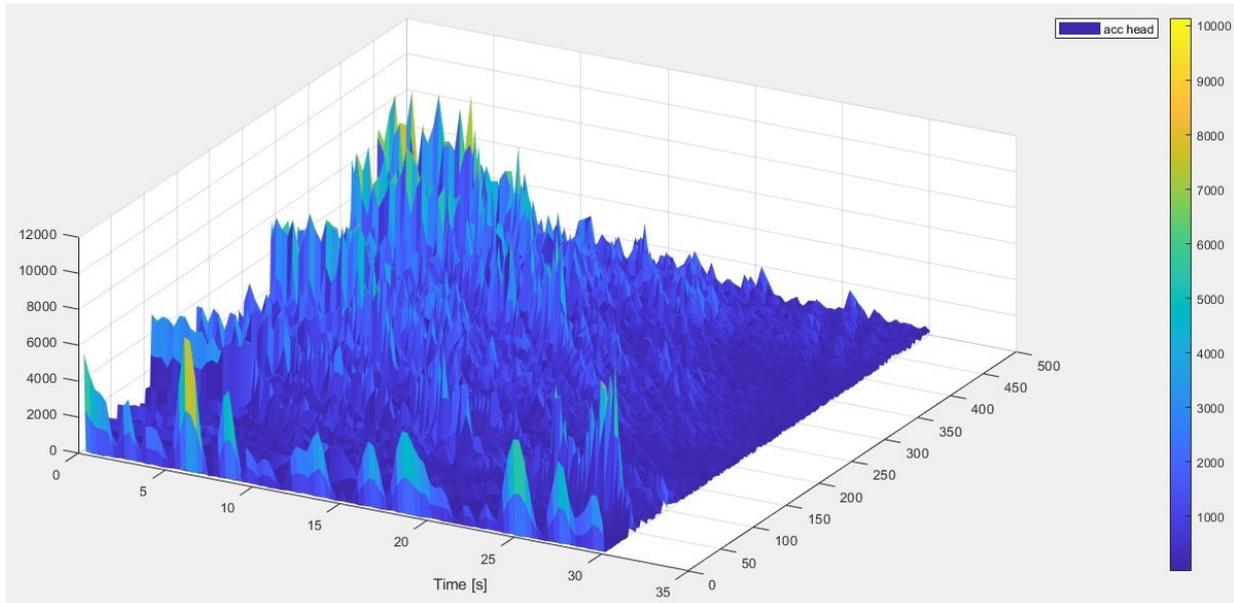


FIG. 22: WATERFALL DEL SEGNALE ACQUISITO DALL'ACCELEROMETRO IN TESTA IN FUNZIONE DEL TEMPO E DEL NUMERO DI GIRI [rpm].

Per avere una migliore idea delle frequenze caratteristiche raggiunte dal sistema durante la prova di Coast Down a regime di giri variabile da 500 → 0 rpm, risulta fondamentale l'analisi in due dimensioni (*fig.23*).

Entrambe le rappresentazioni (*fig. 23 a*, *fig. 23 b*) sono state effettuate con i medesimi dati, plottati ed editati da due software differenti. I grafici riportati si considerano quindi equivalenti ai fini dell'analisi svolta: entrambi presentano dei "pettini", che raffigurano i punti in cui la velocità di rotazione del sistema produce delle vibrazioni, le quali mandano in risonanza il sistema stesso. In entrambe le rappresentazioni è possibile notare dei fasci verticali più chiari, che rappresentano le aree in cui il sistema è in condizione di risonanza. Il rate con cui durante la prova di Coast Down è diminuita la velocità nel tempo risulta piuttosto costante; come diretta conseguenza la curva di diminuzione è quindi lineare.

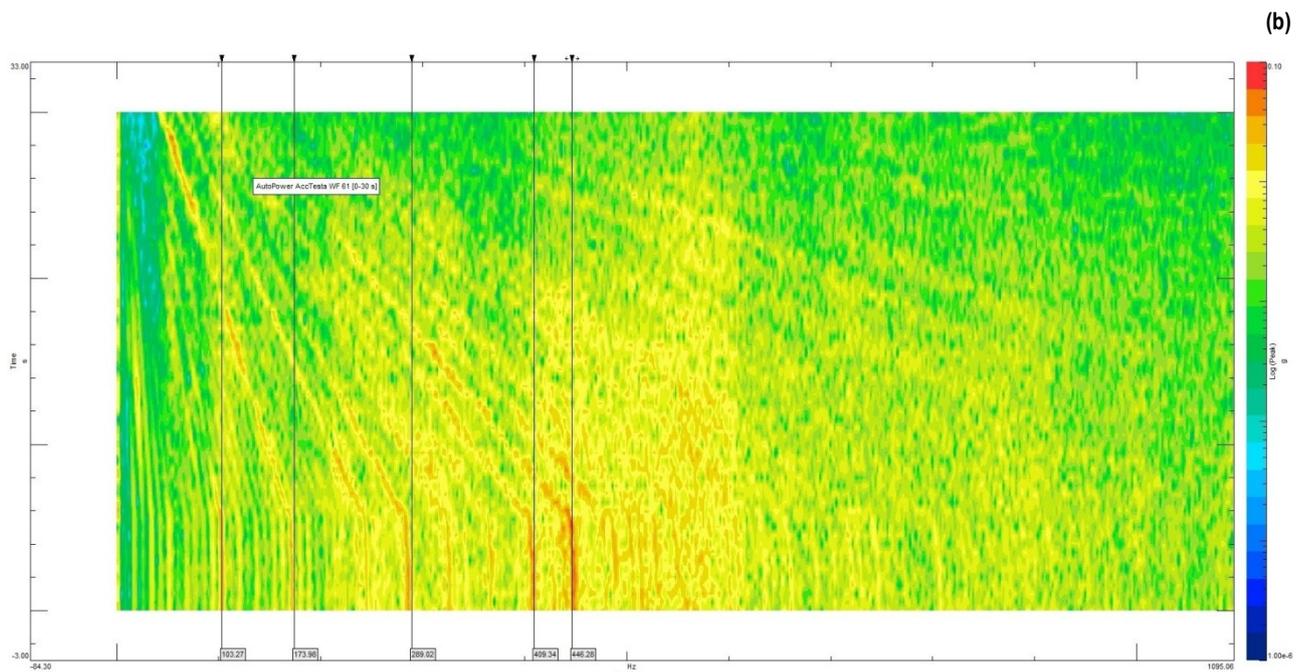
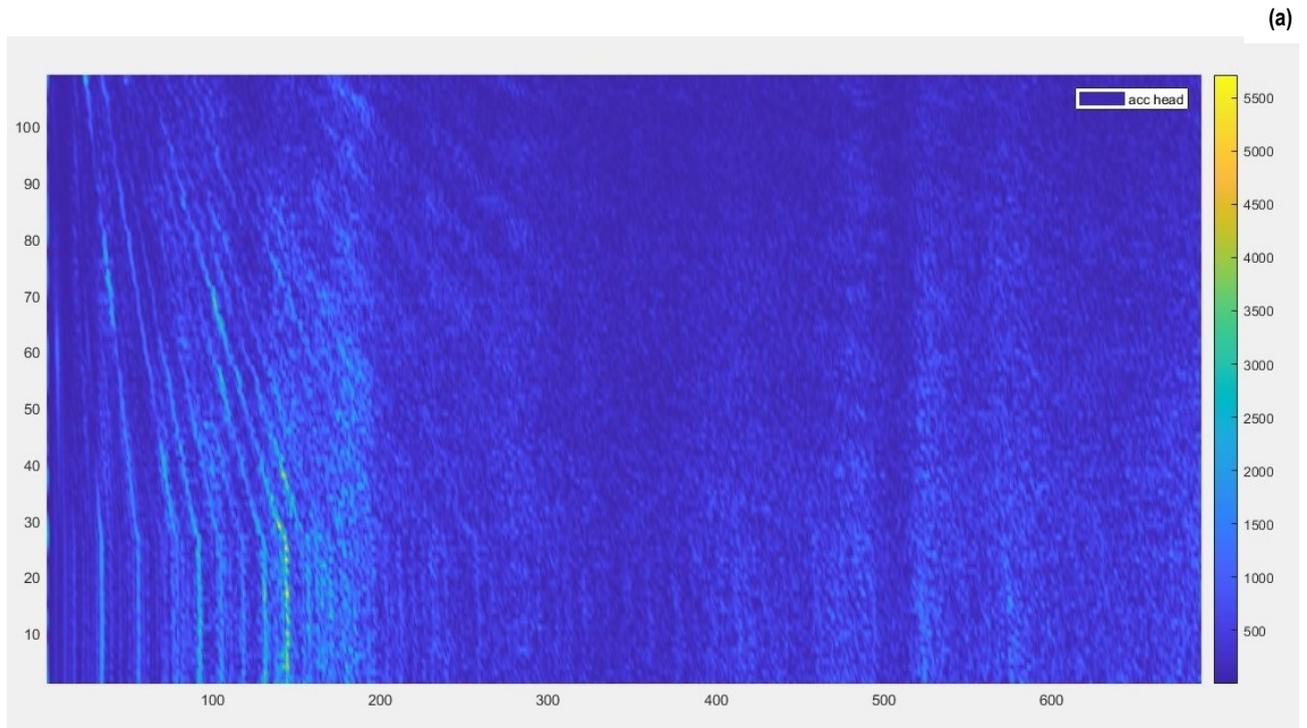


FIG. 23: WATERFALL DEL SEGNALE ACQUISITO DALL'ACCELEROMETRO IN TESTA, RAPPRESENTAZIONE IN DUE DIMENSIONI. STESSI DATI, EDITATI E RAPPRESENTATI CON DUE DIFFERENTI SOFTWARE: MATLAB (a) E SIMENS LMS (b).

4- CONCLUSIONE

La campagna di prove relativa alle misurazioni del moto della valvola di scarico, compiute grazie all'impiego di un vibrometro differenziale laser doppler, in condizioni di testata trascinata da motore elettrico e lubrificata da impianto oleodinamico, che simula l'effettiva lubrificazione come se fossimo in regime di ordinario funzionamento (*firing*), ha fornito risultati molto soddisfacenti. Il vibrometro "Polytec RSV-150" ha consentito di disporre di risultati accurati per lo studio del moto valvola e della relativa velocità. L'analisi preliminare svolta (*vedi capitoli 3.1 e 3.2*) è stata di fondamentale importanza per ricavare i profili di velocità e posizione di un cinematismo Desmodromico di una Ducati Desmosedici GP, che fino al massimo valore di giri acquisito ed analizzato (5000rpm) non presenta scostamenti dall'idealità. Ogni acquisizione eseguita nelle diverse condizioni di regime di giri costante (*esposte in dettaglio nel paragrafo 3.1*) ha mostrato gli stessi andamenti di alzata valvola, ma velocità ed accelerazione ovviamente proporzionali tra i differenti regimi di acquisizione.

L'impiego dei due accelerometri applicati in testa e sul basamento ha consentito l'analisi delle periodiche e caratteristiche sollecitazioni meccaniche cui è sottoposta la testa durante l'ordinario funzionamento (*analizzate nel paragrafo 3.3*), nonché delle frequenze di risonanza tipiche del sistema sperimentale banco – testa (*analizzate nel paragrafo 3.4*).

Dai test eseguiti negli anni passati, è già stato verificato che il vibrometro in-plane applicato sullo stelo valvola fornisce i medesimi risultati del vibrometro differenziale Laser Doppler utilizzato nella corrente analisi. Lo sviluppo del progetto in esame prevede quindi la sostituzione del vibrometro differenziale laser-doppler "Polytec RSV-150" con un vibrometro in-plane, il quale renderà possibile sostenere delle misurazioni in condizioni di firing direttamente sullo stelo valvola, mediante un'opportuna testata realizzata appositamente da DMH, dotata in particolare di un foro (ovviamente chiuso con copertura trasparente e non in comunicazione con l'esterno) dal quale eseguire la misurazione. Grazie a tale progetto sarà possibile valutare il reale effetto che l'accensione (volgarmente "*scoppio*") provoca nel moto della valvola di scarico, riducendone la vita utile, ricavando tuttavia dati importanti riguardanti l'affidabilità dei motori Desmosedici GP.

I dati di ricerca e sviluppo ottenuti, di conseguenza, saranno di fondamentale importanza anche per le motorizzazioni dei modelli di serie, nonostante la produzione di questi ultimi da parte di DMH a partire dal 2021 si sposterà su sistemi di distribuzione tradizionali (a molla) per via degli elevati costi di produzione e manutenzione della distribuzione Desmodromica, nonché della relativa maggiore manutenzione. Da tale campagna di cambiamento, rimarranno esclusi per ora i modelli supersportivi denominati "*Panigale*", in cui la ricerca delle prestazioni è di fondamentale importanza a causa dell'applicazione nel campionato mondiale

Superbike, nel quale fin dai suoi albori Ducati continua ad investire ed essere tra i reali protagonisti.

Il banco prova, parzialmente fornito da DMH ed in parte progettato all'interno del DIISM (*Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche*) durante lo svolgimento dei precedenti test, ha mostrato alcune limitazioni e problematiche. Sviluppandolo, può essere previsto un sistema di controllo remoto in real-time delle pressioni e del livello dell'olio motore nel coperchio di distribuzione. In tal modo sarebbe possibile ottimizzare il setup del banco prova stesso rendendolo più efficiente e sicuro. Di conseguenza, si eviterebbe di avvicinarsi al banco in funzionamento per il controllo dei livelli e delle pressioni dell'olio motore, nonché per la regolazione di tali parametri. Il banco prova, in condizione di normale funzionamento, rappresenta un alto tasso di rischio per gli operatori a causa di organi rotanti, temperature molto elevate con conseguenti rischi di ustioni, alte velocità di rotazione e, di conseguenza, elevato stress meccanico dei componenti.

Da ultimo, essendo possibile una lettura real-time di tali valori, sarebbe anche possibile stabilire con l'ausilio del computer il valore di giri (*rpm*) del motore elettrico e, quindi, dell'albero a camme, evitando la presenza di un operatore che li imposti direttamente dal telecomando, riducendo dunque la possibilità d'infortuni.

Riconoscimenti, gratificazione e conoscenze acquisite

La gratificazione nell'aver lavorato ad un progetto di così elevata importanza e prestigio per DMH, Ducati Corse, UNIVPM (*Università Politecnica delle Marche*) e DIISM è senza eguali. Tirocinio e tesi sono stati di fondamentale importanza per realizzare e comprendere dal punto di vista pratico molti aspetti ingegneristici fino ad oggi affrontati solo teoricamente durante le lezioni ed il percorso di studi. Quest'ultimo è stato estremamente formativo e complesso, anche se ancora carente di molti, forse troppi aspetti pratici di cui la meccanica, più di ogni altra disciplina, necessita. A tal proposito, unito al mio progetto di vita ed al mio trascorso sportivo come pilota a livelli nazionali e internazionali, ho ritenuto di fondamentale importanza concludere il mio percorso di laurea triennale con una tesi sperimentale su questo studio specifico.

Il progetto di ricerca e sviluppo cui ho preso parte e contribuito mediante la realizzazione della suddetta tesi è stato possibile grazie alla disponibilità ed umanità del *prof. Paolo Castellini*, a cui sono infinitamente grato, e dell'intero reparto di misure dell'*Università Politecnica delle Marche*. Un doveroso ringraziamento va anche a *Ducati Corse* e *Ducati Motor Holding* per avermi fornito la possibilità, assieme al mio relatore, di lavorare ad un ambizioso progetto così carico di interesse formativo.

5- BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1]:

Carlini A., Rivola A., Dalpiaz A., Maggiore A., *Valve motion measurements on motorbike cylinder heads using high speed laser vibrometer*

[2]:

Elen s.r.l., *Sensori di velocità ad effetto hall*, scheda tecnica

http://elensrl.com/img/cms/sensori%20velocit%C3%A0/sensori_velocita_effetto_hall.pdf

[3]:

Kübler, *Linear measuring technology*, scheda tecnica

<https://www.kuebler.com/en/products/measurement/bearingless-encoders>

[4]:

Polytec, *RSV-150 Remote Sensing Laser Doppler Vibrometer*, scheda tecnica

<https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry/>

[5]:

Tessieri A., *Come nasce la Ducati Desmosedici da MotoGP*

<https://www.cuoredesmo.com/come-nasce-la-ducati-desmosedici-da-motogp/>

[6]:

Wikipedia, *Ducati Desmosedici*

https://it.wikipedia.org/wiki/Ducati_Desmosedici

[7]:

Wikipedia, *Distribuzione desmodromica*

https://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione_desmodromica