



Università degli Studi di Perugia
Dipartimento di Ingegneria



Galleria del Vento "Raffaele Balli"

RITORNO AL PASSATO

Ottanta anni di evoluzione dell'aerodinamica del motociclo

A cura di **Riccardo Bernabei**

con il coordinamento Scientifico di Francesco Castellani



Gruppo di lavoro:

Nicola Bartolini, Matteo Becchetti, Roberto Pignattini, Lorenzo Scappaticci



Studio realizzato in collaborazione con il
Club Auto e Moto d'Epoca Perugino

Indice

Premessa	3
La campagna di prove	5
Performance aerodinamiche delle motociclette storiche	12
1921: Terrot Model E	13
1931: Triumph NSD 550 cc	14
1971: BSA Gold Star 500 ss	15
1973: MV Agusta 350	16
1975: BMW R90 S	17
1976: BMW R90/6	18
1976: Benelli 750 Sei	19
1986: Honda RS 500 RF	20
1986: Yamaha RD 350 R	21
1986: Honda VFR 750 R	22
1991: Ducati 851 SP3	23
1991: BMW K100 RS	24
1992: Librenti 500	25
2001: Honda CBR 600 F	26
2002: Ducati 998 S	27
2002: Honda VFR 800 Vtec	28
2006: Aprilia RSV 1000 R Factory	29
2007: Ducati Desmosedici RR	30
Evoluzione storica del coefficiente di Drag	31

Premessa

Ritorno al passato: guardare con gli occhi di oggi le scelte tecniche e le intuizioni degli ingegneri di ieri. E' questa, insieme alla grande passione per la scienza e la tecnica del motociclo, l'ispirazione che ha portato alla nascita di questa iniziativa. Lo sviluppo aerodinamico di un motociclo è una attività tanto interessante quanto difficile da decifrare; spesso la scelta delle geometrie deriva da diversi tipi di esigenze alcune delle quali esulano completamente dall'aspetto fluidodinamico. Per questo motivo usualmente le prestazioni aerodinamiche di un motociclo sono tenute riservate dai costruttori; specialmente quando alcune scelte di forma riescono miracolosamente a rispondere non solo alle esigenze prestazionali ma si rivelano vincenti anche dal punto di vista estetico e/o funzionale. Il presente studio nasce invece dall'esigenza di diffondere la cultura della tecnica della motocicletta rendendo dunque pubblici dati e argomentazioni tecniche inediti. Questa attività è stata trainata dall'immensa passione di studenti, appassionati ed esperti del settore che hanno reso possibile ed hanno dato forma ad uno studio unico in cui sono stati analizzati e provati 18 esemplari prodotti dal 1921 al 2007. Introducendo dunque questo documento in cui è riportata la sintesi dei risultati della campagna di prove desidero ringraziare chi ha reso possibile questo prezioso studio:

- **Riccardo Bernabei** per essersi dedicato con passione unica al lavoro che ha portato non solo all'elaborazione della sua tesi di laurea in Ingegneria Meccanica ma anche alla redazione del presente documento e all'organizzazione dell'evento
- **Lorenzo Scappaticci** per avere eseguito personalmente tutte le 129 prove prestandosi come pilota ed arricchendo lo studio con la sua esperienza e le sue importanti impressioni di motociclista e uomo di scienza.
- Tutto lo staff attuale della Galleria a partire dal Responsabile Tecnico **Roberto Pignattini** fino ad arrivare ai Dottorandi **Nicola Bartolini** e **Matteo Becchetti** che ogni giorno si dedicano con passione e professionalità alle svariate attività di ricerca e sviluppo.
- Il Club Auto e Moto d'Epoca Perugino nella persona del Presidente **Ugo Amodeo** ma senza dimenticare il preziosissimo contributo di **Claudio Trippetti** e **Dario Margaritelli**.
- **Paolo Papa** della motofficina Fratelli Papa per aver supportato l'iniziativa fornendo gli splendidi esemplari che si sono cimentati nel motomondiale.
- I proprietari delle altre motociclette provate fra cui ricordiamo la **T&T Racing**, **Gabriele Gamboni**, **Adriano Magherini**, **Claudio Poggiani** e **Lucio Postrioti**.



Un ringraziamento particolare va a **Raffaele Balli** che nel 1992 è riuscito a far nascere la Galleria del Vento e l'ha fatta crescere fino alla sua scomparsa. Dal 6 luglio 2011 la struttura è dedicata al suo fondatore ed ancora oggi la sua passione e le sue idee costituiscono i più alti e innovativi valori del laboratorio.

Perugia 27 Maggio 2016

Francesco Castellani

La campagna di prove

Un veicolo che si muove nell'aria indisturbata causa una perturbazione che è osservabile esclusivamente in uno strato sottile in prossimità del veicolo stesso; tale zona è chiamata strato limite. L'integrazione degli infinitesimi sforzi viscosi e delle infinitesime forze di pressione secondo il flusso libero, porta a una forza, chiamata Drag D , che si oppone all'avanzamento del corpo. È possibile definire il coefficiente di Drag C_D con il rapporto:

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} v_{\infty}^2 A} \quad (1)$$

dove ρ rappresenta la densità del fluido, v_{∞} indica la velocità del flusso indisturbato ed A rappresenta la sezione frontale del corpo esposto. La forza generata dalla pressione dinamica di un flusso libero è $\frac{\rho}{2} v_{\infty}^2$ e agisce sulla sezione frontale. Più è basso il coefficiente di Drag e migliore è la forma. In un motociclo, il C_D , dipende da molti fattori che appartengono a tre principali categorie della forza aerodinamica resistente, ovvero Body Drag, Internal Drag ed il Drag dei dettagli come mostrato in figura 1 [1]. Quando si studia l'aerodinamica del motociclo

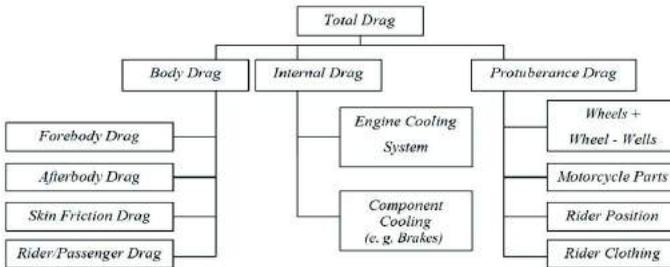


Figura 1: Fattori che influenzano il coefficiente di drag di un motociclo

si sceglie di non prescindere dall'area frontale poiché il pilota rappresenta l'elemento attivo nell'aerodinamica del sistema: perciò si usa il coefficiente $C_D \cdot A$. Nella fase avanzata della progettazione di ogni nuovo veicolo, si realizza uno studio in galleria del vento perché la trattazione analitica esatta del modello globale non è praticabile a causa della complessità della superficie del sistema motocicletta-pilota e delle equazioni analitiche per i flussi fluidi. Gli unici strumenti utilizzabili dal progettista sono l'analisi numerica agli elementi finiti e le prove sperimentali in galleria del vento. In questo lavoro, l'attenzione è posta sulle rilevazioni sperimentali, effettuate presso la Galleria del Vento "Raffaele Balli" del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia; l'impianto è in configurazione a circuito chiuso con una sezione di test aperta, mostrata in figura 2.

L'aria entra nella sezione di test attraverso un ugello di 2200 mm x 2200 mm, mentre la lunghezza totale dell'area di test è di 4.25 m; a valle della sezione

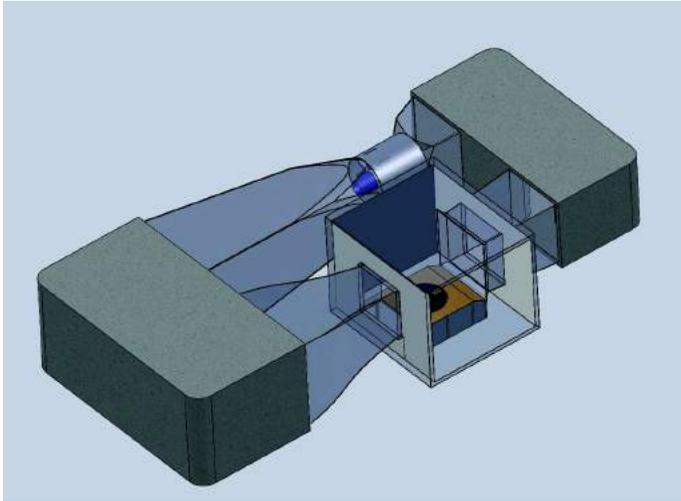


Figura 2: Galleria del vento dell'Università di Perugia.

di test segue un diffusore. Il diffusore permette di frenare il flusso prima che raggiunga le due curve che lo portano al motore.

La galleria è formata da 4 curve con un angolo di 90 gradi, necessarie per indirizzare il flusso dal motore alla sezione di test e viceversa; in ogni curva sono presenti dei deviatori che facilitano il flusso nel compiere la curva. La massima velocità raggiunta dal flusso è di 160 Km/h, grazie all'utilizzo di un rotore di 11 pale ognuna con guscio in fibra di carbonio: il rotore è mosso da un motore elettrico di 375 kW. Per attenuare le componenti turbolente e il valore medio della componente trasversale del flusso, è installata una fitta struttura a nido d'ape prima del tratto convergente a monte della sezione di test. La pressione statica e dinamica nella sezione di test sono misurate attraverso due tubi di Pitot posti in prossimità della sezione minima del tratto convergente, a monte della sezione di test, come mostrato in figura 3.

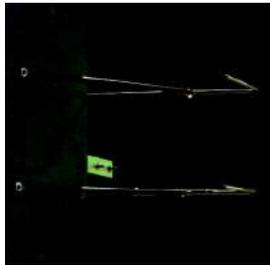


Figura 3: Tubi di Pitot utilizzati per misurare la velocità del flusso.

La misura dei carichi aerodinamici è realizzata attraverso una bilancia che, utilizzando celle di carico, permette di valutare forze e momenti nelle tre direzioni principali del sistema di riferimento. Le celle di carico sono montate sotto il telaio che regge il veicolo, composto di una struttura di base, un piatto superiore e un triangolo flottante come mostrato in figura 4. Il veicolo, posto sul piatto

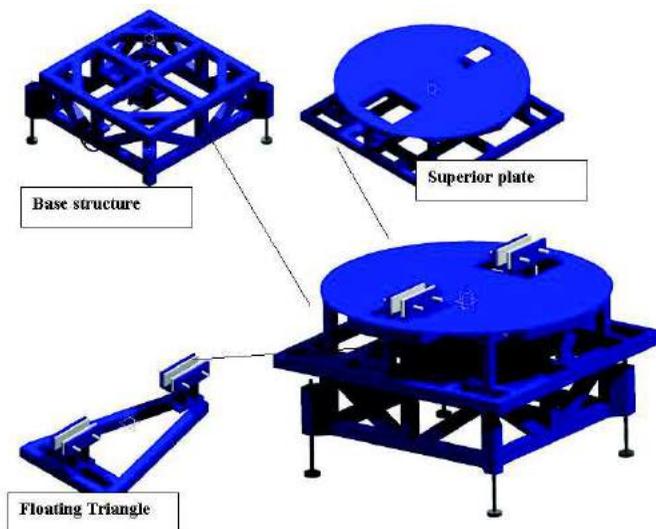


Figura 4: Struttura della bilancia da galleria del vento.

superiore, è perfettamente ortogonale al piano e allineato con la direzione del flusso. Ogni ruota del veicolo giace su supporti differenti connessi al triangolo flottante, che emergono da due fori posti sul piatto. Il triangolo flottante, mostrato in dettaglio in figura 5, permette il trasferimento delle forze e momenti alle celle di carico montate sulla struttura che supporta il piatto.

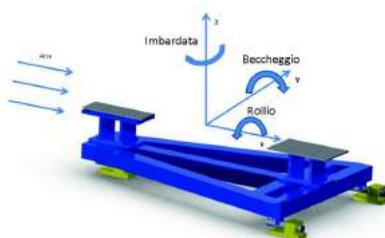


Figura 5: Moti del triangolo flottante.

Nella figura 5, con il colore giallo, vengono rappresentate le tre celle di carico bidimensionali che, con i loro alberi, supportano il triangolo flottante in corrispondenza dei vertici: esse rappresentano l'elemento sensibile della bilancia. Il sistema di acquisizione dati è costituito da un PC che monitora in continuo le misure fatte durante i test. Grazie al programma che gestisce l'acquisizione di dati è possibile eseguire il salvataggio ed impostare le condizioni della prova (la frequenza di campionamento, il numero di campionamenti, la durata della prova, ecc...) monitorando in tempo reale i parametri acquisiti. La presentazione dei dati raccolti è affidata a fogli di calcolo sui quali sono riportati un riepilogo delle varie prove, i valori medi per ogni prova e i valori istantanei acquisiti per l'intera durata di ogni singola prova. Il software presenta simultaneamente a video i parametri aerodinamici calcolati istantaneamente, la velocità istantanea dell'aria e la densità del flusso: in questo modo si può valutare, la qualità di un determinato profilo, l'efficacia delle modifiche apportate al modello di partenza e la stabilità-ripetibilità della prova.

Le condizioni di ogni prova sono state stabilite in base alla tipologia della motocicletta e le prove sono state realizzate sempre con lo stesso pilota. In tabella 1 è presente un quadro riassuntivo della campagna prove:

	Velocità	Posizione del pilota
Motociclette da competizione	90 e 160 Km/h	In carena
Motociclette stradali	90 e 160 Km/h	Eretto e in carena
Motociclette senza carena	90 e 160 Km/h	Eretto e abbassato
Motociclette della prima metà del '900	Massima del veicolo	Eretto con tuta aderente e con abiti d'epoca

Tabella 1: Riassunto della campagna prove.

La durata complessiva di ogni prova è stata fissata a 100 secondi; i dati sono stati acquisiti con una frequenza di 1 KHz e mediati su un secondo.

La strumentazione della galleria del vento dà come risultato immediato il valore del $C_D \cdot A$; volendo conoscere il valore del solo coefficiente di Drag C_D , è necessario effettuare una stima dell'area della sezione frontale del veicolo. Tenendo conto delle nozioni presenti in bibliografia, si è deciso di misurare la sezione frontale delle motociclette attraverso immagini digitali ad alta definizione.

La procedura di misura consta di due fasi principali dipendenti tra loro:

- acquisizione dell'immagine;
- elaborazione delle immagini acquisite e misura della sezione frontale.

Il layout di misura utilizzato nella fase di acquisizione dell'immagine, può essere schematizzato in figura 6:



Figura 6: Acquisizione dell'immagine frontale della motocicletta: è fondamentale la presenza di un'area di riferimento per il calcolo del fattore di scala dell'immagine.

Ai fini della misura è importante avere un'area di riferimento, per il calcolo del fattore di scala, nell'immagine della vista frontale della motocicletta.

L'area di riferimento è costituita da una lastra in materiale metallico posta alla stessa altezza del misurando attraverso un'asta regolabile.

Il posizionamento del riferimento è una fase fondamentale del processo di misura poiché influisce direttamente sull'errore commesso. Per questo motivo l'area di riferimento deve essere posta sullo stesso piano della sezione frontale della moto: l'obiettivo è di eliminare gli errori di scala e parallasse dovuti alla differente posizione tra misurando e riferimento.

La fotocamera digitale, utilizzata per la misura, è una Reflex NIKON ad alta definizione. Per aumentare la ripetibilità della misura, si è utilizzato un cavalletto fotografico con appoggi regolabili e dotato di bolla per il livellamento, collocato all'interno del condotto convergente che porta l'aria alla zona di test. L'obiettivo della macchina si pone al centro della sezione frontale della motocicletta, arbitrariamente considerato coincidente con il centro dei dispositivi d'illuminazione della moto, regolando il cavalletto in altezza e angolo.

L'elaborazione delle immagini comincia dall'eliminazione dello sfondo: questo passaggio è indispensabile poiché esclude, all'interno di ogni singola fotografia, una regione potenzialmente fonte di errore. Lo sfondo, contenendo delle parti indistinguibili con gli stessi livelli di colore del misurando, può indurre il software di calcolo alla sovrastima. Il calcolo dell'area della sezione frontale è effettuato da un software implementato in linguaggio MATLAB.

Il risultato del processo di misura è un'immagine del misurando su cui è riportato il valore dell'area misurata. Le fasi salienti del processo di elaborazione delle immagini e calcolo dell'area della sezione frontale sono riportati in figura 7.



Figura 7: Fasi principali dell'elaborazione delle immagini.

Performance aerodinamiche delle motociclette storiche

Per tracciare un profilo esaustivo dello sviluppo storico dell'aerodinamica delle motociclette è necessario fare una scelta oculata delle tipologie e dei modelli di motocicletta che vogliono essere analizzati in galleria del vento. Se si dà troppo peso a una particolare categoria di motocicletta oppure ci si focalizza solo su un determinato periodo storico è più difficile cogliere le forze trainanti dello sviluppo aerodinamico.

In questo lavoro si sono analizzati 18 veicoli costruiti in un intervallo temporale di 90 anni per un totale di 129 test effettuati in galleria del vento.

I modelli sono presentati seguendo l'ordine cronologico di costruzione. I dati riportati, per ogni modello, sono relativi alla posizione normale di guida assunta dal pilota.

1921:Terrot Model E

La motocicletta, rappresentata in figura 8 è stata costruita nel 1921.



Figura 8: Terrot Model E, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota seduto con abiti d'epoca, a destra è rappresentata la vista laterale.

In tabella 2 sono riportati i dati del modello. La forma del telaio, molto simile a quello di una bicicletta, evidenzia la realizzazione artigianale. Lo studio di questo modello è importante poiché è un buon esempio delle radici comuni di tutti i veicoli a due ruote.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1921
Categoria	Moto d'epoca
Potenza massima motore	N.D.
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota eretto a 45 Km/h	0,450 KW (0,611 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in abiti d'epoca a 45 Km/h	0,554 KW (0,753 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 45 Km/h	N.D.
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in abiti d'epoca a 45 Km/h	N.D.

Tabella 2: Dati della Terrot Model E.

1931: Triumph NSD 550 cc

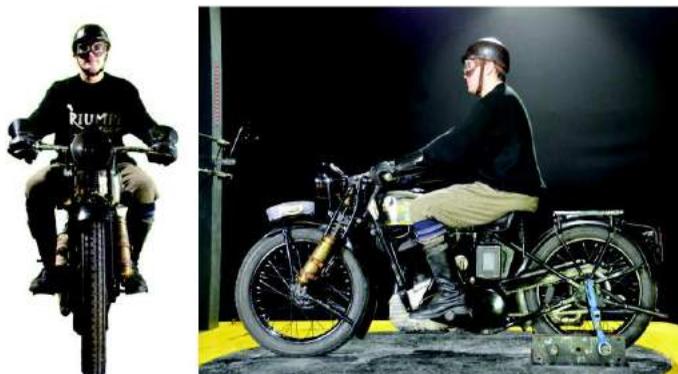


Figura 9: Triumph NSD 550 cc, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota seduto con abiti d'epoca, a destra è rappresentata la vista laterale.

La motocicletta Triumph NSD 550 cc, rappresentata in figura 9, è stata costruita nei primi anni '30; i suoi dati sono riportati in tabella 3. La motocicletta, non essendo dotata di ammortizzatori ma solo di molle sulla sospensione anteriore e sulla sella, vincola il pilota a disporsi in un'unica posizione. Nel retro del veicolo è presente un telaio e delle pedane, riservate alla seduta di un eventuale passeggero.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1931
Categoria	Moto d'epoca
Potenza massima motore	N.D.
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	4,083 KW (5,552 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in abiti d'epoca a 90 Km/h	4,628 KW (6,292 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	N.D.
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in abiti d'epoca a 90 Km/h	N.D.

Tabella 3: Dati della Triumph NSD 550 cc.

1971: BSA Gold Star 500 ss

La motocicletta BSA Gold Star 500 ss è rappresentata in figura 10. La forma



Figura 10: BSA GoldStar 500 Street Scrambler, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota seduto, a destra è rappresentata la vista laterale.

della motocicletta è quella di una moto senza carena dalla seduta alta e molto simile all'enduro: le motociclette con questo particolare disegno, nato in Inghilterra negli anni '70, sono chiamate "scrambler". I dati del veicolo sono riassunti in tabella 4.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1971
Categoria	Turismo Sportivo
Potenza massima motore	25 KW (34 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	4,381 KW (5,957 CV)
Potenza aerodinamica con pilota abbassato a 90 Km/h	3,902 KW (5,305 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	17,52%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota abbassato a 90 Km/h	15,61%.

Tabella 4: Dati della BSA GoldStar 500 Street Scrambler.

1973: MV Agusta 350

La motocicletta MV Agusta 350 è rappresentata in figura 11. Il modello è chiamato anche “350 Ipotesi” in virtù del nome attribuito al primo prototipo realizzato dalla Italdesign e presentato al salone di Milano nel 1973. La carenatura integrale è un optional offerto dal costruttore. In tabella 5 sono riportati i dati del modello.



Figura 11: MV Agusta 350, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota seduto in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1973
Categoria	Sportiva Sportivo
Potenza massima motore	21 KW (28,55 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,396 KW (3,257 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	15,047 KW (20,458 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	11,408%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	71,652%

Tabella 5: Dati della MV Agusta 350.

1975: BMW R90 S

Questo modello è equipaggiato di serie con un cupolino che avvolge il quadro strumenti e il porta lampade.



Figura 12: BMW R90 S a sinistra è rappresentata la sezione frontale, a destra è rappresentata la vista laterale. La linea rossa rappresenta il profilo della BMW R90/6 (modello analogo ma senza la presenza di cupolino).

Il modello è direttamente derivato dalla BMW R90/6 dalla quale prende la stessa cilindrata e ciclistica del posteriore. Il cupolino si abbina a una diversa forcella anteriore e ammortizzatore posteriore, che fanno assumere al pilota una posizione differente rispetto a quella assunta nella R90/6, come mostrato in figura 12. I dati della moto sono riportati in tabella 6.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1975
Categoria	Turismo Sportivo
Potenza massima motore	50 KW (68 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	4,108 KW (5,856 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	20,9 KW (28,416 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	8,217%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 160 Km/h	41,80%

Tabella 6: Dati della BMW R90 S.

1976: BMW R90/6

La motocicletta BMW R90/6 è rappresentata in figura 13. Partendo da questo modello, la sua casa costruttrice, cominciò ad applicare lo sviluppo dell'aerodinamica sui modelli commerciali: il primo passo fu intrapreso con la progettazione della R90 S. I dati del modello sono riportati in tabella 7.



Figura 13: BMW R90/6 a sinistra è rappresentata la sezione frontale, a destra è rappresentata la vista laterale.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1976
Categoria	Naked
Potenza massima motore	45 KW (61,18 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	4,842 KW (6,583 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	24,427 KW (33,211 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	16,433%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 160 Km/h	54,282%

Tabella 7: Dati della BMW R90/6.

1976: Benelli 750 Sei

La motocicletta Benelli 750 Sei è rappresentata in figura 14. Frutto dello sforzo congiunto di Moto Guzzi e Benelli, la 750 Sei appartiene alla categoria delle motociclette stradali di grossa cilindrata. Molti costruttori di componenti ebbero successo grazie alla progettazione di questa motocicletta. La motocicletta, pur non avendo carene, offre al pilota una seduta confortevole. I dati del modello sono riportate in tabella 8.

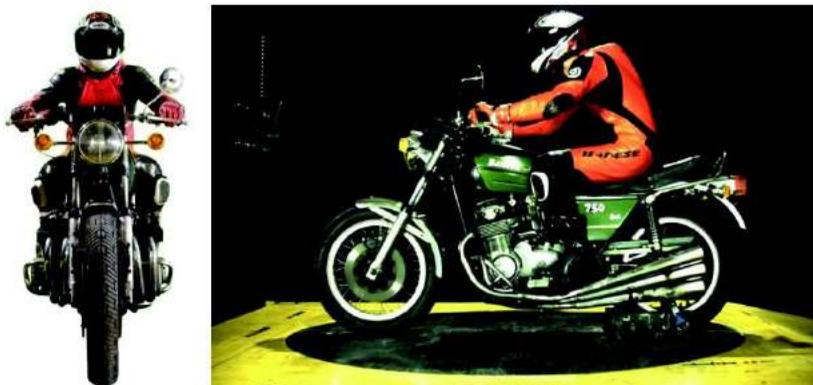


Figura 14: Benelli 750 Sei, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota seduto, a destra è rappresentata la vista laterale.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1976
Categoria	Turismo Sportivo
Potenza massima motore	52 KW (70,7 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	4,005 KW (5,446 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	22,190 KW (30,171 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	7,703%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 160 Km/h	42,674%

Tabella 8: Dati della Benelli 750 Sei.

1986: Honda RS 500 RF

È una moto da competizione, rappresentata in figura 15, prodotta dalla Honda rispettando il regolamento della classe 500 del motomondiale. I dati della moto sono riassunti in tabella 9.



Figura 15: Honda RS500RF, a sinistra è rappresentata la sezione frontale, a destra è rappresentata la vista laterale.

La carena è ottimizzata per offrire il minimo impatto aerodinamico ponendo una certa attenzione anche per i dettagli e le finiture superficiali. I valori sperimentali misurati differiscono meno del 2% dai valori presenti in bibliografia [2] [3] [4] [5].

La moto testata è quella con cui ha corso il pilota Perugino *Marco Papa* nella Classe 500 del Motomondiale del 1986. Questo modello è risultato nella detta stagione il più veloce tra le moto di team privati.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1986
Categoria	Moto da competizione
Potenza massima motore	96 KW (130 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,234 KW (3,037 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	12,14 KW (16,505 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,327%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	12,645%

Tabella 9: Dati della Honda RS 500 RF.

1986: Yamaha RD 350 R

La motocicletta Yamaha RD 350 R è rappresentata in figura 16.

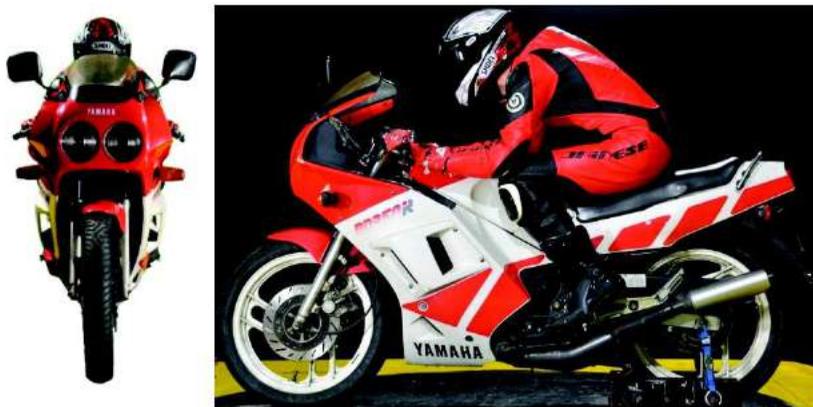


Figura 16: Yamaha RD350R, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

La moto possiede una carenatura che copre molto bene il pilota in posizione abbassata ed ha un'estensione simile a quella delle motociclette con cilindrate molto più grandi. I dati del modello sono riportati in tabella 10.

Caratteristiche tecniche	
Categoria	Sportiva
Potenza massima motore	35 KW (47,59 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,970 KW (4,038 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	16,185 KW (22,006 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	8,485%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	46,244%

Tabella 10: Dati della Yamaha RD 350 R.

1986: Honda VFR 750 R

La motocicletta Honda VFR 750 R è mostrata in figura 17.



Figura 17: Honda VFR750R, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

La motocicletta è stata progettata dalla Honda Racing Corporation per essere omologata secondo il regolamento del campionato mondiale Superbike. Il modello ha conquistato un certo numero di vittorie nel campionato Superbike negli anni 1988 e 1989. In tabella 11 sono riportati i dati della motocicletta.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1986
Categoria	Moto da competizione
Potenza massima motore	80 KW (108,77 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,440 KW (3,317 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	13,272 KW (18,045 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	3,049%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	16,590%

Tabella 11: Dati della Honda VFR 750 R.

1991: Ducati 851 SP3

La motocicletta Ducati 851 SP3 è mostrata in figura 18. La versione destinata alle competizioni, derivata dal modello stradale, ha partecipato a varie annate del campionato mondiale superbike riuscendo a conquistare il mondiale piloti nel 1990. Il modello stradale differisce da quello sportivo per la presenza di un grande faro al centro della carena, per le frecce, che sono integrate ai lati del muso, e per gli specchietti che sono collegati alla parte superiore del cupolino.



Figura 18: Ducati 851 SP3, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

I dati del veicolo sono riassunti in tabella 12.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1991
Categoria	Sportiva
Potenza massima motore	77 KW (104,7 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,812 KW (3,823 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	15,196 KW (20,66 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	3,651%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	19,735%

Tabella 12: Dati della Ducati 851 SP3.

1991: BMW K100 RS

La K100, mostrata in figura 19, è stata realizzata in differenti versioni che variano per la carena: tutte le versioni montano lo stesso motore. La versione studiata è dotata di carena e paramani. Una particolarità di questa moto è quella di essere dotata di uno spoiler aggiustabile sulla parte alta del parabrezza. Le valigie porta oggetti, invece, non sono di serie ma è un accessorio consigliato dalla casa anche per ottimizzare il comportamento aerodinamico della moto. I valori sperimentali misurati differiscono meno del 2% dai valori presenti in bibliografia [2]. I dati della moto sono riportati in tabella 13.



Figura 19: BMW K100RS a sinistra è rappresentata la sezione frontale, a destra è rappresentata la vista laterale con le valigie montate.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1991
Categoria	Turismo
Potenza massima motore	66 KW (90 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	4,235 KW (5,758 CV)
Potenza aerodinamica con pilota eretto a 160 Km/h	22,357 KW (30,397 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 90 Km/h	6,417%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota eretto a 160 Km/h	33,874%

Tabella 13: Dati della BMW K100 RS.

1992: Librenti 500

È una motocicletta artigianale, rappresentata in figura 20, costruita dall'omonimo ingegnere bolognese, per competere nel Motomondiale nella classe 500.



Figura 20: Librenti 500, a sinistra è rappresentata la sezione frontale, a destra è rappresentata la vista laterale.

La carena presenta delle asimmetrie soprattutto nella curvatura del cupolino e nella larghezza delle carene laterali, che mettendo in risalto la natura prototipale del veicolo. I dati della moto sono riportati in tabella 14. Il modello testato è quello con cui il pilota Perugino *Marco Papa* ha corso nel Motomondiale 1992, Classe 500.

Caratteristiche tecniche	
Anno	1992
Categoria	Moto da competizione
Potenza massima motore	132 KW (180 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,570 KW (3,495 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	14,042 KW (19,092 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	1,947%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	10,638%

Tabella 14: Dati della Librenti 500.

2001: Honda CBR 600 F

La motocicletta Honda CBR 600 F è mostrata in figura 21. I dati della moto sono riportati in tabella 15.

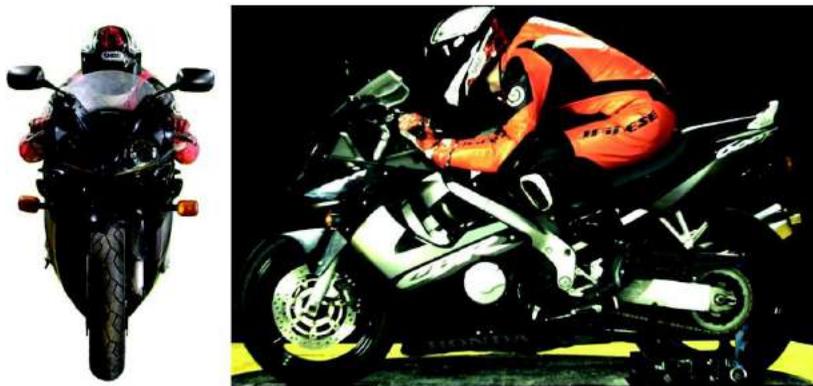


Figura 21: Honda CBR600F, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

La moto in esame è ben rappresentativa di un settore estremamente attivo sin dai primi anni 2000, dove le sportive di media cilindrata hanno ottenuto ottimi risultati nelle vendite a livello mondiale. Da tali modelli sono spesso direttamente scaturite motociclette da competizione per vari campionati monomarca o di derivate di serie.

Caratteristiche tecniche	
Anno	2001
Categoria	Sportiva
Potenza massima motore	81 KW (110 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,668 KW (3,627 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	14,554 KW (19,787 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	3,294%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	17,967%

Tabella 15: Dati della Honda CBR 600 F.

2002: Ducati 998 S

La motocicletta Ducati 998 S è rappresentata in figura 22.

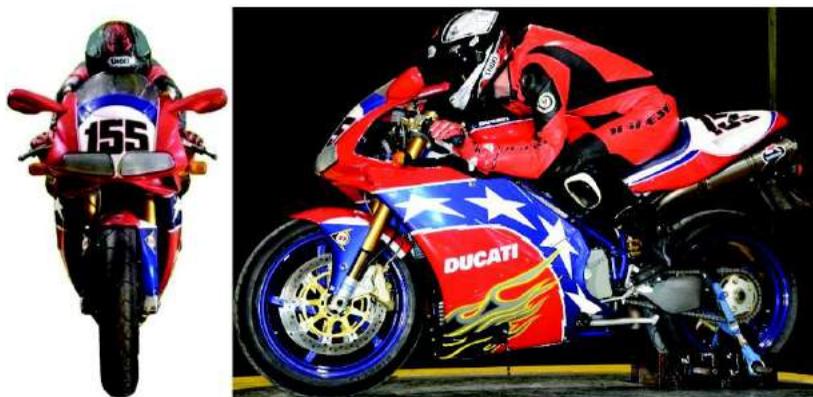


Figura 22: Ducati 998 S, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

La versione da competizione di questo modello ha conquistato il mondiale costruttori e ha sfiorato quello piloti nel 2002. La forma della carena è simile per alcuni aspetti a quella di tutti gli altri modelli appartenenti alla serie '9XX', differenziandosi da loro per le carenature laterali lisce e senza sfoghi per il radiatore che sono ricavati nella parte di carenatura più alta vicino al telaio. In particolare questa versione è dotata di un sottocarena in carbonio per contenere e coprire una parte del motore. La carena è una replica di quella utilizzata da Ben Bostrom nel campionato Superbike nel 2002, ad eccezione degli specchietti. I dati del veicolo sono riportati in tabella 16.

Caratteristiche tecniche	
Anno	2002
Categoria	Sportiva
Potenza massima motore	100 KW (136 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,628 KW (3,574 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	14,417 KW (19,602 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,628%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	14,417%

Tabella 16: Dati della Ducati 998 S.

2002: Honda VFR 800 Vtec

La motocicletta Honda VFR 800 Vtec è mostrata in figura 23.

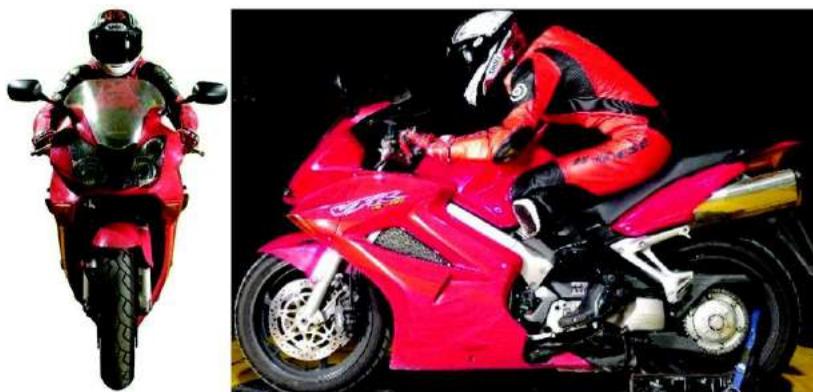


Figura 23: Honda VFR 800 Vtec, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

Una caratteristica importante della carena è la posizione assunta dei radiatori che è differente rispetto a tutte le altre motociclette analizzate: i radiatori non sono posti dietro al parafango, ma lateralmente sulle carene. In tabella 17 sono riportati i dati della motocicletta.

Caratteristiche tecniche	
Anno	2002
Categoria	Turismo sportivo
Potenza massima motore	78 KW (106 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	3,176 KW (4,318 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	17,596 KW (23,925 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	4,071%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	22,560%

Tabella 17: Dati della Honda VFR 800 Vtec.

2006: Aprilia RSV 1000 R Factory

La motocicletta Aprilia RSV 1000 R Factory è mostrata in figura 24. Le caratteristiche tecniche del veicolo sono riportate in tabella 18.



Figura 24: Aprilia RSV 1000 R Factory, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

La versione Factory è dotata, rispetto al modello base, di cerchi in alluminio forgiati, mono-ammortizzatore, forcella öhlins e particolari in carbonio. Gli indicatori di direzione sono incorporati negli specchietti retrovisori e posteriormente nel codone. In tabella 18 sono riportati i dati della moto.

L'Aprilia RSV 1000 è un modello particolarmente legato alla Galleria del Vento "Raffaele Balli", in quanto grazie alla collaborazione con Aprilia e Gruppo Piaggio, molti test aerodinamici sono stati svolti su questa moto, i quali hanno contribuito alla crescita sia della prestazione aerodinamica del mezzo, sia dell'esperienza del personale interno della Galleria del Vento.

Caratteristiche tecniche	
Anno	2006
Categoria	Sportiva sportivo
Potenza massima motore	102 KW (139 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,488 KW (3,382 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	13,422 KW (18,249 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,439%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	13,159%

Tabella 18: Dati della Aprilia RSV 1000 R Factory.

2007: Ducati Desmosedici RR

La motocicletta Ducati Desmosedici RR, rappresentata in figura 25, è stata commercializzata in un numero ridotto di esemplari costruiti direttamente dal reparto corse Ducati. Il modello è la versione stradale del prototipo da corsa impiegato nella classe MotoGP nel motomondiale 2006. Le differenze, con il prototipo da competizione, sono la diversa forma del cupolino e l'integrazione di specchietti e frecce in un unico componente. In tabella 19 sono riportati i dati della moto.



Figura 25: Ducati Desmosedici RR, a sinistra è rappresentata la sezione frontale con il pilota in carena, a destra è rappresentata la vista laterale.

Caratteristiche tecniche	
Anno	2007
Categoria	Sportiva
Potenza massima motore	147 KW (200 CV)
Caratteristiche aerodinamiche	
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	2,333 KW (3,173 CV)
Potenza aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	13,137 KW (17,862 CV)
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 90 Km/h	1,587%
Percentuale di perdita di potenza per interazione aerodinamica con pilota in carena a 160 Km/h	8,937%

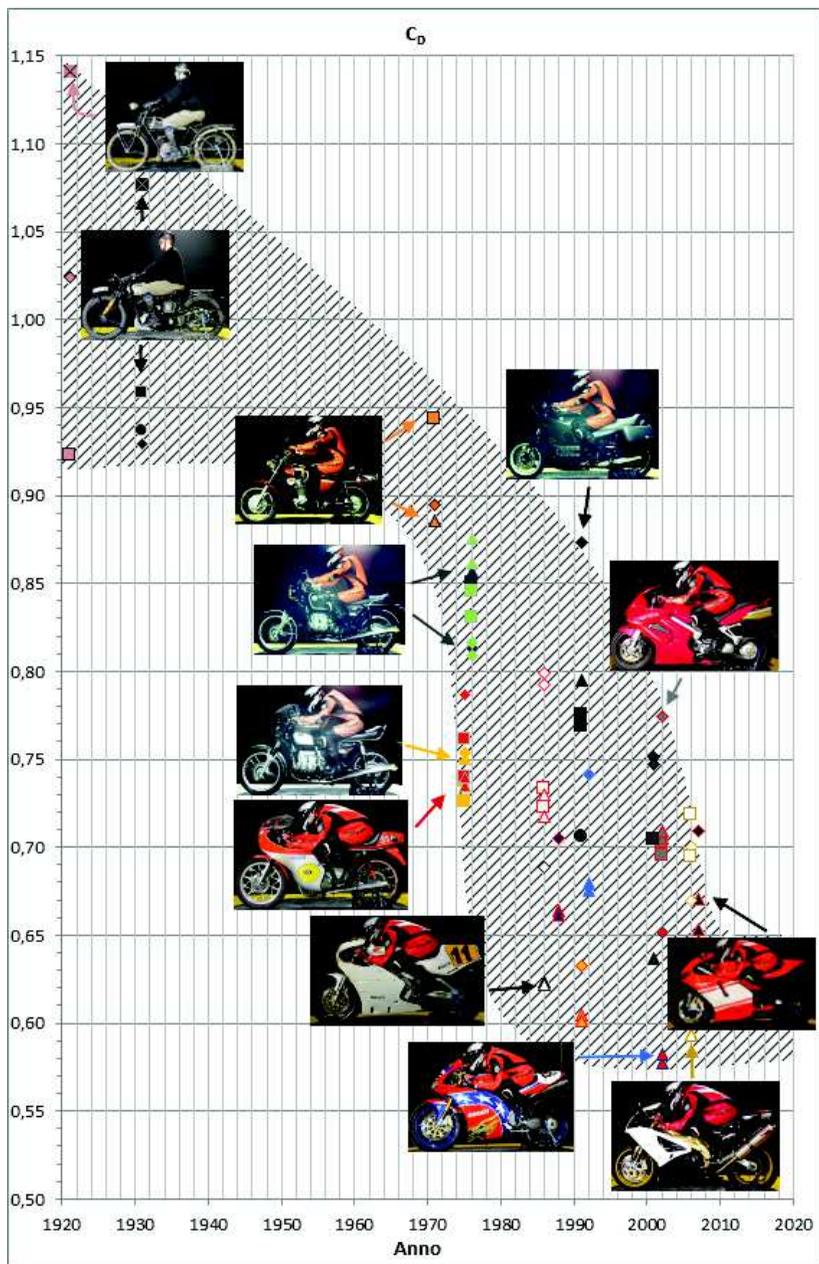
Tabella 19: Dati della Ducati Desmosedici RR.

Evoluzione storica del coefficiente di Drag

In figura 26 si riportano i valori del C_D calcolato per ogni veicolo in funzione dell'anno di costruzione: si osserva un calo di C_D dovuto alla progressiva ottimizzazione aerodinamica della forma delle motociclette. Le motociclette sportive, costruite nel periodo che va dal 2000 al 2007, fanno registrare i più bassi valori di C_D .

In figura 27 si riportano i valori del $C_D \cdot A$ calcolato per ogni veicolo in funzione dell'anno di costruzione: si può osservare che la moto con il più basso C_D non ha il più basso $C_D \cdot A$ evidenziando così che C_D e A hanno la stessa influenza sul Drag.

Si nota inoltre che, per uno stesso periodo storico, la categoria della motocicletta rappresenta un valido discriminante per i valori di $C_D \cdot A$ e C_D . Infatti le moto spiccatamente pensate per un utilizzo da competizione o comunque sportivo presentano sempre valori del coefficiente di penetrazione relativamente bassi, soprattutto nella configurazione naturale per la quale sono state concepite, ovvero con pilota in carena. Al contrario, per modelli da turismo, i coefficienti di penetrazione rimangono sempre più elevati; questo perchè per esigenza di utilizzo le motociclette appartenenti a questa categoria prediligono il comfort e la protezione del pilota nella maggior parte delle situazioni possibili, sacrificando per forza di cose l'efficienza aerodinamica complessiva del sistema.

Figura 26: Sviluppo storico del coefficiente di Drag C_D .

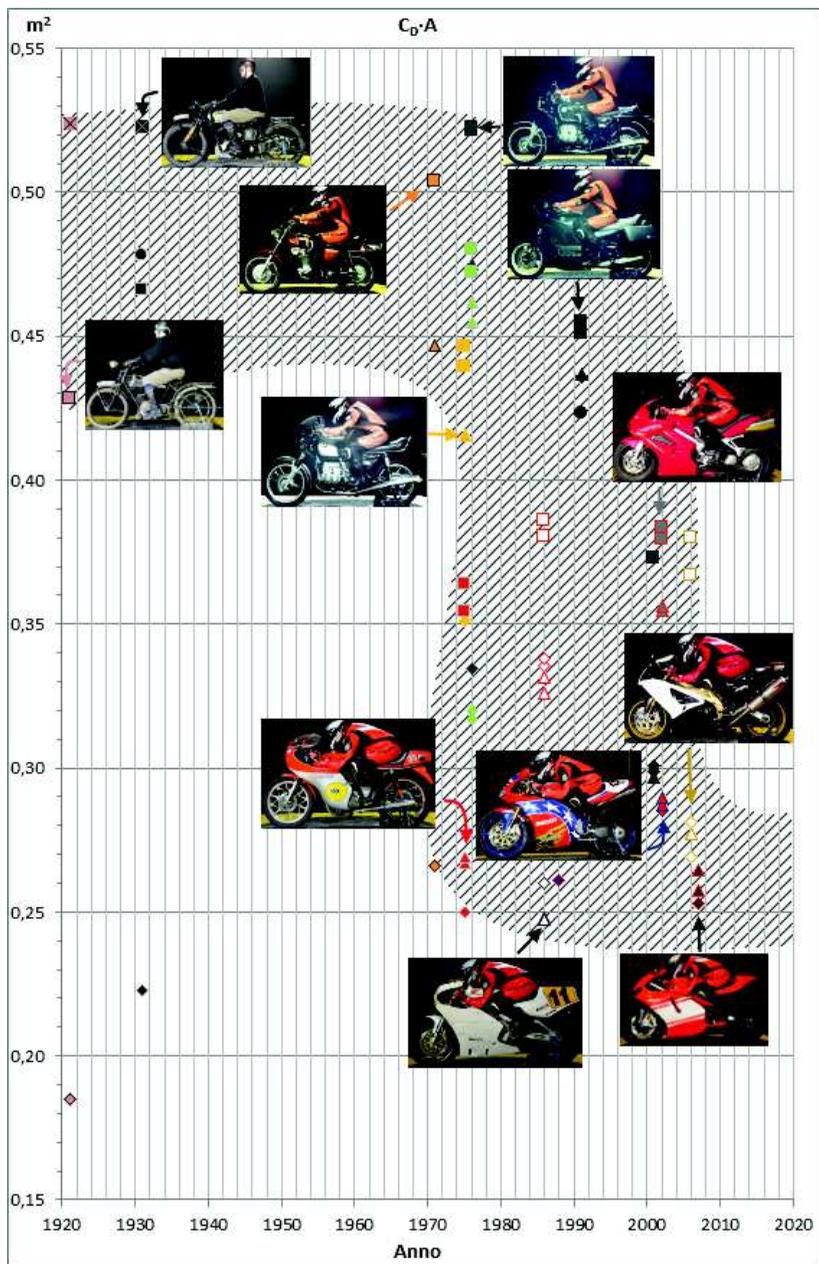


Figura 27: Sviluppo storico dell'area di Drag $C_D \cdot A$.

Riferimenti bibliografici

- [1] Lorenzo Scappaticci, Giacomo Risitano, Michele Battistoni, and Carlo Grimaldi. Drag optimization of a sport motorbike. Technical report, SAE Technical Paper, 2012.
- [2] Wolf-Heinrich Hucho. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. Elsevier, 2013.
- [3] John Robinson. *Motorcycle tuning: chassis*. Butterworth-Heinemann, 1994.
- [4] Tony Foale. *Motorcycle handling and chassis design: the art and science*. Tony Foale, 2006.
- [5] John Bradley. *The Racing Motorcycle: A Technical Guide for Constructors. Gearing, Geometry, Aerodynamics and Suspension*. Broadland leisure publications, 1996.