

Motori a CO₂

1 Introduzione

In questo articolo si è voluto studiare il comportamento di diversi motori a CO₂, utilizzati nella categoria riconosciuta dalla FAI con F1K.

Lo studio condotto porta ad una caratterizzazione dei vari motori tramite un confronto tra famiglie di curve che prendono in considerazione: il passo (p) e il diametro dell'elica (de), tempo di permanenza in movimento (t), numero di giri (n) e trazione (F) prodotta dal motopropulsore.

2 Principio di funzionamento

Tali motori sfruttano la pressione dell'anidride carbonica trasformando l'energia di pressione in energia meccanica, convertendo quest'ultima da moto alternato in rotatorio tramite il consueto cinematismo biella-manovella.

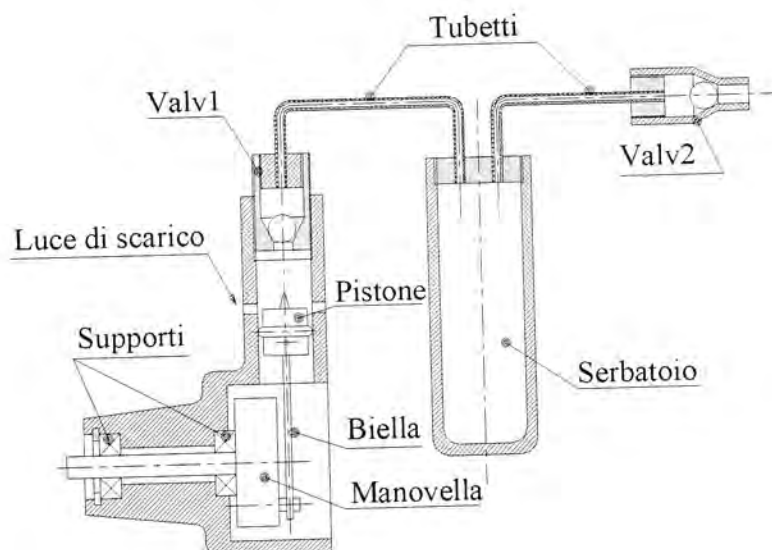


Fig. 2.1 – Schema motore a CO₂

Come si evince dalla figura **Fig. 2.1**, nella sommità (punto morto superiore) la valvola di non ritorno controllata in apertura meccanicamente (Valv1) assolve al compito di cadenzare il ciclo di carica, mentre quello di scarica è affidato nel punto morto inferiore alle luci di scarico. Inoltre ogni motore è corredato di un serbatoio¹ e un'ulteriore valvola (Valv2) per il carico dello stesso.

¹ La F.A.I. ha stabilito la capacità pari a 3 cm³.

Il collegamento fluidico è garantito dai tubetti di rame², opportunamente sagomati, in modo da rendere il meno rigido possibile l'accoppiamento tra i vari componenti descritti.

Avvitando (svitando) la testa del motore (Valv1) posta sulla canna si ottiene un incremento sull'angolo di manovella ($\Delta\alpha_1$ ³) con un conseguente anticipo⁴ (ritardo) sull'apertura della Valv1. Da queste considerazioni, la luce che si viene a creare tra la sfera e la battuta (h) aumenterà (diminuirà) condizionando un aumento (diminuzione) del numero di giri con una conseguente aumento (diminuzione) sulla velocità di scarica del serbatoio, per portare l'aereo in quota (vedasi Fig. 2.2).

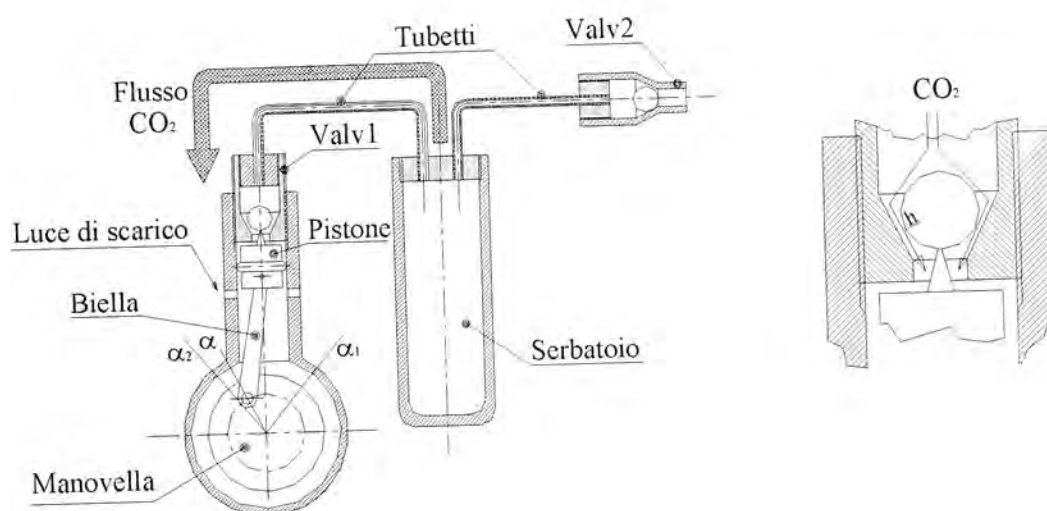


Fig. 2.2 – Ciclo di carica del motore

Ora passiamo a descrivere il funzionamento del motore con il relativo passo preliminare di carica del serbatoio. A tal proposito reputo doveroso introdurre il diagramma di stato della CO₂, in modo da rendersi conto in ogni istante del ciclo, lo stato o il passaggio di stato del fluido motore.

Si noti che al variare dei due parametri vincolanti allo stato (gassoso e liquido) pressione e temperatura, escludendo il solido in quanto non si arriverebbe mai a tali condizioni, il fluido si potrà espandere o contrarre e il range (definito in figura Fig. 2.3 dalla zona con estremi $Z_1 Z_2 Z_3 Z_4$) di utilizzo è:

$$-10 \leq t \leq 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$1 \leq P \leq 50 \text{ atm}$$

dove per il range di temperatura si intende la temperatura⁵ minima (-10°C) che la CO₂ possiede all'interno del serbatoio e a temperatura ambiente allo scarico del

² Normalmente il diametro interno si aggira su 0.5-0.6 mm nel collegamento tra serbatoio e motore, mentre 0.6-0.75 mm tra serbatoio e Valv2. In entrambi i casi lo spessore del tubetto è 0.3-0.4 mm.

³ Intendendo $\Delta\alpha_1 = \alpha_2 - \alpha_1$ un valore piccolo, ma per esigenze grafiche visive si è dovuto disegnare enorme.

⁴ Con un conseguente ritardo o anticipo sulla chiusura della valvola di carico Valv1.

⁵ La temperatura relativa t si esprime in gradi Celsius (°C), mentre la temperatura assoluta T in gradi Kelvin (°K). La relazione che lega le due unità di misura è:

motore (40°C). In modo analogo si considera per la pressione, la pressione⁶ ambiente (1 atm), sempre all'esterno della luce di scarico, e la pressione vigente all'interno del serbatoio (50 atm).

Nel diagramma a sinistra si nota che al di sotto del confine $P_1-T_1-P_2-P_4$ la CO₂ si presenta sotto forma gassosa, invece al di sopra di $P_1-T_1-P_3-P_5$ lo stato è solido, mentre all'interno di $T_1-P_2-P_3$ si osserva liquido.

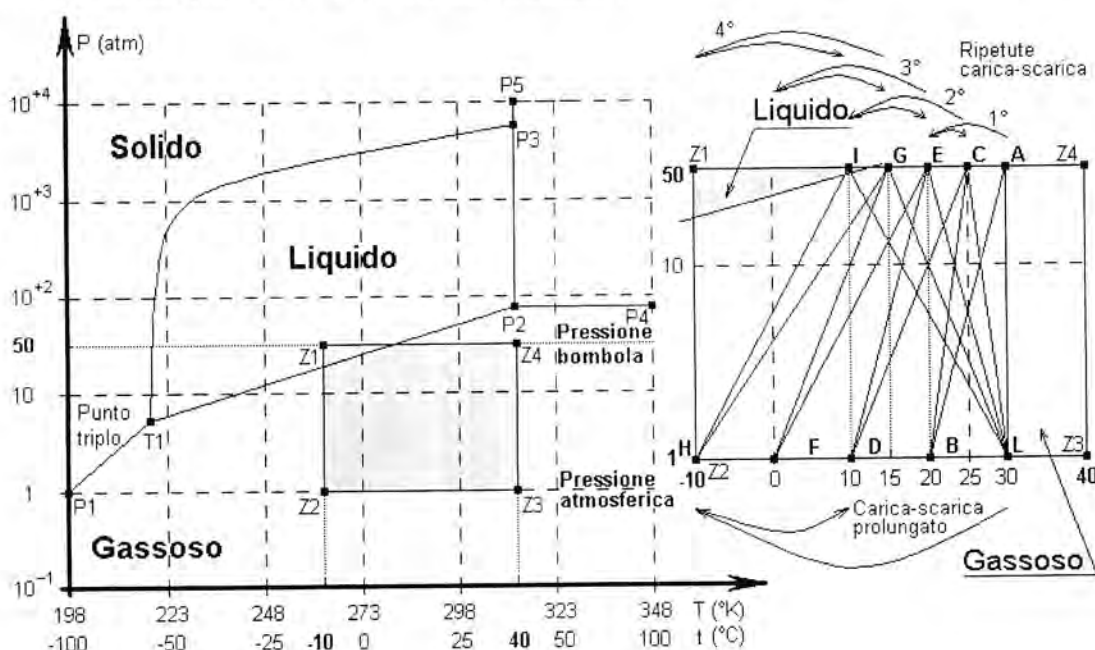


Fig. 2.3 – Diagramma di stato della CO₂ e ciclo di trasformazione del fluido motore all'interno del serbatoio

Sulle linee di confine (zona di transizione) coesistono entrambi gli stati che delimitano la curva, mentre nel punto T_1 (punto triplo) coesistono tutti gli stati di aggregazione (solidi, liquido, gassoso).

2.1 Carica del serbatoio

Per caricare il serbatoio si deve accoppiare la valvola Valv2 con la valvola di non ritorno controllata in apertura meccanicamente della bombola (Valv3)⁷ Fig. 2.4 . Nel passato si usava normalmente, come bombola per la carica, la bomboletta del seltz in quanto nella dotazione del motore veniva fornito l'attacco per tali ricariche. Attualmente si sono affinate le tecniche di carica utilizzando bombole con capacità e pressioni superiore, per assicurare una pressione costante (50 atm) anche dopo ripetute cariche, e di conseguenza l'esistenza di CO₂ liquida⁸ ($\text{Volume}_{\text{bombola}}=0.5 \text{ l} \gg \text{Volume}_{\text{serbatoio}}=3 \text{ cm}^3$).

$$T (^{\circ}\text{K}) = t (^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

⁶ Per completezza nella trattazione accludo il relazionamento tra la pressione espressa in bar e in atmosfere

$$P (\text{atm}) = 1.013 * P (\text{bar})$$

⁷ Vedasi *Allegato A* per la realizzazione della valvola che accoppia il serbatoio alla bombola.

⁸ Per tutta la durata della carica.

In passato per incamerare una quantità maggiore di CO_2 , con un conseguente aumento del tempo di funzionamento del motore, si procedeva ad un raffreddamento diretto del serbatoio.

Attualmente poiché tale operazione non è più ammessa dal regolamento FAI in vigore, si è aggirato l'ostacolo procedendo a ripetute cariche e scariche del serbatoio in tempo breve (derivante dal continuo cambiamento di stato del fluido motore causato da variazioni repentine di pressione all'interno dello stesso).

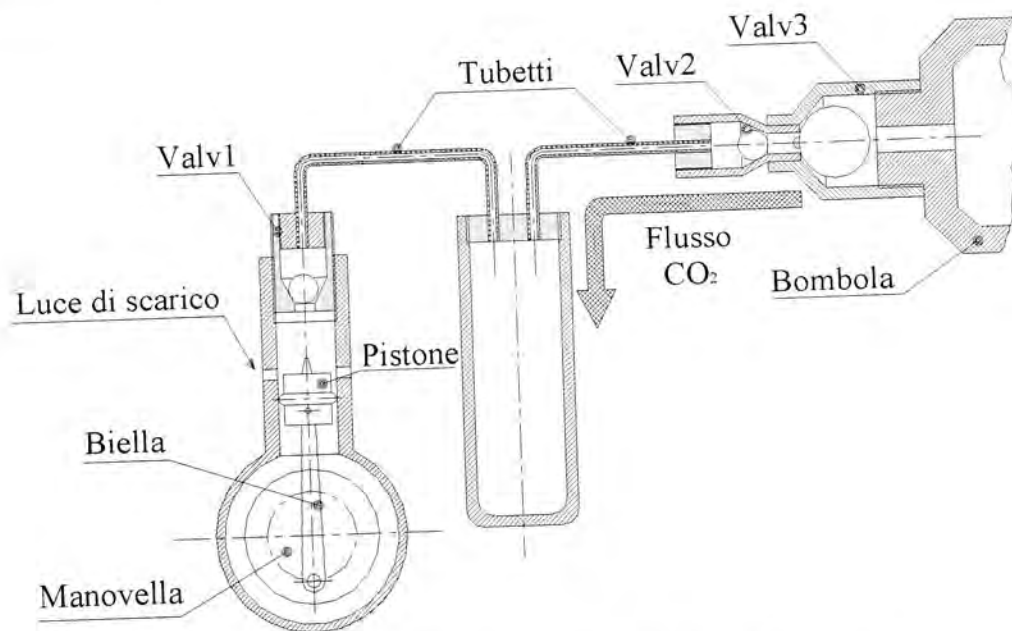


Fig. 2.4 – Schema caricamento del serbatoio dalla bombola

Supponendo (vedi figura Fig. 2.3 destra) di avere la bombola in condizioni $t=30^\circ\text{C}$ e $P=50\text{ atm}$, quindi nel punto A , si ha CO_2 gassoso all'interno del serbatoio, mentre per ripetute cariche e scariche si arriverebbe ad una condizione pari ad I^9 (CO_2 liquida). E' evidente come la condizione I rispetto alla A sia superiore per la trazione, il tempo di rotazione e alla costanza sul numero di giri per passare a serbatoio completamente scarico (L).

I punti denominati con $A\ C\ E\ G\ I$ sono a serbatoio pieno mentre con $B\ D\ F\ H$ risultano a serbatoio scarico mentre con L si indica le condizioni del serbatoio scarico dovuto non alla tecnica di raffreddamento ma bensì all'utilizzo del motore.

Da tale precisazione si deduce che le trasformazioni termodinamiche $A-B\ C-D\ E-F\ G-H$ e $B-C\ D-E\ F-G\ H-I$ risultino rispettivamente di scarico e carico del serbatoio, mentre con $A-L\ C-L\ E-L\ G-L\ I-L$ la scarica del serbatoio dovuto all'utilizzo del motore.

⁹ Caricando per la prima volta il serbatoio si ottiene una condizione di $t_A=30^\circ\text{C}$ e $P_A=50\text{ atm}$ (punto A). Se ora si scarica il serbatoio in modo rapido (tramite la Valv4 , oppure aprendo la Valv2) la pressione risulta pari a quella atmosferica ($P_B=1\text{ atm}$) e la temperatura di 20°C (punto B). Ricaricando la pressione ritorna a $P_C=50\text{ atm}$ con $t_C=25^\circ\text{C}$ (media tra la temperatura t_B del serbatoio e la t_A del fluido motore all'interno della bombola), rimanendo ancora in uno stato pressoché gassoso all'interno del serbatoio. Scaricando e ricaricando si ha rispettivamente il punto D ($P_D=1\text{ atm}$ $t_D=10^\circ\text{C}$) e E ($P_E=50\text{ atm}$ $t_E=20^\circ\text{C}$). Continuando nella scarica e ricarica si passa rispettivamente a F ($P_F=1\text{ atm}$ $t_F=0^\circ\text{C}$) G ($P_G=50\text{ atm}$ $t_G=15^\circ\text{C}$) H ($P_H=1\text{ atm}$ $t_H=-10^\circ\text{C}$) I ($P_I=50\text{ atm}$ $t_I=10^\circ\text{C}$). Si noti con la quarta scarica-carica si arriva a una condizione di liquido all'interno del serbatoio.

Un'altra tecnica di raffreddamento "consentita" è la scarica prolungata seguita dalla carica una volta raggiunto una temperatura che garantisca la CO₂ allo stato liquido (vedasi sempre il diagramma destro di **Fig. 2.3**).

Per utilizzare tale prassi occorre che la valvola di scarico Valv4¹⁰ montata sul serbatoio (tappo del serbatoio), sia svitata, affinché la CO₂ della bombola, passando nel serbatoio fuoriesca dalla Valv4 raffreddandolo, nel medesimo modo descritto in precedenza nella variazione di stato. In questo caso dalla condizione con pressione di serbatoio $P=50$ atm e $t=30^{\circ}\text{C}$ (corrispondente al punto A seppure in questo caso il serbatoio risulti scarico¹¹) si passa direttamente (tempo impiegato circa 8 secondi) a $P=50$ atm e $t=-10^{\circ}\text{C}$ (punto Z₁ anche in questo caso il serbatoio e scarico). Dopodichè si stacca la bombola (Valv3) dal serbatoio (Valv2) sempre con Valv4 aperta in modo da permettere la fuoriuscita della CO₂ residua nel serbatoio portando a $P_H=1$ atm e $t_H=-10$ atm. Si chiude la Valv4 e si carica il serbatoio ottenendo $P_I=50$ atm e $t_I=10^{\circ}\text{C}$.

Una verifica sullo stato di caricamento può essere di tipo visiva. Infatti nel raffreddamento del serbatoio la superficie esterna dello stesso si ricopre di ghiaccio (l'umidità dell'aria che a contatto della superficie fredda si solidifica), che si scioglierà all'atto della carica fino al livello della CO₂ liquida immagazzinata all'interno del serbatoio. Una conferma su quanto esposto può essere notata dall'andamento di carico di CO₂ (peso dell'anidride carbonica liquida stoccata nel serbatoio) definito con m al variare del numero di cariche e scariche (nsc) e raffreddamento prolungato.

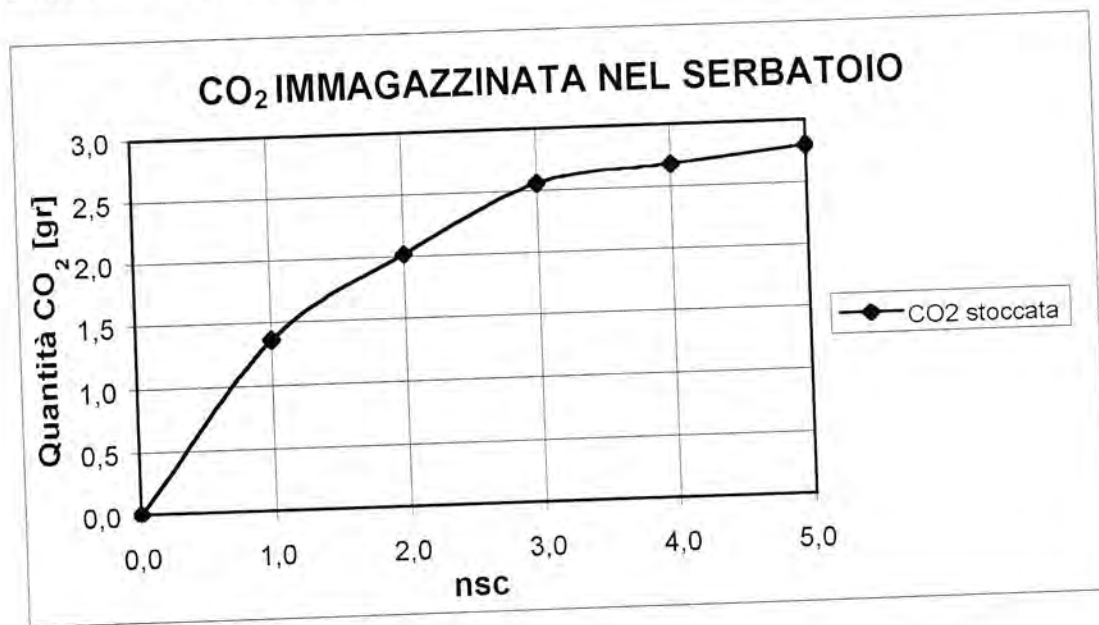


Fig. 2.5 – Diagramma quantità di CO₂ – numero di sottoraffreddamenti

¹⁰ Vedasi *Allegato B* per la realizzazione della valvola a scarico rapido.

¹¹ Accoppiando le valvole Valv2 con Valv3 nel serbatoio si ha una pressione circa pari ad 50 atm, con una temperatura della bombola (30°C), in quanto esiste una caduta di pressione all'imbocco della Valv3 e nella Valv2 e alla conclusione del tubetto nel serbatoio oltre a una caduta distribuita lungo il tubetto. Oltre a tali cadute compaiono pure, sulla Valv4 e il tubetto che unisce il serbatoio e tale valvola. Seppur essendo aperta la Valv4, la pressione si ridurrà ulteriormente, la sezione di scarico risulta piccola quindi il serbatoio incamererà della CO₂ al suo interno formando un polmone (garantendo circa una pressione di 50 atm), non riuscendo a smaltire (da Valv4) la portata entrante dalla Valv2.

2.2 Ciclo del motore

Partendo dalla condizione in cui il pistone sta salendo, senza generare coppia motrice, cioè l'angolo di manovella α risulta compreso tra α_4 e α_1 per l'esattezza $\alpha_4 \leq \alpha \leq \alpha_1$, vedasi Fig. 2.6.

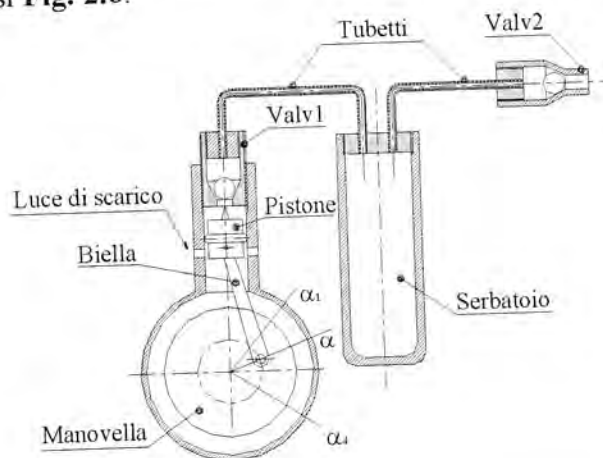


Fig. 2.6 – Ciclo di risalita del pistone del motore

Nella salita si troverà in posizione angolare $\alpha = \alpha_1$ il puntoncino, ubicato sulla faccia del pistone, a contatto con la sfera della Valv1, in tale condizione la valvola di non ritorno controllata meccanicamente risulta ancora chiusa. Nella rotazione del motore si arriverà nel range $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, dove aprendosi la Valv1 riempie la camera “di scoppio” di CO₂ in forma gassosa alla pressione $P_{camera} = 50 - \Delta P$ ¹² generante la coppia motrice. Come si nota dalla Fig. 2.2.

$$C_{motrice} = F \cdot \text{Braccio}_{manovella} = (P_{camera} / \text{Area}_{pistone}) \cdot (R_{manovella} \cdot \cos \alpha)$$

Nel range $\alpha_2 < \alpha < \alpha_3$ il pistone scende con una coppia definita dalla relazione sopra riportata seppure la valvola Valv1 risulta chiusa, non fornendo ulteriore fluido motore all'interno della camera.

¹² Si indica con ΔP la caduta di pressione dovute alla perdita distribuita (sul tubetto collegante la Valv1 con il serbatoio) oltre alla concentrata (Valv1). La prima (ΔP_d) dipende dalla scabrosità superficiale, dalle dimensioni della sezione di passaggio del fluido motore oltre alla viscosità e velocità del fluido. Per quanto concerne la seconda (ΔP_e) deriva dalle variazioni di sezione e geometria oltre alla viscosità e velocità del fluido.

$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_e$$

E' da notare che risulta $\Delta P_d < \Delta P_e$ per la viscosità bassa, la sezione di passaggio superiore tra tubetto e luce della Valv1 (h) e per una ridotta rugosità superficiale rispetto alla Valv1 (estrusione rispetto a lavorazione per asportazione di truciolo). Per concludere la dissertazione dato che h varia al variare dell'angolo α ($h(\alpha = \alpha_1) = h(\alpha = \alpha_2) = \min = 0$, $h(\alpha = 90^\circ) = \max$) varierà la sezione di passaggio nella Valv1 e quindi il ΔP_e oltre a variare ΔP_d conseguente ad una variazione della velocità (sarà la sezione minima di passaggio da serbatoio a camera “di scoppio” a determinare la portata e quindi la velocità del flusso di CO₂). Questa ΔP serve a cambiare lo stato di aggregazione, assicurando che all'interno della camera ci sia CO₂ gassosa.

Vedasi a tal riguardo la **Fig. 2.7**

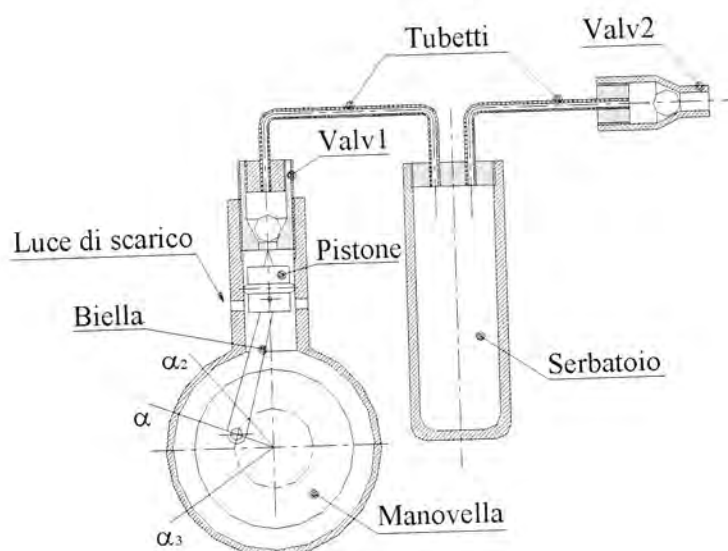


Fig. 2.7 – Ciclo di discesa del pistone del motore

Concludendo il ciclo in $\alpha_3 < \alpha < \alpha_4$ si ha lo scarico della CO₂ dalla camera dalle luci di scarico dove sia in $\alpha = \alpha_3$ sia in $\alpha = \alpha_4$ le luci sono completamente chiuse (**Fig. 2.8**).

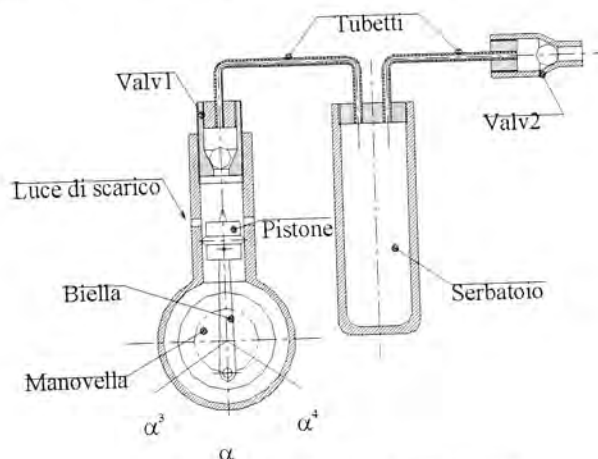


Fig. 2.8 – Ciclo di scarica del motore

3 Prove dei motori

Come precedentemente accennato nell'introduzione, si è condotto uno studio sui motori a CO₂ utilizzando i parametri passo (p) e diametro del propulsore (de), numero di giri (n) e trazione (F) oltre al tempo di funzionamento (t) del motore. Per fare queste rilevazioni si è impiegato il banco prova in fotografia **Fig.3.1**.

Il banco risulta equipaggiato di dinamometro (1) e contagiri (2) per rilevare rispettivamente la forza (F) generata dal motopropulsore e il numero di giri dell'elica (n). Sono state utilizzate delle boccole (3) a basso coefficiente d'attrito ($\mu=0.25$), montate sul carrello (4), in modo da ridurre al minimo le perdite per attrito radente sui valori rilevati dal trasduttore di forza (1).

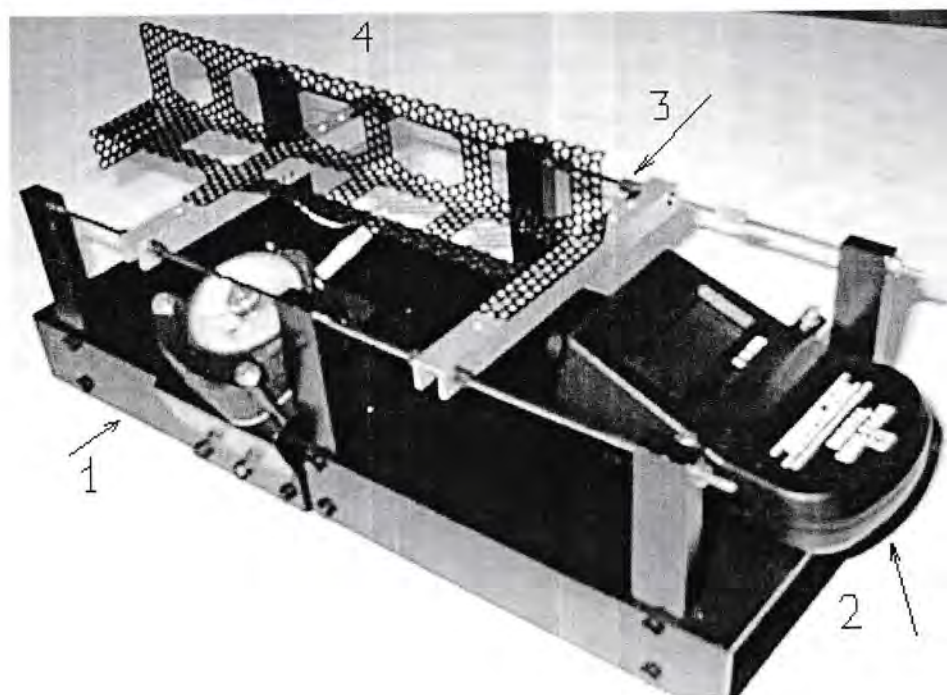


Fig. 3.1 – Banco prova

Si è proceduto anche nel quantificare l'influenza sui due modi di raffreddamento del serbatoio a parità di motopropulsore. Si nota dai diagrammi (Fig.3.2 e Fig.3.3) l'ininfluenza tra un raffreddamento con carica-scarica ripetuto (GERR1) e uno prolungato (GERR2) sia per la caratteristica trazionale sia sul numero di giri.

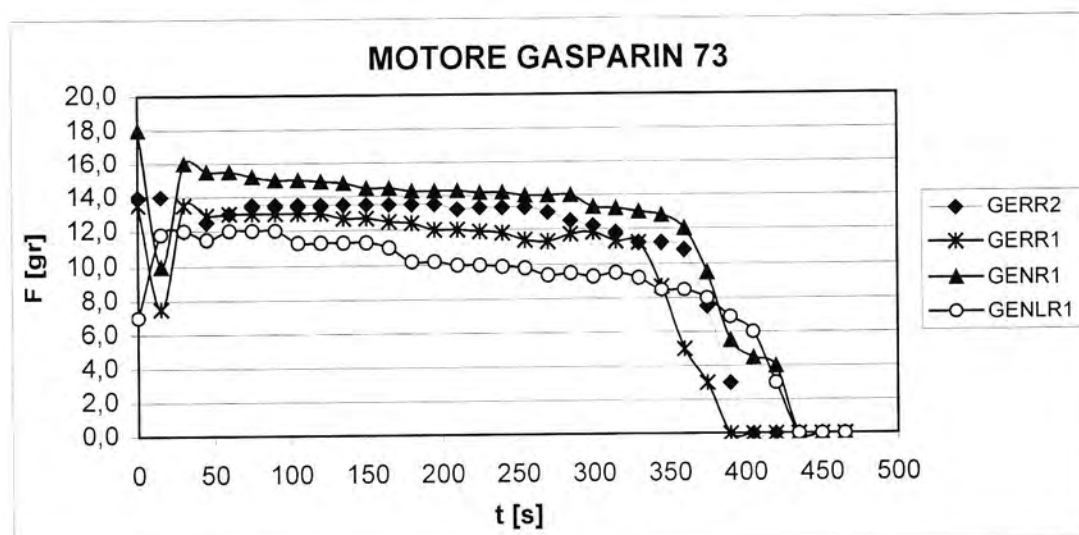


Fig. 3.2 – Caratteristica trazionale del motore Gasparin 73

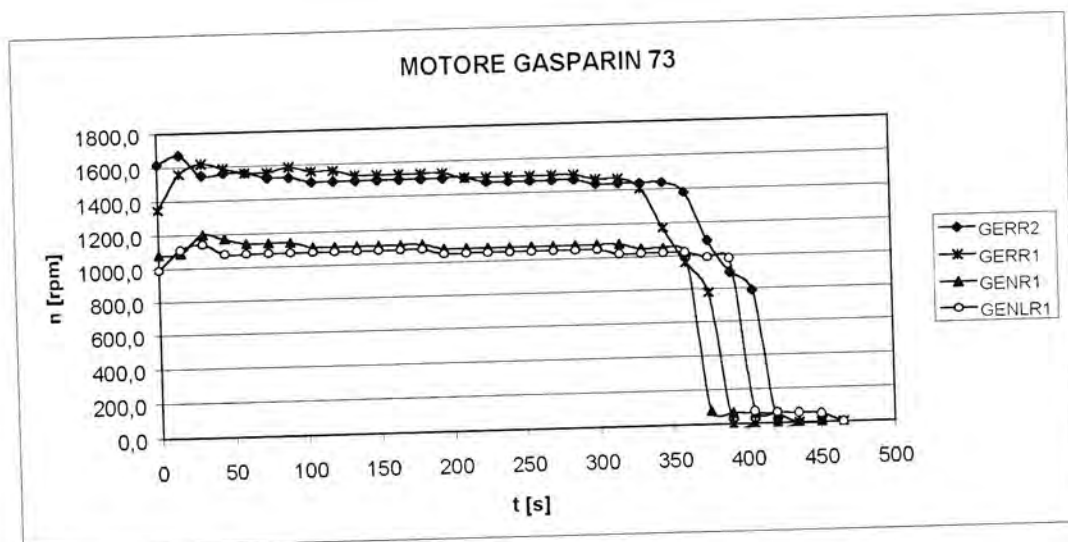


Fig. 3.3 – Numero di giri ottenuto dal motore Gasparin 73

Si è proceduto inoltre nel determinare l'influenza sul peso proprio dell'elica (*GENR1*¹³ e *GENLR1*) a parità ovviamente di motopropulsore (stesso motore stesso d_e , p) e raffreddamento (metodo 1), notando una spiccata costanza sulle due caratteristiche oltre ad un prolungato tempo di funzionamento per il propulsore più pesante.

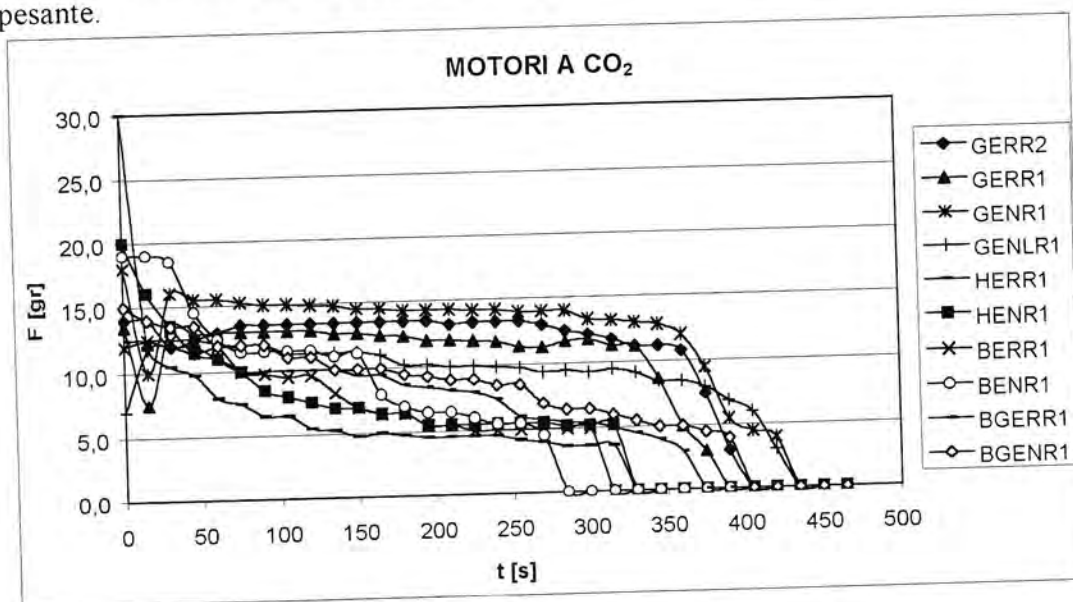


Fig. 3.4 – Caratteristica trazionale dei motori in studio

¹³ Con tale terminologia si intende $\mu E \epsilon R \rho$:

μ : Motore utilizzato (G=Gasparin 73 , B=Boton 88 , H=Helbi 88 ,BG=Boton 88 (come carter) e Gaspari 63 (testa e Valv1)

$E \epsilon$: Elica tipo ϵ (R=Rossa (elica Modela) , N=Nera (elica Boton) , NL=Nera leggera (elica Boton alleggerita)

$R \rho$: Raffreddamento con metodo ρ (1=scarica e carica ripetute , 2= scarica prolungata)

Questo aspetto è dovuto ad un maggiore momento d'inerzia del motopropulsore (organi in movimento del motore + elica) e quindi ad uno sforzo inferiore del pistone nell'aprire la Valv1 (chiusa da una $p=50$ atm) oltre ad una costanza della coppia¹⁴ sull'albero in quanto l'elica comportandosi da volano assorbe e cede energia livellando i picchi e i ventri della coppia ottenuta da pistone-manovella. Da queste considerazioni si nota una convenienza spiccata nell'utilizzo di propulsori pesanti rispetto ai leggeri.

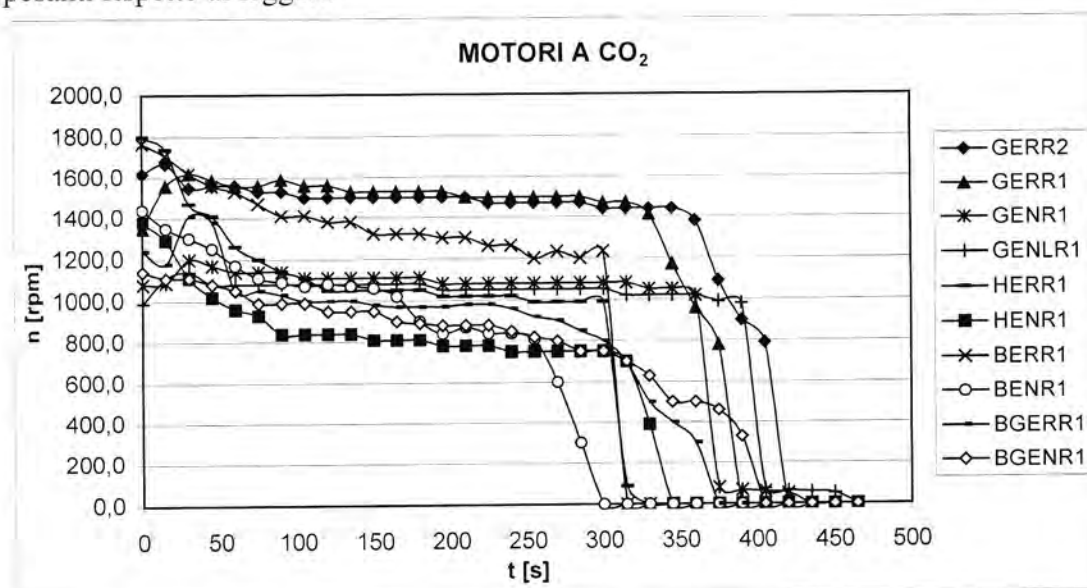


Fig. 3.5 – Numero di giri ottenuto dai vari motori in studio

In un secondo tempo si sono eseguite le prove sui motori *HELBI* (*HERR1*, *HENR1*), *BOTON* (*BERR1*, *BENR1*) e il motore ibrido¹⁵ (*BGERR1*, *BGENR1*).

Dai diagrammi (Fig. 3.4 e Fig. 3.5) si denota che il motore migliore è il Gasparin 73 montante un elica pesante, pur avendo una cilindrata inferiore agli altri presi in esame, sia per la trazione prodotta sia sulla durata di funzionamento, oltre alla costanza sul numero di giri.



Fig.3.6 – Eliche utilizzate nello studio. Dall'alto verso il basso, sono : Modela ,FSK e FSK_{modificata}

¹⁴ Il motore genera coppia solamente per $(\Delta\alpha_1 \cdot 100/360^\circ) \%$ di $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ cioè nel range $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$.

¹⁵ Inteso con motore ibrido, un motore ottenuto utilizzando come canna e Valv1 quella del Gasparin 63 (in numero indica la cilindrata) mentre per il carter, il pistone e l'albero motore il Boton 88.

Tale accoppiamento è stato possibile avendo lo stesso alesaggio ($\phi_{\text{pistone}} = 4$ mm) ottenendo un motore con cilindrata pari 88 mm^3 (88).

Concludendo, le eliche prese in considerazione (vedi **Fig 3.6**) sono:

- Elica MODELA con $\phi_{elica}=180$ mm , passo $p=200$ mm , peso=4,4 gr
- Elica FSK con $\phi_{elica}=234$ mm , passo $p=225$ mm , peso=6.2 gr
- Elica FSK_{modificata} con $\phi_{elica}=234$ mm , passo $p=225$ mm , peso=4.2 gr

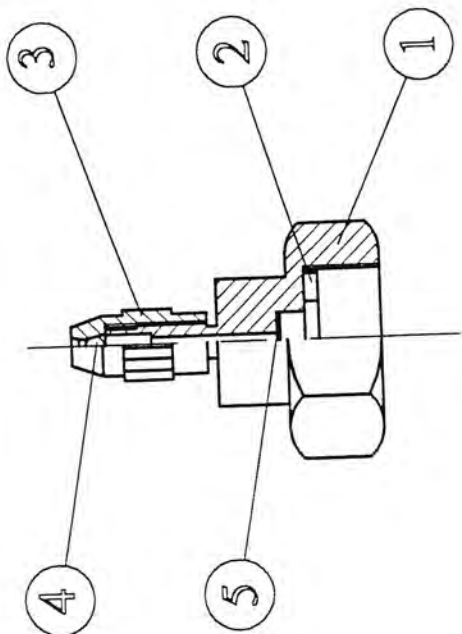
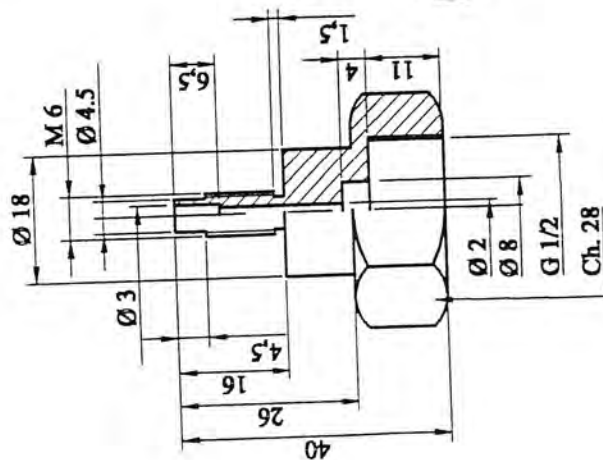
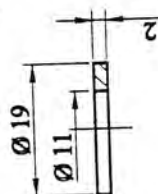
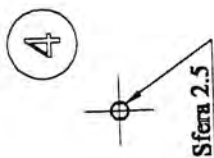
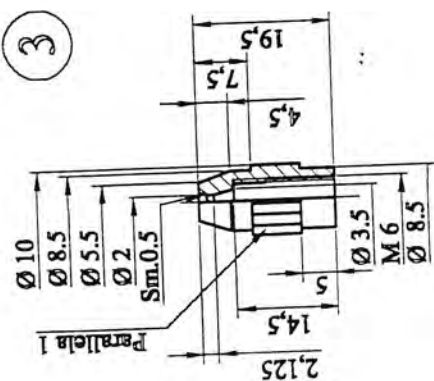
Si noti che esaminando la caratteristica trazionale di **Fig.3.2** un elica più pesante presenta una forza superiore di una leggera ($F_{GENR1} > F_{GERR1} > F_{GENLR1}$) mentre il numero di giri risulta superiore dove il passo è inferiore ($n_{GERR1} > n_{GENR1} \cong n_{GENLR1}$), vedi **Fig. 3.3**.

4. Ottimizzazione

Apportando delle modifiche sul motore di serie si possono avere delle prestazioni superiori.

1. Variando il profilo delle Valv1 nella zona di battuta della sfera si ottiene una migliore regolazione sul numero di giri del motore oltre ad una tenuta superiore. Infatti conviene avere una conicità ridotta per garantire un'agevole regolazione dei giri ($h \cong cost.$) del motore e ridurre i rischi di sfarfallamento (con conseguenti perdite di carico) quando la sfera risulta sollevata dal puntoncino del pistone.
2. Sostituendo l'o-ring montato sul pistone con una guarnizione a labbro, si ottiene una riduzione della forza d'attrito tra guarnizione e canna.
3. Per migliorare ulteriormente il rendimento del motore, dal punto di vista dell'attrito conviene sostituire le bronzine sui supporti di banco e sul piede di biella con cuscinetti¹⁶.

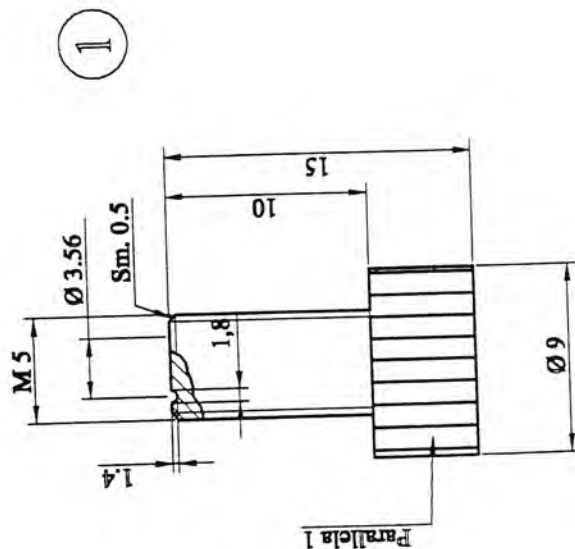
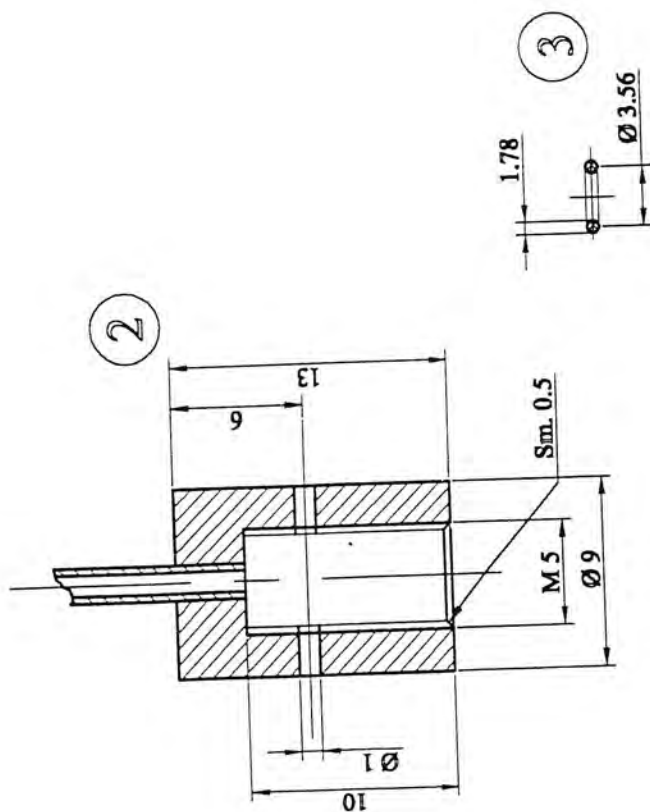
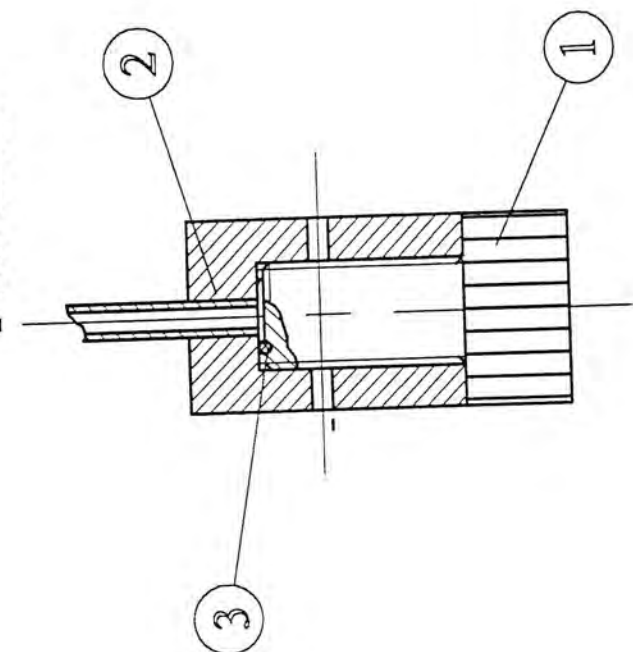
¹⁶ Il Gasparin 73 ne è provvisto.



5	Retina blocca ruggine	1	Ottone
4	Sfera	1	Acciaio tmp
3	Attacco serbatoio motore	1	Alluminio
2	Guarnizione	1	Teflon
1	Attacco bombola	1	Ottone
N	Oggetto	Q.ta	Materiale
Completivo: Valvola non ritorno bombola		Campanella Claudio	
Particolare:		1 2 3 4	Scale : 1:1 Data: 05/12/1999



↑ Serbatoio



3	O-Ring 2007 NB70	1	Teflon
2	Vite di serraggio	1	Ottone
1	Supporto	1	Ottone
N	Oggetto	Q.ta	Materiale

Complessivo:
Valvola di scarico serbatoio

**Campanella
Claudio**

Particolare:

1 2 3

Scala : 3:1

Data: 06/12/1999

