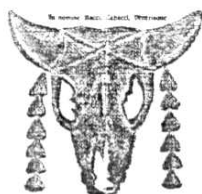


***D.P. ERRIGO***

***PROFILI DI VELOCITA'  
IN UN PLASMA TERMICO***



***Università degli Studi di Padova  
Istituto di Impianti Chimici  
1970***

# ***PROFILI DI VELOCITA' IN UN PLASMA TERMICO***

## **RIASSUNTO**

Allo scopo di conoscere le condizioni di flusso in un plasma a jet termico, occorre ricavare i profili di velocità e di portata.

Le misure di pressione di stagnazione furono condotte a mezzo di sonde raffreddate ad acqua usate come tubo di Pitot.

Furono approntate sonde a diverse dimensioni e a diversi profili della testata.

La parte sperimentale è stata correlata di una formulazione analitica con l'intenzione di giungere a calcolare teoricamente il profilo di velocità.

## **1 - PREMESSA**

Nello studio attualmente in corso presso questo Istituto sui Plasmi termici ad Argo, si è spesso presentata la necessità di conoscere le caratteristiche del flusso del gas.

Lo studio teorico è di notevole complessità data la difficoltà di stabilire le condizioni ai limiti nell'integrazione delle equazioni di conservazione dell'energia e della quantità di moto. Il metodo più idoneo risulterebbe quindi quello sperimentale. Esistono tuttavia in letteratura pochi lavori in tale campo data la difficoltà di eseguire misure locali in condizioni così drastiche ad una temperatura di  $10^4$ °K e con gradienti termici che raggiungono valori di  $10^3$ - $10^4$  °Kmm<sup>-1</sup>.

## **2 - APPARECCHIATURA**

Il plasma-jet è generato a mezzo di un arco elettrico stabilizzato a vortice. Il jet fuoriesce liberamente in aria stagnante attraverso il condotto anulare dell'anodo cavo di diametro  $\Phi = 6$  mm (<sup>1</sup>). Come gas di plasma si è usato l'argo. Le condizioni di taratura e di sperimentazione sono riportate in tabella 1.

Tabella 1

<i>Condizione</i>	<i>Taratura</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
<i>Flusso di gas di Argo, lt min<sup>-1</sup></i>	35	35	23
	--	150	110
<i>Amperaggio, A</i>	--	29	29
<i>Voltaggio, V</i>	--	4,35	3,20
<i>Potenza elettrica, kW</i>			

### **a) Caratteristiche costruttive**

Le sonde impiegate per la misura della pressione di stagnazione sono state costruite in questo Istituto partendo da una descrizione data da GREY (<sup>2</sup>).

Esse sono costituite da tre tubi concentrici in acciaio inossidabile saldati su una testina in rame in modo da avere una doppia camicia di raffreddamento attorno al tubo di pressione.

Le dimensioni devono essere compatibilmente con le esigenze di fabbricazione, tali da turbare il meno possibile i filetti fluidi nei punti di misura, e consentire inoltre di ottenere valori locali e massima risoluzione spaziale.

Il diametro esterno minimo realizzato è di 3 mm. E' evidente che a tali valori risulta determinante ai fini della misura, il profilo interno ed esterno della testata in rame. Alcuni studi (<sup>3</sup>) sono stati eseguiti per flussi a condizioni normali. Tra le forme suggerite per le testate sono state adottate, modificandole secondo le nostre esigenze, quelle che accoppiassero ad una buona attendibilità dei risultati una facilità di realizzazione meccanica. E' da tener presente infatti la difficoltà di ottenere al tornio pezzi di così piccole dimensioni.

Il raffreddamento è ottenuto usando acqua sotto pressione.

### b) Calcolo dello scambio termico

Il flusso termico  $q$  che investe la sonda è dato dal contributo dei termini seguenti (4):

$$q = q_i + q_{\phi\alpha} + q_{conv} + q_{ra} \quad (1)$$

- $q_i$  = flusso termico dovuto all'impatto elettronico,  $\text{cal cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ;  
 $q_{\phi\alpha}$  = flusso termico dovuto alla ricombinazione ioni-elettroni;  
 $q_{conv}$  = flusso termico convettivo  
 $q_{ra}$  = flusso termico dovuto alla radiazione.

Dato che  $q_{ra}$  è minore dell'1% sul valore totale (5) (6) e che  $q_i$  e  $q_{\phi\alpha}$  sono trascurabili data la bassa percentuale di elettroni presenti alle temperature operative, circa l'1% (7), teniamo conto solo del  $q_{conv}$ . Si ha pertanto:

$$q = q_{conv} = h (T_g - T_s) \quad (2)$$

- $h$  = coefficiente di adduzione,  $\text{cal cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{°K}^{-1}$ ;  
 $T_g$  = temperatura del plasma  
 $T_s$  = temperatura della superficie della sonda.

Dove  $h$  è dato dalla relazione (8):

$$h = 1,05 (K/D) Re^{0,5} Pr^{0,3} \quad (3)$$

- $K$  = conducibilità termica globale,  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{°K}^{-1}$  (9);  
 $D$  = diametro della sonda, cm;  
 $Re, Pr$  = numeri di Reynolds e di Prandtl.

Per i calcoli si sono adottate le seguenti condizioni ai limiti:

- $T_g$  = 10.000 °K;  
 $T_s$  = 800 °K, temperatura di fusione delle giunzioni della sonda;  
 $v$  = 600  $\text{m sec}^{-1}$ , velocità del plasma.

Per questi valori si ottiene:

$$Re = \rho d v / \mu_A = 565 \quad ; \quad Pr = C_p \mu_A / K \approx 30$$

- $d$  = diametro del condotto anulare dell'anodo, cm ;  
 $\mu_A$  = viscosità dinamica del gas di plasma (8), cp;  
 $C_p$  = calore specifico del gas di plasma (8),  $\text{cal gr}^{-1} \text{°K}^{-1}$ ;  
 $\rho$  =  $pW/RT$  = densità del gas di plasma,  $\text{gr dm}^{-3}$ ;  $p = 1 \text{ atm}$ ;  $W$  = peso molecolare dell'Argo, 39,944  $\text{gr mole}^{-1}$ ,  $R = 0,082 \text{ lt atm } \text{°K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$ .

In definitiva si ha:

$$h = 0,23 D^{-1} \quad (4)$$

In Tabella 2 vengono dati i valori di  $Q = qS$ , per i quattro tipi di sonda usati.  $S$  è la superficie della testina rivolta verso il plasma.

Tabella 2

	$D,$ $cm$	$S,$ $cm^2$	$Q, \text{cal sec}^{-1}$
Sonde 1, 2, 3	0,6	0,40	184
Sonda 4	0,3	0,15	115

E' così possibile determinare la portata minima  $G$  dell'acqua di raffreddamento, dalla relazione:

$$G = Q / C_p \Delta T \quad (5)$$

$C_p$  = calore specifico dell'acqua, cal  $\text{gr}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\Delta T$  = variazione della temperatura dell'acqua di raffreddamento:  $T_e=10^\circ\text{C}$ ,  $T_u=40^\circ\text{C}$ .

Adottando per  $Q$  un valore di sicurezza di 200, si ottiene  $G = 0,4 \text{ lt min}^{-1}$ . E' inoltre possibile stabilire lo spessore massimo delle testate delle sonde per avere tra la parete esterna ed interna un  $\Delta T$  di circa  $500^\circ$ :

$$s = k/Q \Delta T \quad (6)$$

$k$  = coefficiente di conduzione del rame, cal  $\text{cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$

Si ottiene  $s \approx 1,45 \text{ mm}$ .

In Tabella 3 sono riportate le caratteristiche di costruzione e di impiego delle quattro sonde usate nelle misure di pressione.

Tabella 3

SONDA N.	1		2		3		4	
TESTATA								
TUBI	$\phi_i, \text{mm}$	$\phi_e, \text{mm}$	$\phi_i$	$\phi_e$	$\phi_i$	$\phi_e$	$\phi_i$	$\phi_e$
1	0.7	1.0	1.0	1.2	1.0	1.2	0.7	1.0
2	3.2	3.8	2.6	3.0	2.6	3.0	1.8	2.0
3	4.0	5.0	4.0	5.0	4.0	5.0	2.6	3.0
PORTATA lt/min	0.5		2.2		2.2		0.6	

Caratteristiche costruttive e portata  $G$  dell'acqua di raffreddamento.

### 3 – CARATTERISTICHE DI FLUSSO

#### a) Misure della pressione di stagnazione

per un fluido in moto la pressione di stagnazione isoentropica  $p_s^i$  è correlata alla pressione statica del flusso libero  $p_\infty$  e al corrispondente numero di Mach  $M_\infty$  da <sup>(10)</sup>:

$$p_s^i / p_\infty = \left( 1 + \frac{\gamma(\gamma-1)}{2} M_\infty^2 \right) \quad (7)$$

$\gamma$  = rapporto dei calori specifici.

Per valori bassi del numero di Mach, quando gli effetti della comprimibilità divengono meno importanti, si può approssimare la (7) con la:

$$p_s^i / p_\infty = 1 + \frac{1}{2} \rho v^2 / p \quad (8)$$

$\rho, v$  = densità e rispettivamente velocità del flusso;  
 $g$  = accelerazione di gravità.

Per fluidi reali infine, la (8) può essere sostituita dalla:

$$p_s - p_\infty = C (\frac{1}{2} \rho v^2 / g) \quad (9)$$

con  $p_s$  pressione di stagnazione realmente misurata e  $C$  un fattore circa uguale ad 1 eccetto che per bassi valori di Reynolds. Il termine tra parentesi è la pressione di velocità  $p_v$ .

E' così possibile da misure di  $p_s$  risalire a valori di velocità locali.

per le misure, le sonde venivano centrate e spostate con viti micrometriche in modo che il loro ase fosse parallelo all'asse del jet e rivolte verso di esso.

Posto  $p_\infty$  = pressione ambiente, era possibile leggere direttamente a mezzo di due manometri differenziali posti in parallelo, di cui uno a ramo inclinato per misure più accurate, i valori di  $p_v = p_s - p_\infty$ .

Per assicurare la stabilità dello zero, dopo ogni lettura il sistema veniva aperto all'atmosfera.

### b) Profili di velocità e di portata

Da (7) e (9) è possibile determinare la velocità locale nota la densità. I valori di questa sono stati ottenuti considerando il plasma come un gas ideale. Adottando per  $T$  la temperatura locale sperimentale ottenuta per via spettroscopica (<sup>11</sup>) alla periferia del jet i valori della densità sono stati estrapolati per  $p$  e  $T$  tendenti alla condizione ambiente.

Nelle Tabelle 4, 5, 6 (anche pagina seguente) sono riportati i valori radiali della pressione di velocità, della velocità e della portata per tutte e quattro le sonde a varie altezze del jet sia per le condizioni di taratura, che per le condizioni A e B.

Tabella 4

z = 3 mm	$P_v$ in $\text{N}_2\text{O}$				v. in $\text{sec}^{-1}$				$\rho v$ in $\text{gr da}^{-1} \text{sec}^{-1}$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
r = 0	30	30	32	30	19	19	20	19	308	307	330	308
1	28	18	28	30	18	15	18	19	298	240	298	308
2	22	16	24	30	16	14	17	19	262	237	278	308
3	16	10	18	16	13	11	14	14	214	176	224	224
4	10	0	12	2	11	0	12	3	176	0	188	73

Profili radiali di pressione di velocità, velocità e portata specifiche delle 4 sonde in condizioni di taratura

Tabella 5

z = 3 mm	$P_v$ in $\text{N}_2\text{O}$				v. in $\text{sec}^{-1}$				$\rho v$ in $\text{gr da}^{-1} \text{sec}^{-1}$				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
A	r = 0	263	480	340	470	280	411	380	540	168	273	234	324
	1	190	210	340	280	210	280	385	300	130	168	231	180
	2	125	200	280	200	200	246	281	346	120	167	176	167
	3	70	120	220	130	110	168	211	202	105	131	170	141
	4	30	0	180	80	80	0	182	121	72	0	162	108
B	r = 0	138	172	158	160	210	222	222	224	126	138	133	134
	1	112	142	110	130	180	205	181	186	108	123	108	117
	2	87	112	90	88	130	168	151	143	80	100	80	89
	3	58	88	76	50	110	136	120	97	68	81	72	58
	4	32	40	17	21	70	120	38	40	48	70	23	28

Profili radiali di pressione di velocità, velocità e portata specifiche delle 4 sonde nelle condizioni operative A e B.

Tabella 5

		$P_{v, \text{mm H}_2\text{O}}$				$v, \text{m sec}^{-1}$			
SONDA		1	2	3	4	1	2	3	4
$z = 25 \text{ mm}$									
A	$r = 0$	78	140	180	190	143	192	218	224
	1	68	140	170	188	131	180	212	216
	2	57	135	168	150	112	170	190	179
	3	41	120	140	110	79	139	150	133
	4	27	100	100	80	50	80	80	79
B	$r = 0$	49	64	84	80	89	122	140	137
	1	46	64	80	78	90	110	123	120
	2	40	60	78	50	74	88	98	78
	3	29	48	64	30	55	68	79	54
	4	19	35	44	20	38	44	59	39
$z = 45 \text{ mm}$									
A	$r = 0$	38	70	76	74	89	110	123	121
	1	35	70	74	70	95	112	116	112
	2	31	65	70	64	81	85	98	94
	3	25	50	62	54	53	64	71	66
	4	19	30	54	46	38	48	61	55
B	$r = 0$	18	27	46	28	52	67	87	68
	1	15	25	38	25	42	55	68	55
	2	14	21	30	23	37	44	55	46
	3	12	19	28	20	31	39	48	40
	4	10	15	21	17	26	33	39	35
$z = 55 \text{ mm}$									
A	$r = 0$	18	38	48	40	49	69	78	71
	1	17	34	46	39	45	61	71	65
	2	16	32	44	36	39	51	59	54
	3	15	28	41	32	34	40	49	43
	4	14	24	38	28	30	31	38	33
B	$r = 0$	9	17	18	15	27	39	39	37
	1	7,8	17	15,5	14	28	38	37	35
	2	7,5	16,5	15	13	25	37	36	33
	3	5	16	14	12	23	35	33	30
	4	4	15	13	11	21	32	30	27

Profili radiali di pressione di velocità e di velocità delle 4 sonde, nelle condizioni operative A e B, a varie distanze assiali.

Abbiamo ritenuto opportuno per un confronto più diretto, riportare in diagramma alcuni di tali valori. In particolare in Fig.1 i valori di flusso nelle condizioni di taratura a temperatura ambiente ed in Fig.2 quelli per l'altezza assiale  $z = 5 \text{ mm}$  nelle condizioni A e B.

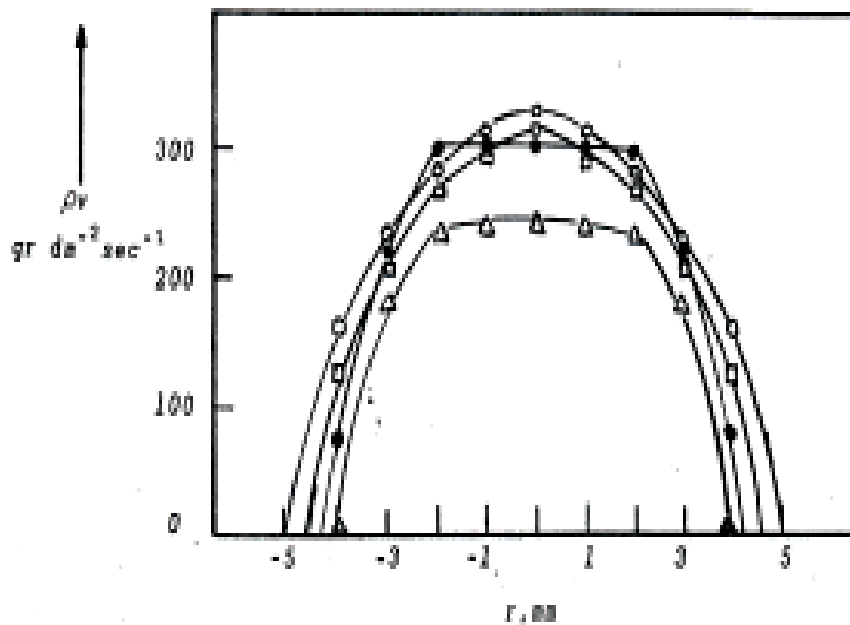
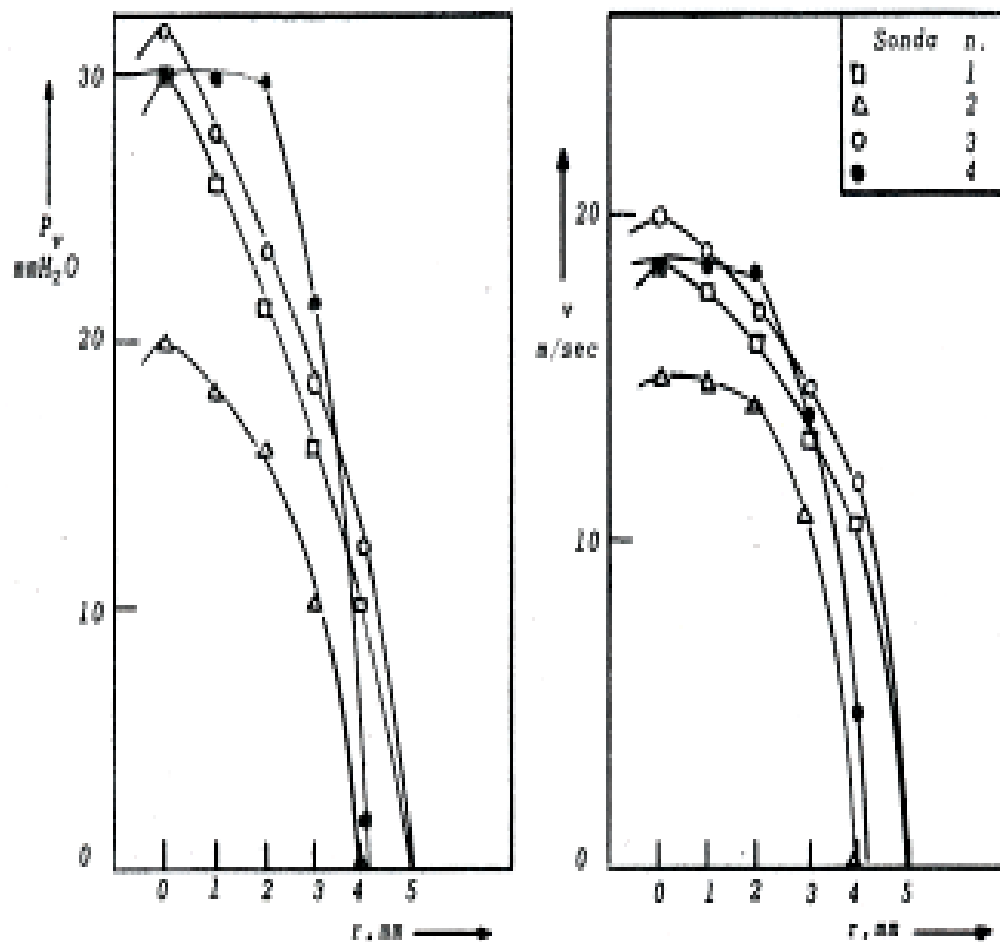


Fig. 1 - Profili radiali di pressione di velocita', velocita' e portata specifica delle 4 sonde in condizioni di taratura; distanza assiale  $z = 5$  mm, temperatura ambiente.

Fig. 1

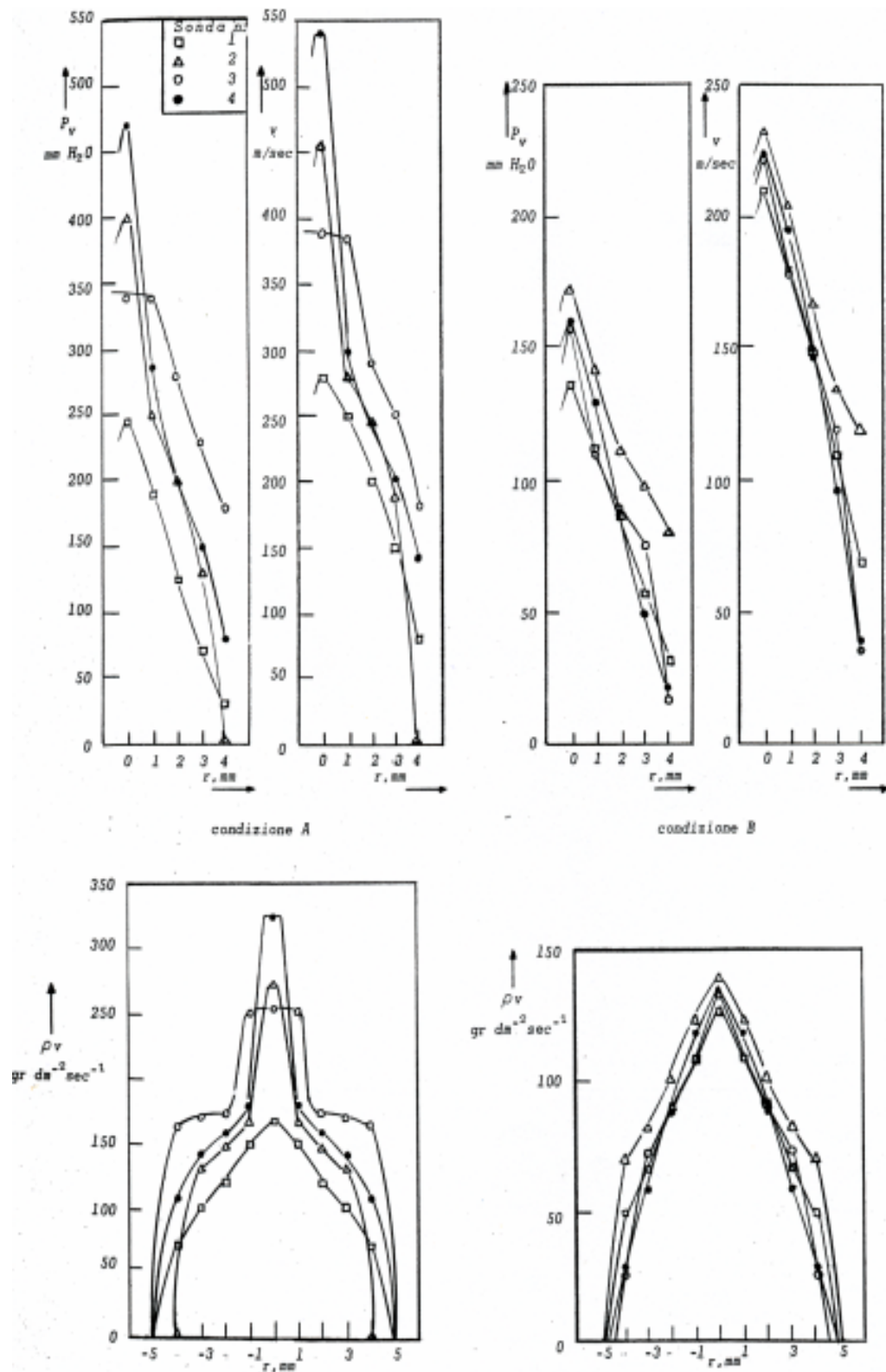


Fig.2 - Profili radiali di pressione di velocità, velocità e portata-specifica delle 4 sonde nelle condizioni operative A e B; distanza assiale  $z = 5$  mm.

Fig. 2

In tabella 7 vengono riportate le divergenze tra i valori di portata  $m^*$  integrati sulla sezione per  $z = 5$  mm, mediante la:

$$m^* = 2\pi \int_0^R \rho v r dr \quad (10)$$

e quelli misurati a mezzo flussimetro.



Tabella 7

$\Delta_{\text{sonda-flussimetro}} \%$

<b>SONDA N°</b>	<b>TARATURA</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	-7	-7	+5
2	+3	+	+4
3	+5	+4	+5
4	+3	+3	+3

E' possibile osservare che la sonda n° 4 è quella che dà il minimo errore medio. Essa inoltre presenta, essendo di dimensioni minori delle altre, l'indubbio pregio di dare una maggiore risoluzione spaziale delle caratteristiche di flusso. Le altre sonde, dando valori medi su sezioni più grandi, tendono ad appaiare i gradienti di velocità e di portata.

In Fig. 3 si riportano i profili radiali di  $p_v$  e di  $v$  per varie altezze del jet nelle condizioni operative A e B, determinati con la sonda n° 4.

#### 4 – PROFILI DI VELOCITA' DA PROFILI DI TEMPERATURA

Cottschlich e coll. <sup>(12)</sup> partendo dall'equazione generale dell'energia hanno derivato una relazione che permette di determinare  $v$  dalla conoscenza della distribuzione parziale della temperatura. Tale formula è la seguente:

$$(11) \quad v = \frac{\lambda(\partial^2 T/\partial r^2 + \frac{1}{2} \partial T/\partial r + \partial^2 T/\partial z^2) + d\lambda/dT(\partial T/\partial r + \partial T/\partial z)^2 - u}{\rho C_p (\partial T/\partial z)}$$

- $r$  = distanza radiale dall'asse del plasma, cm;
- $\lambda$  = conduttività termica del plasma, cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> °K<sup>-1</sup>;
- $u$  = potere radiante specifico, cal sec<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>;

$\rho, C_p, \lambda, u,$  sono funzioni della temperatura, poiché il sistema è in LTE e a  $P = \text{cost.}$

La validità di (11) presuppone le seguenti assunzioni:

- l'arco-jet produce un flusso axi-simmetrico in stato stazionario;
- la velocità ha soltanto una componente assiale;
- le variazioni di energia cinetica nella sezione assiale sono piccole in confronto con le variazioni di entalpia statica;
- la dispersione di energia viscosa è trascurabile;
- il plasma è trasparente alle proprie radiazioni.

Tale formulazione risulterebbe utile se si considera che si può calcolare il profilo di  $v$  senza interferire con il flusso del plasma.

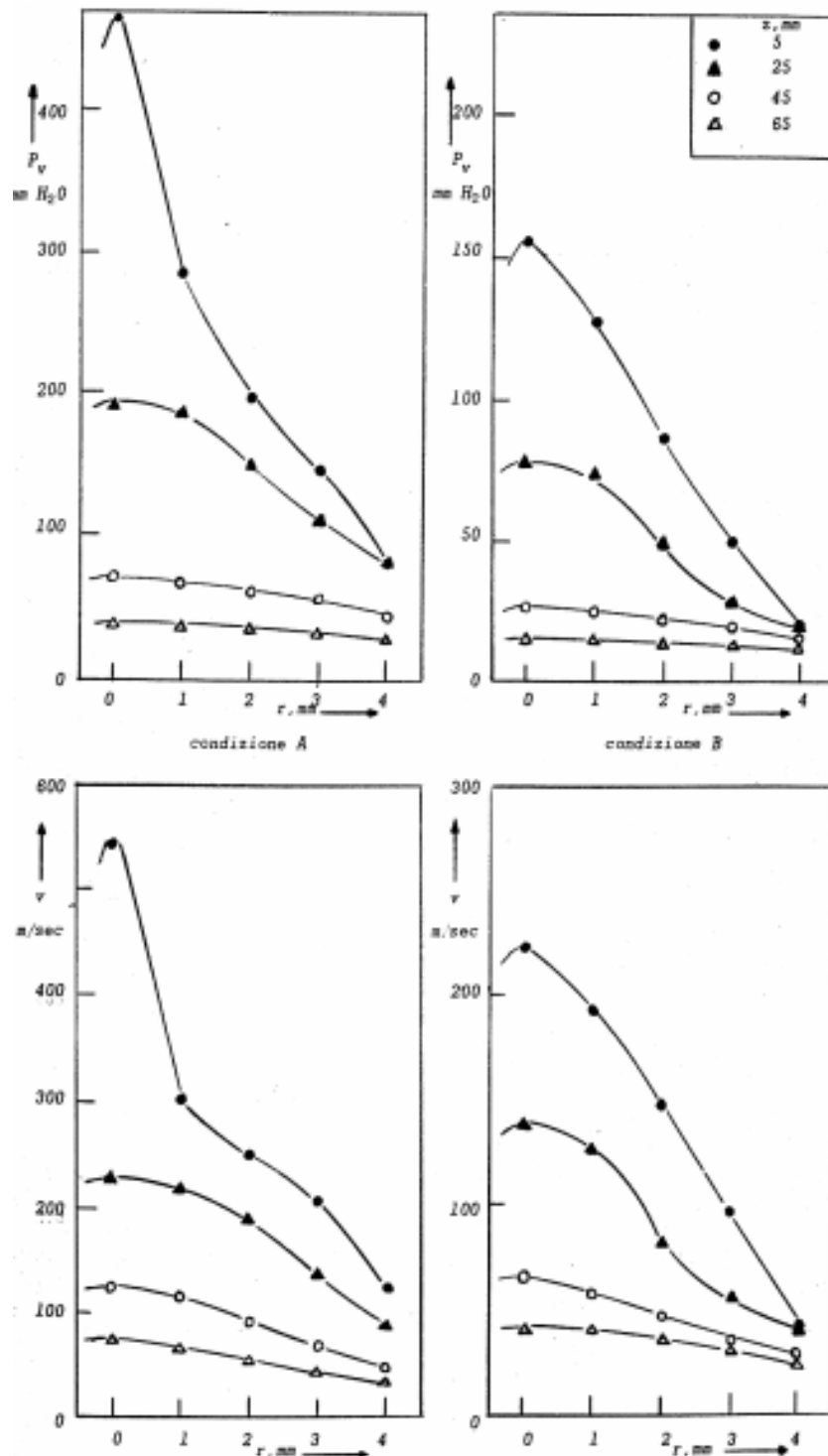


Fig.3 - Profili radiali di pressione di velocita' e di velocita' della sonda n.4 nelle condizioni operative A e B a varie distanze assiali.

Fig. 3

La misura di T viene fatta con metodi spettroscopici.

Noi abbiamo derivato i profili delle velocità nelle condizioni A e B per  $z = 5$  mm da profili di temperatura già a disposizione <sup>(11)</sup> (vedi Fig. 4).

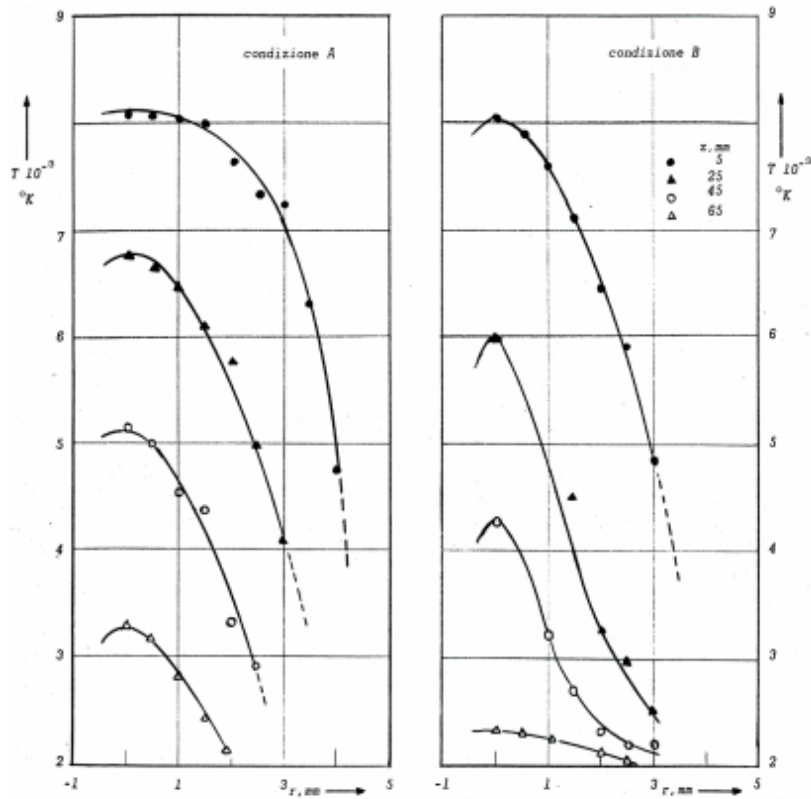


Fig.4 - Profili radiali di temperatura per le condizioni operative A e B a varie distanze assiali.

Fig. 4

Le derivate delle temperature sono state ottenute per mezzo del calcolatore elettronico Olivetti Programma 101 mediante differenziazione numerica <sup>(13)</sup>. I calori specifici sono stati reperiti in un lavoro di Drellishak <sup>(7)</sup>, mentre i valori della conduttività termica sono stati presi da Bosnjakovic <sup>(14)</sup>. Il termine  $u$  è trascurabile <sup>(15)</sup>.

Tali profili sono stati confrontati in Fig. 5 con quelli ottenuti nelle stesse condizioni con la sonda n° 4.

Le differenze sono notevoli e le portate integrate sulla sezione portano ad una divergenza del 30% in meno per le condizioni A e del 20% in meno per la condizione B, rispetto a quelle misurate a mezzo flussometro.

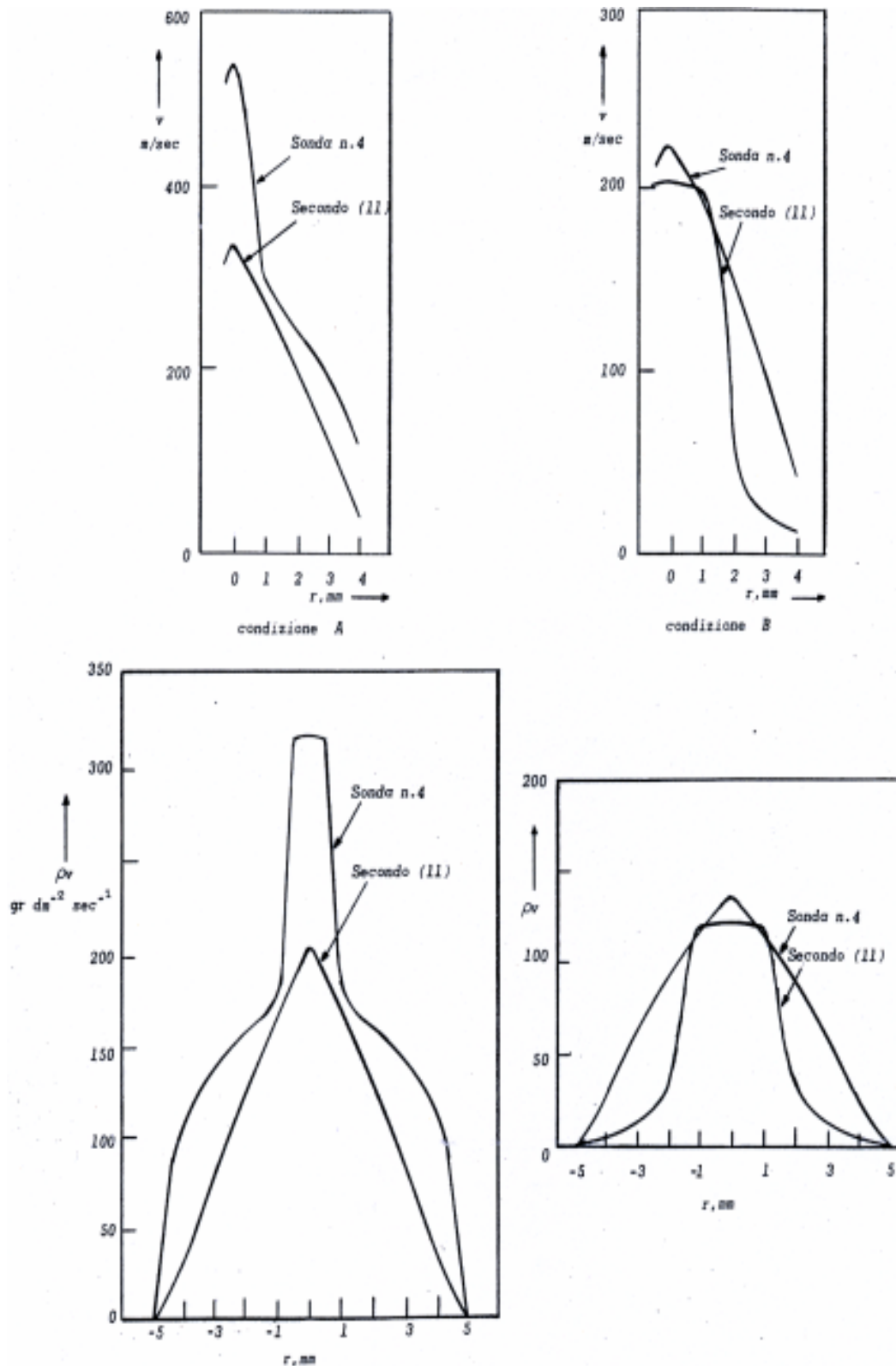


Fig.5 - Raffronto dei profili radiali di velocita' e di portata specifica ottenuti mediante la sonda n.4 e la formulazione (II) nelle condizioni operative A e B; distanza assiale  $z = 5$  mm.

Fig. 5

Riteniamo pertanto che nelle nostre condizioni la (II) non sia applicabile.

Una delle cause potrebbe essere l'aver trascurato l'effetto di diffusione. Noi abbiamo calcolato secondo il Bird<sup>(16)</sup> che il coefficiente di autodiffusione dell'Argo  $D_{AA}$  a  $10.000^\circ\text{K}$  ha un valore di circa  $0,5 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ , cioe' circa 10 volte quello a temperatura ambiente.

Un discorso analogo vale per i valori di viscosità dinamica  $\mu_A$  alle basse temperature. Il valore che noi abbiamo calcolato (17) è di circa 5 cp a 1.000°K e quindi circa 10 volte inf. rispetto a quello a 10.000°K.

## 5 – CONCLUSIONE

La tecnica sperimentale impiegata per la determinazione dei profili di velocità ed i portata di un plasma-jet ad Argo, richiede sonde di particolare forma costruttiva.

Consideriamo i risultati abbastanza soddisfacenti dato che le prove furono condotte in condizioni tecniche gravose e che le caratteristiche del flusso sono complesse e di difficile soluzione analitica.

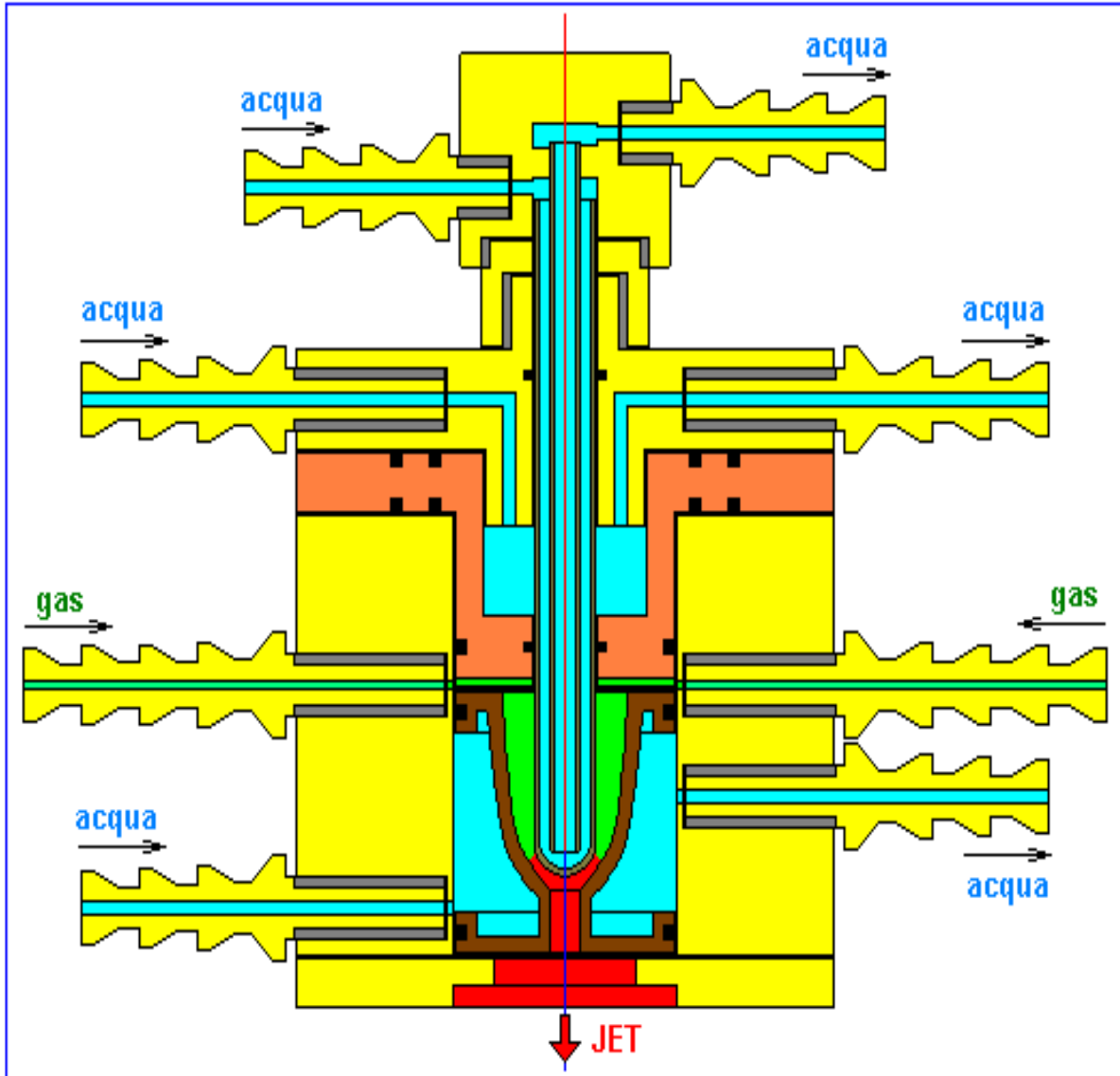
## BIBLIOGRAFIA

- <sup>(1)</sup> S.A. Rienzi, A. Gaydon, *High Temperatures – High Pressures*, 1, 232 (1969).
- <sup>(2)</sup> J. Grey, P.F. Jacobs, *AIAA Journal*, 3, 433 (1964).
- <sup>(3)</sup> R.P. Benedict, “Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurement”, Wiley, New York, 1969, p. 237.
- <sup>(4)</sup> L. Angelin, M. Pinton, G. Cevales, “Dinamica delle Reazioni Chimiche” CNR, CSC, Roma, 5, 247 (1967).
- <sup>(5)</sup> G. Smitz, H.J. Patt, Meeting of the AGARD, Pisa 1965.
- <sup>(6)</sup> M. KelHachker, *Nuclear Fusion*, 4, 294 (1964).
- <sup>(7)</sup> K.S. Drellishak, C.F. Knopp, A. B. Cmabel, *Phys. Fluid*, 6, 1280 (1963).
- <sup>(8)</sup> G. R. Chludzinski, R.H. Kadlek, Meeting A.I. Che-E.I. Chem. E., London, 1965, p. 82
- <sup>(9)</sup> A.B. Cambel, “Plasma Physics and Magnetofluidmechanics”, McGraw-Hill, New York 1963, p. 183.
- <sup>(10)</sup> P.L. Chambré, S.A. Schaff, “Physics Measurements in Gas Dinamics and Conbustion”, Princeton 1954, p. 111.
- <sup>(11)</sup> S.A. Rienzi, L. Angelin, *Rev. Int. Hautes Tempér. et Réfract*, in corso di stampa.
- <sup>(12)</sup> C.F. Cottischlich, J.A. Enright, F.C. Cadek, *AIAA Journal*, 6, 1085 (1966).
- <sup>(13)</sup> M. Abamowita, A. Steguni, “Handbook of Methematical Functions”, Dover Publ. Inc., New York, 1965, p.914.
- <sup>(14)</sup> F. Bosnjacovic, “Progress Int. research on Thermodymics and Transport Properties”, Acad. Press Inc., 1962, p. 618.
- <sup>(15)</sup> R.S. Tankin, J.M. Berry, *Phys. Fluids*, 7, 1620 (1964).
- <sup>(16)</sup> R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, Wiley, New York, 1960, p. 510.
- <sup>(17)</sup> R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, Wiley, New York, 1960, p. 23.

# APPENDICE

## A) IL MOTORE A PLASMA

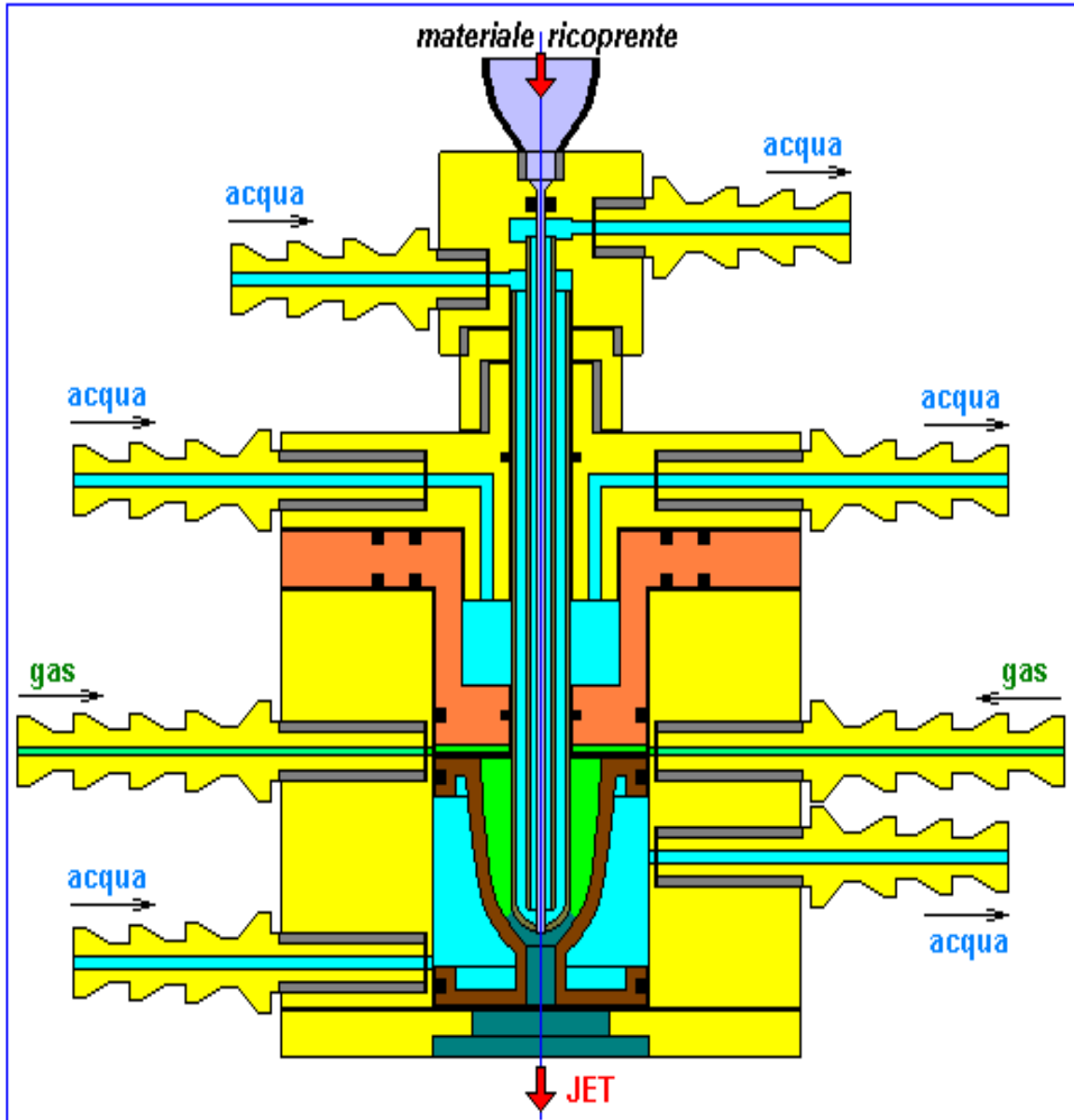
*Funzionava a Plasma di Argo.*



## B) IL RICOPRITORE A PLASMA

E' tratto, come variante, dal MOTORE A PLASMA.

Funzionava a Plasma di Argo e per materiale ricoprente era stato scelto il biossido di silicio. Il mezzo da ricoprire erano i denti di una ruota dentata di Acciaio al Mn.



### C) IL MOTORE RAZZO-PLASMA

E' tratto dal MOTORE A PLASMA.

E' stato progettato e costruito successivamente nei Laboratori di un'azienda privata.

Completamente fuso nel corso del sesto esperimento.

I profili di velocità era quasi tripli rispetto a quelli del Motore a Plasma (1): funzionava a Plasma di Idrogeno in turbolenza di Ossigeno.

*I profili di velocità si sono dimostrati almeno quadrupli rispetto al motore a Plasma iniziale.*

