

## PARAMETRI DEL PLASMA E FORZE ELETTROMAGNETICHE INDOTTE DALL'INTERAZIONE MHD IN REGIMI IPERSONICI

*Carlo .A. Borghi, Andrea Cristofolini, Chiara Latini e Gabriele Neretti*

Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università degli Studi di Bologna  
Viale Risorgimento, 2, 40135, Bologna, Italy

In questa memoria vengono descritti i dati sperimentali ottenuti nell'ambito del progetto CAST rivolto alla creazione di un codice MHD per da utilizzare in fase di progetto di veicoli spaziali per il controllo dell'aerodinamica e dei flussi termici nelle immediate vicinanze del velivolo. Il codice MHD di CAST [1] integra il modello dell'elettrodinamica, della fluidodinamica e della cinetica del plasma. Tale modello è tridimensionale tempo dipendente per regimi magnetici diffusivi. Le indagini sperimentali descritte in questa nota hanno lo scopo di validare il modello numerico per mezzo di campagne sperimentali appositamente progettate. Le condizioni sperimentali debbono quindi riguardare le particolari applicazioni e le condizioni operative specifiche delle applicazioni citate. I dati sperimentali debbono essere non solo qualitativi, ma anche quantitativi e con un elevato grado di accuratezza.

A tal fine sono state messe a punto tecniche diagnostiche per la misura dei parametri di plasma di diverso tipo, i cui risultati sono stati confrontati e verificati vicendevolmente. I parametri di plasma sono i dati di ingresso del sistema MHD. I dati di uscita, generati dall'interazione MHD, sono i campi di forza elettromagnetica, ed in particolare i campi di corrente, i campi elettrici ed i campi di pressione nelle regioni vicine alla superficie del veicolo spaziale. Partendo dai parametri del plasma il codice calcola i campi di forza e determina i parametri di controllo del flusso del gas e del flusso termico. I campi elettromagnetici ed i campi di pressione sono stati misurati e vengono utilizzati per la verifica e la validazione del codice.

Le indagini sperimentali sono state realizzate in una galleria ipersonica in flussi di argon a Mach 6 e Mach 15. Il gas solitamente viene riscaldato per mezzo di una scarica elettrica e quindi viene accelerato da un ugello ipersonico. All'uscita dell'ugello viene posto il provino MHD dotato di un sistema di magneti permanenti. Sono stati fatti esperimenti con provini a geometria conica con tre magneti permanenti di forma anulare integrati nel provino, provini con geometria troncoconica e cilindrica con base minore del cono e base del cilindro poste contro il flusso. Nell'ambito del progetto sono anche previsti esperimenti in azoto ed infine in aria. Gli esperimenti in argon sono realizzati con provini conici nella galleria ipersonica HEAT di Alta-Centospazio di Pisa. I test in azoto sono in fase di realizzazione con provini troncoconici nella galleria Gibli del Cira (Centro Italiano Ricerche Aerospaziali) ed i test in aria verranno realizzati nella galleria ipersonica Scirocco di Cira con il provino cilindrico.

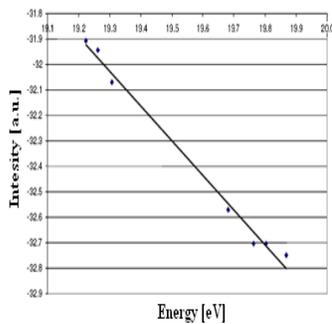
I parametri del plasma negli esperimenti in argon sono stati determinati utilizzando diverse tecniche diagnostiche sia in camera di ristagno prima dell'ingresso del plasma nell'ugello ed all'uscita da esso. In camera di ristagno sono state utilizzate tecniche spettrografiche. È stata determinata la temperatura elettronica per mezzo delle radiazioni di linea emesse dall'argon singolarmente ionizzato (Fig. 1), per mezzo delle radiazioni del continuo di ricombinazione e per mezzo del rapporto radiazioni del continuo e radiazioni di linea. I valori ottenuti sono stati confrontati fra loro ed è stata così determinata l'accuratezza relativa. In questa regione sono anche state fatte misure della densità elettronica da dell'allargamento di linea dell'idrogeno (presente in traccia nel gas). In particolare sono stati rilevati gli allargamenti delle linee  $\alpha$  e  $\beta$  dell'idrogeno ottenendo due valori della densità. Un terzo valore è stato ottenuto ipotizzando equilibrio di Saha alla temperatura elettronica misurata. All'uscita dell'ugello, di fronte all'onda d'urto causata dall'interazione del flusso ipersonico con il provino, la densità elettronica è stata ottenuta da misure dell'assorbimento di un fascio di micro-onde che attraversa il plasma. In tabella 1 sono riportati i risultati ottenuti con le tre tecniche spettrografiche sopra menzionate e per mezzo della diagnostica a micro-onde in un flusso di argon a Mach 6 a tre istanti di tempo dall'inizio del test. I valori della densità elettronica all'uscita dell'ugello sono stati anche calcolati partendo dai valori sperimentali dei parametri del plasma in camera di ristagno per mezzo di un codice che descrive la diffusione nell'ugello tenendo conto della cinetica del plasma in forte non-equilibrio.

A causa della particolare geometria del provino la componente di Faraday della corrente elettrica è distribuita in circuiti chiusi ad anello completamente contenuti nella regione del plasma. La corrente riscalda il plasma per effetto Ohmico, il quale emette radiazioni ed evidenzia gli anelli in corrispondenza delle regioni a campo magnetico elevato. In Fig. 2 è mostrata la distribuzione del campo calcolato calcolata per il sistema magnetico del provino conico. In Fig. 3 è riportata un'immagine sperimentale degli anelli di corrente in corrispondenza delle regioni ad elevato campo mostrate in Fig. 2. Nella configurazione considerata la componente di Faraday del campo elettrico è nulla. Misure della componente di Hall del campo in tre posizioni della parete laterale del provino conico in argon a Mach 15 sono mostrate in Fig. 4. In Fig. 5 sono riportate misure della pressione sulla parete laterale del provino con interazione MHD (linea blu) e senza interazione (linea rossa). Tali campi di forza sono anche calcolati dal codice MHD partendo dai parametri del plasma. In Fig. 6 è mostrato il calcolo dell'abbassamento della temperatura sulla base del provino cilindrico, calcolata dal codice MHD per i test in aria.

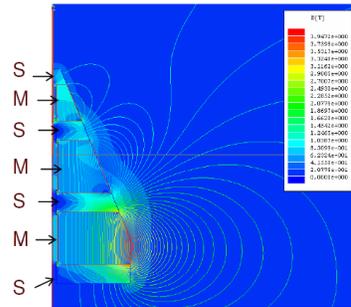
È dimostrata quindi la fattibilità di un dispositivo MHD per il controllo dell'aerodinamica per mezzo dei campi di forza e dei flussi termici indotti dall'interazione MHD in un veicolo ipersonico.

**Tabella 1. Misura della densità elettronica in camera di ristagno ed all'uscita dell'ugello**

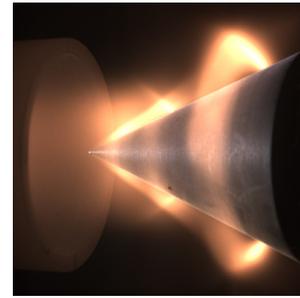
[ms]	Camera di ristagno			Uscita dall'ugello
	$H_{\beta}$ [m <sup>-3</sup> ]	$H_{\beta}$ [Griem] [m <sup>-3</sup> ]	Saha [m <sup>-3</sup> ]	Microonde [m <sup>-3</sup> ]
100	3.67E+20	3.54E+20	3.04E+20	3.15E+18
200	4.60E+20	4.90E+20	3.42E+20	3.82E+18
290	5.13E+20	5.30E+20	4.61E+20	4.30E+18



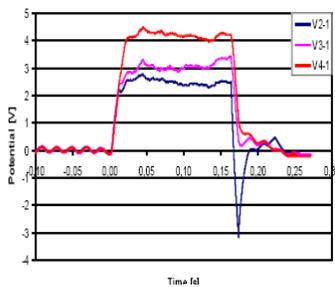
**Fig. 1. Determinazione della temperatura elettronica delle radiazioni di linea**



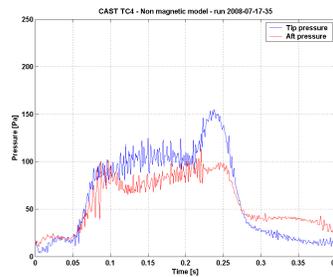
**Fig. 2. Calcolo del campo di induzione magnetica**



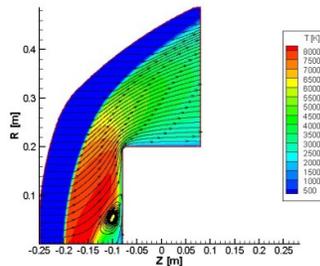
**Fig. 3. Anelli di corrente indotta all'interazione MHD a Mach 15**



**Fig. 4. Componente di Hall del campo elettrico a Mach 15**



**Fig. 5. Pressione senza MHD (linea rossa) e con MHD (linea blu) a Mach 15**



**Fig. 6. Diminuzione della temperatura sulla base del provino cilindrico**

1. A. Cristofolini, C.A. Borghi, and C. Latini, *Numerical Analysis of the MHD Interaction in Argon and Air Hypersonic Flows*, 17<sup>th</sup> International Conference on MHD Energy Conversion, Kanagawa (Japan), pp. 1-8, September 14-17, 2009
2. C.A. Borghi, A. Cristofolini, V. Granciu, G. Neretti, A. Passaro, D. Baccarella, and P. Caredda, *MHD Interaction in a Weakly Ionized Argon Flow at Different Mach Numbers*, 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Paper AIAA 2009-7368, pp.1-15, Bremen (Germany), October 19-22, 2009.