

INDAGINE SPERIMENTALE DELL'INTERAZIONE MHD IN FLUSSI IPERSONICI DI AZOTO.

C.A. Borghi, A. Cristofolini, C. Latini, G. 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 congiuntamente ad ALTA Centro-Spazio e CIRA (Centro Italiano Ricerche Aerospaziali), realizzati all'interno della galleria del vento CIRA GHIBLI, nell'ambito del progetto CAST (Advanced Aerothermodynamic Configurations for Space Transport) finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana. Il progetto CAST è rivolto alla creazione di un codice MHD 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 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 è stata messa a punto una tecnica diagnostica per la misura della densità elettronica del plasma basata sull'interferometria a microonde. 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.

L'indagine sperimentale condotta all'interno della galleria ipersonica GHIBLI, presso il CIRA, è basata sui promettenti risultati ottenuti nella galleria ipersonica HEAT di Alta S.p.A. con flussi di Argon a Mach 6 e 15. Diversi anni di studio e di sperimentazione hanno portato ad una migliore comprensione dell'interazione MHD applicata al volo ipersonico ed hanno permesso di affinare diverse metodologie diagnostiche atte alla rilevazione della presenza e dell'entità dell'interazione MHD e rivolte alla caratterizzazione del flusso libero di plasma. La campagna sperimentale realizzata in GHIBLI è stata condotta con un flusso di plasma di Azoto a Mach 6. GHIBLI è caratterizzato da un riscaldatore ad arco segmentato con una potenza installata di 2MW. Una volta ionizzato, il gas viene poi fatto espandere attraverso un ugello di tipo convergente-divergente. All'uscita dell'ugello viene posto un provino tronco-conico equipaggiato con un sistema di magneti permanenti di induzione residua pari a 1.4 T (Fig. 1 e 2). La stessa sperimentazione è stata condotta su un provino 'gemello' amagnetico in maniera tale da poter verificare la presenza dell'interazione MHD nel caso di provino magnetico.

Negli esperimenti in Azoto la densità elettronica del flusso libero all'uscita dell'ugello è stata stimata valutando l'assorbimento da parte del plasma di un fascio di microonde di frequenza variabile nella banda 2÷18 GHz. Nelle diverse condizioni di prova, la densità elettronica misurata risulta essere consistente rispetto alle variazioni di entalpia specifica e portata in massa del flusso. In Fig. 3 i risultati delle misure sono comparati ad una stima ottenuta dai valori di correlare dell'arco, della pressione totale e della frazione molare dell'Argon. I valori di densità elettronica misurati sono molto simili a quelli calcolati con il modello microscopico sviluppato nell'ambito CAST e sono un ordine di grandezza superiori rispetto a quelli ottenuti con altri modelli macroscopici quali il Kang Dunn. In figura 4 sono mostrati i risultati delle simulazioni del numero di Mach e la distribuzione delle correnti azimutali di Faraday e longitudinali di Hall.

A causa della particolare geometria magnetica 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 evidenziando la regione a campo magnetico elevato. Le immagini di Fig. 5 mostrano come, nel caso di provino magnetico, il fronte d'urto venga allontanato dal provino. La temperatura della superficie dei provini è stata rilevata utilizzando una fotocamera ad infrarossi. La temperatura del punto di ristagno in funzione del tempo di

prova è riportata in Fig. 6. Nel caso di presenza di interazione MHD la temperatura cresce più rapidamente raggiungendo valori superiori rispetto al caso non MHD. Tale comportamento è da attribuire al riscaldamento Ohmico, indotto nel fluido dalle di correnti all'interno del plasma.

Le densità elettroniche misurate nel flusso libero hanno portato ad una validazione positiva del codice di calcolo sviluppato nell'ambito del progetto CAST. L'interazione MHD genera forze e momenti in grado di modificare le caratteristiche termo-fluidodinamiche nel gas che circonda il provino.

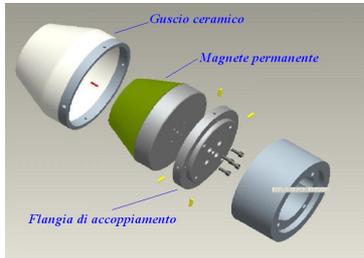


Fig. 1. Schema di assemblaggio del provino magnetico

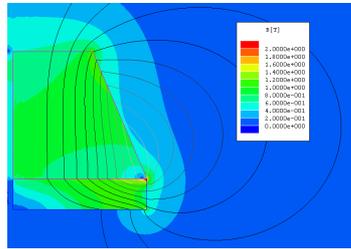


Fig. 2. Linee di induzione ed entità del campo magnetico prodotto

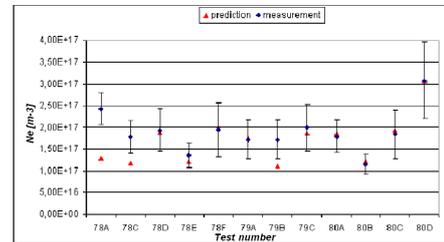


Fig. 3. Densità elettronica del flusso libero misurata mediante interferometria microonde (blu) e calcolata empiricamente (rosso) nei vari test.

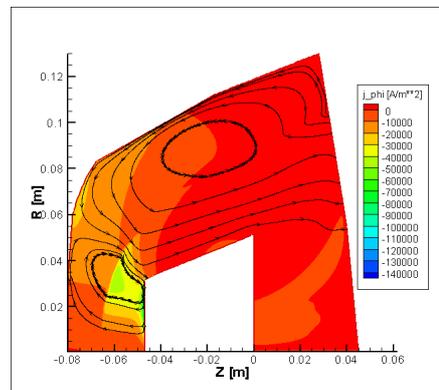
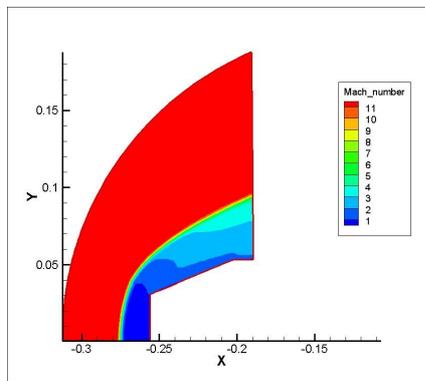


Fig. 4: Simulazioni numeriche. A sinistra il numero di Mach. A destra distribuzione delle correnti di Faraday (colormap) e di quelli di Hall (streamlines).

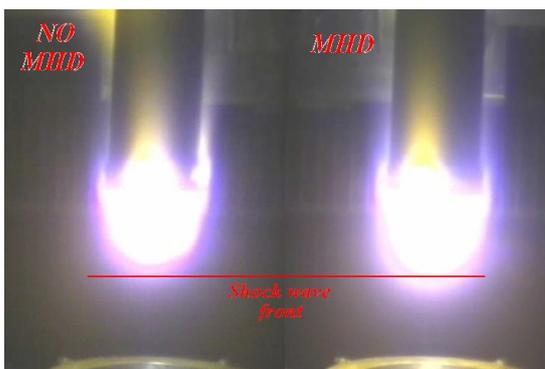


Fig. 5. Immagine dello shock sul provino non magnetico (sx) e magnetico (dx).

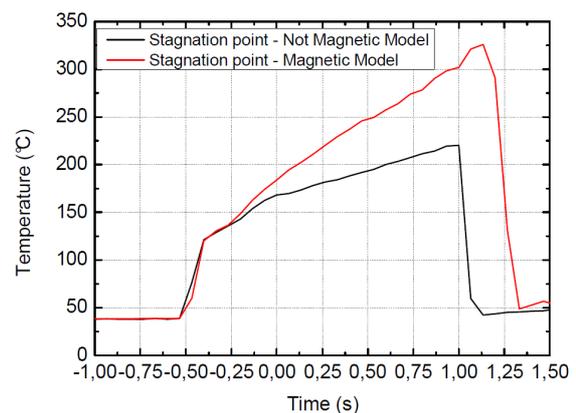


Fig. 6. Temperatura della superficie del provino nel punto di ristagno in assenza (nero) e in presenza (rosso) di interazione MHD.

1. A. Cristofolini, G. Neretti, and C.A. Borghi, *Plasma Parameters and Electromagnetic Forces Induced by the MHD Interaction in an Hypersonic Argon Flow Experiment*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 39, 2011.
2. E. Trifoni, C. Purpura, A. Martucci, E. Graps, A. Schettino, F. Battista, A. Passaro, D. Baccarella, A. Cristofolini and G. Neretti, *MHD Experiment at CIRA GIBLI Wind Tunnel*, 7th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, Bruges, May 9-11, 2011.