

MODELLISTICA MHD PER FUSIONE DI METALLI IN ORBITA

Francesco Lucchini, Michele Forzan, Fabrizio Dughiero

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale
Via Gradenigo 6/A, 35131 Padova, Italia

La recente attenzione verso il recupero dei detriti spaziali ha stimolato studi speculativi sull'utilizzo di fabbriche orbitali [1] per il riciclo dei satelliti inattivi in orbita, come illustrato in Fig. 1. In condizioni di microgravità, dove le tecniche di manipolazione tradizionali risultano impraticabili, la fusione di metalli mediante tecniche di induzione elettromagnetica si presenta come una soluzione promettente.

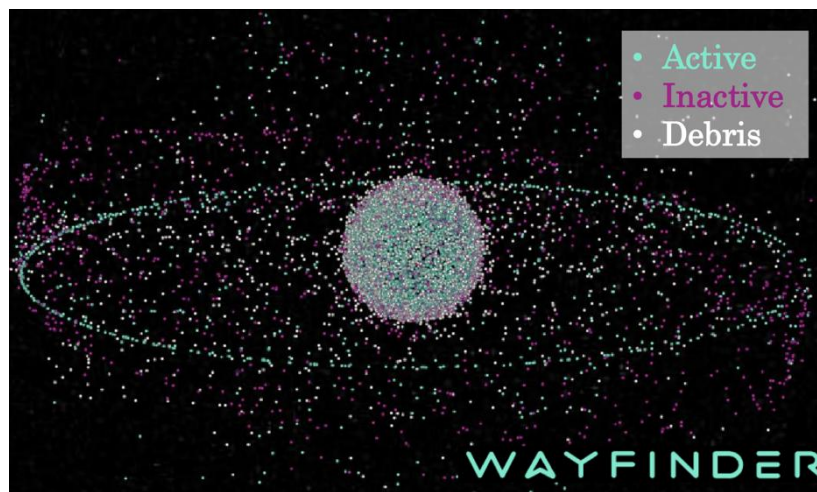


Fig 1: Mappa dei detriti e satelliti attivi ed inattivi attorno alla Terra.

Una adeguata progettazione del sistema di induzione richiede la conoscenza della dinamica della superficie libera del metallo fuso. Ciò richiede la risoluzione di un problema multifisico che accoppia elettromagnetismo, moto turbolento del fluido e fenomeni termici [2]. In microgravità, la forma della superficie libera è influenzata solo dalla tensione superficiale e dalla forza di Lorentz. Il tracciamento della forma della superficie libera durante l'evoluzione temporale viene svolto utilizzando diverse metodologie numeriche quali il "Volume of Fluid", oppure applicando sequenze di ri-discretizzazione del dominio. È di fondamentale importanza tracciare correttamente la superficie per poter imporre la condizione al contorno di radiazione, che rappresenta l'unico meccanismo responsabile del trasferimento di calore nel contesto della fabbrica spaziale.

Al fine di verificare la validità del software ad elementi finiti COMSOL® Multiphysics, è stato realizzato un modello numerico di induttore assialsimmetrico operante in condizioni terrestri, proposto in [3]. L'evoluzione della superficie libera è stata valutata con i due approcci menzionati; in particolare, la Fig. 2(sinistra) mostra il campo di velocità ottenuto al termine della simulazione dopo un transitorio di 1 s. In condizioni terrestri, la forza di Lorentz deve

controbilanciare anche la gravità, tuttavia, come si evince dalla Fig. 2(destra), la parte bassa del sistema di induzione, lasciata libera per poter colare il materiale fuso, comporta una deformazione del campione che assume la caratteristica forma a goccia. In condizioni di microgravità questo effetto è ridotto, tuttavia il design ottimale dell'induttore, al fine di garantire una forma sferica del campione, è necessario. Il design preliminare del sistema può essere svolto analizzando esclusivamente il problema elettromagnetico. Infatti, come si evince in Fig. 2(destra), la forma a goccia si può intuire osservando il comportamento dell'induzione magnetica $\|\mathbf{B}\|$ e del campo di forza causato dal $\nabla \|\mathbf{B}\|^2$. La progettazione dell'induttore, attraverso tecniche di ottimizzazione parametrica e/o topologica può essere svolta minimizzando $\nabla \|\mathbf{B}\|^2$ lungo la superficie iniziale, assunta sferica. Ciò può comportare una diminuzione della deformazione della superficie libera ed assicura una forma quasi-sferica durante il processo di fusione.

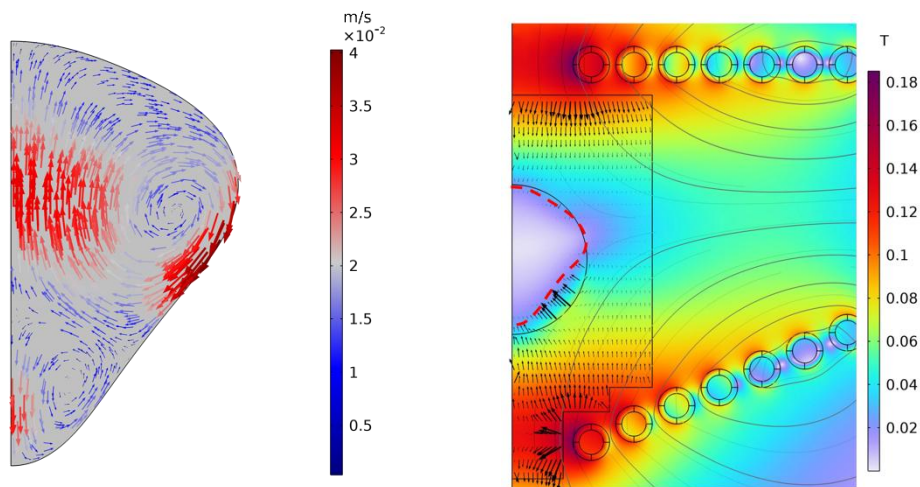


Fig 2: Superficie libera e campo di velocità al termine del transitorio di 1 s (sinistra). Forma della superficie libera ipotizzata (linea rossa tratteggiata) osservando $\|\mathbf{B}\|$ e campo $-\nabla \|\mathbf{B}\|^2$ ottenuti dall'analisi elettromagnetica (sinistra).

Bibliografia:

- [1] C. Sassanelli *et al.*, “Enhanced Factory for Extra-Terrestrial Space Technology Operations: Conceptualization and Scenario, ” *International Joint conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Springer, 2024, pp. 139–150.
- [2] L. Feng, S. Wan-Yuan, “Numerical investigation on frequency shift of an electromagnetically levitated molten droplet,” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 122, 2018, pp. 69-77.
- [3] S. Spitans *et al.*, “Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part II: Conventional electromagnetic levitation,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 47, pp. 522-536, 2016. *Journal of Heat and Mass Transfer* 122, 2018, pp. 69-77.