

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
"Applicazione configurazione Halbach
nei treni a levitazione magnetica"***

Tutor universitario: Prof. Piergiorgio Sonato

Laureando: Bertacche Fernando

Padova, 12/07/2024

Il funzionamento del treno maglev si basa su **tre aspetti** fondamentali:

- Levitazione;
- Propulsione;
- Guida.

Vantaggi:

- Zero emissioni di CO₂;
- Velocità elevate;
- Vibrazioni ridotte;
- Efficienza energetica.

Tre schemi magnetici impiegati:

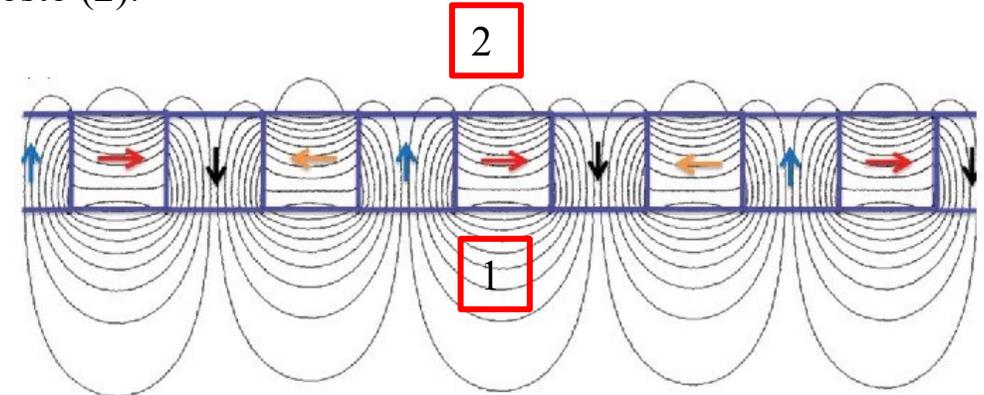
- **EDS**;
- **EMS**;
- **PMS**.



La configurazione Halbach è una disposizione di **magneti permanenti** che permette di aumentare il **campo magnetico** in un singolo lato (1) e ridurlo fino a un valore trascurabile, idealmente nullo, sul lato opposto (2).

La configurazione venne ideata da Klaus Halbach (1925-2000).

Equazione di Laplace:
$$\Delta\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}$$



ANDAMENTO CAMPO DI INDUZIONE MAGNETICA

$$B_y = B_0 \cdot \sin(k \cdot y) \cdot e^{-k \cdot h}$$

$$B_z = B_0 \cdot \cos(k \cdot y) \cdot e^{-k \cdot h}$$

$$B_0 = B_r \cdot (1 - e^{-k \cdot d}) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{m}\right)}{\frac{\pi}{m}}$$

y = direzione longitudinale

z = direzione verticale

m = numero di fasi

h = altezza di levitazione

VANTAGGI DELLA CONFIGURAZIONE

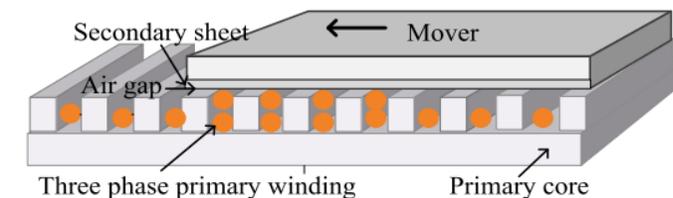
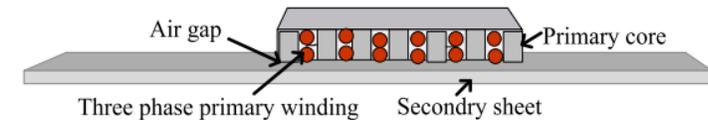
- Forza magnetica localizzata;
- Riduzione dei costi totali;
- Il motore non richiede laminazione;
- Ridotte perdite di isteresi e per correnti parassite.

La propulsione e la levitazione possono essere garantite da due tipologie di motori lineari:

- Motore lineare a induzione **LIM**;
- Motore lineare sincrono **LSM**;

LIM

- Rotore: Lamiera di alluminio con piatto in metallo posizionato sopra;
- Statore: Materiale ferromagnetico ove vengono posizionati avvolgimenti a tre fasi (primario).



LSM

- Rotore: materiali magnetici, tipicamente magneti o superconduttori;
- Statore: Materiale ferromagnetico ove vengono posizionati avvolgimenti a tre fasi (primario).

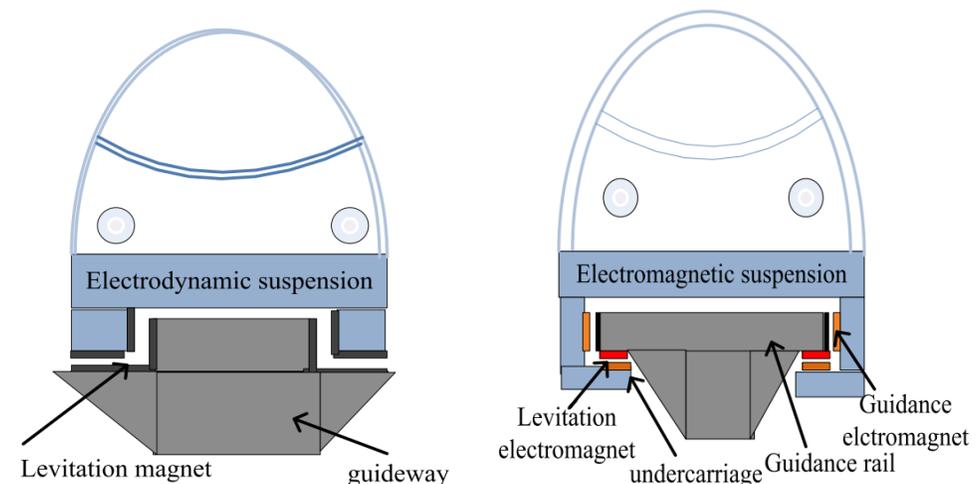
EDS vs EMS

EDS

- Forza repulsiva;
- Stabilità a velocità elevate;

EMS

- Forza attrattiva;
- Stabilità a velocità basse.



PMS (PERMANENT MAGNETIC SUSPENSION)

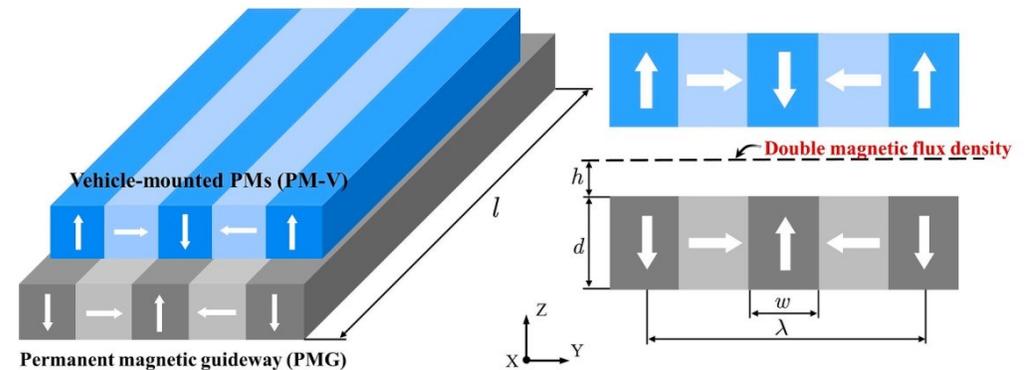
E' uno schema magnetico ove la forza risultante che garantisce la levitazione è generata dall'interazione magnetica tra magneti permanenti sul rotore (PM-V) e sullo statore (PMG) → doppia configurazione Halbach. I magneti permanenti sono NdFeB.

Il principale vantaggio è la completa passività del sistema, garantendo quindi una ridotta dispersione di energia.

Il principale svantaggio è l'instabilità del campo B lungo la direzione longitudinale → presenza di discontinuità.

La forza risultante presenta una simmetria circa sinusoidale, con picco sul polo di magnetizzazione del magnete centrale, con idealmente un flusso pari al doppio del caso di una singola configurazione.

Forza di levitazione:
$$F_z = \frac{10 \cdot B_r^2 \cdot l \cdot \lambda \cdot (\mu_r - 1) \cdot (e^{-k \cdot d} - 1)^2 \cdot e^{-k \cdot h}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi^2}$$



Oltre ad l ed a , la forza dipende anche dai parametri strutturali dei magneti permanenti:

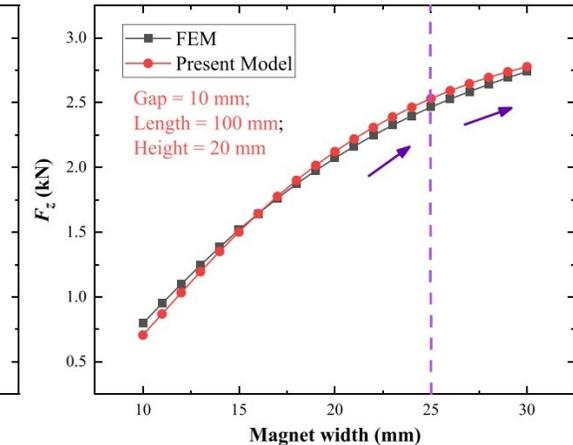
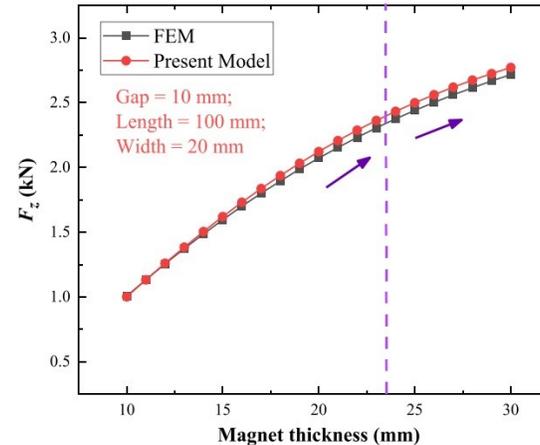
- Spessore b ;
- Larghezza w .

METODI PER OTTIMIZZARE LO SCHEMA

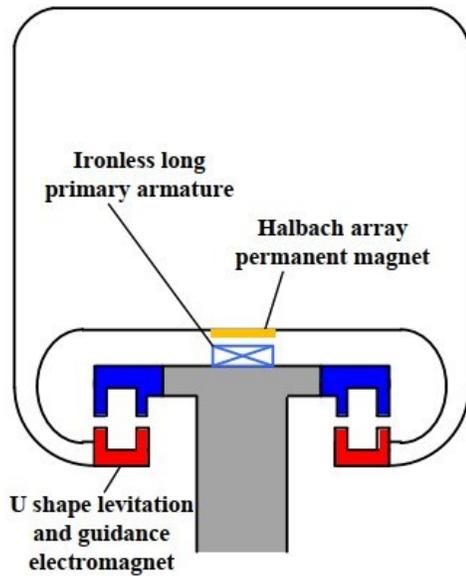
- Utilizzo di magneti Ce;
- Scelta $S_f = \frac{w}{b}$;

SVANTAGGI DELLA TIPOLOGIA

- Instabilità campo magnetico per lunghezze elevate della guida;
- Densità del flusso di B mai massimo;
- Non efficiente a velocità elevate;
- B che varia per la temperatura.

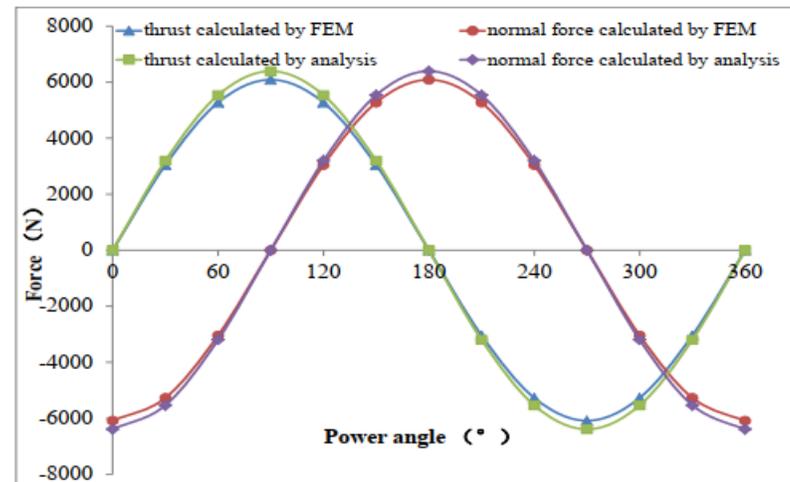


Lo schema PMLSM, ideato in Cina, presenta una forza di levitazione e propulsione ottenuta tramite le interazioni magnetiche tra i campi generati da magneti permanenti, elettromagneti e armatura primaria posta sulla guida.
L'andamento del campo B è molto vicino a quello sinusoidale, grazie alla configurazione Halbach e alle direzioni di magnetizzazione dei magneti.

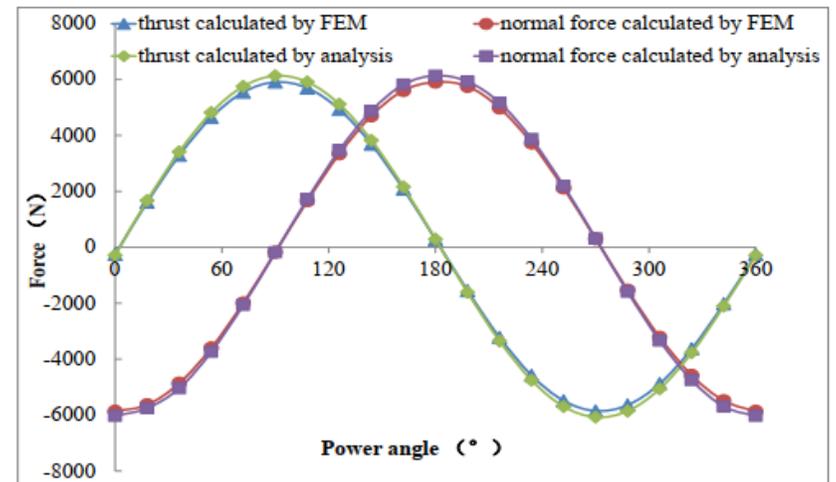


La forza di levitazione e la forza laterale dipendono da:

- Distanza tra i poli magnetici τ_p (I e II);
- Effetti della traversa in acciaio.



Caso I: τ_p costante (ideale)



Caso II: τ_p non costante (reale)

SISTEMA DI PROPULSIONE E DI TRAZIONE

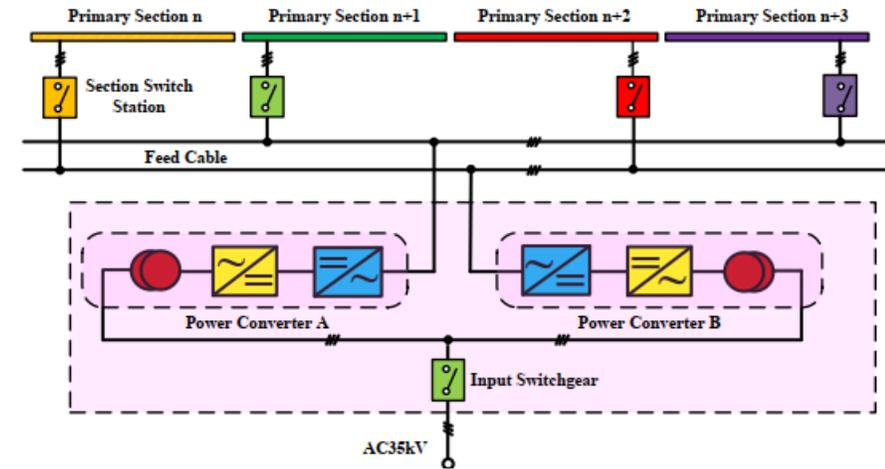
- Propulsione**

La velocità costante del rotore viene garantita dall'apertura e dalla chiusura alternata di interruttori posizionati su singoli blocchi dello statore.

- Trazione**

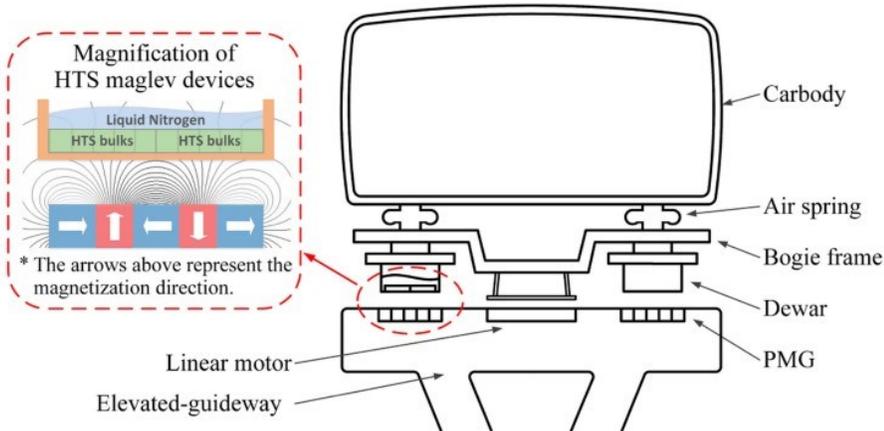
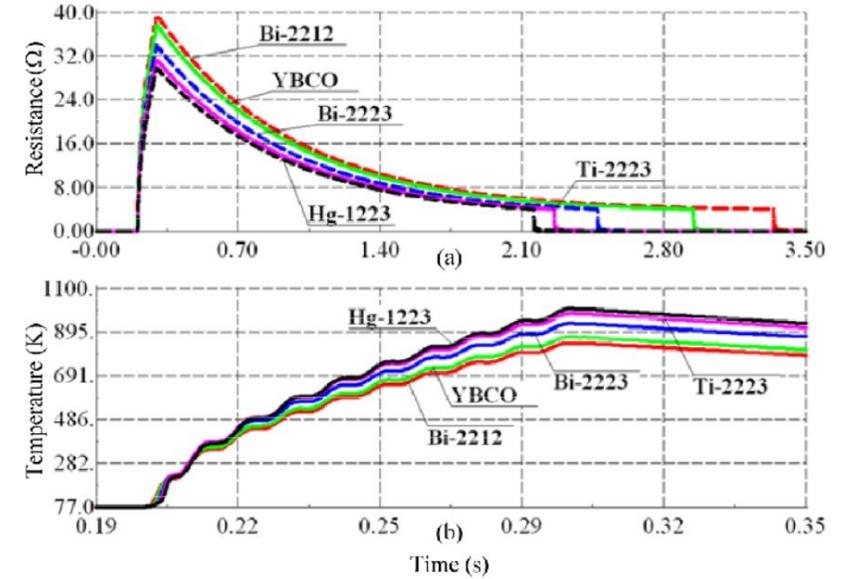
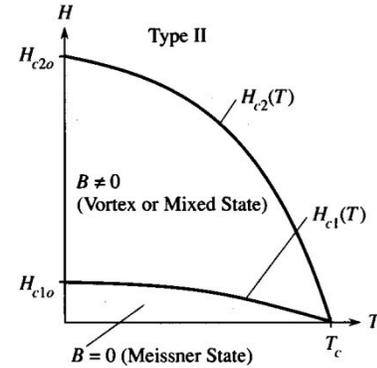
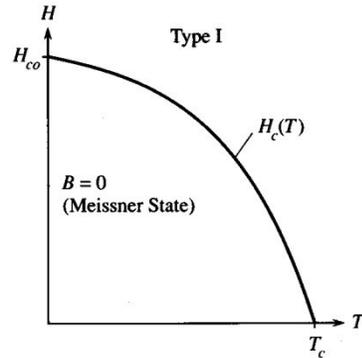
La trazione viene garantita attraverso la regolazione delle componenti di corrente lungo la direzione delle linee di campo "d" e lungo la direzione perpendicolare "q".

Forza orizzontale:
$$F_x = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \Psi_f \cdot i_{qs}$$



Vantaggi HTS:

- Elevata T_c ;
- Elevata J_c ;
- Elevata forza di pinning.



Disposizione HTS nei treni maglev

FORZA DI LEVITAZIONE F_{lev}

Elevata quando è elevato il gradiente di B.

$$F_{lev} = n \cdot (-4211,2 \cdot e^{-0,087z} + 6680,3 \cdot e^{-0,102z} + v_c \cdot c)$$

Modello valido per v_c medie-ridotte

- n = numero di HTS nel Dewar;
- z = altezza di levitazione;
- v_c = velocità del rotore;
- c = smorzamento.

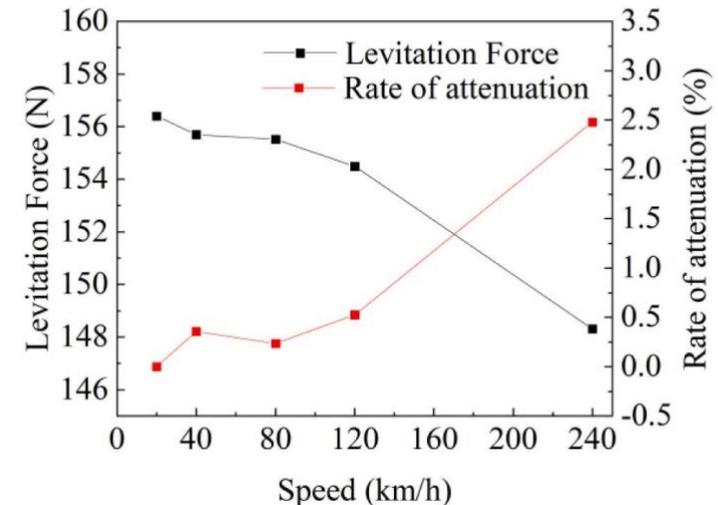
Per v_c elevate la forza di levitazione diminuisce:

- Deformazione magneti;
- Accelerazioni fluttuazioni del campo B;
- Perdita di energia.

Microstruttura

Influenza la capacità di pinning → importante scegliere un processo di realizzazione idoneo. Esempi:

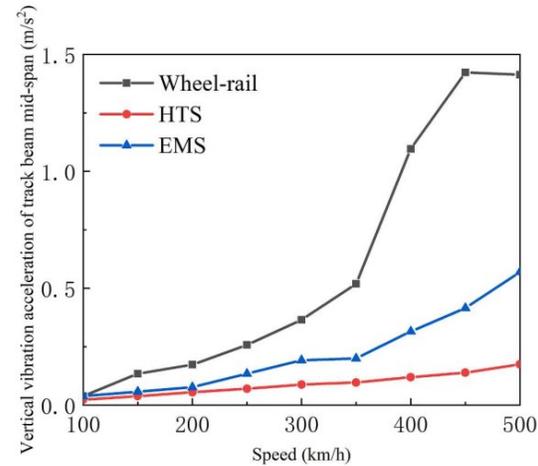
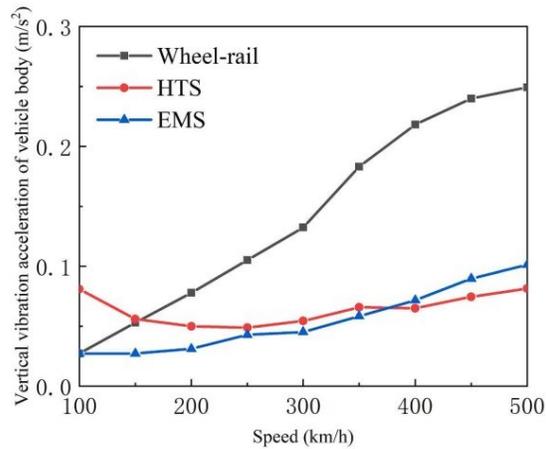
- Top Seeded Melt Growth;
- Multi Seeded Melt Growth;



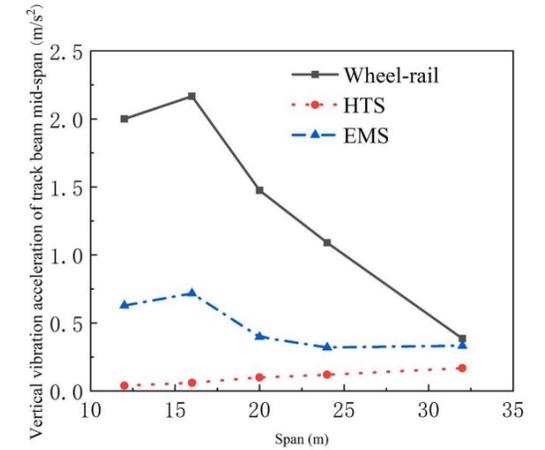
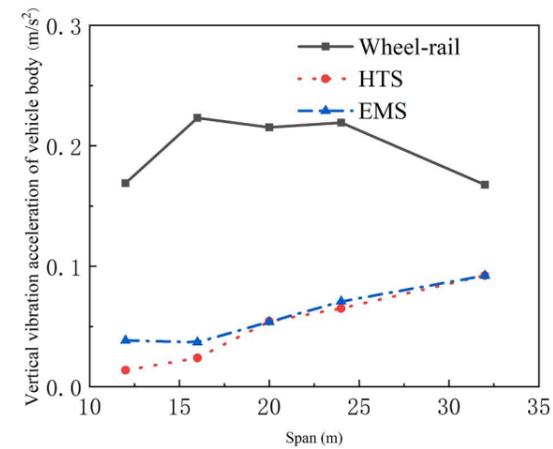
TRE TIPOLOGIE A CONFRONTO: EMS VS HTS VS TRENI A ROTAIA

Vengono valutate le vibrazioni registrate dal corpo treno e dai binari per condizioni esterne differenti

Caso I: velocità differenti



Caso II: lunghezze di ponte differenti



I treni a levitazione magnetica risultano un'opzione valida per una futura mobilità “green” per le elevate prestazioni dinamiche che li caratterizzano e per i ridotti impatti ambientali, ma tutt'ora non si è ancora in grado di realizzare tratte magnetiche ad elevata percorrenza, limitandone l'uso solo per ridotte percorrenze e solo in determinati paesi come Cina, Giappone e Corea del Sud. Si è lontani dall'aver in ogni parte del mondo un sistema ferroviario a levitazione magnetica, ma la direzione che si sta prendendo per raggiungere tale traguardo è quella «giusta».



FINE

Grazie mille per l'attenzione

Bibliografia delle immagini della presentazione

- [1] Y. Deng, K. Fan, H. Kuang, B. Su, J. Ye, J. Zeng, P. Zhan, “Concise magnetic force model for Halbach-type magnet arrays and its application in permanent magnetic guideway optimization”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 587, 2023.
- [2] S. Paul, “Optimisation of input power in linear induction motor (LIM) based Maglev vehicle”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 58, Part 1, 2022.
- [3] Jin, K. Wang, B. Zhang, L. Zhao, “Design and Application of an Ironless Halbach PMLSM Propulsion System for Medium Speed Maglev Vehicle”, *The 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, 23-26 March 2023, Chengdu, China.
- [4] Y. Ijiri, C. Poudel, P. Williams, L. Moore, T. Orita, M. Zborowski, "Inverted Linear Halbach Array for Separation of Magnetic Nanoparticles", *IEE Transactions on magnetics*, 2013.
- [5] Z. Deng, J. Li, L. Wang, D. Wu, Y. Yuan, “Dynamic performance of HTS maglev and comparisons with another two types of high-speed railway vehicles”, *Cryogenics*, vol 117, 2021.
- [6] Z. Deng, J. Li, H. Wang, Y. Li, J. Zeng, “Dynamic Simulation of the Vehicle/Bridge Coupled System in High-Temperature Superconducting Maglev”, *Computing in Science and Engineering*, vol. 21, 2019, IEEE.
- [7] S. Romphochai, K. Hongesombut, "Calculation of current limiting reactance of hybrid SFCL for low voltage ride-through capability enhancement in DFIG wind farms", *ResearchGate*, 2017.
- [8] Chuo Shinkansen: work in progress - We Build Value.
- [9] N. Haleeda, M. Kechik, R. Abd-Shukor, "Effect of Yb₂O₃ Nanoparticle Addition on Superconducting Properties of BSCCO (2223)/Ag Tapes by Acetate Precipitation Method", *ResearchGate*, 2017.