

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale  
«Levitazione magnetica ferroviaria:  
sistemi a confronto»***

Tutor universitario:

Prof. Piergiorgio Sonato

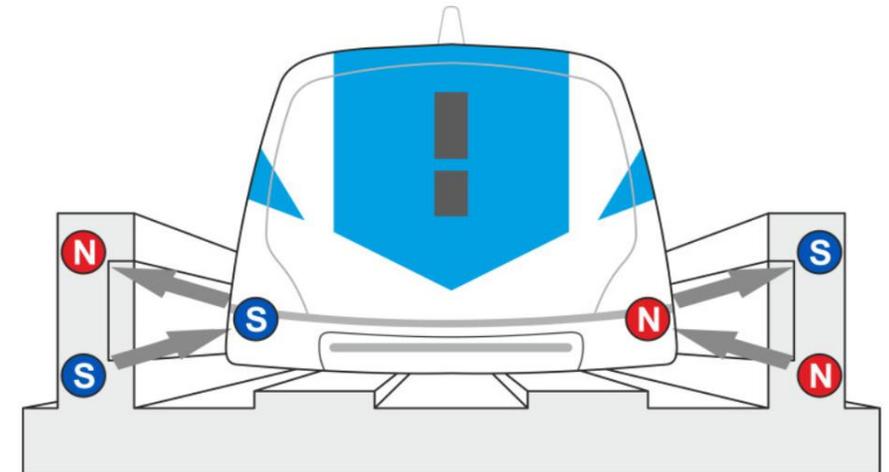
Laureando:

*Leo Carli*

Padova, 12/07/2024

La tesi si propone di:

- Analizzare e comparare diversi sistemi per la levitazione magnetica
- Evidenziare pregi e difetti di ogni sistema
- Individuare quali criticità si tentano di risolvere
- Individuare quali nuove sfide emergono



La tecnologia MagLev non è recente come si tende a credere:  
il primo brevetto risale al 1934 e le prime sperimentazioni agli anni '70.

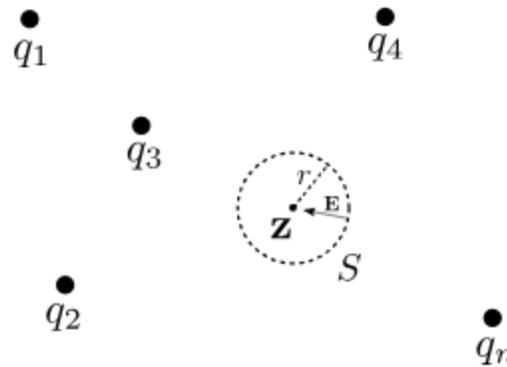


Esempio: la M-Bahn a Berlino nel 1989

Il futuro della Transrapid in Germania brutalmente interrotto in seguito ad un incidente il 22 settembre 2006 dove persero la vita 23 persone.



Enunciato: "Non è possibile ottenere una configurazione in equilibrio stabile di particelle in campo elettrostatico"



Più in generale, non si può avere un equilibrio stabile in campi elettromagnetici costanti nel tempo senza forze di contatto fisico.

Il Teorema di Earnshaw **non** prevede:

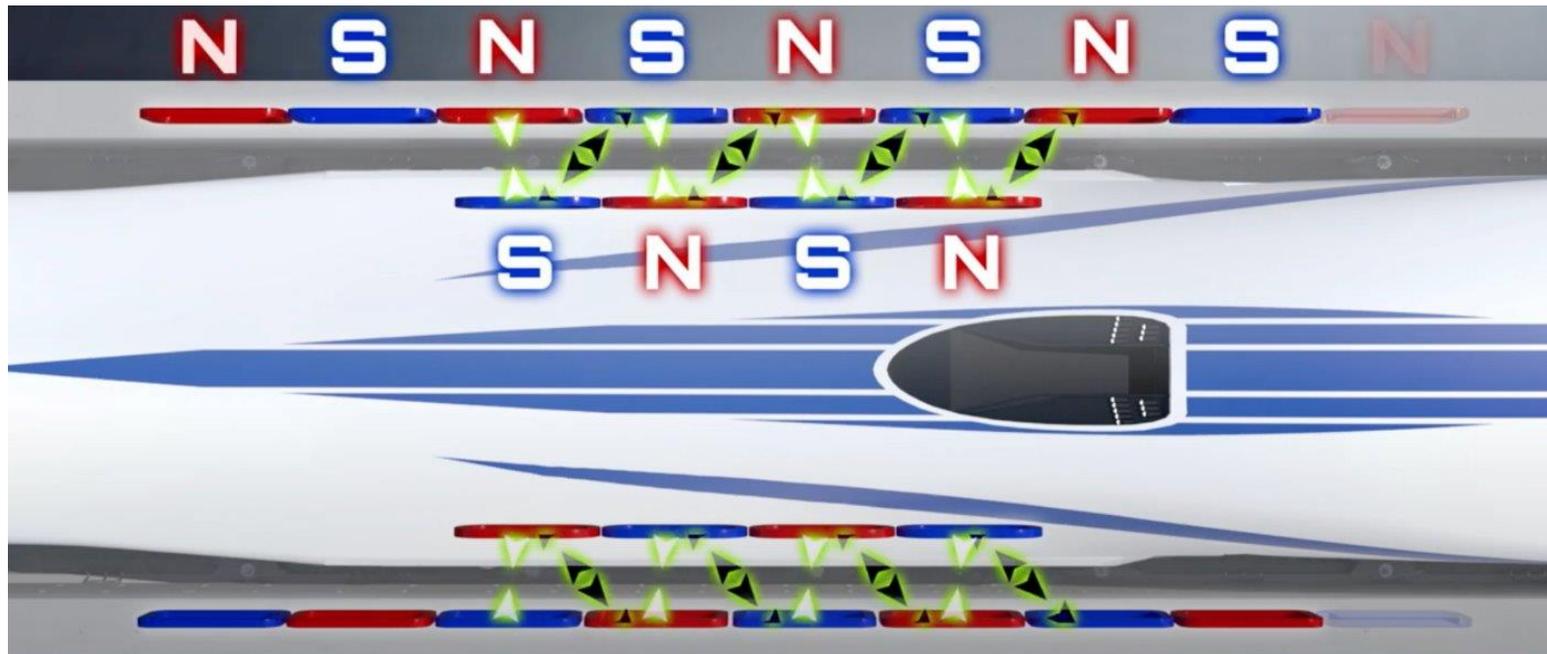
1. Campi elettromagnetici **variabili** nel tempo
2. Materiali **diamagnetici**
3. Vincoli meccanici (contatto fisico)



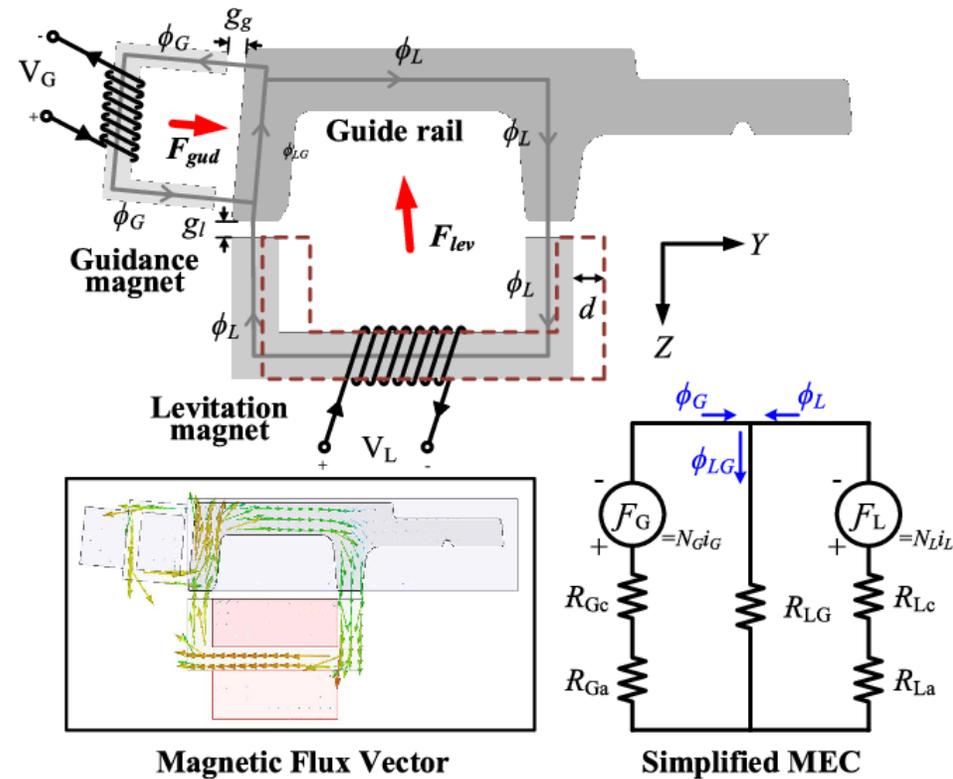
Ognuno dei sistemi MagLev analizzati in seguito sfrutta **almeno una** di queste tre **eccezioni**



Regolando la frequenza della corrente nelle spire **attive** di statore è possibile accelerare e decelerare il veicolo



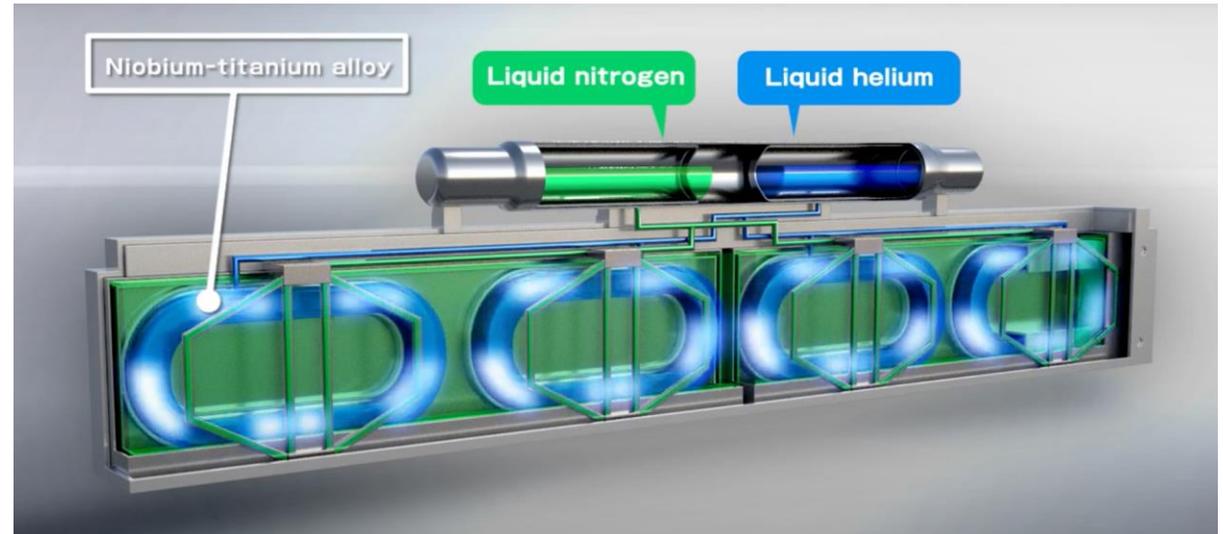
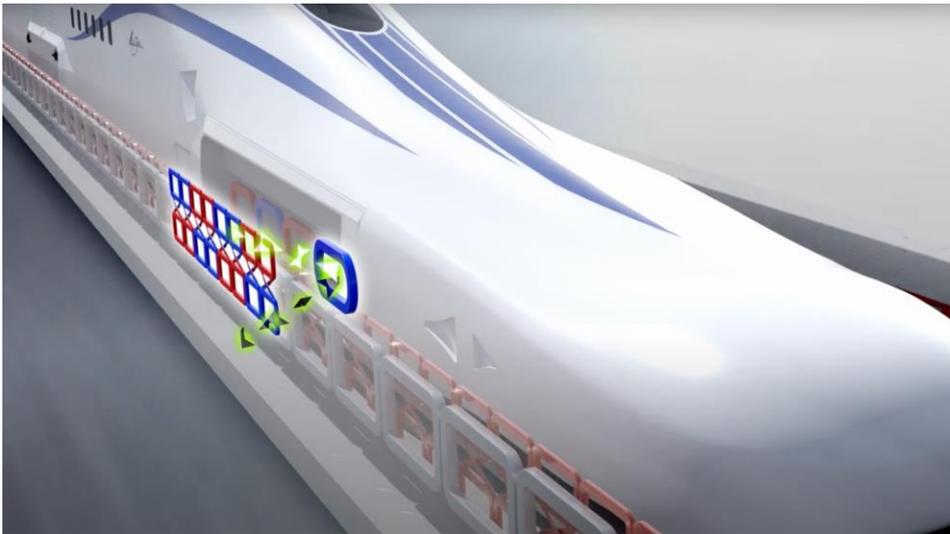
Sia la sospensione che la stabilità sono ottenute tramite sistemi di controllo automatizzati che regolano istante per istante l'intensità del campo generato dagli elettromagneti



Esempio operativo: Shanghai Transrapid del 2004  
Tratta: Aeroporto-Città di 30 km  
Velocità media: circa 250 km/h

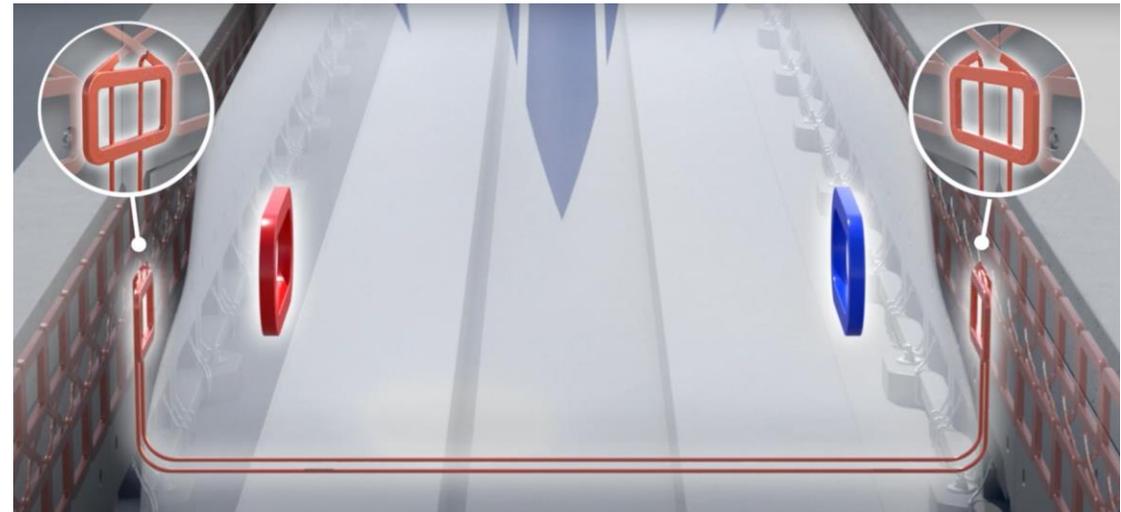
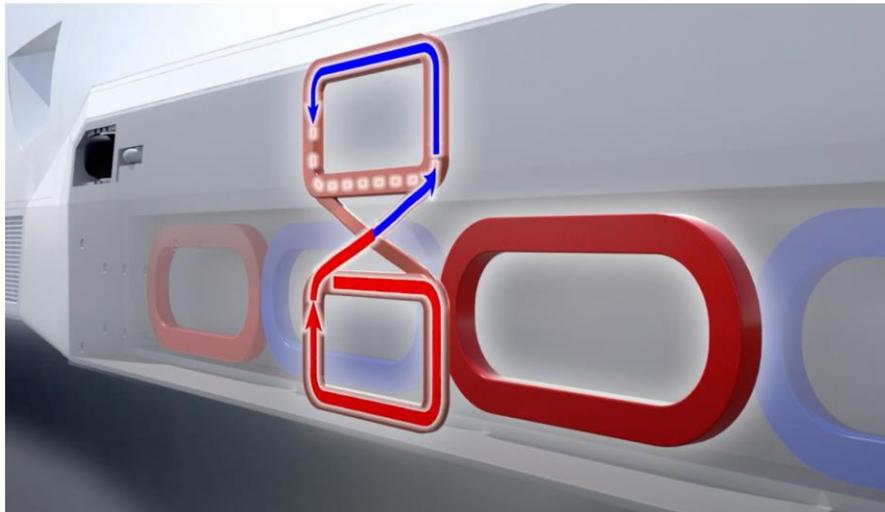


I materiali superconduttori offrono una resistenza elettrica prossima allo zero. Una spira superconduttrice attraversata da una corrente iniziale di eccitazione si comportano come un potente **magnete permanente**.



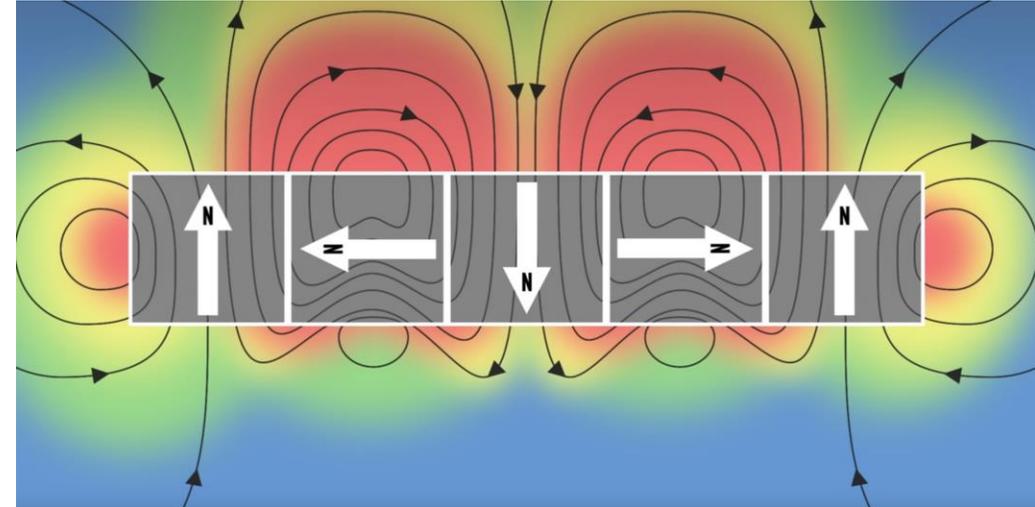
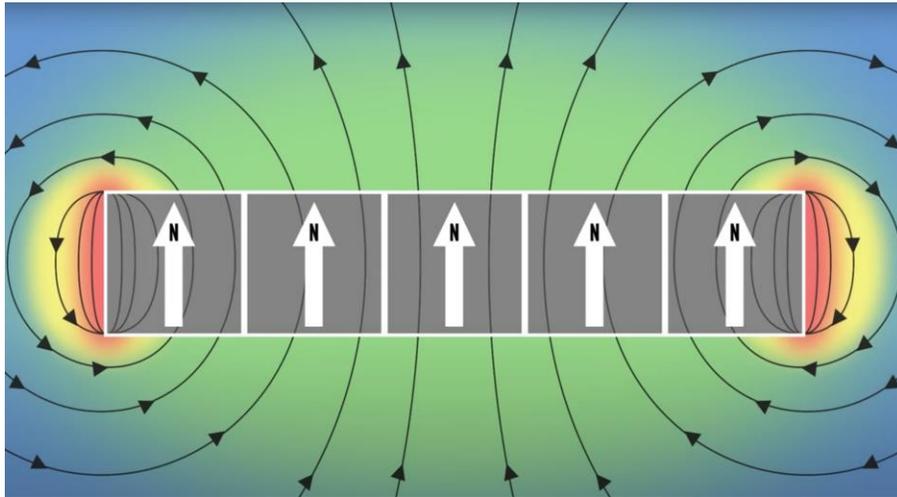
Dall'interazione **dinamica** con le spire di statore si ottengono sospensione e stabilità. Ne segue che i sistemi EDS non possono essere sospesi da fermi, ma devono prima raggiungere una velocità critica. Necessitano quindi di **ruote** ausiliarie nella fase statica.

Stabilità laterale e verticale sono ottenute tramite un sistema di spire **passive** implementate nel tracciato (organo statorico).



Le spire si attivano nel momento in cui la variazione di flusso magnetico nei lobi superiore e inferiore, così come tra spira destra e spira sinistra, non è più equilibrata. In accordo con la **Legge di Lenz**, la corrente indotta alle spire genererà un campo magnetico che tende a riportare la carrozza alla posizione centrale di equilibrio.

Con questa specifica configurazione è possibile concentrare le linee di campo magnetico su un unico lato della schiera di magneti



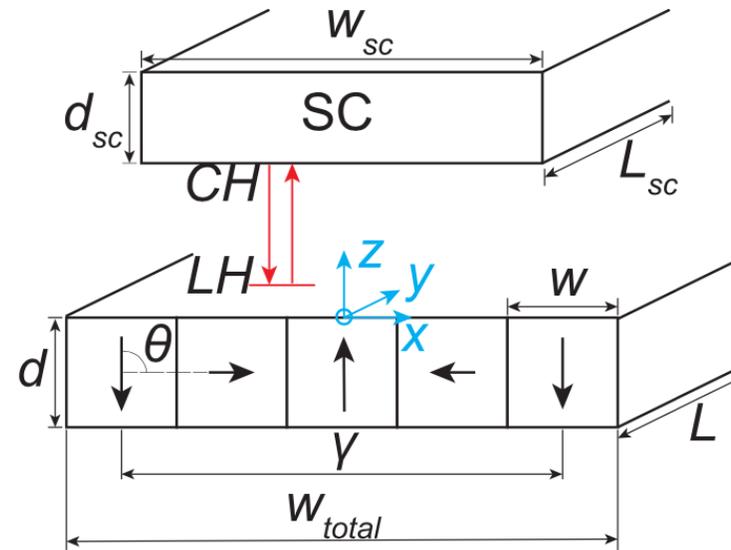
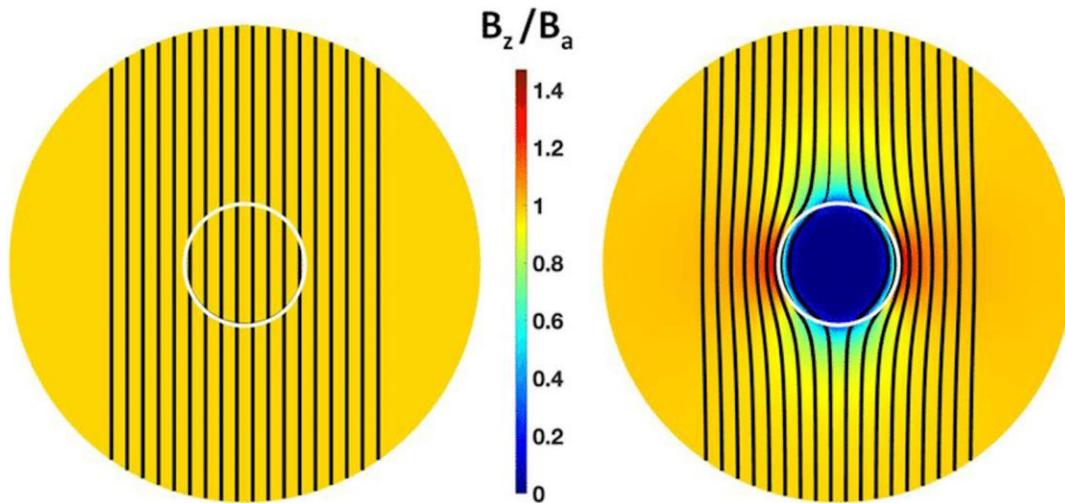
Esiste anche una variante circolare dell'array di Halbach impiegata nei motori elettrici

Inductrack è un sistema a sospensione elettrodinamica (è a tutti gli effetti un EDS) che sfrutta magneti permanenti in configurazione di Halbach anziché i superconduttori.



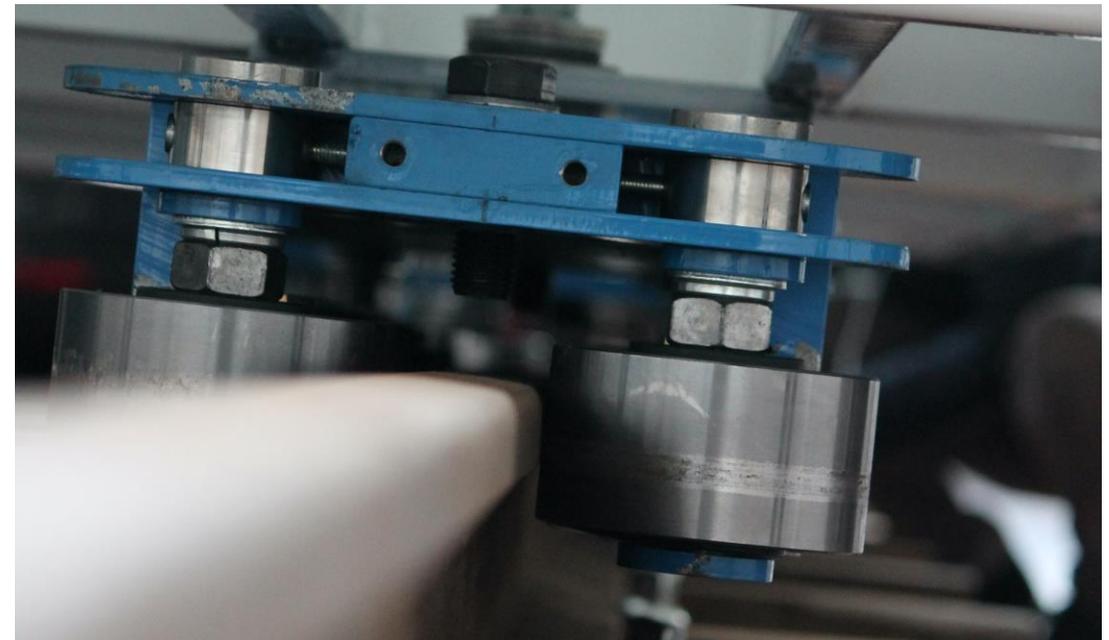
Dal punto di vista fisico sembra vantaggioso, ma presenta limitazioni sia per la velocità che per quanto riguarda il carico trasportabile che lo rendono poco competitivo

La proprietà dei materiali superconduttori di "espellere" il campo magnetico è noto come Effetto Meissner-Ochsenfeld e sortisce un effetto stabilizzante



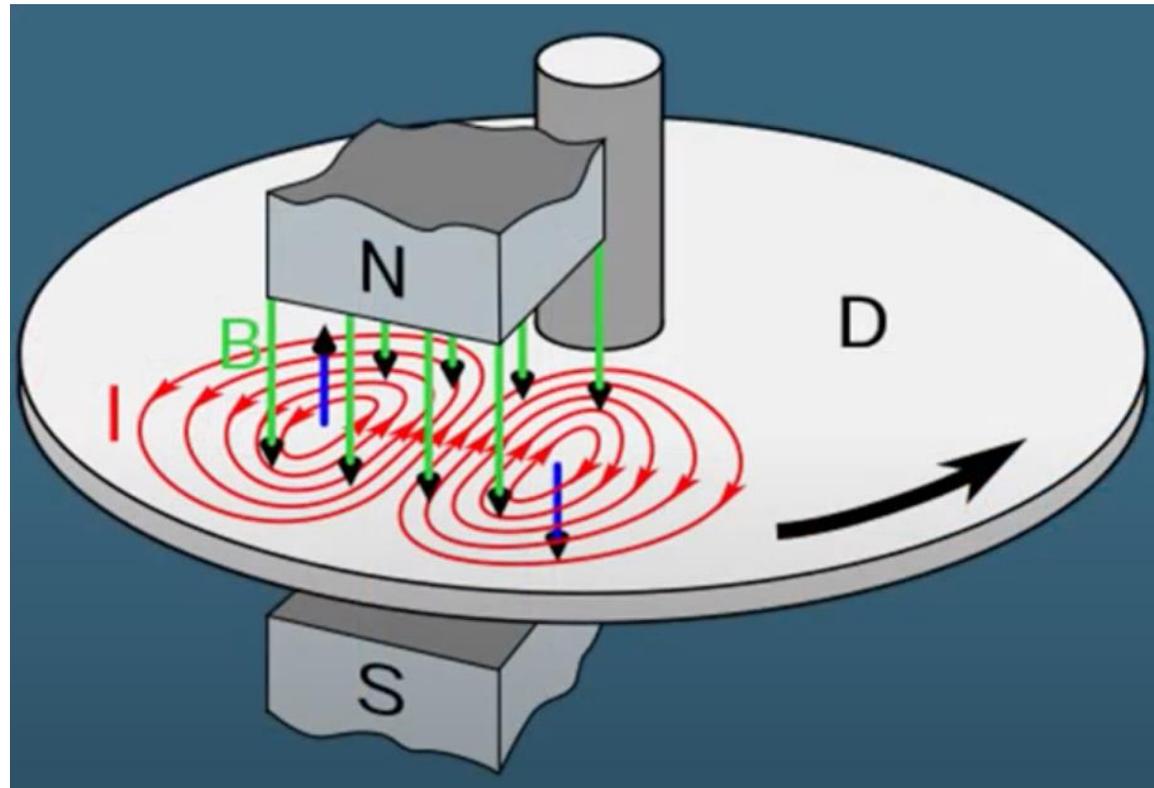
Un modo alternativo di utilizzare i superconduttori è quello di impiegarli per la stabilizzazione e lasciare l'effetto di sospensione all'interazione tra magneti permanenti

Questo caso non rientra sotto la definizione di levitazione perché sfrutta il contatto fisico delle ruote guida, le quali comunque non sono sottoposte al peso dell'intero veicolo



Il vantaggio sarebbe quello di riuscire a sfruttare l'infrastruttura ferroviaria già esistente

Un problema fondamentale: le correnti di Foucault



Queste stesse sono alla base dei freni elettromagnetici del tipo "Eddy Brake"

Sotto un unico termine "MagLev" ricadono tecnologie basate su principi fisici diversi

Sistema	Sospensione	Stabilità	Propulsione
EMS	Attrazione elettromagnetica	Attrazione elettromagnetica	Motore elettrico lineare
Inductrack	Magneti permanenti	Induzione elettromagnetica	Motore elettrico lineare
EDS a SC	Repulsione tra SC e spire passive	Repulsione tra SC e spire passive	Motore elettrico lineare a SC
Ibrido	Magneti permanenti	Effetto Meissner	Motore elettrico lineare
IronLev	Magneti permanenti	Contatto fisico ruote-guida	Motore elettrico tradizionale a contatto

Dal lavoro emergono, più in generale, per progetti come quelli MagLev:

- L'importanza di avere un obiettivo chiaro definito da parametri oggettivi
- Definizione chiara del problema da risolvere
- Bilancio dei fattori problematici e ordine di priorità
- Fattibilità economica del progetto

1. [M-Bahn](#)
2. [Transrapid](#)
3. [Teorema di Earnshaw \(1\)](#)
4. [Teorema di Earnshaw \(2\)](#)
5. [Levitazione magnetica di una rana](#)
6. [R-MagLev \(LIM e EDS\)](#)
7. [EMS](#)
8. [Shanghai Maglev](#)
9. [Halbach](#)
10. [Inductrack](#)
11. [Ibrido a Effetto Meissner](#)
12. [Ironlev](#)
13. [Eddy Current Brakes](#)