

## STATO DI AVANZAMENTO DELLE ATTIVITÀ PER L'ANNO 2007 DEL SISTEMA DI TRASPORTO INNOVATIVO PIPE\$NET

Franco Cotana, Federico Rossi, Mirko Amantini, Valerio Brunori, Andrea Marri

CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Atmosferici), V. G. Duranti 67, 06125 Perugia

### SOMMARIO

Nel presente lavoro si illustra lo stato della ricerca relativo al sistema Pipe\$net (brevettato) e si descrivono gli avanzamenti nel progetto relativi allo sviluppo di alcuni sottosistemi, quali la sospensione senza contatto e la tecnologia del vuoto. Per quanto riguarda la sospensione sono state indagate due diverse soluzioni tecnologiche: la levitazione magnetica passiva a superconduttori e quella attiva con elettrocalamita. Per ciascuna delle due soluzioni si illustrano le teorie alla base dei fenomeni e le prove sperimentali che sono state realizzate per testare le suddette tecnologie e verificarne la fattibilità di applicazione al sistema Pipe\$net.

Nell'ambito della tecnologia del vuoto si riporta lo studio sul prototipo che è stato realizzato al fine di esaminare il comportamento delle strutture e dei sistemi proposti: tubo in polietilene ad alta densità corrugato, saldature di polietilene, guarnizioni e pompa del vuoto.

### INTRODUZIONE

“Pipe\$net” è un originale sistema di trasporto merci leggere (fino a 50 Kg) costituito da una rete di tubi in cui è mantenuto il vuoto, all'interno dei quali si muovono capsule ad alta velocità e basso attrito, spinte da motori elettrici lineari.

Le prerogative principali di Pipe\$net sono:

1. elevata capacità di trasporto, in virtù delle alte velocità combinate alle elevate frequenze di inoltro delle capsule;
2. ridotto consumo energetico;
3. decongestionamento del traffico su strada;
4. ridotto impatto ambientale in termini di emissioni inquinanti in atmosfera e di rumore;
5. rapidità di consegna della merce;
6. integrazione con le infrastrutture viarie (ferrovie, strade, percorsi pedonali) esistenti per realizzare i collegamenti in tempi ridotti e costi contenuti;
7. possibilità di estensione modulare della rete e diffusione capillare lungo il territorio.

Pipe\$net è un sistema flessibile: nella sua forma più articolata basata su tecnologie fortemente innovative quali la levitazione magnetica può collegare tratte di lunghezza superiore alle decine di chilometri sfruttando l'alta velocità garantita dall'attrito ridotto; nella sua forma semplificata, con tecnologie ampiamente consolidate, è adatto a connessioni locali, contribuendo in modo innovativo al miglioramento della mobilità, al decongestionamento del traffico e alla riduzione delle emissioni inquinanti sia atmosferiche che acustiche.

Da un'indagine statistica preliminare risulta che oltre il 70% delle merci attualmente movimentate su strada potrebbe essere trasportato con Pipe\$net.

Le caratteristiche tecniche del sistema Pipe\$net sono state illustrate in un precedente articolo [1].

In questo lavoro si presenta lo stato di avanzamento del progetto, illustrando le prove sperimentali condotte nel corso del 2006 relative in particolare ad alcuni sottosistemi di Pipe\$net, quali la sospensione senza contatto tramite levitazione magnetica e la tecnologia del vuoto.

### I PRECEDENTI PROTOTIPI

Prima dello svolgimento delle attività sperimentali descritte nel presente articolo, è stato realizzato un prototipo di lunghezza limitata, ma con caratteristiche del sistema finale, dove il movimento della capsula è generato da un motore sincrono lineare sottostante che produce un campo magnetico traslante con parametri opportunamente regolabili ai fini di consentire il moto desiderato (Figura 1).



Figura 1: primo prototipo di Pipe\$net

Il materiale usato per il tubo di contenimento è un corrugato di PEAD (polietilene ad alta densità), le cui proprietà meccaniche e chimico-fisiche sono tecnologicamente compatibili con le condizioni di esercizio del sistema: per questo motivo lo stesso materiale è stato impiegato anche nelle prove di vuoto descritte nel seguito.

Il prototipo è stato messo in funzione ed esposto presso il Vittoriano di Roma durante la mostra “i 60 anni della Repubblica italiana” svoltasi nei mesi di marzo e aprile 2006, scelto come progetto rappresentativo dell’innovazione italiana nel settore energia e trasporti.

## SOSPENSIONE SENZA CONTATTO

Nella sua configurazione ad alta velocità, il sistema Pipe§net trae beneficio dalla diminuzione degli attriti conseguenti al moto delle capsule nei tubi, impiegando tecnologie di sospensione senza contatto. Nel seguito si premette la definizione e una concisa descrizione delle differenti tipologie di sostentazione magnetica valutate nel corso della ricerca progettuale in oggetto:

- levitazione magnetica a Magneti Permanenti (nel seguito MP): sistema di sospensione passiva (mantenuta senza consumo di energia elettrica) che sfrutta la repulsione fra elementi magnetici con la stessa polarità;

- levitazione elettromagnetica (Electro Magnetic Suspension, nel seguito EMS): sistema di sospensione attiva (mantenuta con consumo di energia elettrica) in cui il peso del veicolo è contrastato tramite elettrocalamite attratte dalle guide metalliche del sistema;

- levitazione elettrodinamica (Electro Dynamic Suspension, nel seguito EDS): sistema di sospensione attiva costituita da potenti elettrocalamite (generalmente in superconduzione date le potenze in gioco) che muovendosi attraverso bobine non alimentate disposte lungo le guide del sistema vi inducono campi magnetici con polarità tali da sollevare il veicolo;

- levitazione con superconduttori passivi (High Temperature Superconductors, nel seguito HTS): sistema di sospensione passiva in cui il peso del veicolo è contrastato dalla repulsione indotta in un blocco di materiale superconduttore raffreddato a temperature criogeniche esposto a campi magnetici (in genere magneti permanenti), fenomeno denominato “effetto Meissner”.

A causa dell’intrinseca instabilità del sistema a MP e della complessità strutturale della EDS, i metodi di levitazione magnetica più promettenti per il sistema Pipe§net sono stati ritenuti la EMS e la sospensione per mezzo di HTS: su queste due tipologie si sono concentrati gli studi e le prove sperimentali nell’ambito del progetto Pipe§net.

## LEVITAZIONE MAGNETICA CON SUPERCONDUTTORI

### Cenni Storici e Teorici

Negli ultimi anni, con il progresso della tecnologia del freddo e con la scoperta di nuovi materiali superconduttori ad alta temperatura, ha assunto sempre più interesse l’impiego degli stessi per ottenere sistemi di sospensione magnetica ad attrito nullo.

Brevemente, si definiscono superconduttori quei materiali che, al di sotto di una data temperatura di transizione ( $T_c$ , temperatura critica), non oppongono alcuna resistenza al

passaggio della corrente elettrica ed espellono (completamente o in parte) i campi magnetici presenti al loro interno. La  $T_c$  dipende dalla natura del materiale, dalla densità di corrente che lo attraversa e dalla presenza di campi magnetici esterni. Questi fattori ostacolano l’instaurarsi della superconduttività e abbassano la  $T_c$ .

La temperatura di transizione dallo stato normale allo stato superconduttore per i metalli puri è di pochi gradi Kelvin al di sopra dello zero assoluto. La necessità di raggiungere temperature così basse aveva precluso le enormi potenzialità dei superconduttori e limitandone l’uso a pochi campi. Nel 1986 destò enorme sensazione la scoperta di una ceramica di ittrio, bario, rame e ossigeno, detta YBCO, che assumeva lo stato di superconduzione alla temperatura di circa 90 °K, tale da permettere di usare l’azoto liquido (alla temperatura di 77 °K) come refrigerante, molto più economico ed efficiente dell’elio fino a quel momento impiegato per tutti gli esperimenti e le applicazioni sulla superconduzione.

Nel 1933 due fisici tedeschi, Karl Walther Meissner e Robert Ochsenfeld, scoprirono che i superconduttori, oltre ad essere perfetti conduttori di elettricità, sono anche dei perfetti materiali diamagnetici, capaci cioè di espellere il flusso magnetico che contengono quando vengono raffreddati al di sotto della propria  $T_c$ , grazie alle supercorrenti di superficie che producono un campo magnetico esattamente opposto a quello esterno così da impedirne la penetrazione (Figura 2). La completa espulsione del flusso magnetico è nota oggi sotto il nome di “effetto Meissner”.

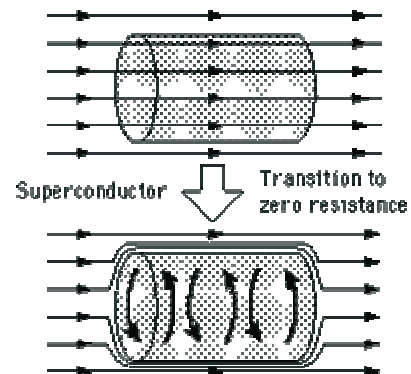


Figura 2: superconduttore immerso in un campo magnetico

Superconduttori di I e II tipo. L’evoluzione nel tempo delle conoscenze sulla superconduttività ha portato ad una classificazione dei materiali superconduttori in due tipi, indicati semplicemente con I e II. I superconduttori di tipo I tendono ad essere superconduttori in condizioni di bassa temperatura e debole campo magnetico; se il campo raggiunge una soglia critica, penetra nel materiale distruggendo lo stato di superconduzione.

I superconduttori di tipo II sono molto più utili: essi rimangono nello stato di superconduzione anche dopo la penetrazione del campo magnetico. L’YBaCuO e lo BiSrCaCuO sono esempi di superconduttori del II tipo: in questi, un campo magnetico esterno penetra nel materiale sotto forma di tubi di flusso discreti che formano intrusioni tubolari del campo applicato attorno alle quali circolano le supercorrenti (per questo si parla spesso di “vortici”). Queste supercorrenti producono un campo magnetico che tende a schermare il campo magnetico esterno applicato.

Sospensione senza contatto. La levitazione magnetica rappresenta una concreta applicazione dell'effetto Meissner.

Se si porta infatti un superconduttore al di sotto della sua temperatura critica e si pone sopra ad un magnete permanente (esercitante un campo inferiore a quello critico) si ha come conseguenza un comportamento perfettamente diamagnetico del superconduttore che espellendo le linee di flusso dal suo interno è sottoposto a una spinta levitativa. Nel caso di superconduttori di I tipo, l'azione levitativa però non garantisce l'equilibrio del sistema (la situazione è paragonabile a quella di due magneti permanenti in repulsione fra loro).

In un superconduttore di II tipo, invece, alcune linee di flusso del campo penetrano all'interno del superconduttore entrando nei vortici che si creano a causa delle imperfezioni e anisotropie del materiale: il superconduttore oltre ad essere soggetto alla forza levitativa dovuta alle linee di flusso respinte, è soggetto anche ad una forza di "pinning" che tende a bloccare il superconduttore e a non farlo muovere verso zone a diverso campo magnetico in una condizione di equilibrio che possiamo definire indifferente. La forza di "pinning" si manifesta infatti solo quando si spinge il superconduttore a muoversi verso una zona a campo magnetico diverso. Se la forza levitativa imposta dal campo magnetico è sufficiente a garantire la levitazione, contrariamente a quanto avviene per i superconduttori di I tipo, il superconduttore, se perturbato, si sposta verso una nuova posizione di equilibrio in cui vi è un medesimo valore del campo magnetico. Questa condizione può essere raggiunta in due modi: portando il superconduttore al di sotto della sua temperatura critica e poi forzandolo ad entrare in un campo magnetico oppure posizionando il superconduttore nel campo magnetico e raffreddandolo fino ad una temperatura minore di  $T_c$ . È proprio quest'ultimo metodo che è stato approfondito nelle prove di levitazione magnetica delle guide di Pipe\$net.

### Prove Sperimentali di Sospensione

Per le prove di sospensione di Pipe\$net sono stati scelti superconduttori di II specie ad alta temperatura (HTS) del tipo REBCO (Ossidi di Rame con Bario e Terre Rare) prodotti dalla THEVA Dünnschichttechnik GmbH (Figura 3).



Figura 3: blocchetto di YBCO

La scelta è caduta su superconduttori di II specie per due motivi:

1) possono essere portati allo stato superconduttivo refrigerandoli con azoto liquido a 77 °K, con ovvi vantaggi in termini di costi e difficoltà tecnologiche rispetto all'uso di elio liquido;

2) la forza di "pinning" permette il mantenimento del centraggio del superconduttore sulla pista magnetica. Se si fa transitare il superconduttore nello stato di superconduzione in opportune condizioni geometriche rispetto al magnete permanente, oltre alla forza levitativa, si ottiene anche una forza di "pinning" che permette il centraggio del superconduttore sulla pista e si oppone ad eventuali forze esterne che tendono a spostare il superconduttore trasversalmente rispetto all'asse della pista stessa, realizzando di fatto un sistema di guida passivo senza consumo di energia.

Le dimensioni dei blocchetti impiegati nelle prove svolte in laboratorio sono 64 x 33 x 12 mm.

I superconduttori sono stati fissati all'interno di due recipienti criogenici ottenuti con polistirene espanso ricoperto da uno strato di colla vinilica e carta.

I due recipienti sono stati collegati tramite una struttura leggera (peso poco superiore ad 1.8 Kg) di polistirolo e legno, denominata in seguito "navicella" (Figura 4), in modo da garantire l'allineamento assiale dei superconduttori fissati all'interno dei recipienti stessi (Figura 5).

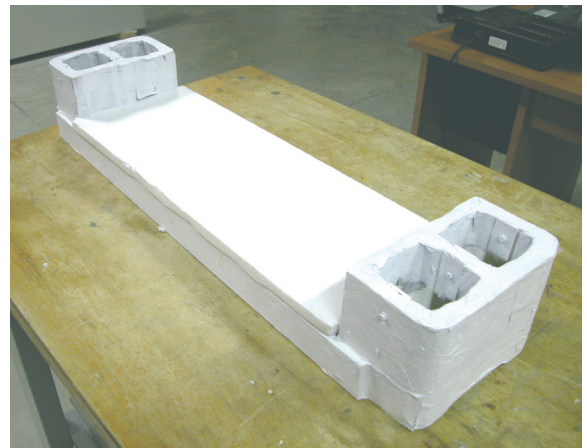


Figura 4: struttura complessiva del criostato

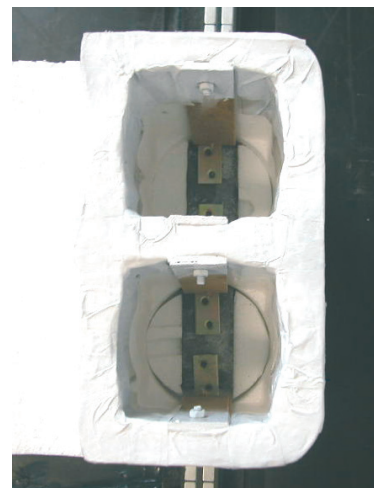


Figura 5: dettaglio del criostato con i superconduttori

Per quanto riguarda le piste magnetiche (Figura 6) sono state appositamente progettate a concentrazione di flusso per garantire flusso magnetico massimo in corrispondenza dell'asse longitudinale del superconduttore e massimo gradiente in direzione perpendicolare all'asse della pista

stessa. Da un esame della letteratura scientifica (ad es. [2]), risulta infatti che la forza levitativa ottenibile è proporzionale all'intensità  $B$  del campo magnetico applicato esternamente al superconduttore, mentre la forza di "pinning" è anche influenzata dal gradiente di  $B$ .



Figura 6: piste di magneti montate sul tubo

Ciascuna pista lunga circa 2 metri è costituita da una struttura a sandwich (Figura 7), realizzata da SAIMAG srl e formata (a partire dall'esterno) da:

- due lamiere di ferro dolce piegate a L di spessore 2 mm e altezza 28 mm; queste fungono anche da base di ancoraggio alla struttura del prototipo;
- due strati di magneti NeFeB (aventi un campo magnetico residuo  $B_r=1.2$  Tesla) di spessore 8 mm ed altezza 28 mm (la lunghezza del singolo magnete è di 30 mm);
- una lastra centrale di ferro dolce di spessore 4 mm ed altezza 28 mm.

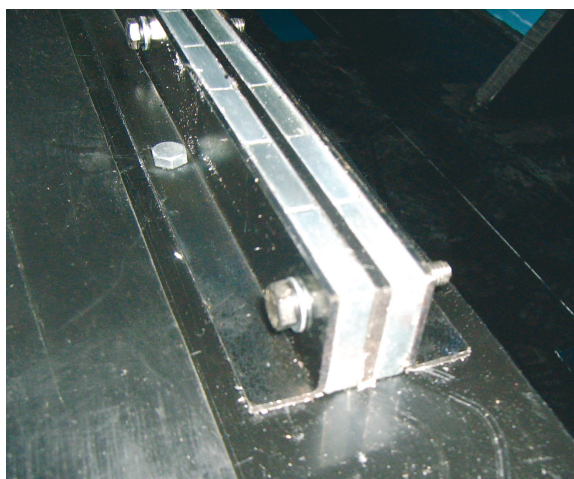


Figura 7: particolare della pista di magneti

Il campo magnetico generato dal magnete permanente non si disperde nello spazio circostante ma rimane concentrato totalmente nella zona sovrastante la pista stessa. Il massimo del campo magnetico sull'asse della guida è evidenziato anche dal picco del grafico di Figura 8 che rappresenta l'andamento della componente verticale del campo di flusso  $B$  in direzione perpendicolare all'asse ad una distanza di 1 mm dalla superficie del magnete permanente; il valore raggiunto è prossimo a 1 Tesla.

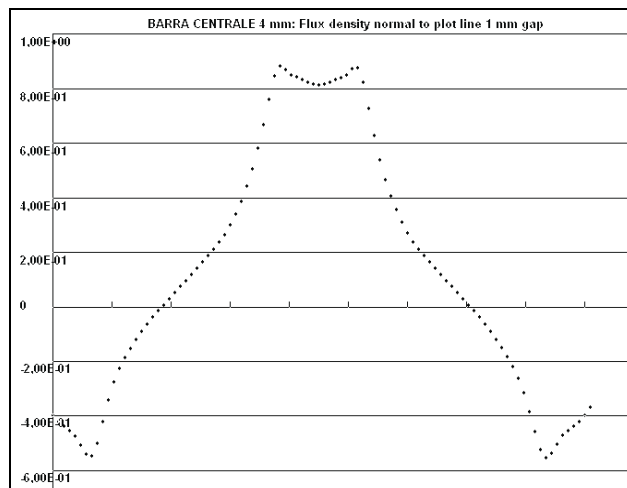


Figura 8: andamento della componente verticale di  $B$

Tentando di allontanare il superconduttore trasversalmente rispetto all'asse della guida si ha una elevata variazione della intensità del campo magnetico che genera una elevata forza di "pinning" che si oppone alla traslazione laterale del superconduttore sopra il magnete; la conseguente variazione delle supercorrenti interne è energeticamente sfavorevole.

Con la strumentazione sopra descritta sono state eseguite due diverse prove: la prima a campo zero ossia i superconduttori sono stati portati al di sotto della temperatura critica al di fuori del campo magnetico esercitato dalle piste; la seconda prova è stata realizzata raffreddando i superconduttori ad una distanza fissa di 10 mm dalla superficie superiore delle piste. Di seguito si descrive ciascuna prova e i risultati ottenuti.

Prova a campo zero. Il recipiente criogenico, posto in un piano lontano dal campo magnetico prodotto dalle piste (campo magnetico zero), è riempito con azoto liquido. Dopo un tempo di attesa di 5 minuti, necessario ai superconduttori per passare allo stato superconduttivo, si pone il criostato sopra le piste. Si fa attenzione a far coincidere l'asse delle piste con l'asse delle coppie di superconduttori su ciascun recipiente (Figura 9).

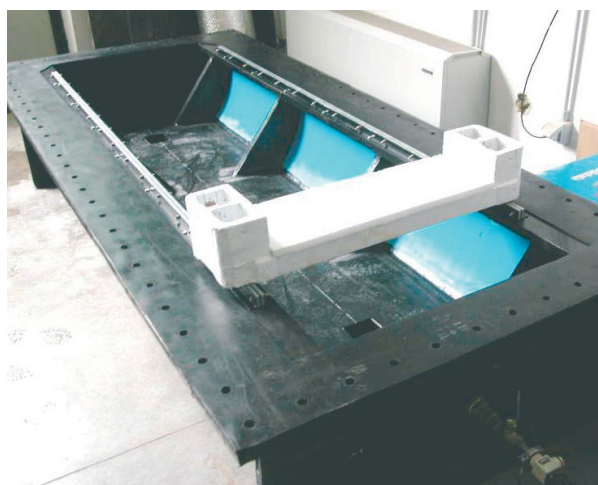


Figura 9: criostato disposto sopra le piste di magneti

Dalla prova si possono trarre le seguenti conclusioni: il criostato non è stabile sopra le piste di magneti permanenti ossia tende a spostarsi di lato e disporre il proprio asse

parallelamente a quello delle guide; vi è una assenza completa della forza di “pinning” e l’equilibrio è instabile.

Il fenomeno non contraddice le proprietà dei superconduttori di II specie, infatti il sistema è stato raffreddato a campo zero ed è stato posto in seguito sopra il campo magnetico prodotto dalle guide; ciò significa forza levitativa massima e forza di “pinning” nulla. Forzando il sistema ad avvicinarsi alla superficie superiore della pista (la distanza iniziale tra pista e superconduttore in cui forza peso e forza levitativa si eguagliano è di 8 mm) alcune linee del campo magnetico penetrano nel superconduttore. Eliminando la forza coercitiva di avvicinamento si nota che la forza levitativa è diminuita essendo ora la distanza tra piste e superconduttore minore e che si è manifestata anche una piccola forza di “pinning” dovuta appunto all’imprigionamento delle linee di forza nei vortici creati nel superconduttore stesso.

Dalla misura della forza levitativa, effettuata posizionando dei pesi crescenti sulla navicella fino ad ottenere un *gap* tra superconduttore e magneti permanente di 5 mm, è stato ottenuto il valore di 160 N.

La misura è stata effettuata con un *gap* di 5 mm poiché è quella minima che si ritiene si debba garantire a causa delle oscillazioni attorno alla posizione di equilibrio della navicella causate da discontinuità del campo magnetico lungo la pista stessa.

L’impiego di questo tipo di procedura per raffreddare i superconduttori non è efficace al fine dell’applicazione su Pipe\$net poiché non viene garantita una forza di “pinning” sufficiente ad assicurare il centraggio della navicella sulla guida.

Prova a campo non zero. Il criostato è posto sulle piste magnetiche, facendo attenzione all’allineamento assiale fra le piste e la stessa navicella, sopra alcuni spessori di plastica (altezza totale 10 millimetri). In questo modo il campo magnetico a cui sono soggetti i superconduttori durante la transizione non è nullo.

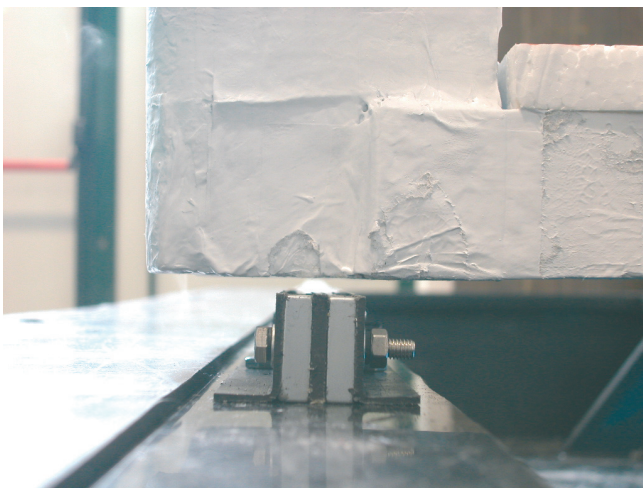


Figura 10: levitazione

Si riempie poi ciascun vano dei recipienti criogenici con azoto liquido. Dopo un tempo di attesa di 5 minuti si tolgono gli spessori. A causa del peso della capsula il *gap* iniziale tra navicella e pista magnetica tende a diminuire. Si ha l’equilibrio ad una distanza di 8 mm (Figura 10).

Da questa prova risulta che i superconduttori sono soggetti ad un’elevata forza di “pinning” oltre che alla forza di

levitazione. La forza di pinning così ottenuta è dello stesso ordine di grandezza di quella di levitazione e garantisce il rispetto del centraggio della navicella sulle guide.

Si lasciano a sperimentazioni successive le misure dei rapporti di grandezza tra le due e dei principi che governano le loro relazioni.

Dalle prove svolte si è potuto vedere come l’aumentare della forza di “pinning”, ottenibile diminuendo la distanza a cui il sistema è raffreddato allo stato superconduttivo, produce un rapido decadimento della forza di levitazione magnetica.

Dalla misura della forza levitativa, effettuata posizionando dei pesi crescenti sulla navicella fino ad ottenere un *gap* tra superconduttore e magneti permanenti di 5 mm, è stato ottenuto il valore di 70 N.

Questo tipo di procedura di raffreddamento sembra appropriata all’implementazione su Pipe\$net. A discapito di una minore forza levitativa, che rispetto al raffreddamento a campo zero diminuisce di più della metà, si ha una elevata forza di “pinning” che permette il centraggio e il mantenimento della coassialità tra piste e navicella. Rimandiamo a studi futuri il comportamento del sistema in condizioni dinamiche e di alta velocità di traslazione della navicella sulle guide.

## SOSPENSIONE ELETTROMAGNETICA

È in via di conduzione uno studio volto a definire l’applicabilità per il sistema Pipe\$net di un tipo di sospensione senza contatto basata sulla levitazione elettromagnetica (EMS, Electro-Magnetic Suspension). Il principio, attualmente sfruttato nel Maglev Transrapid sviluppato dalla ThyssenKrupp e operativo nel collegamento fra l’aeroporto e la città di Shanghai, si basa sull’attrazione esercitata da una serie di magneti permanenti verso il materiale ferromagnetico di cui è costituito il motore elettrico lineare che permette la propulsione. Questa attrazione vince la forza peso della capsula, ma non garantisce un equilibrio stabile perché al diminuire del traferro la forza d’attrazione aumenta e viceversa.



Figura 11: elettrocalamite realizzate da TRAFOMECA

È necessario pertanto inserire un campo magnetico variabile con la distanza della capsula dai motori elettrici lineari, in modo da aumentare l’intensità del campo magnetico e quindi l’attrazione se la capsula tendesse ad allontanarsi dal suo traferro di progetto e, viceversa, in modo da diminuire il campo magnetico a vantaggio della forza peso, se la capsula dovesse avvicinarsi ai motori rispetto alla sua posizione d’equilibrio. Questo comportamento può essere realizzato con

un'elettrocalamita, tramite un controllo a catena chiusa che misura costantemente la distanza fra la capsula e i motori elettrici lineari (impiegando un laser micrometrico MICRO-EPSILON ILD1401-20 allo scopo) e comanda un variatore di corrente che regola l'intensità del campo magnetico generato dalle spire dell'elettromagnete.

Gli elettromagneti (due per consentire un controllo sulle dislocazioni di beccheggio della capsula), realizzati dalla TRAFOMECC di Tavernelle (PG) sono visibili nella Figura 11.

Il dimensionamento dell'elettrocalamita è stato effettuato partendo dall'ipotesi di poter bilanciare un carico complessivo di 10 kg, garantendo un traferro massimo di 3 mm.

Indicando con  $t$  il traferro,  $N$  il numero di spire e con  $S$  la sezione del nucleo, deve valere la seguente disuguaglianza:

$$\frac{\mu_0 S (NI_{\max})^2}{2t_{\max}^2} > mg \quad (1)$$

Scegliendo una sezione del nucleo rettangolare di 7 cm x 3 cm si ottiene  $NI_{\max} > 818A$ . Ponendo  $N = 120$  si ottiene  $I_{\max} > 6.82A$ .

Considerando 2 strati di avvolgimento ed un filo di raggio  $r = 1\text{mm}$ , è possibile calcolare la potenza massima dissipata che vale  $P_{\max} = RI_{\max}^2 = 6.51W$ . La densità di corrente massima sviluppata è  $\delta_{\max} = 2.17 A/\text{mm}^2$ .

La dinamica dell'elettrocalamita è descritta dalla seguente equazione

$$\ddot{z} = g - k \frac{i^2}{z^2} \quad (2)$$

essendo  $i$  la corrente che scorre al suo interno,  $z$  la distanza dal ferro (traferro) e  $k$  una costante data da:

$$k = \frac{\mu_0 S N^2}{2m} \quad [\text{m}^3 / \text{A}^2 \text{ s}^2] \quad (3)$$

L'equazione precedente può essere scissa in un sistema di 2 equazioni differenziali del primo ordine

$$\begin{cases} \dot{z} = v \\ \dot{v} = g - k \frac{i^2}{z^2} \end{cases} \quad (4)$$

Sia  $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \\ v \end{pmatrix}$  il vettore delle variabili di stato,

$u = i$  il segnale di ingresso e  $y = z$  il segnale di uscita, la dinamica dell'elettromagnete può essere modellata con il seguente sistema non lineare nello spazio di stato

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - k \frac{u^2}{x_1^2} \end{cases} \quad (5)$$

Il sistema è stato linearizzato intorno al punto di equilibrio,  $x_{1,\text{eq}} = 0.002 \text{ m}$  e  $u_{\text{eq}} = 4.5445 \text{ A}$ .

Per la sintesi del regolatore digitale viene discretizzato il sistema conservando tutte le pulsazioni in corrispondenza di una risposta in frequenza del sistema sopra ai  $-20\text{dB}$  rispetto alla risposta in continua. Questo corrisponde alla pulsazione  $\omega_0 = 300 \text{ rad/s}$  e in base al teorema di Nyquist il periodo del campionamento deve essere  $T_s \leq \pi / \omega_0 = 0.0105 \text{ s}$ .

La sintesi del regolatore è stata quindi effettuata mediante tecnica FTR (Finite Time Response) imponendo errore nullo a regime per ingressi costanti tramite l'inserimento di un polo in  $z=1$  in catena aperta e cancellando il polo stabile con uno zero in  $z=0.3714$ . ottenendo il seguente controllore:

$$R(z) = \frac{-12077.864(z - 0.3714)(z - 0.8232)}{(z - 1)(z + 0.8646)} \quad (6)$$

Il completo allestimento dell'esperimento è previsto per il secondo trimestre 2007. Durante le prove si prevede di verificare l'opportunità di controllare il traferro variando le correnti statoriche così da evitare l'alimentazione delle capsule.

## PROVE DI VUOTO

Per effettuare test di tenuta e resistenza sul materiale selezionato per i tubi di Pipeşnet, in collaborazione con la ditta FUTURA S.r.l. ed ITALIANA CORRUGATI S.r.l., è stato realizzato un tubo prototipo di 2,5 metri di lunghezza (Figura 12) che impiega due semigusci ricavati da tubi standard di diametro 100 cm in PEAD (polietilene ad alta densità) corrugato a doppia parete, con classe di rigidità anulare SN8 (pari a 8 kN/m<sup>2</sup>) misurata secondo UNI EN ISO 9969. Il volume interno è circa 1400 litri.



Figura 12: tubo per prova di vuoto

Quattro lastre di PEAD complanari all'asse del tubo sono saldate ai semigusci per fornire mensole di appoggio alle piste di magneti per le eventuali prove di levitazione; le mensole sono rinforzate per garantire la necessaria stabilità dimensionale (Figura 13).

Un'altra serie di lastre è saldata nel semiguscio inferiore per fungere da struttura di supporto per i motori elettrici lineari (Figura 13).

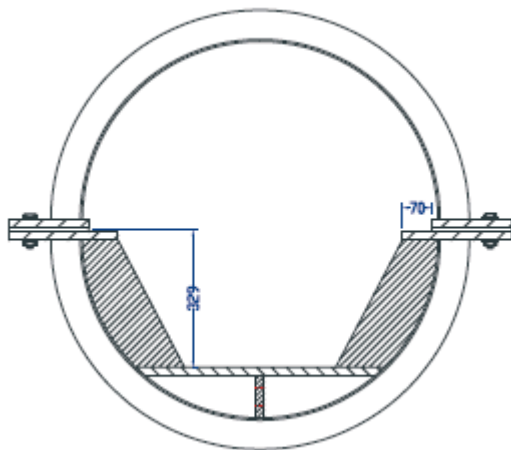


Figura 13: sezione del tubo per la prova di vuoto

Infine 4 piastre di PEAD di spessore 30 mm sono saldate alle estremità per garantire la tenuta del sistema. A causa delle sollecitazioni previste in seguito alla differenza di pressione fra interno ed esterno del tubo (forza superiore alle 2 tonnellate), ogni piastra è stata rinforzata saldando 2 costolature in PEAD di sezione quadrata 30 x 30 mm.

Le due sezioni sono assemblate con bulloni lungo i 4 lati; una guarnizione in gomma fornisce la necessaria tenuta. Una pompa rotativa a palette Leybold da 16 m<sup>3</sup>/h è collegata al tubo per generare la depressione (Figura 14).

La pressione minima raggiunta nel corso del primo esperimento è stata di 80 mbar (pari a 1/13 circa di atmosfera) in 30 minuti. A chiusura della valvola, il sistema ha evidenziato una caduta di pressione di 3.3 mbar/min.



Figura 14: pompa applicata per la prova di vuoto

In seguito si sono individuate le perdite dovute a difettosità nella lavorazione di saldatura: i fori sono stati individuati mettendo in pressione il tubo e cospargendolo di materiale che genera bolle in presenza di fuoriuscite d'aria. In prossimità dei fori è stato effettuato un intervento correttivo di saldatura.

La pressione finale raggiunta dopo l'intervento è stata pari a 40 mbar (1/25 di atmosfera) in 30 minuti e la caduta di pressione è migliorata a circa 1 mbar/min.

Considerando che la pompa impiegata ha una potenza di 0.55 kW, trascurando la variazione della caduta di pressione e della velocità di aspirazione con la pressione interna al tubo, si ottiene con un calcolo di massima una potenza consumata per il mantenimento delle condizioni di vuoto prestabilite pari a circa 6÷7 kW / km.

Per quanto concerne la resistenza dei materiali la configurazione corrugata del tubo ha dimostrato di sostenere adeguatamente le forti sollecitazioni dovute alla differenza di pressione. L'inflessione riscontrata nelle piastre terminali (prossima ai 20 mm al centro delle stesse) non è da ritenersi un problema nel sistema Pipe\$net in quanto le linee saranno costituite da tubi senza soluzione di continuità.

Si rimanda a prove ulteriori lo studio dell'influenza della guarnizione collocata fra i due semigusci sulle perdite di tenuta, la valutazione del contributo all'impedenza del sistema da parte dei raccordi fra il tubo e la pompa e il funzionamento del motore elettrico lineare in condizioni di vuoto.

## CONCLUSIONI

Nel corso del 2006 lo sviluppo del sistema di trasporto Pipe\$net si è focalizzato sull'elaborazione di prove sperimentali volte a definire le potenzialità tecnologiche di alcuni suoi sottosistemi fondamentali, quali la sospensione con levitazione magnetica e la tecnologia del vuoto.

Per quanto concerne la levitazione, la tecnologia dei superconduttori ad alte temperature ha evidenziato potenzialità di successo molto promettenti, ma tali da richiedere ulteriori studi per verificarne l'applicabilità nella gestione di carichi pesanti in condizioni di elevata dinamicità. Nell'ambito della levitazione per mezzo di sospensione elettromagnetica si sta mettendo a punto un prototipo per lo studio della stessa da completarsi entro il 2007.

Riguardo la tecnologia del vuoto, è stato verificato il ridotto consumo energetico della metodologia impiegata, con un valore indicativo di 6÷7 kw/km per il mantenimento delle condizioni di vuoto all'interno della linea Pipe\$Net.

## NOMENCLATURA

$g$	accelerazione di gravità	[m/s <sup>2</sup> ]
$I_{max}$	intensità di corrente massima	[A]
$m$	massa	[kg]
$R$	resistenza	[Ω]
$\mu_0$	permeabilità magnetica del vuoto	[H/m]

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. F. Cotana, F. Rossi, A. Marri, Pipe\$net: un sistema di trasporto merci innovativo confronto delle prestazioni con i sistemi di trasporto su gomma e ferroviario, *Atti 6° Congresso Nazionale CIRIAF*, pp. 443-448, 2006.
2. X. R. Wang, H. H. Song, et al., Levitation force and guidance force of YBaCuO bulk in applied field, *Physica C*, 386, pp. 536-539, 2003.