

Manovellismi per “coffe machine” a cialde

La progettazione di macchine per espresso casalinghe ha visto in questi ultimi anni diverse soluzioni tecniche basate sul ben noto meccanismo biella-manovella utilizzato per la movimentazione della cialda.

Sebbene sembri a prima vista un meccanismo ormai standardizzato e privo di caratteristiche innovative, un’analisi più approfondita attraverso le più moderne tecnologie CAD/CAE riserva una varietà di soluzioni diverse su cui ci si sofferma per identificare i criteri di progettazione e un confronto tra diverse soluzioni disponibili in commercio



(Cortesia Lavazza)

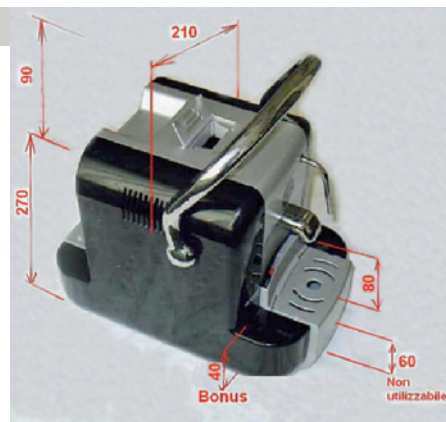


Fig. 1 – Alcune macchine per espresso da casa disponibili in commercio

Ancora una volta il ben noto meccanismo biella-manovella. Smontando alcune macchine per la preparazione del caffè espresso da casa, ci si imbatte in un meccanismo fondamentale nel convertire il moto rotatorio, ottenuto dalla leva di caricamento, alla traslazione della cialda in posizione di erogazione e ... 30 secondi di attesa per un ottimo caffè !

L'analisi presentata è focalizzata a partire da tre diverse soluzioni tecniche da un punto di vista cinematico e tecnologico. In primo piano si possono distinguere i criteri progettativi e i classici compromessi di una ingegnerizzazione minimalista e ottimizzata per quanto riguarda il numero di componenti della distinta base, l'utilizzo di componentistica standardizzata e i materiali economici. In particolare domina l'utilizzo di materie plastiche, con ruolo strutturale, anche se i requisiti funzionali e prestazionali di queste macchine non sono banali: semplicità e robustezza del dispositivo, compattezza, materiali e tecnologie produttive economiche, temperature di esercizio intorno ai 90°C, elevata sollecitazione di pressione durante l'erogazione con requisiti di tenuta, necessità di fornire il primo e il cinque millesimo caffè nominalmente uguali.

Requisiti cinematici e soluzioni tecniche

I dispositivi esistenti sul mercato per la movimentazione manuale della cialda nelle macchine da caffè casalinghe possono essere classificati in due famiglie:

- ▶ con manovellismo caratterizzato da movimentazione lineare della cialda;



Fig. 2 – Alcuni cinematismi traslativi (in alto) e roto-traslativi (in basso)

- ▶ con movimentazione composta di rotazione angolare e movimentazione lineare della cialda.

Tra le soluzioni puramente (o quasi) traslative, sicuramente il sistema biella-manovella è stato ampiamente utilizzato in quanto robusto sia dal punto di vista dell'affidabilità, sia del mantenimento delle proprietà cinematiche e del recupero dei giochi. I requisiti che questi cinematismi devono avere come obiettivo per rendere semplice, affidabile e preciso il meccanismo di movimentazione della cialda sono:

- ▶ l'angolo della leva azionata dall'utente e il relativo range devono avere valori ergonomici e compatibili con gli ingombri generali della macchina,
- ▶ la cialda deve essere posta in modo parallelo alla disposizione in condizione di erogazione del caffè,
- ▶ la cialda deve essere avvicinata alla regione di erogazione (definita doccetta) in modo progressivo e con movimento lento e preciso nel finale,

- ▶ il punto morto di sicurezza nel serraggio finale e la centratura della cialda contro la doccetta devono evitare perdite e trafileamenti in fase di erogazione del caffè.

Limitando l'analisi alle soluzioni con la sola traslazione del portacialda rappresentata dalle tre macchine rappresentate in Figura 1, si distinguono due regioni angolari di possibili utilizzo del cinematismo (rispettivamente intorno al punto morto superiore PMS o inferiore PMI) che sfruttano le seguenti caratteristiche cinematiche:

- ▶ una velocità di avanzamento del portacialda inizialmente elevata (con una eventuale piccola rotazione del portacialda ottenibile con un parametro di disallineamento),
- ▶ un accostamento nella posizione di fondo corsa con velocità ridotta e, quindi, precisa,
- ▶ una condizione finale di impuntamento del cinematismo, conseguente al superamento di una configurazione a velocità nulla (punto morto) per evitare in modo assoluto una potenziale apertura involontaria dalla

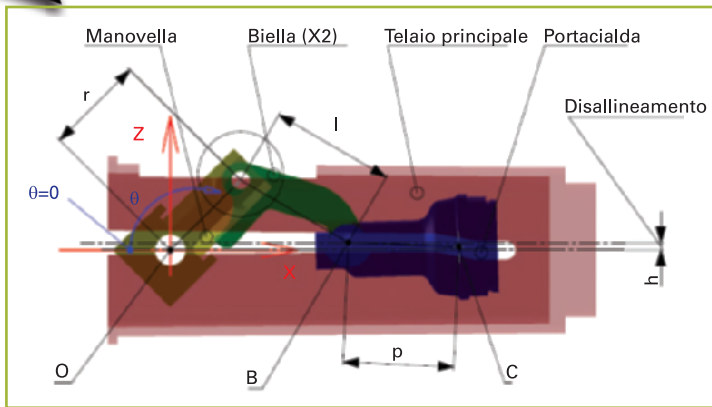


Fig. 3 – Cinematismo biella-manovella con nomenclatura e riferimenti cinematici

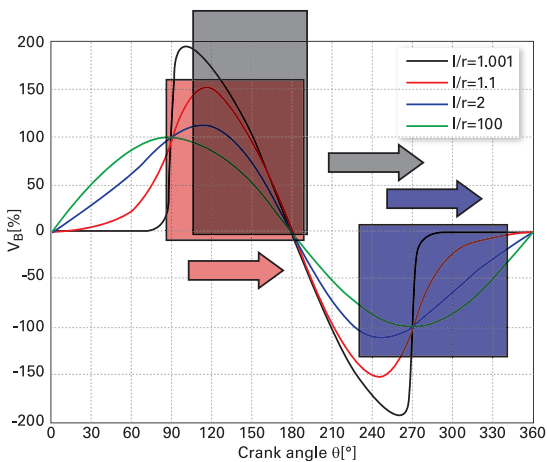


Fig. 5 – Range cinematici dei manovellismi

condizione di erogazione caffè.

Nelle soluzioni roto-traslative la cialda viene posta in macchina dall'utente con asse quasi verticale e subisce poi una rotazione all'interno della macchina prima della fase di erogazione del caffè.

Per rendere semplice, affidabile e preciso il meccanismo di movimentazione della cialda, i requisiti da ottimizzare possono essere così riassunti:

- ▶ l'angolo della leva azionata dall'utente ed il conseguente angolo di rotazione della cialda all'interno della macchina devono avere valori ergonomici e compatibili con gli ingombri generali della macchina,
- ▶ il rotazione della cialda deve essere progressivo e privo di urti, affinché la cialda non cada e si disponga in modo non ottimale durante il movimento,
- ▶ la cialda deve essere avvicinata alla doccetta in modo progressivo e con movimento lento e preciso nel finale,
- ▶ il punto morto di sicurezza nel serraggio finale e la centratura della cialda contro la

doccetta devono evitare perdite e trafileamenti in fase di erogazione del caffè.

I meccanismi di roto-traslazione presenti in commercio presentano tipicamente un moto disaccoppiato prima di rotazione (qualitativamente lineare) e successiva traslazione con moto analogo ai cinematismi biella-manovella con velocità iniziale più elevata e accostamento più lento per la configurazione di erogazione caffè. In rari casi si ha contemporaneamente spostamento e rotazione del gruppo in un moto composto. Nella transizione tra rotazione e traslazione sono evidenti problematiche di possibili urti o leggeri impuntamenti che possono essere ridotti attraverso una progettazione accurata della transizione e possibili accorgimenti per recuperare eventuali giochi.

Ancora una volta il cinematismo biella-manovella è il cuore del sistema.

I fondamenti del meccanismo

Per comprendere come il meccanismo biella-manovella abbia valide motivazioni della sua grande diffusione, non solo per quanto riguarda i motori a combustione interna, si introdurrà una sola equazione che descrive lo spostamento lineare della testa di biella I (punto B), in funzione della rotazione ϑ della manovella r intorno al punto fisso O.

Definendo

$$\lambda = \frac{l}{r}$$

l'inverso del cosiddetto "rapporto di allungamento" e

$$\varepsilon = \frac{h}{l}$$

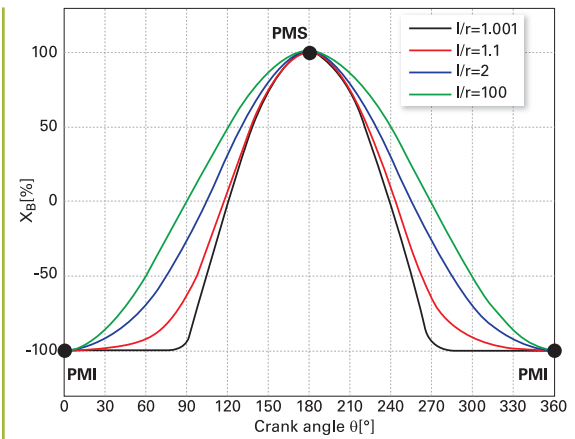
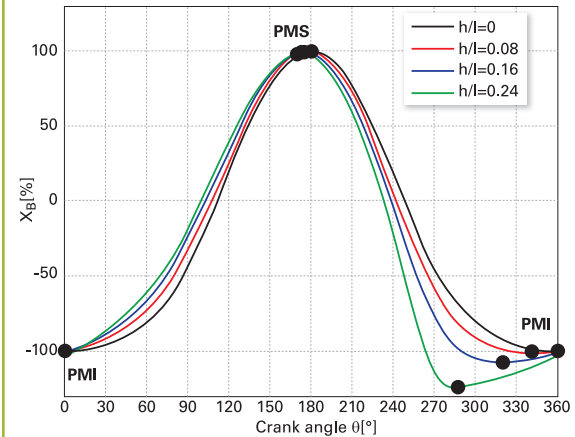


Fig. 4 – Caratteristiche parametriche del cinematismo biella-manovella



l'eventuale disallineamento del cinematismo, lo spostamento del portacialda (Fig. 3) risulta:

$$x_B = r \cos \vartheta + \sqrt{\lambda^2 - (\sin \vartheta - \varepsilon \lambda^2)^2}$$

In pratica, questa formula dimostra che il meccanismo biella-manovella è in grado di modulare, durante la rotazione, la massima distanza raggiungibile dalla sola manovella: all'aumentare della lunghezza della biella lo spostamento e la velocità dell'estremo del portacialda tendono a diventare sempre più prossimi a forme sinusoidali; al contrario, più le dimensioni di biella e manovella sono confrontabili, più il moto periodico differisce da un moto sinusoidale. Analoghe considerazioni possono essere delineate per la velocità del punto B, la velocità massima cresce marcatamente quando il rapporto di allungamento è prossimo all'unità.

Da questa proprietà deriva l'immediata applicazione nel convertire il moto rotatorio in un moto controllato di avanzamento, nel caso specifico, del portacialda.

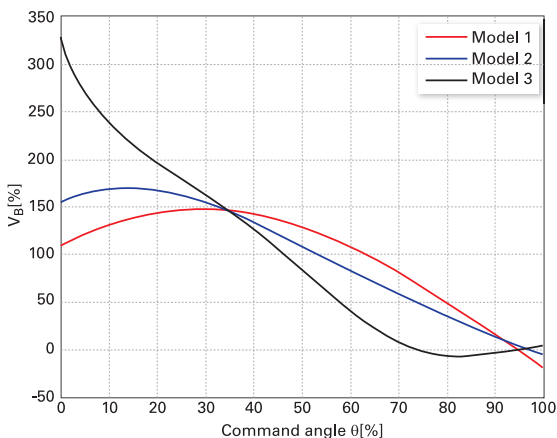
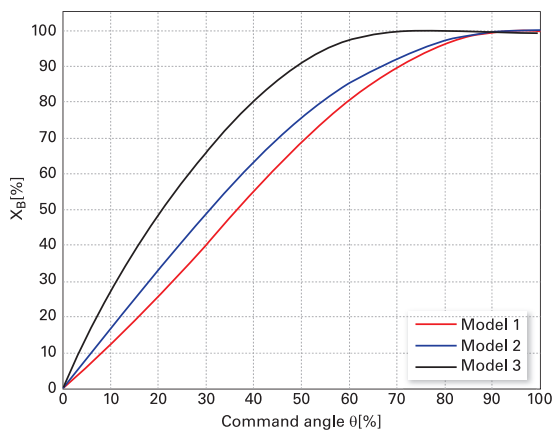


Fig. 6 – Confronto adimensionale tra i cinematismi

Si precisa inoltre che, a differenza del classico utilizzo a 360° della manovella, il cinematismo può essere applicato anche nel caso in cui la manovella sia più lunga della biella ($r > l$); in quest'ultimo caso il manovellismo avrà un campo angolare di lavoro ridotto, assumendo il ruolo di un bilanciante.

Confronto adimensionale

Poiché le forme delle cialde disponibili in commercio sono uno degli elementi importanti dal punto di vista brevettuale, coinvolgendo rapporti di forma e dimensioni piuttosto diversi, per poter confrontare i dispositivi è fondamentale utilizzare tecniche di adimensionalizzazione nel trattare le lunghezze dei dispositivi, la corsa e la velocità del portacialda.

Le regioni angolari sfruttate dalle tre macchine in esame (indicate con la regione rossa, blu e nera) sfruttano regioni angolari qualitativamente simili intorno al PMS in due casi (range compreso tra 90° e 200°), mentre la rimanente sfrutta il PMI (range da 230° a 360°).

La figura 5 evidenzia le diverse regioni con una freccia per indicare il verso di rotazione del cinematismo per raggiungere la configu-

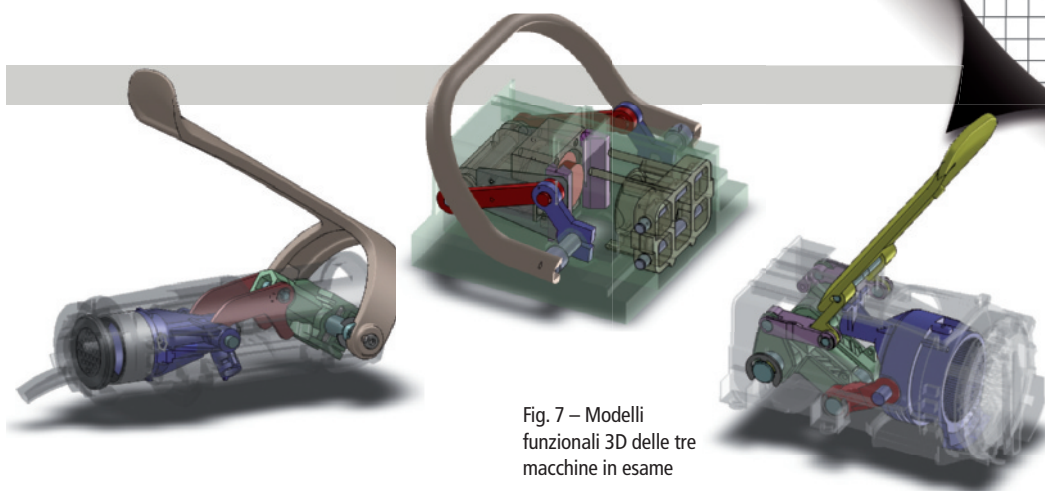


Fig. 7 – Modelli funzionali 3D delle tre macchine in esame

razione di erogazione caffè. L'adimensionalizzazione dello spostamento e della velocità del porta cialda, rappresentate nella Figura 6 per i tre cinematismi, è definita considerando lo spostamento del punto B riferito allo spostamento massimo (100%). Similmente, per la rotazione della manovella, si considera l'angolo minimo (0%) e massimo (100%) che la manovella può compiere nel cinematismo considerato. Per la velocità del portacialda si considera come riferimento (100%) la velocità media costante per percorrere la corsa compiuta dal cinematismo.

Il grafico dello spostamento indica come i casi rosso e blu abbiano un andamento simile (spostamento in percentuale vs. rotazione della manovella in percentuale), mentre per il caso nero si verifica che gran parte dello spostamento del punto B si ha dopo solo il 60% della rotazione della manovella, durante la seconda parte della rotazione quindi il portacialda non si muove, o comunque lo spostamento è molto limitato, conseguente all'introduzione di un secondo stadio di riduzione (sempre riconducibile a un biella-manovella) tra leva di comando e manovella.

Negli andamenti delle velocità del punto B nei tre sistemi è subito evidente come il manovellismo nero permetta di raggiungere velocità molto elevate nella prima parte (nell'ordine di più del 300% della velocità di confronto costante), per poi mantenere una velocità praticamente nulla per circa il 40% della rotazione conclusiva della manovella. Invece nei rimanenti manovellismi si ha una velocità superiore al 100% per la prima parte di rotazione della manovella, e una velocità inferiore al 100% che si annulla solo alla fine per la seconda parte di rotazione.

Escludendo quindi la soluzione nera (cinema-

ticamente superiore, ma costituita da due stadi di conversione), il confronto tra la soluzione rossa e quella blu porta a una valutazione cinematicamente superiore per il caso blu, poiché viene sfruttato un range angolare più idoneo (PMI), nonostante un rapporto di allungamento più svantaggioso.

Le soluzioni tecniche

Per l'analisi cinematica precedente e per la valutazione tecnica dell'industrializzazione del prodotto, sono stati sviluppati i modelli funzionali tridimensionali delle macchine, riproducendo nel dettaglio le caratteristiche geometriche e i materiali impiegati.

Nelle fasi di smontaggio e nel realizzare i modelli funzionali tridimensionali dei tre cinematismi, si sono osservate scelte progettative non sempre allineate.

I materiali plastici dominano sui pochi elementi strutturali quali perni e, in alcuni casi, bielle. Pochi elementi elastici devono garantire il recupero dei giochi e, naturalmente, garantire tenuta dopo il superamento del punto morto e, quindi, dell'impuntamento del sistema. Il primo manovellismo mostra un buon livello di industrializzazione, dal punto di vista della riduzione del numero dei componenti e della semplicità di assemblaggio.

Il secondo manovellismo presenta scelte progettuali e componentistiche con alcuni limiti sulla leggerezza del cinematismo, un numero maggiore di componenti e di elementi elastici e, infine, ingombri del cinematismo non particolarmente ridotti. La cinematica imposta risulta superiore al primo e inferiore al terzo.

Il terzo manovellismo sembrerebbe una evoluzione del primo, presenta sottogruppi e sequenze di assemblaggio molto simili. Anche i

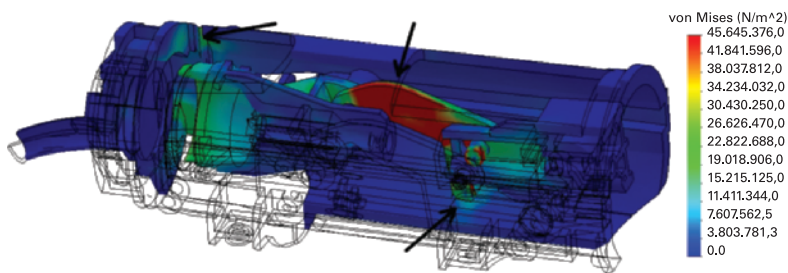
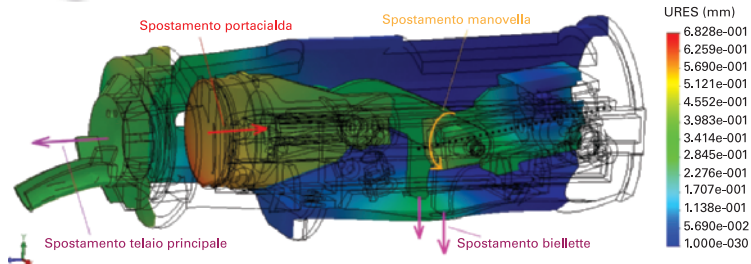


Fig. 8 – Spostamenti e tensioni equivalenti di Von Mises di uno dei modelli funzionali 3D

luzione del primo, presenta sottogruppi e sequenze di assemblaggio molto simili. Anche i due gruppi cinematici di movimentazione della cialda sono realizzati con tecnologie e materiali simili, ma hanno disegno diverso, come se il terzo cinematismo, con un numero di componenti maggiore e, quindi, con un disegno più complesso, fosse una evoluzione o perfezionamento del primo.

Verifiche e dimensionamento

Una volta verificata la parte cinematica con l'approccio rigoroso analitico, si possono simulare i comportamenti cinematici con i modelli funzionali tridimensionali. Sicuramente i tipici approcci multi-body integrati in ambienti CAD/CAE possono fornire immediatamente anche le differenze ottenute tenendo in conto delle cedevolezza degli elementi elastici sul cinematismo.

Inoltre, in configurazione di evaporazione del vapore, si possono utilizzare i tipici approcci multi-body e di discretizzazione agli elementi finiti per la determinazione delle forze scaricate sui vincoli esterni (al telaio) ed interni (tra i singoli componenti) e per l'analisi delle deformazioni e delle tensioni interne dei componenti.

Le condizioni di sollecitazioni del manovellismo sono considerevoli: la pressione esercitata dal vapor acqueo sul fondo della cialda preme la doccetta e il manovellismo verso l'impuntamento.

Si può considerare cautelativamente una pressione di 15 bar sulle superfici del portacialda e della doccetta a causa delle cadute di pressione rispetto alla pressione imposta dalla pompa.

La permeazione ottimale del vapore nella cialda permette di raccogliere sul beccuccio il caffè erogato.

A titolo di esempio, nella figura 8 si posso-

no apprezzare gli spostamenti e le sollecitazioni equivalenti di Von Mises su uno degli assiemi. Come fisicamente ragionevole, si delinea un allungamento del telaio nella zona della doccetta e analogo compressione del cinematismo che impuntandosi sul telaio, tende a deformare la parte inferiore del telaio stesso.

Dal punto di vista tensionale, rimangono evidenti nel caso illustrato le due bielle particolarmente sollecitate, in quanto trasmettono la spinta del vapore nel portacialda sul perno di manovella e, quindi, al telaio. Non a caso, a differenza di tutti i rimanenti componenti in materiali plastici, le due bielle sono gli unici elementi in acciaio ottenuti per tranciatura. In tutti i cinematismi analizzati l'opportuno dimensionamento di irrigidimenti e nervature permettono l'ottimale trasferimento dei carichi e un elevato sfruttamento dei materiali.

Conclusioni

Dall'impostazione cinematica delle proprietà del manovellismo biella-manovella e dall'analisi comparativa effettuata, si possono desumere le linee guida di progettazione con cui orientare l'impostazione cinematica e lo sviluppo industriale di innovativi meccanismi di caricamento di cialde in macchine per espresso casalinghe:

- ▶ un azionamento ergonomico con rotazione della leva di comando θ al massimo di 90° ;
- ▶ uno spostamento della cialda con velocità inizialmente piccola, poi crescente nella zona centrale e ancora decrescente con accostamento a velocità molto bassa nella fase finale di bloccaggio della cialda contro la doccetta;
- ▶ se possibile, contemporanea rotazione e traslazione del portacialda con cinematismo composto e integrato;

- ▶ per cinematismi con rototraslazione della cialda, un angolo di rotazione della cialda φ di circa 60° ;
- ▶ in questa tipologia di cinematismi, rotazione molto dolce a velocità decrescente di rotazione in modo da evitare urti a conclusione della fase.
- ▶ In conclusione, si può affermare che il meccanismo di movimentazione composto angolare e traslativo della cialda possa essere percepito dall'utente come una caratteristica al tempo stesso utile e gradita dal punto di vista ergonomico e funzionale.

Nell'analisi delle diverse soluzioni si è visto come si possano soddisfare i requisiti esposti sopra per rendere semplice, affidabile e preciso il meccanismo di movimentazione della cialda.

Tenendo conto che i meccanismi considerati devono essere prodotti in quantità elevate ed inseriti in macchine con un costo globale molto limitato, gli schemi e i modelli funzionali devono tendere a una progettazione che riduca al massimo il numero di componenti necessari per realizzare il movimento.

E tutta questa attività di progettazione e ottimizzazione ingegneristica per degustare alla fine un ottimo prodotto, tipicamente italiano e apprezzato in tutto il mondo: un buon caffè espresso! ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA

Ringraziamenti

Parte del materiale è tratto dalle tesi di laurea di Fulvio Tortoreto, Francesco Rossiello e Fabrizio Dotta, discusse al Politecnico di Torino nel 2010. Si ringraziano il prof. Stefano Tornincasa, coordinatore del progetto, e il Prof. Vittorio Vicentini che insieme hanno fornito diversi spunti e suggerimenti per lo sviluppo del lavoro.