

METODO KRIGING PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DELLE MASSE PER TRENI MERCI

G. Arcidiacono^a, L. Cantone^b, P. Placidoli^c

^a Università degli Studi G. Marconi, Dipartimento per le Tecnologie e i Processi di Innovazione, Via Plinio, 44 -00193 Roma, e-mail: g.arcidiacono@unimarconi.it

^b Università degli Studi di Roma - Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa "Mario Lucertini", Viale del Politecnico, 1 -00133 Roma, e-mail: Luciano.Cantone@uniroma2.it

^c Università degli Studi G. Marconi, Dipartimento per le Tecnologie e i Processi di Innovazione, Via Plinio, 44 -00193 Roma, e-mail: p.placidoli@unimarconi.it

Sommario

I metodi d'interpolazione sono spesso utilizzati in problemi ingegneristici analizzati con procedure di calcolo iterative in quanto forniscono un mezzo efficace per la modellazione e l'ottimizzazione in ambito multi-obiettivo. Il lavoro propone una procedura di ottimizzazione basata sul metodo Kriging applicato ad un Design of Experiments (DoE) esplorativo. Per esaminare il design space il campionamento è generato utilizzando l'algoritmo Sobol in modo da garantire una scelta imparziale degli individui. La procedura di ottimizzazione è qui applicata al calcolo delle performance di frenatura (valutate in termini di forze longitudinali) di un treno merci in configurazione classica con locomotiva in testa per diverse manovre ferroviarie. Poiché tali performance sono legate alla ripartizione delle masse nel treno, la procedura implementata individua efficacemente la loro distribuzione ottimale. Le simulazioni sono condotte con il software *TrainDy*, certificato internazionalmente per questo tipo di calcolo in modo da aumentare la significatività applicativa dei risultati ottenuti.

Abstract

The interpolation methods are often used in engineering problems. They are analyzed by interactive calculation procedures since they create an effective tool to model and optimize in the multi-objective field. This study proposes an optimization procedure based on the Kriging method and applied to an exploratory Design of Experiments. To observe the design space, the sampling is generated by the Sobol algorithm, which ensures a fair choice of individuals. In this case, the optimization procedure is applied to the evaluation of the braking performance (assessed through the longitudinal forces) of a freight train that employs the classical train configuration (with only a front loco) for different railway operations. Since these performances are related to the mass distribution in the train, the implemented procedure finds its effective optimal distribution. In order to increase the validity and the application of the obtained results the simulations are performed through the software *TrainDy*, which is certificated internationally for this type of calculation.

Parole chiave: Modello Kriging, DoE, trasporto ferroviario merci, ottimizzazione della distribuzione delle masse.

1. INTRODUZIONE

Il trasporto ferroviario merci è una modalità di trasporto economica ed energeticamente efficiente, il cui utilizzo è incoraggiato dalla politica europea dei trasporti. Per tale ragione la ricerca di strategie che ne incrementino l'efficacia risulta essere un campo di studio di grande attualità. Tra queste, l'aumento della lunghezza complessiva del treno è quella che sembra avere una maggiore possibilità di attuazione. Tale

risultato può essere ottenuto in due modi: posizionando le locomotive in testa e, per superare gli 800 m di lunghezza, ponendone una o più lungo il treno (in posizione centrale o di coda). In entrambi i casi, durante una frenatura o un'accelerazione seguita da una frenatura, si generano forze longitudinali di compressione tra i respingenti dei diversi veicoli, che possono essere così elevate da portare in particolari condizioni (ad es. durante la percorrenza di una curva) al deragliamento di alcuni carri. Fissata la manovra ferroviaria, il regime di frenatura e la massa complessivamente trainata, risulta che queste forze dipendono notevolmente dalla distribuzione del "carico" (massa trasportata dal carro ferroviario) lungo il treno e, come detto, qualora siano molto elevate sono tali da causare il deragliamento del convoglio. Il presente lavoro riguarda lo studio e l'implementazione di un metamodello che ottimizzi la distribuzione delle suddette masse, in modo da poterne trovare una configurazione che minimizzi le forze di compressione tra veicoli durante una manovra di emergenza del convoglio. Questo studio è da considerarsi un'evoluzione del percorso di ricerca intrapreso degli stessi Autori [1], ove si desumeva l'importanza posizionale di ogni veicolo rappresentandolo come un fattore di piani fattoriali completi o ridotti utilizzati per l'analisi statistica. Nel presente lavoro invece, pur condividendo lo scopo del precedente, si affronta la problematica attraverso l'implementazione di un flusso di ottimizzazione mediante il modello Kriging. Quest'ultimo è il più noto metodo di interpolazione statistica utilizzato nella geostatistica. Questa branca della statistica si occupa dell'analisi di dati spaziali e il suo campo classico di applicazione sono le Scienze della Terra, in particolar modo la Geologia. Si pone come obiettivo quello di verificare se osservazioni effettuate su punti vicini presentino effettivamente una minore variabilità rispetto ad osservazioni effettuate tra punti distanti, valutando cioè l'effetto della posizione del punto di misura sulla variabilità del dato osservato. Il modello Kriging negli ultimi anni è divenuto tuttavia uno strumento fondamentale per la creazione di metamodelli grazie alla crescente capacità di calcolo dei computer che consente lo studio di complessi problemi ingegneristici attraverso la simulazione numerica. In tale ambito però, a fronte di una maggiore accuratezza della simulazione, è generalmente richiesto un aumento dell'onere del tempo computazionale, problema ancora più evidente se si considerano applicazioni in cui si vuole condurre una ottimizzazione multi obiettivo in cui si richiede una procedura di calcolo di tipo iterativo. Per questo tipo di scenario l'utilizzo di modelli matematici che approssimino l'output del codice è divenuto uno strumento fondamentale in ottica di efficienza di simulazione. L'idea base per la definizione di un metamodello è quella di poter avere uno strumento che agisca sia come "curve fit" dei dati di output calcolati, sia come strumento di data mining il cui scopo è quello di poter desumere le relazioni funzionali tra le variabili di input e output e poterne fornire una visualizzazione intuitiva attraverso l'utilizzo di grafici [2]. Il lavoro in oggetto, applicato alla problematica dell'ottimizzazione della distribuzione di masse lungo i treni merci (fissata la massa complessivamente trasportata), propone tale tipo di modellazione in un'ottica innovativa, diversa dai suoi classici ambiti di utilizzo.

2. MODELLO KRIGING

Il Kriging è un metodo di regressione che permette di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio. Conoscendone il valore in alcuni punti, possiamo stimare il valore della medesima grandezza per altri punti di cui non esistono misurazioni. Nel Kriging, questa interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione che definisce il grado di dipendenza spaziale tra i valori assunti da una variabile campionata. Si assume, quindi, che la correlazione fra i valori della variabile tenda a diminuire con l'aumentare della distanza.

Dal punto di vista stocastico, ogni punto dello spazio non ha un solo valore per la data proprietà incognita, ma un insieme di valori. Ciò significa che per ogni punto \mathbf{x} la rispettiva proprietà $\mathbf{Z}(\mathbf{x})$ è trattata come una variabile casuale continua con media μ e varianza σ^2 e il set di valori reali (misurati) di \mathbf{Z} può considerarsi come una variabile regionalizzata [3], variabile il cui valore è fortemente condizionato dalla posizione spaziale.

Dal punto di vista teorico [4] il modello Kriging ipotizza che il processo che genera le variabili di output segua il seguente modello:

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (1)$$

Dove μ è la media del processo e $\varepsilon(x)$ è una variabile casuale di media zero e covarianza $C(h)$, dove:

$$C(h) = E[\varepsilon(x)\varepsilon(x+h)] \quad (2)$$

O esprimibile come:

$$C(h) = E[\{Z(x) - \mu\}\{Z(x+h) - \mu\}] = E[Z(x)Z(x+h) - \mu^2] \quad (3)$$

In tali equazioni h (*lag*) è la distanza tra gli individui del design space mentre $Z(x)$ e $Z(x+h)$ sono i valori di Z calcolati nel punto x e $x+h$. Fino ad ora si è implicitamente supposto che il processo stocastico fosse di tipo stazionario in senso forte, dove la funzione di densità di probabilità della variabile casuale Z non cambia né in funzione del tempo né dello spazio. Tuttavia è usuale considerare ai fini della definizione del modello, l'ipotesi di processo stazionario in senso debole [3], dove solo i primi due *momenti* (la media μ e la varianza σ^2) non cambiano nel tempo e nello spazio. In questo caso si ha che $E[Z(x) - Z(x+h)] = 0$ e la covarianza viene sostituita dalla metà della varianza delle differenze, la semivarianza:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[\{Z(x) - Z(x+h)\}^2] \quad (4)$$

E' importante notare come tale modellazione sia applicabile al caso della simulazione numerica se si considera l'output della stessa come realizzazione di un processo stocastico. L'errore ε , in questo caso viene interamente attribuito al modello essendo la simulazione numerica deterministica per sua natura. Il termine μ del modello può essere perciò interpretato come un'approssimazione globale del design space, mentre il termine $\varepsilon(x)$ come la variazione localizzata della risposta incognita.

2.1 Variogramma

La funzione $\gamma(h)$ nel metodo Kriging è chiamata variogramma e viene ottenuta applicando il *metodo dei momenti di Matheron* [3]:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{j=1}^{m(h)} \{z(x_j) - z(x_j+h)\}^2 \quad (5)$$

In cui Z è il valore di una misura in un particolare punto, h è un intervallo tra punti di misurazione (*lag*) e $m(h)$ rappresenta il numero di coppie di osservazioni effettuate alla distanza h . Gli assi del variogramma sono distanze tra coppie di dati (asse x) e semivarianza (asse y). Una volta calcolati i punti del variogramma si esegue un fitting attraverso un modello regressivo interpolante i punti del variogramma stesso (si veda la Figura 1).

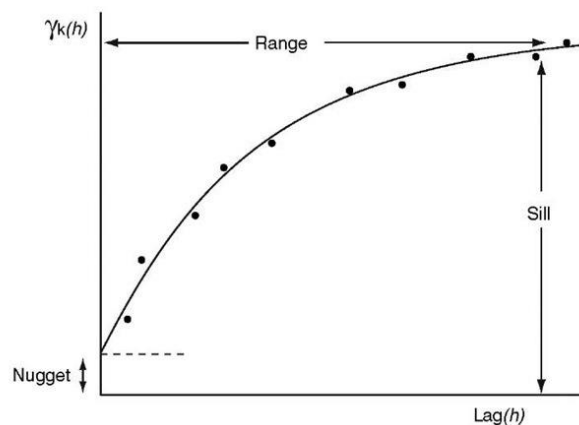


Figura 1: Esempio di funzione variogramma.

Le funzioni di correlazione generalmente utilizzate sono quella esponenziale, gaussiana o sferica di cui vengono stimati i seguenti parametri:

- *Nugget*: descrive il livello di variabilità casuale;
- *Sill*: valore massimo della semivarianza quando si ha stazionarietà (esso approssima per eccesso la varianza campionaria);
- *Range*: rappresenta la distanza massima entro la quale si manifesta una correlazione tra semivarianza e lag.

Dal punto di vista operativo l'approccio seguito per scegliere la funzione di correlazione è quello generalmente implementato nei moderni software statistici ed è il seguente [1]:

- 1- Rappresentare graficamente il variogramma sperimentale;
- 2- Applicare un fitting di diversi modelli col metodo pesato dei minimi quadrati [5];
- 3- Rappresentare graficamente il modello sul variogramma sperimentale per verificare che il fitting sia accettabile;
- 4- Nel caso in cui vi sia più di un modello che risulta adeguato, occorre scegliere quello con la minima somma dei quadrati dei residui.

La stima \hat{Z} delle risposte $Z(x)$ di punti non appartenenti al piano sperimentale è calcolata come:

$$\hat{Z}(h) = \hat{\mu} + \psi^T \Psi^{-1} (y - \mathbf{1} \hat{\mu}) \quad (6)$$

Dove Ψ è il modello regressivo scelto e la stima di μ e varianza σ^2 sono:

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{1}^T \Psi^{-1} y}{\mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{1}} \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(y - \mathbf{1} \hat{\mu})^T \Psi^{-1} y}{n} \quad (8)$$

3. PROCEDURA DI OTTIMIZZAZIONE CARICO TRENI

Nel presente lavoro, il metamodello Kriging viene quindi applicato all'individuazione della disposizione ottimale della masse lungo il convoglio ferroviario che garantisca performance di frenatura tali da ridurre le massime forze longitudinali in compressione (al fine di evitare il rischio di deragliamento) ed in trazione (al fine di evitare lo "spezzamento" del treno in corrispondenza dei ganci di trazione). Per l'applicazione in esame è stato considerato il caso del treno merci adibito a trasporto rottami, scenario nel quale la posizione dei veicoli che costituiscono il convoglio e il carico totale trasportato sono scelti a priori secondo criteri logistici in ottica di efficienza di carico e scarico merci ed in cui ogni carro trasporta carichi uniformemente distribuiti (ad es., carbone, acciaio in rottami). In particolare è stato considerato un treno merci con locomotiva in testa e costituito da 33 carri, operante su tracciato in piano, soggetto a due tipi di manovre ferroviarie: la frenatura di emergenza da 30 km/h ed una manovra di trazione (accelerazione del treno) fino a 30 km/h seguita da una frenatura di emergenza. Per quanto concerne il carico trasportato, si è voluta esplorare una condizione in cui il carico trasportato corrispondesse al 50 ed all'80 % della massima capacità di traino (determinata, tra le altre cose, dal massimo carico verticale per asse ferroviario). Con la prima condizione di carico, si è inteso esplorare completamente le possibili condizioni di carico di un carro che sono potute variare dalla condizione di "tara" (nessun carico trasportato) a quella di carico massimo. Con la seconda condizione ci si è posti in una condizione più frequente dal punto di vista operativo, nella quale tutti i carri sono carichi ed alcuni lo sono maggiormente. L'analisi è volta al calcolo delle forze longitudinali di compressione a 2 m ed a 10 m e di quelle in trazione a 2 m, al fine di valutare quali sono le distribuzioni ottimali di massa in grado di minimizzare le precedenti quantità; il software di calcolo utilizzato per le analisi è *TrainDy*,

internazionalmente certificato per questo tipo di calcoli [6]. Le precedenti forze longitudinali di compressione e trazione sono, quindi, le variabili di output per il metamodello.

Per procedere alla realizzazione del metamodello, il primo passo è quello di definire la strategia di costruzione del piano DoE. Per avviare la campagna sperimentale di simulazione numerica è, infatti, prima necessario scegliere gli individui da testare, i treni, in modo da avere un campione il più possibile rappresentativo della popolazione. L'approccio seguito in questa fase è frutto del carattere distintivo del metodo Kriging: il concetto di correlazione spaziale tra le variabili. Ciò significa innanzitutto trovare variabili continue che possano rappresentare in maniera univoca la distribuzione di massa del singolo treno e che quindi possano caratterizzarlo in maniera non ambigua. Una combinazione di variabili deve necessariamente contraddistinguere un solo treno del DoE. La caratteristica identificativa scelta, per ogni individuo del piano, è la forma della distribuzione di carico lungo tutto il convoglio: l'approccio si può però applicare a diverse sotto-sezioni del treno. Facendo riferimento alla casistica reale per quanto concerne il trasporto rottami, le distribuzioni scelte per la costruzione del piano sperimentale sono quella uniforme, triangolare e trapezoidale, si veda la Figura 2, e che sono rappresentabili matematicamente per mezzo di sole variabili continue.

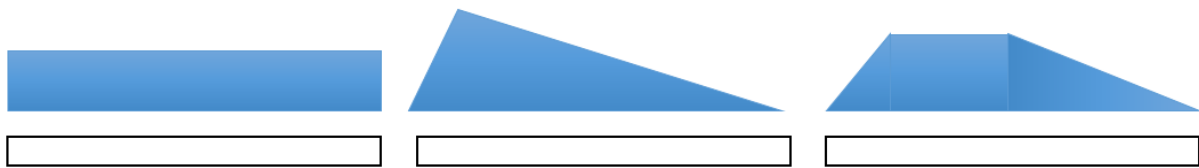


Figura 2: Rappresentazioni di diverse distribuzioni di massa.

Impostando a priori il numero di carri che compongono il treno e il carico trasportato, corrispondenti rispettivamente alla base (B) di ogni forma geometrica e all'area (Q) della stessa, si veda la Figura 3 (a), ogni possibile distribuzione è quindi univocamente determinata solo dai parametri h ed x . Dal punto di vista della configurazione di carico del treno, la variazione del parametro h determina la forma della distribuzione mentre la variazione del parametro x identifica la modalità di carico lungo il convoglio. Per meglio chiarire questo concetto, se si considera una generica forma trapezoidale, le tre coppie di valori (h,x) : $(0.5, 0)$; $(0.5, 0.5)$ e $(0.5, 1)$ rappresenteranno rispettivamente i tre trapezi evidenziati in Figura 3 (b) in cui il carico massimo è disposto in testa, al centro e in coda al treno. Per mezzo di due sole variabili continue parametrizzate tra 0 e 1, è quindi possibile rappresentare tutte e tre le condizioni di carico di interesse ferroviario in quanto le distribuzioni triangolare e uniforme sono casi degeneri della forma trapezoidale (base minore nulla o uguale alla base maggiore) in cui il parametro h assume rispettivamente il valore di 1 e 0.

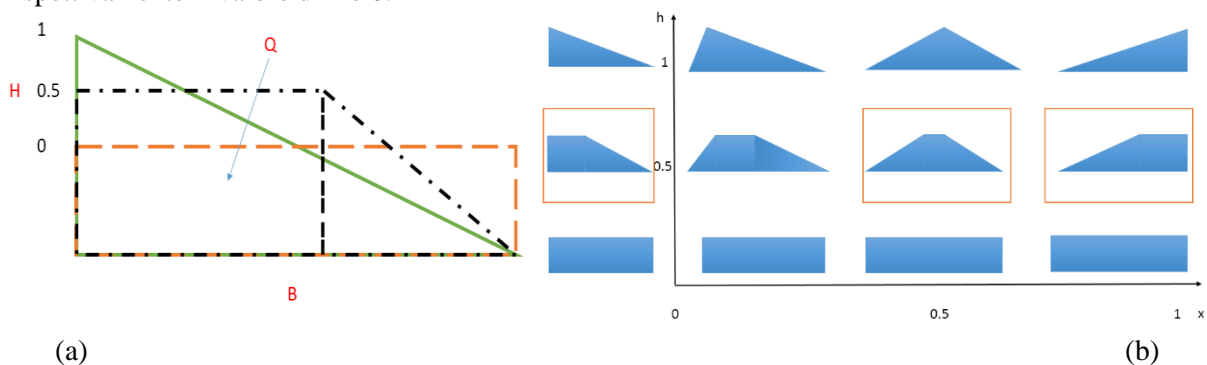


Figura 3: (a) Distribuzioni isoarea; (b) Rappresentazione del design space

Definita la strategia di rappresentazione per ogni individuo, si è successivamente scelto il numero e le diverse configurazioni di carico del treno per la campagna di simulazioni. Il DoE è stato costruito attraverso un algoritmo che generasse una sequenza Sobol [7]. Tale tipo di DoE esplorativo fa parte della famiglia degli *space filling design*. Gli individui da simulare sono di fatto scelti in maniera tale da

poter “coprire” l’intero design space eliminando le configurazioni ridondanti e generare così un campione rappresentativo del comportamento della variabile incognita. In Figura 4 è mostrato il piano sperimentale composto dai 400 individui di cui verrà effettuata la simulazione con *TrainDy*.

La costruzione del variogramma per la variabile incognita (forza di compressione o trazione), è stato effettuato con l’utilizzo del software di analisi statistica modeFrontier che ha consentito di effettuare le routine di calcolo per l’applicazione del Kriging e confrontare così diverse funzioni di covarianza. Tra queste è stata scelta quella esponenziale in quanto consente un miglior fitting del variogramma stesso. E’ stato così possibile costruire la superficie di risposta cercata che interpolasse i dati disponibili fornendo quindi uno strumento di stima dei valori di forza per individui non simulati nella campagna sperimentale.

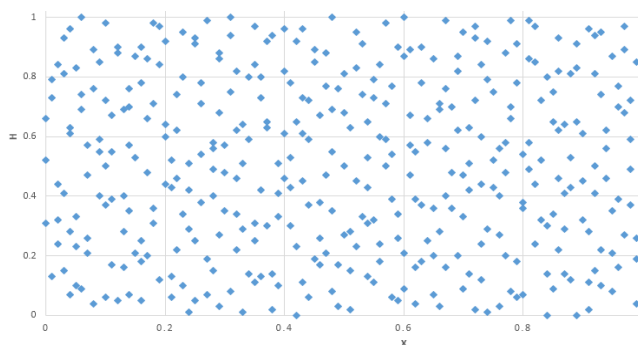


Figura 4: Rappresentazione del piano DoE

4. ANALISI DEI RISULTATI

Conclusa l’implementazione del metamodello, i primi risultati analizzati sono stati quelli relativi al treno caricato al 50% della massima capacità di traino e soggetto a due differenti tipi di manovre ferroviarie: la frenatura di emergenza da 30 km/h e la manovra di trazione (accelerazione) fino a 30 km/h seguita da una frenatura di emergenza fino all’arresto del treno. In fase preliminare, è stato condotto lo studio degli individui testati attraverso i classici strumenti della statistica descrittiva così da poter effettuare un’analisi di sensibilità dei risultati ottenuti.

Per determinare l’importanza delle variabili di input h e x rispetto alle variazioni delle forze sono stati confrontati i coefficienti di correlazione di Pearson, riportati in Tabella 1. Com’è ben noto, un valore dell’indice compreso tra 0 e 0.3 indica una correlazione debole, tra 0.3 e 0.7 una correlazione moderata, maggiore di 0.7 una correlazione forte. Nel caso specifico, per entrambe le manovre ferroviarie, si ha un indice maggiore di 0.7 per la variabile x e minore di 0.4 per h (si veda tabella 1): ciò significa che la modalità di posizionamento del carico lungo il treno ha una influenza maggiore rispetto alla forma della distribuzione.

Tabella 1: Indici di correlazione di Pearson

Variabili di input	x	h
Man. Fen. Emerg.	0.84	0.342
Man. Traz. Fren Emerg.	0.748	0.364

Si osserva, inoltre, come entrambi i coefficienti siano positivi indicando che ad una variazione positiva dei parametri di input corrisponde un aumento della forza longitudinale di compressione a 10m e, quindi, un peggioramento della dinamica longitudinale del convoglio durante la manovra. Le migliori configurazioni risultano quindi quelle in cui i carri maggiormente carichi si trovano in testa al convoglio, a parità di massa complessivamente trasportata. Tale considerazione trova riscontro nella comune pratica ferroviaria di porre in coda i vagoni scarichi. Per quanto concerne il comportamento della forza al variare della forma della distribuzione (uniforme, trapezoidale, triangolare) risulta interessante la rappresentazione grafica del campione simulato riportata nelle Figure 5 e 6.

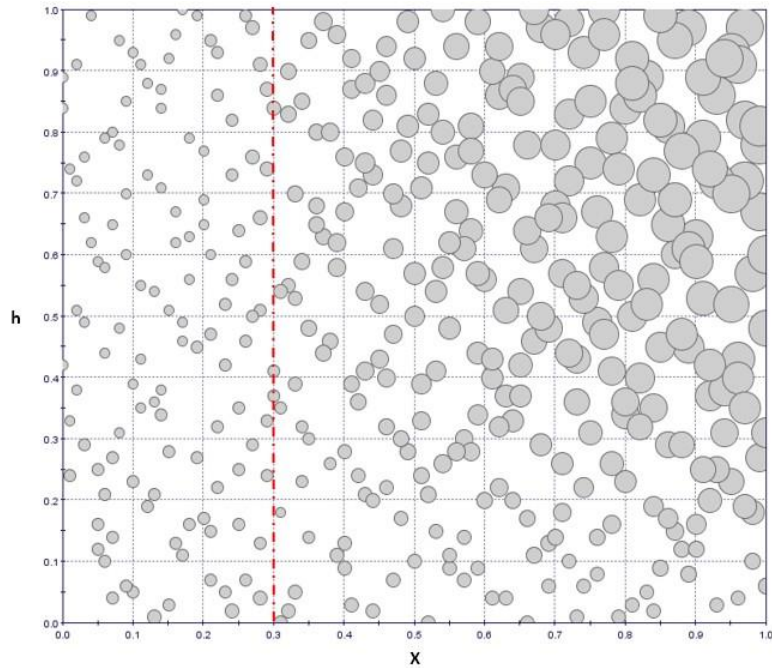


Figura 5: Diagramma a bolle per la manovra di frenatura di emergenza per treno carico 50%

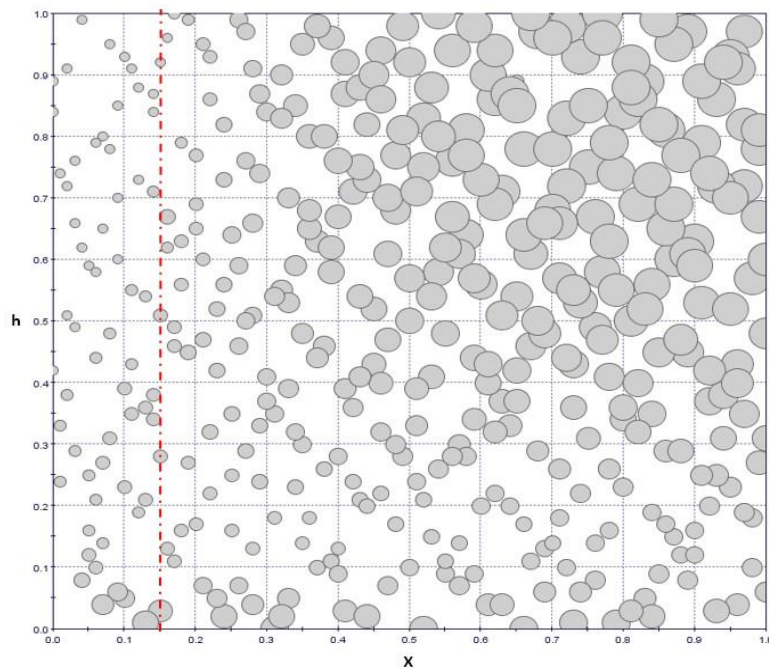


Figura 6: Diagramma a bolle per la manovra di trazione seguita da frenatura di emergenza per treno carico 50%

Sugli assi coordinati del diagramma a bolle sono riportate le variabili di input mentre la variabile di output è rappresentata dal diametro della bolla. L'aspetto interessante che si coglie dall'analisi della manovra di frenatura di emergenza, riguarda la presenza di due zone ben distinte riferite ad un valore del parametro x pari a 0.3. Per x comprese tra 0 e 0.3, i carri maggiormente carichi lungo il primo terzo del convoglio, si hanno forze basse (diametro piccolo della bolla) per qualsiasi variazione di h . Ciò significa che in questa prima zona la forma della distribuzione è trascurabile in relazione alla forza. Per x maggiori di 0.3, ossia per carri maggiormente carichi da un terzo della lunghezza del treno in poi, la geometria della distribuzione (data dal parametro h) è rilevante ai fini dell'aumento della forza. Si nota in questa seconda zona infatti, che a parità di x si verifica un peggioramento della dinamica del treno

con l'aumentare di h , passando cioè dalla forma di carico uniforme a quella triangolare. Per quanto concerne la manovra di trazione seguita dalla frenatura di emergenza, si veda Figura 6, possono essere fatte considerazioni analoghe riguardo l'importanza delle variabili di input e la loro relazione sulla risposta. Anche in questo caso si evince che la disposizione dei carri maggiormente caricati in testa al treno risulti essere la condizione migliore. È importante sottolineare che in questo tipo di manovra ferroviaria, differentemente da quella precedente, la distribuzione di carico all'incirca uniforme (h compreso tra 0 e 0.1), contribuisce ad un (leggero) aumento della forza di compressione. Questo tipo di confronto evidenzia come la distribuzione di carico ottimale sia, quindi, funzione della manovra eseguita: per configurazioni tradizionali, però, una configurazione del carico maggiormente spostato verso la testa (di tipo triangolare o trapezoidale) è in grado di ottimizzare il comportamento per entrambe le manovre ferroviarie.

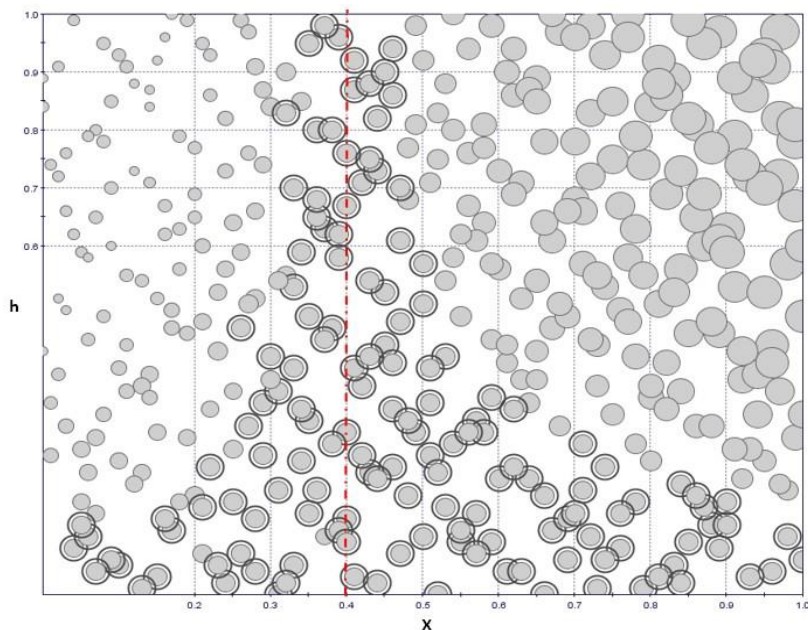


Figura 7: Diagramma a bolle per la manovra di frenatura di emergenza per treno carico 80%

Lo stesso tipo di analisi è stata condotta per le simulazioni relative al treno caricato all'80% della massima capacità di traino, soggetto alla manovra di frenatura di emergenza sempre da 30 km/h (in genere la velocità più critica per questo tipo di manovre ferroviarie). In questo caso in riferimento alle simulazioni cerchiato in nero in Figura 7 si evince che il valor medio della forza di compressione, circa 50 kN, occorra, per tutti i valori di h fissando il parametro x ad un valore di circa 0.4, caricando cioè maggiormente i carri posti al centro del convoglio. Tali simulazioni dividono il grafico nelle consuete zone in cui a valori bassi di x corrisponde una migliore dinamica del treno e viceversa.

Per valutare il comportamento dinamico globale del treno soggetto a questo tipo di manovra, l'analisi è proseguita con lo studio delle forze longitudinali di compressione e di trazione a 2m. Sebbene per le prime si possano svolgere analoghe considerazioni già descritte per le forze di compressione a 10m, si veda figura 8 (a), risulta interessante notare come per le seconde lo studio evidenzia una condizione ottimale di carico del convoglio opposta a quella fin qui descritta. Come si evince dalla figura 8 (b), si hanno infatti forze di trazione alte per treni in cui i carri maggiormente caricati si trovano in testa al convoglio. Si ricorda che alte forze longitudinali in compressione possono portare al deragliamenti di uno o più carri, mentre alte forze longitudinali in trazione possono portare allo "spezzamento" del treno per rottura dei ganci di trazione, con conseguente inagibilità della linea.

Questo comportamento duale delle forze di trazione e compressione, indica che la ricerca dell'ottimale distribuzione di massa del treno non possa prescindere da un'analisi congiunta delle suddette forze. Per tale ragione, ai fini di una descrizione globale della dinamica longitudinale del treno, è stata condotta un'analisi considerando la somma (in modulo) delle forze longitudinali a 2m.

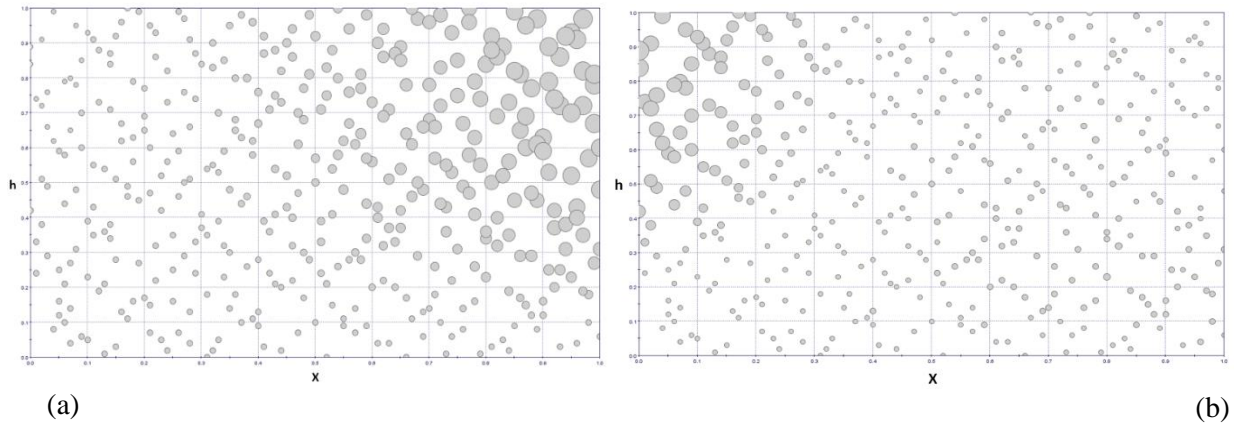


Figura 8: (a) Forze compressione 2m; (b) Forze trazione 2m

In riferimento alla figura 9 si desume come la regione ottimale che garantisca forze basse sia una zona intermedia tra quelle di ottimo delle due forze osservate separatamente. Le configurazioni migliori per distribuzioni di carico non uniforme sono quelle in cui i carri maggiormente caricati sono a circa un terzo della lunghezza del convoglio. Si riscontra, altresì, come la distribuzione uniforme abbia un buon comportamento sia a trazione che compressione; ovviamente tali studi andrebbero proseguiti considerando anche altre manovre ferroviarie e livelli di massa trasportata, cosa che qui non si ha lo spazio d'approfondire.

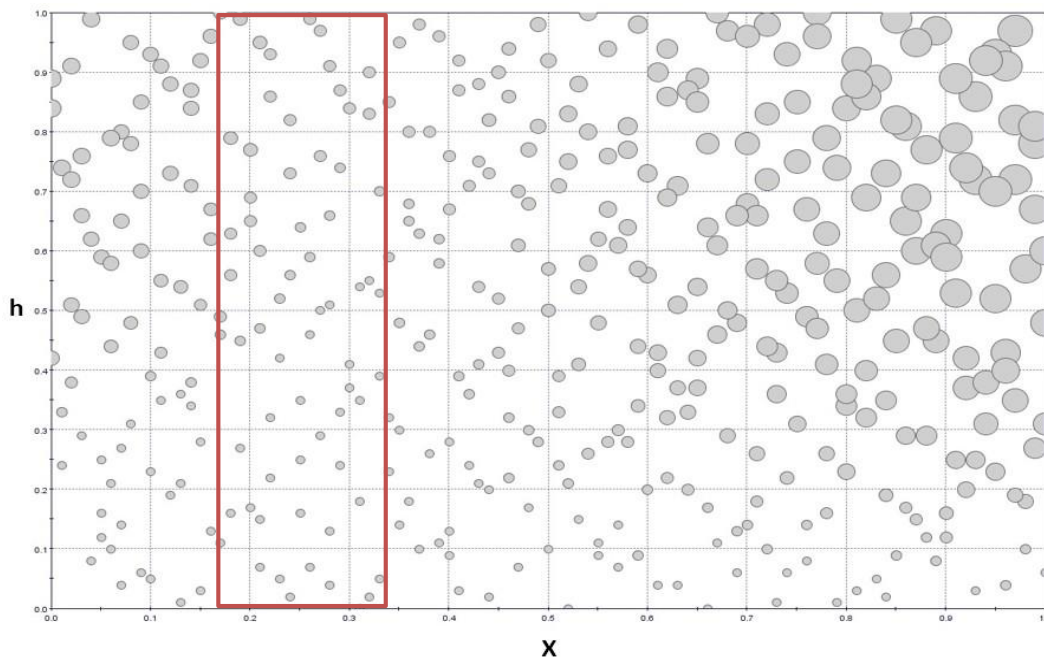


Figura 9: Diagramma a bolle relativo alla somma (in modulo) delle forze longitudinale 2m per la manovra di frenatura di emergenza per treno carico 80%

Per tutti i casi considerati è stata quindi costruita la relativa superficie di risposta effettuando una cross-validazione durante la routine di calcolo. Il modello di predizione è stato infatti “allenato” con 360 simulazioni e validato con le rimanenti 40 confrontando il valore di forza simulato con quello predetto dalla superficie di risposta stessa. In tabella 2 sono riportati il valore massimo dell’errore relativo e il parametro R^2 che indica quanto il modello matematico ricavato sia in grado di “spiegare” bene il fenomeno reale. Tutte e tre le superfici di risposta presentano il valore del parametro R^2 prossimo ad 1 e risultano quindi modelli altamente predittivi. L’errore relativo massimo tra la prova simulata e quella predetta occorre per alcune simulazioni che si trovano in regioni “di confine” del design space

(condizioni estremali di carico) tuttavia l'entità dello stesso può ritenersi accettabile per il tipo di applicazione studiata.

In Figura 10 è rappresentata la superficie di risposta della dinamica longitudinale per il treno caricato all' 80% della massima capacità di traino. Osservando la figura si nota una regione estesa (azzurra), relativa ad un elevato numero di configurazioni, cui corrisponde il valor medio della forza e che delimita le due zone di interesse in cui alle distribuzioni di carico corrispondono la forza minima (blu) e massima (rosso).

Tabella 2: Errore relativo e parametro R^2

	Max Err. Rel.	R^2
Man. Emerg. Treno 50%	7.94 %	0.998
Man. Traz. Emerg. Treno 50%	7.62%	0.997
Man. Emerg. Treno 80%	3.5%	0.996

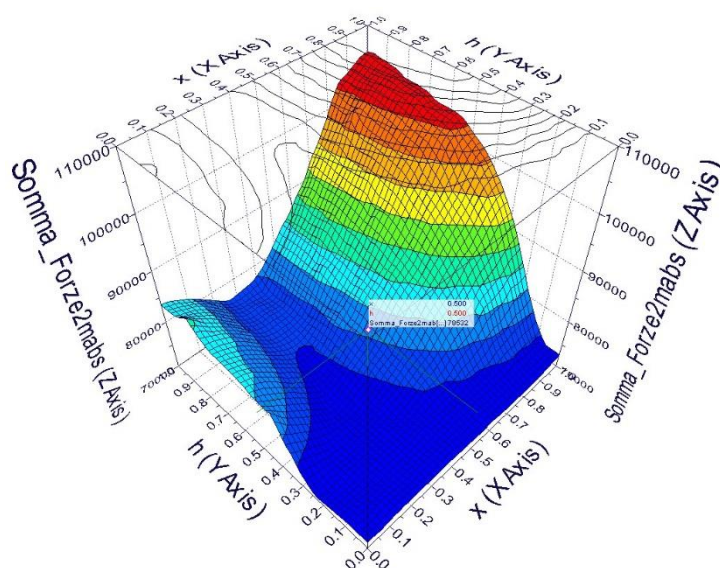


Figura 10: Superficie di risposta manovra frenatura di emergenza treno carico 80%

5. CONCLUSIONI

I metamodelli rappresentano, nello studio di complessi problemi ingegneristici, uno strumento accurato ed efficiente dal punto di vista computazionale alternativo a procedure iterative di simulazione. Oltre a questi vantaggi il loro utilizzo fornisce una chiara comprensione delle relazioni funzionali tra le variabili del problema in esame grazie allo studio analitico del metamodello stesso. Il lavoro mostra l'implementazione di un metamodello basato sul metodo di interpolazione statistico Kriging, al fine di conseguire un duplice obiettivo per quanto concerne l'analisi della complessa dinamica longitudinale di un treno merci adibito a trasporto rottami. Il primo scopo è, infatti, quello di implementare un modello matematico in grado di cogliere il comportamento delle forze longitudinali tra i respingenti del convoglio durante due manovre di emergenza. Il secondo scopo, consiste nell'individuare la distribuzione ottimale di massa lungo il treno che minimizzi le suddette forze e garantisca così una maggior sicurezza di marcia contro il deragliamento da frenatura. Il metodo Kriging oltre a confermare gli esiti di studi già effettuati sulle performance di frenatura di treni merci, ha fornito risultati puntuali sulla ottimale configurazione di massa lungo il treno evidenziando una generale necessità di ripartizione del carico maggiore sui carri posti ad un terzo della lunghezza del convoglio. L'implementazione del metamodello ha inoltre consentito di effettuare un numero ridotto di simulazioni con conseguente beneficio dei tempi di calcolo grazie alla creazione di superfici di risposta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cantone, L., Arcidiacono, G., Placidoli, P., “Ottimizzazione della distribuzione delle masse per treni merci”, AIAS XLII Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana per l’Analisi delle Sollecitazioni, Salerno, 2013.
- [2] Forrester, A. I. J., Sobester, A., Keane, A. J., Engineering design via surrogate modelling: A practical guide, J. Wiley, Chichester, West Sussex, England, 2008.
- [3] Matheron, G., 1965. “Les variables régionalisées et leur estimation”, Masson, Paris.
- [4] Oliver, M.A., Webster, R., “A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging”, CATENA, vol. 113, Febbraio 2014, p. 55-69.
- [5] Cressie, N., 1985. “Fitting variogram models by weighted least squares”, J. Int. Assoc. Math. Geol., vol. 17, p. 563–586.
- [6] Cantone L., “TrainDy: the new Union Internationale des Chemins de Fer software for freight train interoperability”, *Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2011, 225 (F1), 57-70. DOI 10.1243/09544097JRRT347.
- [7] Sobol, I.M., 1976. "Uniformly distributed sequences with an additional uniform property", U.S.S.R Comput. Maths. Math. Phys. vol. 16, 236-242 (in English).