POLITECNICO MILANO 1863 | DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Workshop AGI – Intelligenza artificiale

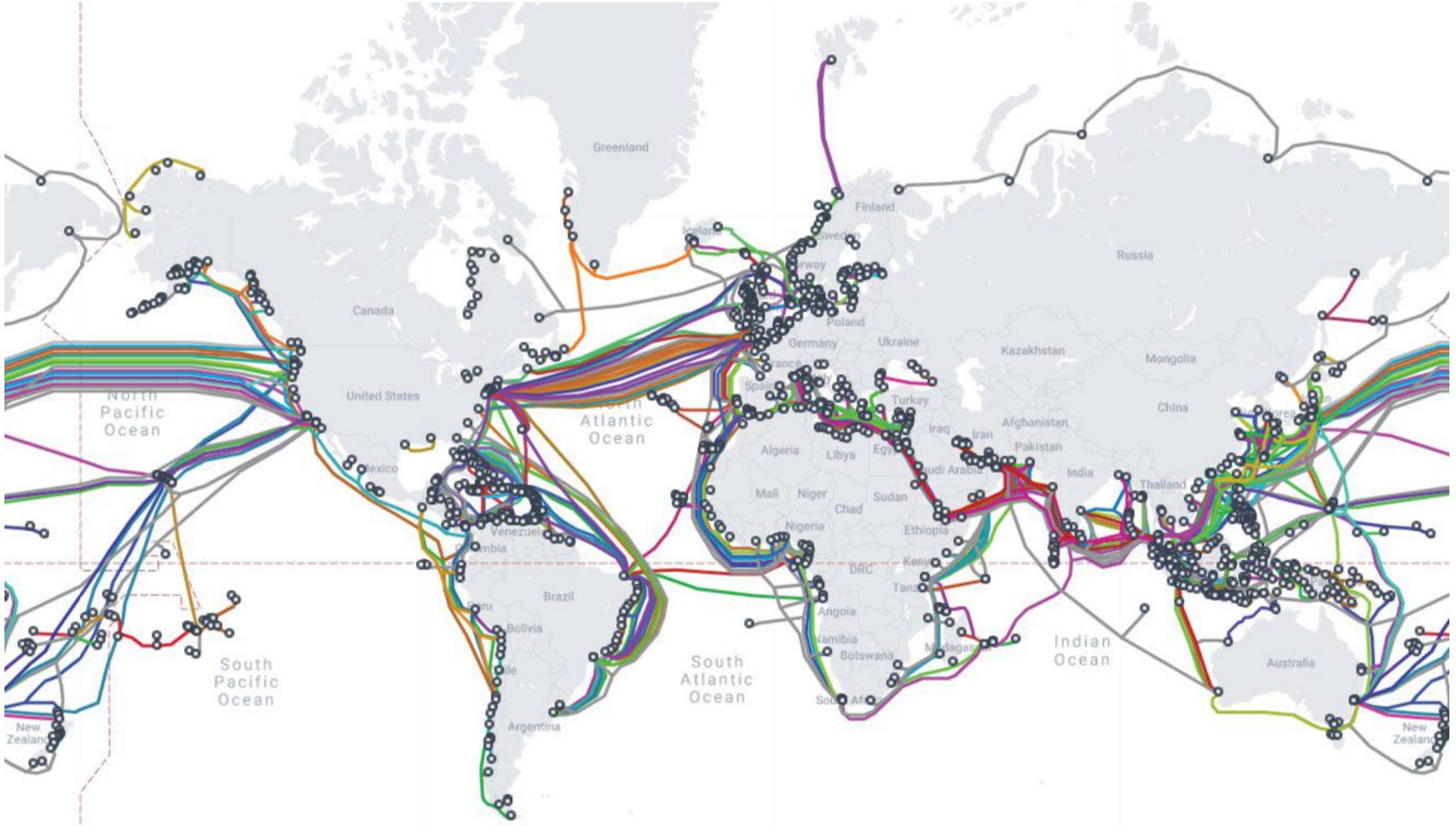
Sviluppo di modelli di machine learning per l'installazione di cavi sottomarini a partire da indagini offshore

21.09.2026 | Gabriele Della Vecchia

Introduzione: l’installazione di cavi offshore

01

Connessioni via cavo sottomarino in tutto il mondo



Source: *TeleGeography*[33]

Il ruolo della geotecnica: il cavo deve essere interrato

- Protezione da ancore e attivita' di pesca
- Protezione da impatti e azioni accidentali
- Riduzione degli effetti di correnti, onde e mobilita' del fondale
- Prevenzione di spostamenti e fatica del cavo
- Aumento dell'affidabilita' e della vita utile dell'infrastruttura
- Per i cavi elettrici, l'interramento contribuisce a definire le condizioni di dissipazione termica

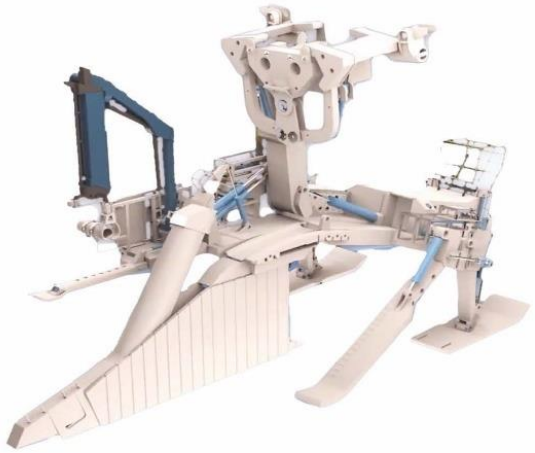
Il ruolo della geotecnica

Problema di interazione aratro–terreno : un aratro viene trainato da una nave e scava una trincea nella quale viene posato il cavo.

Messa in opera dell'Heavy Duty Plough (HDP) e l'inizio del processo di installazione

Cosa e come

- Stimare la forza necessaria per trainare l'aratro
- Applicazione di modelli di ML supervisionato, addestrati su dati di campo provenienti da reali progetti di installazione



Heavy Duty (HD3) cable plough

Perchè?

Espressioni analitiche: rapide e fondate su una base fisica, ma poco predittive

FEM e modelli numerici avanzati (PFEM, MPM): problemi di calibrazione dei parametri ed elevati costi computazionali.

La letteratura sull’installazione dei cavi

02

La forza di traino nei terreni sabbiosi

- **Reece, A. B. (1964)**. *Paper 2: The fundamental equation of earth-moving mechanics*
- **Wismer, R. D. & Luth, H. J. (1971)**. *Rate effects in soil cutting*
- **Palmer, A. C. (1999)**. *Speed effects in cutting and ploughing*
- **Godwin, R. J. (2006)**. *A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces*
- **Bransby et al. (2010)**. *Pipeline plough performance in sand waves. Part 1: model testing*
- **Robinson et al. (2021)**. *A cone penetration test (CPT) approach to cable plough performance prediction based upon centrifuge testing*

La *forza di traino* F risulta dipendere da:

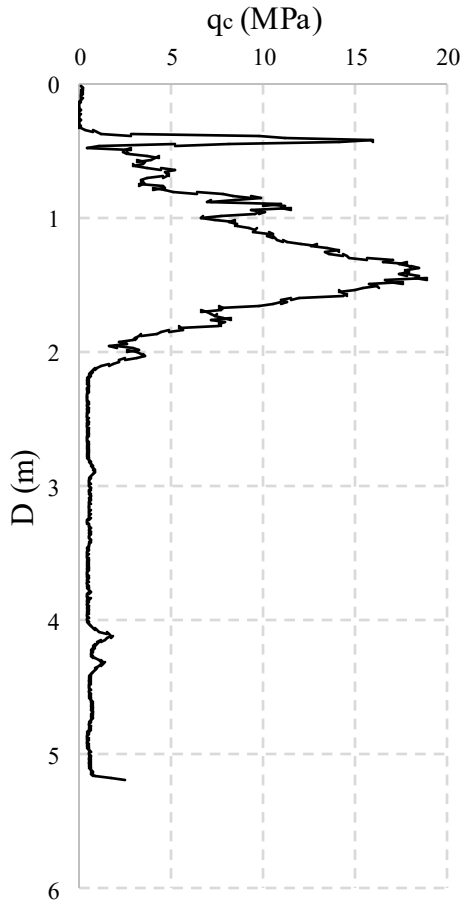
Resistenza del terreno	$\{\phi, c\}$
Interfaccia terreno-metallo	$\{\delta, c_\alpha\}$
Peso terreno	γ
Inclinazione terreno	β
Profondita' di interro	D
Inclinazione aratro	θ
Geometria aratro	$\{\alpha, D/w\}$
Velocita'	
Coeff. consolidazione	
Dilatanza terreno	
Permeabilità terreno	

La forza di traino nei terreni sabbiosi

- **Reece, A. B. (1964)**. *Paper 2: The fundamental equation of earth-moving mechanics*
- **Wismer, R. D. & Luth, H. J. (1971)**. *Rate effects in soil cutting*
- **Palmer, A. C. (1999)**. *Speed effects in cutting and ploughing*
- **Godwin, R. J. (2006)**. *A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces*
- **Bransby et al. (2010)**. *Pipeline plough performance in sand waves. Part 1: model testing*
- **Robinson et al. (2021)**. *A cone penetration test (CPT) approach to cable plough performance prediction based upon centrifuge testing*

La *forza di traino* F risulta dipendere da:

Resistenza del terreno	$\{\phi, c\}$
Interfaccia terreno-metallo	$\{\delta, c_\alpha\}$
Peso terreno	γ
Inclinazione terreno	β
Profondita' di interro	D
Inclinazione aratro	θ
Geometria aratro	$\{\alpha, D/w\}$
Velocita'	
Coeff. consolidazione	
Dilatanza terreno	
Permeabilità terreno	



Formule di letteratura per terreni sabbiosi

Interro condotte

Cathie & Wintgens (2001)'s model – CW model

$$F = C_w W' + C_s(D_r)\gamma' D^3 + C_d(D_r, d_{10})\, D^2 V$$

Lauder (2010)'s model – L model

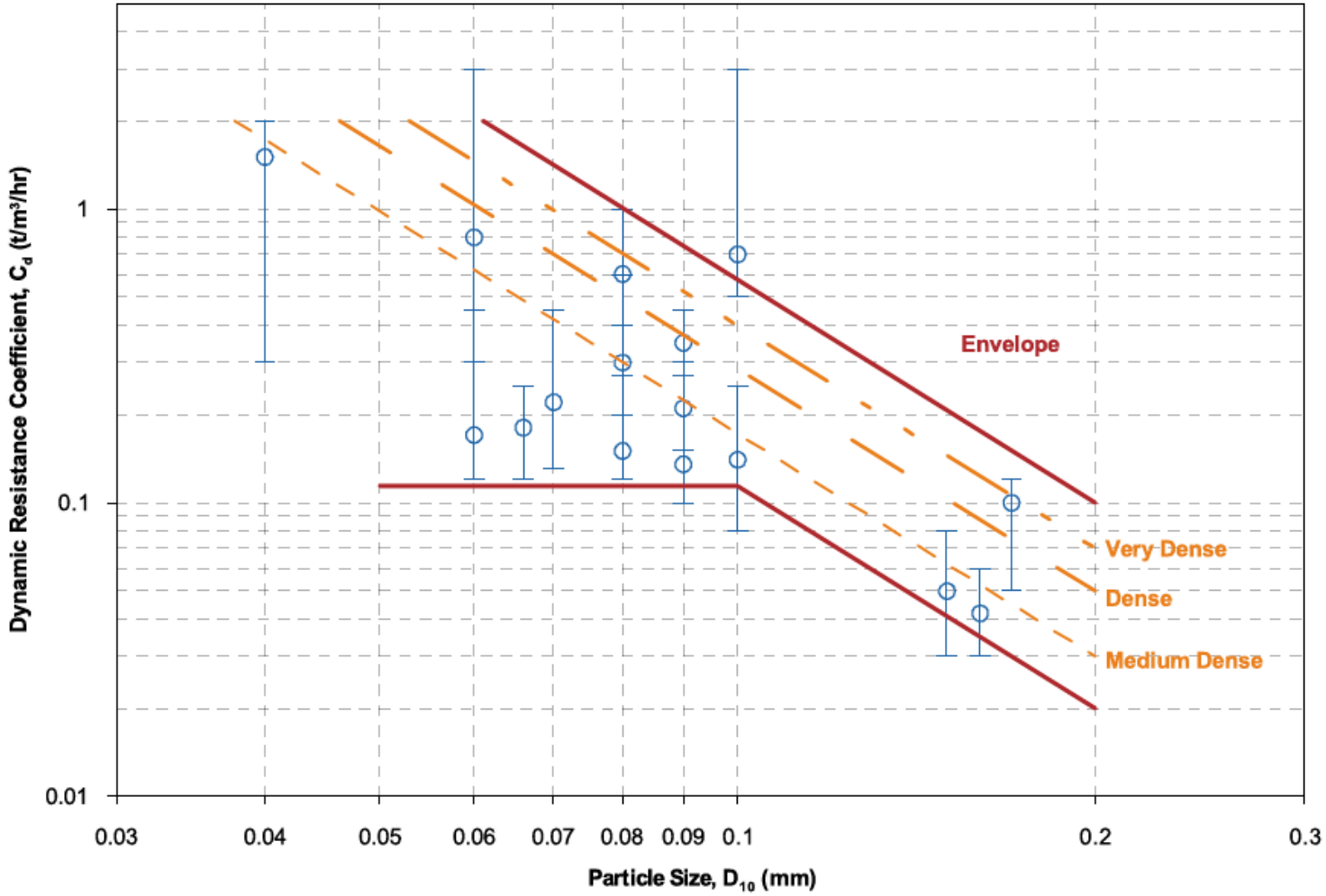
$$F = C_w W' + C_s \gamma' D^3 + C_d(D_r, d_{10})\, D^2 V$$

Interro cavi

Robinson et al. (2021)'s model – R model

$$F = \left\{ C_w W' + \frac{3}{2} K_p \gamma D^2 w + K_s \gamma D A_s \tan\delta \right\} \times \left\{ 1 - C_{dn\psi} \frac{\psi V D}{c_v} \right\}$$

Formule di letteratura per terreni sabbiosi



Adapted from Cathie and Wintgens (2001).

Formule di letteratura per terreni sabbiosi – dipendenza dalla velocità

Interro condotte

Cathie & Wintgens (2001)'s model – CW model

$$F = C_w W' + C_s(D_r)\gamma' D^3 + C_d(D_r, d_{10})\, D^2 V$$

Lauder (2010)'s model – L model

$$F = C_w W' + C_s \gamma' D^3 + C_d(D_r, d_{10})\, D^2 V$$

Interro cavi

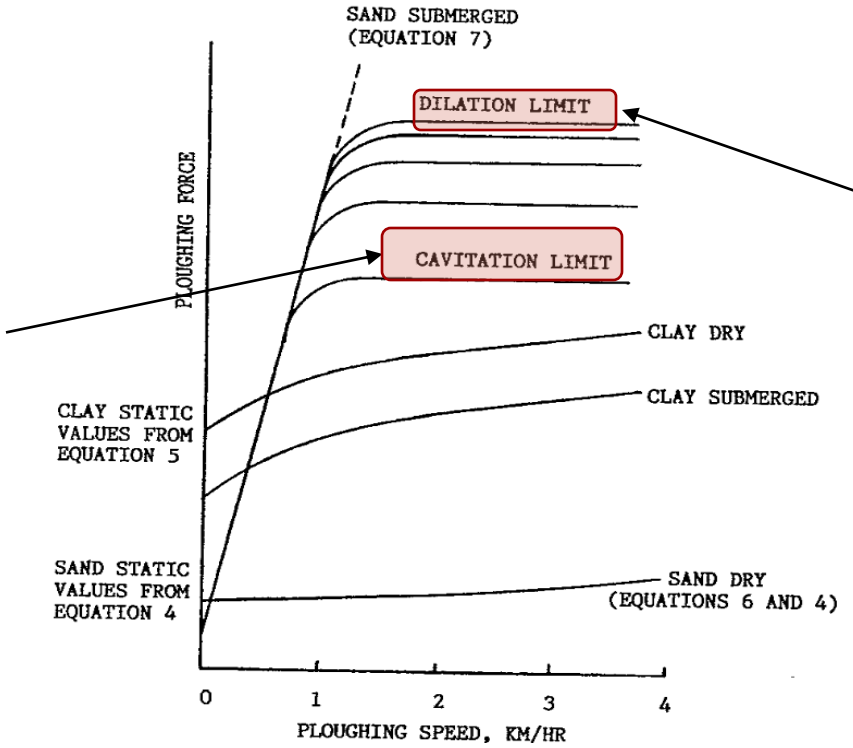
Robinson et al. (2021)'s model – R model

$$F = \left\{ C_w W' + \frac{3}{2} K_p \gamma D^2 w + K_s \gamma D A_s \tan\delta \right\} \times \left\{ 1 - C_{dn\psi} \frac{\psi V D}{c_v} \right\}$$

Formule di letteratura per terreni sabbiosi – dipendenza dalla velocità

L'**accoppiamento idro-meccanico** è generalmente considerato l'**effetto dominante** (si veda, ad esempio, *Palmer, 1999*).

L'accumulo di sovrappressioni interstiziali negative indotte dalla dilatanza può portare alla cavitazione dell'acqua interstiziale.

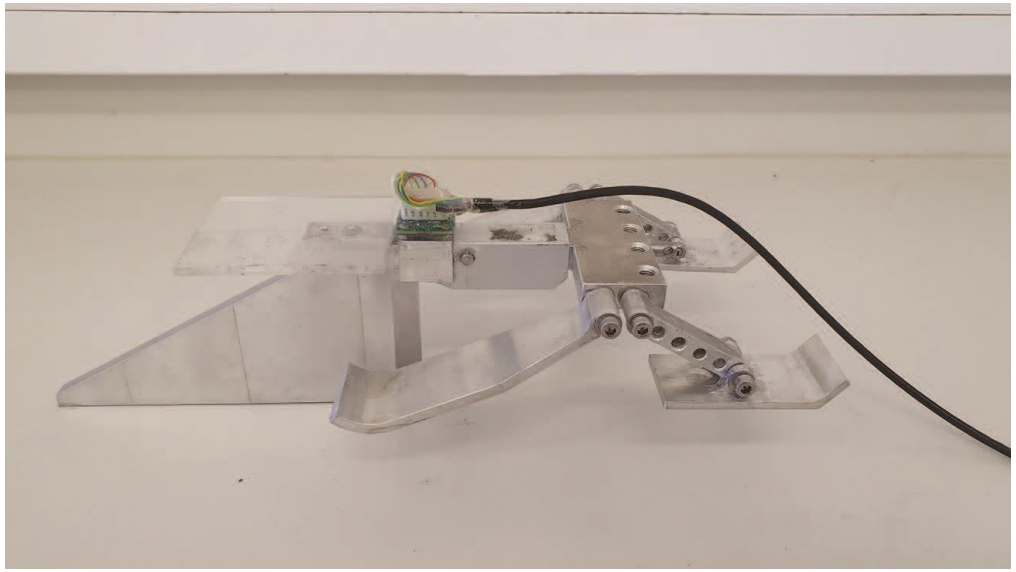


Effetti dell'accoppiamento idro-meccanico durante l'aratura offshore. Da Reece & Grinsted (1986).

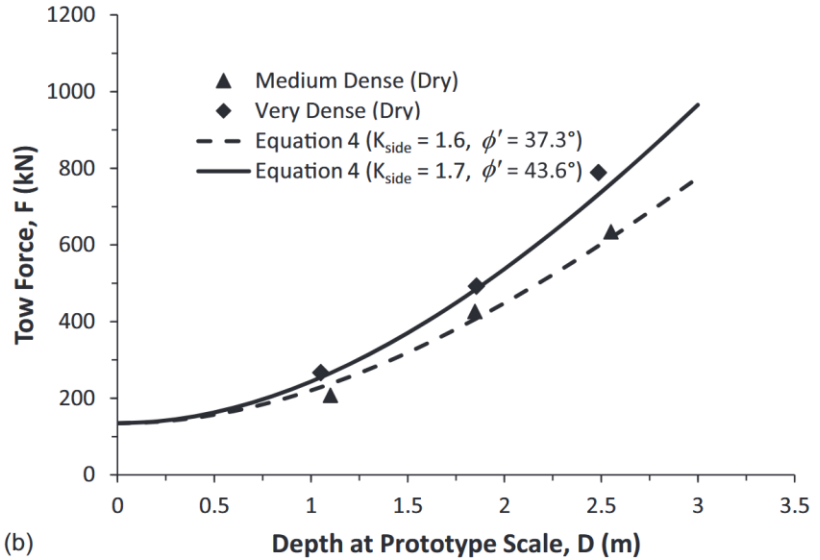
L'incremento dello stato tensionale efficace è limitato dal raggiungimento dello stato critico da parte del terreno posto davanti al vomere dell'aratro.

Formule di letteratura per terreni sabbiosi

$$F = \underbrace{\left\{C_w W'}_{\text{Attrito}} + \underbrace{\frac{3}{2} K_p \gamma' D^2 w}_{\text{Capacita' portante}} + \underbrace{K_s \gamma' D A_s \tan\delta\right\}}_{\text{Resistenza laterale}} \times \underbrace{\left\{1 - C_{dn\psi} \frac{\psi V D}{c_v}\right\}}_{\text{Termine rate-dependent}}$$



Modello in scala 1:50 dell'interramento di un cavo mediante aratro, utilizzato nelle prove in piccola scala condotte da Robinson et al. (2021).



Dati di prove in centrifuga sull'interramento mediante aratro in sabbia asciutta a diverse densità, interpolati mediante forze di traino stimate a partire da prove CPT

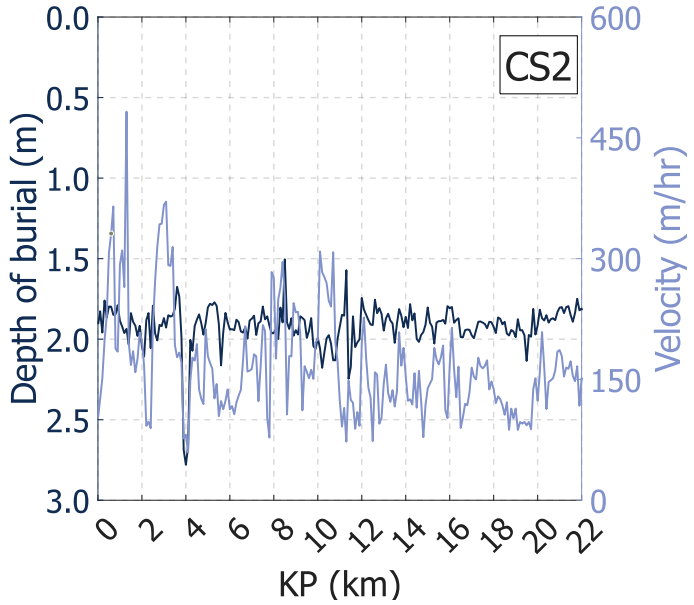
Dati di sito disponibili e applicazione modelli di letteratura

03

Dati a disposizione

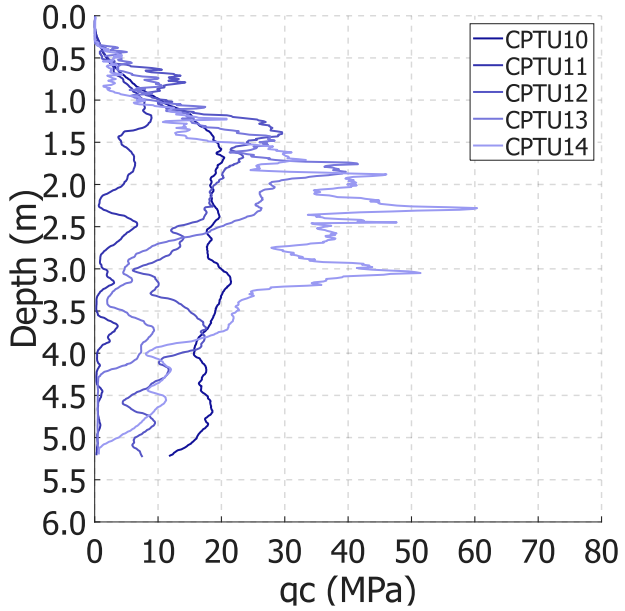
As-Built

Velocità aratro	V
Profondità interro	D
Forza di traino	F
Inclinazione fondale	β



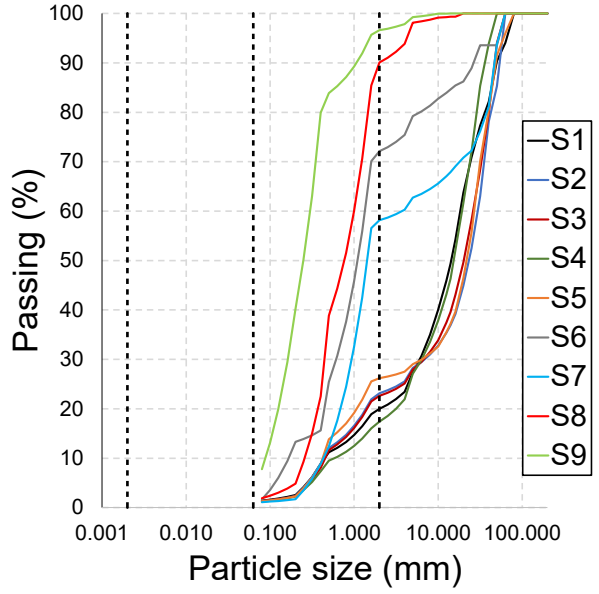
CPTU

Resistenza alla punta	q_c
Resistenza laterale	f_s
Pressione dei pori	u_2



VC

Granulometria	GSDC
Contenuto in acqua	w
Densità	γ



Dati di sito da 3 diverse location (fondali sabbiosi)

Dataset:

- **CPTU**: Cone Penetration Tests
- **VC**: Prove di lab su campioni prelevati con vibrocarotaggio.
- **As built data**

CS1

N. Cable	2
N. CPTU	15
N. VC	14
KP	From 16 to 27

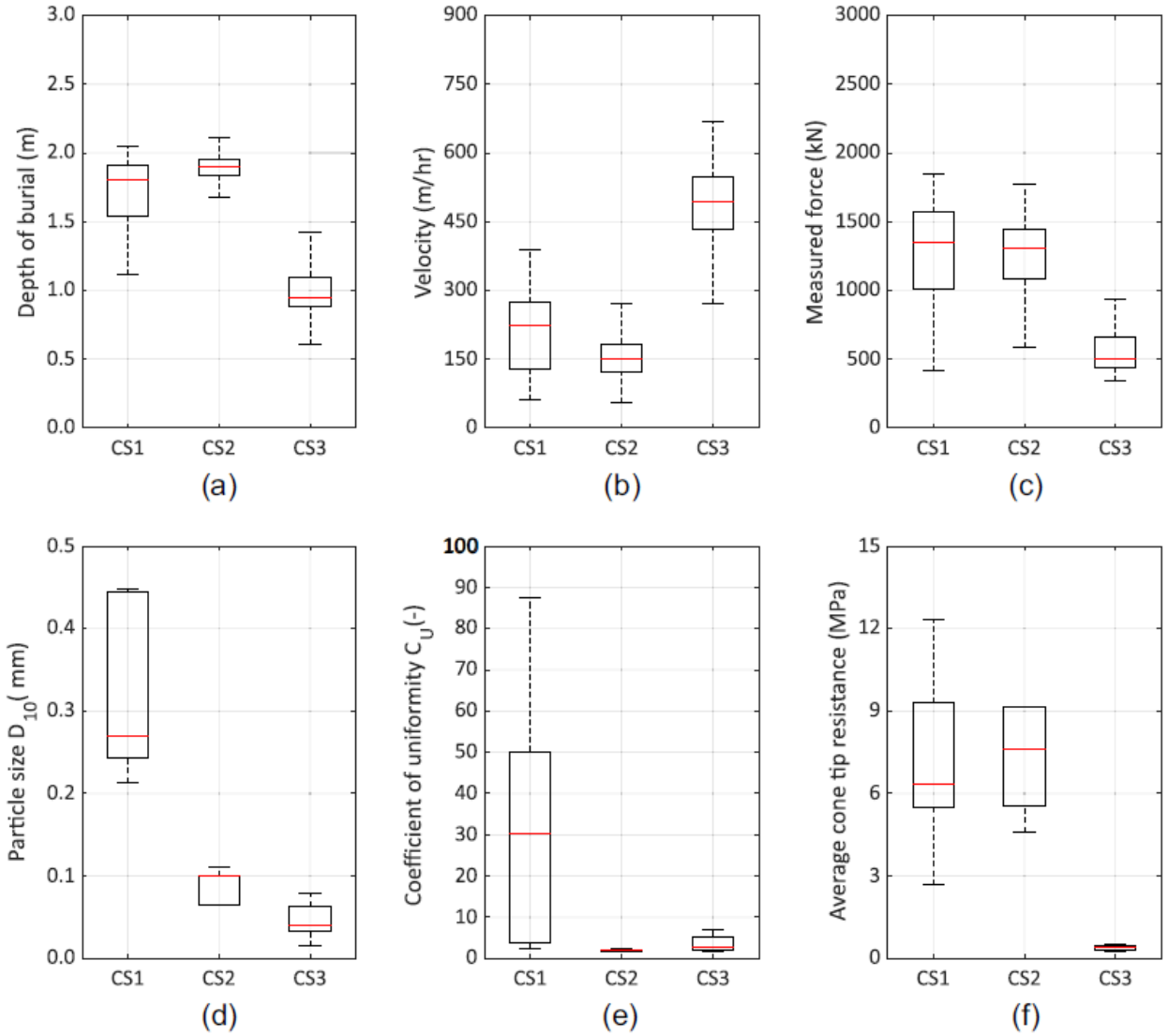
CS2

N. Cable	1
N. CPTU	7
N. VC	8
KP	From 42 to 65

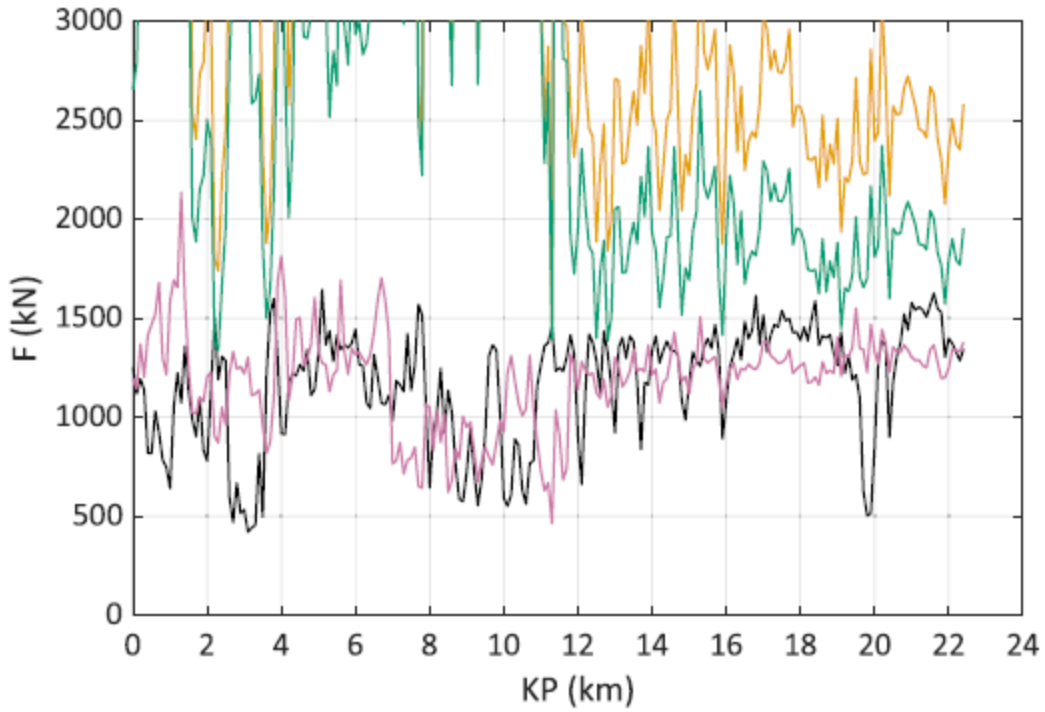
CS3

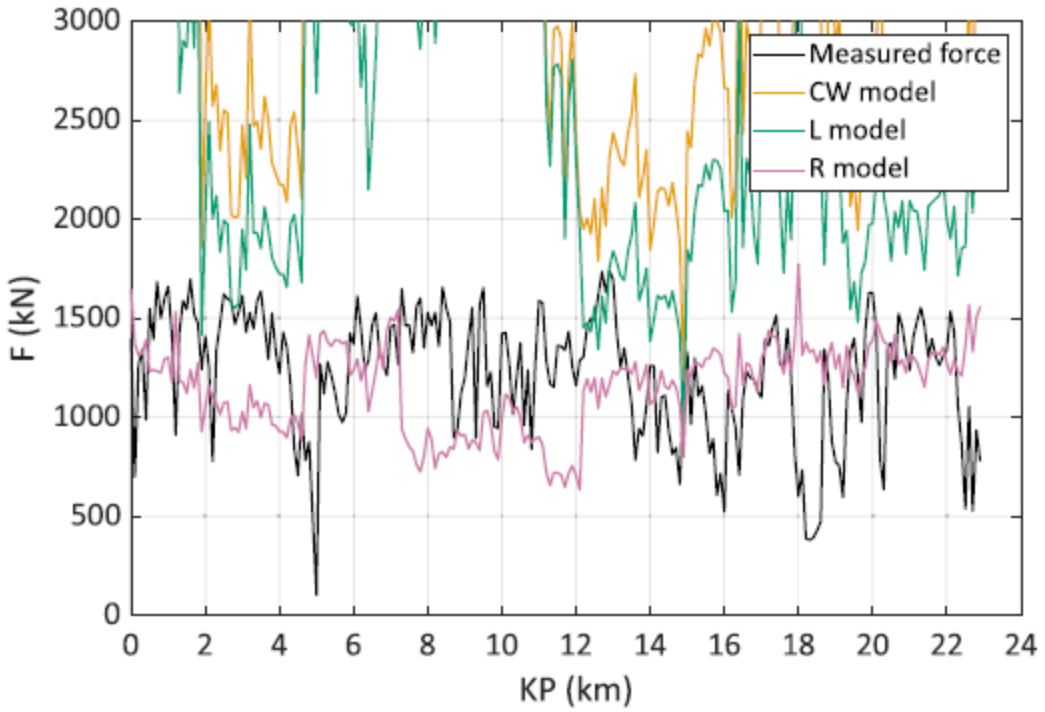
N. Cable	1
N. CPTU	16
N. VC	14
KP	From 90 to 97 From 101 to 107 From 114 to 128

Range dei dati misurati



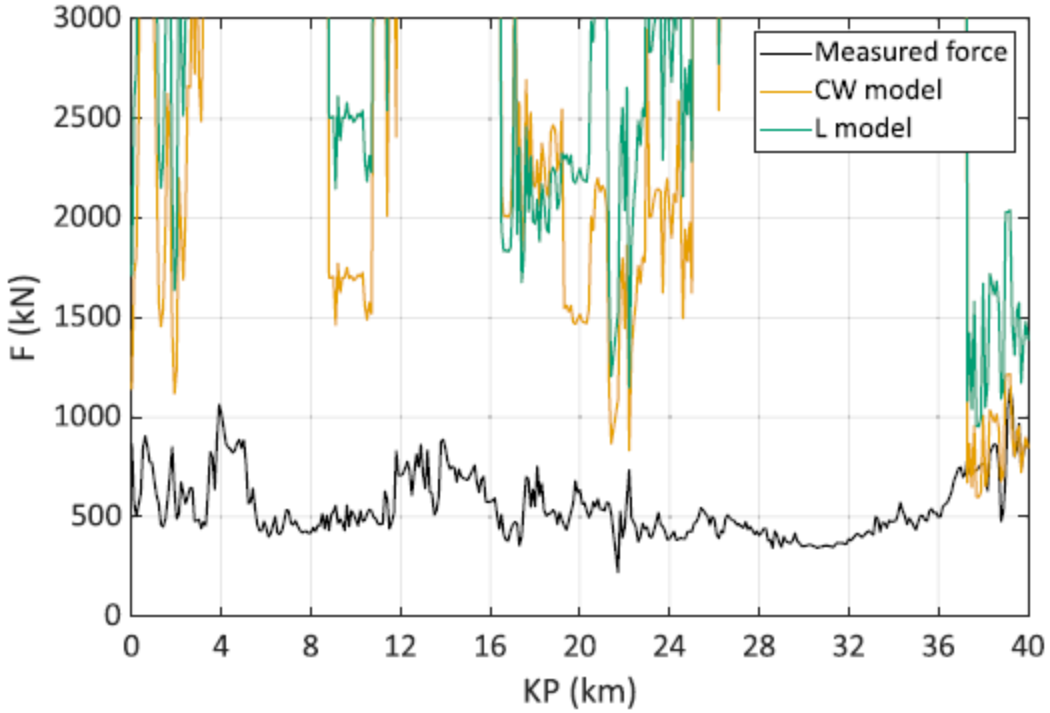
Applicazione dei modelli di letteratura - CS2





Bassa trasferibilità dei modelli empirici a condizioni di sito

Applicazione dei modelli di letteratura - CS3

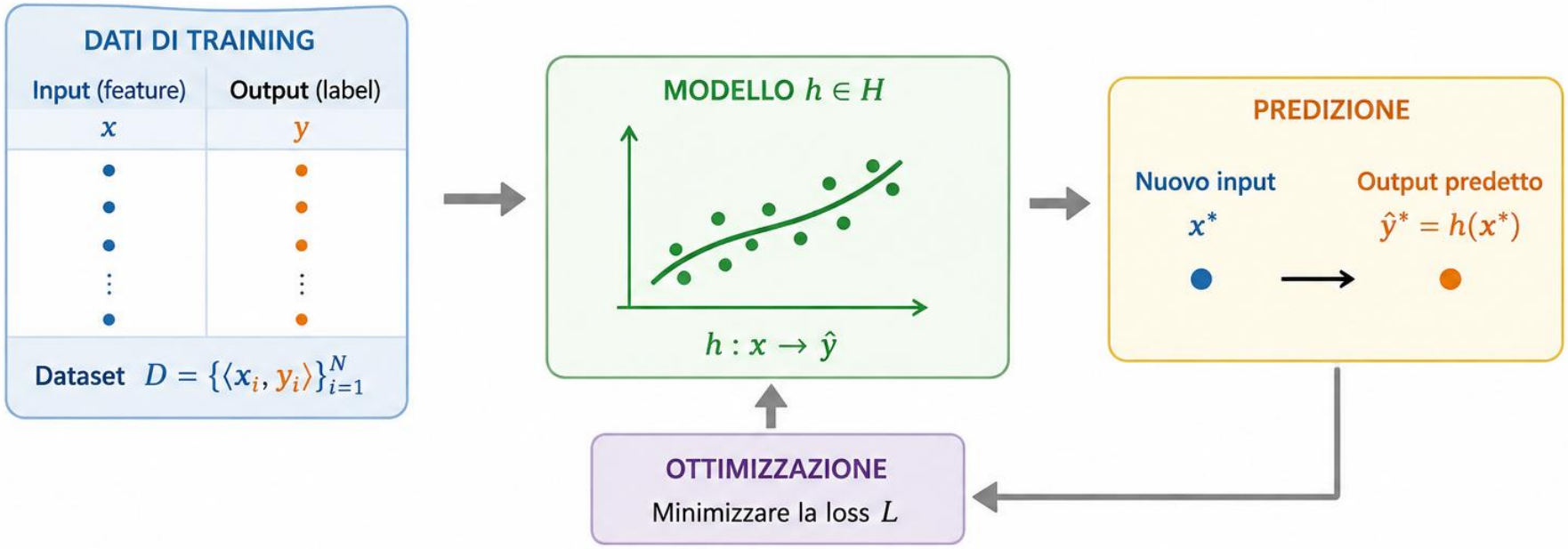


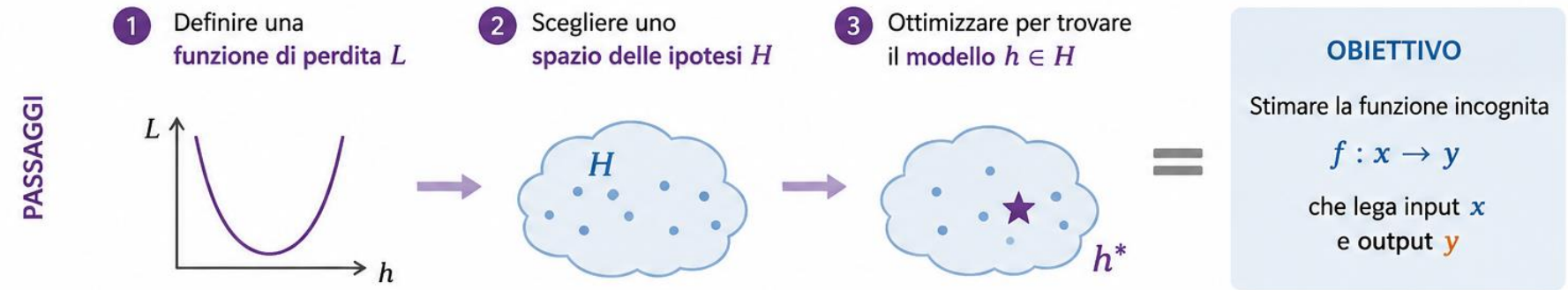
CS3 presenta sabbie molto fini e soprattutto molto sciolte, quindi condizioni meno rappresentate nei dataset di calibrazione dei modelli disponibili → RMSE >1500%

Approccio Machine Learning

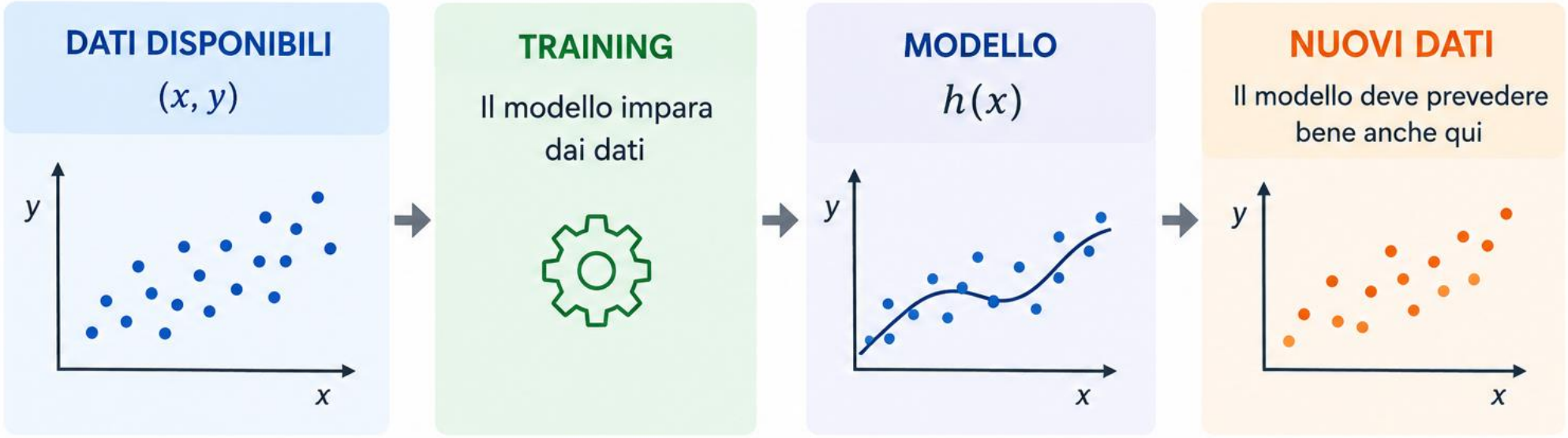
04

Apprendimento supervisionato: costruzione del modello



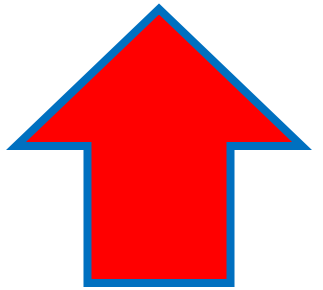


Generalizzazione: training e testing

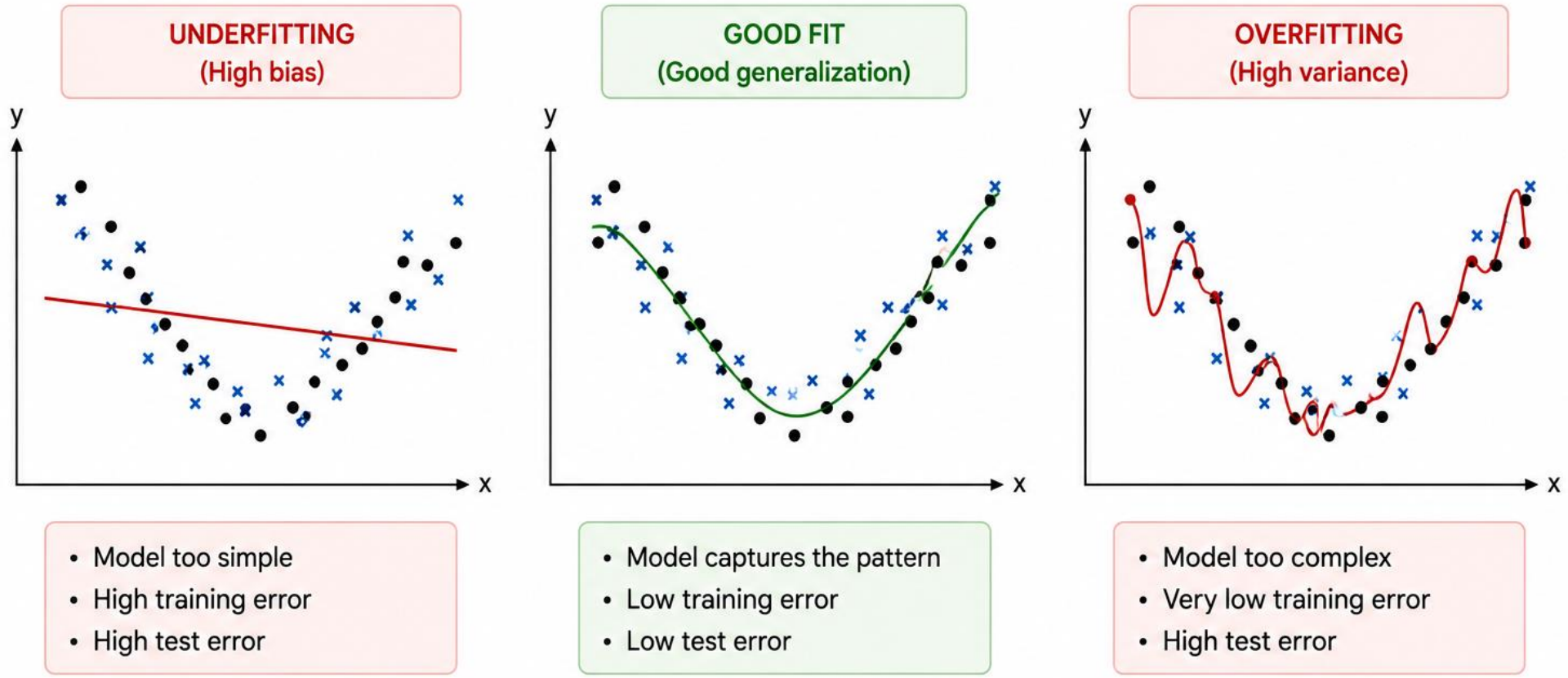


TRAINING SET

TESTING SET

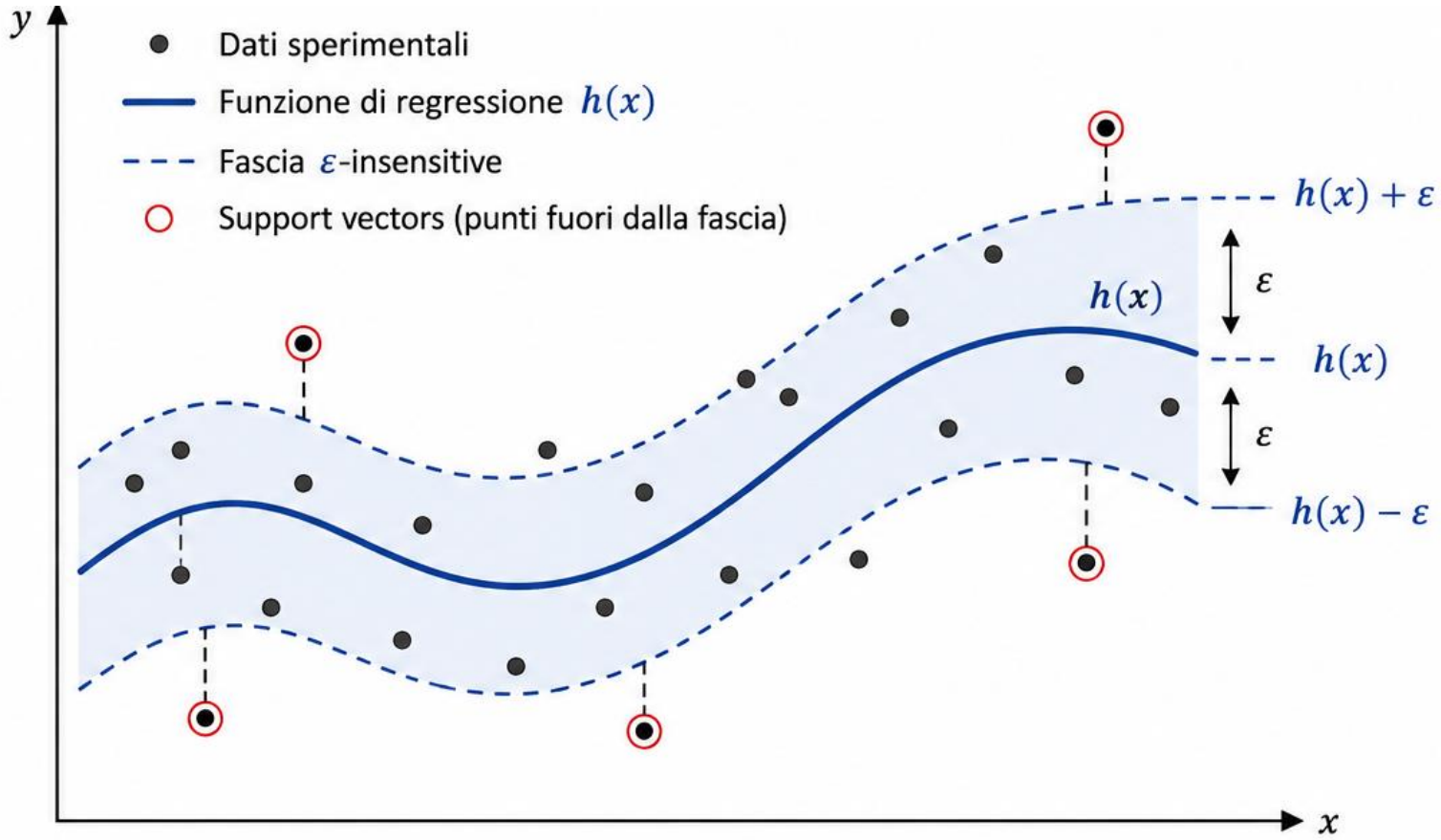


Complessita' del modello: underfitting e overfitting



Scelta dell'algoritmo – Support Vector Regression

SVR cerca una funzione h(x) che approssimi i dati, tollerando errori piccoli entro una fascia ε



SVR PRINCIPLE

Si cerca la funzione $h(x)$ che è il più piatta possibile (e semplice) tale che:

$$|y_i - h(x_i)| \leq \varepsilon$$

↓

Gli errori entro la fascia ε non sono penalizzati.

↓

Solo i punti fuori dalla fascia influenzano la calibrazione del modello (support vectors).

Support Vector Regression

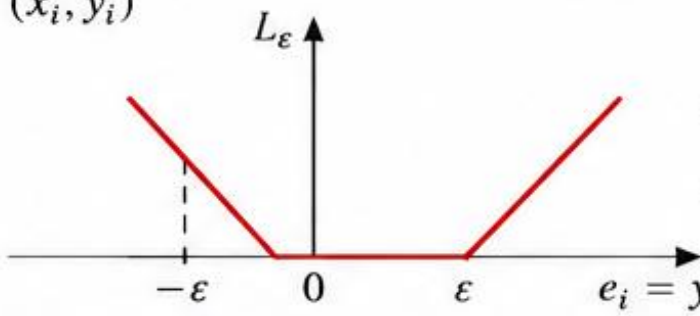
Funzione di regressione (non lineare)

$$h(x) = w^\top \phi(x) + b$$

Funzione di loss

Per ogni osservazione (x_i, y_i)

$$L_\varepsilon(y_i, h(x_i)) = \max\{0, |y_i - h(x_i)| - \varepsilon\}$$



- se $|e_i| \leq \varepsilon \rightarrow L_\varepsilon = 0$
- se $|e_i| > \varepsilon \rightarrow L_\varepsilon = |e_i| - \varepsilon$

Funzione da minimizzare

$$\min_{w,b} \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n} L_\varepsilon(y_i - h(x_i))$$

complessità del modello (funzione più "piatta")

penalizzazione delle violazioni della fascia

Support Vector Regression

$$\min_{w,b} \quad \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{i=1}^{n} L_\varepsilon(y_i - h(x_i))$$

complessità del modello (funzione più "piatta")

penalizzazione delle violazioni della fascia

Termine di regolarizzazione

Hyperparameter 1: regola il peso delle violazioni rispetto alla semplicità del modello

Hyperparameter 2: ε regola l'ampiezza della fascia di tolleranza

Da calibrare in fase di validazione

Selezione dei dati in ingresso del modello – aka Feature Selection

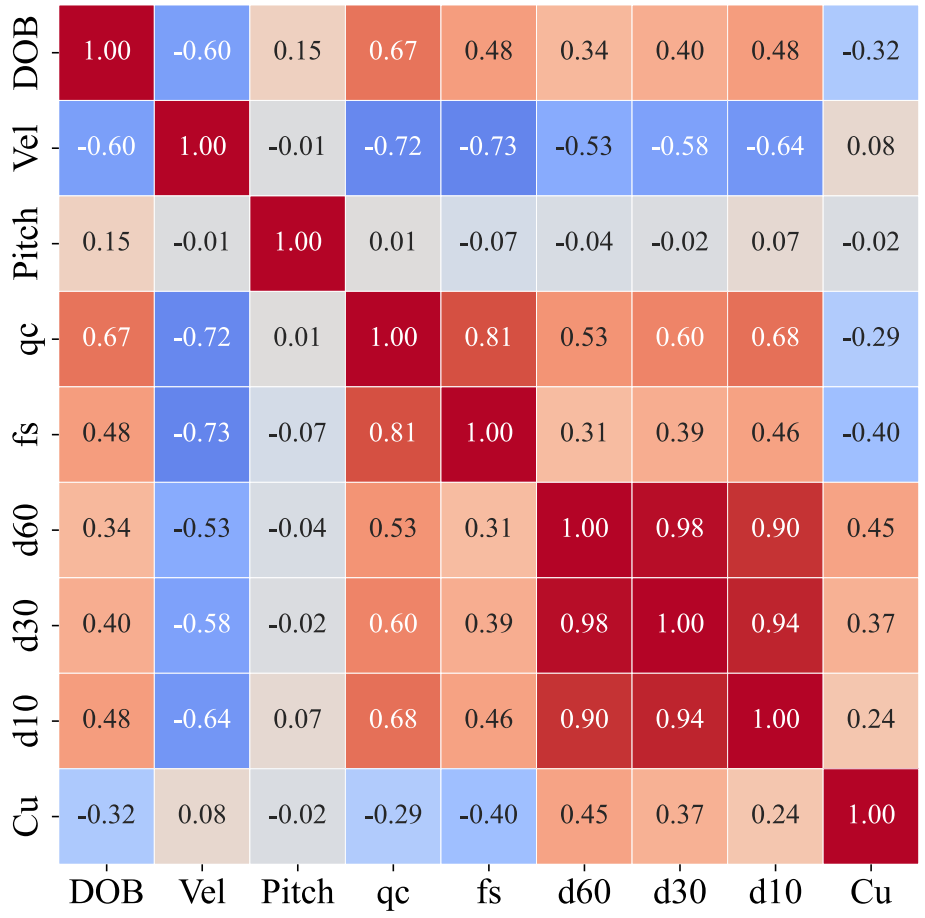
Le variabili di input sono scelte sulla base dei meccanismi fisici che controllano la forza di traino e della loro disponibilità nelle normali indagini offshore.

- Profondità di interro (D) → influenza sia la componente statica sia il drenaggio.
- Velocita' dell'aratro V → influenza il termine rate dependent.
- D_{10} e CU → descrivono granulometria, quindi indirettamente la conducibilità idraulica.
- q_c medio sulla profondità → legata a densità relativa e angolo di attrito.

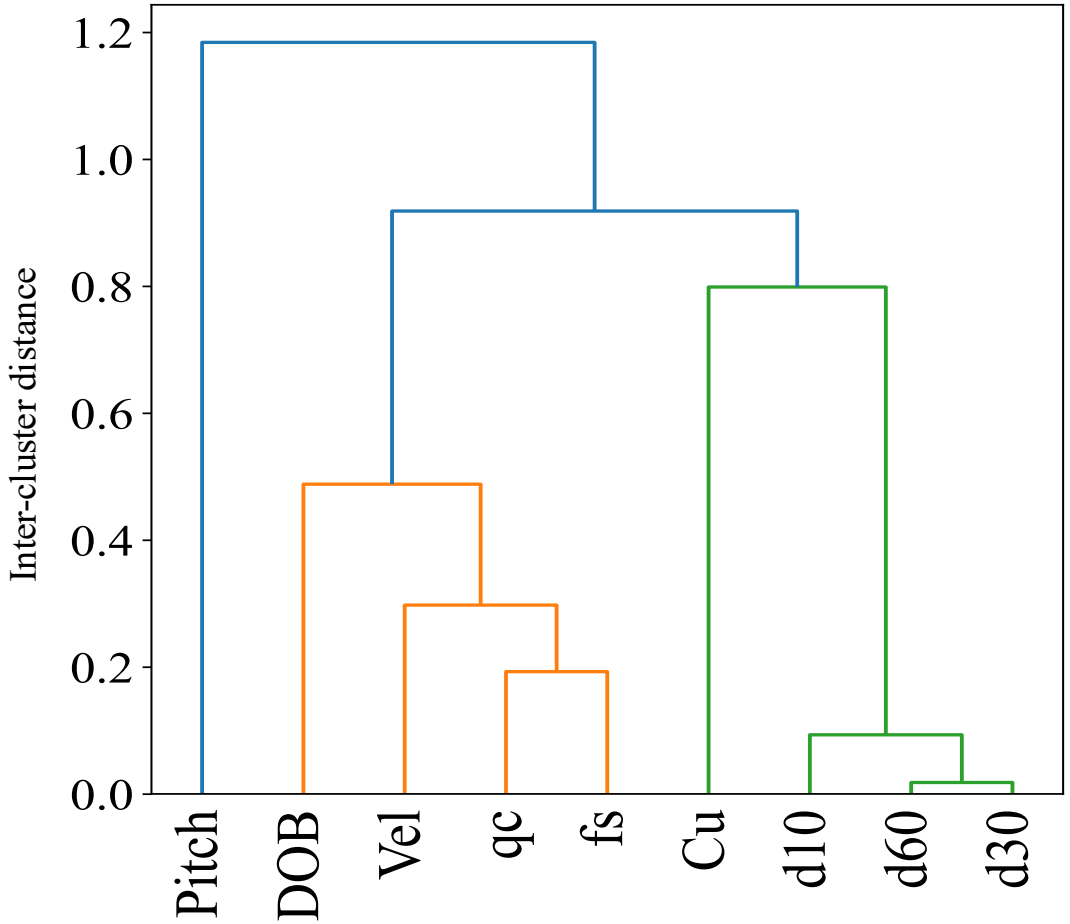
- Tutte le feature sono ottenute da **dati as-built e indagini geotecniche di routine**, senza introdurre parametri difficili da calibrare.
- Peso e geometria dell'aratro non vengono inclusi perché **tutti i dati disponibili si riferiscono allo stesso aratro**

Selezione dei dati in ingresso del modello – aka Feature Selection

Matrice di correlazione



Identificazione dei cluster



Blu: correlazione negativa, **Rosso**: correlazione positiva

Processamento dei dati

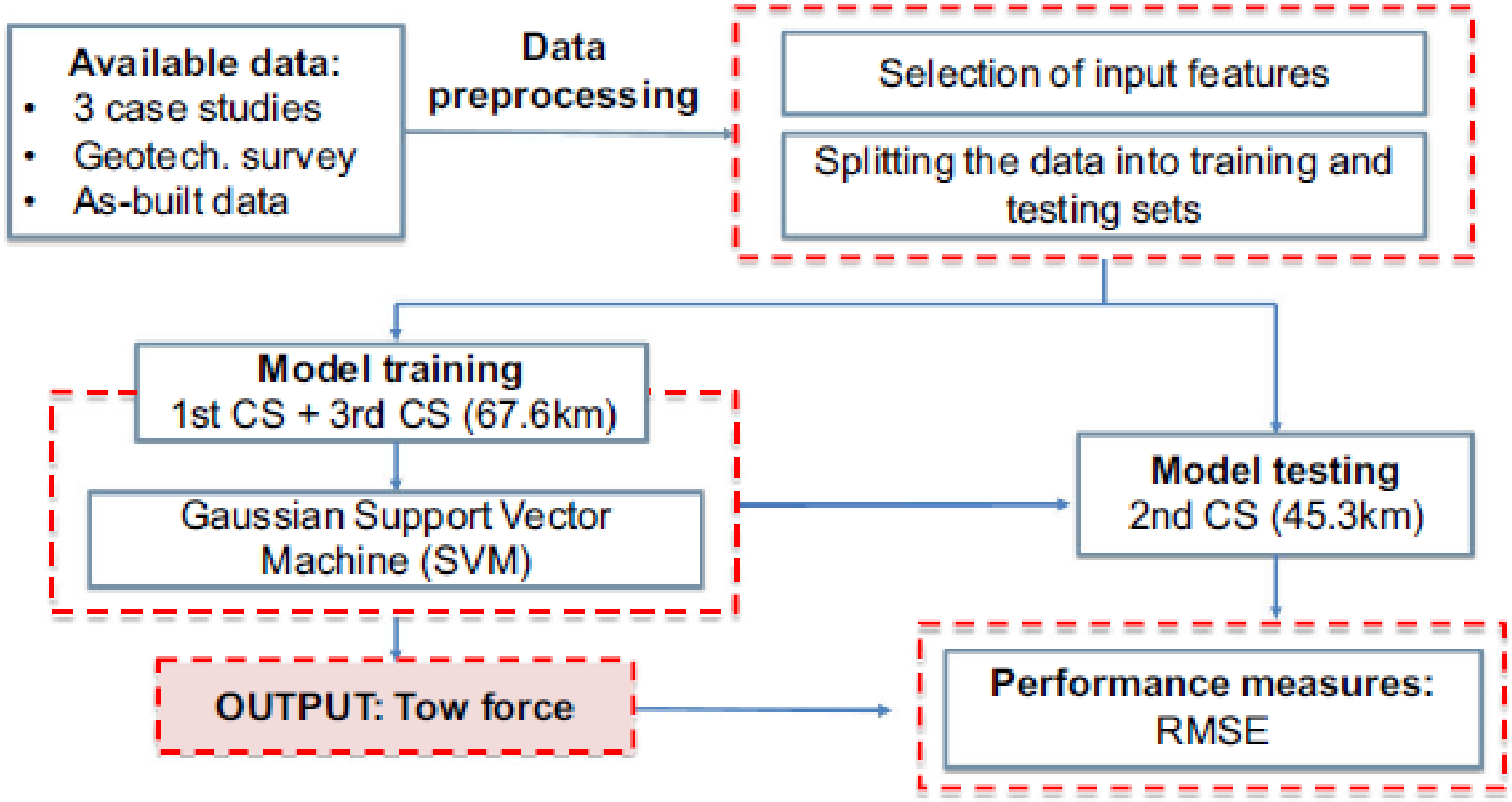
- **Training**: CS1 + CS3, 67.6 km (60%).
  Test: CS2, 45.3 km (40%), mai utilizzato durante l'addestramento.

- Il test viene effettuato su un sito geologicamente differente, quindi è una verifica reale della capacità di generalizzazione.

- Le condizioni di CS2 rimangono però all'interno del dominio coperto dai dati di training → interpolazione, non estrapolazione.

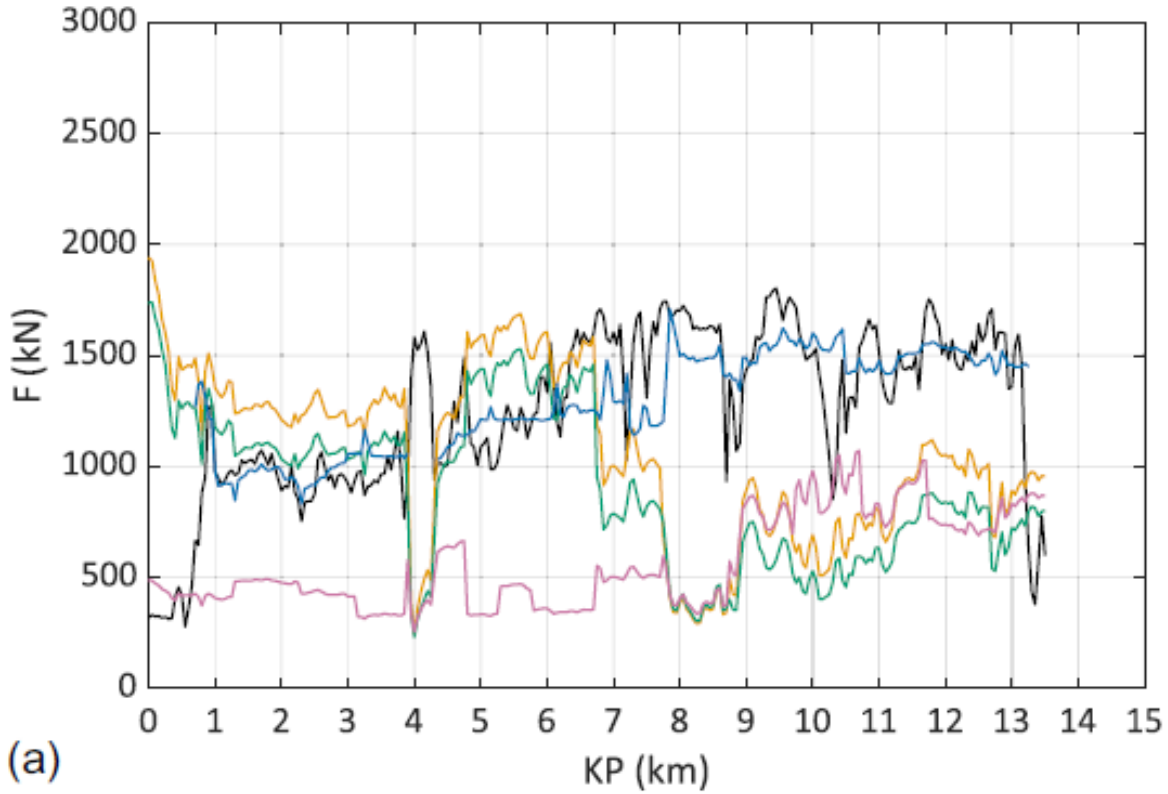
- Le feature vengono standardizzate prima del training

Sintesi della metodologia

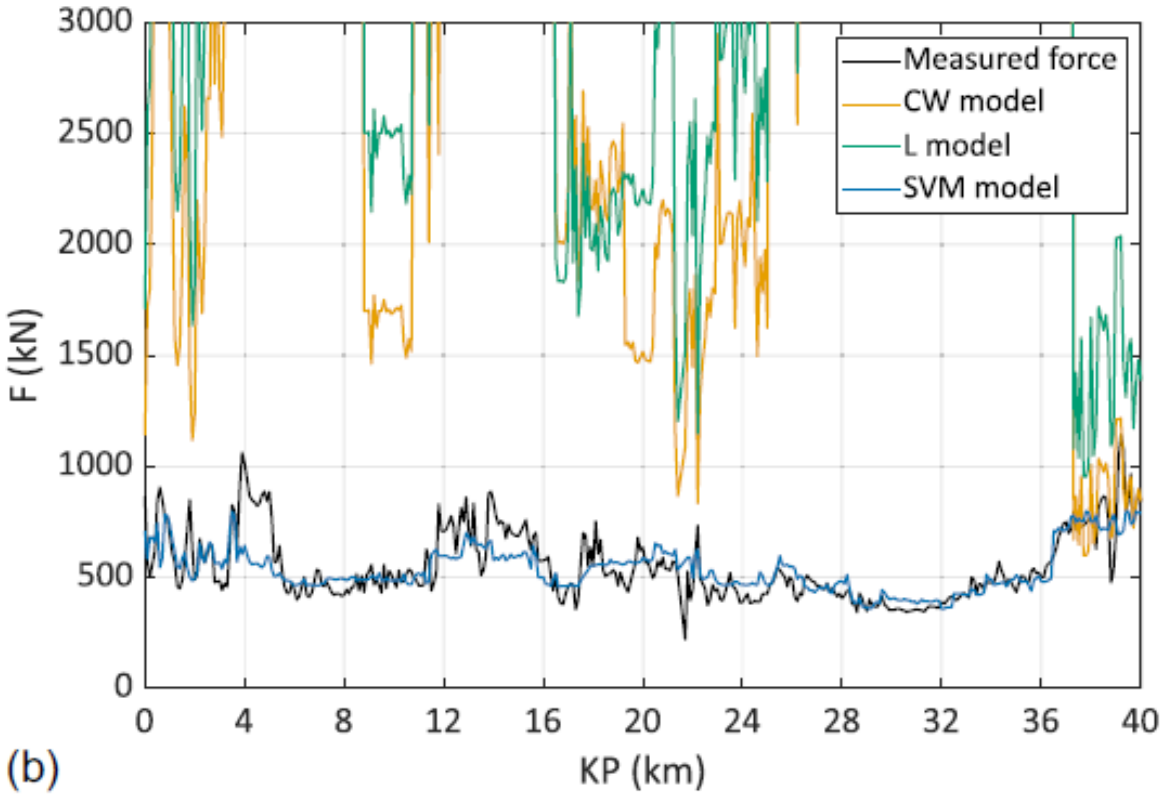


Performance del modello: training

CS1

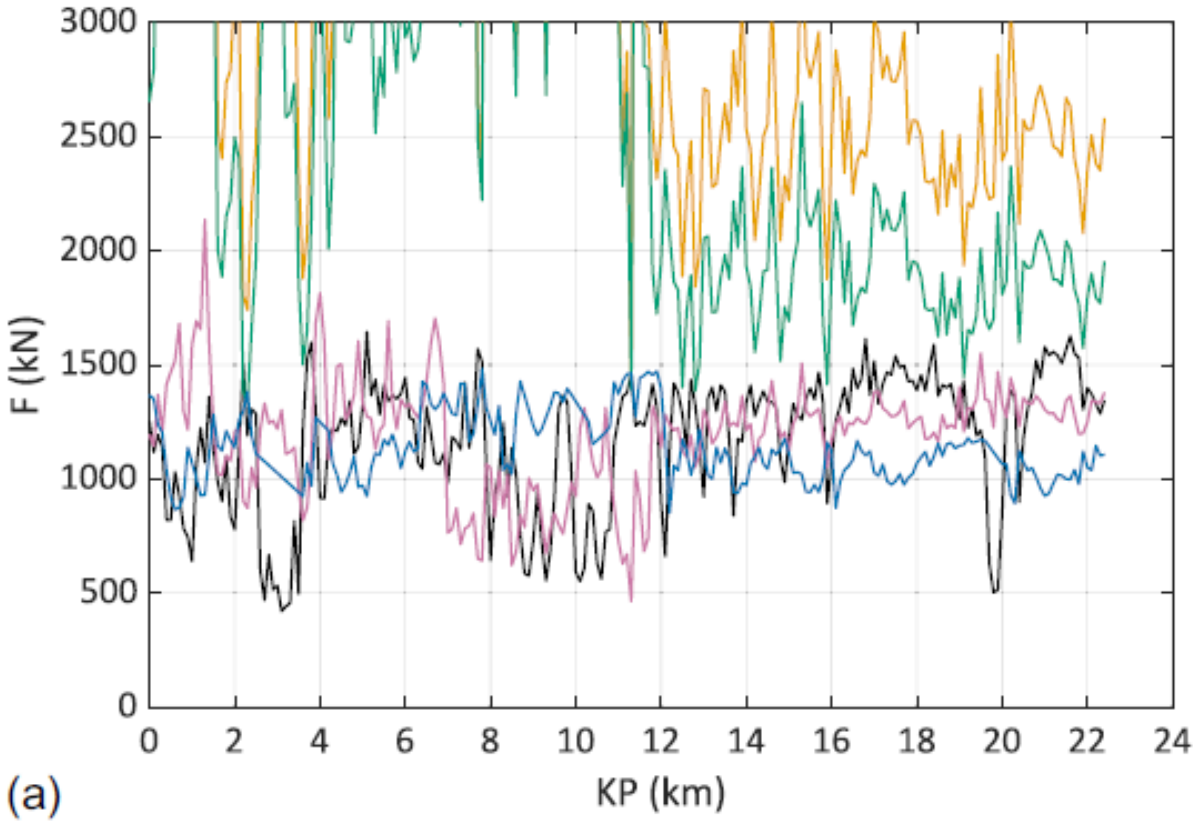


CS3

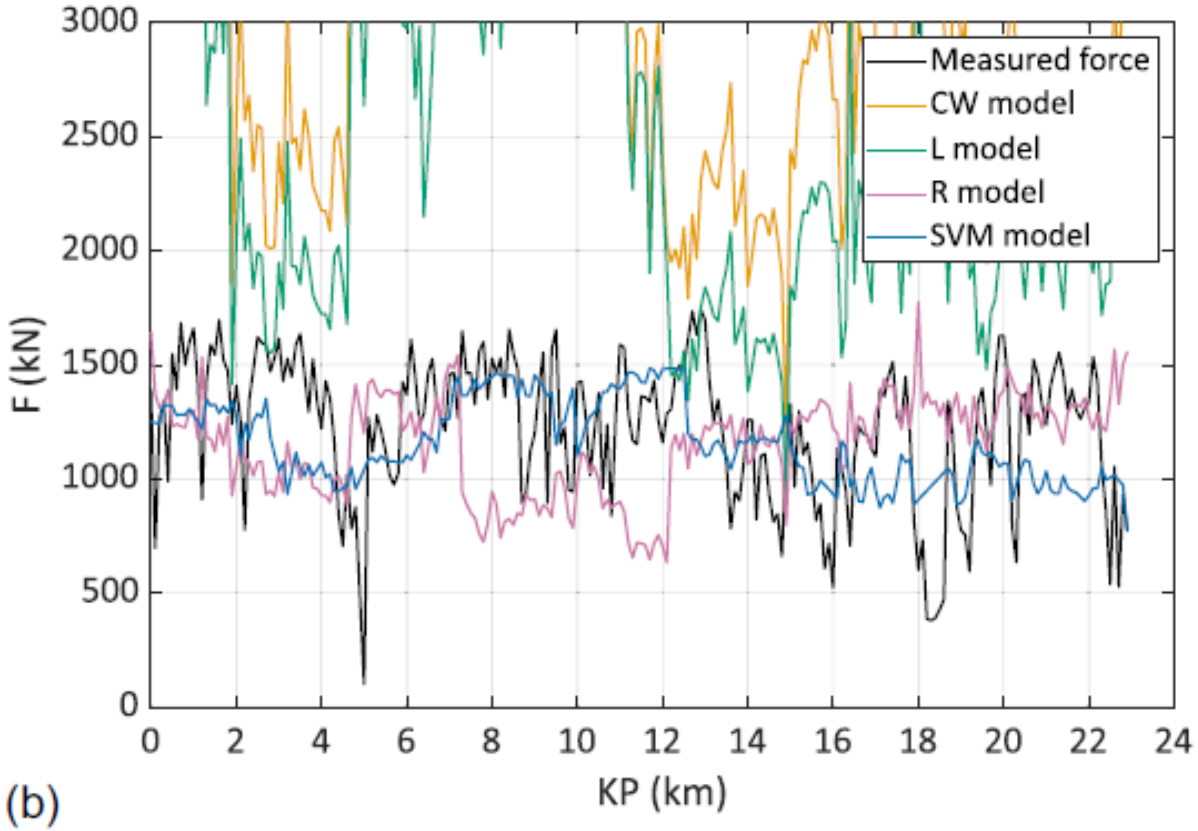


Performance del modello: testing

CS2 – cavo 1

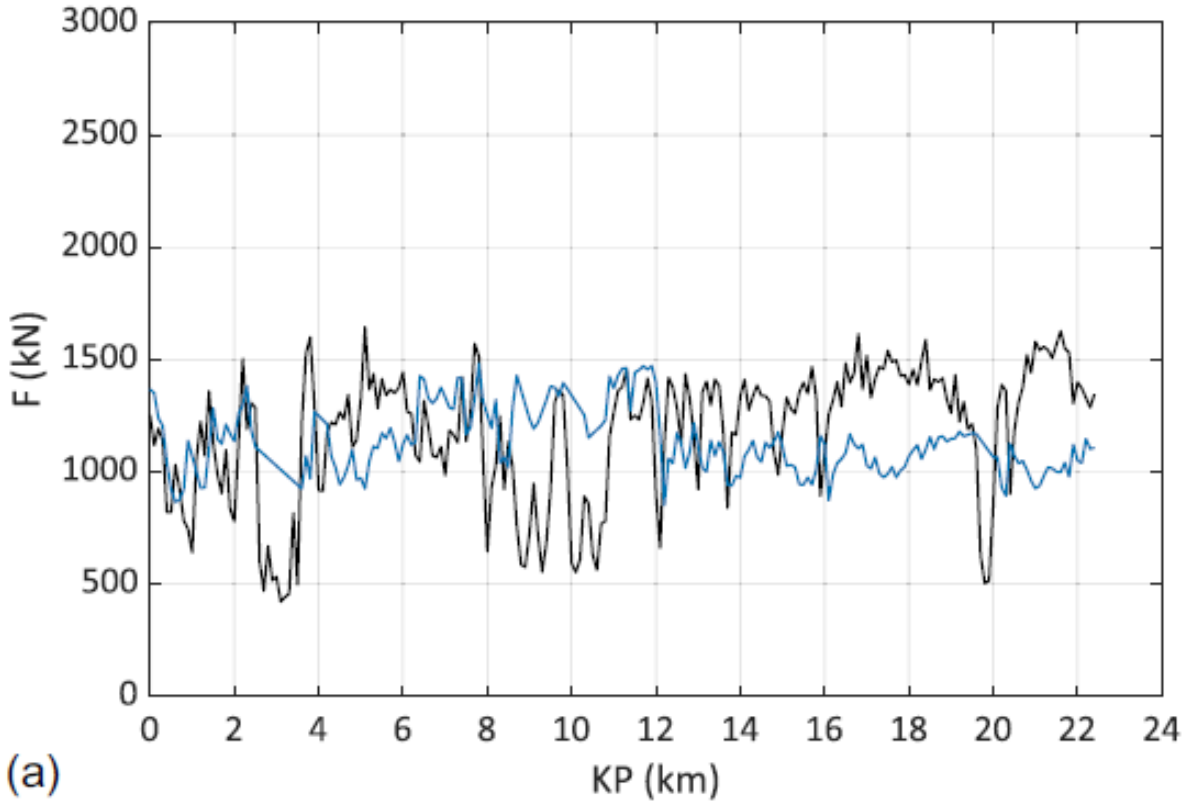


CS2 – cavo2

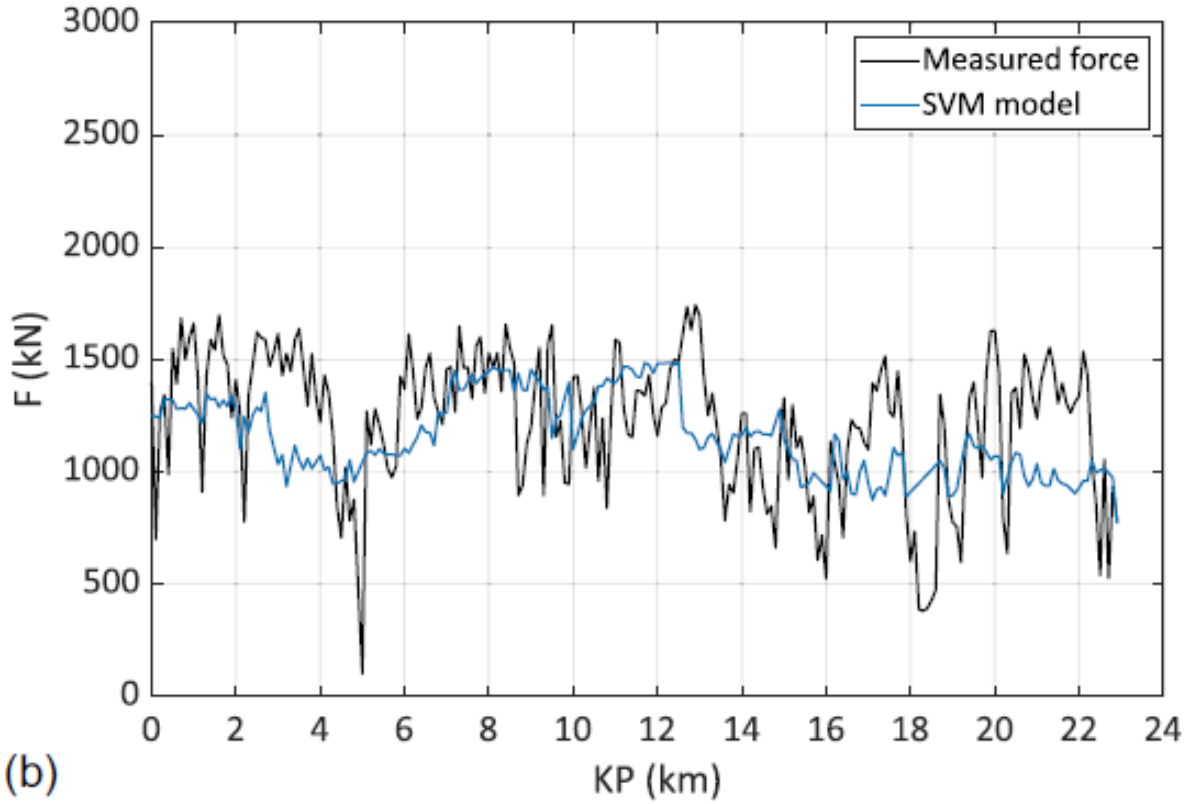


Performance del modello: testing

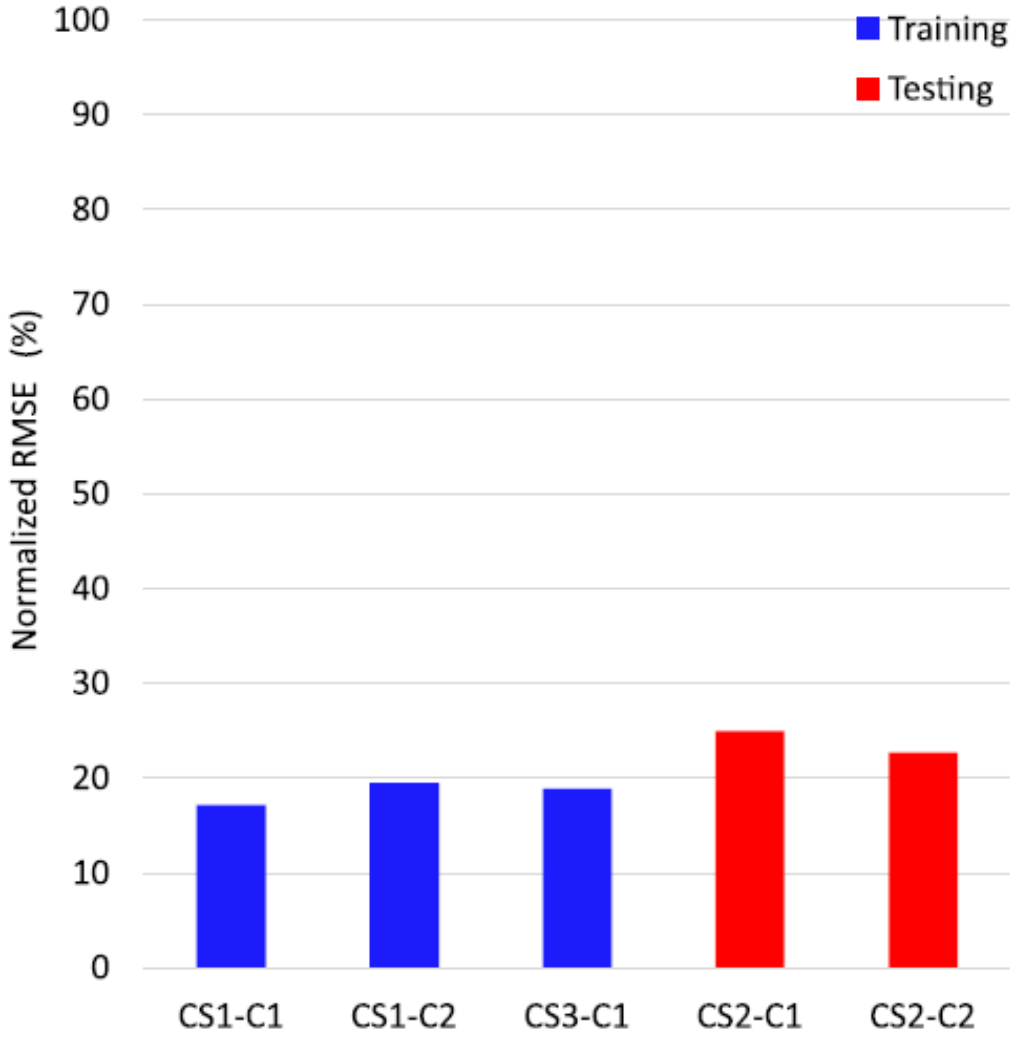
CS2 – cavo 1



CS2 – cavo2

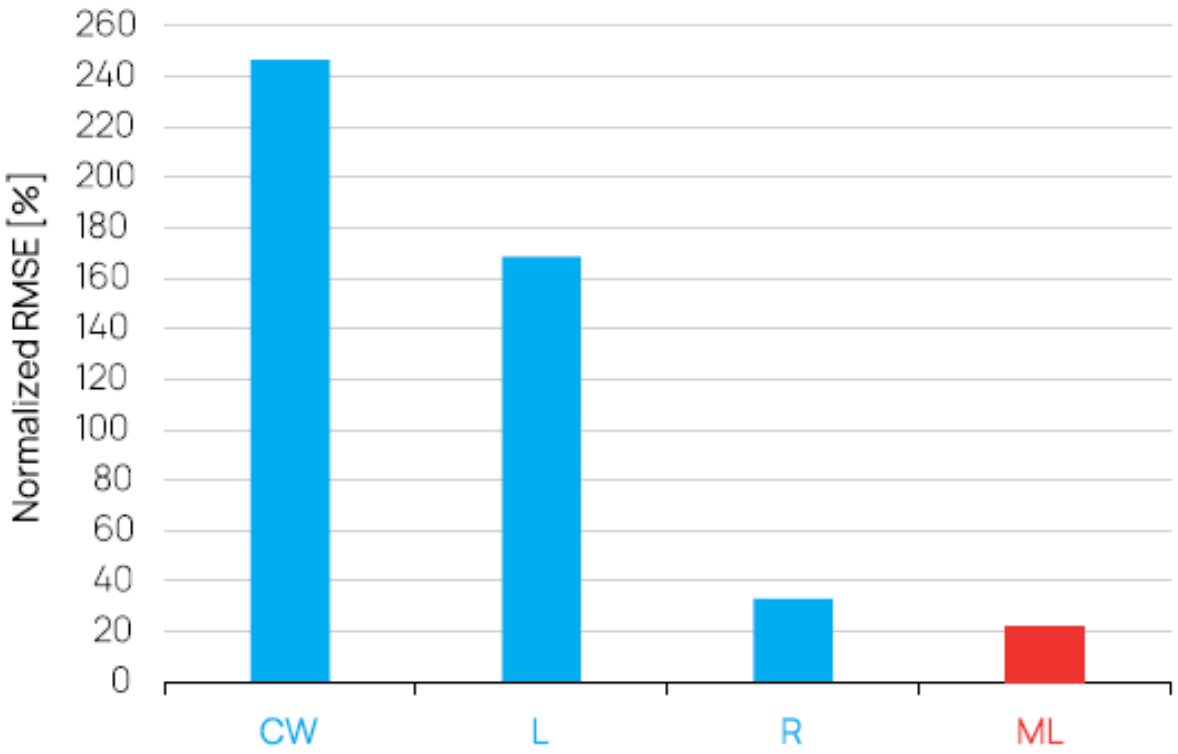


Performance del modello: training vs testing

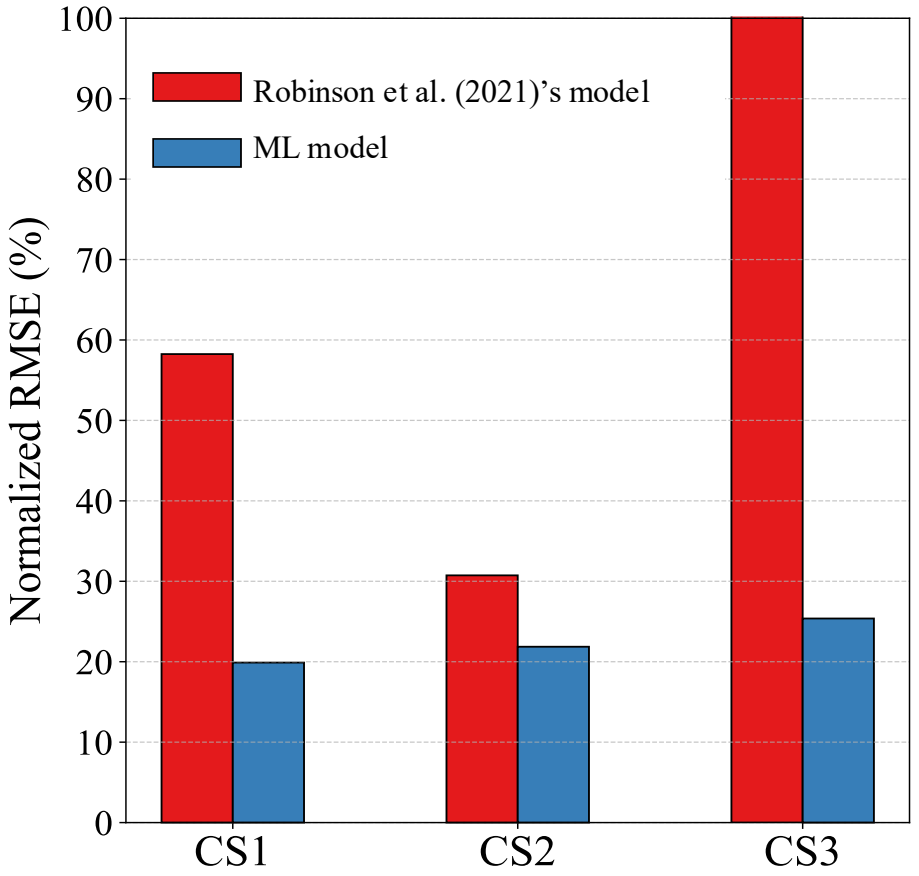


Performance del modello: ML vs modelli analitici

CS2



ML vs Robinson

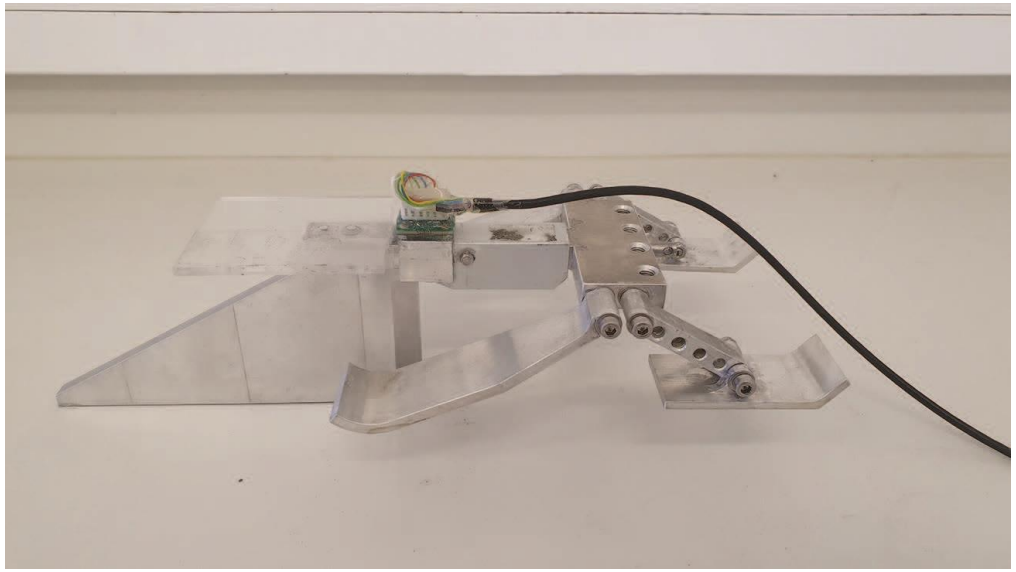


Approccio alternativo: Machine Learning a supporto della modellazione analitica

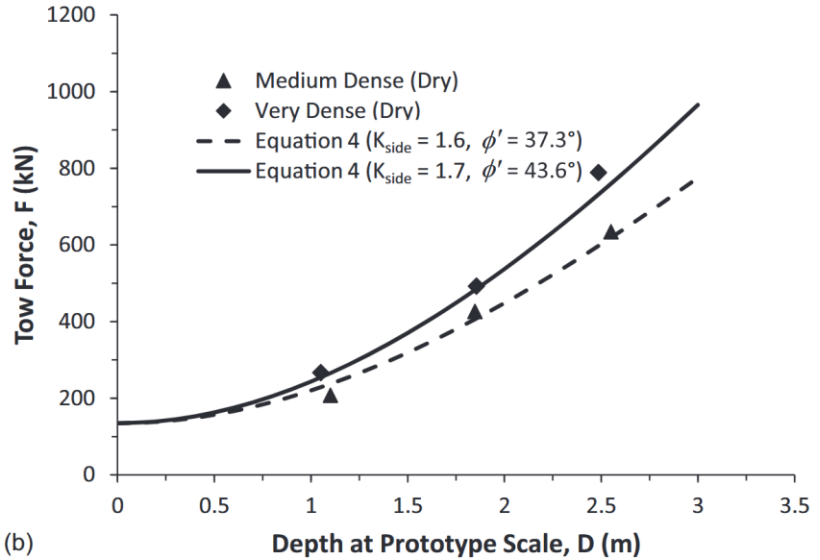
05

Punto di partenza: modello di Robinson et al (2021)

$$F = \underbrace{\left\{C_w W'}_{\text{Attrito}} + \underbrace{\frac{3}{2} K_p \gamma' D^2 w}_{\text{Capacita' portante}} + \underbrace{K_s \gamma' D A_s \tan\delta\right\}}_{\text{Resistenza laterale}} \times \underbrace{\left\{1 - C_{dn\psi} \frac{\psi V D}{c_v}\right\}}_{\text{Termine rate-dependent}}$$



Modello in scala 1:50 dell'interramento di un cavo mediante aratro, utilizzato nelle prove in piccola scala condotte da Robinson et al. (2021).



Dati di prove in centrifuga sull'interramento mediante aratro in sabbia asciutta a diverse densità, interpolati mediante forze di traino stimate a partire da prove CPT

Modello analitico migliorato con ML: metodologia

$$F = \left\{C_w W' + \frac{3}{2} K_p \gamma' D^2 w + K_s \gamma' D A_s \tan\delta\right\} \times \left\{1 - C_{dn\psi} \frac{\psi VD}{c_v}\right\} = F_{st} \times \{1 + A(\boldsymbol{x}) VD\}$$

Inputs

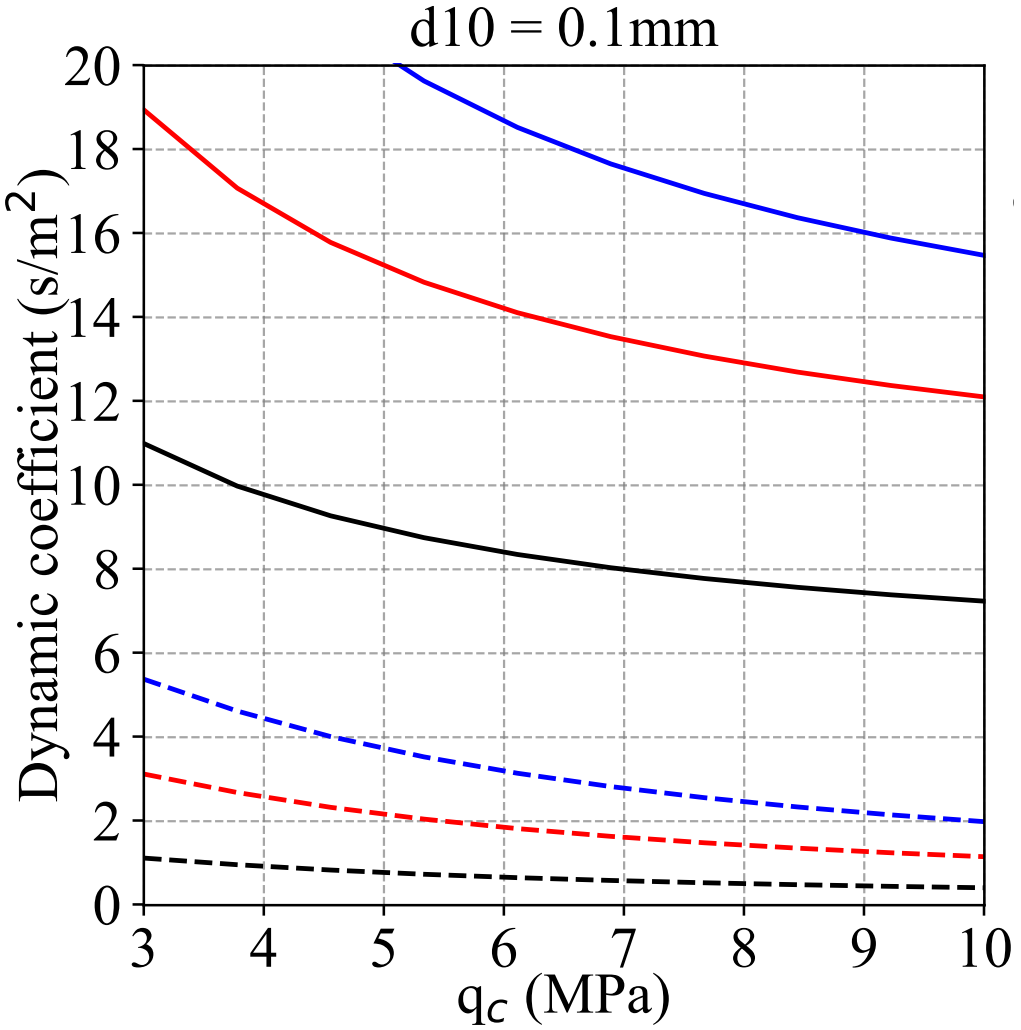
$$x^{(i)} = \begin{Bmatrix} 1/q_c \\ d_{10} \\ C_u \end{Bmatrix}^{(i)}$$

ML algorithm

Output

$$A^{(i)} = \left(\frac{F - F_{st}}{F_{st}} \frac{1}{VD}\right)^{(i)}$$

Modello analitico migliorato con ML: risultati



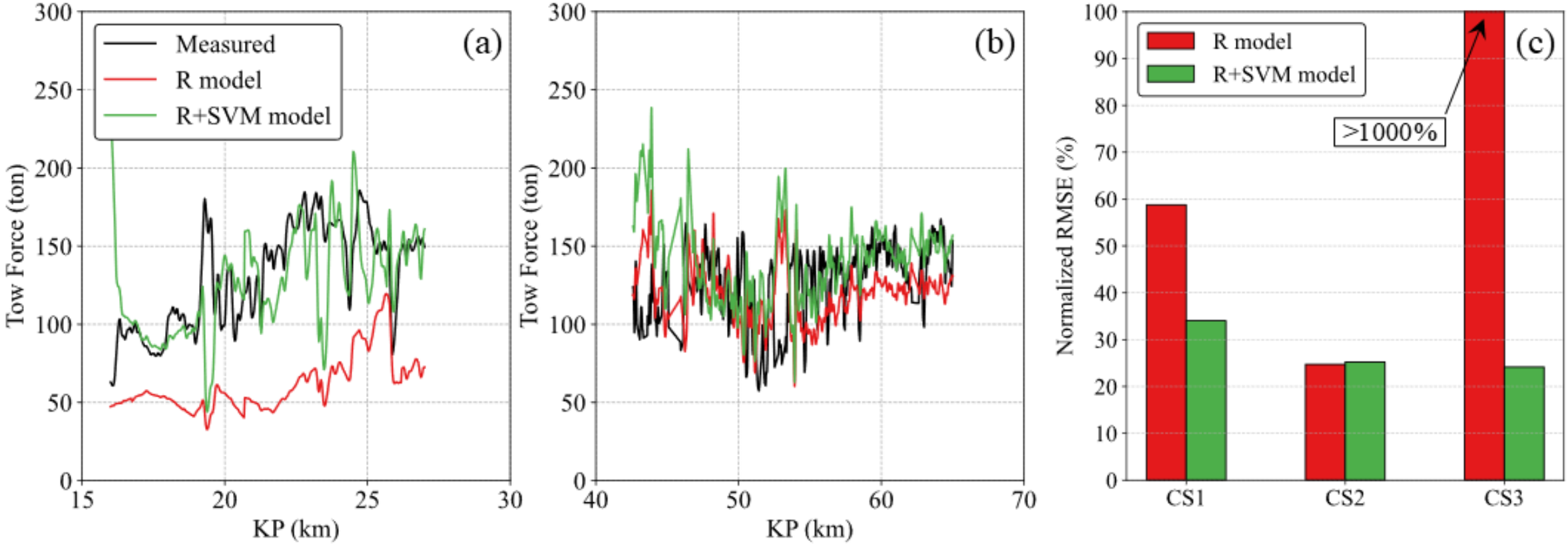
Evoluzione del coefficiente rate dependent A con q_c per differenti combinazioni di CU e d10

- Curva tratteggiata: modello analitico originale
- Curva continua: modello analitico migliorato con ML

Modello analitico migliorato con ML: risultati

CS1

CS2



Conclusioni

- I modelli analitici disponibili descrivono i principali meccanismi fisici, ma mostrano limiti di accuratezza e trasferibilità tra condizioni geotecniche diverse.
- La Support Vector Regression, utilizzando solo dati as-built e parametri ottenibili da indagini geotecniche di routine, migliora significativamente la previsione della forza di traino.
- La rappresentatività del training set è fondamentale: buone prestazioni richiedono che il nuovo scenario ricada nel dominio coperto dai dati di addestramento.
- Possibilità di usare approccio ibrido: mantenere la struttura fisica del modello analitico e usare il ML per calibrare i contributi piu' incerti.

In corso:

- Applicazione a terreni argillosi e 'misti'
- Utilizzo altri algoritmi di regressione e reti neurali
- Approcci geostatistici
- Comprensione e simulazioni del ruolo del jetting

Hanno collaborato a questo lavoro

Dr. Pietro Marveggio
Ing. Davide Gritti
Ing. Alejandro Malo Romero
Prof. Stefano Mariani

POLITECNICO
MILANO 1863

Ing. Daniele Magri

Prysmian
Group

Grazie per l’attenzione