

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

**Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria del Veicolo

## **ANALISI TERRAMECCANICA DELL'INTERAZIONE TRA MACCHINE AGRICOLE E SUOLO**

*Sviluppo di un modello per la stima in tempo reale  
delle curve di rendimento*

**Relatore:**

Prof. Michele Mattetti

**Candidato:**

Simone Bergamaschi

Matricola: 184813

---

Anno Accademico 2024/2025



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>1 Materiali e Metodi</b>	<b>5</b>
1.1 Prove di tiro sul campo . . . . .	5
1.1.1 Trattore . . . . .	5
1.1.2 Sensori e Parametri Rilevati . . . . .	5
1.1.3 Caratteristiche del Suolo . . . . .	6
1.2 Modello Terrameccanico di Wong-Reece . . . . .	7
1.2.1 Teoria del Modello . . . . .	7
1.2.2 Parametri del Terreno . . . . .	11
1.2.3 Multipass Effect . . . . .	12
1.3 Applicazione del modello al caso reale . . . . .	12
1.3.1 Primo Approccio . . . . .	12
1.3.2 Modello Ruota di Wong-Reece . . . . .	13
1.3.3 Modello di Wong-Reece per l'Intero Trattore . . . . .	14
1.3.4 Calibrazione Parametri del Terreno . . . . .	15
1.3.5 Rimozione dipendenza dai WFT . . . . .	17
1.3.6 Traction Efficiency e Vehicle Traction Ratio . . . . .	19
1.3.7 Mappatura Parametri del Terreno . . . . .	22
<b>2 Risultati</b>	<b>24</b>
2.1 Modello Ruota di Wong-Reece . . . . .	24
2.1.1 Modello a Singola Ruota . . . . .	24
2.1.2 Calibrazione Modello per Ruota Anteriore . . . . .	28
2.1.3 Calibrazione Modello per Ruota Posteriore . . . . .	33
2.1.4 Modello a 4 Ruote . . . . .	34
2.1.5 Validazione del Modello . . . . .	37
2.2 Calcolo della trazione senza i WFT . . . . .	37
2.3 Curve di Rendimento e Potenza . . . . .	38
2.3.1 Traction Efficiency . . . . .	38
2.3.2 Vehicle Traction Ratio . . . . .	41

2.3.3	Traction Efficiency vs Vehicle Traction Ratio . . . . .	43
2.3.4	Potenza al Gancio vs Vehicle Traction Ratio . . . . .	43
2.4	Mappatura del Suolo . . . . .	44
2.4.1	Esempio di funzionamento del modello . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Discussione</b>	<b>49</b>
3.1	Analisi Risultati ed Errori del Modello di Wong-Reece . . . . .	49
3.2	Utilizzo delle sole condizioni stazionarie . . . . .	50
3.3	Comportamento del Modello senza i WFT . . . . .	52
3.4	Analisi Curve di Rendimento . . . . .	52
3.4.1	TE vs Slip . . . . .	52
3.4.2	TE e Potenza al Gancio vs VTR . . . . .	53
3.5	Analisi della Mappatura del Suolo . . . . .	54
	<b>Conclusioni</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>56</b>

# Introduzione

Una delle principali differenze tra automobili e macchine agricole è la tipologia di terreno su cui devono transitare, in particolare nel caso delle autovetture l'asfalto ha proprietà pressochè costanti mentre il suolo agricolo, essendo fortemente deformabile, può presentare caratteristiche molto differenti anche all'interno dello stesso campo. A causa di questa situazione lo studio della trazione risulta più complesso e caratterizzato da un numero di parametri molto elevato per cui si parla di problema di terrameccanica complessa.

L'obiettivo del progetto di tesi è la realizzazione di un modello in grado riprodurre il comportamento del trattore al fine di rilevare i parametri del terreno utili per la realizzazione delle curve caratteristiche di rendimento del veicolo. L'interazione tra veicolo e terreno è stata modellizzata mediante l'approccio semi-empirico di **Wong-Reece** che ha permesso di sostituire il trattore per ricavare valori di trazione piuttosto realistici nel caso di suolo deformabile tramite i parametri del terreno e del veicolo.

La validazione del modello è stata effettuata confrontando i risultati teorici con i dati sperimentali raccolti durante alcune prove di tiro svolte in campo in cui è stato utilizzato un trattore **New Holland T7** strumentato con trasduttori di forza su ogni mozzo ruota, una cella di carico sulla barra di traino e un sistema GPS per il monitoraggio di velocità e slittamento. Attraverso questo processo è stato possibile ricavare le curve di rendimento grazie alle quali il sistema di controllo di bordo è in grado di adattare in tempo reale i parametri operativi, come lo slittamento imposto, al fine di massimizzare l'efficienza riducendo sensibilmente il consumo specifico di carburante durante la lavorazione. Mediante questi accorgimenti si possono limitare i costi necessari alle operazioni in campo e l'impatto ambientale sfruttando al massimo la potenza erogata dal motore.

# Capitolo 1

## Materiali e Metodi

In questo primo capitolo verranno illustrate le prove eseguite sul campo, nello specifico verrà descritta la tipologia di trattore utilizzato ed il metodo impiegato per ricavare i dati utilizzati in seguito nello sviluppo del modello. Successivamente verrà approfondito il modello di Wong-Reece impiegato per modellare il contatto pneumatico-suolo e i successivi passaggi svolti per raggiungere una coerenza fisica dei risultati.

### 1.1 Prove di tiro sul campo

#### 1.1.1 Trattore

Le prove di tiro sono state eseguite con un trattore New Holland T7.315 HD, un veicolo a trazione integrale caratterizzato da una trasmissione di tipo CVT. Il trattore presenta una potenza massima di 230 kW (313 hp) ed una massa di 11570 kg a cui sono state aggiunte una zavorra anteriore di 1800 kg ed una posteriore di 2000 kg. Durante le prove il trattore è stato equipaggiato con pneumatici Michelin AxioBib2 ad elevata flessibilità con denominazione VF 710/70R42 al posteriore e VF 600/70R30 all'anteriore.

#### 1.1.2 Sensori e Parametri Rilevati

Durante le prove di tiro il trattore è stato dotato di differenti sensori e ricevitori al fine di ricavare i dati necessari per gli studi successivi [1]. I parametri motore quali regime di rotazione ( $n_e$ ) e coppia al volano ( $T_e$ ) sono stati ricavati direttamente dalla rete CAN-BUS e registrati utilizzando un data logger (Kvaser Memorator Pro 5xHS) tramite la porta di diagnostica, attraverso queste due grandezze è stato possibile stabilire la potenza motore erogata istante per istante. Per rilevare la velocità è stato installato un ricevitore

GNSS (xProGPS\_nano, Suchy Data Systems, GmbH, Erdweg, DE) dotato di una frequenza di campionamento di 25 Hz, grazie a questo dato viene calcolato lo slittamento ( $s$ ) a causa della differenza tra velocità delle ruote e velocità di avanzamento reale, esso è stato calcolato sulla base del raggio di rotolamento misurato su cemento a carico zero. La forza al gancio è stata misurata tramite una cella di carico con portata massima di 196 kN (model TA, NBC Elettronica, Sondrio, IT) posizionata sulla barra di traino, mentre sulle ruote sono stati collocati 4 trasduttori di forza (WFT) di tipo (LW-2 T-100 K, Michigan Scientific Corporation, Milford, MI, USA) in grado di fornire forza orizzontale, verticale e coppia agenti sui singoli mozzi, questi valori sono stati fondamentali per lo sviluppo e la validazione del modello di contatto ruota-suolo. I segnali di forza grezzi dei WFT sono stati pre-elaborati correggendo i disallineamenti angolari e stimando il carico delle ruote e successivamente sono stati filtrati con un filtro Butterworth passa-basso per poi essere memorizzati in un file ASCII utilizzando il software CANalyzer 10.0 SP7 (Vector Informatik GmbH, Stoccarda, DE), i dati sono stati ricampionati con un tempo di campionamento costante di 0,01 s e successivamente convertiti in un formato di file compatibile con MATLAB.

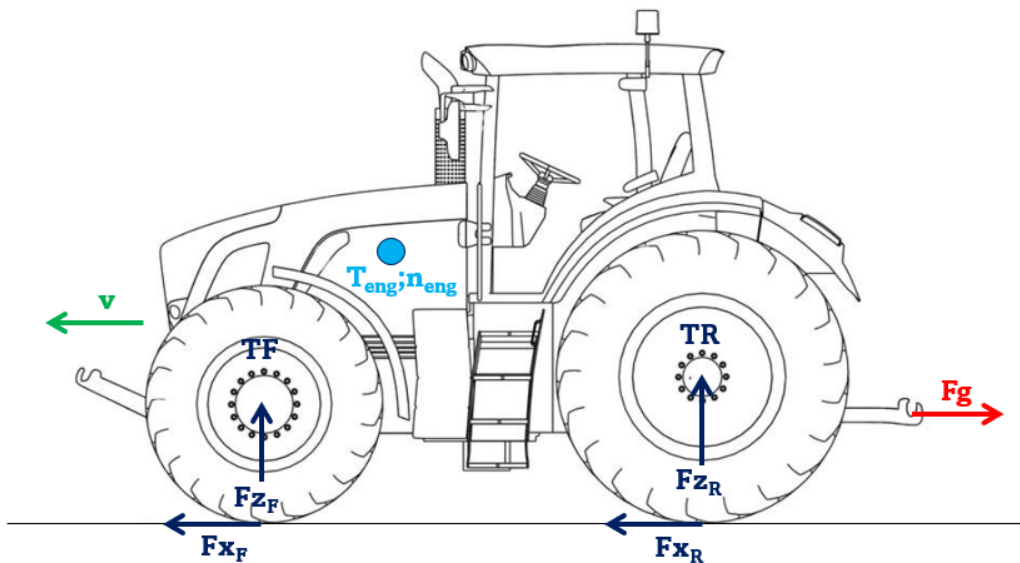


Figura 1.1: Parametri ricavati durante i test

### 1.1.3 Caratteristiche del Suolo

Tutti 5 i test di tiro sono stati effettuati sul medesimo terreno collocato ad un'altezza di 83 metri sul livello del mare, ad una temperatura ambientale

media di 8°C ed un'umidità del 64 %. Il terreno può essere denominato come *sandy loam* secondo la classificazione presente nel testo di Wong [7], caratteristica molto importante al fine di ricavare dalle tabelle i parametri del suolo da inserire all'interno del modello terrameccanico.

## 1.2 Modello Terrameccanico di Wong-Reece

### 1.2.1 Teoria del Modello

Dato il problema in questione si è scelto di approfondire il modello di Wong-Reece sviluppato alla fine degli anni '60 [7] [6] in grado di rappresentare il contatto tra ruota rigida e terreno deformabile. Questo modello ha superato l'idea di Bekker [2] in cui si vedeva l'interazione tra i due elementi come una piastra rigida affondante nel terreno, ora invece si considera la ruota in movimento che affonda nel suolo. Una caratteristica molto importante è la distribuzione delle tensioni lungo l'area di contatto descritta da Wong-Reece in cui si nota una variazione lungo l'arco di contatto ma con un picco massimo che non coincide con il centro dell'impronta. Nel momento in cui la ruota affonda nel suolo si vengono a generare tensioni di tipo normale  $\sigma$  e tensioni di tipo tangenziale  $\tau$ , queste tensioni sono responsabili dell'affondamento  $z$  (*sinkage*) e della forza di trazione  $D$ .

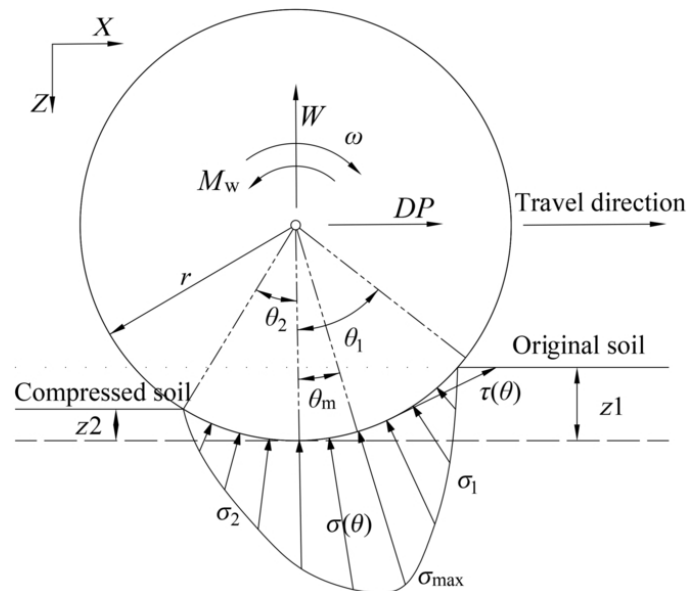


Figura 1.2: Distribuzione delle Tensioni

Fonte: J. Y. Wong. Theory of Ground Vehicles

Dalla figura 1.2 si nota la distribuzione irregolare delle **tensioni normali** lungo l'arco di contatto sotteso dalla somma degli angoli  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , nel caso in esame si è scelto di trascurare il ritorno elastico del terreno per cui  $z_2$  risulta nullo e di conseguenza anche l'angolo  $\theta_2$ . La massima tensione viene raggiunta in corrispondenza dell'angolo  $\theta_M$  ricavabile direttamente dall'equazione:

$$\theta_M = \theta_1 \cdot (c_1 + c_2 \cdot i) \quad (1.1)$$

Dove  $c_1$  e  $c_2$  sono parametri caratteristici del terreno mentre  $i$  prende il nome di **slittamento** (*slip ratio*) definito come:

$$i = 1 - \frac{v}{\omega \cdot r} \quad (1.2)$$

In questa equazione compaiono la velocità reale del trattore  $v$  e la velocità angolare della ruota  $\omega$  da cui si nota che lo slittamento risulta nullo soltanto in condizioni di perfetta aderenza in cui la velocità tangenziale della ruota corrisponde con la velocità di avanzamento del veicolo mentre assume un valore unitario nel caso in cui il mezzo risulta fermo mentre le ruote girano senza avere aderenza.

Una volta stimato il valore dell'angolo  $\theta_M$  in funzione di alcuni parametri del terreno e dello slittamento grazie a due espressioni derivanti dall'equazione di Bekker-Reece è possibile definire l'andamento delle tensioni normali lungo il profilo della ruota:

$$\sigma_1 = (k_1 + k_2 \cdot b) \left(\frac{R}{b}\right)^n (\cos \theta - \cos \theta_1)^n \quad (1.3)$$

$$\sigma_2 = (k_1 + k_2 \cdot b) \left(\frac{R}{b}\right)^n \left[\cos(\theta_1 - \frac{\theta - \theta_2}{\theta_M - \theta_2})(\theta_1 - \theta_M)\right]^n \quad (1.4)$$

Nello studio svolto la tensione è stata calcolata attraverso l'espressione 1.3 in quanto la 1.4 si riferisce all'angolo  $\theta_2$  che è stato considerato nullo per ipotesi, inoltre è possibile notare la dipendenza dalle geometrie della ruota quali raggio ( $R$ ) e larghezza ( $b$ ). Qui compaiono 3 parametri caratteristici del terreno come  $k_1$ ,  $k_2$  ed  $n$  che verranno analizzati in un successivo capitolo specifico.

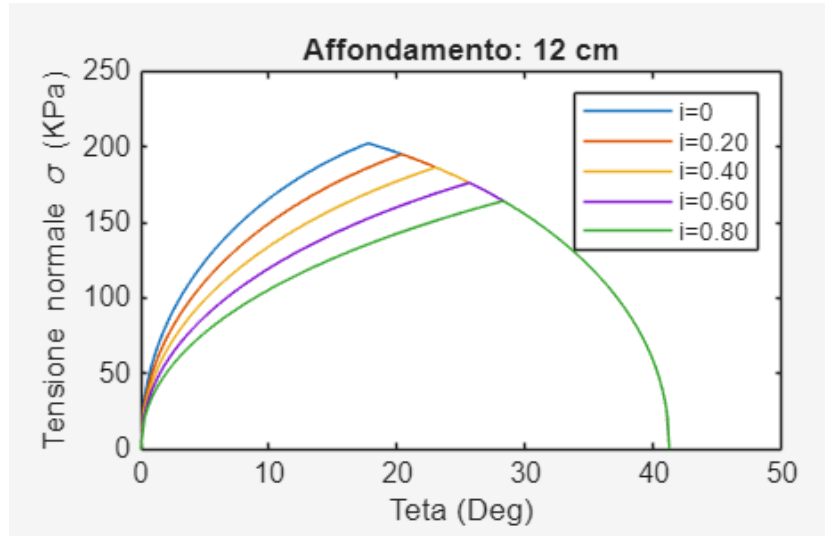


Figura 1.3: Distribuzione della Tensione Normale

**Fonte:** Risultato dal modello Matlab

Dal grafico 1.3 si denota come all'aumentare dello slittamento il massimo valore di tensione normale si allontani sempre di più dal centro dell'arco di contatto a parità di affondamento dello pneumatico.

Una volta ricavata la tensione normale attraverso l'equazione di Janosi-Hanamoto si ottiene l'espressione della **tensione tangenziale**:

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi)(1 - e^{-\frac{j}{K}}) \quad (1.5)$$

Si vedono comparire all'interno dell'equazione tre nuovi parametri del terreno quali la coesione  $c$ , l'angolo di attrito interno  $\phi$  e il parametro di deformazione al taglio  $K$ , questi valori sono caratteristici della tipologia di suolo sul quale il veicolo sta transitando. All'esponente compare la deformazione a taglio  $j$  definita come:

$$j = \int_0^t V_j dt = R[(\theta_1 - \theta) - (1 - i)(\sin(\theta_1) - \sin \theta)] \quad (1.6)$$

Sostituendo l'espressione di  $j$  nell'equazione 1.5 si arriva all'espressione completa della tensione tangenziale:

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi)(1 - e^{-\frac{R}{K}[(\theta_1 - \theta) - (1 - i)(\sin(\theta_1) - \sin \theta)]}) \quad (1.7)$$

Anche per le tensioni tangenziali il massimo valore non coincide con il centro dell'impronta ma all'aumentare dello slittamento tende a spostarsi verso valori di  $\theta$  crescenti come mostrato nel grafico successivo

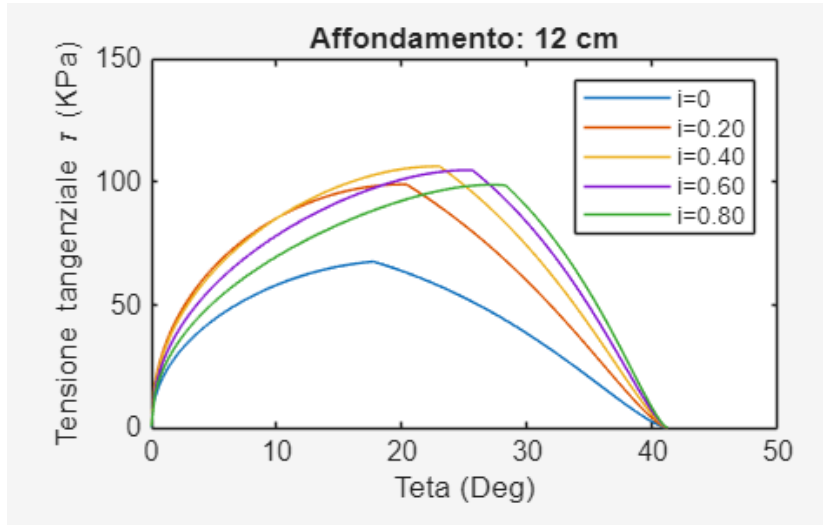


Figura 1.4: Distribuzione della Tensione Tangenziale

**Fonte:** Risultato dal modello Matlab

Note le tensioni normali e tangenziali e la relativa distribuzione lungo l'arco di contatto, mediante integrazione vengono calcolate la **reazione verticale** del terreno  $W$ :

$$W = R \cdot b \left[ \int_{\theta_M}^{\theta_1} \sigma_1 \cos \theta d\theta + \int_0^{\theta_M} \sigma_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_M}^{\theta_1} \tau_1 \sin \theta d\theta + \int_0^{\theta_M} \tau_2 \sin \theta d\theta \right] \quad (1.8)$$

La **forza di trazione** sviluppata dalla ruota  $D$ :

$$D = R \cdot b \left[ \int_{\theta_M}^{\theta_1} \tau_1 \cos \theta d\theta + \int_0^{\theta_M} \tau_2 \cos \theta d\theta - \int_{\theta_M}^{\theta_1} \sigma_1 \sin \theta d\theta - \int_0^{\theta_M} \sigma_2 \sin \theta d\theta \right] \quad (1.9)$$

La **coppia applicata al mozzo**  $T$ :

$$T = R \cdot b^2 \left[ \int_{\theta_M}^{\theta_1} \tau_1 d\theta + \int_0^{\theta_M} \tau_2 d\theta \right] \quad (1.10)$$

Al fine dello studio della forza di trazione erogata dal trattore il modello ruota è stato utilizzato per ricavare la forza di trazione  $D$  per la singola ruota e successivamente lo si è applicato a tutte e 4 le ruote contemporaneamente ottenendo la forza al gancio disponibile nelle date condizioni operative.

## 1.2.2 Parametri del Terreno

Nelle equazioni mostrate nel paragrafo precedente compaiono vari parametri che rappresentano le condizioni e la tipologia di terreno sul quale il trattore sta operando, è possibile distinguere:

- Parametri di Affondamento:
  - **n**: *Esponente di Affondamento*  
Indica la variazione della rigidità del suolo in base alla profondità, valori molto inferiori ad 1 indicano un terreno che si compatta facilmente. Dalla tabella di Wong è stato ricavato  $n=0,99$  per il terreno sul quale sono stati eseguiti i test.
  - **k<sub>1</sub>**: *Modulo di Coesione ( $k'_c$ )*  
Componente della rigidità del terreno dovuta alla coesione tra le particelle, nella formulazione precedente viene espresso in  $kPa$ . Per il terreno in esame all'anteriore si ha  $k_1F=3,25 kPa$  mentre al posteriore  $k_1R=6,5 kPa$ .
  - **k<sub>2</sub>**: *Modulo d'Attrito ( $k'_\phi$ )*  
Componente della rigidità che dipende dall'attrito interno e dal carico gravitazionale, nella formulazione precedente viene espresso in  $kPa/m$ . Nel modello sono stati utilizzati per l'anteriore  $k_2F=1800 kPa/m$  mentre per il posteriore  $k_2R=3600 kPa/m$ .
  - **c<sub>1</sub>**: Indica la posizione del picco massimo di tensione nel caso di slittamento nullo. Da tabella per la tipologia di suolo in esame si ha  $c_1=0,4$ .
  - **c<sub>2</sub>**: Determina di quanto di sposta il picco massimo di tensione in funzione dello slittamento. Da tabella per la tipologia di suolo in esame si ha  $c_2=0,15$ .
  
- Parametri di Resistenza al Taglio
  - **c**: *Coesione*  
Rappresenta la forza di legame tra le particelle ed è indipendente la carico verticale, per un terreno sabbioso assumi piccoli valore mentre un terreno più ricco di argilla presenta una coesione più elevata. Per le ruote anteriori si ha  $cF=48 kPa$  e per quelle posteriori  $cR=76 kPa$ .

- $\phi$ : *Angolo di Attrito Interno*  
Capacità delle particelle di incastrarsi tra loro, è influenzato dal carico verticale dovuto al peso del veicolo. All'anteriore si ha  $\phi_F=27^\circ$  e al posteriore  $\phi_R=37,8^\circ$ .

- Parametro di Deformazione

- **K**: Modulo di Deformazione al Taglio  
Indica la deformazione del terreno necessaria affinché esso generi la massima forza di trazione, per terreni rigidi si ha un valore di K inferiore a terreni più soffici. All'anteriore si ha  $K_F=0.0293$  m e al posteriore  $K_R=0.038$  m.

### 1.2.3 Multipass Effect

Tale fenomeno è dovuto al compattamento del terreno causato dal passaggio degli pneumatici. In particolare, le ruote anteriori incontrano un suolo vergine che comprimono con il loro transito, di conseguenza, le ruote posteriori andranno ad incontrare un terreno con caratteristiche differenti. Per inserire il fenomeno all'interno del modello sono stati differenziati i valori dei parametri del terreno tra anteriore e posteriore, nello specifico i valori utilizzati per l'asse posteriore sono caratteristici di un suolo più compatto e sodo rispetto a quello preso in considerazione all'anteriore considerato più soffice. I valori riportati in Tabella 1.1 sono stati ricavati dal testo *Theory of Ground Vehicles* di Wong [7] e si riferiscono a un terreno denominato sandy loam. Alcuni di essi, come l' Angolo di Attrito e la Coesione, sono stati modificati rispetto a quelli selezionati nella fase iniziale a seguito di una calibrazione eseguita sia per le ruote anteriori che posteriori; questo processo verrà analizzato in un paragrafo apposito.

## 1.3 Applicazione del modello al caso reale

### 1.3.1 Primo Approccio

Il primo script realizzato in Matlab aveva lo scopo di verificare il funzionamento del modello ruota nel caso di un singolo carico verticale agente sul mozzo ruota per un range di slittamento tra 0 e 100 %. Una volta impostati parametri del terreno e carico verticale sono stati confrontati i grafici di Affondamento, Trazione e Coppia con quelli presenti nei libri di testo al fine di assicurarsi che le equazioni inserite fornissero risultati congruenti con la teoria di Wong-Reece.

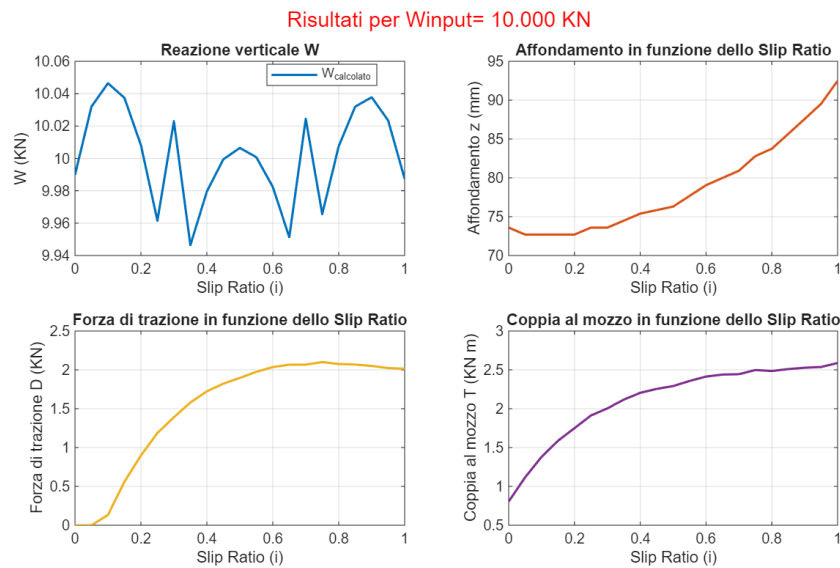


Figura 1.5: Reazioni e Affondamento

**Fonte:** Risultato dal modello Matlab

Come mostrato dalla Fig. 1.4 nel caso di terreno deformabile la forza di trazione cresce all'aumentare dello slittamento, in particolare questo avviene nel range di slittamento in cui spesso il trattore è chiamato ad operare.

### 1.3.2 Modello Ruota di Wong-Reece

Una volta constatata l'efficacia del modello iniziale nel fornire curve realistiche di trazione e coppia si è passati ad una versione completa i cui dati di input, come carico verticale e slittamento, derivano direttamente dai WFT ricavati durante i test in campo. Per ogni coppia di carico verticale e slittamento il modello è in grado di fornire un valore di trazione corrispondente, ripetendo questo processo per più coppie di valori si è in grado di descrivere la curva Trazione-Slittamento della ruota relativa allo specifico terreno in esame. Di seguito è illustrato l'algoritmo rappresentante i singoli passaggi eseguiti dal modello:

Questo procedimento è stato applicato sia alle ruote anteriori che posteriori, le differenze principali le si hanno nei parametri in input del terreno e delle ruote in quanto il suolo pre-compattato presenta coesione e angoli di attrito maggiori mentre gli pneumatici posteriori presentano geometrie maggiori rispetto a quelle anteriori. Per ogni modello si è ricavata la curva di trazione,

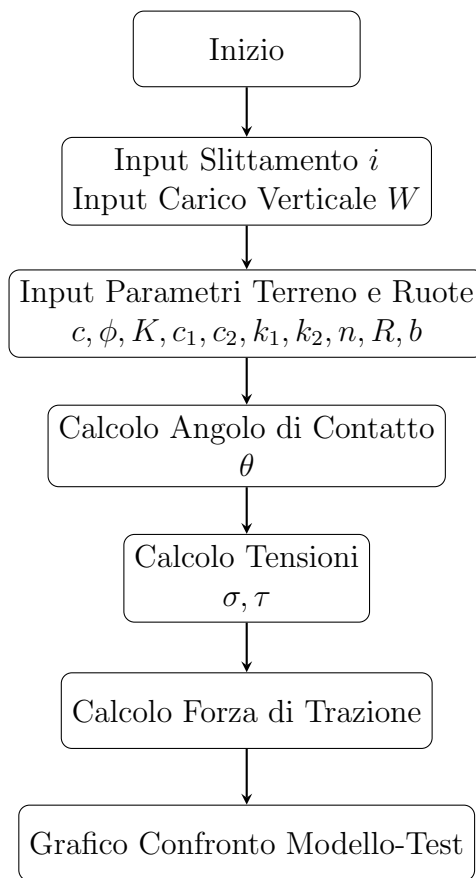


Figura 1.6: Diagramma di flusso modello ruota

fondamentale per la comparazione con la curva ricavata durante il test sul campo al fine di verificare la validità del modello implementato.

### 1.3.3 Modello di Wong-Reece per l'Intero Trattore

Analizzando lo schema dell'intero veicolo si nota come l'equilibrio longitudinale sia dato dalla forza di trazione espressa dalle singole ruote e dalla forza al gancio, essa deriva dalla presenza di una forza resistente posteriore generata, ad esempio, da un attrezzo durante la lavorazione in campo. Di seguito si illustra uno schema rappresentativo del veicolo:

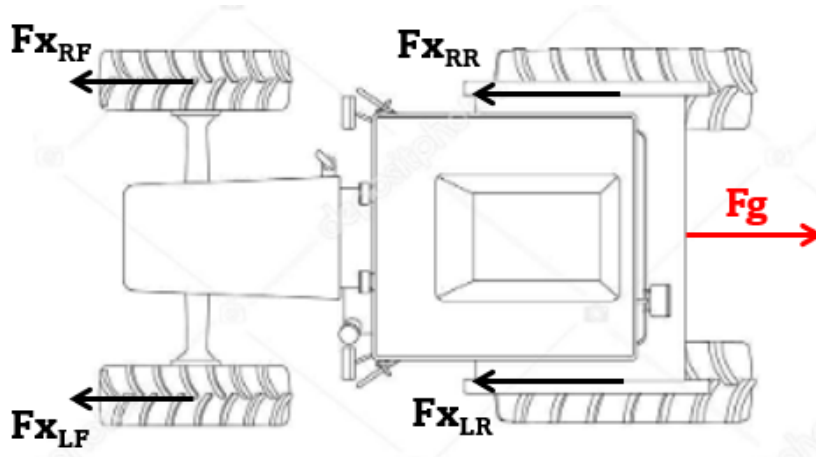


Figura 1.7: Modello Longitudinale del Trattore

Nello schema in figura sono indicate con  $F_{x_{RF}}$ ,  $F_{x_{LF}}$ ,  $F_{x_{RR}}$ ,  $F_{x_{LR}}$  le forze di trazione sviluppate dalle singole ruote e con  $F_g$  la forza al gancio. Definite le forze in gioco si scrive l'equazione di equilibrio alla traslazione longitudinale:

$$F_{x_{RF}} + F_{x_{LF}} + F_{x_{RR}} + F_{x_{LR}} - F_g = 0 \quad (1.11)$$

La somma delle singole forze di trazione viene espressa come  $F_{x_{TOT}}$  e viene calcolata attraverso un apposito script realizzato in Matlab. Il modello calcola la trazione di ogni ruota tramite il rispettivo carico verticale ricavato dai WFT utilizzando lo stesso algoritmo del modello per ruota singola, una volta ricavata e graficata la trazione totale si esegue un confronto con la forza misurata in fase di test per verificare l'errore commesso. I dati ricavati dalle prove sul campo sono stati salvati in un file denominato Axio\_group\_49\_4WD\_f.mat il quale viene richiamato ogni volta in cui si esplicita un parametro contenuto in esso. Durante i calcoli si è utilizzato il  $kN$  come unità di misura delle forze mentre la forza al gancio misurata durante le prove di tiro è stata espressa in  $kgf$ , per questo motivo è presente un termine moltiplicativo che rappresenta l'accelerazione di gravità all'interno del dato di input.

### 1.3.4 Calibrazione Parametri del Terreno

Precedentemente sono stati presentati i parametri del terreno necessari al modello per calcolare la forza di trazione del veicolo, essendo nota la tipologia di terreno su cui sono state eseguite le prove di tiro si sono potuti ricavare dalla tabella presente nel libro di Wong i valori iniziali dei parametri. Come mostrato nella tabella triangolare realizzata da E. Benham e R.J. Ahrens nel

testo *Clarification of Soil Texture Class Boundaries* [3] ogni denominazione di terreno ricopre una sezione più o meno ampia a seconda della composizione specifica perciò i valori presenti nella tabella di Wong possono subire leggere variazioni.

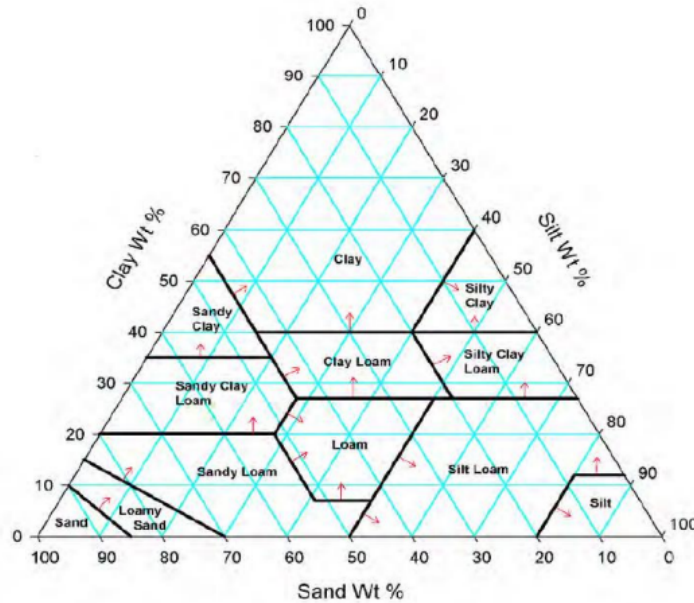


Figura 1.8: Classificazione dei terreni secondo Benham e Ahrens

**Fonte:** R.J. Ahrens E. Benham. *Clarification of Soil Texture Class Boundaries*

Una volta verificata la risposta del modello con i valori iniziali si è cercato di ricavare parametri più precisi per ottenere un modello del veicolo in grado di fornire una forza di trazione più vicina possibile a quella rilevata durante i test. Per fare ciò è stata svolta una calibrazione dei parametri del terreno sia per le ruote anteriori che posteriori sfruttando i singoli modelli di contatto ruota-suolo per evidenziare l'influenza del Multipass Effect. Nello specifico la calibrazione è stata eseguita per 3 parametri: Angolo di Attrito, Coesione e Modulo di Deformazione al Taglio, mentre per i restanti parametri sono stati mantenuti i valori espressi nella tabella di Wong.

Parametri	c1	c2	$\phi$	c	k1	k2	n	k
Valori iniziali	0.4	0.15	32	32	3.25	1800	0.99	0.012
Limite inferiore	0.4	0.15	27	10	3.25	1800	0.99	0.001
Limite superiore	0.4	0.15	40	60	3.25	1800	0.99	0.035

Tabella 1.1: Parametri iniziali e limiti imposti

Nella figura riportata compaiono i termini  $lb$  ed  $ub$  che rappresentano i limiti entro cui l'ottimizzatore può "cercare" i valori ideali, questo per far sì che i dati abbiano coerenza fisica con la tipologia di terreno in esame. Per la calibrazione è stato utilizzato il toolbox Optimization presente in Matlab con il quale si è cercato di minimizzare la funzione di costo che per il caso studiato corrisponde al Root Mean Square Error ( $RMSE$ ), definito come:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{test,j} - D_{calc,j})^2}{n}} \quad (1.12)$$

L'ottimizzatore trova la combinazione di parametri per cui la differenza tra forza al gancio misurata e forza al gancio stimata dal modello sia minima, ciò permette di individuare i parametri specifici del terreno relativi al momento in cui sono state eseguite le prove. Una volta eseguita la calibrazione sia per l'anteriore che per il posteriore si introducono i valori dei parametri ricavati all'interno del modello integrale con tutte e 4 le ruote, così facendo si verifica la capacità del modello di replicare il comportamento del trattore.

### 1.3.5 Rimozione dipendenza dai WFT

Nei modelli precedenti come carico verticale agente sul mozzo ruota è stato utilizzato il valore di forza misurato da trasduttori collocati appositamente su ogni mozzo ruota durante le prove di tiro, normalmente i trattori non sono dotati di questi sensori di forza, per cui durante la normale attività di lavoro i valori dei carichi verticali non sono esplicitamente noti. Per evitare questa problematica si è scelto di rendere indipendente il modello dai valori di forza misurati dai sensori, per fare ciò è stato necessario realizzare un modello longitudinale del veicolo in cui risulta necessario conoscere le masse del trattore e delle zavorre, la forza misurata al gancio e le geometrie del veicolo e delle ruote. Nel caso in esame tutte queste grandezze risultavano note ma per rendere più generale la formulazione ed applicabile ad ogni trattore ogni equazione è stata espressa in forma parametrica. Per prima cosa è stato realizzato lo schema longitudinale corredato di quote e forze agenti nei rispettivi punti di applicazione come mostrato nella figura sottostante:

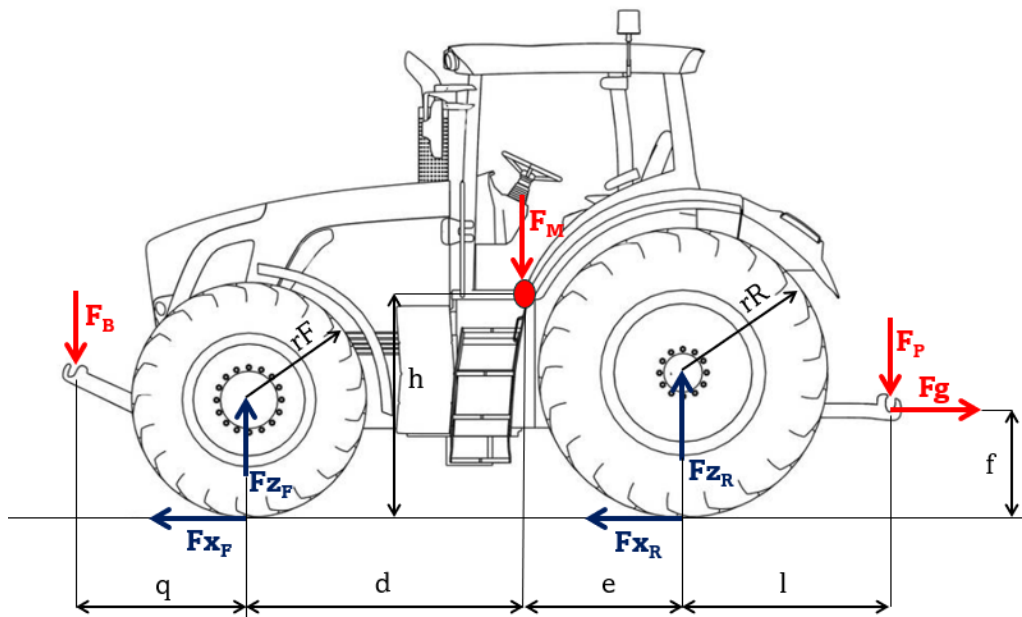


Figura 1.9: Schema Longitudinale del Veicolo

$m=11570$  Massa del Trattore [kg]

$m_B=1800$  Massa Zavorra Anteriore [kg]

$m_P=2000$  Massa Zavorra Posteriore [kg]

$F_g$ : Forza al Gancio [kN]

$p=2.995$  Passo [m]

$d=0.6 \cdot p$  Semipasso Anteriore [m]

$e=0.4 \cdot p$  Semipasso Posteriore [m]

$q=0.9$  Posizione Zavorra Anteriore [m]

$l=0.85$  Posizione Zavorra Posteriore [m]

$h=1$  Altezza Baricentro [m]

$f=1$  Altezza Gancio Posteriore [m]

Nello schema presentato vengono indicati con  $Fz_F$  e  $Fz_R$  i carichi agenti sulle singole ruote anteriori e posteriori, essi vengono ricavati dalle equazioni di equilibrio. Avendo due incognite, in quanto le forze verticali agenti sulle

ruote dello stesso asse risultano uguali tra loro, sono necessarie due equazioni, una di equilibrio alla traslazione verticale ed una di equilibrio alla rotazione rispetto al centro ruota posteriore.

$$Fz_F - m_B \cdot g - m \cdot g + Fz_R - m_P \cdot g = 0 \quad (1.13)$$

$$-F_g(f - rR) + m \cdot g \cdot e - Fz_F(e + d) + m_B \cdot g \cdot (e + d + q) - Fg \cdot rR - m_P \cdot g \cdot l = 0 \quad (1.14)$$

Avendo trovato due equazioni lineari in due incognite risulta facile esplicitare le forze verticali:

$$Fz_F = \frac{-F_g \cdot f + m_B \cdot g \cdot (e + d + q) + m \cdot g \cdot e - m_P \cdot g \cdot l}{2 \cdot p} \quad (1.15)$$

$$Fz_R = \frac{F_g \cdot f - m_B \cdot g \cdot q + m \cdot g \cdot d + m_P \cdot g \cdot (d + e + q)}{2 \cdot p} \quad (1.16)$$

Come si può notare nelle due espressioni l'unico termine che influenza il trasferimento di carico tra anteriore e posteriore durante una lavorazione è la forza al gancio. All'aumentare del suo valore si ha un trasferimento di carico verso il posteriore dipendente dall'altezza del punto di applicazione della forza. Avendo ricavato i carichi  $Fz_F$  e  $Fz_R$  ora si ha un modello di Wong-Reece applicabile ad ogni trattore.

### 1.3.6 Traction Efficiency e Vehicle Traction Ratio

Verificata la capacità del modello di fornire un valore di forza al gancio noti i parametri del terreno e slittamento, è possibile utilizzare questo valore per il calcolo della **Traction Efficiency** ( $\eta_{TE}$ ) e per tracciarne la relativa curva in funzione dello slittamento. L'efficienza di trazione è definita come il rapporto tra la potenza al gancio e la potenza disponibile alle ruote, cioè definisce quanto il trattore sia efficiente nel trasformare la potenza erogata in forza di tiro. L'efficienza è stata calcolata sia per il modello che per i dati rilevati in campo così da permettere un confronto tra i risultati ottenuti. Per il modello viene espressa come:

$$\eta_{TE_{mod}} = \frac{F_t \cdot v}{P_{eng} \cdot \eta_m} \quad (1.17)$$

In questa espressione compaiono i termini di Forza di Trazione  $F_t$  stimata dal modello di Wong-Reece, di velocità  $v$  misurata tramite GPS, di Potenza Motore  $P_{eng}$  e il Rendimento di Trasmissione  $\eta_m$ . Di seguito viene mostrata l'espressione della Traction Efficiency per i dati raccolti durante i test:

$$\eta_{TE_{test}} = \frac{F_g \cdot v}{P_{eng} \cdot \eta_m} \quad (1.18)$$

Rispetto all'equazione precedente l'unico termine differente è la forza al gancio, in questo caso viene misurata tramite cella di carico mentre nell'altra espressione è una stima fatta dal modello. Conoscendo l'andamento del rendimento in funzione dello slittamento risulta semplice far lavorare il trattore in prossimità del picco di efficienza massima essendo lo slittamento stesso un parametro regolabile con continuità sia dall'operatore a bordo macchina che dal veicolo stesso. Il trattore in esame dispone di una trasmissione di tipo CVT composta da una componente idrostatica con efficienza minore ed una meccanica dotata di un'efficienza più elevata, il maggior intervento di una componente piuttosto dell'altra fa sì che il rendimento di trasmissione vari. Esso è definito come:

$$\eta_m = \frac{P_r}{P_{eng}} \quad (1.19)$$

La potenza motore è ricavata dal prodotto tra coppia e velocità dell'albero motore mentre la potenza alle ruote è data dalla somma delle potenze di ognuna di esse espressa come il prodotto tra coppia erogata e velocità angolare.

$$P_r = \sum_{j=1}^4 \frac{2\pi \cdot n_j \cdot T_j}{60} \quad (1.20)$$

Di seguito viene rappresentato il grafico del rendimento di trasmissione in funzione della forza al gancio da cui si comprende come esso possa variare alle diverse condizioni di utilizzo;

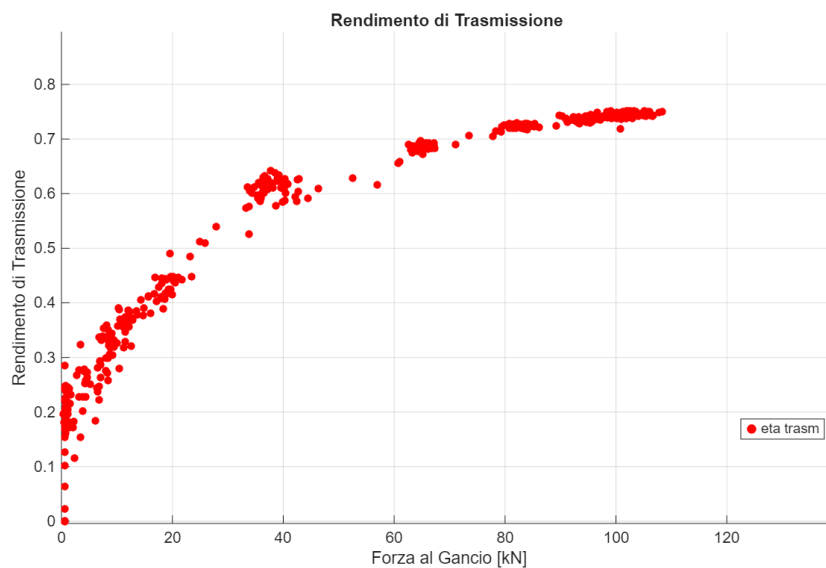


Figura 1.10: Rendimento di Trasmissione in funzione della Forza al Gancio

**Fonte:** Risultato dal modello Matlab

In campo ingegneristico si cerca spesso di eliminare la dipendenza della Traction Efficiency dallo slittamento e lo si fa introducendo la **Vehicle Traction Ratio** ( $VTR$ ), quest'ultimo termine viene definito come il rapporto tra la forza di tiro e il peso del trattore. Nello specifico non viene considerato il carico statico, definito come il prodotto tra massa del veicolo e gravità, ma il carico dinamico in cui oltre la componente statica viene considerata anche la componente verticale della forza di tiro. Nel caso di forza perfettamente orizzontale si ha un trasferimento di carico dall'asse anteriore a quello posteriore ma il carico verticale totale rimane invariato rispetto al caso statico. Durante i test eseguiti in campo è stata rilevata solo la componente orizzontale di forza al gancio perciò verrà mostrata sia la formulazione generale che la formulazione utilizzata durante lo studio del caso in esame:

$$VTR = \frac{F_g}{W_D} \quad (1.21)$$

Qui si ha l'espressione generalizzata in cui  $W_D$  rappresenta il carico dinamico mentre di seguito si ha la formula utilizzata per lo studio in cui si impiega la massa totale del veicolo compreso di zavorre  $m_{TOT}$ :

$$VTR = \frac{F_g}{m_{TOT} \cdot g} \quad (1.22)$$

Note la Traction Efficiency e la  $VTR$  è possibile realizzare la curva che le pone in relazione stabilendo per quale valore di  $VTR$  si ha il picco massimo

di rendimento, analizzando la formula 1.19 si nota che variando la zavorratura del trattore ci si può spostare lungo la curva per far sì che il trattore lavori nelle condizioni di massima efficienza possibile. Un'ulteriore curva utile al fine dello studio del comportamento del trattore è quella della **Potenza al Gancio** in funzione della VTR, essa è stata definita precedentemente come il prodotto tra forza al gancio e velocità del veicolo:

$$P_g = F_g \cdot v \quad (1.23)$$

### 1.3.7 Mappatura Parametri del Terreno

Fino a questo momento, essendo nota la tipologia di suolo su cui sono stati eseguiti i test, i parametri del terreno sono stati ricavati dai test e poi calibrati. Nel caso di lavorazione reale non è possibile conoscere le caratteristiche specifiche del terreno essendo fortemente influenzate dalle condizioni atmosferiche e dalle lavorazioni precedentemente eseguite. Per questo motivo, una volta validato il modello di Wong-Reece, lo si è impiegato per svolgere il problema inverso: data una finestra temporale rappresentante un determinato numero di campionamenti consecutivi in cui vengono rilevati forza al gancio e slittamento, il modello è in grado di fornire i parametri del terreno su cui sta avvenendo la lavorazione. I valori ricavati vengono utilizzati come input per il modello di Wong-Reece per generare le curve di Traction Efficiency e VTR che consentono di configurare il trattore nelle condizioni di massima efficienza per svolgere la lavorazione. Nel caso specifico i parametri da estrarre sono 4: Coesione Anteriore e Posteriore ed Angolo di Attrito Anteriore e Posteriore mentre gli altri parametri sono stati fissati per ridurre il peso delle operazioni. Sono stati selezionati l'angolo di attrito interno e la coesione come incognite da ricavare secondo la teoria presente nel testo di K. Iagnemma [5] in cui viene indicato come il modello di Wong-Reece sia poco sensibile alla variazione del coefficiente di deformazione a taglio, perciò esso viene fissato.

Per svolgere questa operazione sono state create due **Mappe 4D**, una per le ruote anteriori e una per quelle posteriori. Il nome deriva dal fatto che sono realizzate per coprire un ampio range per ognuno dei 4 parametri di input, slittamento, carico verticale, coesione e angolo di attrito. All'interno della mappa sono contenute tutte le possibili combinazioni di questi 4 parametri che permettono di calcolare la forza al gancio, avendo a disposizione la mappa pre-compilata si possono ottenere in pochi istanti i valori di coesione ed an-

golo di attrito tramite lo slittamento e i carichi verticali sulle ruote (ricavati tramite la forza al gancio) misurati all'interno della finestra temporale.

```

% Griglia della Mappa
vec_i   = 0:0.05:0.6; % Slittamento
vec_W   = 1:5:65;     % Carico Verticale
vec_c   = 1:5:110;   % Coesione
vec_phi = 1:1:45;    % Angolo di Attrito
    
```

Figura 1.11: I 4 Parametri della Mappa

L'ottimizzatore cerca i parametri del terreno che minimizzano la differenza tra la forza al gancio calcolata e quella misurata utilizzando come metrica l'errore quadratico medio (*RMSE*).

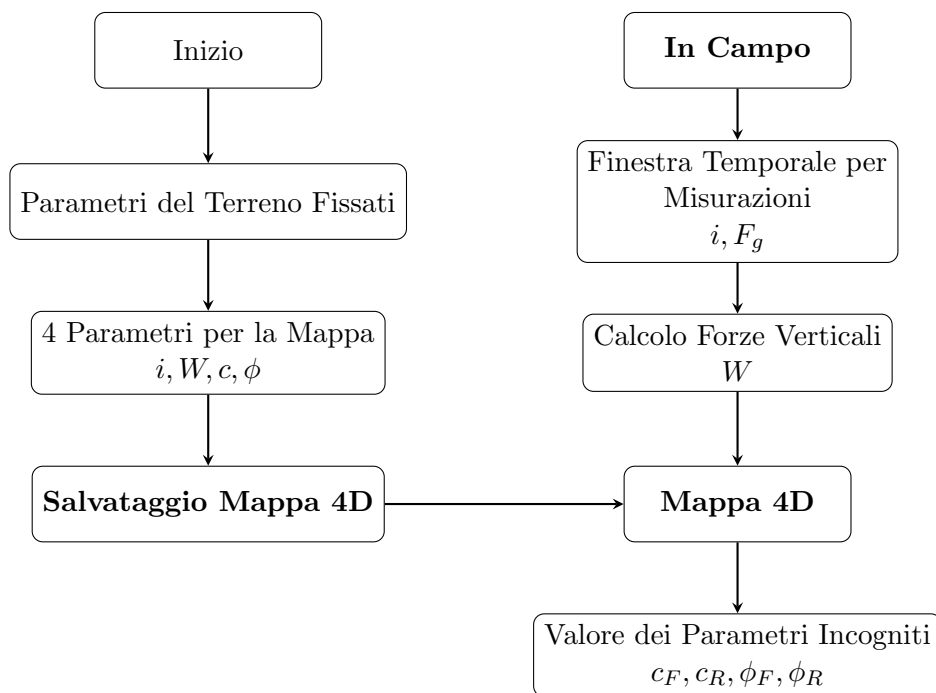


Figura 1.12: Algoritmo Mappatura del Terreno

Questo algoritmo rappresenta come vengono estratti i parametri del terreno seguendo i vari step, una volta a conoscenza di questi valori è possibile procedere con la realizzazione delle curve di rendimento.

# Capitolo 2

## Risultati

In questo capitolo vengono mostrati i risultati ricavati dai modelli realizzati e, quando possibile, vengono messi a confronto con i valori ricavati sul campo per fornire un raffronto che confermi il buon funzionamento dei modelli sviluppati.

### 2.1 Modello Ruota di Wong-Reece

#### 2.1.1 Modello a Singola Ruota

Come descritto precedentemente questo modello necessita in ingresso sia di parametri del terreno che di parametri del veicolo quali slittamento e carichi verticali. Per la singola ruota si hanno a disposizione la forza verticale misurata istante per istante nella fase di test, questo permette di realizzare la curva completa di trazione della ruota. Il primo approccio è stato eseguito con i valori dei parametri del terreno ricavati dalla letteratura ma che hanno comunque permesso di verificare la risposta del modello.

Parametro	Simbolo	Valore Anteriore	Valore Posteriore	Unità di Misura
Esponente di Affondamento	$n$	0,99	0,99	
Modulo di Coesione	$k_1$	3,25	6,5	$kPa$
Modulo d'Attrito	$k_2$	1800	5000	$kPa/m$
Parametro di Wong-Reece	$c_1$	0,4	0,4	
Parametro di Wong-Reece	$c_2$	0,15	0,15	
Coesione	$c$	32	38	kPa
Angolo di Attrito	$\phi$	32	38	°
Modulo di Deformazione	$K$	0.012	0.010	$m$

Tabella 2.1: Parametri del Terreno ricavati dalla Letteratura

Avendo a disposizione i dati necessari sono state realizzate le curve di trazione per la singola ruota anteriore e sono state sovrapposte alle curve ricavate durante il test in campo. Il primo grafico raffigura l'andamento della forza al gancio in funzione del tempo:

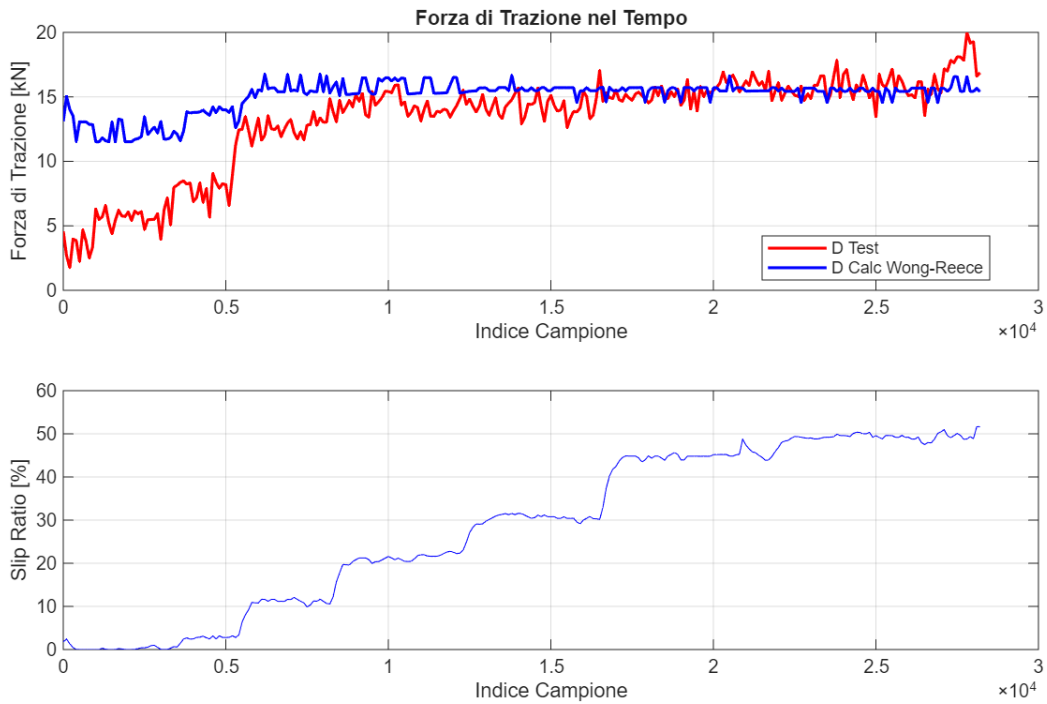


Figura 2.1: Andamento forza di trazione durante il test

Analizzando il grafico in alto si nota come sia presente una certa differenza tra la forza calcolata e quella misurata nella prima fase della prova di tiro, in particolare si può vedere che ciò avviene in corrispondenza di valori di slittamento pressochè nulli. Oltre il 20% di slittamento la forza calcolata non si discosta di molto da quella misurata, questo fenomeno si verifica per tutte e 5 le prove eseguite. Per verificare questo fenomeno si studia il grafico che pone in relazione forza di trazione e slittamento:

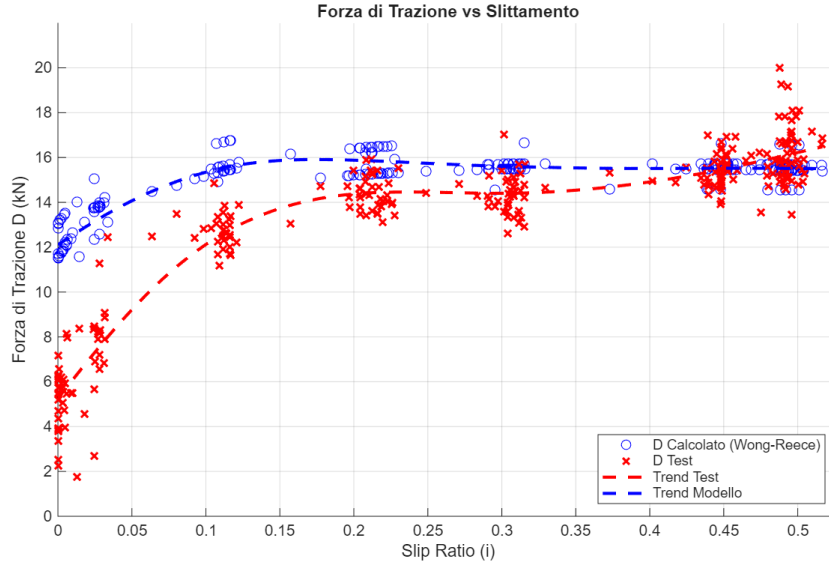


Figura 2.2: Forza di trazione in funzione dello Slittamento

Il grafico mostrato in Figura 2.2 conferma che il modello sovrastima la forza di trazione per valori di slittamento inferiori al 20%, in seguito verrà studiato il fenomeno per capire la causa e la strada da seguire per risolverlo. Per valutare l'entità dell'errore commesso dal modello sono stati utilizzati l'Errore Medio Assoluto ( $MAE$ ) e l'Errore Medio Percentuale ( $MAPE$ ), inoltre è stato graficato l'errore percentuale in funzione dello slittamento per fornire un valore numerico al fenomeno individuato precedentemente.

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^n |D_{\text{calc},j} - D_{\text{test},j}|}{n} \quad (2.1)$$

Il  $MAE$  viene calcolato come la media dei singoli errori calcolati in ogni punto ed è espresso in  $kN$  mentre il  $MAPE$  è la media dei singoli errori ma questa volta espressi in percentuale.

$$MAPE = \sum_{j=1}^n \frac{|D_{\text{calc},j} - D_{\text{test},j}|}{D_{\text{test},j}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Di seguito è mostrato l'andamento dell'errore percentuale in funzione dello slittamento, si nota come per slittamenti elevati l'errore si aggiri attorno al 10-15% mentre per slittamenti inferiori si abbiano errori molto elevati.

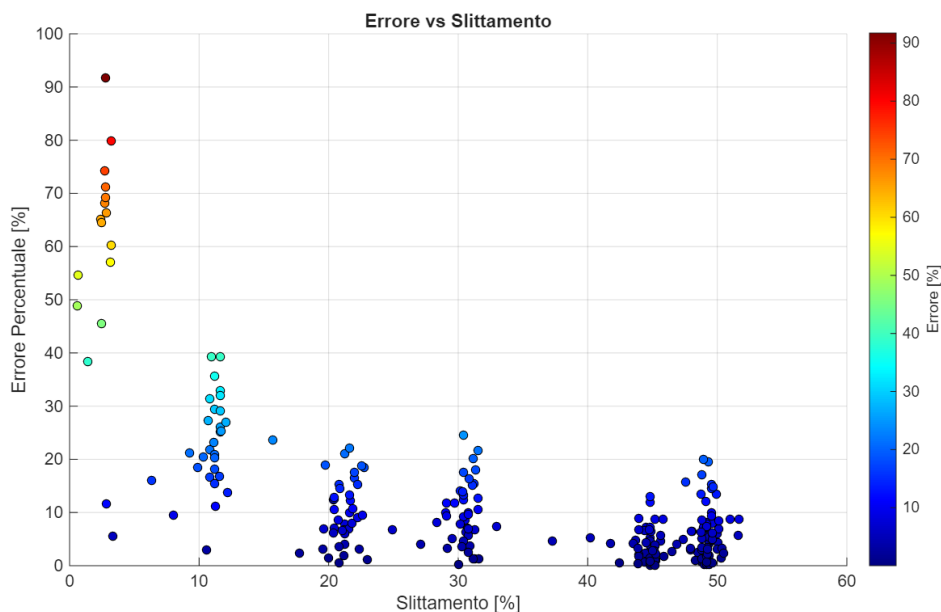


Figura 2.3: Errore in funzione dello Slittamento

La prova è stata eseguita per tutti e 5 i test sia sulla ruota anteriore che quella posteriore in modo da realizzare una tabella che riassume gli errori medi di ogni prova, successivamente verranno confrontati con i risultati ottenuti dopo aver migliorato il modello.

	<b>Anteriore</b>		<b>Posteriore</b>	
<b>Prova</b>	<b>MAE [kN]</b>	<b>MAPE [%]</b>	<b>MAE [kN]</b>	<b>MAPE [%]</b>
Test 1	1,540	12,53	5,549	18,15
Test 2	2,297	22,38	4,116	18,01
Test 3	2,039	17,54	4,129	20,16
Test 4	2,430	24,68	5,397	23,10
Test 5	2,313	19,11	4,954	18,43
Media	2,124	19,25	4,823	19,57

Tabella 2.2: Errori Medi per i singoli test

Dalla tabella si denota un errore medio percentuale che si attesta attorno al 19% sia per le ruote anteriori che per quelle posteriori, un valore troppo elevato per validare il modello utilizzato.

## 2.1.2 Calibrazione Modello per Ruota Anteriore

Nel capitolo precedente è stato descritto il metodo utilizzato per la calibrazione dei parametri del terreno, nello specifico sono stati calibrati l'Angolo di Attrito, la Coesione e la Resistenza al Taglio evidenziati nella tabella seguente da colonne in grassetto. Eseguendo il processo per ognuno dei 5 test si sono ottenuti altrettanti valori per ogni parametro, eseguendo la media si è ricavato il valore finale utilizzato all'interno del modello ruota.

<b>Anteriore</b>	$c_1$	$c_2$	$\phi$	$c$	$k_1$	$k_2$	$n$	$K$
<b>Valori Iniziali</b>	0.4	0.15	<b>32</b>	<b>32</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.012</b>
Test 1	0.4	0.15	<b>27</b>	<b>49.83</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.0295</b>
Test 2	0.4	0.15	<b>27</b>	<b>48.89</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.0299</b>
Test 3	0.4	0.15	<b>27</b>	<b>43.54</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.0289</b>
Test 4	0.4	0.15	<b>27</b>	<b>53.45</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.0321</b>
Test 5	0.4	0.15	<b>27</b>	<b>43.29</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.0263</b>
Media	0.4	0.15	<b>27</b>	<b>47.82</b>	3.25	1800	0.99	<b>0.0293</b>
<b>Valori Finali</b>	<b>0.4</b>	<b>0.15</b>	<b>27</b>	<b>48</b>	<b>3.25</b>	<b>1800</b>	<b>0.99</b>	<b>0.0293</b>

Tabella 2.3: Parametri del Terreno Calibrati

Di seguito vengono mostrati la forza di trazione calcolata dal modello usando i parametri del terreno calibrati:

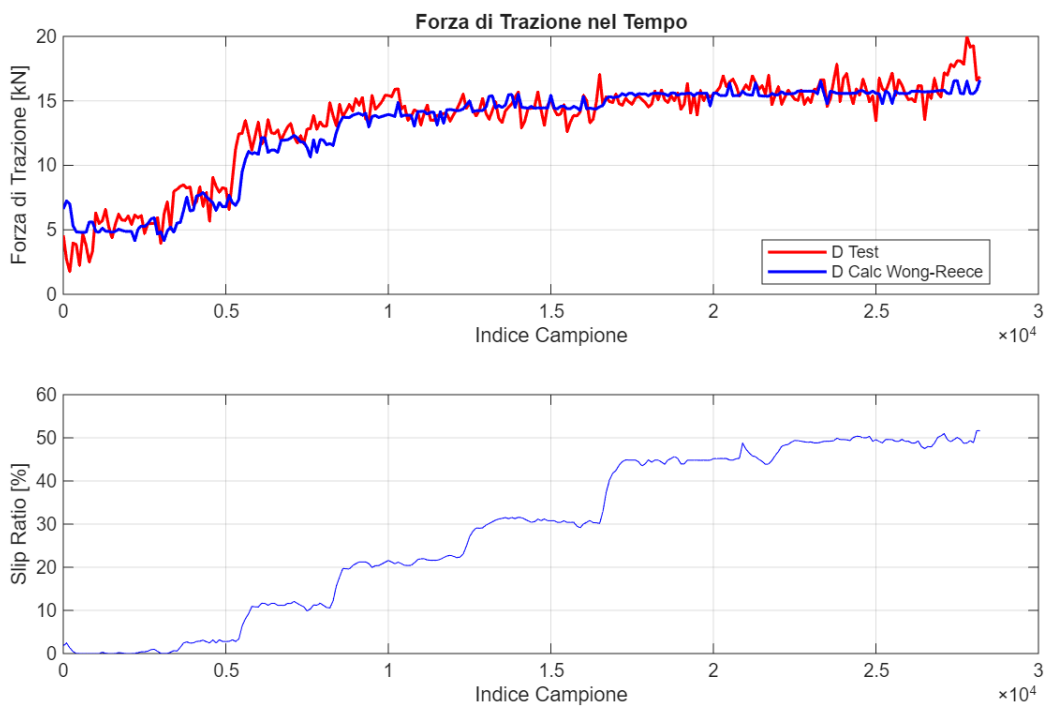


Figura 2.4: Andamento forza di trazione durante il test

Il grafico ora rappresenta un andamento della forza calcolata molto coerente a quello della forza misurata durante tutta la prova di tiro, ciò è confermato dal grafico che pone in relazione forza di trazione e slittamento mostrato in Fig. 2.5:

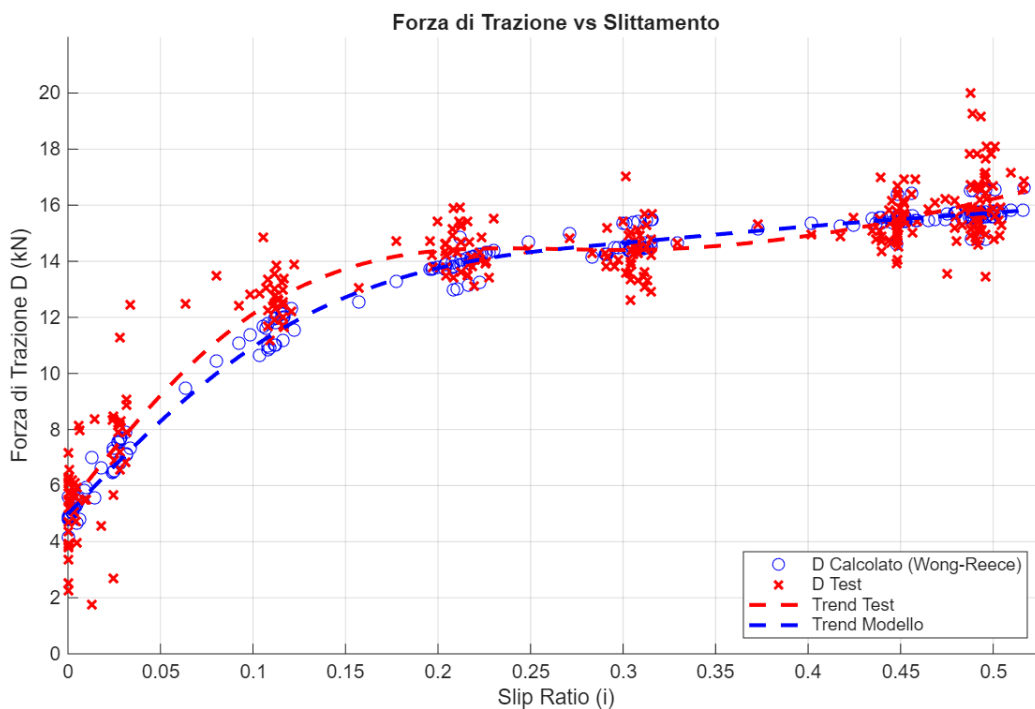


Figura 2.5: Forza di trazione in funzione dello slittamento

La forza rilevata durante le prove presenta una certa variabilità per ogni valore di slittamento creando nuvole di punti mentre la forza calcolata dal modello si pone esattamente all'interno di questa nuvola rispecchiando un risposta del modello piuttosto realistica. Precedentemente alla calibrazione si potevano notare errori medi percentuali attorno al 20% con picchi molto più elevati per piccoli valori di slittamento, di seguito viene mostrato il grafico rappresentante l'errore percentuale in cui si può notare come esso sia diminuito.

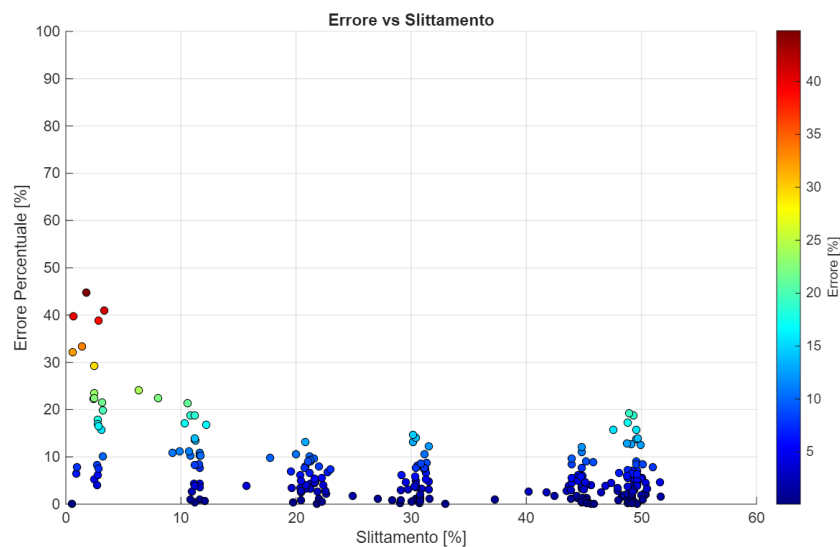


Figura 2.6: Errore in funzione dello Slittamento

In questo grafico si nota come la distribuzione dei punti rappresentanti l'errore si sia spostata verso valori più bassi, in particolare la maggior parte dei punti si trova all'interno del 10%. Per dimostrare la coerenza tra i dati misurati e quelli calcolati si utilizza il *Coefficiente di Determinazione* ( $R^2$ ), esso rappresenta quanto il modello sia in grado di replicare la realtà anche al variare di alcune condizioni come carico verticale e slittamento. La condizione ideale è data da  $R^2 = 1$ , più questo valore si scosta dal valore unitario meno il modello è preciso, nel grafico successivo definito *Parity Plot* questa condizione è rappresentata dalla bisettrice in cui forza misurata e forza calcolata coincidono. Si cerca di ricavare un grafico in cui i punti rilevati siano più vicini possibile alla bisettrice come mostrato in Figura 2.7:

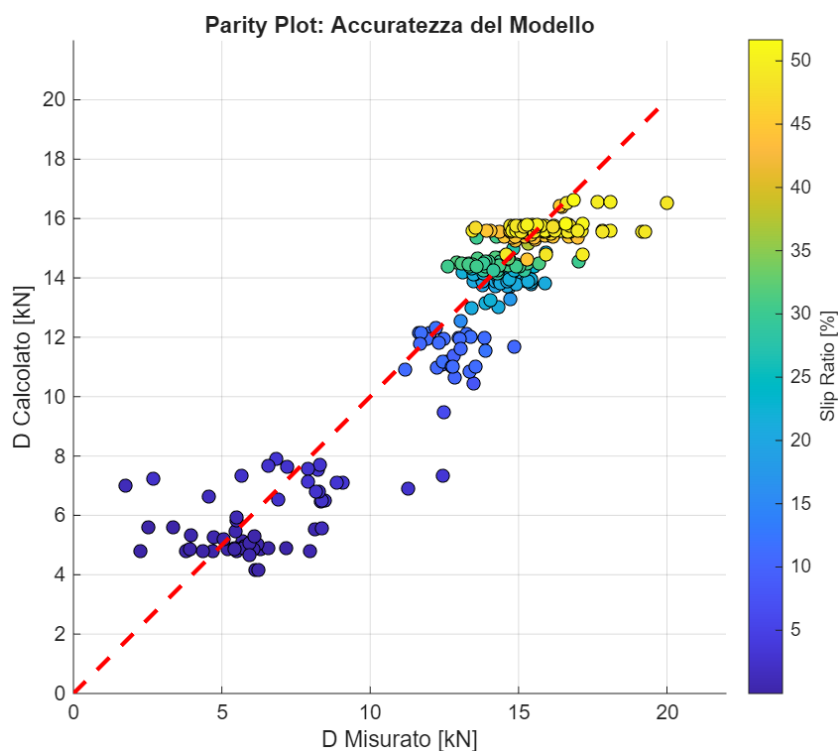


Figura 2.7: Parity Plot

Ricavati i valori di Errori Medi ed  $R^2$  per ogni singolo test essi a seguito della calibrazione essi vengono confrontati con i valori misurati precedentemente, questo raffronto viene mostrato nella tabella 2.4 posta di seguito:

Prova	Pre Calibrazione		Post Calibrazione		
	MAE [kN]	MAPE [%]	MAE [kN]	MAPE [%]	$R^2$
Test 1	1,540	12,53	0,907	6,96	0,7736
Test 2	2,297	22,38	1,041	9,77	0,8166
Test 3	2,039	17,54	1,509	11,32	0,6513
Test 4	2,430	24,68	1,125	11,78	0,7582
Test 5	2,313	19,11	1,423	11,59	0,7150
Media	2,124	19,25	<b>1,201</b>	<b>10,28</b>	<b>0,7429</b>

Tabella 2.4: Errori Medi per i singoli test

A seguito della calibrazione si ha un errore medio quasi dimezzato rispetto alla verifica precedente, questo dimostra che i parametri del terreno

ora rappresentano opportunamente le condizioni del terreno stesso trovate durante le prove sul campo.

### 2.1.3 Calibrazione Modello per Ruota Posteriore

Per le ruote posteriori è stato eseguito lo stesso processo di calibrazione realizzato per le ruote anteriori, la necessità di eseguire una calibrazione dedicata è dovuta alla presenza del Multipass Effect. La calibrazione fornisce parametri che denotano un terreno più compatto rispetto a quelle anteriori, di seguito si ha la tabella che riassume i valori ricavati. I valori ricavati sono

<b>Posteriore</b>	$c_1$	$c_2$	$\phi$	$c$	$k_1$	$k_2$	$n$	$K$
<b>Valori Iniziali</b>	0.4	0.15	<b>38</b>	<b>38</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.010</b>
Test 1	0.4	0.15	<b>33</b>	<b>95.47</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.0318</b>
Test 2	0.4	0.15	<b>35.99</b>	<b>79.91</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.0321</b>
Test 3	0.4	0.15	<b>40</b>	<b>63.09</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.0347</b>
Test 4	0.4	0.15	<b>40</b>	<b>68.88</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.0333</b>
Test 5	0.4	0.15	<b>40</b>	<b>65.31</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.0302</b>
Media	0.4	0.15	<b>37.8</b>	<b>74.53</b>	6.5	5000	0.99	<b>0.0324</b>
<b>Valori Finali</b>	<b>0.4</b>	<b>0.15</b>	<b>37.8</b>	<b>76</b>	<b>6.5</b>	<b>3600</b>	<b>0.99</b>	<b>0.038</b>

Tabella 2.5: Parametri del Terreno Calibrati

stati inseriti all'interno del modello per verificarne la risposta, i grafici non vengono riportati in quanto del tutto simili a quelle realizzati per le ruote anteriori. Si riporta la tabella rappresentante gli Errori Medi pre e post calibrazione:

<b>Prova</b>	<b>Pre Calibrazione</b>		<b>Post Calibrazione</b>		
	<b>MAE [kN]</b>	<b>MAPE [%]</b>	<b>MAE [kN]</b>	<b>MAPE [%]</b>	$R^2$
Test 1	5,549	18,15	2,434	9,09	0,8986
Test 2	4,116	18,01	2,058	10,48	0,9288
Test 3	4,129	20,16	2,265	10,46	0,9234
Test 4	5,397	23,10	2,808	12,66	0,8832
Test 5	4,954	18,43	2,845	11,09	0,8931
Media	4,823	19,57	<b>2,482</b>	<b>10,76</b>	<b>0,9054</b>

Tabella 2.6: Errori Medi per i singoli test

### 2.1.4 Modello a 4 Ruote

Ottenuti i parametri del terreno dalla calibrazione per entrambi gli assi si è potuto verificare il comportamento del modello di Wong-Reece per l'intero veicolo, in questo caso verrà analizzata la trazione totale per essere comparata con la forza al gancio misurata durante i test. Il primo grafico rappresenta l'andamento della forza di trazione durante la prova di tiro:

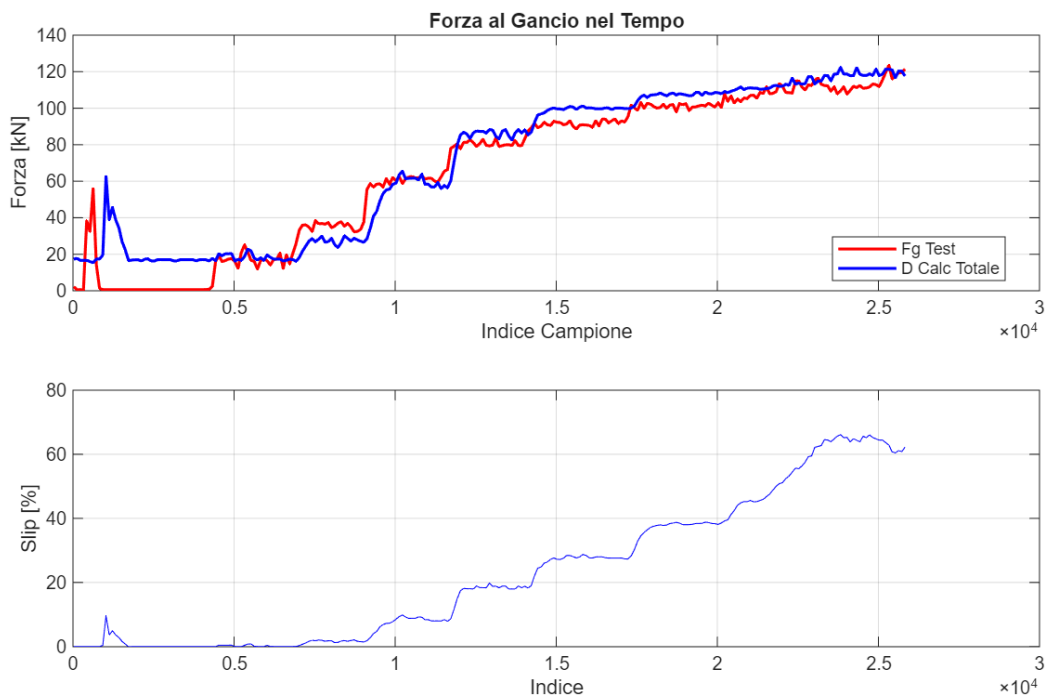


Figura 2.8: Forza al Gancio e Slittamento durante la prova di tiro

Il grafico evidenzia un comportamento della forza calcolata simile a quello della forza al gancio misurata, l'unica zona in cui le due curve si discostano corrisponde al periodo in cui lo slittamento è nullo perciò occorre analizzare il motivo di questo problema.

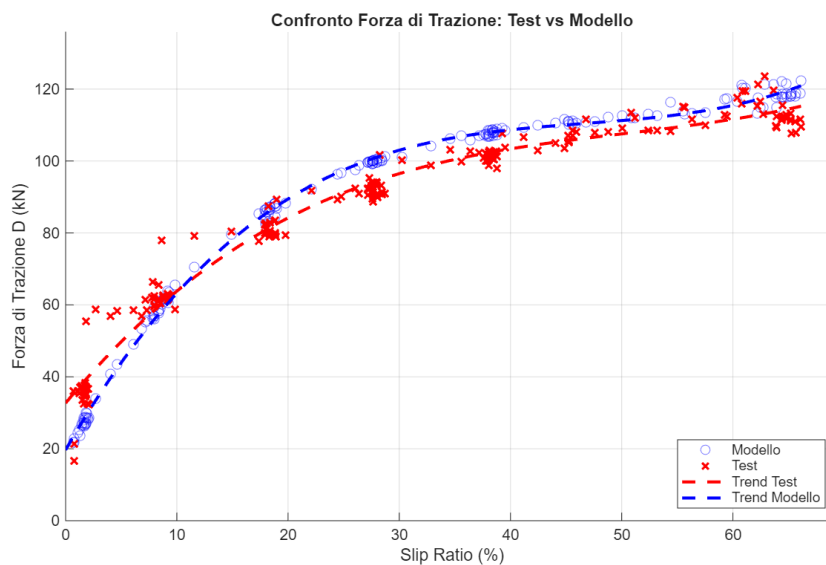


Figura 2.9: Forza al Gancio vs Slittamento

La Fig. 2.9 dimostra come il modello sia in grado di replicare il comportamento del trattore per l'intero range di slittamento in cui il veicolo viene utilizzato, questo conferma il risultato mostrato dalle singole ruote anteriori e posteriori. Nel grafico sottostante si evidenzia come per slittamenti inferiori al 10% si abbia un leggera discrepanza tra forza calcolata e misurata mentre per valori di slittamento più elevati l'errore percentuale risulti inferiore.

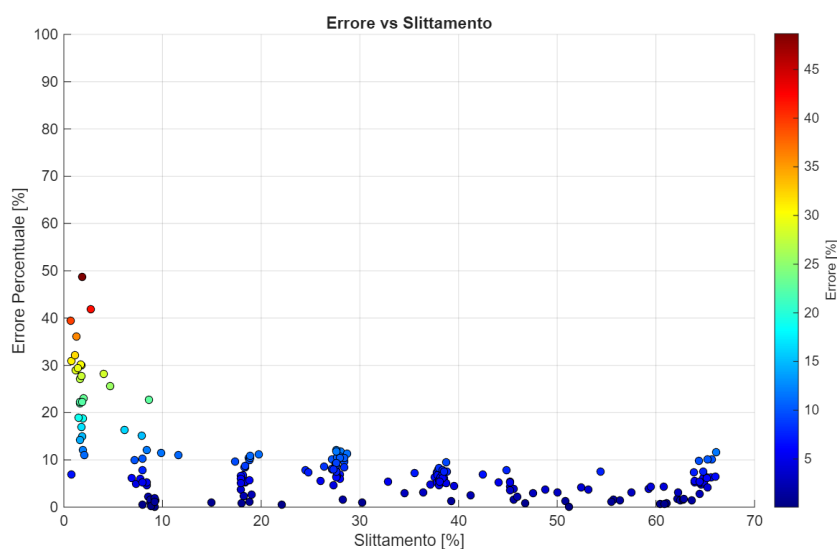


Figura 2.10: Errore percentuale vs Slittamento

Di seguito si illustra la tabella composta dagli errori commessi dal modello per ogni test e dalla media finale che fornisce un'indicazione delle prestazioni del modello di Wong-Reece per l'intero trattore.

Prova	MAE [kN]	MAPE [%]	$R^2$
Test 1	9,231	11,37	0,7609
Test 2	7,103	11,20	0,9044
Test 3	7,700	10,92	0,8693
Test 4	6,451	10,42	0,8808
Test 5	6,342	9,02	0,8916
Media	<b>7,366</b>	<b>10,59</b>	<b>0,8468</b>

Tabella 2.7: Errori Medi per i singoli test

Inoltre viene raffigurato il Parity Plot per l'intero trattore in cui si nota come i punti si trovino in prossimità della bisettrice, il che sta a sottolineare la capacità del modello di fornire un valore di forza piuttosto simile a quello misurato.

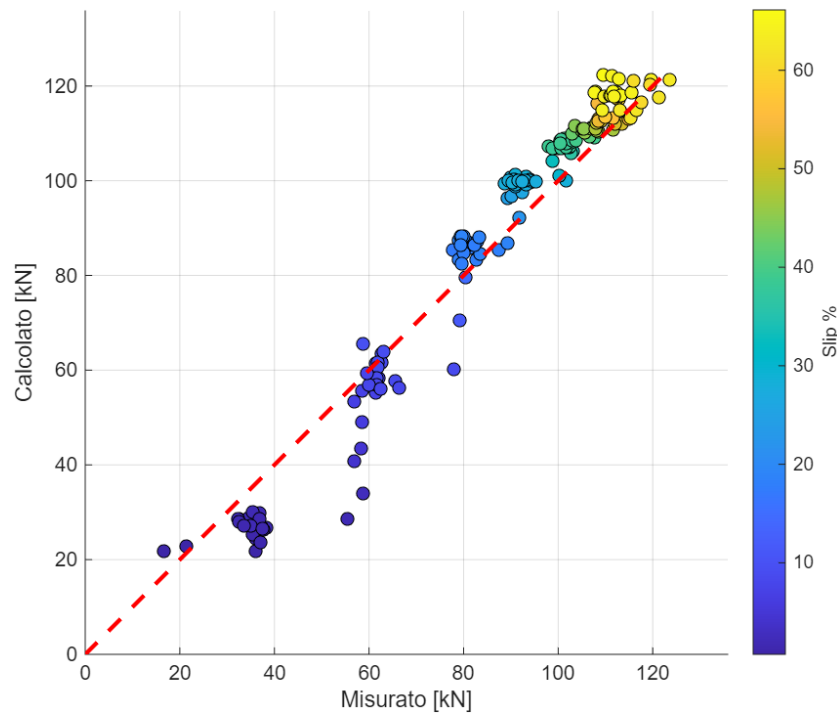


Figura 2.11: Parity Plot per l'intero trattore

### 2.1.5 Validazione del Modello

Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva in cui sono presenti gli errori medi percentuali ed assoluti e il coefficiente di determinazione per i singoli assi e per l'intero veicolo.

	MAE [kN]	MAPE [%]	$R^2$
<b>Ruota Anteriore</b>	1,20	10,28	0,74
<b>Ruota Posteriore</b>	2,48	10,76	0,90
<b>Intero Trattore</b>	7,36	10,59	0,85

Tabella 2.8: Errori medi per i singoli modelli

Analizzando i risultati si nota come tutti e 3 i modelli presentino un errore medio percentuale attorno al 10% ed un  $R^2$  per il modello completo pari a 0,85 perciò i modelli possono considerarsi validati ed utilizzabili per il calcolo del rendimento di trazione in tempo reale.

## 2.2 Calcolo della trazione senza i WFT

Nel capitolo precedente è stato descritto come vengono calcolate le forze verticali agenti sui mozzi ruota senza aver a disposizione la misura della forza effettuata localmente, ora invece vengono mostrati i grafici in cui si compara la forza al gancio calcolata partendo dalle forze verticali note e quella calcolata utilizzando le forze verticali stimate tramite la dinamica del trattore.

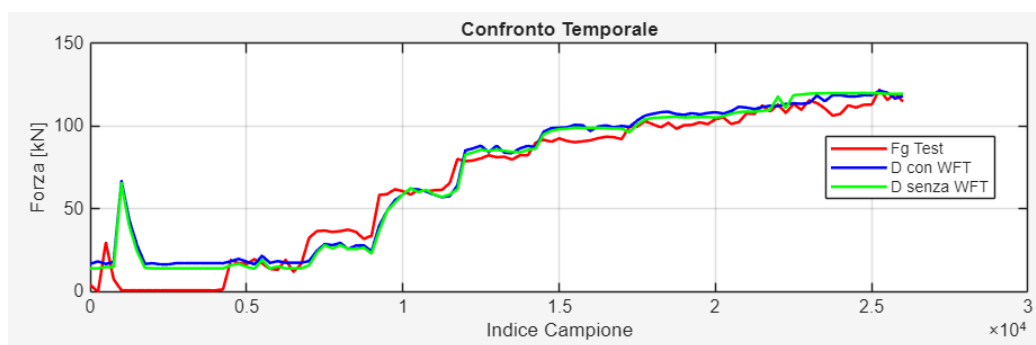


Figura 2.12: Forza di trazione ricavata con e senza WFT

Dalla Figura 2.12 si nota come le curve blu (trazione calcolata con i WFT) e verde (trazione calcolata senza WFT) coincidano durante tutta la prova

perciò si ha la conferma che i carichi verticali agenti sugli assi siano coerenti con quelli misurati ed anche il trasferimento di carico da assale anteriore a posteriore sia ben rappresentato.

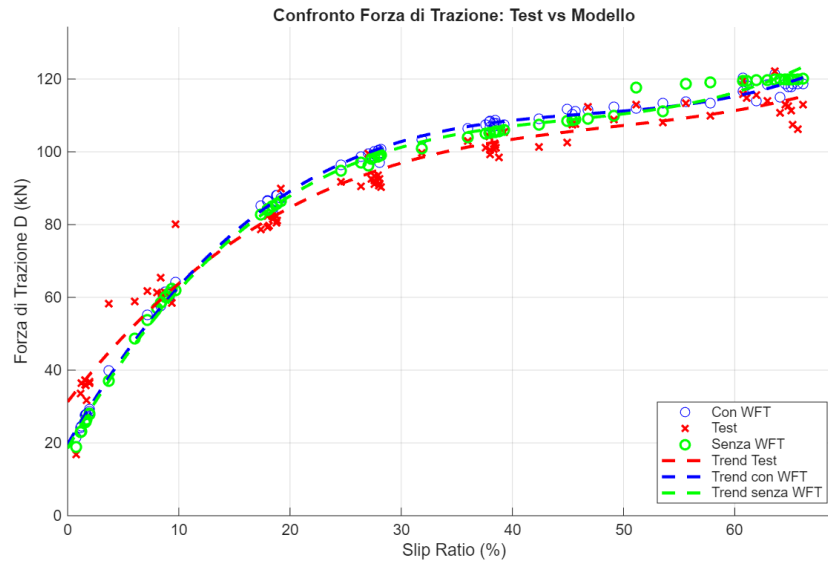


Figura 2.13: Forza di Trazione vs Slittamento

Anche graficando la curva di trazione rispetto allo slittamento si verifica come la risposta del modello sia pressochè identica sia con i carichi verticali misurati che con quelli calcolati. Questa conferma permette di rimuovere definitivamente dai dati in input il segnale dei sensori posizionati sui mozzi ruota rendendo il modello applicabile ai diversi trattori sul mercato, d'ora in poi tutti i calcoli verranno effettuati senza questi valori noti.

## 2.3 Curve di Rendimento e Potenza

### 2.3.1 Traction Efficiency

Dopo avere realizzato le curve di trazione per l'intero veicolo ed averle confrontate con quelle realizzate sperimentalmente e dopo aver verificato che il modello fornisca la stessa forza al gancio anche a seguito della rimozione dei WFT dagli input, sono state realizzate le curve di rendimento caratteristiche del veicolo. La Traction Efficiency è stata definita come il rapporto tra la potenza al gancio e quella alle ruote, il primo grafico rappresenta la curva della TE in funzione dello slittamento e fornisce una prima indicazione di dove si trovi il picco massimo.

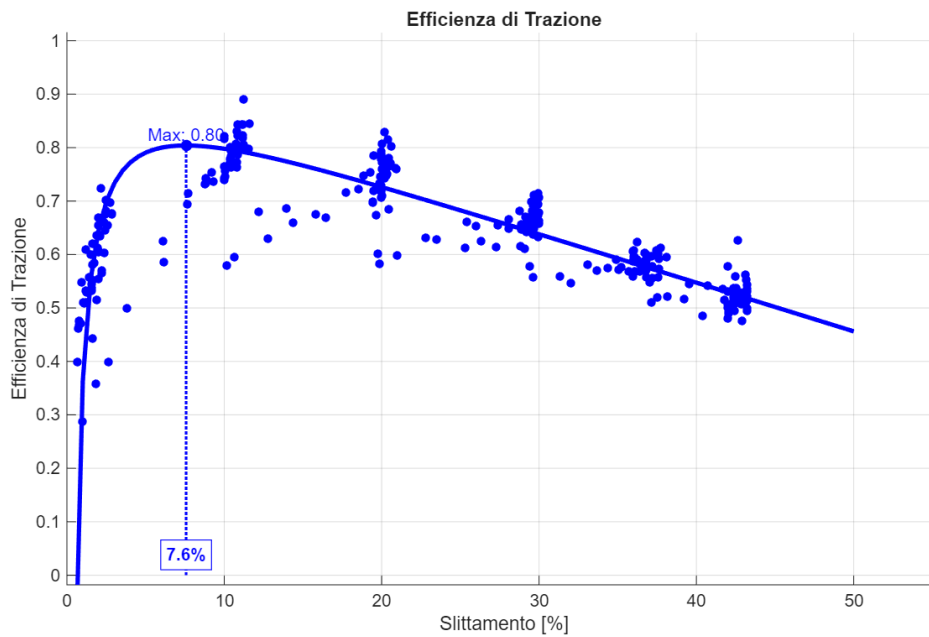


Figura 2.14: Traction Efficiency vs Slittamento

Per tracciare la curva è stata utilizzata una legge di interpolazione esponenziale funzione dello slittamento presente all'interno del testo di Bashford e Von Bargaen [4], la TE segue la legge:

$$TE = (1 - s) \left( 1 - \frac{D}{1 - e^{E \cdot s}} \right) \quad (2.3)$$

Analizzando la curva del caso in esame si nota come il picco del rendimento coincida con valori di slittamento attorno all'8%, questa curva presenta una pendenza molto elevata per slittamenti bassi mentre decede più lentamente per slittamenti superiori al 10%. Ora si sovrappongono le 5 curve rappresentanti i relativi test da cui si ricava la curva media della TE in funzione dello slittamento:

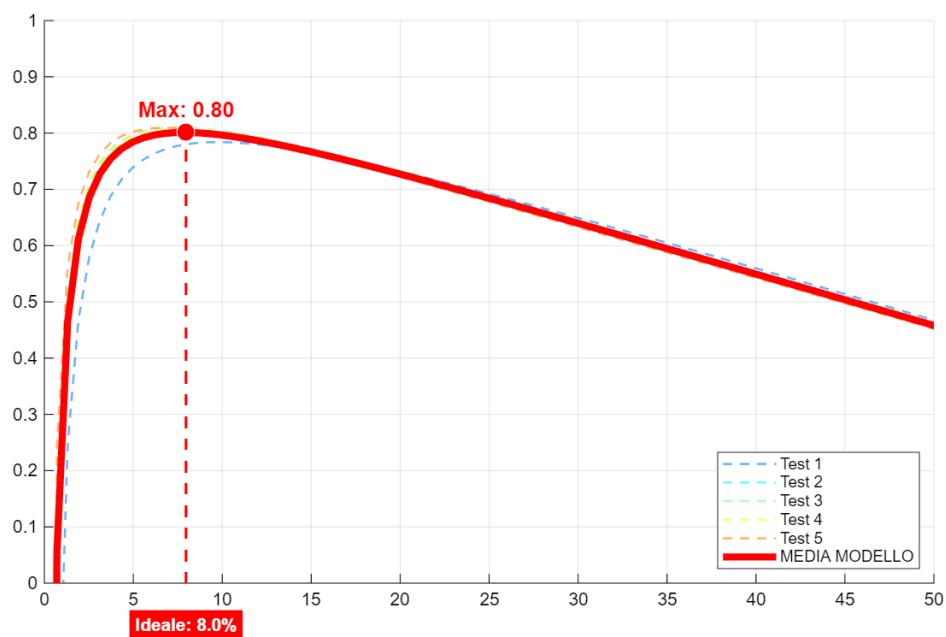


Figura 2.15: Curva media Traction Efficiency vs Slittamento

La curva media mostra come la Traction Efficiency presenti un picco massimo pari a 0,80 in corrispondenza di uno slittamento pari all'8%. Le curve delle singole prove presentano un andamento simile tra loro dimostrando coerenza tra i diversi risultati ottenuti.

Nel grafico seguente viene mostrato il confronto tra la curva di TE ricavata in campo e la curva di TE prodotta dal modello, la prima utilizza la forza al gancio misurata mentre la seconda utilizza la forza di trazione stimata.

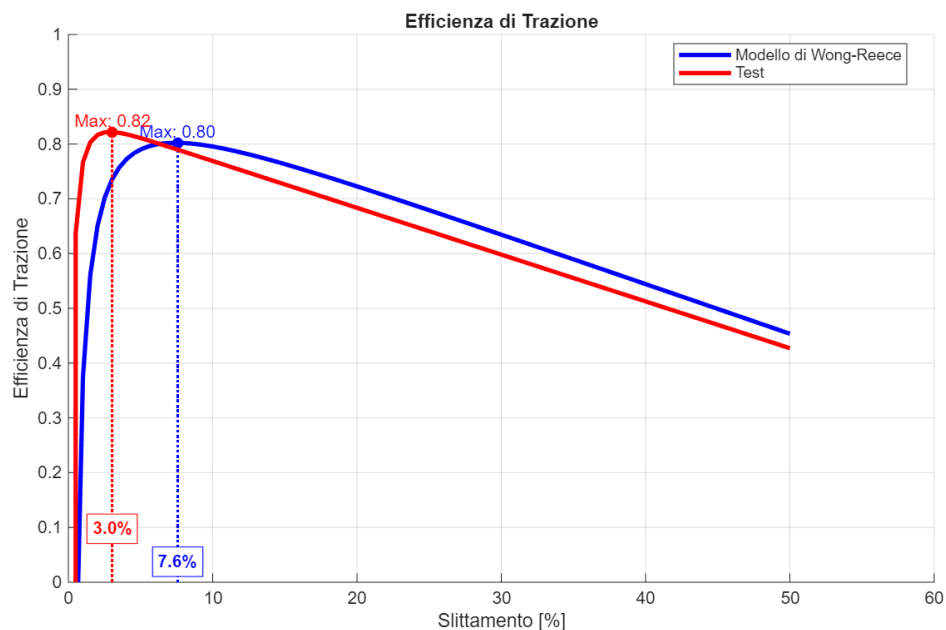


Figura 2.16: Confronto Traction Efficiency vs Slittamento

Entrambe le curve presentano un picco massimo attorno a 0,80 ma la differenza principale la si ha nel valore di slittamento in cui viene raggiunta la massima efficienza di trazione. Nel test svolto in campo si è raggiunto il picco di efficienza in corrispondenza di uno slittamento del 3% mentre la predizione del modello indica il punto di massima efficienza per uno slittamento pari al 7,6%. Tutti e 5 i test svolti hanno fornito lo stesso risultato, cioè che il modello posiziona il picco di massima efficienza ad uno slittamento maggiore rispetto al caso rilevato sul campo.

### 2.3.2 Vehicle Traction Ratio

La VTR è stata definita come il rapporto tra la capacità di tiro del trattore e il suo peso, questo parametro è molto utile come indicazione della necessità o meno di zavorrare il veicolo per migliorarne le prestazioni. Si esprime la VTR in funzione dello slittamento:

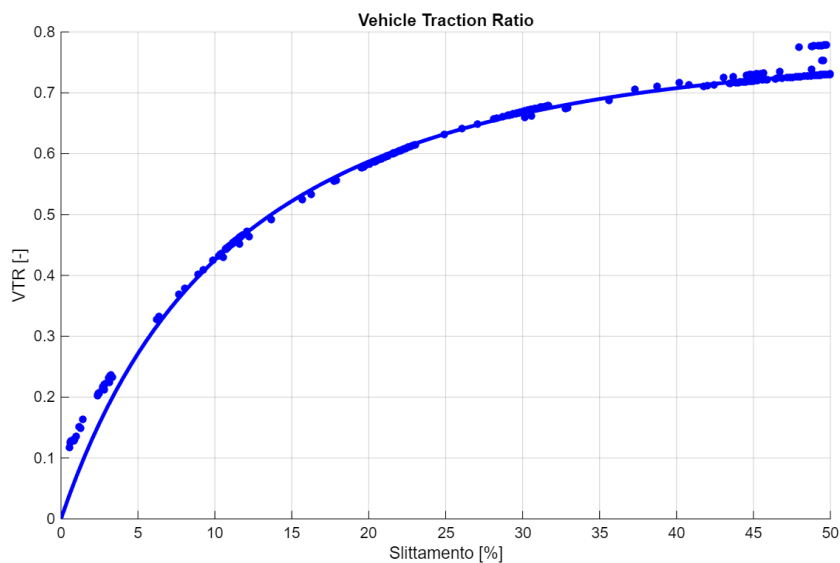


Figura 2.17: Vehicle Traction Ratio vs Slittamento

Dal grafico si denota come la VTR sia una funzione strettamente crescente, essa verrà utilizzata come parametro di riferimento per i grafici della Traction Efficiency e della Potenza al Gancio. Di seguito vengono graficate la VTR stimata dal modello e quella misurata durante i test, dal confronto si nota una crescita più rapida per bassi valori di slittamento della VTR misurata.

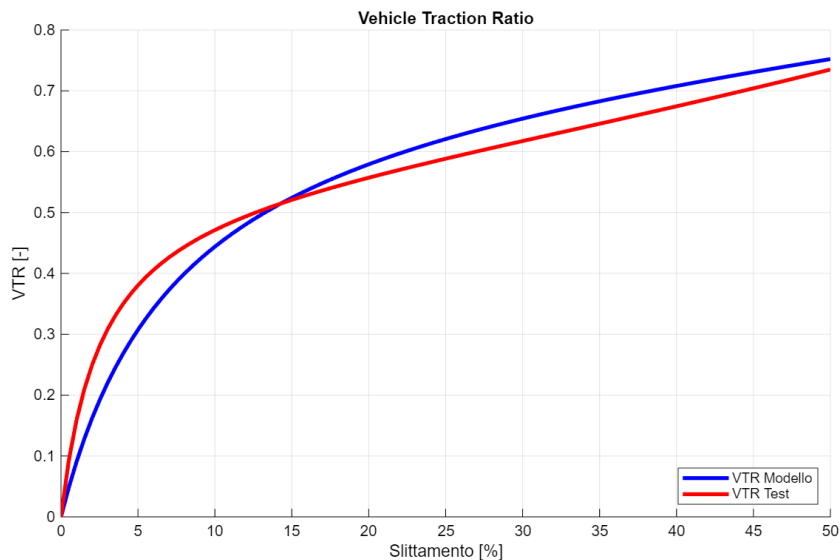


Figura 2.18: Confronto Vehicle Traction Ratio del Modello e del Test

### 2.3.3 Traction Efficiency vs Vehicle Traction Ratio

Dopo aver realizzato le curve di Traction Efficiency e Vehicle Traction Ratio in funzione dello slittamento viene introdotto il grafico che pone in relazione la TE con la VTR, questo grafico risulta utile per definire la configurazione di zavorramento ideale. L'interpolazione è stata fatta utilizzando la legge quadratica  $fit = ax^2 + bx$  che descrive accuratamente la curva della Traction Efficiency.

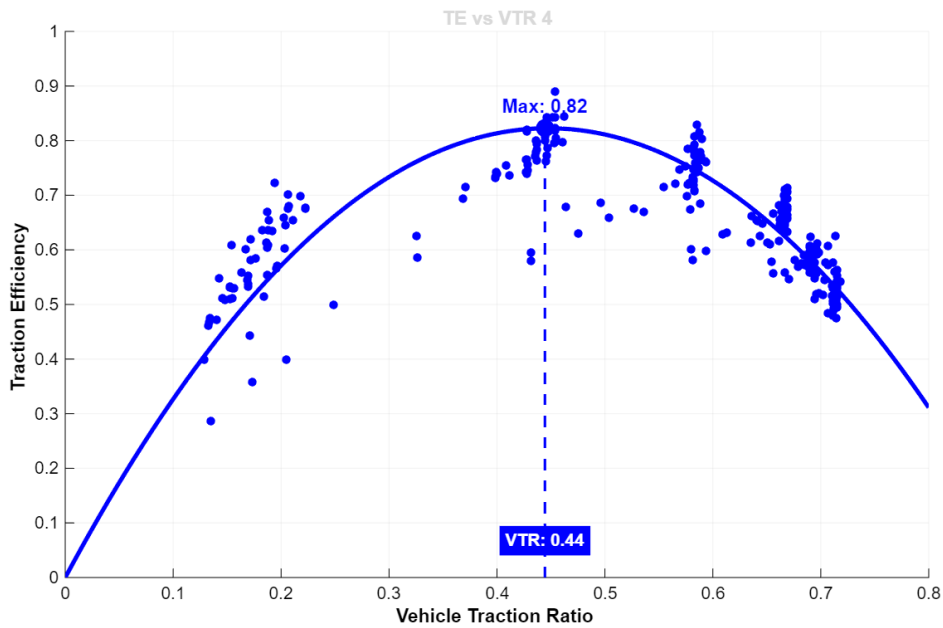


Figura 2.19: Traction Efficiency vs Vehicle Traction Ratio

La curva presenta un picco massimo pari 0,82 in corrispondenza di una VTR di 0,44 perciò si ha la massima efficienza di trazione quando la forza di tiro è leggermente inferiore alla metà del peso del trattore.

### 2.3.4 Potenza al Gancio vs Vehicle Traction Ratio

Definita la potenza al gancio come il prodotto tra forza al gancio e velocità, la si rappresenta in funzione della VTR al fine di stabilire la zavoratura in grado di massimizzare la potenza. Analizzando il grafico si nota un andamento lineare della potenza fino ad una VTR di 0,4 mentre per valori successivi la pendenza va a diminuire fino a raggiungere il picco di potenza massima in corrispondenza di una VTR pari a 0,58.

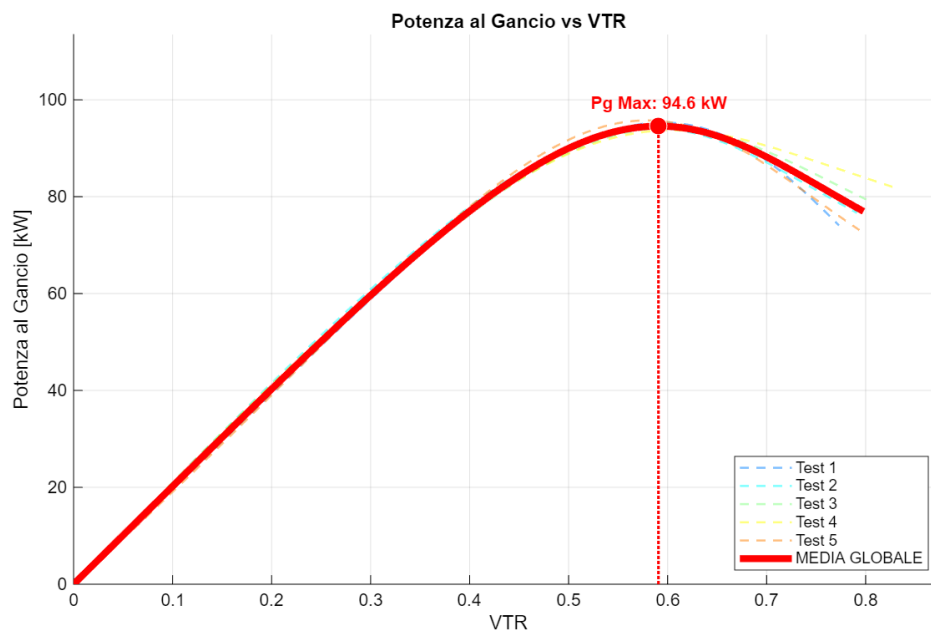


Figura 2.20: Potenza al Gancio vs Vehicle Traction Ratio

La massima potenza al gancio si attesta attorno a 95 kW a fronte dei 230 kW massimi erogabili dal motore, rispetto alla TE si nota come il picco massimo si ottenga per valori più elevati di VTR, in questo caso per una forza al gancio più elevata della metà del peso del trattore.

## 2.4 Mappatura del Suolo

Nel capitolo precedente è stato spiegato come viene realizzata la Mappa 4D dei parametri del terreno, ora si mostra come è stata simulata la rilevazione dei parametri incogniti ed i risultati forniti. Viene simulata una lavorazione di 10 secondi, per cui vengono considerati 1000 campioni consecutivi (campionamento a 100 Hz) tramite una finestra casuale:

```
% Finestra Casuale
window_size = 1000;
start_idx = randi([1, num_tot_campioni - window_size + 1]);
idx = start_idx : (start_idx + window_size - 1);
```

Figura 2.21: Finestra Casuale

All'interno di questa finestra viene misurato lo slittamento medio e la forza al gancio utile per il calcolo delle forze verticali agenti sugli assi tramite

le equazioni della dinamica longitudinale. Per far sì che il modello trovi soluzioni fisicamente accettabili vengono imposti dei limiti superiori ed inferiori ai parametri mentre per rispettare il multipass effect si impone che il terreno sotto le ruote posteriori presenti maggior compattezza.

Parametri	<b>cF</b>	<b>phiF</b>	<b>cR</b>	<b>phiR</b>
Limiti inferiori	30	21	40	23
Limiti superiori	90	33	90	38

Tabella 2.9: Limiti dei parametri

Noti slittamento, carichi verticali sulle singole ruote e limiti dei parametri è possibile ricavare dalla Mappa 4D i 4 parametri incogniti del terreno. Per verificare la qualità dei risultati ottenuti sono stati eseguite due prove per ogni test sul campo per un totale di 10 prove, nella tabella sottostante sono stati elencati per ogni prova lo slittamento medio, i 4 parametri ricavati e gli errori medi assoluti e percentuali calcolati eseguendo il modello di Wong-Reece con i parametri del suolo appena stimati:

	<b>TEST 1</b>		<b>TEST 2</b>		<b>TEST 3</b>		<b>TEST 4</b>		<b>TEST 5</b>	
<b>Prova</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$s_{med}$	49,36	0,57	13,96	48,31	7,37	38,69	0,44	29,66	64,87	28,09
$c_F$	60	71	61	60	56	61	65,15	61	60	61
$c_R$	65	86	66	66	66	65	86	71	65	61
$\phi_F$	27	26	28	27	31	28	23,8	28	27	28
$\phi_R$	30,5	31	36	30,5	32	30,5	31	30	38	32
<b>MAPE</b>	9,24	9,94	8,86	14,38	10,11	12,87	9,27	14,90	8,58	12,66
<b>MAE</b>	6,772	7,979	4,892	8,651	5,694	8,075	4,859	8,451	5,975	8,769

Tabella 2.10: Prove di Rilevazione Parametri del Terreno

### 2.4.1 Esempio di funzionamento del modello

Si illustrano i risultati prodotti dal modello completo in grado di ricavare i parametri del terreno e successivamente utilizzarli per realizzare le curve di rendimento. Si considera la prova di tiro corrispondente al test 3 e si seleziona una finestra casuale in cui vengono letti slittamento e forza al gancio. Dalla mappa 4D si estraggono i valori dei parametri del suolo:

Parametri del Terreno Ricavati (Slittamento Medio: 44.22%)  
cF: 61.00 kPa  
cR: 65.00 kPa  
phiF: 29.00 deg  
phiR: 32.81 deg

Figura 2.22: Parametri del Suolo

Questi parametri vengono utilizzati come dati di input per il modello di Wong-Reece, per prima cosa si verifica che la forza di trazione calcolata con questi valori riproduca la forza al gancio misurata durante il test e se ne calcola l'errore.

#### RISULTATI

Errore Medio Assoluto (MAE): 5.031 kN  
Root Mean Square Error (RMSE): 7.395 kN  
Errore Medio Percentuale (MAPE): 9.03 %

Figura 2.23: Errori medi commessi dal modello

Si mostrano anche i grafici relativi alla forza di trazione e agli errori per fornire un'idea del comportamento del modello. Il primo grafico rappresenta il confronto tra forza stimata e forza misurata nel tempo mentre il secondo rappresenta lo stesso confronto questa volta in funzione dello slittamento

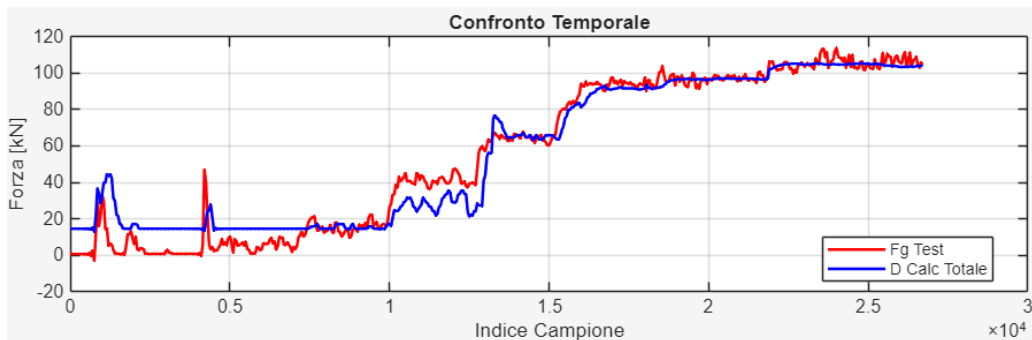


Figura 2.24: Confronto forza di trazione nel tempo

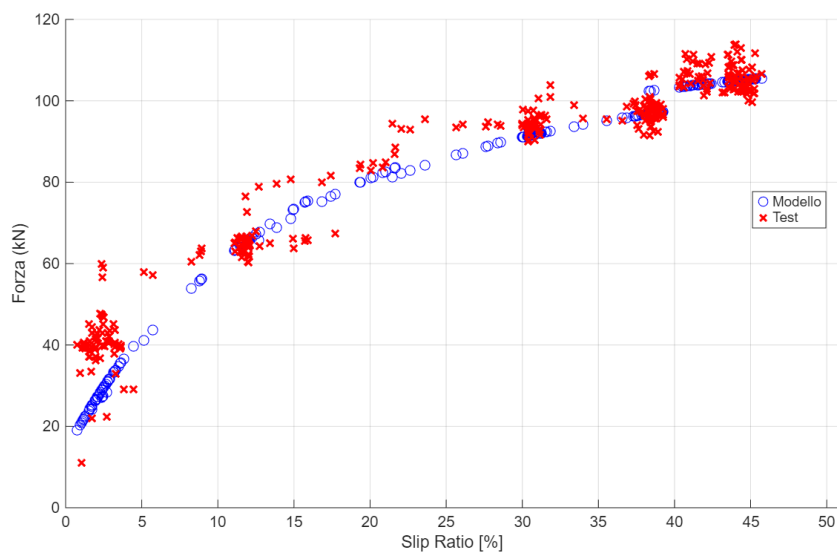


Figura 2.25: Confronto forza di trazione vs slittamento

Verificata la risposta positiva del modello si raggiunge il vero obiettivo del progetto, la realizzazione di grafici di Traction Efficiency, Vehicle Traction Ratio e Potenza al Gancio. Nei grafici seguenti si mostra come la massima efficienza di trazione pari a 0,76 si ottenga per uno slittamento del 7,9% oppure attraverso una VTR pari a 0,43.

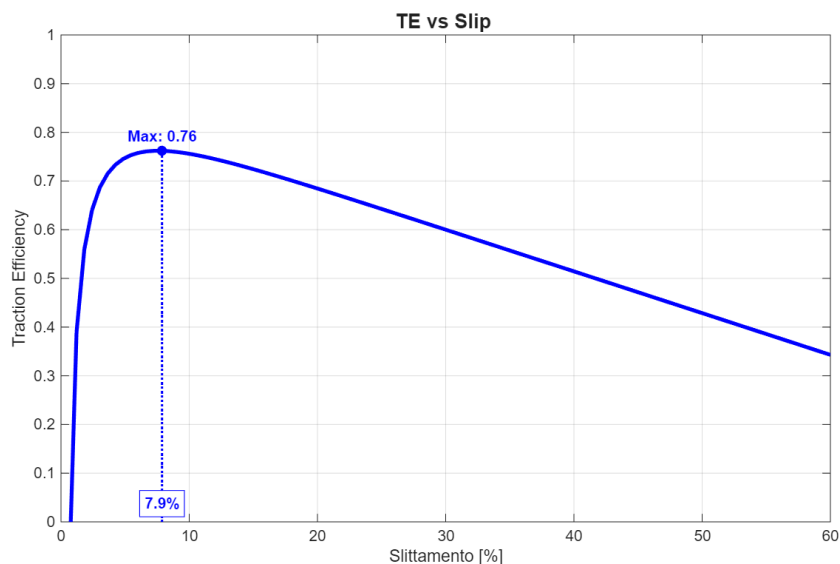


Figura 2.26: TE vs Slip

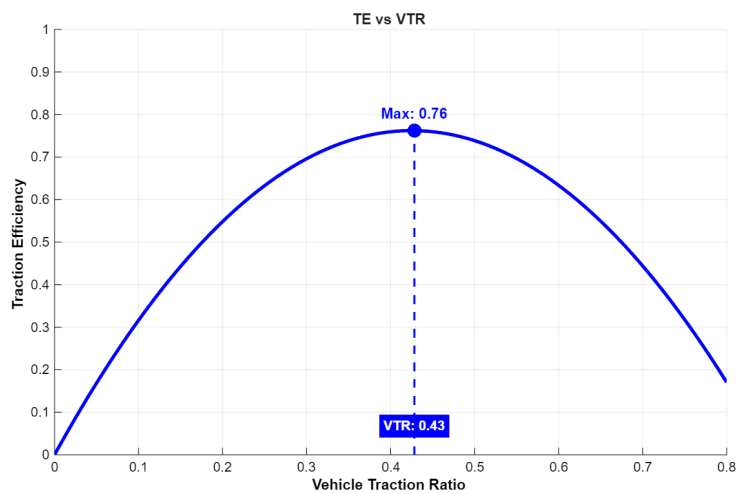


Figura 2.27: TE vs VTR

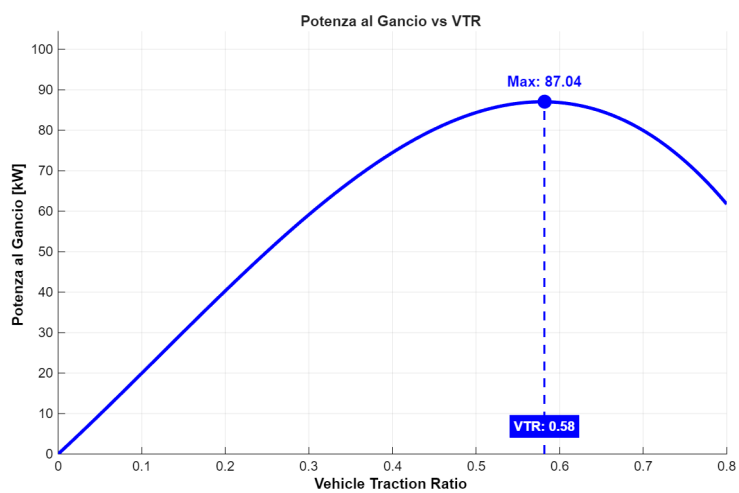


Figura 2.28: Potenza al Gancio vs VTR

L'ultimo grafico evidenzia come il picco di potenza si ottenga per valori di VTR più elevati rispetto al picco di efficienza di trazione, questo permette di ottimizzare lo zavorramento in funzione della caratteristica che si vuole massimizzare.

# Capitolo 3

## Discussione

Nei capitoli precedenti è stato spiegato il processo seguito per realizzare il modello finale con la relativa teoria su cui è basato e successivamente sono stati mostrati i risultati ottenuti. Ora si vogliono illustrare e motivare alcune scelte fatte e commentare i risultati ottenuti discutendo sulle possibili soluzioni per migliorare l'efficienza.

### 3.1 Analisi Risultati ed Errori del Modello di Wong-Reece

In questo paragrafo si analizzano i risultati forniti dal modello ruota di Wong-Reece in termini di forza di trazione e gli eventuali errori commessi. Il grafico in Figura 2.5 mostra differenti valori di forza di trazione misurata per bassi valori di slittamento (inferiori al 2%), questo fenomeno può derivare dal fatto che la differenza tra la velocità del veicolo e la velocità delle ruote sia ridotta pertanto minime variazioni di una delle due velocità crea una lieve incertezza nella lettura del valore dello slittamento. Questo è uno dei fattori che comporta errori elevati per bassi slittamenti visibili nel grafico in Figura 2.6, mentre il secondo fattore deriva dal fatto che il modello di Wong-Reece presenti delle forte semplificazioni quali l'ipotesi di ruota rigida e priva di tasselli. La presenza di pneumatici ad elevata flessibilità dotata di tasselli fa sì che per slittamenti ridotti la capacità di trazione sia maggiore di quella stimata da modello grazie al miglior ingranamento tra pneumatico e terreno. Parte di questa differenza viene ridotta dal fatto che il modello stimi una forza di trazione non nulla anche in caso di slittamento pari a zero, ciò deriva dall'equazione 1.6 in cui per  $i = 0$  si ottiene un valore di spostamento piccolo ma non nullo. Questo termine presente nell'equazione 1.5 viene amplificato da un valore di coesione del terreno piuttosto elevato, la tensione

tangenziale non nulla comporta una certa forza di trazione anche nel caso di slittamento nullo. Passando dal modello ruota all'intero veicolo questa problematica si fa meno evidente in quanto la trazione calcolata viene confrontata con la forza al gancio misurata che presenta fluttuazioni più ridotte rispetto alle forze misurate tramite i WFT. Analizzando nel complesso l'errore commesso dal modello nello stimare la forza di trazione si ricava un errore medio percentuale pari al 10,6% ed un  $R^2$  di 0,85, ottimi valori per un problema di terrameccanica in cui il suolo presenta elevata variabilità delle sue caratteristiche.

### 3.2 Utilizzo delle sole condizioni stazionarie

Nel paragrafo precedente si è discusso delle motivazioni per cui vengono rilevate forze considerevoli anche a slittamento nullo, per verificare una soluzione alternativa si è scelto di utilizzare solamente i periodi delle prove caratterizzati da condizioni stazionarie. Nel grafico seguente si notano 7 sezioni in cui la forza al gancio risulta all'incirca costante, per ognuna di esse sono stati ricavati forza al gancio e slittamento medi da utilizzare nel modello di Wong-Reece.

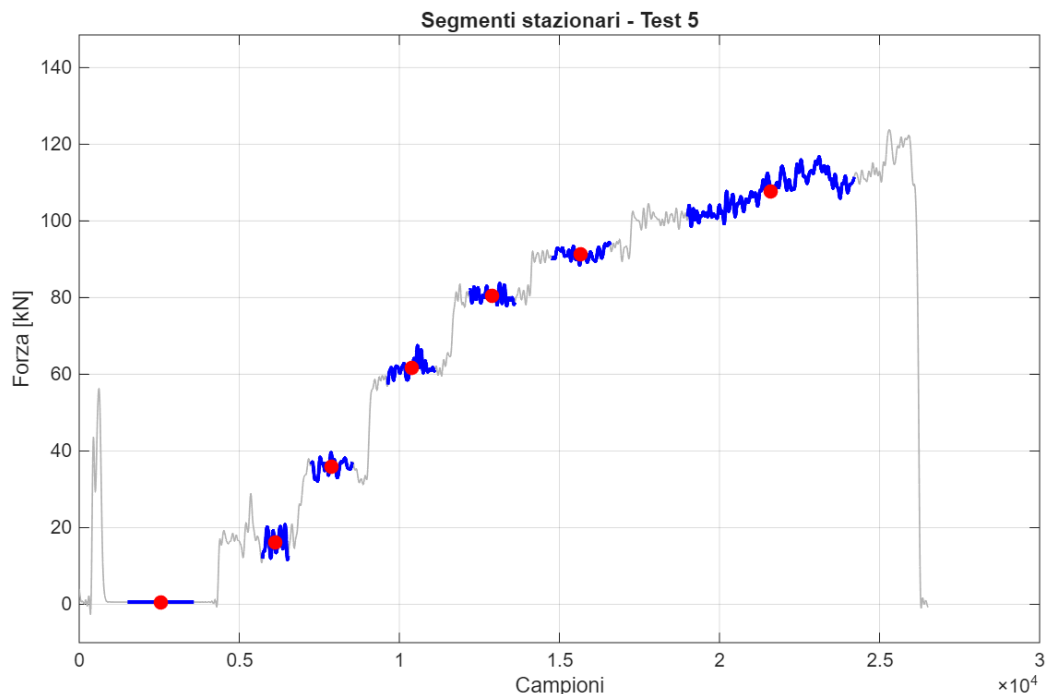


Figura 3.1: Sezioni stazionarie

Avendo a disposizione forza al gancio e slittamento per ogni sezione si può ora tracciare il grafico forza-slittamento in cui vengono rappresentate sia la curva rilevata durante il test che la curva ricavata dal modello.

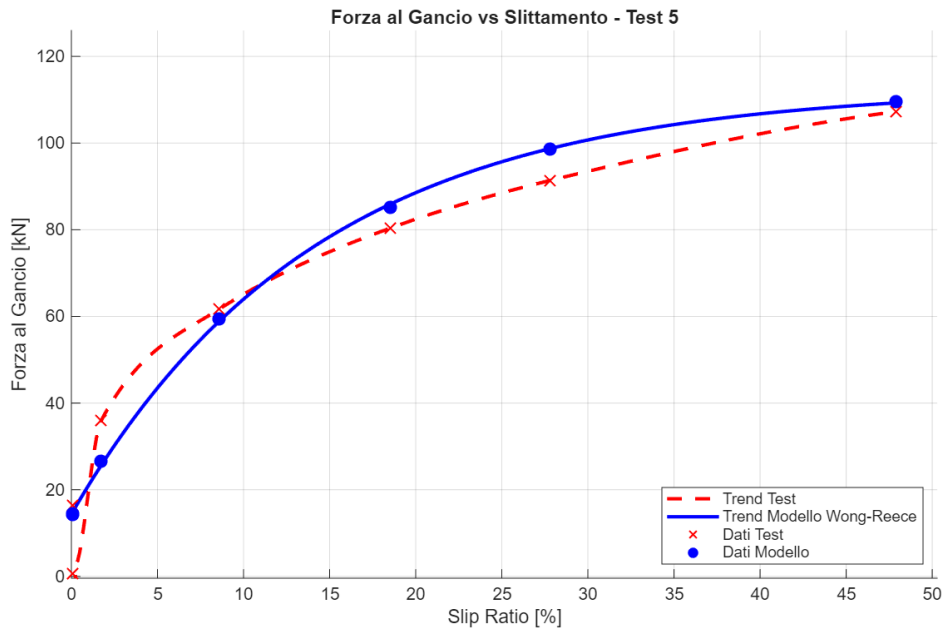


Figura 3.2: Forza al Gancio vs Slittamento

Nonostante siano state considerate solo le sezioni stazionarie si nota che per uno slittamento nullo sono presenti differenti valori di forza misurati in fase di test, questo conferma la problematica rilevata precedentemente in cui la lettura dello slittamento per valori piccoli risulta difficoltosa. Mentre la curva blu dimostra che i valori calibrati sui dati precedenti risultano lievemente forzati e il modello cerca di ottenere una forza non nulla anche a slittamento nullo per colpa dei dati in ingresso. Avendo a disposizione soltanto una prova eseguita con periodi stazionari non è stato possibile eseguire confronti però l'andamento della forza calcolata dal modello ne indica un corretto funzionamento. Nel caso di lavorazione in campo in cui si hanno condizioni pressochè stazionarie si ipotizza un corretto funzionamento del modello.

### 3.3 Comportamento del Modello senza i WFT

I grafici in Figura 2.12 e in Figura 2.13 mostrano come la forza di trazione calcolata utilizzando i carichi verticali stimati dalle equazioni della dinamica e la forza calcolata utilizzando i carichi misurati dai WFT differiscano lievemente in particolare per per valori di forza al gancio elevati. Questa differenza deriva dal fatto che la somma dei 4 carichi verticali agenti sulle ruote tenda a diminuire all'aumentare della forza al gancio.

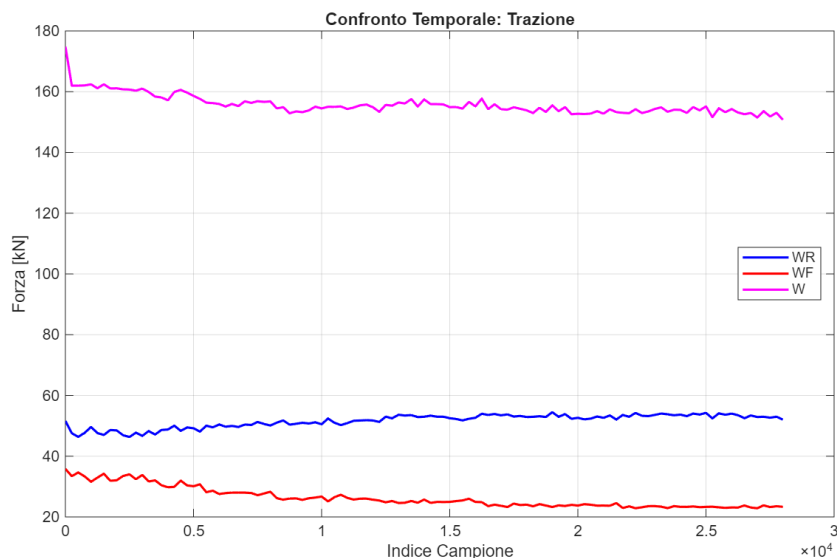


Figura 3.3: Carichi Verticali

Studiando l'andamento dei carichi sulle ruote anteriori (linea rossa) e posteriori (linea blu) si nota il corretto trasferimento di carico dovuto alla presenza della forza al gancio. La linea rosa che rappresenta il carico verticale totale dovrebbe indicare un valore fisso costante se la forza al gancio fosse puramente orizzontale come descritto nelle prove, nella realtà questo carico tende a diminuire il che sta a significare che la forza al gancio in fase di test risultasse leggermente inclinata verso l'alto.

### 3.4 Analisi Curve di Rendimento

#### 3.4.1 TE vs Slip

La curva della Traction Efficiency in Figura 2.15 presenta una crescita molto rapida per piccoli valori di slittamento sino a raggiungere il picco mentre

una volta superato il valore massimo si ha una decrescita più lenta. Questo indica come convenga lavorare ad un valore di slittamento prossimo a quello ideale o lievemente superiore per non rischiare una perdita significativa di efficienza, mentre se si decidesse di lavorare con slittamenti inferiori a quello ideale si avrebbe il rischio di un crollo dell'efficienza di trazione. Analizzando il grafico si può stabilire un range ottimale di slittamento tra il 7 e il 10% in cui la TE si attesta attorno a 0,80, da qua si nota come nelle migliori condizioni il 20% della potenza disponibile alle ruote viene persa a causa della resistenza al rotolamento dovuta alla deformazione del terreno.

Questi risultati sono stati ottenuti utilizzando la forza al gancio stimata dal modello di Wong-Reece, ora dal grafico in Figura 2.16 si analizzano le possibili cause che comportano una differenza tra la curva stimata e quella misurata. Si è visto come le due curve presentino una buona coerenza fornendo all'incirca lo stesso valore di efficienza massima ma una certa differenza nel valore di slittamento in corrispondenza del quale il picco massimo viene raggiunto. Come visto nell'analisi della forza di trazione il modello di Wong si basa sull'ipotesi di ruota rigida e priva di tasselli, questo comporta che la ruota raggiunga un certo slittamento prima di fornire una forza di trazione. Nel caso reale lo pneumatico è deformabile e presenta tasselli pronunciati, ciò comporta che la ruota sia in grado di fornire una forza di trazione considerevole già a piccoli valori di slittamento e di conseguenza anche il picco dell'efficienza di trazione venga raggiunto a slittamenti inferiori rispetto a quelli stimati.

La curva TE vs Slittamento risulta molto utile nel controllo in tempo reale dell'efficienza di trazione in quanto lo slittamento risulta facilmente regolabile a bordo macchina sia dall'operatore che, se opportunamente programmato, in automatico dal trattore così da lavorare nelle migliori condizioni di efficienza possibili.

### **3.4.2 TE e Potenza al Gancio vs VTR**

Il grafico in Figura 2.19 presenta un andamento a campana della Traction Efficiency in cui il picco viene raggiunto per una VTR pari a 0,44, cioè per una forza al gancio di poco inferiore alla metà del peso del veicolo. Questo grafico può essere utilizzato sia per l'adattamento in tempo reale delle prestazioni in quanto, essendo noto il peso totale del trattore, si adatta la forza di tiro in modo da avere un VTR prossima a quella ideale, oppure per un adattamento precedente all'inizio della lavorazione. Nota la forza di tiro necessaria si va ad agire sulla zavorratura, nello specifico aggiungendo peso la VTR diminuisce. Questo grafico permette di trovare la configurazione di massimo rendimento mentre se si vogliono massimizzare le prestazioni occorre analizzare il grafico

in Figura 2.20 in cui viene rappresentata la potenza al gancio in funzione della VTR. Il picco di potenza si ottiene per una VTR pari a 0,58 per cui un valore più elevato rispetto al punto in cui si trova il picco di efficienza, pertanto in base alle necessità dell'utilizzatore occorre adattare il valore della vehicle traction ratio. Nel caso dell'efficienza energetica come obiettivo occorre far lavorare il trattore con una VTR pari a 0,44 mentre se si ha come obiettivo la massima produttività occorre portare la VTR a 0,58, una possibile soluzione potrebbe essere trovare un compromesso in cui si consente al trattore di lavorare con buona efficienza ed un'elevata produttività.

### 3.5 Analisi della Mappatura del Suolo

La mappatura del terreno è stata effettuata tramite due parametri del suolo per le ruote anteriori e due per le ruote posteriori come descritto dalle prove svolte da Iagnemma, così facendo si è riusciti a limitare i gradi di libertà del problema evitando che il modello fornisse soluzioni forzate. Il terreno è stato caratterizzato tramite la coesione e l'angolo di attrito interno utilizzando la mappa 4D ed i valori di ingresso quali slittamento e forza al gancio, una volta ricavati i valori dei parametri sono stati inseriti nel modello di Wong-Reece il quale ha fornito i risultati visibili in tabella 2.10. Le dieci prove eseguite hanno fornito errori medi percentuali compresi tra l'8,5 e il 14%, un valore prossimo a quello ottenuto utilizzando i parametri del terreno calibrati in cui l'errore medio si attestava attorno al 10%. Questo risultato indica che per la tipologia di terreno in esame il modello è in grado di fornire parametri del suolo realistici anche utilizzando diversi valori di slittamento come dato in input. La verifica fatta attraverso l'esempio del Paragrafo 2.4.1 dimostra un'ottima risposta del modello, utilizzando i parametri rilevati l'errore commesso rispetto alla forza misurata risulta prossimo al 9% e le curve di rendimento ottenute rispecchiano quelle realizzate in precedenza tramite i parametri calibrati. Si ha un picco di TE pari a 0,76 in corrispondenza di uno slittamento del 7,9% e di una VTR pari a 0,43, valori molto prossimi a quelli già rilevati perciò questo sistema di mappatura può essere definito affidabile.

# Conclusioni

Nel presente progetto di tesi è stato affrontato il problema relativo alla massimizzazione dell'efficienza di trazione di una macchina agricola, in particolare è stata studiata l'interazione tra pneumatico e terreno deformabile. Il primo passo è stata la realizzazione e validazione di un modello di Wong-Reece in grado di replicare la forza di trazione senza la necessità di conoscere le forze sugli assali tramite l'utilizzo di appositi trasduttori di forza. Il modello rappresentante l'intero trattore ha fornito un errore medio percentuale del 10,6% ed un  $R^2=0,85$  che stanno a significare un buon risultato per un problema di terrameccanica. Questo modello presenta il vantaggio di essere applicabile ad ogni trattore in quanto necessita solamente della conoscenza della velocità tramite sistema GPS, della forza al gancio tramite cella di carico e dei parametri motore ricavabile tramite rete CAN-BUS ed inoltre grazie ai primi due parametri è in grado di ricavare dalla mappa 4D la coesione e l'angolo di attrito interno del suolo su cui il mezzo sta operando. Una volta noti i parametri del suolo il modello realizza le curve di Traction Efficiency e Potenza al Gancio in funzione di Slittamento e Vehicle Traction Ratio utili a trovare la configurazione di lavoro del trattore che massimizza l'efficienza o la produttività in base alle necessità dell'utilizzatore.

# Bibliografia

- [1] Leonardo Angelucci. “Towards more efficient tractors: Assessing and refining traction test procedures for agricultural tractors”. In: *Journal of Terramechanics* 117 (2025).
- [2] M. G. Bekker. *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*. University of Michigan Press, 1969.
- [3] R.J. Ahrens E. Benham. *Clarification of Soil Texture Class Boundaries*. W.D. Nettleton National Soil Survey Center, 2009.
- [4] K. Iagnemma. “Online terrain parameter estimation for wheeled mobile robots with application to planetary rovers”. In: *IEEE Transactions on Robotics* 20 (2004).
- [5] Kenneth Von Barga Leonard L. Bashford. “Performance Comparisons Between Duals and Singles on the Rear Axle of a Front Wheel Assist Tractor”. In: *Transactions of the ASAE* 30 (1987).
- [6] Costamagna Matteo. “Studio comparativo di un modello di contatto ruota-terreno per una trattoria agricola in ambiente multibody”. Tesi di Laurea. Politecnico di Torino, 2021.
- [7] J. Y. Wong. *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, 2022.