UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

Valutazione degli effetti del traffico controllato su compattamento del terreno, forze di trazione e slittamenti

Relatore
Dott. Luigi Sartori
Correlatore
Dott. Marco Benetti

Laureando
Thomas Vomiero
Matricola n. 2027859

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

INDICE

RIASSUNTO

ABSTRACT

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE

1.1 Il compattamento

1.2 Le cause

1.3 Le interazioni suolo macchina

1.4 Le interazioni suolo pneumatico

1.5 I metodi di rilevazione

1.6 Gli effetti sul terreno

1.7 Gli effetti sulla pianta

1.8 Misure di mitigazione

CAPITOLO 2. OBIETIVI

CAPITOLO 3. METERIALI E METODI

3.1 Il sito e le condizioni pedoclimatiche

3.2 L'impostazione prova

3.3 Le attrezzature impiegate

3.4 Elaborazione dati

3.5 Rilevazione di densità apparente e resistenza di penetrazione

CAPITOLO 4. RISULTATI

CAPITOLO 6. DISCUSSIONE

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

RIASSUNTO

Il compattamento del suolo è considerato il problema ambientale più grave causato dall'agricoltura moderna. Questo fenomeno causa un'alterazione della porosità e quindi dei parametri fisici, chimici e biologici del suolo, con un impatto negativo sulla fitness delle piante, le relative produzioni e di conseguenza sul bilancio aziendale.

Le problematiche legate al compattamento inoltre, sono aggravate dalla difficoltà di determinazione dello stesso, in quanto è un fenomeno nascosto e le metodologie di rilevazione sono spesso complesse e articolate. Le cause che portano al compattamento del suolo sono molteplici, ma le più impattanti riguardano il traffico dei macchinari per le lavorazioni e la scorretta gestione delle pratiche agricole. Una delle pratiche per prevenire questa problematica è l'utilizzo di corsie di traffico in un sistema di traffico controllato. L'adozione di questa tecnica ha diversi risvolti positivi, tra i quali il confinamento del compattamento alle corsie di traffico, che permette di ridurre il compattamento diffuso del terreno e l'aumento dell'aderenza delle macchine con una migliore trafficabilità e tempestività rispetto a sistemi di traffico convenzionali. In questo studio con prova sperimentale, vengono analizzati gli effetti sul compattamento e sulla capacità di trazione di una trattrice impiegata in condizioni di traffico controllato e casuale attraverso l'uso di più parametri di rilevazione.

ABSTRACT

Soil compaction is considered the most serious environmental problem caused by modern agriculture. This phenomenon causes an alteration of the porosity and therefore of the physical, chemical and biological parameters of the soil, with a negative impact on the fitness of the plants, their production and consequently on the company budget. Furthermore, the problems related to compaction are aggravated by the difficulty of determining the same, as it is a hidden phenomenon and the detection methods are often complex and articulated. The causes that lead to soil compaction are many, but the most impacting ones concern the traffic of machinery for processing and the incorrect management of agricultural practices. One of the practices to prevent this problem is the use of traffic lanes in a controlled traffic system. The adoption of this technique has several positive implications, among which the confinement of the compaction to the traffic lanes, which allows to reduce the widespread compaction of the soil and the increase of the adherence of the machines with a better viability and timeliness compared to systems of conventional traffic. In this study with experimental test, the effects on compaction and traction capacity of a tractor used in controlled and random traffic conditions are analysed through the use of multiple detection parameters.

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE

Negli anni le dinamiche di mercato mondiale dei cereali, hanno portato le aziende agricole a fare i conti con una crescente pressione finanziaria che si è tradotta in una continua spinta verso una maggiore produttività e qualità dei prodotti agricoli. Con lo scopo e il bisogno di aumentare l'efficienza produttiva agricola, l'agricoltura moderna si serve di macchinari più efficienti, utilizzando tecnologie più sofisticate o come risultato di economie di scala. Negli anni la tendenza si è chiaramente spostata verso macchinari più grandi e potenti, ma questi risultano essere spesso più pesanti, aumentando così la possibilità di compattamento del suolo (Ansorge & Godwin, 2007). Il peso dei veicoli agricoli è infatti aumentato enormemente negli ultimi sessant'anni. È stato stimato che i carichi sulle ruote delle mietitrebbie dal 1960 al 2009 sono aumentati da circa 1,5 t a 9 t, che equivale a circa una tonnellata aggiuntiva ogni sette anni. Stesse considerazioni si possono fare per i trattori, dove i carichi sulle ruote sono aumentati da circa 1 t nel 1955 a più di 4 t nel 2000 (Keller et al., 2019, **Figura 1.1**.).

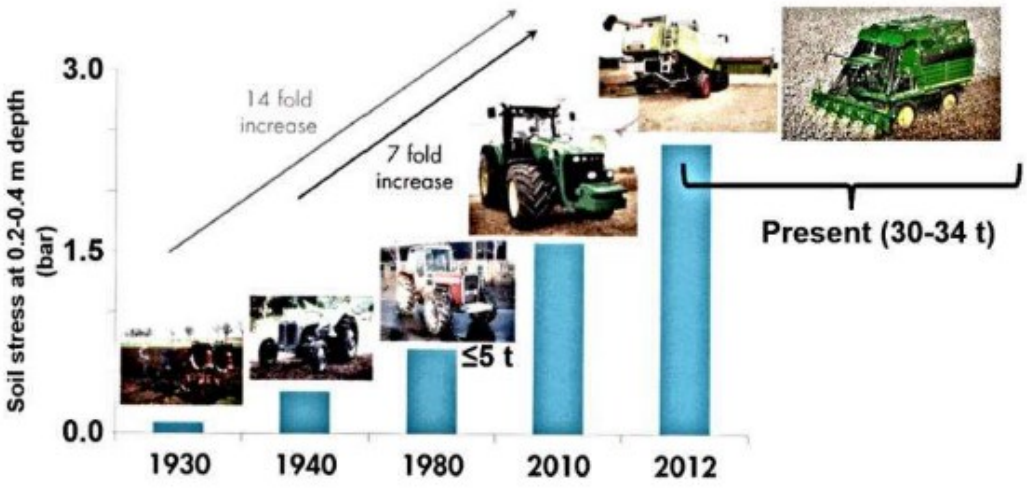

Figura 1.1. Incremento di peso delle macchine agricole nel tempo (Keller et al., 2019)

Questi dati sono una sottostima del reale impatto sul suolo di queste macchine, poiché sono stati considerati i carichi statici delle macchine, ma non quelli dinamici che durante le operazioni sul campo sono preponderanti. Ai carichi

statici va quindi aggiunta la componente dinamica, causata dalla forza di traino delle attrezzature e dalla ridistribuzione del peso dall'asse anteriore a quello posteriore a causa della forza di trazione. I carichi dinamici aumentano dal 25 fino al 45% i carichi totali sull'asse, a seconda del livello di trazione e quindi del tipo di lavorazione (Keller et al., 2019).

Un ulteriore aspetto da considerare è il carico sull'asse aggiuntivo a quello statico, nel caso di attrezzature portate nelle svolte di fine campo. L'aumento del carico sull'asse in questo caso è dovuto a due componenti. La prima è data dal peso delle attrezzature stesse, che sono aumentate anche termini di dimensioni di pari passo con l'aumento delle dimensioni dei trattori. La seconda è la quota generata dalla ridistribuzione del peso tra gli assi, dovuto allo spostamento del baricentro quando l'attrezzo è sollevato. La sollecitazione subita dal suolo dal peso delle macchine è dovuta anche al fatto che negli anni l'incremento di peso delle macchine, è stato seguito solo in parte da un aumento dell'area di contatto pneumatico-suolo, causando una maggiore pressione unitaria al suolo.

Il suolo è soggetto a diverse forze, dove il peso è la componente verticale, data dal peso della macchina operatrice e dal peso del terreno stesso, a cui si oppone una forza contraria di resistenza alla sollecitazione o capacità portante data dal terreno. Quando la capacità portante del suolo è maggiore della componente verticale peso, si ha deformazione elastica, ovvero una deformazione che scompare dopo il passaggio della macchina. Mentre quando la forza peso, supera la forza di resistenza al compattamento del terreno, si una deformazione plastica e quindi compattamento del suolo. Maggiore è la differenza tra le due forze, tra peso della macchina e capacità portante maggiore sarà il compattamento. Inoltre vi sono delle forze oblique rispetto la verticale che vanno a formare quello che è definito cono di compattamento che vanno ad interessare un volume di suolo maggiore rispetto a quello limitato al disotto della superficie di contatto pneumatico-suolo.

1.1 Il compattamento

Il compattamento del suolo può essere definito come "il processo mediante il quale le particelle del terreno vengono riorganizzate per ridurre lo spazio vuoto e portarli a più stretto contatto tra loro, aumentando così la densità apparente" (Farrakh Nawaz et al., 2013).

Il fenomeno del compattamento del suolo è più sentito e ingente nei paesi sviluppati e in via di sviluppo, dove la coltivazione si basa sull'utilizzo di macchine operatrici. La stima dell'estensione del suolo compattato in tutto il mondo è pari a 68 milioni di ettari di terreno considerando il solo traffico dei macchinari (Flowers & Lal, 1998).

In Europa, si stima che il compattamento del suolo sia responsabile del degrado di un'area di 33 milioni di ettari (Akker et al., 2001), 10 milioni di ettari in Asia, 4 milioni di ettari in Australia e in alcune aree del Nord America (Flowers & Lal, 1998).

Per diffusione ed entità, questo fenomeno è considerato il problema ambientale più grave causato dall'agricoltura convenzionale (McGarry, 2003), in quanto compromette la struttura del suolo causando a cascata un'alterazione delle caratteristiche chimico fisiche del suolo con risvolti negativi sulla porosità, l'infiltrazione dell'acqua, la mineralizzazione di C e N. Alterando le caratteristiche del suolo, si ha una modifica della crescita e performance delle colture che si traducono in una minore efficienza e minore produttività. Inoltre a questa problematica così diffusa non è correlata una facile identificazione e quantificazione, in quanto è un fenomeno non visibile senza rilevamenti strumentali. In particolare la problematica maggiore riguarda il compattamento profondo, che è più difficile da determinare e risulta essere la componente del fenomeno più persistente. Alcuni modelli hanno stimato 50 Kpa come valore di sollecitazione verticale limite, oltre il quale si ha deformazione plastica nel sottosuolo in condizioni di capacità di campo. Sulla base di questi modelli, delle simulazioni hanno evidenziato che la profondità a cui si raggiunge una sollecitazione verticale di 50 kPa a seguito del passaggio dei macchinari, è aumentata da circa 0,25 m nel 1940 a circa 0,75 m nel 2010 (Keller et al., 2019).

Pertanto negli anni, c'è un aumento dello strato di suolo interessato dal compattamento, che ne amplifica le criticità gestionali e di rilevazione.
Questo fa si che spesso gli agricoltori tendano ad imputare stress e ridotte rese delle colture ad altre cause. Ma, in alcuni casi vi è il contrario, ovvero che gli agricoltori reputano le diminuzioni di resa al compattamento del suolo anche se questo in realtà non è presente (M. Hamza et al., 2005).

1.2 Le cause

Il compattamento del suolo, è un fenomeno che può originarsi in diversi modi. Uno di questi è l'attività di calpestio degli animali al pascolo, che ricopre però un importanza marginale relativamente ai campi coltivati, mentre più rilevante è una gestione inadeguata del suolo in condizioni sfavorevoli di umidità e il traffico di macchinari (M. Hamza et al., 2005).
In merito al compattamento causato dal traffico di macchinari per le lavorazioni agricole, vanno considerati diversi fattori, ognuno dei quali ha un'incidenza più o meno accentuata sul fenomeno. Essi sono: il numero delle ruote dei macchinari, la velocità di avanzamento, il numero di passate, la pressione di gonfiaggio dei pneumatici, e il carico sulla ruota.
Numerosi sono in letteratura gli studi condotti per conoscere i fenomeni e le interazioni tra questi fattori e il loro impatto sul terreno.
Operativamente si consiglia di utilizzare ruote con un battistrada più largo e/o con un maggior raggio per favorire la distribuzione del peso e trazione in una superfice di suolo più ampia. Sempre nell'ottica di ridurre il carico unitario un'ulteriore strategia è l'utilizzo di macchinari con più assi. Specie nelle attrezzature trainate come rimorchi e botti per lo spargimento dei reflui zootecnici, negli anni sono stati sviluppati rimorchi con maggiore numero di assi e ruote, offrendo diversi vantaggi in termini di stabilità e distribuzione dei carichi trattore-rimorchio. Tuttavia va considerato che i pesi e le portate dei rimorchi odierni sono notevolmente aumentati rispetto il passato, come anche le richieste di potenza per il traino, quindi servono trattori più pesanti e con maggiore forza di traino, che causano una maggiore sollecitazione al suolo.

Un altro fattore da considerare è la velocità di lavoro del macchinario, in quanto all'aumentare della velocità nella lavorazione lo stress sul terreno diminuisce. Questo è spiegato dal fatto che con velocità basse, c'è una maggiore permanenza del carico per un'unità di superfice del suolo (Taghavifar & Mardani, 2014), che accentua il rischio di creare compattamento.

Anche il numero di passaggi ha un ruolo sul compattamento del suolo, ma incide in maniera sempre minore all'aumentare dei passaggi. I primi passaggi, effettuati su terreno non disturbato incidono in maniera importante sul compattamento, mentre nei passaggi successivi, l'incidenza seppur positiva, è via via minore. Questo è spiegato dal fatto che con i primi passaggi dei mezzi, si ha un forte compattamento, dato dalla riduzione di volume causato dalla perdita di porosità. Mentre l'incidenza dei passaggi successivi sul compattamento del suolo è gradualmente inferiore, poiché il suolo ad ogni passaggio ha via via meno pori da comprimere (Taghavifar & Mardani, 2014).

1.3 Le interazioni suolo macchina

La relazione che lega la macchina e il suolo su cui transita è data dall'interazione suolo-pneumatico. Le performance di trazione della macchina sono determinate dalle caratteristiche intrinseche della macchina come la potenza del motore, il tipo di trasmissione ma anche dalle caratteristiche del suolo su cui le ruote esplicano la forza motrice.

Per valutare l'efficienza di utilizzazione della potenza della macchina e bisogna fare riferimento a quello che è il bilancio dinamico della macchina che tiene in considerazione le perdite di potenza subite da una macchina durante la trazione. Durante il movimento infatti, non tutta la potenza prodotta dal motore viene utilizzata in trazione o alla p.d.p (presa di potenza), ma una parte viene persa principalmente a causa delle resistenze di attrito.

Le perdite di potenza possono essere suddivise in perdite proprie della macchina, che sono perdite di potenza dovute alla trasmissione, al circuito idraulico. Queste

perdite non possono essere migliorate in campo, in quanto sono implicite della macchina e costanti. Mentre ci sono altre perdite legate all'interazione della ruota con il suolo, che possono far aumentare di molto le perdite di potenza della macchina e sono dovute allo slittamento degli pneumatici e alla resistenza all'avanzamento dovuto alla deformazione del suolo promosso dallo pneumatico per vincere la resistenza all'avanzamento.

Se si fa riferimento alla energia nell'unità di tempo e si indicano con Wt, Wp, Ws, Wid le potenze dissipate per trasmissione; avanzamento; slittamento e impianto idraulico, è evidente che la somma delle potenze dissipate e della potenza utile Wu deve eguagliare la potenza Wm sull'albero motore; sicché per il movimento uniforme su superficie orizzontale si ha la seguente uguaglianza (Lazzari & Mazzetto, 2010):

$$Wm = Wt + Wp + Ws + Wid + Wu$$

La potenza utile è quindi solo una parte della potenza sull'albero motore: per questo convenzionalmente si definisce rendimento globale della trattrice il rapporto fra Wu e Wm, ossia:

$$\eta g = Wu/Wm$$

La potenza persa per trasmissione (Wt) dipende dal tipo e dalle caratteristiche della trasmissione della trattrice e perciò può considerarsi quasi costante per una determinate trattrice. Tale perdita è causata dalla dissipazione di energia in calore per effetto dell'attrito fra i diversi organi in movimento. Il trasferimento del moto dall'albero motore alle ruote viene effettuato tramite un cambio di velocità, costituito da un certo numero, a volte notevole, di ingranaggi e altri dispositivi meccanici. Il loro movimento è fonte di attriti che, anche se minimizzati dalla lubrificazione, danno origine ad una dissipazione di potenza che è variabile oltre che dal tipo di trattrice, anche dalla complessità del cambio. Queste perdite dipotenza possono essere anche molto importanti in quanto ad esempio un cambio powershift totale la perdita di potenza raggiunge anche il 20-25% (Lazzari & Mazzetto, 2010).

La potenza necessaria per il sistema idraulico (Wid) deriva invece dalla potenza necessaria per fornire pressione al liquido idraulico, per farlo muovere e per azionare gli organi. Nei modelli costruttivamente più semplici di trattore questa perdita può essere assunta come costante in quanto la pompa idraulica è "sempre in presa", cioè funziona con continuità quando il motore è acceso, anche se non viene inviato olio in pressione al sollevatore e alle altre utilizzazioni idrauliche. In condizioni di regime la potenza persa risulta compresa tra 2 e 4%, ma può raggiungere anche il 40% (Lazzari & Mazzetto, 2010).

Riguardo invece alle potenze perse per slittamento e avanzamento un ruolo chiave lo svolge il tipo di pneumatico ma soprattutto le caratteristiche del suolo o pavimentazione su cui il trattore transita.

Lo slittamento è una perdita di aderenza dello pneumatico sul suolo, che si manifesta quando la forza generata dal motore sulla ruota è superiore alla forza di attrito tra suolo e pneumatico. Durante il moto i ramponi del battistrada dello pneumatico comprimono il terreno orizzontalmente, determinando una forza in una direzione opposta a quella della direzione di movimento del trattore.

Questa forza è detta di aderenza (Fa), che a sua volta è la risultante di più forze che si sviluppano in tutti i punti di contatto tra ruota e suolo e impediscono lo slittamento. Qualora infatti la forza di aderenza si riduce o viene a mancare, si genera slittamento, lo pneumatico scava il terreno e la trattrice non avanza.

Il valore dell'aderenza determina la forza massima di trazione che può esercitare la macchina per muovere un attrezzatura. La forza massima può quindi essere pari o superiore alla forza di aderenza ed è data dalla seguente uguaglianza (Lazzari & Mazzetto, 2010).

$F \leq Fa = Ka*Qa$

dove:

Qa = peso aderente che corrisponde al peso che grava sulle ruote motrici e corrisponde al peso totale nel caso di trattori a 4RM e a una frazione di questo per le 2RM

Ka = coefficiente di aderenza;

Quindi la forza di trazione potenziale di una macchina è funzione non solo della potenza del motore, ma anche dalla relazione con il suolo su cui transita in particolare del valore massimo di aderenza, che a sua volta dipendono dalle caratteristiche del suolo e dello pneumatico, nonché dal carico gravante sulle ruote motrici.

Il coefficiente Ka, dipende dalle caratteristiche intrinseche del terreno, dalla sua umidità e dalla superficie di contatto del pneumatico con il terreno. Per questo il coefficiente Ka è molto variabile (**Tabella 1.3.1.)**

Terreno	coefficiente di aderenza (Ka)	
	ruote gommate	Cingoli
terra Battuta	0,60-0,65	0,85-0,95
stoppie di grano	0,35-0,50	0,80-0,85
cotica erbosa	0,45-0,60	0,70-0,75
letto di semina	0,25-0,40	0,50-0,60
terreno bagnato	0,15-0,25	0,30-0,40

Tabella 1.3.1. Valori di Ka in varie condizioni del terreno (Lazzari & Mazzetto, 2010).

In realtà, tra la forza di aderenza e lo slittamento esiste una correlazione positiva fino ad un punto di flesso, oltre al quale lo slittamento continua ad aumentare mentre il coefficiente di aderenza decresce.

Mettendo in relazione forza di aderenza e slittamento (**Grafico 1.3.1.**) si evidenzia che con bassi livelli di slittamento, un incremento di questo comporta un aumento più che proporzionale della forza di aderenza, mentre quando lo slittamento raggiunge valori maggiori ad una certa soglia la forza di aderenza decresce e questo trend è valido per tutti i tipi di suolo e condizioni. Convenzionalmente in letteratura sono riportati dei valori di slittamento massimi oltre al quale si avrebbero limitati vantaggi in trazione e per la macchina crescenti perdite di potenza, di carburante e usura degli pneumatici; mentre per il suolo, un maggiore rischio di erosione e destrutturazione del suolo.

I valori ammessi sono compresi tra:

0,15 e 0,25 per trattori a 2 RM, 0,10 e 0,18 per trattori a 4 RM e 0,05 e 0,12 per le macchine a cingolati (Lazzari & Mazzetto, 2010).

Per aumentare la forza di aderenza si può agire principalmente sul tipo di pneumatico e sulle condizioni del suolo, fino a raggiungere il livello di aderenza massimo, dove si esplica la maggiore forza di trazione della macchina.

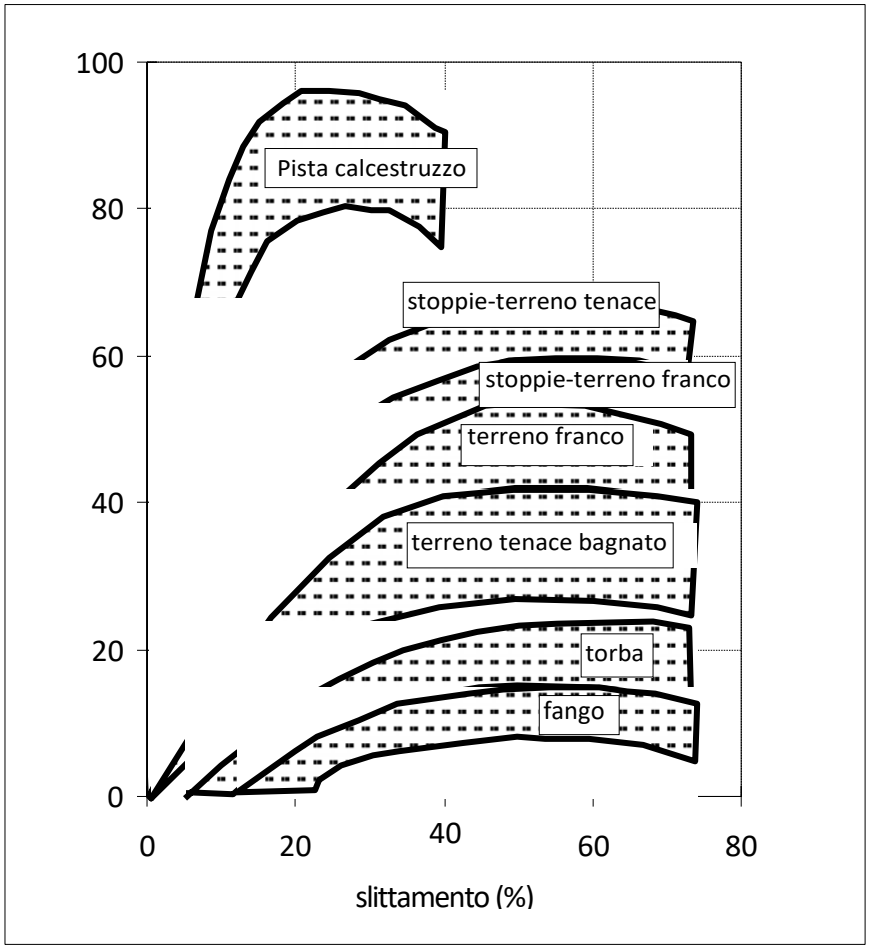

Grafico 1.3.1. Andamento della forza di trazione in funzione dello slittamento (Lazzari & Mazzetto, 2010)

La potenza consumata per l'avanzamento (Wp) è la potenza usata per vincere la resistenza all'avanzamento o anche chiamata resistenza al rotolamento.

La resistenza al rotolamento è dovuta a numerosi fattori, ma nel caso di trattori in condizioni di campo, la componente predominante è la perdita di potenza dovuta

all’affondamento dello pneumatico nel suolo durante il moto (Czarnecki et al., 2019).

La potenza persa per l’avanzamento può essere espressa dalla seguente formula (Lazzari & Mazzetto, 2010):

$$Wa = Ra\ Va/1000$$

Dove:

Ra = resistenza all'avanzamento (N)

Va = velocità di avanzamento della trattrice (m/s)

La Ra, dipende essenzialmente dalla massa Q, dalla deformabilità del suolo, e dalle caratteristiche della trattrice e dei pneumatici. A parità di macchina quindi il fattore che maggiormente incide sulla Ra è il suolo. In particolare in letteratura sono stati stimati dei coefficienti di resistenza all’avanzamento o di rotolamento (Kr) in funzione del suolo o fondo considerato (**Tabella 1.3.2**.). Kr rappresenta la forza necessaria all'avanzamento della trattrice sul terreno considerato, per ogni N di forza peso della trattrice stessa di conseguenza Kr è un numero puro.

Data questa relazione Ra, può essere espressa dalla seguente formula (Lazzari & Mazzetto, 2010):

$$Ra = Kr\ Q$$

dove:

Kr = coefficiente di resistenza all'avanzamento o di rotolamento

Q = massa del trattore (N)

Più è alto Kr più il terreno è deformabile, viceversa terreni meno deformabili comportano valori di Kr bassi.

Tipo di fondo	Coefficiente di resistenza all'avanzamento Kr
Pista in calcestruzzo	0,02-0,03
Prato	0,04-0,06
Terreno agrario secco	0,06-0,08
Terreni arati	0,18-0,40
Terreni scivolosi	0,20 ed oltre
Sabbia sciolta	0,16-0,39

Tabella 1.3.2. Valori del Kr in vari substrati (Lazzari & Mazzetto, 2010).

La forza generata dal motore, viene scaricata al suolo come forza di trazione, attraverso il contatto suolo-pneumatico. Per descrivere il rapporto suolo-ruota e definire quale parte della potenza fornita dal motore ad una ruota viene utilizzata sotto forma di potenza di traino, in letteratura il parametro frequentemente utilizzato è l'efficienza di trazione. La potenza che non viene utilizzata per il traino, viene dissipata sotto forma di perdite dovute alla resistenza al rotolamento e perdite dovute a slittamenti (Czarnecki et al., 2019).

La suddetta deformazione orizzontale del suolo dipende dalla pressione individuale che viene applicata al suolo dai ramponi del battistrada dei pneumatici e dalla capacità del suolo di resistere alla deformazione, stimata come coefficiente di deformazione individuale (Bulgakov et al., 2020).

Comunemente, resistenza al rotolamento e slittamento vengono considerate come un'unica perdita totale e non si conosce quale delle due prevalga negativamente sull'efficienza di trazione e in quali condizioni. Recenti studi hanno chiarito l'apporto di ciascuna delle due perdite di potenza nella perdita di potenza totale, considerando pneumatici di diverse dimensioni e suolo nudo o con stoppie (Czarnecki et al., 2019). I dati raccolti evidenziano che su stoppia, i pneumatici sono più performanti in potenza di traino con valori di efficienza di trazione più elevati rispetto al suolo nudo. In particolare sul terreno con stoppie rispetto al suolo nudo è stata riscontrata una minore resistenza al rotolamento, mentre meno marcate sono le differenze negli slittamenti tra i due terreni. La spiegazione di

questi risultati, può risiedere nella maggiore struttura e capacità di carico del terreno con stoppie, dovuto alla parte ipogea della coltura rimasta dopo la raccolta, che ha ridotto sensibilmente l'affondamento dello pneumatico. Da questa prova emerge che la perdita di potenza di trazione è prevalentemente causata dalla resistenza al rotolamento (Czarnecki et al., 2019). Gli studi teorici e sperimentali effettuati indicano che il rotolamento della ruota su piste artificiali permanenti è accompagnato da un valore di slittamento inferiore, e al contempo la ruota genera una forza di trazione maggiore (Bulgakov et al., 2020).

Le macchine operatrici pesanti, sono le più esposte a questo fenomeno, in quanto, se non provviste di pneumatici adeguati in grado di trasferire il peso al suolo, aumenta l'affondamento dei pneumatici, favorendo la destrutturazione del suolo e maggiori perdite di potenza. Per limitare il rotolamento, è necessario avere un battistrada sufficientemente ampio è quindi importante per ridurre lo stress al suolo e massimizzarne le performance della macchina consentendole una galleggiabilità tale da evitare l'affondamento.

1.4 Le interazioni suolo pneumatico

Lo pneumatico è ciò che permette il moto e lo scaricamento del peso della macchina, perciò riveste un ruolo importante, nella trazione, nella sollecitazione al suolo e nell'efficienza di lavoro della macchina.

La struttura è una delle parti dello pneumatico che si è evoluta nel tempo. In particolare, una grande rivoluzione c'è stata con l'avvento di pneumatici radiali che ha fatto sì che l'impronta del pneumatico avesse una larghezza costante e una distribuzione omogenea delle sollecitazioni nell'area di contatto

pneumatico-terreno e minori pressioni di gonfiaggio a parità di carico rispetto al vecchio tipo diagonale. Tuttavia recenti studi hanno evidenziato che non ci sono differenze in termini di riduzione delle sollecitazione al suolo tra uno pneumatico diagonale e uno radiale, testati a dimensione, pressione di gonfiaggio e carico sulla ruota costanti (Keller et al., 2019).

Le forme e geometrie dello pneumatico si sono evolute e modificate nel tempo per rispondere al meglio alle diverse condizioni di lavoro. Ci sono infatti pneumatici specifici per l'utilizzo in campo (**Figura 1.4.1.**) pneumatici polivalenti per un uso misto strada/suolo, fino a pneumatici per utilizzi specifici su strada o forestali (**Figura 1.4.2.**). Una delle caratteristiche che maggiormente identifica uno pneumatico agricolo per l'utilizzo su campo è la forma e geometria dei ramponi. I ramponi hanno infatti un ruolo chiave nel rapporto pneumatico-suolo, in quanto determinano la capacità della macchina di trasferire la forza motrice al suolo.

Figura 1.4.1. Esempio pneumatico per uso agricolo

Figura 1.4.2. Esempio di pneumatico uso forestale

Va notato che a parità di altri fattori, la geometria e le dimensioni dei pneumatici sono i fattori maggiormente responsabili sull'efficienza di trazione e la percentuale di slittamento. Slittamenti maggiori si registrano più frequentemente in macchine di elevate potenze, dove una ridotta o inadeguata superfice suolo-pneumatico genera slittamenti che causano ridotta efficienza di lavoro della macchina e una erosione del suolo. In particolare lo slittamento del suolo è un fenomeno che causa una destrutturazione dei primi strati di terreno interessati dai ramponi con lo spostamento laterale di masse di terreno, e favorisce il rischio di compattamento. Lo slittamento nelle macchine ad elevate potenze, può essere limitato aumentando la superficie di contatto e quindi attrito tra suolo pneumatico. Questo può essere fatto in diversi modi, utilizzando cingoli o ruote gemellate rispetto a ruote singole, utilizzando macchine a 4 ruote motrici o instaurare un sistema di traffico controllato. In generale un suolo strutturato, consente un maggiore attrito allo pneumatico e minori rischi di slittamento e affondamento. L'utilizzo di CTF (Controlled Traffic Farming), può essere una strategia in questo senso in quanto la presenza di corsie consolidate offre maggiore forza di attrito e minore affondamento nel suolo, riducendo le perdite di potenza. Tuttavia aspetti

importanti da considerare in termini di forza di trazione e slittamenti sono legati alla tessitura del suolo, al livello di umidità nelle diverse operazioni e alla presenza di residui colturali. Si è visto che risultati migliori in termini di trazione si hanno con ruote gemellate o cingoli su terreni sciolti, mentre meno marcate sono le differenze tra ruote singole e cingoli in terreni argillosi, lavorati con basso livello di umidità. Con livelli di umidità elevati, si prevede che anche nei terreni argillosi, si riduca la forza di trazione e quindi si abbiano effetti simili a quelli ottenuti con terreni a basso contenuto di argilla (Arvidsson et al., 2011). Anche la presenza di residui colturali, altera il contatto suolo-pneumatico, riducendo la capacità dei ramponi dei pneumatici di infilarsi nel suolo con conseguenti slittamenti. Infine, a seguito dell'usura dei ramponi, aumentano gli slittamenti e l'erosione al suolo causata dal passaggio della macchina, per questo all'aumentare dell'usura le performance dei pneumatici possono cambiare notevolmente.

Riguardo la pressione di gonfiaggio dei pneumatici è dimostrato che all'aumentare della pressione di gonfiaggio aumenta la sollecitazione al suolo. L'effetto di questa componente si ha solo nei primi cm di suolo causando effetti negativi in particolare sulla germinabilità dei semi e le prime fasi di crescita delle piante, mentre il suo contributo nel compattamento degli strati più profondi è irrisorio. Va notato che l'aumento nel tempo dei carichi sulle ruote, ha fatto aumentare le pressioni di gonfiaggio dei pneumatici (Keller et al., 2019).

L'effetto della pressione dei pneumatici, è strettamente correlato al carico in quanto, a parità di pressione, carichi diversi, comportano una eterogeneità delle sollecitazioni sotto lo pneumatico. Con carichi più alti si riscontra una maggiore sollecitazione nelle parti intermedie poste tra bordo e centro dello pneumatico, mentre con carichi minori, il trasferimento del peso al suolo si sposta nelle zone prossimali al centro dello pneumatico (**Figura 1.4.3**). Mentre la sollecitazione media sotto lo pneumatico può essere approssimata quando la pressione di gonfiaggio del pneumatico è quella consigliata dal produttore (Arvidsson & Keller, 2007).

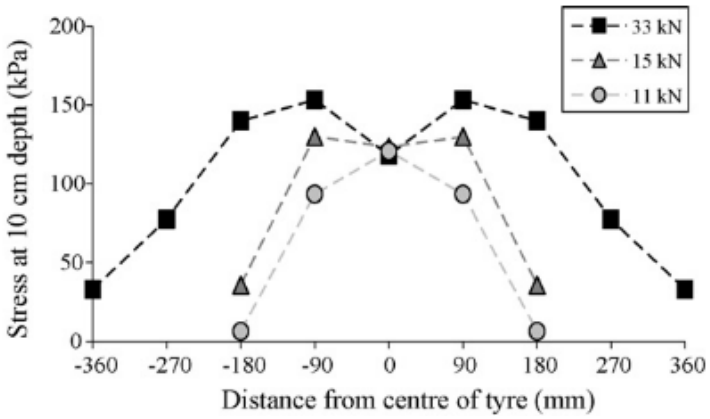

Figura 1.4.3. Distribuzione della sollecitazione verticale di diversi carichi, misurata a 10 cm di profondità perpendicolarmente alla direzione di marcia

Il fattore relativo alla macchina operatrice che più incide sul compattamento del suolo è però il carico per ruota. All'aumentare del carico per ruota, aumenta il compattamento, in particolare dello strato profondo, rispetto allo strato superficiale (Ansorge & Godwin, 2008). L'effetto del carico per ruota sul compattamento del sottosuolo è conosciuto, ma la sua determinazione è la più difficile in quanto non visibile e determinabile se non con misure puntuali e accurate.

1.5 I metodi di rilevazione

I parametri per la determinazione del compattamento del suolo sono diversi.

Uno di questi è la determinazione della densità apparente (massa del suolo secco per unità di volume) (Panayiotopoulos & Papadopoulou, 1994). Il sistema di misurazione di questo parametro è articolato, richiede molto tempo e nel caso di terreni ricchi di scheletro risulta poco affidabile e difficilmente applicabile per la scarsa struttura del suolo. Uno dei più diffusi sistemi di rilevazione della densità apparente si basa sul prelevamento di un volume noto di suolo tramite una carotatrice. Il campione viene pesato e messo in stufa a 105°C per 24 ore. Una volta essiccato si pesa il campione asciutto e per differenza con il peso fresco si risale all'umidità contenuta. Il peso secco rapportato al volume del campione che è standard determina la densità apparente. Maggiore è il peso del suolo essiccato, minore è la porosità in esso contenuto e quindi maggiore è la densità apparente.

Un altro parametro comunemente utilizzato è la resistenza del suolo, intesa come resistenza alla penetrazione ed è usata indirettamente, come indicatore della capacità di penetrazione e crescita delle radici (Farrakh Nawaz et al., 2013). Questa misurazione si basa su un dispositivo chiamato penetrometro. Il penetrometro è uno strumento caratterizzato da un asta con punta conica di dimensioni standard montata su delle celle di carico. Durante l'affondamento dell'asta nel suolo, le celle di carico determinano la pressione che viene applicata per l'affondamento e restituiscono dei valori in Megapascal.

Anche il tasso di infiltrazione dell'acqua può essere usato nella determinazione del compattamento del suolo. Questa misurazione, si basa sul fatto che essendo il compattamento di fatto, una riduzione della porosità totale del suolo, maggiore è il tasso di infiltrazione dell'acqua, maggiore è la porosità e quindi minore è il compattamento del suolo (Farrakh Nawaz et al., 2013).

Considerando sempre la porosità e la relazione inversa con il compattamento, un'altra misurazione indiretta per il rilevamento del compattamento si basa sulla quantificazione della macroporosità, misurando il tasso di diffusione dell'ossigeno, il potenziale redox e la permeabilità all'aria (Cannell, 1977).

Tra questi la misurazione della permeabilità all'aria non offre misurazioni molto attendibili in quanto a parità di compattamento, restituisce valori molto variabili in relazione alle caratteristiche fisiche del suolo. La misurazione del potenziale redox invece risulta essere di facile applicabilità e ben si presta a misurazioni continue nel tempo, ma necessità di suoli con contenuti di umidità molto elevati.

Tra le misurazioni sopra citate, i parametri più utilizzati nella determinazione del compattamento del suolo, sono la densità apparente e la resistenza del suolo. Tuttavia tutti, presentano vantaggi e svantaggi nell'esecuzione e nell'accuratezza, perciò per una maggiore precisione e una migliore comprensione del fenomeno è auspicabile una combinazione e determinazione di più parametri (Farrakh Nawaz et al., 2013).

1.6 Gli effetti sul terreno

Tutti i terreni sono soggetti a compattamento ma, sono le diverse condizioni chimico-fisiche, livello di umidità e contenuto di sostanza organica che determinano la vulnerabilità e l'entità del compattamento.

Tra le caratteristiche fisiche del suolo, si fa riferimento a porosità, densità apparente e forza del suolo, intesa come resistenza alla penetrazione. All'aumentare del livello di compattamento si registra una riduzione della porosità totale e quindi all'aumento di densità apparente e forza del suolo. In merito alla natura del suolo, la tessitura è tra le proprietà fisiche del terreno che maggiormente identifica la sua suscettibilità al compattamento. Ad esempio, in generale i terreni limosi con basso contenuto di colloidi sono più suscettibili dei terreni argillosi a basso contenuto di acqua, mentre i terreni sabbiosi sono meno suscettibili alla compattazione del suolo (Horn et al., 1995). Infatti, il diverso contenuto di argilla e le caratteristiche mineralogiche del terreno a un dato livello di umidità ed energia determinano una sensibilità variabile al compattamento (Smith et al. 1997; (Farrakh Nawaz et al., 2013).

Considerando gli aspetti chimici del suolo, maggiori problematiche si riscontrano in terreni argillosi ad alto contenuto di sodio. Alte concentrazioni di sodio portano ad un suo adsorbimento sulle superfici dei colloidi argillosi ed organici al posto di calcio e magnesio. Avendo il sodio un'azione deflocculante sulla struttura del terreno favorisce la destrutturazione del suolo esponendolo al rischio di compattamento a seguito del successivo transito delle macchine operatrici. In tal modo si generano problemi di asfissia radicale, causati dalla minor permeabilità e dal peggior drenaggio; di conseguenza la struttura del terreno che ne scaturisce, favorisce a sua volta l'accumulo di sali, intensificando il danno sulla crescita delle coltivazioni. Tra le misure di mitigazione per ridurre la salinità e i relativi effetti negativi in questi suoli si possono effettuare abbondanti irrigazioni con acqua dolce per lisciviare i sali o apportare sostanza organica. La sostanza organica è un fattore strutturante del suolo in quanto lega le particelle minerali del suolo, riduce la bagnabilità degli aggregati e ne influenza la resistenza meccanica. Come risultato di questi processi, in condizioni di una adeguata quantità nel suolo, la sostanza organica stabilizza la struttura del suolo aumentandone la capacità

portante, diminuisce la densità apparente e ne promuove la resistenza alla deformazione e/o l'elasticità (Farrakh Nawaz et al., 2013), (M. Hamza et al., 2005).

Studi hanno evidenziato che anche in condizioni proibitive di elevata umidità, in terreni argillosi e limosi-argillosi, elevati contenuti di carbonio organico possono mitigare la problematica del compattamento (Smith et al., 1997).

Tuttavia l'effetto benefico della sostanza organica sul compattamento ha un impatto variabile e non generalizzabile. Queste differenze sembrano essere legate al rapporto C/N e al grado di resistenza alla decomposizione della sostanza, nonché al tipo di suolo e alle condizioni ambientali come umidità e temperatura. Importante è anche il tipo di sostanza organica, in quanto la forma prontamente ossidabile sembra essere più rilevante della sostanza organica totale nel determinare il comportamento meccanico del suolo. D'altra parte, meno umificata è la materia organica, maggiore è il suo effetto nell'aumentare la porosità dell'aggregato e quindi maggiore è la densità apparente del suolo. (M. Hamza et al., 2005).

Un altro fattore che ha un ruolo rilevante sul compattamento del suolo è il suo contenuto idrico (M. Hamza et al., 2005), (Horn et al., 1995), (Mosaddeghi et al., 2000). L'umidità del suolo influisce infatti sulla forza dei legami con cui interagiscono i minerali argillosi, determinando la capacità di carico o la pressione massima consentita al suolo prima di determinare una deformazione plastica (Medvedev et al., 1995).

In generale, un terreno con un contenuto di umidità molto basso è meno vulnerabile al compattamento rispetto a un terreno con un contenuto di umidità elevato (Gysi et al., 1999). Ma allo stesso modo, terreni con stato idrico molto elevato, che presentano tutti i pori del suolo pieni d'acqua, sono meno comprimibili (Smith et al., 1997). Infatti, è stata dimostrata una relazione positiva tra umidità e compattamento, in cui la vulnerabilità del suolo al compattamento aumenta all'aumentare del contenuto d'acqua fino ad un limite oltre il quale diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua (Ishaq et al., 2001). Inoltre va considerato che la perdita di porosità di un suolo compattato, si traduce in una

minore capacità di stoccaggio di aria e acqua. La perdita stimata di capacità di stoccaggio dell'acqua di un suolo compattato nel sottosuolo (0,25–1,0 m) è di circa 24 mm m^{-2} (Keller et al., 2019). Questo comporta una minore disponibilità di acqua durante il ciclo colturale e amplifica i fenomeni di ruscellamento superficiale ed erosione dei suoli (**Figura 1.6.1**). La ridotta infiltrazione dell'acqua o capacità d'invaso dei suoli è ritenuta infatti una delle cause che amplificano la gravità e l'incidenza dei fenomeni di inondazione (Keller et al., 2019).

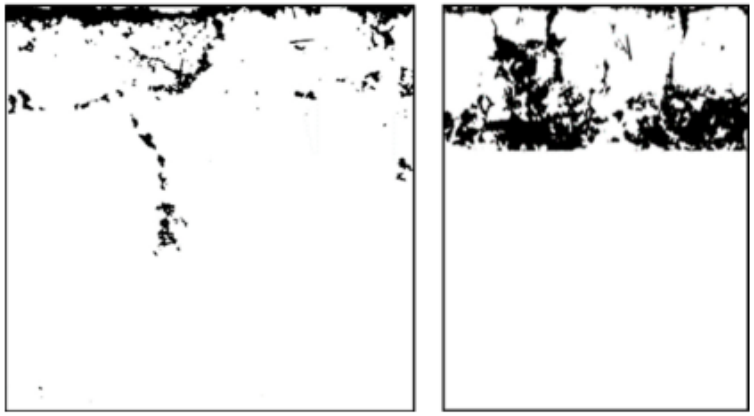

Figura 1.6.1. Modelli di flusso d'acqua (nero = percorso del flusso) ottenute da uno studio con tracciante colorante su un terreno argilloso prima (a sinistra) e dopo (a destra) il compattamento (Keller et al., 2019)

Questi fattori incidono e hanno un'entità diversa a seconda del tipo di suolo considerato.

Gli effetti del compattamento del suolo sono molteplici, perché altera lo stato chimico-fisico e biologico del suolo e quindi tutti i processi ad essi collegati. Esso altera la permeabilità del suolo all'acqua e all'aria favorendo problematiche legate al ristagno idrico e fenomeni di anossia. Questi due fenomeni a loro volta, vanno a modificare il potenziale redox del terreno modificando la disponibilità di alcuni elementi come il ferro e influiscono sul ciclo del carbonio e dell'azoto.

Alti livelli di compattamento riducono la mineralizzazione della sostanza organica e la nitrificazione netta (Tan et al., 2007) favorendo processi fermentativi e produzioni di composti fitotossici. Considerando l'aspetto ambientale, il compattamento del suolo direttamente, determina un minor efflusso di CO_2 dal

suolo (Silveira et al., 2010), ma aumenta sensibilmente i consumi di carburante per lavorazioni profonde che richiedono più carburante e in definitiva a maggiori emissioni di CO2 (Farrakh Nawaz et al., 2013).

Riguardo il ciclo dell'azoto, il compattamento del suolo aumentando il livello di umidità del terreno, favorisce la denitrificazione (Maag & Vinther, 1996) che da un lato riduce le emissioni di NO_x dal suolo (Skiba et al., 1994) ma dall'altro aumenta la volatilizzazione dell'ammoniaca, rispetto ai suoli non compattati (Soane & van Ouwerkerk, 1995). Questo si traduce in una minore disponibilità di azoto per le piante (Tan et al., 2008), quindi una minore NUE (*"Nitrogen Use Efficency"*) e ad un incremento delle emissioni di gas serra.

1.7 Gli effetti sulla pianta

In generale, il compattamento del suolo ha un impatto fortemente negativo sulla crescita delle piante, provocando una diminuzione della lunghezza della radice e una maggiore difficoltà di penetrazione della radice, che si aggrava notevolmente nel caso di colture con apparati radicali non fittonanti (Farrakh Nawaz et al., 2013).

Questo causa una minore esplorazione del suolo, limitando l'intercettazione di acqua e nutrienti abbassando notevolmente l'efficienza d'uso degli input agronomici.

Si stima che i valori di resistenza del suolo al di sopra dei quali si interrompe l'allungamento delle radici variano a seconda della coltura, ma questi in genere variano tra 2 e 2,5 MPa per la maggior parte dei seminativi (Antille et al., 2019).

Non solo la resistenza meccanica, ma anche l'elevato contenuto idrico e di composti fitotossici in ambiente asfittico, possono favorire da un lato la comparsa di malattie in particolare marciumi radicali e dall'altra un ambiente proibitivo per la crescita radicale (Fritz et al., 1995). Solitamente i danni più ingenti si riscontrano dove il compattamento interessa gli strati più superficiali, perché è su questi che si trova la maggior parte delle radici della pianta. Tuttavia il compattamento profondo altera i flussi idrici e ossidativi che possono turbare gli strati più superficiali. Inoltre si è visto che se un suolo soffre già di altre problematiche come la salinità, gli effetti drastici della compattazione del suolo

sulla crescita delle piante e sulla resa delle colture sono raddoppiati (Saqib et al., 2004).
Il compattamento quindi favorisce uno stato di stress multiplo per la pianta che si traduce in una minor fitness e quindi minore resa produttiva.

1.8 Misure di mitigazione

Diverse sono le misure di mitigazione che possono essere messe in atto per prevenire o attenuare il problema del compattamento del suolo e possono essere classificate in naturali e artificiali. Ma gli studi condotti sulle tecniche di mitigazione del compattamento del suolo hanno evidenziato che in generale, queste risultano essere deludenti, tanto che il compattamento del suolo è riconosciuto dall'Unione Europea (UE) come una grave forma di degrado del suolo (Jones et al., 2003).

I fenomeni naturali coinvolti nel recupero dei suoli compattati sono: le precipitazioni attraverso i cicli di bagnatura e essiccazione, i cicli di gelo-disgelo e l'attività biologica che comprende lo scavo di lombrichi, la penetrazione e la decomposizione delle radici. Il recupero naturale del terreno compattato però, è un processo molto complesso e lento che può richiedere in media dai 5 ai 18 anni per lo strato di 5-15 cm, ma al di sotto di questi il tempo per il recupero completo di un terreno pesantemente compattato può variare da 100 a 190 anni (Webb, 2002). La velocità di recupero varia a seconda del tipo di terreno, del grado di compattamento e dal clima (Froehlich et al., 1985). È stato riscontrato infatti, che la ripetizione di periodi alternati di secco e umido riducono il compattamento in terreni argillosi, mentre in terreni sabbiosi questi cicli naturali hanno un effetto molto minore e di conseguenza il ripristino della porosità risulta più lento (Nawaz et al., 2012).

A seguito dei lunghi tempi necessari per il recupero naturale, è necessario che nei terreni coltivati l'uomo intervenga contro il compattamento con diversi mezzi e per far questo può predisporre diverse strategie, di ordine preventivo o curativo.

Tra le misure preventive si fa riferimento a corrette pratiche agronomiche, considerando le operazioni colturali con un'umidità idonea, la riduzione delle sollecitazioni dei macchinari al suolo, l'aumento dell'area di contatto tra pneumatico e suolo, l'utilizzo di macchinari possibilmente più leggeri, massimizzare l'omogeneità della distribuzione del carico delle macchine al suolo e favorire lavorazioni veloci per diminuire il tempo di contatto tra pneumatico e suolo.

Dal lato delle macchine, per ridurre il fenomeno del compattamento del suolo, il primo obbiettivo è quello di ridurre il carico per ruota. Per far questo occorre: favorire attrezzature trainate o semi portate, considerare il corretto baricentro della macchina in lavorazione e distribuire il carico in una superficie ampia di suolo, riducendo così la pressione unitaria a cui è soggetto il suolo. Maggiore larghezza delle ruote, maggiore numero di ruote o ruote gemellate e cingoli, sono le modalità in cui si interviene per ridurre la pressione al suolo delle macchine operatrici. Relativamente all'aumento del numero di ruote, la pratica più semplice è usare ruote gemellate alle macchine operatrici, andando a distribuire il peso in maniera più efficace.

In generale, i cingoli sono migliori delle ruote nel limitare la compattazione del suolo (Erbach, 1994). Tuttavia, in letteratura si mette in risalto che le migliori performance del cingolo rispetto al compattamento del suolo, possono abbassarsi se il cingolo non ha una corretta tensione in quanto la distribuzione del carico, si concentra in corrispondenza delle ruote motrici. Inoltre va considerato che con il cingolo, la pressione al suolo anche se minore viene mantenuta per più tempo e le vibrazioni che arrivano dal motore e altre componenti della macchina, vengono trasferite maggiormente al suolo a causa del ridotto effetto della sospensione (Ansorge & Godwin, 2007). Fondamentale per avere la massima efficienza di distribuzione del peso al suolo nell'utilizzo di macchine a cingolo è il baricentro della macchina che deve essere mantenuto durante la lavorazione, altrimenti carichi eccessivi tendono a generare maggiore pressione al suolo nella parte posteriore del cingolo. Tuttavia non sempre i cingoli sono la pratica migliore per diminuire la sollecitazione creata dalla macchina al suolo. In termini di

compattamento del terreno va tenuto in considerazione anche il peso intrinseco dei cingoli, che aumenta il peso del trattore. Ad esempio, per un trattore di 120 cv, l'installazione di 4 cingoli indipendenti, può aumentare di 2000 kg il peso della macchina rispetto allo stesso trattore a ruote singole, che corrisponde a 500 kg di peso in più per unità cingolata rispetto ai pneumatici singoli. Se il peso maggiore non è necessario per trasferire la forza di traino, si consiglia quindi di valutare l'utilità dell'uso di cingoli al fine di evitare un carico inutile sul terreno. Se si vuole montare un cingolo su un trattore convenzionale, questo deve avere una potenza elevata in relazione al suo peso affinché i vantaggi dei cingoli ne giustifichino il peso aggiuntivo dei cingoli (Arvidsson et al., 2011).

Altre strategie preventive, per ridurre l'impatto del compattamento mirano alla riduzione del numero di passate, attraverso l'utilizzo di macchinari multifunzione in grado di effettuare più lavorazioni con un solo passaggio e l'utilizzo corsie di traffico in un sistema CTF (Nawaz et al., 2012). Il sistema a traffico controllato è stato adottato nell'agricoltura su scala commerciale nel 1990, inizialmente in Australia e successivamente nell'Europa settentrionale e centrale e in Canada; aiutato dalla disponibilità di macchinari in commercio e dallo sviluppo di sistemi di guida di precisione (Antille et al., 2019).

In generale, un sistema CTF si compone di: macchinari con stessa larghezza di lavoro e carreggiata in modo da limitare al minimo il traffico sul campo nell'area delle corsie di circolazione permanenti. Inoltre tutte le macchine sono in grado di guidare con precisione lungo le corsie di circolazione permanenti che sono progettate per ottimizzare il drenaggio superficiale e la logistica operativa (Antille et al., 2019).

L'interesse per l'adozione di sistemi CTF è crescente perché racchiude molteplici vantaggi. Tra i più importanti vi è la concentrazione del compattamento dovuto al passaggio delle macchine alle sole corsie di traffico generando numerosi effetti a cascata. Infatti negli appezzamenti in cui si utilizza CTF la permanenza di superficie non trafficata, favorisce il mantenimento di un terreno più morbido che offre minore resistenza agli organi lavoranti delle attrezzature, che richiedono così meno energia.

Ridotti consumi nei sistemi CTF sono dovuti anche alla minore resistenza al rotolamento e slittamento dei pneumatici sulla carreggiata permanente, favorendo una migliore trafficabilità, efficienza di trazione e minore perdita di potenza sulle corsie di circolazione rispetto al traffico su terreno coltivato. Studi teorici e sperimentali effettuati indicano un minore rotolamento della ruota su careggiate permanenti, e al contempo una forza di trazione maggiore.

Di conseguenza, in un sistema CTF la macchina operatrice perdendo meno velocità di movimento a seguito della minore resistenza incontrata sul suolo, consuma meno energia a parità di lavoro effettuato Alcune prove hanno evidenziato riduzioni del consumo di energia fino al 50% e questo è spiegato dalla stima che circa il 50% della potenza di un trattore può essere sprecato nelle operazioni di lavorazione di coltivazione e di riduzione del compattamento creato dalla trattrice stessa in un sistema non CTF (Chen & Yang, 2015). Tuttavia in letteratura ci sono limitati studi che quantificano il risparmio di energia in un sistema CTF.

Altri benefici derivanti dall'utilizzo di CTF sono associati alla tempestività delle operazioni sul campo date dalla maggiore capacità portante registrata nelle corsie di traffico, e da un incremento in precisione e uniformità, innalzando l'efficienza produttiva. Studi sull'economia di sistemi CTF mostrano che si tratta di un'innovazione tecnologica valida per ridurre i consumi energetici e gli input produttivi, migliorando la NUE a vantaggio della produttiva e la redditività aziendale. In termini di produttività, mantenendo un'area non trafficata, si migliora la struttura del suolo e la capacità di conservazione dell'acqua, con risvolti positivi nell'accrescimento e resa delle colture. Una prova ha mostrato che anche se il 30% del campo viene occupato da corsie di circolazione permanenti, il traffico controllato aumenta comunque la resa annuale totale, compensando la perdita di resa nelle corsie (Chen & Yang, 2015).

Nonostante i numerosi benefici apportati dall'utilizzo di CTF solo alcuni paesi come l'Australia adottano su larga scala questi sistemi, dove circa il 30- 40% della superficie totale di produzione di grano è gestita da CTF (Antille et al., 2019). La spiegazione può essere dettata dal fatto che in Australia ci sono organizzazioni strutturate che aiutano gli agricoltori nella programmazione, conversione delle

aziende da convenzionale a CTF, in particolare nella sostituzione e adeguamento dei macchinari ai sistemi CTF che è uno degli aspetti più difficoltosi nell'adozione di questi sistemi. Infatti le incompatibilità delle apparecchiature e la necessità modificare i macchinari per adattarli a un progetto di sistema specifico, comporta numerose difficoltà tecniche e incertezze gestionali, in particolare nelle macchine per la raccolta in quanto solitamente presentano carreggiate e pneumatici maggiori rispetto alle trattrici (Antille et al., 2019).

Per mitigare questi ostacoli sono stati sviluppati sistemi a traffico controllato stagionale, progettati per confinare la maggior parte delle operazioni sul campo a delle corsie di traffico semipermanenti, di solito ad eccezione della raccolta.

Questi sistemi rappresentano una soluzione tecnica per le industrie di ortaggi, zucchero e cotone, ad esempio, dove le incompatibilità tra le attrezzature per la raccolta utilizzate con diverse colture nella rotazione sono comuni (Antille et al., 2019).

L'utilizzo di un sistema di traffico controllato permette quindi di mantenere una zona più favorevole alla crescita delle piante, limitando il compattamento del suolo alle corsie di circolazione (Braunack et al., 1995) fornendo così una corsia di circolazione compatta e una zona di radicazione non disturbata (M. Hamza et al., 2005). Un sistema a traffico controllato interessa una porzione variabile del campo, che cambia in relazione alla colture e alle attrezzature impiegate per la coltivazione, arrivando ad occupare fino al 20% del terreno nel caso di macchine a cingoli, dove le perdite in quest'area possono essere compensate da una resa maggiore nelle fasce non transitate (Li et al., 2000).

Tra le misure curative, si può agire su due fronti, uno che riguarda la gestione colturale e l'altro che riguarda le lavorazioni. Tra le prime vi è la coltivazione di colture con apparati radicali fittonanti in grado di de-compattare il terreno, oppure l'utilizzo di cover crop per sfruttarne l'attività radicale, ma anche l'apporto di biomassa che entrando nel ciclo del carbonio comporta un aumento della SO favorendo la strutturazione del suolo. In merito alle lavorazioni, queste rivestono la principale strategia di mitigazione del compattamento del suolo e si basa sull'utilizzo di attrezzature agricole come dissodatori o de-compattatori in grado di ristabilire la porosità del suolo. La lavorazione degli strati compattati, risulta

essere il più efficace e veloce metodo per risolvere il problema del compattamento, ma va considerato che è costoso dal punto di vista energetico, riducendo i margini economici aziendali.

Inoltre, un grande svantaggio delle lavorazioni curative, è che il terreno lavorato è particolarmente vulnerabile al ricompattamento da parte del successivo traffico di macchinari e da ripetute precipitazioni di argille fini e colloidi attraverso cicli di bagnatura-essiccazione soprattutto in terreni argillosi (M. Hamza et al., 2005). Per prevenire il ricompattamento e favorire la riformazione della struttura del terreno non compattato, è necessario l'apporto di un agente legante o flocculante come gesso o sostanza organica, senza il quale la compattazione può ripresentarsi dopo poco tempo (M. A. Hamza & Anderson, 2003). A tal fine, anche l'utilizzo di corsie di traffico controllato, rallenta l'effetto della ricompattazione del terreno lavorato (Busscher et al., 2002).

CAPITOLO 3 . OBIETTIVI

Tra i vantaggi dell'utilizzo di sistemi CTF nella gestione agronomica, vi è una maggiore efficienza di trazione, che si traduce in una migliore efficienza delle operazioni e in un risparmio di energia e carburante. Tuttavia in letteratura gli studi condotti per quantificare effettivamente il risparmio energetico sono limitati. L'obiettivo della prova è stato verificare se ci sono differenze in termini di efficienza di trazione e quantificare il risparmio di carburante in un terreno gestito convenzionalmente rispetto ad una gestione basata su traffico controllato.

CAPITOLO 4. MATERIALI E METODI

4.1 Il sito e le condizioni pedoclimatiche

La prova è stata condotta presso l'azienda Lucio Toniolo dell'Università di Padova.

Il terreno utilizzato per le prove presenta un contenuto di sabbia-limo-argilla rispettivamente di 33,8 - 37 e 29,2% mentre il contenuto di SO è di 1,81%. Il campo prova è un tipico terreno coltivato, dove precedentemente sono stati coltivati cereali. Il terreno è stato arato e preparato con erpice rotante, seguendo un sistema di traffico controllato, per evitare le ormaie delle lavorazioni preparatorie nell'area di saggio della prova.

Le condizioni ambientali in cui si è condotta la prova sono state particolari. Il contenuto idrico del suolo soprattutto nei primi strati di terreno erano molto bassi. Questa condizione è stata causata da una limitata piovosità durante il periodo invernale e nei mesi precedenti la prova.

4.2 L'impostazione prova

Il campo prova era un rettilineo costituito da due parti, la prima definita "rampa di lancio" pari a circa 16 m e una di rilevazione di 10 m dove venivano eseguiti le misurazioni. Il primo tratto di 16 m è stato predisposto per far si che il trattore raggiungesse la velocità prefissata di 3,3 km/h. Inoltre questa distanza è stata utilizzata per far si che il carro frenante adeguasse la resistenza all'avanzamento per avere una forza frenante stabile, secondo i valori prefissati. I valori di carico utilizzati sono stati: 0-800-1500-2500 kg.

Per valutare l'efficienza di trazione della macchina, sono stati analizzati gli slittamenti per ogni livello di trazione. Inoltre le rilevazioni sono state condotte dopo ogni passaggio con lo scopo di valutare se e come cambiano le performance di trazione, con l'aumento del numero di passaggi, ovvero creando via via una careggiata più compatta. Essendo la forza di trazione, influenzata dallo slittamento

e dal rotolamento, innanzitutto è stato calcolato il rotolamento. Il rotolamento è stato calcolato trainando il trattore a vuoto, simulando i nove passaggi su una careggiata prefissata e tramite il dinamometro è stata calcolata la forza persa per il rotolamento. Successivamente si sono calcolati gli slittamenti per i diversi livelli di carico nei diversi passaggi. Lo slittamento è stato calcolato considerando la differenza tra i metri percorsi dalla ruota con livello di trazione zero e i 3 livelli di trazione, nei nove passaggi. Per misurare lo spazio percorso è stato marcato lo pneumatico con un segno, contati 4 giri della ruota e misurata la distanza tra inizio e fine.

Rotolamento e slittamento sono stati calcolati in primo luogo su terreno indisturbato, per simulare l'effetto su terreno lavorato. Le stesse misurazioni sono state poi eseguite per ognuno dei 9 passaggi e ripetuti per i livelli di carico di 800-1500-2500 kg. In fine sono state condotte le prove di trazione e slittamento per i tre livelli di carico sopra citati, su corsie consolidate, ovvero su terreno battuto, senza precedente passaggio di macchine in trazione. Quest'ultima prova è stata condotta per valutare se il terreno superficiale smosso dalla trattrice ad ogni passaggio, aveva un impatto sulla percentuale di slittamenti e rotolamenti della prova successiva.

4.3 Le attrezzature impiegate

I mezzi utilizzati per la prova sono 2, uno utilizzato come carro frenante e l'altro come carro trainante. La macchina utilizzata come traino e sulla quale sono state seguite le misurazioni, è un trattore fiat 680H a due ruote motrici con potenza di 50 KW. Visto il basso contenuto idrico del suolo, per aumentare le sollecitazioni al suolo per meglio rilevare e analizzare i dati durante la prova, si è deciso di aumentare il peso della macchina con dei carichi aggiuntivi. Al peso a vuoto di 3020 kg della macchina, è stata aggiunta una zavorra aggiuntiva al posteriore di 1100 kg e all'anteriore di 240 kg, portando il peso complessivo a 4360 kg. Il mezzo monta all'anteriore degli pneumatici Vredestein Multirill 7.50-16, mentre la motricità è assicurata da pneumatici Kleber traker 420/85R30 al posteriore. I pneumatici al posteriore sono stati portati ad una pressione di 1,45 bar (**Tabella 4.3.1.**).

Carico asse posteriore	Pneumatico posteriore			
Peso (kg)	Marca	Modello	Dimensione	Pressione (bar)
1980 + 1100	Kleber	traker	420/85R30	1.45
Carico asse anteriore	Pneumatico anteriore			
Peso (kg)	Marca	Modello	Dimensione	Pressione (bar)
1090 + 240	Vredestein	Multirill	7.50-16	1.70

Tabella 4.3.1. Caratteristiche tecniche del trattore utilizzato

Il trattore è stato equipaggiato con un sistema RTK di Trimble, utilizzato per seguire con elevata accuratezza la careggiata in analisi durante i passaggi successivi e rilevare la velocità della macchina. La velocità rilevata è la velocità reale del mezzo tramite sistema GPS. Tramite un sensore posto sulla presa di potenza (PTO) del trattore si si sono monitorati i giri della PTO. Sapendo che i giri della PTO hanno un rapporto di trasmissione fisso e noto con i giri motore e che a loro volta i giri motore hanno un rapporto di trasmissione fisso e misurabile con le ruote si può calcolare la velocità teorica. La velocità teorica viene calcolata al netto del calo giri motore, dovuto allo sforzo della prestazione.

Come carro frenante è stato utilizzato un prototipo aziendale triciclo, dotato di cambio idrostatico. La scelta di una macchina, con questo tipo di cambio è stata molto importante per la prova; in quanto l'operatore servendosi dell'elevata reattività del cambio idrostatico poteva modulare l'avanzamento e quindi la capacità frenante.

Per sottoporre il trattore a diversi carichi, è stato utilizzato il carro frenante collegato con una corda d'acciaio di 16 m in modo da avere uno spazio sufficientemente ampio per evitare che il carro frenante andasse a calpestare l'area soggetta ad analisi, transitata solo dal trattore trainante (**Figura 4.3.1.**). Sulla corda d'acciaio è stato posto un dinamometro (**Figura 4.3.2.**). Le rilevazioni del dinamometro venivano trasmesse in diretta in un monitor posto sul carro frenante, guidando l'operatore nella modulazione dell'avanzamento al fine di mantenere costante il carico frenante a dei valori prefissati. I dati raccolti dal dinamometro

posto sul carro frenante e del sistema RTK posto sulla trattrice sono stati registrati e poi scaricati in laboratorio.

Figura 4.3.1. Carro frenante e trattore

Figura 4.3.2. Dinamometro

4.4 Elaborazione dati

L'elaborazione dei dati per rilevare la potenza utile sulla base dei dati raccolti, si compone di più fasi. La prima è stata stimare la percentuale di slittamento per ogni passaggio, calcolata come (Bodria et al., 2013):

$$s = (d_2 - d_1 / 4) / d_2 \times 100$$

dove:

d_2 = distanza teorica su terreno lavorato (m)

d_1 = distanza reale dopo 4 giri della ruota (m)

La percentuale di slittamento è stata calcolata per i 3 livelli di trazione e anche con trazione zero, ovvero considerando gli slittamenti della sola macchina nell'avanzamento senza ulteriori carichi da trainare.

Successivamente sono stati calcolati i carichi in kg generati dal rotolamento. I carichi generati dal rotolamento sono stati ricavati dal dinamometro durante le prove di trazione.

Utilizzando i dati raccolti dal dinamometro si sono ricavati i carichi di trazione in kg, per i livelli di trazione 0-800-1500-2500 kg.

È stato poi calcolato il coefficiente di aderenza (ka) utilizzando la forza necessaria per il rotolamento calcolato come media dei valori raccolti e il peso aderente della macchina sull'asse trainante (Bodria et al., 2013). In questa prova, le ruote trainanti sono poste nell'asse posteriore perché si tratta di un trattore a 2RM con un carico sull'asse di 3530 kg.

La formula utilizzata è:

$$k_a = c_a / G_a$$

dove:

c_a = carico del rotolamento (kg)

G_a = peso aderente (kg)

Per ricavare la potenza utile che può essere utilizzata per produrre lavoro, si devono sottrarre alla potenza generata dal motore le perdite intrinseche della macchina e le perdite generate dalle condizioni esterne. Con le perdite proprie della macchina si fa riferimento a perdite di potenza per la trasmissione e per il sistema idraulico. Mentre con perdite esterne si fa riferimento all'assorbimento di potenza necessario per l'avanzamento ovvero il rotolamento. Gi assorbimenti della trasmissione e del sistema idraulico hanno dei valori caratteristici in relazione alla loro tipologia, per questo vengono utilizzati dati tabellari. In letteratura, considerando il tipo di trasmissione e impianto idraulico della macchina utilizzata per la prova, si sono utilizzati come valori di assorbimento: per la trasmissione 7 kW, mentre per l'impianto idraulico 4 kW (Bodria et al., 2013).

Per stimare l'assorbimento di potenza dovuto all'avanzamento sono stati trasformati i carichi in kg in Newton e la velocità misurata in km/h trasformata nel sistema internazionale in m/s e successivamente applicata la formula per la determinazione della potenza di rotolamento (Pr) (Bodria et al., 2013) espressa in kW:

$$Pr = Rr \times va \times 10^{-3}$$

dove:

Rr = rotolamento (N)

Va = velocità (m/s)

La stessa formula è stata utilizzata per stimare la potenza utile (Pu) per ogni livello di trazione, considerando i carichi di trazione calcolati precedentemente.

Sulla base della potenza utilizzata e il tipo di utilizzo si è considerato secondo dati in letteratura un consumo specifico di gasolio di 260 g/kWh (Bodria et al., 2013).

Tramite il rapporto tra consumo specifico e potenza utile si è stimato il consumo di carburante in kg/h per ogni livello di trazione.

Per differenza tra il consumo di carburante calcolato pe ogni passaggio rispetto al passaggio zero, ovvero su terreno lavorato è stato calcolato il risparmio di gasolio, per valutare se ci sono vantaggi in riduzione di gasolio in un sistema CTF rispetto ad una gestione a traffico non controllato.

Infine sapendo che la combustione di un kg di gasolio produce 2,6 kg di CO_2 (Consumo et al., 2012), si sono stimate le emissioni di anidride carbonica nelle diverse simulazioni in prova.

4.5 Rilevazione di densità apparente e resistenza di penetrazione

Per misurare e analizzare l'effetto sul suolo del passaggio della trattrice è stata analizzata la densità apparente e la resistenza alla penetrazione con livello di trazione zero.

Questi due parametri sono stati misurati all'inizio della prova per contestualizzare e conoscere il livello di compattamento del suolo, prima del traffico veicolare. Successivamente le misurazioni si sono ripetute per il passaggio 1, 4 e 9.

Per la misurazione della densità apparente, la prima parte si è svolta in campo, tramite la raccolta di un campione di suolo. Il campione è stato raccolto tramite l'utilizzo di una carotatrice Ejkelkamp (Veesbek, NL), al cui interno vi è un cilindro di acciaio che consente la raccolta di un volume standard di suolo. I campioni raccolta per ogni prova sono stati tre, rispettivamente a profondità di 20-40-60 cm. I campioni raccolti venivano posti su dei sacchetti, chiusi e classificati. La raccolta del campione prevedeva innanzitutto l'asportazione del terreno al di sopra delle profondità oggetto di campionamento con una trivella e poi l'utilizzo della carotatrice per il campionamento. Successivamente la seconda parte per la determinazione della densità apparente si è svolta in laboratorio, dove i campioni sono stati pesati tramite una bilancia elettronica di precisione 0,1g per ricavare il peso fresco e poi messi in stufa a 105°C per 24 h per l'essicazione. Una volta essiccati i campioni sono stati nuovamente pesati e per differenza si è ricavata l'umidità contenuta e la densità apparente espressa in g/cm^3.

Per misurare la resistenza del suolo è stato utilizzato il penetrometro Ejkelkamp Penetrologger (Veesbek, NL). È stato utilizzato un penetrometro a cono per valutare l'effetto delle condizioni del traffico sulla resistenza alla penetrazione del suolo. Il penetrometro a cono viene inserito nel terreno a velocità costante con velocità di penetrazione inferiore a 2 cm/s. Il cono utilizzato nel penetrometro ha un diametro alla base di 12,83 mm e un angolo del cono di 30°, come specificato nelle norme ASAE S313.3 ed EP 542 (Norme ASAE, 1999, 2001). Il penetrometro utilizzato rileva la resistenza alla penetrazione di ogni cm di suolo durante l'affondamento.

Lo strumento è stato montato su un supporto collegato ad un trattore (**Figura 4.5.1.**).

Figura 4.5.1. Penetrometro

Il supporto è costituito da un telaio rigido e uno scorrevole, che permette di traslare agevolmente lo strumento mantenendo la perpendicolarità con il terreno. Sul supporto è montato un pistone idraulico su cui è fissato lo strumento, che tramite la spinta idraulica permette l'affondamento dell'asta con punta conica nel terreno a velocità costante. Per ridurre l'errore dello strumento nel fissare lo zero di partenza, nell'asta di misurazione è stato applicato un piattello, opportunamente sagomato per far si che il sensore di distanza dal suolo posto sotto al display

misuri la profondità dal piattello, per avere una superficie piana in modo da evitare false letture dovute alle asperità del terreno. Le misurazioni sono state fatte prima del passaggio del trattore e successivamente a seguito dei passaggi 1,4 e 9. In tutti i casi la rilevazione di questo parametro prevedeva una misurazione ogni 5 cm a partire dal centro della corsia creata dalla trattrice, trasversalmente per tre repliche. Ogni misurazione è arrivata fino a 70 cm di profondità.

CAPITOLO 5. RISULTATI

In termini di bilancio dinamico si ipotizza che il CTF, con la presenza di corsie di traffico permanenti, possa aumentare il rendimento della potenza del trattore e quindi ridurre i consumi di gasolio attraverso principalmente due fattori: l'aumento del coefficiente di aderenza e la riduzione della resistenza all'avanzamento, proprio per la modifica delle condizioni della superficie del terreno su cui poggiano gli pneumatici.

I dati raccolti durante la prove hanno confermato la correlazione positiva tra aderenza e slittamento. All'aumentare del Ka aumenta anche la % di slittamento (**Grafico 5.1.**). I coefficienti di aderenza sono stati calcolati per i passaggi 1 che rappresenta il traffico su terreno lavorato e per i passaggi 4 e 9. Per il calcolo è stato fatto il rapporto tra i valori di trazione raccolti dal dinamometro durante i tre livelli di trazione 800, 1500 e 2500 kg e il peso gravante sull'asse posteriore dove sono poste le ruote motrici, pari a 3530 kg.

I valori di Ka raccolti sono in linea con i valori riportati in letteratura (Lazzari & Mazzetto, 2010) in particolare è stato rilevato su terreno lavorato a 0 passaggi un Ka di 0,21 fino al passaggio 9 dove i valori massimi hanno raggiunto Ka di 0,73 – 0,75. Dal grafico si evince inoltre che i livelli di aderenza più alti a parità di slittamento sono ottenute sulle corsie di traffico compatte, senza precedente transito. I minori valori di Ka tra corsie precedentemente transitate e battute sono spiegati dal terreno scavato durante il transito che crea una superficie di ancoraggio minore per i ramponi dello pneumatico rispetto alle careggiate battute.

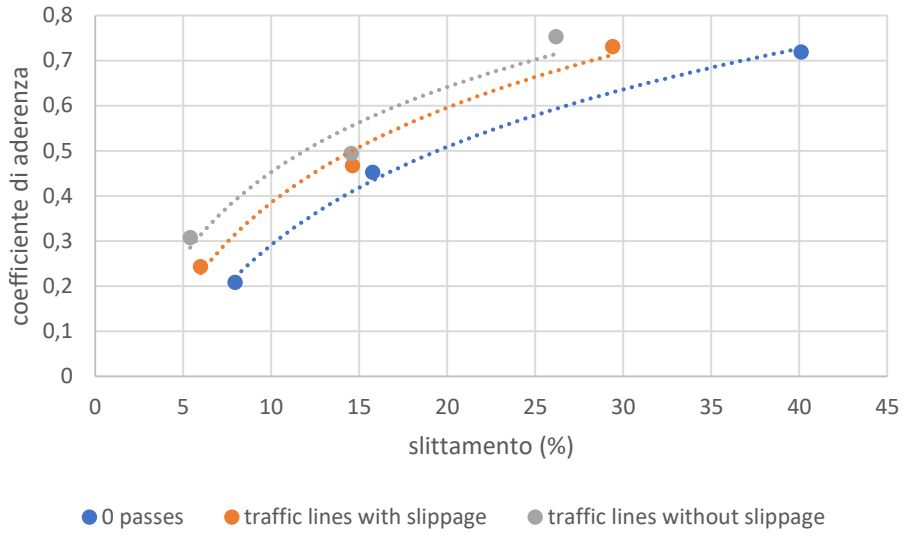

Grafico 5.1. variazione del coefficiente di aderenza su diverse linee di traffico in relazione allo slittamento

Data la correlazione positiva tra Ka e slittamento, anche le percentuali di slittamento sono minori dove il suolo risulta meno deformabile (**Grafico 5.2.**). Come atteso, si sono riscontrati linearmente per tutti i livelli di trazione slittamenti inferiori sulle careggiate battute senza precedente traffico. In particolare per il livello di trazione maggiore la percentuale di slittamento sul traffico su terreno lavorato, la trattrice ha superato il 40% di slittamento.

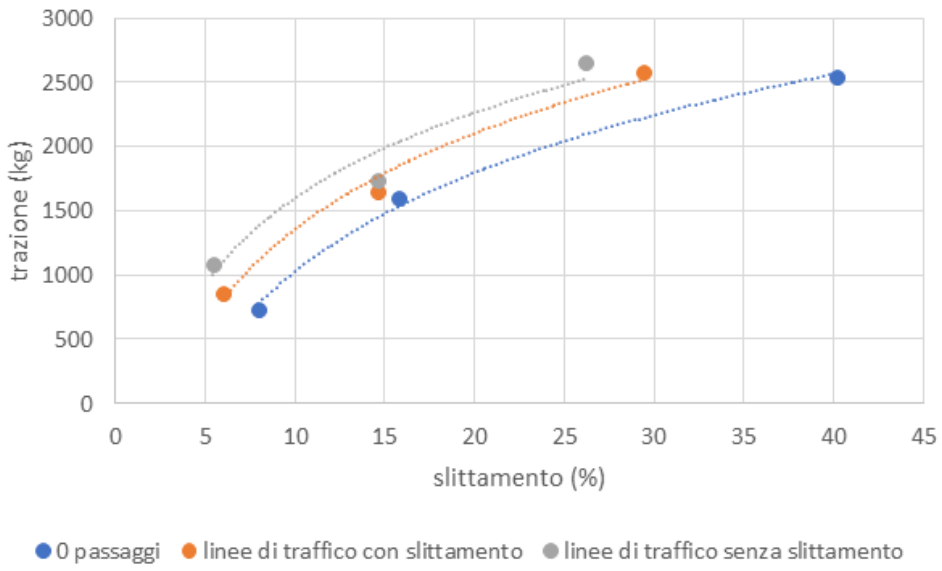

Grafico 5.2. Livelli di slittamento in funzione del livello di trazione

Minori sono le percentuali di slittamento, minore è la potenza dissipata dalla trattrice in slittamento a vantaggio della trazione. Dall'elaborazione dei dati emerge, che con carichi maggiori ci sono slittamenti maggiori (**Tabella 5.1.**).

Considerando il primo passaggio su suolo indisturbato, con livelli di carico di 800 kg, si sono riscontrate percentuali di slittamento del 7,95%, mentre con il livello di carico maggiore di 2500 kg, la percentuale di slittamento ha raggiunto il 40,11%. La differenza in percentuale di slittamento dal passaggio 2 al 9, sono invece meno marcati, per tutti i livelli di trazione con valori compresi tra 4,91 e 7,05, 14,42 e 14,81, 27,75 e 30,79 %, rispettivamente per i livelli di trazione 800-1500-2500 kg. Tra il primo e il secondo passaggio, maggiori differenze percentuali si sono riscontrate con il livello di trazione maggiore, rispettivamente di 40,11 e 30,79% con una differenza di 9,32%. Valori minori in termini di slittamento si sono riscontrati su careggiate consolidate per tutti i livelli di trazione. In particolare, maggiori differenze percentuali di slittamento tra suolo lavorato e corsie consolidate si sono ottenute con il livello di trazione massimo, dove gli slittamenti sono stati rispettivamente del 40,11% per il suolo lavorato e del 26,18% per careggiate consolidate. Calcolando la differenza percentuale tra i due slittamenti, parità di carico e livello di trazione con corsie consolidate si ha una riduzione dello slittamento del 34,73%.

Livello di trazione (kg)	0	800	1500	2500
Passaggi	slittamento (%)			
0	0,00	7,95	15,77	40,11
1	1,29	6,54	14,42	30,79
2	1,15	5,86	14,42	29,78
3	1,52	5,70	14,64	29,83
4		7,05	14,81	27,75
5	1,40	6,20	14,81	29,78
6		5,92	14,64	28,99
7	1,89	5,30	14,42	28,71
8		6,37	14,47	29,50
9	1,44	4,91	14,81	29,44
corsie consolidate		5,40	14,55	26,18

Tabella 5.1. Relazione tra numero di passaggi e percentuale di slittamento.

Come atteso anche la resistenza all'avanzamento è diminuita all'aumentare del numero di passaggi (**Grafico 5.3.**). La resistenza massima si ha durante il passaggio su terreno lavorato, dove comprensibilmente, le ruote affondandosi nel terreno soffice, creano maggiore resistenza all'avanzamento. La resistenza al rotolamento successivamente decresce progressivamente fino al passaggio 4 dove si assesta poi a dei valori tendenzialmente costanti intorno a 300kg.

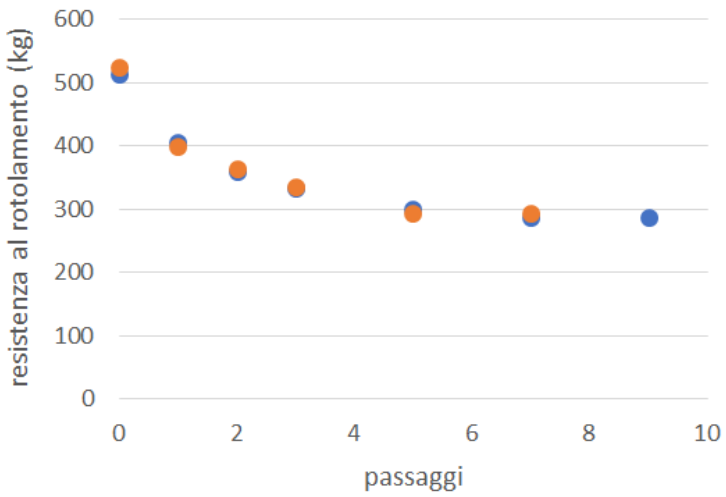

Grafico 5.3. Variazione della resistenza al rotolamento in funzione del numero di passaggi

Al primo passaggio, effettuato su terreno lavorato, si sono riscontrati carichi di 513 kg, che sono diminuiti progressivamente ad ogni passaggio, arrivando a 286 kg al passaggio 9. Riducendo la resistenza all'avanzamento del 44,25 %. dal passaggio 1 al 9. Calcolato il rotolamento, in funzione del carico gravante sull'asse posteriore di 3530 kg, si sono calcolati i coefficienti di rotolamento per ogni passaggio (**Grafico 5.4.**). Ad ogni passaggio, diminuendo il carico per rotolamento e rimanendo ovviamente costante il carico sull'asse, i coefficienti di rotolamento diminuiscono. Questi risultati sono concordi con i dati in letteratura (Bodria et al., 2013) dove per un trattore gommato si stimano i coefficienti di rotolamento (Kr) su suolo lavorato compresi tra 0,12 e 0,18.

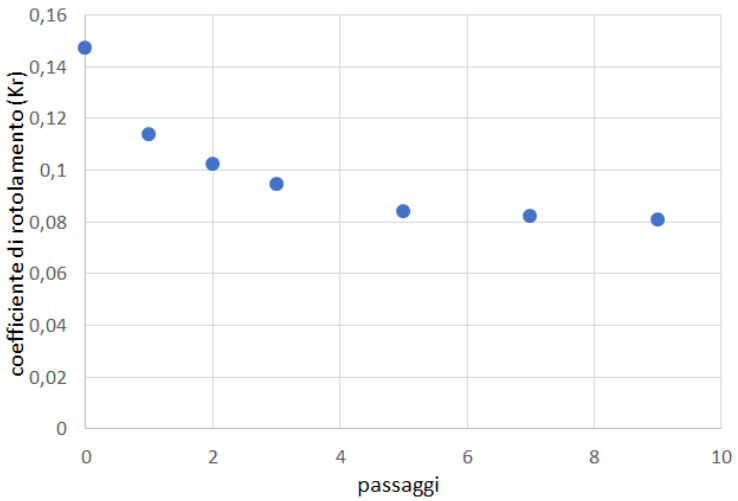

Grafico 5.4. Variazione del coefficiente di rotolamento in funzione del numero di passaggi

Diminuendo i carichi persi per il rotolamento e slittamento all'aumentare del numero di passaggi, aumenta la potenza utile che può essere spesa in trazione. Infatti i carichi utili, spesi in trazione, aumentano progressivamente all'aumentare del numero di passaggi. Traducendo in potenza i valori raccolti, si nota che la macchina, all'aumentare del numero di passaggi, per tutti i livelli di trazione utilizza meno potenza per produrre lo stesso lavoro (**Tabella 5.2.**). Su terreno lavorato la macchina su tutti i livelli di trazione richiede maggiore potenza, rispetto al transito su corsie compattate. Per i livelli di trazione di 800-1500-2500 kg, le maggiori richieste di potenza sono state rispettivamente di 2,4-3,63-11,91 kW. Di conseguenza anche i consumi di gasolio sono risultati inferiori, con differenze tra traffico su suolo lavorato e al nono passaggio del 15,41 - 13,99 -

21,21% per livelli crescenti di trazione. Considerando il traffico su suolo indisturbato rispetto a careggiate consolidate, i risparmi sono ancora più marcati, con valori di: 25,50 - 29,23 - 42,34 %.

Livello di trazione (kg)	800	1500	2500	800	1500	2500	800	1500	2500
passaggi	**potenza utilizzata (kW)**			**consumi (kg/h)**			**risparmio gasolio (%)**		
0	13,86	25,92	56,13	3,60	6,74	14,59	0,00	0,00	0,00
1	13,91	26,61	45,85	3,62	6,92	11,92	-0,36	-2,66	18,32
2	12,36	26,14	44,07	3,21	6,80	11,46	10,83	-0,85	21,49
3	12,92	22,90	43,81	3,36	5,96	11,39	6,74	11,64	21,96
4									
5	13,16	23,21	44,29	3,42	6,03	11,52	5,03	10,47	21,10
6									
7	12,48	22,39	43,80	3,24	5,82	11,39	9,94	13,62	21,97
8									
9	11,72	22,29	44,23	3,05	5,80	11,50	15,41	13,99	21,21
corsie consolidate	10,32	18,34	32,37	2,68	4,77	8,42	25,50	29,23	42,34

Tabella 5.2. Consumo e risparmio di carburante con diversi livelli di trazione e numero di passaggi.

Dal punto di vista ambientale, il risparmio di carburante equivale ad una riduzione delle emissioni di CO_2 in atmosfera. In letteratura si stima che per ogni litro di gasolio consumato da un motore, si liberino in atmosfera 2,6 kg di CO_2 (Consumo et al., 2012). Moltiplicando questo valore per il consumo rilevato dalla macchina si è ricavata la produzione di CO_2 del trattore nelle diverse condizioni ogni ora di lavoro. È stato poi calcolato il risparmio di emissioni di CO_2 per ogni passaggio rispetto al passaggio su terreno lavorato per quantificare il beneficio ambientale del traffico su careggiate rispetto al terreno lavorato (**Tabella 5.3.**).

livello di trazione (kg)	800	1500	2500	800	1500	2500	800	1500	2500
passaggi	**consumi (kg/h)**			**emissioni CO2 (Kg/h)**			**risparmio emissioni CO2 (kg/h)**		
0	3,60	6,74	14,59	9,51	17,79	38,53			
1	3,62	6,92	11,92	9,55	18,27	31,47	-0,03	-0,47	7,06
2	3,21	6,80	11,46	8,48	17,94	30,25	1,03	-0,15	8,28
3	3,36	5,96	11,39	8,87	15,72	30,07	0,64	2,07	8,46
4									
5	3,42	6,03	11,52	9,03	15,93	30,40	0,48	1,86	8,13
6									
7	3,24	5,82	11,39	8,57	15,37	30,07	0,95	2,42	8,46
8									
9	3,05	5,80	11,50	8,05	15,30	30,36	1,47	2,49	8,17
corsie consolidate	2,68	4,77	8,42	7,09	12,59	22,22	2,43	5,20	16,31

Tabella 5.3. Emissioni di CO_2 in funzione del consumo di carburante

In merito alla densità apparente, analizzando i dati raccolti si registra un aumento progressivo della densità apparente all'aumentare del numero di passaggi. Questo trend è visibile per tutte e tre le profondità analizzate, seppur con differenze (**Tabella 5.4.**). Come descritto in letteratura, l'effetto maggiore di aumento della densità apparente si ha nei primi passaggi. Infatti a tutte le profondità, si registra un aumento marcato della densità apparente tra il terreno indisturbato e il primo passaggio.

passaggi	0	1	4	9
profondità (cm)	**densità apparente (g/cm^3)**			
20	1,249	1,392	1,435	1,465
40	1,343	1,432	1,455	1,487
60	1,267	1,430	1,495	1,528

Tabella 5.4. Variazione della densità apparente a 3 diverse profondità in relazione al numero di passaggi

Anche dalla misura della resistenza alla penetrazione si vede un effetto sul terreno del passaggio della macchina. L'incremento di resistenza a causa del traffico è visibile a tutte le profondità, ma le differenze maggiori ci sono sui primi strati di suolo. In particolare a seguito del primo passaggio, la resistenza a 20 cm è incrementata del 58,78 % ovvero da 0,467 a 1,133 Mpa.

L'analisi della resistenza alla penetrazione ha evidenziato la tendenza ad un incremento della resistenza all'aumentare del numero di passaggi, seppur con valori non costanti rispetto ai dati di densità apparente.

CAPITOLO 6. DISCUSSIONE

Per ridurre le perdite di potenza dovute a slittamenti e rotolamento, una delle strategie è assicurare il traffico su corsie compatte. Questo è infatti uno dei vantaggi nell'utilizzo di sistemi CTF per l'organizzazione della viabilità dei macchinari sul campo. Le prove effettuate hanno consentito di valutare e quantificare gli effetti di slittamento e rotolamento della macchina in termini di perdita di potenza e relativi consumi di carburante nelle diverse condizioni di transito.

Considerando la relazione tra trazione e slittamento si evince che all'aumentare della forza di trazione, aumenta anche lo slittamento. Tuttavia le performance della macchina in termini di trazione cambiano significativamente in relazione alle condizioni del suolo. Su terreno lavorato, al primo passaggio per ogni livello di trazione, si registrano gli slittamenti maggiori. Ridotti notevolmente sono invece gli slittamenti dopo il primo passaggio e ancora minori su terra battuta, senza precedente passaggio di macchine in trazione. Dai dati analizzati si può vedere che su careggiate compattate, senza precedente slittamento, vi è una maggiore efficienza di trazione, poiché il terreno smosso dallo slittamento, fa aumentare gli slittamenti ai passaggi successivi. Quindi lo slittamento non solo riduce le performance in trazione della macchina e aumenta i costi durante la lavorazione, ma crea le condizioni per un maggiore slittamento anche nelle operazioni successive. Per questo in un sistema CTF, la presenza di corsie di traffico compatte riduce lo slittamento a parità di carico e lavoro rispetto al terreno lavorato, ma è consigliabile non eccedere in velocità o carico sulla macchina per evitare l'aumento degli slittamenti.

Durante lo slittamento i ramponi dello pneumatico, penetrano nel terreno e creando una forza parallela al terreno, opposta rispetto l'avanzamento smuovono i primi centimetri di suolo, destrutturandolo. Una parte di questo terreno, a seguito del pattinamento dello pneumatico viene scavato e portato all'esterno dell'ormaia, mentre una parte rimane all'interno dove crea uno strato soffice che offre minore aderenza al passaggio successivo della ruota. La prova conferma che con tutti i livelli di trazione, vi è slittamento e che esso aumenta all'aumentare del carico in

tutti i passaggi e condizione di suolo. Su terreno lavorato, si registrano slittamenti maggiori, mentre minori sono gli slittamenti su careggiate. In particolare la condizione migliore si hanno su careggiate consolidate, dove appunto viene meno il fenomeno dello slittamento. Il terreno su careggiata consolidata, non presentando lo strato di suolo smosso precedentemente offre probabilmente più aderenza per gli pneumatici e quindi aumenta le performance di trazione della macchina.

Un altro aspetto emerso e confermato da questo studio è che all'aumentare del numero di passaggi la resitenza all'avanzamento diminuisce. La presenza di careggiate più compattate a seguito dei passaggi della trattrice, riducono le perdite di potenza per l'avanzamento, in quanto la ruota, affonda meno nel terreno e si crea quindi minore resistenza. Dalle prove i valori di carico per l'avanzamento della macchina sono notevolmente più alti durante il primo passaggio su terreno lavorato rispetto ai passaggi successivi. L'energia persa per il rotolamento, su terreno lavorato, viene persa per deformare il suolo, che trovandosi destrutturato a seguito delle lavorazioni, ha bassa capacità elastica per resistere alle sollecitazioni plastiche. Per questo nei primi passaggi si ha una perdita di energia importante, mentre all'aumentare dei passaggi e su terreno battuto, le perdite iniziano a stabilizzarsi in quanto ad ogni passaggio si ha via via meno deformazione dovuta alla progressiva diminuzione di porosità e quindi minor affondamento nel suolo dello pneumatico. Questo perché all'aumentare della densità apparente, tendenzialmente aumenta anche la capacità portante del suolo, di conseguenza aumenta la capacità elastica del suolo, che va a contrastare le sollecitazioni derivanti dalla macchina, facendole perdere meno energia.

Riducendo le perdite di potenza, si ha una maggiore potenza disponibile. Questa potenza viene definita potenza utile, ed è la parte di potenza prodotta dal motore che viene sfruttata per produrre lavoro.

Impiegando meno energia per produrre lo stesso lavoro, si ha quindi un risparmio in carburante variabile a seconda del carico della macchina, con differenze tra traffico su suolo lavorato e al nono passaggio del 15,41 - 13,99 - 21,21% per i livelli di trazione 800 – 1500 - 2500 kg. Risultati simili sono stati riscontrati anche

da Chen & Yang (nel 2015), con un risparmio di carburante tra transito su terreno lavorato e su careggiate consolidate del 23,7%. Se si analizzano le differenze tra traffico su suolo indisturbato rispetto a careggiate consolidate, i risparmi sono ancora più marcati, con valori di: 25,50 - 29,23 - 42,34 %.

Il risparmio di carburante può avere diversi risvolti pratici. Primo tra tutti il minor consumo di carburante, riduce le spese per le operazioni. Moltiplicando infatti i litri ora di carburante per il prezzo al litro di acquisto si può facilmente ricavare il risparmio economico. L'incidenza del risparmio, dalla nostra prova è tanto maggiore quanto più alto è il carico sottoposto alla macchina. Infatti è con il livello di trazione più alto che si riscontra il maggior effetto positivo del transito su careggiate. Un risparmio di carburante più o meno marcato in relazione al tipo di operazione, comporta comunque un vantaggio economico. Da qui la possibilità per un'azienda agricola di utilizzare il carburante in diversi modi, uno di questi è la possibilità di eseguire un ulteriore operazione a parità di carburante utilizzato ad esempio per preparare in modo migliore il letto di semina o altre operazioni colturali come frazionare le concimazioni in più applicazioni rispetto ad un unico apporto per aumentare l'efficienza di assorbimento e utilizzazione degli input delle piante. Altre possibilità riguardano la possibilità di utilizzare il carburante risparmiato per altre operazioni come l'irrigazione. Oppure un'altra via è la possibilità di sfruttare la potenza utile risparmiata della macchina per aumentare la capacità di lavoro. Ad esempio dai dati emersi dalla prova per il livello di trazione più alto di 2500 kg, la potenza utilizzata è stata per il terreno lavorato di 56,13 kW, mentre al nono passaggio di 44,23 kW, che si traduce con ben 11.9 kW di potenza non utilizzata, ovvero del 21,20%. Questa potenza inutilizzata, se consideriamo il traffico su corsie può essere utilizzata per aumentare la velocità dell'operazione colturale oppure per aumentare la capacità di carico alla macchina. Dividendo il carico di 2500 kg per 44,23 kW si ottiene 56,52 kg/kW che è il carico sostenuto da 1 kW. Moltiplicando quindi 56,52 per 11,9 che sono i kW non utilizzati, si ottiene il carico maggiore che la macchina è in grado di sostenere, che è pari a 672,60 kg. Avere 11,9 kW aggiuntivi di potenza utile disponibile, significa quindi aumentare la capacità di traino della macchina del 26,88%. Percentuali ancora migliori possono essere raggiunte in un sistema CTF,

dove nel tempo le corsie di traffico diventano sempre più consolidate. Aumentare la capacità di trazione significa o eseguire lavorazioni più impegnative o aumentare la larghezza di lavoro, quindi la capacità di lavoro della trattrice. Incrementare la larghezza di lavoro significa ridurre la frequenza delle careggiate sugli appezzamenti, con maggiore distanza tra loro. Questo, in un sistema CTF si traduce in una maggiore superficie di coltivazione e quindi maggiori produzioni per ettaro. Inoltre, aumentare la capacità di lavoro della macchina significa anche ridurre i tempi per le operazioni, le ore di lavoro dell'operatore e della macchina, nonché il suo deperimento

Per un'azienda, il risparmio di carburante è vantaggioso per tutti i risvolti operativi, dal risparmio economico diretto all'aumento della capacità di lavoro.

Dal punto di vista ambientale consumare meno significa inquinare meno. Riducendo consumo di gasolio, si riducono le emissioni di CO2 in atmosfera. Considerando il livello di trazione massimo dove maggiori sono stati i risparmi energetici, per eseguire la stessa operazione, nella prova al nono passaggio rispetto al transito su suolo lavorato si ha una riduzione delle emissioni di CO2 del 21,20%. Ma riduzioni ancora maggiori si sono ottenute sul traffico su corsie consolidate, rispetto al passaggio su suolo lavorato, dove le emissioni di anidride carbonica sono state quasi dimezzate, con una differenza percentuale del 42,34%.

Misurando la densità apparente e la resistenza del suolo durante le prove si vede l'andamento del compattamento del suolo. In particolare entrambi i parametri utilizzati hanno mostrato una correlazione positiva tra numero di passaggi e compattamento del suolo. Infatti come riportato in letteratura all'aumentare del numero di passaggi tendenzialmente aumenta anche il compattamento.

Come l'atteso è stato visto un rapido incremento della densità apparente tra suolo indisturbato e il primo passaggio, con effetti seppur positivi ma meno marcati con l'aumentare del numero di passaggi. Questi risultati sono concordi con quanto riportato in letteratura, in quanto essendo la densità apparente una misura della porosità del suolo, su terreno indisturbato vi è una grande porosità, che viene ridotta bruscamente dopo il primo passaggio. Riducendo molto la porosità, i

passaggi successivi hanno impatti progressivamente minori perché la porosità è progressivamente minore. Secondo i dati raccolti, l'effetto minore dei passaggi sulla densità apparente, lo si ha avuto per le misurazioni svolte a 40 cm. Da notare è anche l'effetto del transito a 60 cm di profondità che seppur meno ingente, comunque ha seguito il trend dei valori raccolti alle profondità inferiori.

Dall'analisi della resistenza alla penetrazione al suolo, è visibile un aumento della pressione in corrispondenza dei 40-50 cm (**Grafico 6.1.**).

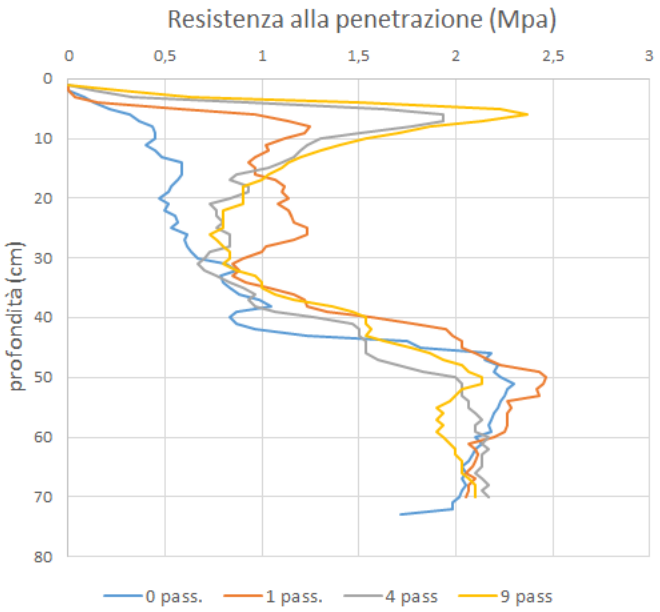

Grafico (6.1.) Variazione della resistenza alla penetrazione a diverse profondità in relazione al numero di passaggi

Il terreno utilizzato per le prove viene convenzionalmente arato a 40 cm di profondità, con un'aratura entro solco, dove le ruote del trattore transitando nel solco, creano la cosiddetta "suola di aratura". Il fatto che il transito della macchina interessi uno strato ancora inferiore a quello originato dall'aratura che già si presenta compatto, fa riflettere sull'estensione e la difficoltà del monitoraggio del compattamento nei suoli agricoli. Lo strato di suolo in cui vi è un maggiore incremento della resistenza alla penetrazione, è quello dei primi 20 cm. Superata questa profondità le differenze tra i passaggi tendono a diminuire fino a 40 cm e a

profondità ancora più bassa le differenze si assottigliano progressivamente. Questi dati testimoniano che il traffico del trattore comporta un maggiore compattamento nei primi strati di suolo, rispetto agli strati più profondi. Tuttavia anche l'analisi della resistenza alla penetrazione come l'analisi della densità apparente hanno dimostrato che il traffico veicolare ha un effetto negativo a tutte le profondità analizzate. Inoltre l'analisi della resistenza alla penetrazione evidenzia che a profondità inferiori ai 40 cm il terreno presenta una maggiore resistenza.

CONCLUSIONI

Il fenomeno del compattamento del suolo è una minaccia reale, la cui entità e gravità spesso è sconosciuta. I danni a lungo termine promossi da questo fenomeno implicano una rivisitazione delle convenzionali pratiche agricole, dove negli anni c'è stato un progressivo aumento della meccanizzazione e del peso delle macchine in agricoltura che hanno intensificato il rischio del compattamento. Spesso si ricorre a misure di mitigazione curative perché sembrano essere la risposta immediata al problema, tuttavia sono poco risolutive e necessitano di elevate quantità di energia. Nell'ottica di un agricoltura più efficiente e a minori emissioni, una via per affrontare questa problematica è l'utilizzo di sistemi CTF. Questi sistemi, consentono di evitare lavorazioni profonde ed energivore perché vanno ad interessare una porzione limitata del campo, lasciando aree di coltivazioni indisturbate per la crescita delle colture. I sistemi CTF presentano numerosi vantaggi, quelli trattati in questa prova hanno dimostrato una minore richiesta di potenza nelle careggiate a traffico controllato rispetto al traffico su suolo indisturbato. Questo studio ha provato che con sistemi CTF vi sono significative riduzioni di potenza persa per rotolamento e slittamento. Il risparmio di energia persa si traduce in una maggiore potenza utile della macchina che può essere utilizzata per incrementare la capacità di traino o di lavoro, riducendo di conseguenza le tare causate dalle careggiate del traffico controllato incrementando quindi le potenzialità produttive degli appezzamenti. Riducendo la potenza persa, si ha un risparmio di carburante rilevante in particolare con alti livelli di carico, che significano dal lato ambientale minori emissioni di CO_2 e dal lato economico una riduzione dei costi a vantaggio della PLV aziendale.

I dati raccolti di densità apparente e resistenza alla penetrazione, dimostrano che l'effetto negativo del traffico della macchina ha un impatto maggiore a seguito del passaggio su terreno indisturbato, che essendo incoerente presenta una minore capacità portante ed è più sensibile alle sollecitazioni derivanti dalla macchina. Inoltre è stata dimostrato che le sollecitazioni generate dal traffico della trattrice interessano profondità superiori a quella comunemente lavorata. Questo dimostra

che il traffico ha un impatto importante sul suolo e che una possibilità per ridurre l'estensione del compattamento nei terreni è l'utilizzo di un sistema CTF, dove è stato dimostrato che l'aumento di densità apparente e resistenza alla penetrazione a passaggi successivi cala progressivamente con la formazione di careggiate sempre più consolidate.

BIBLIOGRAFIA

Akker, J. Van den, Und, A. C.-Z. für K., & 2001, U. (2001). Two European concerted actions on subsoil compaction. *Research.Wur.Nl*. https://research.wur.nl/en/publications/two-european-concerted-actions-on-subsoil-compaction

Ansorge, D., & Godwin, R. J. (2007). The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: Single axle-studies. *Biosystems Engineering*, *98*(1), 115–126. https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2007.06.005

Ansorge, D., & Godwin, R. J. (2008). The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction—Part 2: Multi-axle machine studies. *Biosystems Engineering*, *99*(3), 338–347. https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2007.11.014

Antille, D. L., Peets, S., Galambošová, J., Botta, G. F., Rataj, V., Macak, M., Tullberg, J. N., Chamen, W. C. T., White, D. R., Misiewicz, P. A., Hargreaves, P. R., Bienvenido, J. F., & Godwin, R. J. (2019). Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*, *17*(3), 653–682. https://doi.org/10.15159/AR.19.133

Arvidsson, J., & Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research*, *96*(1–2), 284–291. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2007.06.012

Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T., & Gilbertsson, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. *Soil and TillageResearch*, *117*, 103–109. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2011.09.004

Bodria L., Pellizzi G. e Piccarolo P. 2013. Meccanica e meccanizzazione agricola. Bologna: Edagricole – Edizioni Agricole de Il sole 24 ORE spa

Braunack, M., McPhee, J., Of, D. R.-A. J., & 1995, U. (1995). Controlled traffic to increase productivity of irrigated row crops in the semi-arid tropics. *CSIRO Publishing*. https://www.publish.csiro.au/an/EA9950503

Bulgakov, V., Olt, J., Kuvachov, V., & Smolinskyi, S. (2020). A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus*, *31*(1), 10–16. https://doi.org/10.15159/jas.20.08

Busscher, W., Bauer, P., Research, J. F.-S. and T., & 2002, U. (2002). Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198702000831?casa_token=z7Emdb7SViYAAAAA:pe7Dm4vWkuOkOmtw_iFNT9n6-LE24FS0mNS5_YRtZLuDHOllaodgV5C7RUeHRJ3jXkjmyWQiUjU

Cannell, R. (1977). Aerazione e compattazione del suolo in relazione alla crescita delle radici e alla gestione del suolo. *Biologia Applicata*. https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302472823

Chen, H., & Yang, Y. (2015). Effect of controlled traffic system on machine fuel saving in annual two crops region in North China Plain. *Soil and Tillage Research*, *153*, 137–144. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2015.06.001

Consumo, S. U. L., Delle, E., Ing, P., Lorenzo, M., Arch, D., & Bossi, B. (2012). *Di Cantiere "*. https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/79998/3/2013_04_Guastalegname.pdf

Czarnecki, J., Brennensthul, M., Białczyk, W., Ptak, W., & Gil, Ł. (2019). Analysis of Traction Properties and Power of Wheels Used on Various Agricultural Soils. *Agricultural Engineering*, *23*(1), 13–23. https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0002

Erbach, D. C. (1994). Benefits of Tracked Vehicles in Crop Production. *Developments in Agricultural Engineering*, *11*(C), 501–520. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50029-5

Farrakh Nawaz, M., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). *Soil compaction impact and modelling. A review*. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8

Flowers, M. D., & Lal, R. (1998). Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil and Tillage Research*, *48*(1–2), 21–35. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00095-6

Fritz, V. A., Allmaras, R. R., Pfleger, F. L., & Davis, D. W. (1995). Oat residue and soil compaction influences on common root rot (Aphanomyes euteiches) of peas in a fine-textured soil. *Plant and Soil 1995 171:2*, *171*(2), 235–244. https://doi.org/10.1007/BF00010277

Froehlich, H. A., Miles, D. W. R., & Robbins, R. W. (1985). Soil Bulk Density Recovery on Compacted Skid Trails in Central Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, *49*(4), 1015–1017. https://doi.org/10.2136/SSSAJ1985.03615995004900040045X

Gysi, M., Ott, A., & Flühler, H. (1999). Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, *52*(3–4), 141–151. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00066-5

Hamza, M. A., & Anderson, W. (2003). Risposte delle proprietà del suolo e della resa del grano allo strappo profondo e all'applicazione di gesso in un terreno sabbioso argilloso compatto in contrasto con un terreno argilloso sabbioso in ... *Australian Journal of Agricultural*. https://doi.org/10.1071/AR01099

Hamza, M., Research, W. A.-S. and tillage, & 2005, U. (2005). Soil compaction

in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704001849

Horn, R., Domzzał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., & van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, *35*(1–2), 23–36. https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C

Ishaq, M., Hassan, A., Saeed, M., Ibrahim, M., & Lal, R. (2001). Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: I. Soil physical properties and crop yield. *Soil and Tillage Research*, *59*(1–2), 57–65. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00189-6

Jones, R. J. A., Spoor, G., & Thomasson, A. J. (2003). Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil and Tillage Research*, *73*(1–2), 131–143. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00106-5

Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, *194*, 104293. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.104293

Lazzari M., Mazzetto F., Prontuario di Meccanica agraria e meccanizzazione, REDA, Roma, 2010

Li, H., Gao, H., Chen, J., Li, W., Engineering, R. L. A., & 2000, U. (2000). Study on controlled traffic with conservative tillage. *Cabdirect.Org*. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20002402788

Maag, M., & Vinther, F. P. (1996). Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology*, *4*(1), 5–14. https://doi.org/10.1016/0929-1393(96)00106-0

McGarry, D. (2003). Tillage and Soil Compaction. *Conservation Agriculture*, 307–316. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1143-2_37

Medvedev, V., Research, W. C.-S. and T., & 1995, U. (1995). Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167198795005013

Mosaddeghi, M., Hajabbasi, M., … A. H.-S. and T., & 2000, U. (2000). Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198700001021

Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2012). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development 2012 33:2*, *33*(2), 291–309. https://doi.org/10.1007/S13593-011-0071-8

Panayiotopoulos, K., & Papadopoulou, C. (1994). Resistenza alla compattazione e alla penetrazione di un Alfisol ed Entisol e loro influenza sulla crescita delle radici delle piantine di mais. *Suolo e Lavorazione Del Terreno*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167198794900396

Saqib, M., Akhtar, J., & Qureshi, R. (2004). Studio in vaso sulla crescita del frumento in terreni salini e compatti allagati: II. Crescita delle radici e relazioni ioniche fogliari. *Ricerca Sul Suolo e La Lavorazione Del Terreno*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704000170

Silveira, M. L., Comerford, N. B., Reddy, K. R., Prenger, J., & DeBusk, W. F. (2010). Influence of military land uses on soil carbon dynamics in forest ecosystems of Georgia, USA. *Ecological Indicators*, *10*(4), 905–909. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2010.01.009

Skiba, U., Fowler, D., & Smith, K. (1994). Emissions of NO and N2O from Soils. *Non-CO2 Greenhouse Gases: Why and How to Control?*, 153–158. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0982-6_15

Smith, C., Johnston, M., Research, S. L.-S. and T., & 1997, U. (1997). Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198797000238

Soane, B. D., & van Ouwerkerk, C. (1995). Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research*, *35*(1–2), 5–22. https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00475-8

Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *13*(1), 57–66. https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2013.01.004

Tan, X., Chang, S. X., & Kabzems, R. (2008). Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, *44*(3), 471–479. https://doi.org/10.1007/S00374-007-0229-3

Tan, X., Research, S. C.-S. and T., & 2007, U. (2007). Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198706000754

Webb, R. H. (2002). Recovery of severely compacted soils in the Mojave Desert, California, USA. *Arid Land Research and Management*, *16*(3), 291–305. https://doi.org/10.1080/153249802760284829