

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Corso di laurea in  
Tecnologie Forestali e Ambientali**

**Analisi dei raggi di curvatura di  
un rimorchio forestale con telaio  
articolato, a due assi e a passo variabile  
per il trasporto di legname**

**Relatore:**

**Prof. Raffaele Cavalli**

**Correlatori:**

**Dott. Stefano Grigolato**

**Dott. Francesco Marinello**

**Laureando:**

**Massimo Vaccher**

**Matricola n. 608772/TFA**

**ANNO ACCADEMICO 2012 - 2013**



*Ai miei figli*

*Valeria e Diego*

*“ Il foglio e l'albero. Il foglio porta l'albero e l'albero porta le foglie.*

*Il foglio porta l'albero quindi la logica delle relazioni.*

*La relazione viene definita dalla giuntura e dalla separazione.*

*Due cose sono in relazione fra di esse se sono al tempo stesso giunte e separate”.*

*Armando Verdiglione*





# INDICE

Riassunto	6	
Ringraziamenti	8	
1	Introduzione	9
1.1	Tipologia di rimorchi forestali per il trasporto di legname	11
1.2	Obbiettivi	15
2	Metodologia	17
2.1	Rilievo delle caratteristiche geometriche del rimorchio e della motrice	17
2.2	Caso di studio	24
2.3	Studio delle traiettorie e ingombri in campo su tracciato stradale con caratteristiche geometriche note	26
2.4	Studio sulla velocità del sistema di trasporto	37
2.5	Determinazione degli angoli di sterzata	39
2.6	Determinazione dei raggi di sterzata degli assi	43
2.7	Disegno 2D su CAD dei raggi di curvatura interni ed esterni	50
2.8	Disegno traiettoria dei raggi di curvatura in tornanti con raggio di curvatura centro strada variabile da 6 a 12 metri	52
3	Risultati	55
3.1	Determinazione del raggio di curvatura minimo che consente al complesso trattrice-rimorchio di procedere senza manovre	55
3.2	Caratteristiche di tornanti per il transito del veicolo	63
4	Discussioni e conclusioni	73
Bibliografia	75	
Siti Internet	78	

## RIASSUNTO / ABSTRACT

[IT]

Il presente elaborato raccoglie un'analisi di molteplici dati, relativi ad uno speciale rimorchio forestale, di recente tecnologia, per il trasporto su strade forestali di legname con lunghezze eccezionali.

Inizialmente, è stato individuato nella località di Longarone (BL), un caso studio per il trasporto di legname.

Per un quadro conoscitivo sul tracciato della viabilità forestale, e con lo scopo di eseguire i rilievi geometrici, si è provveduto ad un sopralluogo tecnico.

Sono stati esaminati dei tratti del tracciato, con riguardo: alla larghezza della carreggiata su strettoie, alla larghezza minima e massima della carreggiata su tornanti e su piazzali di manovra.

Per valutare tecnicamente il rimorchio forestale articolato e le sue potenzialità per il trasporto, è stato eseguito un rilievo dimensionale accurato dell'intero convoglio forestale, formato da una trattoria forestale e da un rimorchio con telaio articolato.

In occasione della fase di esbosco su strada forestale, si è provveduto alla verifica di fattibilità del trasporto su alcuni tratti della viabilità: su uno specifico tornante rappresentativo con raggio della carreggiata di 8 metri; e su particolare curva a 90° con restringimento carreggiata in uscita.

Ulteriori accertamenti sono stati eseguiti per verificare la manovrabilità del convoglio forestale: sulla manovra di retromarcia su tornante; sulla manovra di inversione di marcia su piazzola.

Con i rilievi dimensionali del convoglio forestale e quelli geometrici del tracciato stradale, è stato eseguito uno studio del ingombro e delle traiettorie del convoglio in fase di manovra. Gli angoli e i raggi di sterzata sono stati calcolati con formule matematiche, e dove non è stato possibile, si è provveduto alla simulazione delle manovre in ambiente CAD. Disegnando i raggi di curvatura e le linee di traiettoria sono state ottenute le dimensioni cercate.

Un'ultima analisi tecnica, è stata quella di rilevare la lunghezza del tracciato sull'intera viabilità, mediante lo strumento GPS. E per mezzo del programma GIS, sono stati elaborati i dati registrati dal GPS, ottenendo la velocità media del convoglio e il tempo di percorrenza.

[EN]

The present study contains an analysis of various data relating to a special forestry trailer having the latest technology, for transportation of forest roads with timber loads of exceptional lengths.

Initially, it was located in the town of Longarone (BL), a case study for the transport of timber.

In order to have a global view of the layout of forest roads, and with the purpose of executing the geometrical surveys, steps were taken to do a technical survey.

Some parts of the route were examined in respect: to the width of the carriageway of the bottlenecks, of the minimum and maximum width of the roadway on bends and on yards of maneuver.

To technically evaluate the articulated trailer forestry and its potential for transportation, a thorough dimensional relief convoy was carried out, consisting of a forest tractor and a trailer with articulated chassis.

During the skidding phase on forest road, steps were taken to check the feasibility of transport on some stretches of the road: a specific typical bend with a roadway radius of 8 meters, and a specific 90° bend with a narrowing of the carriageway in outbound.

Additional checks were performed to ascertain the manoeuvrability of the forest convoy: going in reverse on a bend; gear reversing in turning areas.

With the dimensional measurements of the convoy forestry and geometric ones of the road layout, was performed a study of the overall dimensions and the trajectories of the convoy in the operating phase.

The angles and the turning radii were calculated with mathematical formulas, and in cases where this was not possible the simulation of the manoeuvres in CAD environment was provided for.

The dimensional sought were obtained by drawing the radii of curvature and the trajectory lines.

A final analysis technique, has been to detect the length of the track on the whole road network, by means of the instrument GPS.

Also, the data recorded by the GPS was elaborated by the GIS program, and the average speed of the convoy and overall travel time were obtained.

## RINGRAZIAMENTI

Colgo l'occasione, per ringraziare i docenti del corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali dell'Università di Padova, istituzione che mi ha permesso di integrare ed approfondire interessanti aspetti culturali.

Iscrivendomi al corso di laurea in Scienze Forestali e Ambientali, ho frequentato l'Università per tre anni, dal 1989 al 1992, conseguendo una parte di esami. Con malincuore, per motivi familiari, sono stato costretto ad interrompere la prosecuzione degli studi.

Nel 2009, i miei cari genitori Adelia e Luciano, mi hanno ricordato che avevo in sospeso il progetto studi. Questa provocazione diventò pulsionale. Così pensai di riscrivermi come ex novo alla stessa facoltà.

E' stato interessante riprendere gli studi, che mi hanno messo a dura prova di tenacia. Infatti ho dovuto organizzare al meglio le ore per il lavoro, per lo studio e per l'ascolto dei miei figli. A quest'ultimi dedico la tesi con un aforisma: "l'arte vera è quell'arte che non fa vedere lo sforzo".

Esprimo un particolare ringraziamento: al p.i. Denis Pighin, per il suo prezioso supporto alle realizzazioni grafiche; alla dottoressa Liliana Bomben, per lo stimolo e per i suggerimenti in questi anni di studio; alla dottoressa Antonella Silvestrini, che mi ha riaccessò l'entusiasmo per la ricerca al valore della parola.

# 1 INTRODUZIONE

Il patrimonio agro-silvo-pastorale costituisce un valore, in ampie porzioni su tutto il territorio nazionale, in particolare nelle zone montane e collinari. La viabilità agro-silvo-pastorale, è una infrastruttura importante e indispensabile, per gestire razionalmente ed economicamente tale patrimonio. L'eventuale assenza di una accessibilità stradale, comporta il rischio dell'abbandono del comprensorio. L'isolamento e l'impossibilità di trasportare a valle i beni forestali, limitano l'utilizzo del comprensorio per un uso produttivo e gestionale (Cielo et al., 2003).

Per una gestione continuativa del bosco con obiettivi economici, è indispensabile valutare il livello di accessibilità sia in termini quantitativi (sull'intera estensione della superficie forestale), che qualitativi (sulla buona condizione di percorribilità) (Cavalli et al., 2010).

La viabilità forestale è di fondamentale importanza per l'espletazione degli interventi di carattere selvicolturale e non, che permettono di valorizzare il bosco e le sue funzioni. Per poter praticare attivamente la selvicoltura, è indispensabile poter accedere ai boschi con il minor tempo e con le minime risorse, per questo sono necessarie le strade e le piste forestali (Hippoliti, 1998).

Le utilizzazioni forestali, le attività di prevenzione e sistemazione dei dissesti idrogeologici, la viabilità ai mezzi antincendio, richiedono un'accessibilità al bosco, che può essere garantita da una rete stradale. Anche se tuttavia la costruzione delle strade viene giudicata come potenziale impatto ambientale. Questo impatto ambientale può essere ridotto utilizzando le metodologie e le tecniche nelle fasi di progettazione, di costruzione e manutenzione delle strade. Si ottengono i migliori risultati, attraverso una attenta scelta dei tracciati, con un ridotto movimento della terra, con la realizzazione di un sistema funzionale di drenaggi, e con il consolidamento delle scarpate con l'inerbimento (Marchi e Spinelli, 1997)

Le principali funzioni delle strade forestali sono quelle: di permettere all'uomo con i suoi mezzi un agevole accesso al bosco; di consentire l'asportazione di legna e legname utilizzato. Per queste funzioni, le strade devono sempre consentire l'accesso al bosco, anche con condizioni climatiche sfavorevoli. Devono permettere la transitabilità ai mezzi utilizzati dagli addetti delle imprese boschive, ai mezzi per il trasporto del legname e di legna. Per tanto, le strade devono essere costruite per avere una sufficiente portanza. A questo scopo, la carreggiata è normalmente inghiaziata o massiciata, e sulle strade trattorabili ha una larghezza di 3,5÷4 metri (Hippoliti, 1998).

Considerato che, le strade forestali servono per facilitare l'uomo all'accesso al bosco, se un bosco non necessita di interventi, non ha bisogno di strade. Se un bosco richiede degli interventi a lunghi intervalli, sarà scarsamente servito da strade. Se in un bosco sono necessari interventi frequenti, è necessario che sia ben servito da strade. Dovranno essere ben serviti da strade i seguenti boschi: fustaie altamente produttive, rimboschimenti, cedui in conversione. Per tanto è indispensabile una adeguata rete di strade per la realizzazione di una selvicoltura razionale e concreta (Hippoliti, 1976).

La viabilità forestale è rappresentata: dalla rete viabile principale e dalla rete viabile secondaria (Hippoliti, 1976).

Il presente studio prende in riferimento la rete viabile principale o rete di strade forestali, formata da strade camionabili e trattorabili. La viabilità principale facilita l'accesso al bosco con i mezzi da lavoro forestale e, altrettanto consente l'asportazione del legname (Hippoliti, 1976).

La rete viabile principale è formata da carrarecce (per la circolazione di trattori con rimorchi), da camionabili secondarie (per il transito di autocarri), da camionabili principali (per la circolazione di autotreni e autoarticolati) (Hippoliti, 1976).

La scelta opportuna di costruire una strada camionabile piuttosto di una carrareccia, dipende dal costo annuo (ammortamento, interesse, manutenzione) della camionabile e dal costo del trasporto del legname sulla carrareccia (Hippoliti, 1976). Il valore della quantità (in mc) di legname trasportato annualmente, ci permetterà di scegliere quale strada conviene costruire. Altro fattore importante per il ragionamento di convenienza, è quello di tener presente la larghezza della traccia necessaria e della sua pendenza (Hippoliti, 1976).

La reale disponibilità di legname è influenzata dai costi per l'approvvigionamento.

I costi per l'approvvigionamento dipendono da vari fattori, quali: l'organizzazione e l'efficienza delle imprese boschive; il trasporto; la quantità di legname disponibile (Cavalli et al., 2010).

Il trasporto è condizionato dalle caratteristiche della infrastruttura viaria: le strade forestali, i piazzali e gli imposti determinano la disponibilità degli spazi di manovra, di accessibilità dei mezzi e la distanza di conferimento (Cavalli et al., 2010).

Il costo del trasporto, è in funzione della tipologia di sistema utilizzato (trattore con rimorchio, autocarro, autoarticolato), e sulla distanza percorsa. Solitamente per ciascun sistema di trasporto, la variabile distanza viene quantificata attraverso l'analisi GIS (Cavalli et al., 2010).

Il presente caso di studio, analizza la possibilità di un approvvigionamento di legname in un particolare contesto forestale, con l'utilizzo di un convoglio forestale articolato, formato da una trattrice e un rimorchio articolato con raggio di sterzo variabile.

L'analisi evidenzia le caratteristiche del convoglio forestale in relazione all'accessibilità della viabilità forestale. Evidenzia anche le caratteristiche della viabilità forestale, che influenzano le modalità di approvvigionamento per quanto riguarda il trasporto su rete viabile principale.

## 1.1 TIPOLOGIE DI RIMORCHI FORESTALI PER IL TRASPORTO DI LEGNAME

In genere, la categoria dei rimorchi forestali, permette il trasporto di legname su strade e piste forestali.

Le caratteristiche che distinguono i rimorchi forestali dai comuni rimorchi agricoli sono:

- la maggior robustezza;
- la migliore manovrabilità;
- la performante mobilità.

I carichi rilevanti di legname, richiedono mezzi strutturalmente robusti, in grado di resistere al carico e alle diverse sollecitazioni che agiscono durante il transito su strade forestali.

I rimorchi forestali, vengono maggiormente rinforzati su specifici punti più sollecitati, e vengono sovradimensionati sulle assi principali e portanti.

Le altre caratteristiche interessanti, che devono possedere i rimorchi, sono:

- la manovrabilità;
- la mobilità.

Queste caratteristiche permettono di operare in quegli ambienti, in cui sono numerosi gli ostacoli, e i terreni sono sconnessi.

Perciò, i rimorchi vengono costruiti in modo che:

- gli ingombri siano minimi;
- la luce ampia;
- il baricentro basso.

I rimorchi forestali possiedono un assale con due ruote motrici, con dimensioni di larghezza maggiorata rispetto a quelle di un rimorchio per uso agricolo.

La motricità dell'assale viene trasmessa con un collegamento (giunto cardanico), alla presa di forza sincronizzata del trattore.

L'assale trainante del rimorchio, è sempre in posizione anteriore, e ha una funzione fondamentale per la movimentazione del rimorchio. In fatti, bensì la trattoria forestale sia dotata di quattro ruote motrici per il traino, è necessario che il rimorchio abbia l'autotrazione, visto che su di esso grava un peso maggiore.

Le ruote motrici del rimorchio, permettono al veicolo una buona forza per la salita e una buona frenatura nella discesa.

Il rimorchio forestale è strutturato da un telaio portante, il quale ha un prolungamento anteriore di forma triangolare e viene detto timone. Il timone permette il collegamento del rimorchio con la trattoria.

Esistono diversi modelli di timone:

- in versione fissa;
- in versione sterzate a snodo meccanico (ralla);
- in versione sterzante a comando idraulico (pistone), con oscillazione di  $\pm 33^\circ \div 36^\circ$ .

Il telaio del rimorchio è una struttura che fa corpo unico con gli assali, i quali a loro volta lo sostengono.

Il telaio può essere costituito:

- da traverse fisse e sagomate, per il sostegno dei tronchi;
- rivestito con una lamiera striata anti-usura, per ottenere un pianale di carico.

Il pianale di carico, in certi modelli di rimorchio, è incernierato sul telaio e per mezzo di un pistone idraulico può inclinarsi verso l'alto, permettendo così lo scarico rapido del legname sfuso.

Il ribaltamento idraulico può avvenire:

- posteriormente;
- trilaterale (posteriormente e sui lati).

Il pianale di carico può essere dotato:

- di sponde;
- di piantoni;
- di traverse porta pali.

I pianali dei rimorchi, hanno una base rettangolare con dimensioni variabili secondo il modello. Solitamente per un rimorchio con portata di 14000 kg, le dimensioni di larghezza per lunghezza sono 4300 x 6600 mm.



Gli assali possono essere di varie tipologie:

- completamente rigidi;
- dotati di sospensioni a balestra cantilever;
- dotati di sospensioni idrauliche indipendenti (tipo a bilanciere o bogie, e con oscillazione  $\pm 20^\circ \div 22^\circ$ ).

Le sospensioni idrauliche hanno il vantaggio, di permettere alle ruote del rimorchio di mantenere sempre il contatto a terra sia su strada, che su pista forestale.

Il rimorchio può essere di tipo:

- mono-assale;
- bi-assale;
- tri-assale.

Il mono-assale ha una capacità di portata fino a 6000 kg.

Il bi-assale è strutturato con dimensioni maggiori del mono-assale, e ha una portata di carico superiore, fino a 14000 kg.

I rimorchi tri-assale, sono considerati rimorchi speciali. Spesso sono dotati di una gru industriale, e se progettati secondo le esigenze, divengono delle vere macchine operatrici. Gli assi anteriori sono motrici differenziali con riduttori, e gli assi posteriori sono auto sterzanti.

L'asse motrice del rimorchio viene azionata:

- con trasmissione meccanica;
- con trasmissione idraulica a velocità fissa;
- con trasmissione idraulica a velocità variabile.

Nei casi più comuni si utilizza la trasmissione meccanica, in quanto:

- è più pratica;
- necessità di minori manutenzioni e controlli;
- è la più economica.

La trasmissione idraulica, è un sistema idraulico costituito da una pompa a ingranaggi, collegata ad un motore idraulico dotato di disinnesto. Questo sistema è installato sul rimorchio, e viene attivato dalla forza motrice della trattrice per mezzo del giunto cardanico.

La trazione viene usata su due marce per ogni regime della motrice, con possibilità di innesto e disinnesto in movimento, consentendo una velocità variabile del veicolo da 1 a 5 km/h.

Le operazioni vengono azionate dal posto di guida della trattrice. La trazione idraulica funziona solo in spinta, e da la possibilità di invertire il senso di marcia. Si possono gestire i movimenti del mezzo sia in avanti che in retromarcia.

La trazione idraulica di nuova tecnologia, è a velocità variabile e con controllo elettronico sui modelli più evoluti (Catalogo Serie Forestal 2010 “Zaccaria”).

Il sistema con controllo elettronico è simile al precedente, ma differisce per essere costituito da una pompa a portata variabile. E' gestito da un software personalizzato, che permette di controllare la velocità in modo sincronizzato tra trattrice e rimorchio.

La velocità del rimorchio si adegua automaticamente alla velocità della trattrice, indipendentemente dalla marcia utilizzata e dal regime di giri della motrice.

La velocità del veicolo varia da 1 a 8 km/h.

I vantaggi della trazione idraulica si riassumono con i seguenti punti:

- la velocità di trazione del rimorchio è sincronizzata con quella della trattrice;
- è consentito invertire il senso di marcia;
- è un ottimo freno motore in discesa;
- si riducono al minimo i rischi di rottura del mezzo.

La frenatura delle ruote, può essere azionata con un sistema:

- meccanico;
- pneumatico;
- idraulico.

I rimorchi forestali hanno i pneumatici delle ruote motrici con dimensioni maggiorate, per esempio le misure: 400/55 R 22,5 conferiscono un ingombro di larghezza massima del rimorchio pari a 2100 mm; mentre con le misure 600/60 R 22,5 si ottiene una larghezza pari a 2400 mm (Catalogo on-line “Bernardi macchine”).

I rimorchi forestali, hanno una portata omologata variabile a seconda del modello. Solitamente la portata varia fra i 4000 e i 14000 Kg, tranne per i rimorchi speciali che raggiungono i 20000 Kg.

I rimorchi forestali, possono essere dotati di una gru idraulica a braccio articolato, con portata girevole variabile a seconda del modello. Solitamente la portata varia fra i 1000 e i 6000 Kg.

La gru idraulica risulta utile per le operazioni:

- di carico del legname;
- di scarico del legname;
- per la movimentazione del legname nei cantieri di raccolta.

Tutte queste operazioni, gestite direttamente sul rimorchio, permettono una maggiore stabilità del veicolo e versatilità d'uso.

## 1.2 OBIETTIVI

L'obiettivo principale, che si vuole ottenere con il presente elaborato, è quello di determinare l'efficienza del convoglio forestale nel trasporto del legname, su strade forestali con tornanti a differente raggio di curvatura.

Gli altri obiettivi sono quelli: di determinare il raggio di curvatura minimo, che consente al convoglio forestale di procedere senza manovre; di determinare le caratteristiche dei tornanti per il transito del convoglio.



## 2 METODOLOGIA

### 2.1 RILIEVO DELLE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RIMORCHIO E DELLA MOTRICE

Per il trasporto dei prodotti agricoli e forestali si utilizzano le seguenti macchine agricole:

- macchine agricole semoventi;
- macchine agricole trainate.

Nello specifico, si tratta di una macchina agricola semovente, detta trattrice.

La macchina agricola semovente, viene azionata da un motore proprio, ed è provvista di due assi con ruote, destinata a trainare e a spingere rimorchi impiegati nell'attività agricola e forestale.

Per la movimentazione di un rimorchio, con portata di carichi superiori ai 15000 kg, la trattrice deve possedere dei requisiti minimi, che verranno relazionati qui di seguito.

La trasmissione del moto alle ruote deve essere di tipo meccanico, entrambi gli assi dovranno essere autonomi con il dispositivo differenziale, le quattro ruote devono essere motrici.

Con l'azionamento delle quattro ruote motrici, si conferisce alla trattrice:

- un buon assetto;
- una buona maneggevolezza;
- una buona stabilità.

Se la trattrice è ben aderente al terreno, riesce a trasformare tutta la forza motrice in elevata ed affidabile capacità di trazione.

L'innesto della trazione e dei differenziali deve avvenire con comando elettro-idraulico.

Con lo stesso comando automatico, può avvenire il disinnesto della trazione anteriore e lo sbloccaggio dei differenziali.

Nel caso risultasse inserita la trazione integrale, la frenatura delle quattro ruote con il sistema idrostatico, risulterà altrettanto integrale.

Se la trazione anteriore risultasse disinserita, la frenatura verrà riservata alle sole ruote posteriori equamente bilanciate, oppure può essere diretta su ciascuna ruota singola posteriore, destra o sinistra.

La frenatura del rimorchio deve essere comandata dalla trattrice con un sistema pneumatico.

Facendo il rapporto fra la potenza motore e la massa massima del convoglio, possiamo ottenere la potenza effettiva che deve possedere il motore della trattrice, in questo caso deve essere almeno di 2,2 kW/t (D.M. trasporti 14 novembre 1997 - punto 7.10. Rapporto fra potenza motore e massa complessiva a pieno carico(massa massima)).

Il convoglio forestale in esame, viene trainato da una trattrice SAME modello Silver 130.

Nel riquadro sottostante (tabella 2.1) vengono riportati i dati tecnici.

Tabella 2.1: dati tecnici della trattrice.

<b>DATI TECNICI</b>	<b>TRATTORE SAME SILVER 130</b>
Luce libera da terra (mm)	450
Passo	2750
Carreggiata ant. min.max. (mm)	1825 / 2365
Carreggiata post. min.max. (mm)	1750 / 2250
Raggio min. di volta con freni/senza freni (mm)	3650 / 5500
Pneumatici	14.9 R30 ant. - 18.4 R38 post.
Potenza massima alla frizione P.T.O. (kW)	93,5
Angolo di sterzata (°)	50

Continuando con la classificazione delle macchine agricole, vediamo rientrare anche quelle cosiddette trainate. Queste macchine, sono prive di motore proprio, si agganciano ad una macchina agricola semovente, che ha minimo due assi.

Nello specifico, la macchina agricola trainata, è un rimorchio forestale a telaio articolato.

Il rimorchio in esame, è stato progettato e costruito con apposite caratteristiche tecniche, per poter trasportare tronchi semi-lunghi di lunghezza fino a 12,2 metri.

Il merito dell'invenzione è della Impresa Forestale CERI di Brescia.

Il rimorchio è stato omologato dal Ministero delle infrastrutture e dei trasporti nel aprile 2004, codice omologazione EU/26403/MAUPBS04, collaudo ai sensi della legge 112/92.

La forma complessa del rimorchio, viene rappresentata nella figura 2.2 e nella figura 2.3.

Il rimorchio articolato, con la sua forma atipica, è stato ottenuto dalla trasformazione di un ex rimorchio da camion industriale, già fuori collaudo.

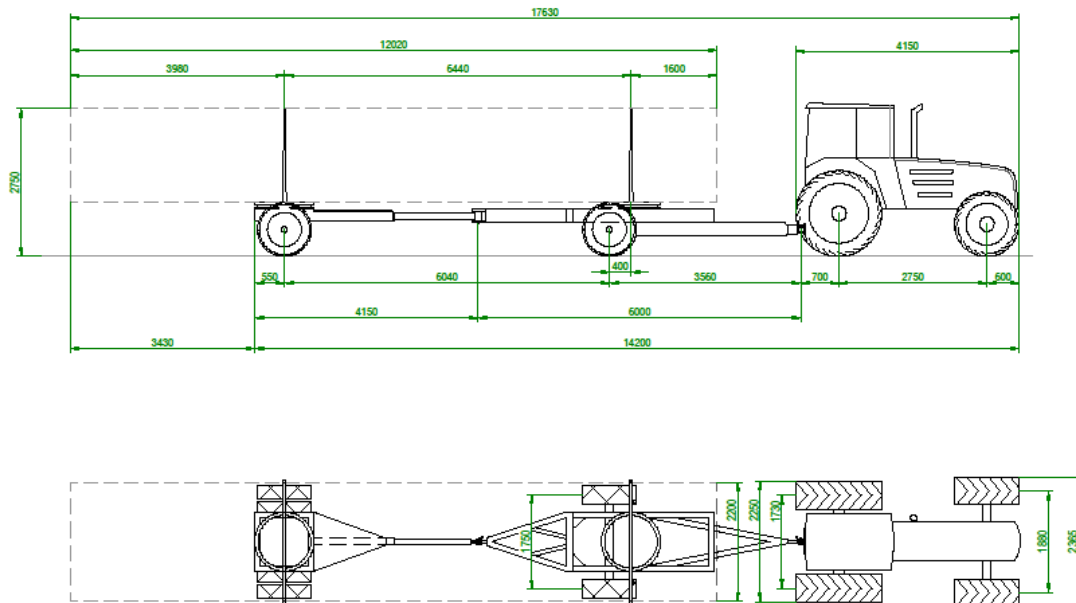


Figura 2.2: disegno tecnico del convoglio forestale articolato.



Figura 2.3: illustrazione del convoglio forestale senza carico di legname.

Si procede qui di seguito alla descrizione del rimorchio articolato.

Il telaio portante del rimorchio, è una struttura formata da profilati (elementi in acciaio strutturale al carbonio), di sezione rettangolare, con dimensioni 200 x 100 x 5 mm.

I profilati appoggiano sugli assali trasversali e sono normali alla direzione di movimento del veicolo.

L'assale può ruotare su un piano orizzontale, attorno ad una ralla centrale di articolazione.

La ralla è girevole su se stessa e permette la sterzata. Ha un diametro di 900 mm, e porta pali verticali di lunghezza 1700 mm circa.

Il rimorchio è formato da due parti:

- una anteriore;
- una posteriore.

Il telaio della parte anteriore è dotato di timone, terminante con un occhione, che funge da dispositivo di accoppiamento nell'apposito gancio di traino della trattrice.

Il telaio della parte posteriore è dotato di timone telescopico, terminante con occhione, che permette l'accoppiamento nell'apposito gancio di traino della parte anteriore.

Il telaio anteriore del rimorchio, è dotato di un assale con due ruote pneumatiche motrici collegate ad un differenziale. La trasmissione del moto al differenziale è di tipo meccanico, e viene trasmesso dalla trattrice al rimorchio per mezzo di un albero a doppio giunto cardanico.

Il rimorchio è dotato di riduzione a due marce, che si trova inframezzo al ponte fra il differenziale e il giunto cardanico.

Il rimorchio dotato di assale motore, permette di sfruttare al meglio la potenza della trattrice, e consente la marcia in condizioni di terreno declive e con difficile aderenza.

Il telaio posteriore del rimorchio, è invece dotato di un assale, in cui sono montate due coppie di ruote pneumatiche gemellari non motrici.

Il timone del telaio posteriore del rimorchio è fatto da un profilato (elemento in acciaio strutturale al carbonio), di sezione tonda, con diametro di 120 mm. La sua lunghezza minima è di 3250 mm, allungandosi può raggiungere una lunghezza di 4750 mm circa.

L'assale del telaio anteriore del rimorchio, è disposto in posizione arretrata rispetto al baricentro della ralla di 400 mm. In questa posizione, parte del carico viene a gravare sul gancio di traino della trattrice. Ne aumenta così il peso aderente e la manovrabilità del rimorchio.



Il telaio anteriore del rimorchio, ha il timone che si accoppia con il gancio di traino della trattrice, ad una altezza di 280 mm e comunque più bassa rispetto all'altezza dell'assale motore della trattrice.

La posizione del gancio di accoppiamento può influire sulle prestazioni della trattrice alla trazione.

Infatti, la trattrice si muove per mezzo di:

- organi di propulsione (ruote posteriori motrici);
- organi di sostegno (ruote anteriori motrici).

Le ruote posteriori hanno la funzione:

- di produrre l'energia necessaria per l'avanzamento della trattrice;
- di produrre la forza necessaria per la trazione del rimorchio;
- di scaricare parte del peso della trattrice sul terreno.

Le ruote anteriori hanno la funzione:

- di consentire la direzione della trattrice;
- di scaricare una parte del peso della trattrice sul terreno.

In funzione delle condizioni del terreno e delle caratteristiche delle ruote, dipendono l'aderenza e il coefficiente di aderenza (o resistenza utile di attrito).

La trazione di una ruota motrice, è sempre e comunque accompagnata dallo slittamento, ed il valore è crescente se aumenta il valore della forza di trazione. Si può inoltre affermare, che se diminuisce il coefficiente di aderenza, aumenta lo slittamento.

Pertanto, l'altezza da terra del gancio di accoppiamento fra trattrice e rimorchio, deve essere nelle condizioni di assicurare approssimativamente la posizione orizzontale del timone.

Se il timone dovesse essere inclinato verso il basso, si ottiene una buona aderenza, ma con pericolo di impennamento della trattrice, nei casi: di partenze in salita, e di traini di carichi gravosi o su terreni instabili.

Se il timone dovesse essere inclinato verso l'alto, si ottiene una scarsa aderenza, per il motivo dell'alleggerimento delle ruote motrici della trattrice.

Nel caso del rimorchio articolato, per garantire un'operatività in sicurezza, è stata posizionata la linea di tiro del timone del rimorchio articolato, in linea orizzontale e vicina a terra.

Il timone del telaio posteriore, si accoppia al telaio anteriore del rimorchio, per mezzo di una cerniera, che è un dispositivo di aggancio formato da un occhione e un perno.

Il timone ha la caratteristica di prolungarsi telescopicamente. Questa invenzione straordinaria e geniale, permette al convoglio forestale di curvare su tornanti di strade forestali con raggi di curvatura variabili.

Si riportano nel riquadro sottostante (tabella 2.4), i dati tecnici sensibili del rimorchio forestale con telaio articolato.

Tabella 2.4: dati tecnici del rimorchio forestale articolato dell'Impresa Forestale Ceri.

<b>DATI TECNICI</b>	<b>RIMORCHIO A TELAIO ARTICOLATO</b>
Luce libera da terra (mm)	460
Lunghezza (mm)	9670
Passo min. di progetto (mm)	5560
Passo min. di lavoro (mm)	6150
Carreggiata ant. min.max. (mm)	1850 / 2200
Pneumatici	14.5 R20 S. ant. - 10.0 R20 D. post.
Tara (kg)	6400

Le caratteristiche dimensionali del convoglio forestale, sono state confrontate con le prescrizioni previste dal codice della strada, per le sagome e le masse limite delle macchine agricole (ENAMA, 2011).

Secondo il codice della strada, per la sagoma limite, si applicano alle macchine agricole semoventi e a quelle trainate, le norme stabilite dall'articolo 61, comma 1.

Rispettivamente, per i veicoli in generale e per i rimorchi, ogni veicolo compreso il suo carico, non deve superare:

- i 2,55 metri in larghezza;
- i 4,0 metri in altezza;
- i 16,5 metri in lunghezza massima del convoglio, se complessi: macchine agricole semoventi e trainate, art. 105, comma 1.

Pertanto, dalle prescrizioni del codice della strada, si deduce che: il convoglio forestale rispetta le dimensioni di sagoma, solo quando trasporta tronchi di lunghezza massima di 11,2 metri.

Nel riquadro sottostante (figura 2.5), viene riportata l'immagine del convoglio mentre esce da una strada forestale e avente lunghezza complessiva di 17 m.



Figura 2.5 : transito del convoglio forestale articolato all'uscita di una strada forestale.

Il codice della strada prescrive un'ulteriore regola: quella che la trattoria e il suo rimorchio devono poter essere manovrati, in entrambi i sensi, per una traiettoria completa di 360°, entro una corona circolare dal raggio esterno di 12,5 metri, e dal raggio interno di 5,3 m, senza che nessuno dei punti più esterni del veicolo (ad eccezione degli elementi sporgenti) sporga dalla corona (D.M. trasporti 14 novembre 1997 - punto 7.6. Manovrabilità).

Questa regola, viene rispettata dal convoglio forestale qualora esegua la manovra senza il carico di legname. Per questa specifica manovra, verrà eseguita una descrizione dettagliata nel capitolo 2.3, in particolare per una manovra su piazzola di inversione.

Il codice della strada prevede che il carico posizionato sul rimorchio, deve essere sistemato in modo che la massa massima sull'asse più caricato non superi i 10000 kg (EMANA, 2011).

Il rimorchio forestale articolato, può trasportare tronchi di lunghezza fino a 12,2 metri, ma è stato osservato che la massa trasportata non viene distribuita equamente sugli assi del rimorchio.

Infatti, suddividendo la lunghezza totale della massa trasportata in due parti diseguali, e facendo il rapporto fra le lunghezze di 5020 mm e 7000 mm (figura 2.6), si ottiene il carico in misura percentuale che grava su ciascun asse.

Pertanto, i risultati sono: che l'asse posteriore supporta il 70%, mentre l'asse anteriore supporta il 30% del carico complessivo di legname.

Per quanto riguarda la trattrice, la distribuzione dei carichi sugli assali, risulta equamente distribuita al 50% su ciascun assale, visto che l'assetto della trattrice viene bilanciato, con l'aggiunta di una massa supplementare (pesi in acciaio) sull'assale anteriore.

Nel riquadro sottostante (figura 2.6), viene illustrato come la massa trasportata, grava sugli assali del convoglio forestale articolato.

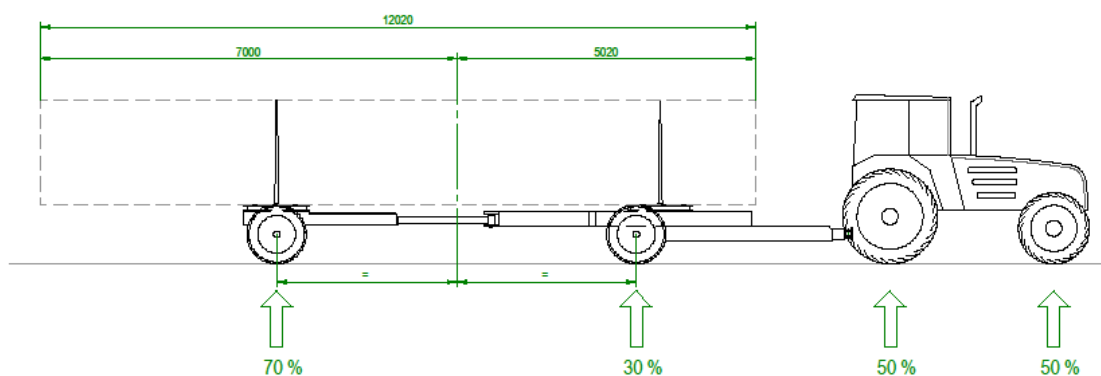


Figura 2.6: distribuzione del carico percentuale (%) sugli assali del convoglio forestale articolato.

## 2.2 CASO STUDIO

Il caso studio si riferisce all'appalto forestale indetto dal Comune di Longarone, che nel 2012 ha assegnato al taglio finale il lotto di Vedelei nei pressi della località di Mezzocanale.

Con questo progetto, il Comune di Longarone, ha voluto introdurre un nuovo modo per valorizzare l'ampio patrimonio boschivo, aggiungendo valori come la qualità, l'innovazione, la tradizione, con l'obiettivo di ottenere i risultati economici e una valorizzazione ambientale.

Fin dai tempi della Repubblica Veneta, la località di Longarone praticava attivamente la cura dei boschi, e fino agli anni sessanta, quest'ultimi erano una delle fonti primarie di reddito del Comune, che vennero poi abbandonati con l'avvento dell'industrializzazione e della infrastrutturazione delle città (Cronaca-Corriere delle Alpi).

Il Comune di Longarone, con la politica forestale di promuovere e sostenere l'utilizzazione del legname indigeno, e per rilanciare l'economia forestale locale, ha ricercato sul territorio nazionale un sistema di trasporto del legname su strade forestali, che fosse in grado di approvvigionare e valorizzare le risorse disponibili locali.

L'impresa forestale di Piernicola Ceri, con un innovativo sistema di trasporto del legname, ha dato l'occasione al Comune di Longarone, di trasportare a valle il legname di lunghezza fino a 12,2 m su carrareccia silvo-pastorale per una distanza di 5 Km.

Sono stati riscontrati ottimi risultati sulla velocità di trasporto, e sulla facile manovrabilità del sistema di trasporto in prossimità di curve a minimo raggio di curvatura.

Con questo innovativo sistema di trasporto, sono stati ridotti al minimo i costi per l'approvvigionamento.

Vista la disponibilità del legname in grandi quantità, il Comune di Longarone, ha avuto l'occasione di proporre al mercato svizzero e austriaco un prodotto forestale di ottima qualità, e di ricavarne un cospicuo guadagno dalla vendita dello stesso.

La viabilità forestale del lotto boschivo di Vedelei, può essere percorribile esclusivamente con un convoglio forestale, formato da una trattrice e un rimorchio forestale.

L'impresa forestale Ceri, ha saputo organizzare al meglio il cantiere forestale, tenendo presente le condizioni operative a disposizione (spazi per lo stoccaggio), e delle caratteristiche qualitative della viabilità forestale.

Nella fase operativa di trasporto del legname, sono state raccolte tutte le caratteristiche dimensionali e meccaniche del rimorchio forestale articolato Ceri, analizzando la dinamica delle manovre su tutto il tracciato stradale e soprattutto in corrispondenza delle curve.

Sono stati eseguiti, i rilievi geometrici della viabilità: sui raggi di costruzione dei tornanti, e sulla larghezza di ingombro massimo dei piazzali per l'inversione di marcia.

Inoltre, sono stati esaminati i parametri che definiscono la qualità della viabilità, la sua estensione e i limiti di accessibilità, quali: la pendenza e la larghezza della carreggiata, la disponibilità di piazzali.

Per mezzo del GPS, è stata eseguita una analisi specifica del sito: sono state valutate le distanze e le velocità di conferimento del legname, dal bosco di Vedelei al centro di raccolta e stoccaggio di Soffranco.

Lavorando poi in ambiente CAD, è stata eseguita l'analisi della percorribilità del tracciato, con l'ipotesi di valutare la fattibilità di manovra e di sterzata del convoglio forestale articolato, su tornanti con raggio di curvatura variabile.

## **2.3 STUDIO DELLE TRAIETTORIE E INGOMBRI IN CAMPO SU TRACCIATO STRADALE CON CARATTERISTICHE GEOMETRICHE NOTE**

Il tracciato stradale può essere definita come un'opera, costituita da una strada per la circolazione dei veicoli su ruote.

Nel seguito della trattazione, con il termine di tracciato stradale, si intende il sinonimo di un'opera viabile, sia su strada che su pista.

L'opera viabile è quella, che possiede l'asse stradale proiettato sul piano topografico o cartografico orizzontale (Cielo et al., 2003).

Gli elementi costruttivi e primari del manufatto stradale vengono qui di seguito descritti.

Il corpo stradale viene costituito:

- da un fondo naturale;
- da un fondo rilevato.

Il corpo stradale viene poi trasformato in una superficie piana, detta piattaforma stradale, che viene completata apportandoci sopra una massicciata.

La massicciata, detta anche manto stradale, viene formata da più strati portanti, e ha le seguenti funzioni:

- di distribuire i carichi dei veicoli;
- di regolare la percolazione e lo scorrimento dell'acqua;
- di agevolare la circolazione dei veicoli.

La porzione centrale della piattaforma stradale, viene detta carreggiata, e viene destinata allo scorrimento dei mezzi. La sua larghezza può variare in funzione del numero di corsie di marcia e con la presenza di piazzole di scambio.

Nei casi in cui la massicciata non vi è presente, e i veicoli transitano sul fondo naturale, si parla di pista forestale.

Nel riquadro sottostante (figura 2.7), viene rappresentata una sezione stradale con i principali elementi costruttivi .

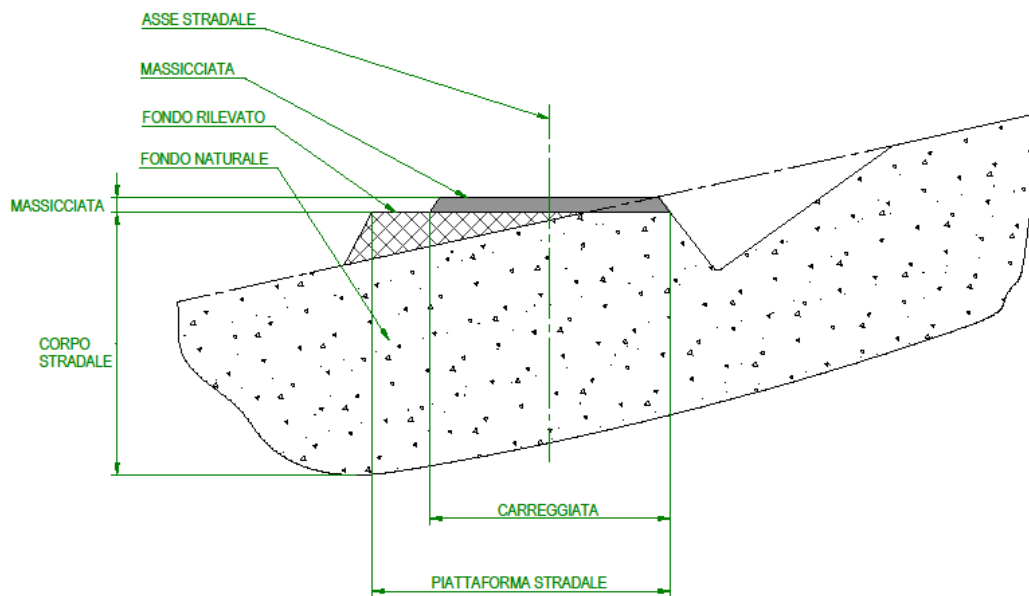


Figura 2.7: illustrazione di una strada costruita a mezza costa.

Le opere stradali ad uso pubblico, vengono progettate secondo le prescrizioni normative, di carattere funzionale e geometrico, atte a garantire la sicurezza degli utenti.

Sulla base del flusso di traffico, viene calcolata la velocità massima consentita, detta velocità di progetto.

L'andamento planimetrico e altimetrico dovrà essere conforme a tale velocità.

Vengono determinate le opportune lunghezze dei rettifili, i raggi delle curve, le larghezze delle corsie e delle banchine, la misura della pendenza massima.

In ogni modo, evitando le brusche variazioni di altimetria o direzione (Cielo et al., 2003).

L'allargamento in curva, viene definito come aumento di ingombro. Questo allargamento, tanto più risulta essere elevato, e tanto minore sarà il raggio della curva, e tanto maggiore sarà il passo del veicolo.

Le opere per la viabilità agro-silvo-pastorale, soddisfano invece un traffico modesto e sporadico, connesso alle attività di gestione dei beni forestali e pastorali.

Per tanto, è necessario che vengano soddisfatte le seguenti caratteristiche costruttive minime (tabella 2.8).

Inoltre, è doveroso tenere sempre in considerazione, la salvaguardia dei valori ambientali e paesaggistici, con il fine di ridurre l'impatto idrogeologico e sull'ambiente.

Nella tipica viabilità agro-silvo-pastorale, si riscontra un senso di marcia unidirezionale, e lo scorrimento avviene a bassa densità e velocità.

Si ribadisce, che nella fase di progettazione, piuttosto che stabilire lunghezze minime o massime dei rettifili, sarà opportuno evitare bruschi cambiamenti della pendenza e della direzione.

Bensì la carreggiata sia unica, devono essere previste delle piazzole di scambio.

I tornanti devono possedere un raggio di curvatura, compatibile con le possibilità di sterzata dei veicoli che transitano sulla strada.

I veicoli devono poter transitare senza effettuare manovre, pertanto in corrispondenza dei tornanti dovrà essere previsto l'allargamento della carreggiata.

La pendenza longitudinale massima, deve essere determinata in funzione della capacità dei veicoli a transitare con pieno carico.

I valori di pendenza ottimale, solitamente corrispondono tra il 3÷8%, con valori massimi del 12% per brevi tratti (Cielo et al., 2003).

In ogni caso, per permettere lo sgrondo delle acque, la pendenza non dovrà mai essere nulla.

Le caratteristiche costruttive di un'opera per la viabilità, vengono stabilite in funzione delle richieste di utilizzo e della geologia del terreno.

Le prestazioni e le dimensioni dei veicoli che transitano la strada, condizionano le caratteristiche dimensionali della strada, in particolar modo : la larghezza della carreggiata, il raggio minimo di curvatura, la pendenza longitudinale.

Queste caratteristiche dimensionali, sono tra loro direttamente proporzionali.

Maggiori sono le dimensioni del veicolo, e maggiore dovrà essere la larghezza della carreggiata. Il raggio di curvatura dell'asse della carreggiata, dovrà essere maggiore del raggio di sterzata del veicolo. La pendenza longitudinale dovrà permettere il transito del veicolo in sicurezza.

Nel riquadro sottostante (tabella 2.8), si illustrano le caratteristiche geometriche di due categorie di viabilità agro-silvo-pastorale: strade camionabili secondarie e strade trattorabili (Cielo et al., 2003).



Nella figura 2.9, viene illustrata una strada camionabile secondaria.

Tabella 2.8: parametri costruttivi della viabilità agro-silvo-pastorale.

CARATTERISTICHE	STRADE CAMIONABILI SECONDARIE	STRADE TRATTORABILI
Larghezza prevalente piano viabile (m)	4	3
Larghezza minima della carreggiata nei rettifili (m)	3	2,5
Raggio minimo di curvatura (m)	6	5
Pendenza ottimale (%)	3÷8	3÷8
Pendenza media massima (%)	10	12
Pendenza massima per brevi tratti (max 50 m) (%)	18	20
Contropendenza massima (%)	10	10
Allargamento in curva della carreggiata (m), calcolato per tornanti con raggio di curvatura minimo	2,5	2
Massicciata	si	si
Sopraelevazione in curva	localmente	no
Modellazione del corpo stradale a schiena d'asino o a spiovente trasversale	si	no
Cunetta longitudinale	si	a tratti
Opere di sostegno	si	si
Piazzole di scambio	si	si
Piazzali di manovra	si	si
Piazzali di deposito e lavorazione	si	valutare localmente



Figura 2.9: strada camionabile secondaria con larghezza della piattaforma di 4,0 m.

La viabilità agro-silvo-pastorale, ha una sistemazione a spezzata e costituita da rettifili.

I vertici della spezzata, vengono raccordati con curve e tornanti.

Se l'angolo formato dai rettifili risulta grande, si ottiene una curva interna, con il centro della curva dal lato interno della poligonale.

Se l'angolo formato dai rettificili risulta piccolo, si ottiene una curva esterna o tornante.

Le curve esterne, vengono sempre raccordate con contro curve.

Per raggio della curva, viene inteso quello riferito all'asse della carreggiata.

Nella figura 2.10, viene rappresentato l'asse della carreggiata della curva interna in posizione accorciata.

Nella figura 2.11, viene invece rappresentato l'asse della carreggiata della curva esterna in posizione allungata.

Per tanto, con una curva interna, si ottiene un aumento della pendenza longitudinale, mentre con un tornante si ottiene una diminuzione.

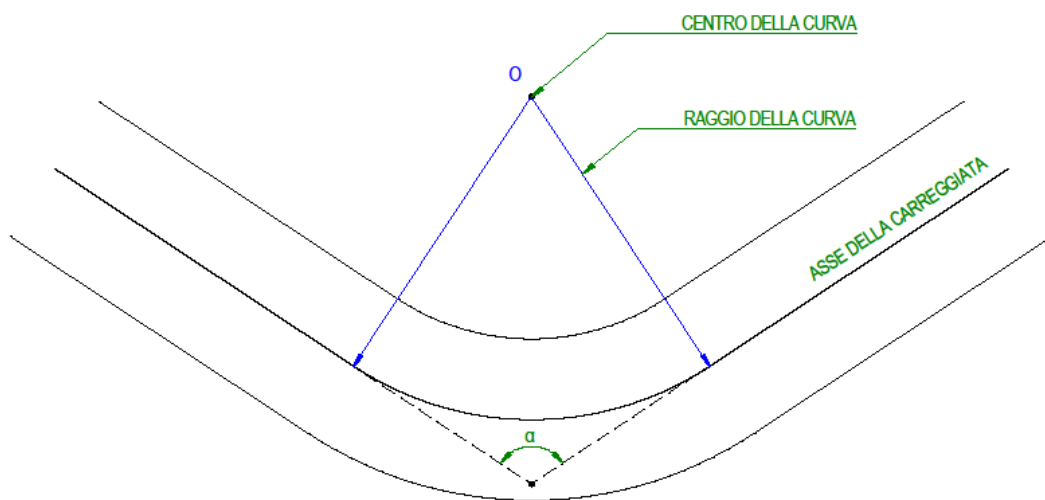


Figura 2.10: esempio di curva interna (Cielo et al., 2003).

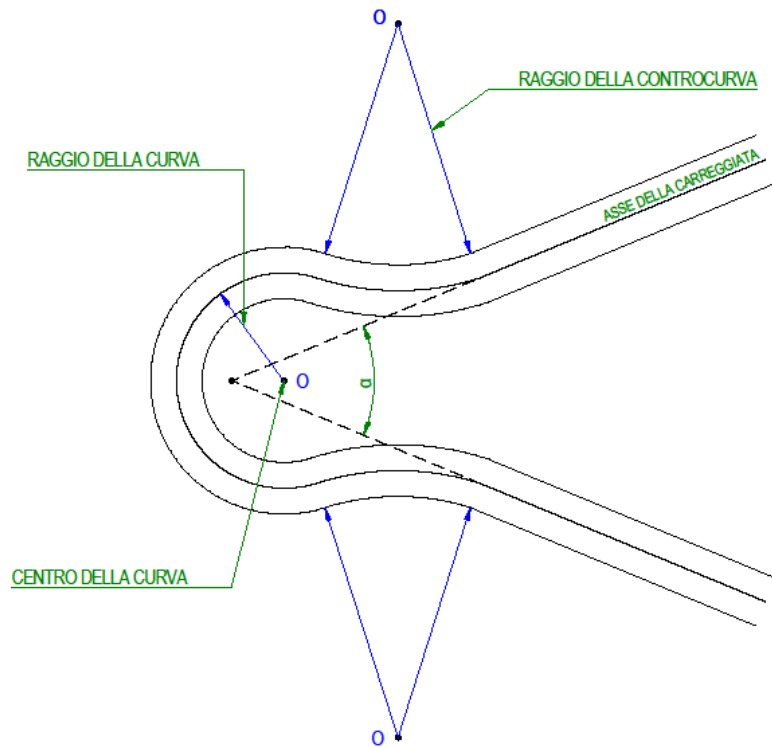


Figura 2.11: esempio di curva esterna o tornante (Cielo et al., 2003).

Il veicolo può affrontare una curva, solo con l'utilizzo delle ruote anteriori sterzanti.

Si deduce che le ruote posteriori non seguono lo stesso percorso di quelle anteriori, e quindi lo spazio della sagoma (ingombro massimo) del veicolo aumenta in corrispondenza delle curve.

Per tanto, la larghezza della carreggiata in curva, deve essere maggiore di quella sui rettifili. Viene calcolato l'allargamento supplementare della carreggiata in corrispondenza della curva, sulla base delle caratteristiche dimensionali del veicolo e sulla base delle caratteristiche geometriche della strada.

Per calcolare il raggio minimo “R int.”, il raggio massimo “R est.” e l'allargamento supplementare “e” della carreggiata, vengono considerate le caratteristiche dimensionali del convoglio forestale con il carico sporgente (“p” il passo o distanza tra i due assi del rimorchio, “a” la distanza tra l'asse sterzante e la sporgenza anteriore, “wt” la larghezza massima del rimorchio, “n” la distanza tra l'asse posteriore e la sporgenza posteriore, “c” la larghezza della carreggiata, “R” il raggio di curvatura dell'asse della carreggiata).

Si procede di seguito ad illustrare le formule matematiche, da utilizzare per il calcolo dei raggi (Buzzella, 2012).

Raggio minimo “R int.”:

$$R \text{ int.} = R - \frac{c}{2}$$

Raggio massimo “R est.”:

$$R \text{ est.} = \sqrt{(R \text{ int.} + wt)^2 + (p+a)^2}$$

Qualora vi sia il caso di un carico di legname sporgente dal rimorchio, che comporta un ingombro supplementare di “m”, il passo “p” dovrà essere sostituito dal valore “p+m”.

L'allargamento della carreggiata “e”:

$$e = R \text{ est.} - (R \text{ int.} + c)$$

L'allargamento “e” della carreggiata in curva, viene calcolato come differenza fra il raggio esterno “R est.” e il raggio interno “R int.”.

Praticamente, “e” dipende dalle dimensioni di lunghezza dell'ingombro del carico trasportato, e dal raggio “R” della curva.

Nell'illustrazione di figura 2.12 , viene simulata una manovra di un rimorchio su tornante, per rappresentare l'allargamento supplementare “e” della carreggiata, necessario per permettere il transito del rimorchio forestale articolato.

Nella tabella 2.13, si riportano le dimensioni di lunghezza dell'ingombro del carico trasportato dal rimorchio forestale articolato.

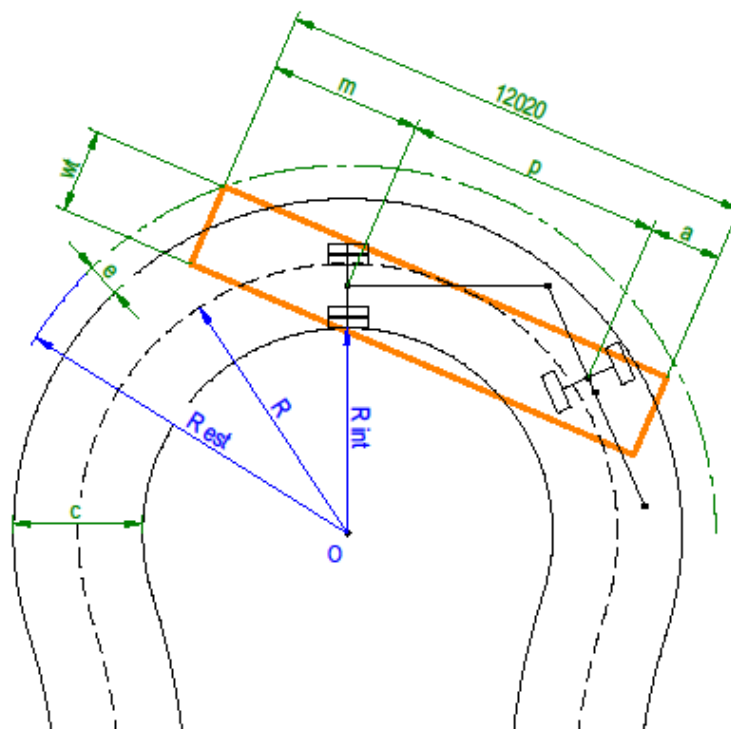


Figura 2.12: rappresentazione dell'ingombro del rimorchio forestale articolato, con carico sporgente e allargamento supplementare “e” della carreggiata.

Tabella 2.13: dimensioni di lunghezza dell'ingombro del carico trasportato.

<b>m (m)</b>	<b>p (m)</b>	<b>a (m)</b>	<b>wt (m)</b>	<b>c (m)</b>
3,98	6,04	2,00	2,20	4,00

Per il calcolo dimensionale dell'ingombro del convoglio forestale articolato, non sono state applicate le formule matematiche sopra descritte, per le motivazioni e condizioni che seguono.

Il centro geometrico del tornante, non risulta coincidente con il centro di istantanea rotazione del convoglio forestale.

L'angolo di sterzata, e chiaramente il raggio di curvatura delle ruote anteriori della trattrice, risultano diversi dall'angolo di sterzata e dal raggio di curvatura delle ruote del rimorchio, e pertanto le tracce delle ruote non coincidono.

Il valore del raggio esterno “R est.”, ottenuto dall'ingombro sporgente del carico di legname, risulta diverso dal valore del raggio massimo “R massimo”, che viene invece ottenuto dalla traccia delle ruota anteriore esterna della trattrice.

Infine, per effettuare la manovra del convoglio, il valore del raggio interno “R int.” della curva, deve risultare inferiore al valore del raggio minimo “R min.r2” di curvatura del rimorchio.

Ne consegue che, per ottenere le caratteristiche geometriche stradali, è necessario lavorare in ambiente CAD ed eseguire una simulazione della manovra.

La descrizione dettagliata della simulazione in ambiente CAD, verrà trattata nel capitolo 2.6. Mentre ora si riportano nella tabella 2.14, i valori geometrici ottenuti dalla simulazione al CAD, per la manovra del rimorchio forestale articolato carico di legname, su un tornante con raggio “R” di 6 metri.

La simulazione dimostra che il raggio minimo “R min.r2” di curvatura del rimorchio, ha un valore di 4,2 m, e superiore al valore di 4,0 m del raggio interno “R int.” della curva.

Con il raggio interno “R int.” riportato in tabella 2.9, ci si riferisce al raggio di curvatura interno del tornante.

Tabella 2.14: dimensioni geometriche dei raggi di curvatura di un tornante, e dell'allargamento supplementare della carreggiata, per la manovra del convoglio forestale articolato.

<b>R(m)</b>	<b><math>\alpha(^{\circ})</math></b>	<b>R int.(m)</b>	<b>R est.(m)</b>	<b>e(m)</b>
6,00	20,00	4,00	8,75	0,78

Nella viabilità forestale, in particolari punti lungo il tracciato, si riscontra spesso la necessità di allargare la carreggiata “c”, per consentire le manovre dei veicoli.

Per tanto vengono realizzate:

- piazzole di scambio;
- piazzali di deposito e lavorazione;
- piazzali di manovra.

Nello specifico contesto, tratteremo i piazzali di manovra, e le caratteristiche geometriche necessarie per consentire l'inversione di marcia ai veicoli, e in particolar modo del convoglio forestale articolato.

Il piazzale di manovra, dovrebbe consentire l'inversione di marcia senza manovre o comunque con un numero limitato di manovre.

Il piazzale deve avere una larghezza non inferiore a 10 metri nel caso di percorsi trattorabili, e di 14 metri nel caso di vie camionabili (Cielo et al., 2003).

Per la progettazione del piazzale, vengono utilizzate delle formule matematiche, dalle quali si ottengono gli angoli di sterzata della trattrice e i raggi minimi della curva per la manovra di inversione. La descrizione dell'argomento verrà trattata nel capitolo 2.5 .

Nella figura 2.15, viene illustrata una piazzola di manovra e lo schema simulato della manovra del convoglio forestale articolato senza il carico di legname.

Nella tabella 2.16, vengono riportati i valori geometrici ottenuti dalla simulazione di manovra al CAD, e le caratteristiche misurate sono: i raggi di curvatura ( $R$ ,  $R_{min.r2}$ ,  $R_{min.r1}$ ,  $R_{min.t}$ ), la larghezza della curva ( $L_{curva}$ ) impegnata dal convoglio, l'angolo di sterzata ( $\alpha$ ) delle ruote anteriori della trattrice, la larghezza della carreggiata ( $c$ ), le dimensioni di ingombro minimo ( $I_{min.}$ ) della piazzola.

Nella figura 2.17, si illustra la manovra di inversione del convoglio forestale articolato, in corrispondenza di una piazza pubblica nel centro di Soffranco (BL).

La simulazione al CAD della manovra di inversione, è stata eseguita prendendo come riferimento il centro (O) di istantanea rotazione. Dai valori individuati dell'angolo di sterzata della trattrice e dei raggi minimi interni di curvatura del rimorchio, si possono commentare con le seguenti considerazioni.

Nella manovra di inversione su piazzola, l'angolo sterzante delle ruote anteriori della trattrice assume diverse angolazioni.

La prima fase, quella di ingresso della trattrice nella piazzola, le ruote anteriori hanno una angolazione massima dello sterzo, pari a  $50^\circ$  .

La fase successiva, quando il rimorchio entra in piazzola e inizia la manovra, le ruote anteriori della trattrice devono ridurre l'angolazione dello sterzo da  $50^\circ$  a  $30^\circ$  , in quanto le ruote posteriori della trattrice potrebbero intercettare il timone del rimorchio.

L'angolazione di  $30^\circ$  dello sterzo della trattrice, viene mantenuta così per tutta la manovra di inversione.

Un'ulteriore simulazione al CAD, è stata eseguita nel caso specifico di una manovra di inversione del convoglio su una rotatoria a 360°. In questo caso, l'angolo massimo dello sterzo delle ruote anteriori della trattrice ha un valore di 31,5°.

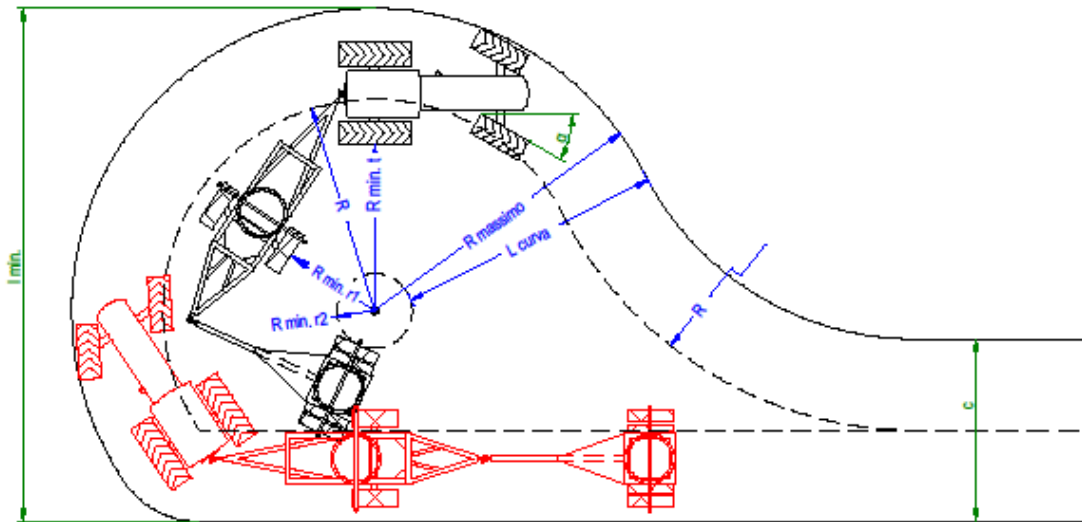


Figura 2.15: illustrazione del piazzale di manovra e schema di inversione del convoglio forestale articolato.

Tabella 2.16: dati del piazzale di manovra e dei raggi minimi di curvatura del convoglio.

<b>R(m)</b>	<b><math>\alpha(^{\circ})</math></b>	<b>R min.r2(m)</b>	<b>R min.r1(m)</b>	<b>R min.t(m)</b>	<b>I min.(m)</b>	<b>L curva(m)</b>	<b>C(m)</b>
4,64	30,00	0,82	2,20	3,64	11,27	5,82	4,00





Figura 2.17: manovra di inversione su piazzola del convoglio forestale senza carico.

## 2.4 STUDIO SULLA VELOCITÀ DEL SISTEMA DI TRASPORTO

Il rilievo dei tracciati della viabilità forestale, è stato eseguito avvalendosi della moderna strumentazione, cioè di sistemi hardware e software innovativi.

Il GPS (Global Positioning System), è un hardware che rappresenta il Sistema di Posizionamento Globale. Funziona con la radio-navigazione, e trasmette informazioni sulla posizione, sulla velocità e sul tempo.

I ricevitori GPS lavorano con i segnali che provengono da molteplici satelliti, e permettono di rilevare i dati di posizione, velocità e tempo con una buona precisione.

Il GPS professionale per il mapping GIS, garantisce una precisione che si aggira su  $1,5 \div 2$  metri (Grigolato, 2011).

Il rilievo dei dati del tracciato, è stato eseguito posizionando l'antenna del GPS sulla trattoria (figura 2.18), per ottenere un migliore scambio dei segnali con i satelliti.

Nel mese di luglio 2012, è stato effettuato un rilievo per determinare le velocità medie del sistema di trasporto.

Il rilievo ha previsto l'utilizzo di una antenna GPS professionale Trimble PRO-XH singola fase, collegata ad un palmare Trimble NOMAD.

L'utilizzo di GPS professionali per la valutazione delle velocità delle macchine operative e dei mezzi di trasporto nelle operazioni forestali, si è consolidato negli ultimi anni con evidenti risultati come mostrato da Veal et al. (2001).



Figura 2.18: installazione dell'antenna GPS sulla trattrice.

Come proposto dalla modalità di acquisizione, è stata impostata su un rilievo su base temporale con un intervallo di tempo di 1 s , così come proposto e applicato da Simwanda et al. (2011).

I dati acquisiti, sono stati successivamente rielaborati sulla base di un filtraggio dei punti acquisiti con un PDOP inferiore a 6 e una successiva correzione differenziale con modalità *post-processing* con l'ausilio del *software* GPS Pathfinder di Trimble.

Il rilievo ha riguardato due viaggi di andata e ritorno, che sono stati analizzati in relazione al verso di percorrenza e alle condizioni di trasporto: salita con rimorchio vuoto e discesa con rimorchio carico.

L'analisi valuterà quindi le medie delle velocità, per tratti omogenei di viabilità così distinti:

- A. strada asfaltata con pendenza inferiore a 8%;
- B. strada forestale con fondo migliorato con pendenza superiore a 8 %;
- C. strada forestale con fondo migliorato pendenza inferiore a 8 %.

## 2.5 DETERMINAZIONE DEGLI ANGOLI DI STERZATURA

L'obbiettivo di questo paragrafo, è quello di individuare i modelli matematici, che ci permettono di studiare il comportamento direzionale del veicolo.

Prima di implementare i modelli matematici, è indispensabile tenere in considerazione le seguenti ipotesi.

La prima ipotesi, è quella di supporre, che il veicolo si muova su strada piana e orizzontale.

La seconda, è quella di supporre, di avere una velocità di avanzamento bassa e costante, poco variabile, escludendo situazioni di frenature ed accelerazioni brusche.

La terza ipotesi, è quella di trascurare l'effetto dell'inclinazione laterale del veicolo, di scuotimento, di beccheggio e di rollio; il veicolo lo consideriamo perfettamente rigido.

Queste tre ipotesi rappresentano i presupposti di un moto piano.

Per mantenere un moto piano, si suppone la quarta ipotesi, che è quella di considerare l'asse dello sterzo di ciascuna ruota anteriore della trattrice, in asse ortogonale al piano della strada.

In realtà l'asse è inclinato, e viene solitamente definito come “campanatura” delle ruote o angolo di Camber.

Le ipotesi sopra descritte, si riferiscono ad un modello di veicolo, strutturato come un corpo rigido in moto piano.

Si procede ora a formulare i modelli matematici per il veicolo, rappresentato in figura 2.19.

Il veicolo dispone di due ruote anteriori sterzanti. La posizione del baricentro è contrassegnata con la lettera “G”.

La posizione del baricentro rispetto alla trattrice è definita dalla lunghezza “a”.

Con “l” e “w” si indicano, rispettivamente, il passo e la carreggiata della trattrice, entrambe misurate dai centri delle ruote.

Per semplicità di calcolo, la carreggiata anteriore e posteriore sono supposte uguali.

Con “ $\alpha$ ” si indica l'angolo di sterzo medio delle due ruote anteriori, chiamato anche angolo di deriva.

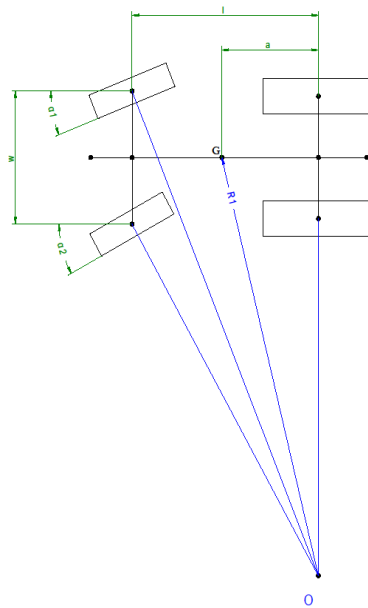


Figura 2.19: schema dello sterzo di un veicolo.

Il caso del convoglio forestale articolato senza carico di legname, viene analizzato con le seguenti formule matematiche specifiche per il calcolo: degli angoli di sterzata e dei raggi di curvatura del veicolo.

Per manovrare un veicolo, è necessario il meccanismo a sterzo, che permette di far sterzare le ruote.

Il moto del veicolo, si basa sullo schema di sterzata cinematica.

La cinematica ammette, lungo una traiettoria curva, la condizione di rotolamento delle ruote senza slittamento. La condizione è possibile solamente alle basse velocità.

Consideriamo inizialmente un veicolo a due assi, in cui quello anteriore ha le ruote sterzanti. Il veicolo si trova nelle condizioni di sterzata cinematica, quando tutte le ruote hanno in comune lo stesso centro istantaneo di rotazione nel punto "O".

I due angoli di sterzo non sono uguali e hanno valori diversi.

Per mezzo di considerazioni geometriche, si giunge a realizzare la condizione di sterzata cinematica, nota come relazione di Ackermann:

$$\cot \alpha_1 - \cot \alpha_2 = \frac{w}{l}$$



Il valore del raggio di curvatura della traiettoria del baricentro, viene ottenuto dalla seguente relazione:

$$R1 = \sqrt{a^2 + \left(l \cot \alpha - \frac{w}{2}\right)^2}$$

Per facilitare le relazioni e semplificare le procedure, si fa uso del modello a bicicletta o a mono-traccia, il quale prevede che le ruote destre e sinistre hanno lo stesso modo di comportamento. Il veicolo (modello a bicicletta), viene schematizzato nella figura 2.20.

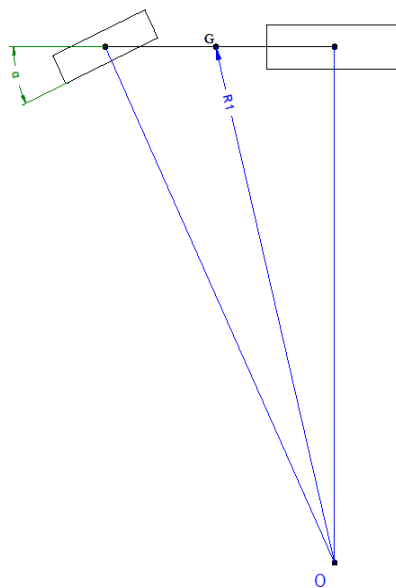


Figura 2.20: modello a bicicletta equivalente ad un veicolo.

Gli angoli di sterzo “α1” e “α2” dell'avantreno, per semplicità, vengono unificati in un unico angolo “α”, definito come media aritmetica dei due angoli.

Per tanto il valore del raggio di curvatura della traiettoria del baricentro “G”, viene ottenuto dalla seguente relazione:

$$R1 = \sqrt{a^2 + l^2 \cot^2 \alpha}$$

La condizione di sterzo di Ackermann, è la condizione di sterzo cinematica.

E' una condizione statica a velocità zero, gli angoli di slittamento sono nulli e non vi è alcuna forza centrifuga.

Sul punto esterno delle ruote anteriori del veicolo, viene tracciato il raggio "R massimo".

Sul punto interno delle ruote posteriori del veicolo, viene tracciato il raggio "R min.t" .

$$R_{\text{massimo}} = \sqrt{(R_{\text{min.t}} + wr)^2 + (l + g)^2}$$

$$R_{\text{min.t}} = R_x - \frac{1}{2} wr$$

Queste due formule rappresentano la condizione cinematica di uno sterzo, in cui le tracce delle ruote anteriori sterzanti sono diverse dalle tracce delle ruote posteriori fisse.

Lo spazio necessario per la svolta del veicolo, si può calcolare con "ΔR".

$$\Delta R = R_{\text{massimo}} - R_{\text{min.t}}$$

Se un veicolo a quattro ruote ha un rimorchio, è possibile ottenere una condizione cinematica di sterzo.

Nella figura 2.21, viene illustrato un convoglio forestale, composto da una trattrice con il rimorchio forestale articolato.

Il centro di massa "G" del veicolo, ruota su un ipotetico cerchio con raggio "R1".

In una condizione di stato stazionario tra il rimorchio e la trattrice, e utilizzando la trigonometria, si può calcolare l'angolo "B".

Nel caso in cui  $b_1 - b_2 \neq 0$  (figura 2.22), si utilizza la seguente formula:

$$\beta = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{1}{b_1 - b_2} (R_4 - \sqrt{R_4^2 - b_1^2 + b_2^2}) \right]$$

Analogamente, con lo stesso principio matematico, si può calcolare l'angolo "γ", che si ottiene nella condizione di sterzo tra la parte anteriore e quella posteriore del rimorchio:

$$\gamma = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{1}{b_3 - b_4} (R_6 - \sqrt{R_6^2 - b_3^2 + b_4^2}) \right]$$

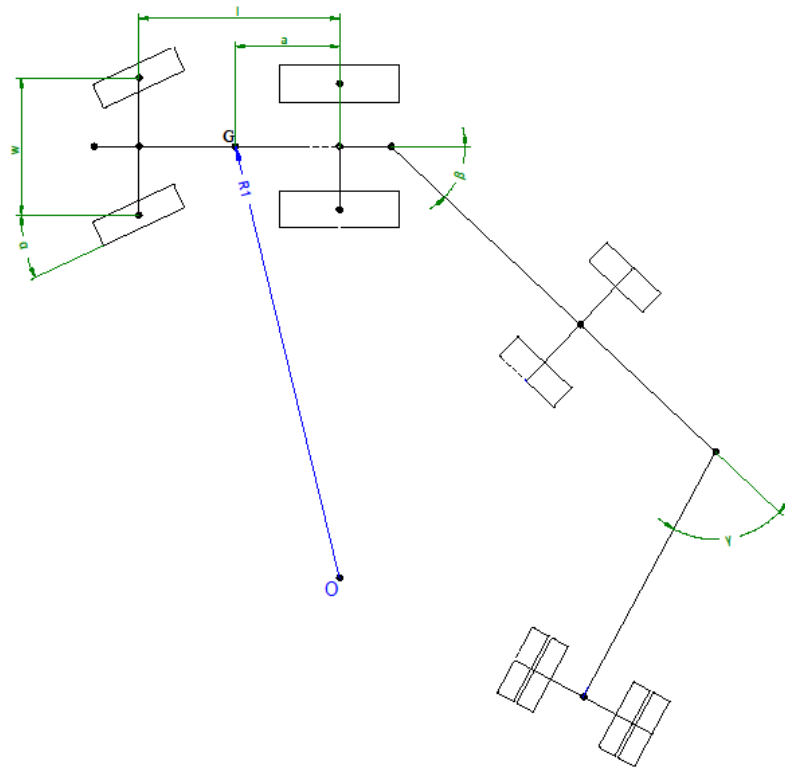


Figura 2.21: schema di un convoglio forestale.

## 2.6 DETERMINAZIONE DEI RAGGI DI STERZATURA DEGLI ASSI

In questo paragrafo, si procede con la descrizione delle formule matematiche, per il calcolo dei raggi di curvatura degli assi del convoglio forestale articolato.

Le quattro ipotesi descritte nel capitolo 2.4, sono da considerare per l'implementazione di un modello matematico, e sono da ritenere valide anche per le elaborazioni matematiche che seguono.

Come viene illustrato nella figura 2.22, il centro di massa "G" della trattrice, ruota su un ipotetico cerchio di centro "O" e con raggio "R1". Per semplicità di calcolo, vengono considerati i rispettivi centri di massa "G1" e "G2" del rimorchio, coincidenti con i rispettivi punti "B" e "D" posizionati nella mezzeria degli assali. Per tanto il centro di massa "G1" dell'assale anteriore del rimorchio, ruota rispetto al centro "O" nel punto "B", avente raggio "R4". Mentre il centro di massa "G2" dell'assale posteriore del rimorchio, ruota rispetto al centro "O" nel punto "D", avente raggio "R6".

Per il calcolo del valore numerico di “R4”, possiamo riferirci al triangolo rettangolo con vertici “OAB”, e utilizzare la seguente formula matematica:

$$R4 = \sqrt{R2^2 + b1^2 - b2^2}$$

Ma poiché la lunghezza “OA” è uguale a:

$$OA^2 = R4^2 + b2^2$$

$$OA^2 = R2^2 + b1^2$$

E sostituendo “R2” nella formula  $R4 = \sqrt{R2^2 + b1^2 - b2^2}$ , si ottiene che il raggio di curvatura del rimorchio è legato alla geometria del mezzo (Buzzella, 2012).

Per tanto, per calcolare il raggio “R4”, si utilizza la seguente equazione :

$$R4 = \sqrt{R1^2 - a^2 + b1^2 - b2^2}$$

Per calcolare il raggio di curvatura “R2” del punto “A”, si utilizza la seguente equazione:

$$R2 = \sqrt{\left(R_{min.r1} + \frac{wt}{2}\right)^2 + b2^2 - b1^2}$$

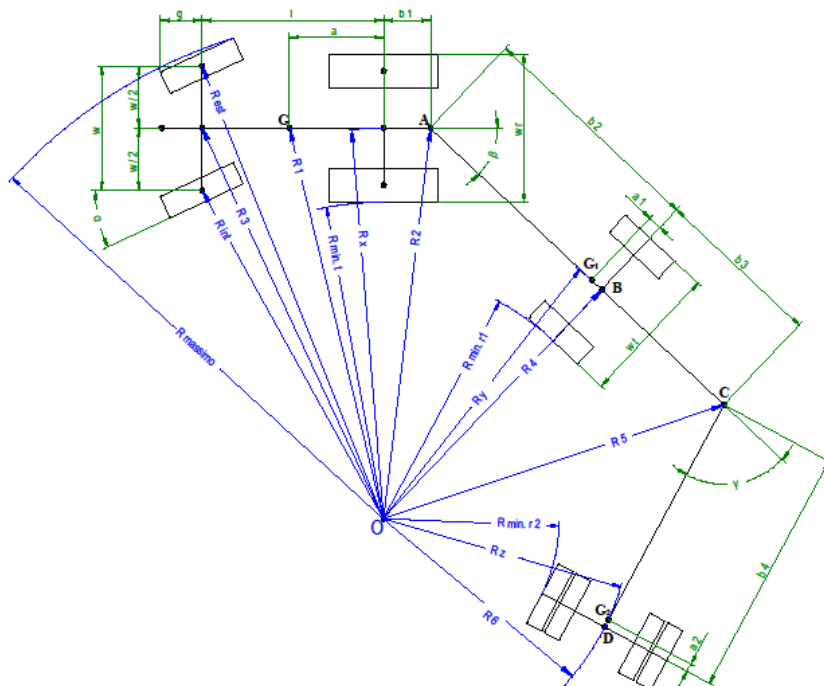


Figura 2.22: schema di un convoglio forestale articolato, mentre esegue una sterzata secondo la condizione di Ackermann.



La condizione di Ackermann, ci permette anche di calcolare l'ampiezza dell'ingombro massimo di un veicolo nella fase di sterzo.

La geometria dello sterzo viene illustrata nel riquadro che segue (figura 2.23).

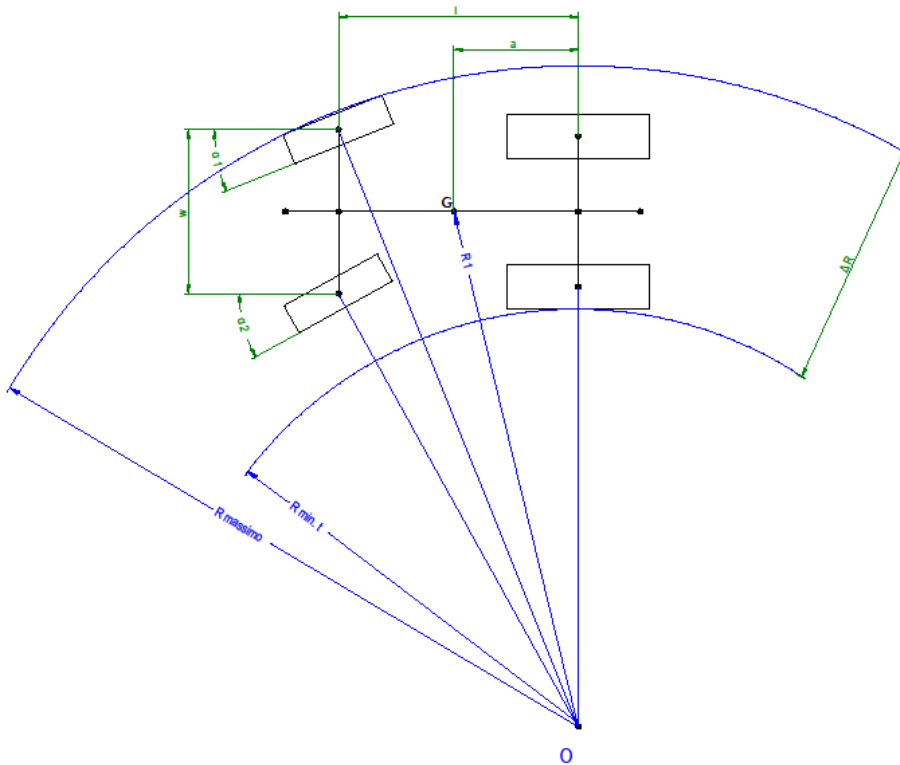


Figura 2.23: geometria dello sterzo e dell'ingombro massimo di un veicolo.

Il punto più esterno della ruota anteriore del veicolo, traccia la traiettoria del raggio di curvatura “R massimo”.

Il punto più interno della ruota posteriore del veicolo, traccia la traiettoria del raggio di curvatura “R min.t” .

$$R_{\text{massimo}} = \sqrt{(R_{\text{min.t}} + wr)^2 + (l + g)^2}$$

$$R_{\text{min.t}} = R_x - \frac{1}{2} wr$$

Queste due formule rappresentano la condizione cinematica di uno sterzo, in cui le tracce delle traiettorie delle ruote anteriori sterzanti, sono diverse dalle tracce delle traiettorie delle ruote posteriori.

Il raggio minimo “R min.t”, dipende dalle caratteristiche del veicolo, ed è in funzione dell'angolo di sterzata “ $\alpha$ ” e dalla lunghezza dell'interasse “l”.

Calcolati i raggi di curvatura, si può per differenza, determinare l'ampiezza “ $\Delta R$ ”, che è quella necessaria al veicolo per svoltare:

$$\Delta R = R_{\text{massimo}} - R_{\text{min.t}}$$

Per il principio, che tutti gli assi del veicolo ruotano attorno ad un centro di rotazione comune “O”, si illustrano le formule matematiche che seguono per il calcolo: dei raggi di curvatura del convoglio forestale articolato, schematizzato in figura 2.22.

Il raggio “R3” di curvatura nel punto di mezzeria dell'assale anteriore della trattrice, si calcola nel seguente modo (Dykstra et al., 1996):

$$R_3 = \frac{l}{\sin \alpha}$$

Il raggio “R<sub>x</sub>” di curvatura nel punto di mezzeria dell'assale posteriore della trattrice:

$$R_x = \sqrt{(R_2)^2 - (b_1)^2}$$

Il raggio “R int.” di curvatura interno della ruota anteriore della trattrice (Buzzella, 2012):

$$R_{\text{int.}} = R_x - \frac{1}{2} w$$

Il raggio “R est.” di curvatura esterno della ruota anteriore della trattrice (Buzzella, 2012):

$$R_{\text{est.}} = \sqrt{(R_{\text{int.}} + w)^2 + (l + g)^2}$$

I valori numerici dei raggi di curvatura del rimorchio, si possono calcolare con le seguenti seguenti formule matematiche.

Il raggio “R min.r1” di curvatura minimo della ruota anteriore del rimorchio (Buzzella, 2012):

$$R_{\text{min.r1}} = R_4 - \frac{1}{2} w t$$

La cerniera di snodo centrale, nel punto “C”, traccia la traiettoria del raggio di curvatura “R5”.

Applicando i principi della trigonometria, ai vertici del triangolo “OBC”, si ottiene una relazione matematica per calcolare il raggio “R5” di curvatura, con la seguente formula:

$$R5 = \sqrt{R4^2 + b3^2}$$

Invece, prendendo in considerazione i vertici del triangolo rettangolo “OCD”, la lunghezza “OC” è uguale a:

$$OC^2 = R6^2 + b4^2$$

$$OC^2 = R5^2 + b3^2$$

Il baricentro “G1” di massa del rimorchio anteriore, si trova ad una distanza rispetto al punto “B”, pari alla lunghezza “a1”. Per tanto, per il calcolo del raggio “R6”, possiamo enunciare la seguente formula:

$$R6 = \sqrt{Ry^2 - a1^2 + b3^2 - b4^2}$$

Per semplicità di calcolo del raggio “R6” di curvatura, viene ipotizzato che la posizione del baricentro “G1” corrisponda al punto “B”, e che la posizione del baricentro “G2” corrisponda al punto “D”.

Per tanto, per calcolare il raggio “R6”, l'equazione si semplifica con la formula:

$$R6 = \sqrt{R5^2 + b3^2 - b4^2}$$

Il raggio “R min.r2” di curvatura minimo della ruota posteriore interna del rimorchio, viene calcolato con lo stesso principio matematico utilizzato per il raggio “R min.r1” (Buzzella, 2012):

$$R \text{ min.r2} = R6 - \frac{1}{2}wt$$

Le formule appena illustrate, si utilizzano per calcolare i raggi di curvatura e gli angoli di sterzata del convoglio forestale articolato con o senza carico di legname.

Le uniche eccezioni da tenere presenti in caso di convoglio carico, sono quelle per il calcolo dei seguenti parametri: il raggio  $R_{minr2}$ , il raggio  $R_z$ , il raggio  $R_6$ , l'angolo di sterzo  $\gamma$ , e la lunghezza variabile "b4". Questi parametri sono in funzione della lunghezza variabile "b4".

Il calcolo della lunghezza variabile "b4", si ottiene applicando i principi della trigonometria sui vertici del triangolo "BCD" (figura 2.24). Mentre i rimanenti parametri vengono ottenuti dalle simulazioni CAD.

Il carico di legname, è appoggiato sulle ralle di articolazione ad una distanza "p".

Al variare dell'angolo di sterzo " $\alpha$ ", varia di conseguenza l'angolo " $\beta$ " e l'angolo " $\gamma$ ".

Al variare di " $\gamma$ ", si ottengono gli angoli " $\varphi$ ", " $\lambda$ " e " $\sigma$ ", i quali sono i rispettivi angoli del triangolo "BCD". Mentre i lati "BC" e "BD" del triangolo, rimangono fissi, il lato "CD" varia al variare dell'angolo " $\gamma$ ".

Si procede ora ad illustrare le formule per il calcolo: degli angoli interni del triangolo "BCD", e della lunghezza "CD" (lunghezza variabile "b4").

Ponendo come condizione iniziale la seguente equazione:

$$\frac{p}{\text{sen}\lambda} = \frac{b_4}{\text{sen}\omega} = \frac{b_3}{\text{sen}\sigma}$$

Si procede al calcolo dell'angolo " $\sigma$ ".

Se:

$$\frac{p}{\text{sen}\lambda} = \frac{b_3}{\text{sen}\sigma}$$

Allora:

$$\text{sen}\sigma = \frac{b_3}{p} \text{sen}\lambda$$

La formula per il calcolo dell'angolo " $\sigma$ " diventa:

$$\sigma = \text{arc sen}\left(\frac{b_3}{p} \text{sen}\lambda\right)$$

Si procede al calcolo dell'angolo "λ".

Se è vero che:

$$\sigma + \varphi + \lambda = \pi$$

Allora:

$$\lambda = \pi - \sigma - \varphi$$

Ma "λ " è anche:

$$\lambda = \pi - \gamma$$

Si procede al calcolo dell'angolo "φ", sostituendo "λ" nella formula:

$$\pi + \sigma + \varphi = \pi + \gamma$$

Elidendo il "π", si ottiene la formula per calcolare l'angolo "φ":

$$\varphi = \gamma - \sigma$$

Si procede al calcolo della lunghezza del lato "CD" ("b4").

Ponendo come condizione iniziale la seguente equazione:

$$\frac{p}{\text{sen}\lambda} = \frac{b4}{\text{sen}\varphi}$$

La formula per il calcolo di "b4" diventa:

$$b4 = \frac{p}{\text{sen}\lambda} \text{sen}\varphi$$

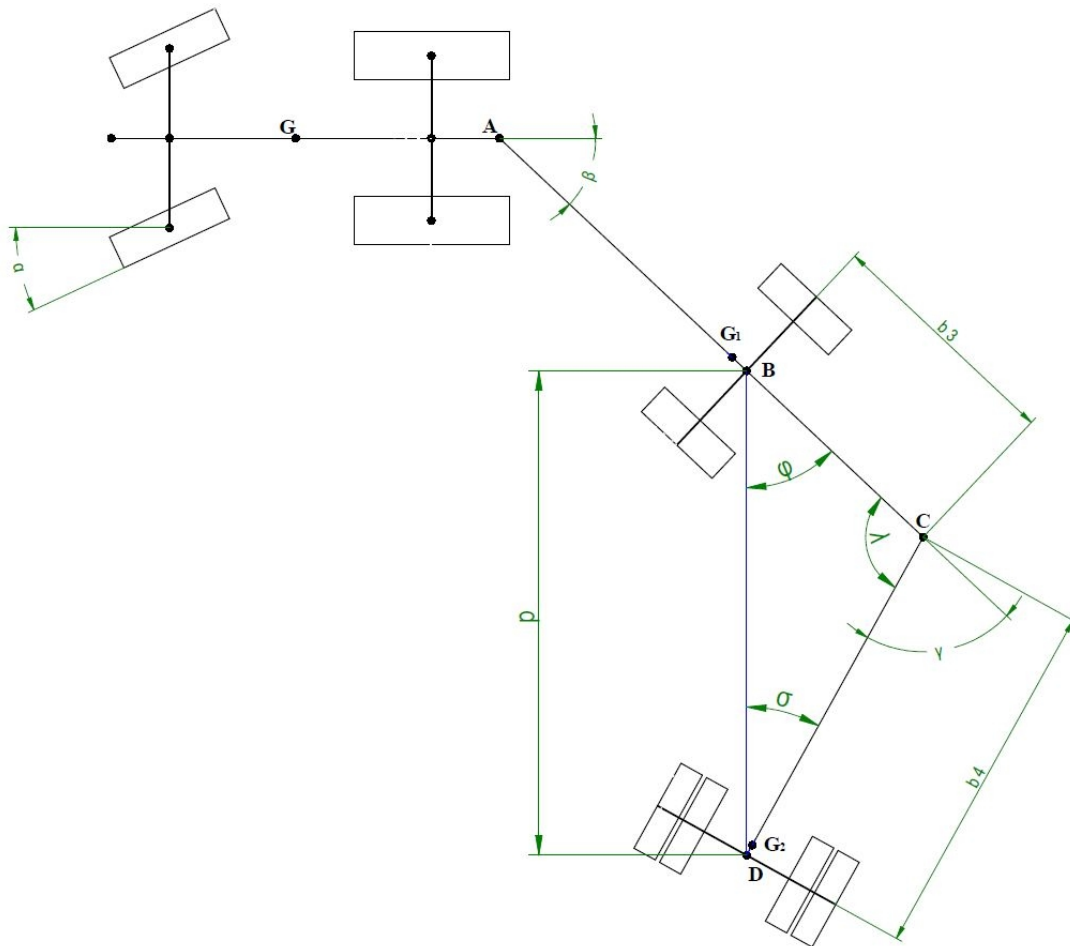


Figura 2.24: schema del triangolo “BCD” e lunghezza variabile “b4”.

## 2.7 DISEGNO 2D SU CAD DEI RAGGI DI CURVATURA INTERNI ED ESTERNI

Per simulare la manovra di sterzo del convoglio forestale articolato, è stato utilizzato uno specifico programma software per disegno 3D.

Il software utilizzato permette la progettazione, la visualizzazione e la modellazione solida di prototipi digitali tridimensionali.

Tale software viene indicato come CAD 3D, la modellazione solida meccanica è stata eseguita con Solid Edge® versione ST4 della Siemens.

Il software di simulazione, in generale, porta dei vantaggi in termini di progettazione e sperimentazione di nuovi veicoli.

Infatti: riduce i tempi e i costi per lo sviluppo della progettazione per nuovi prodotti; consente la verifica meccanica delle diverse varianti di design, sia per semplici elementi e sia per strutture complesse; permette la simulazione della dinamica per prevedere la traiettoria del movimento e la manovrabilità di un veicolo.

La rappresentazione della simulazione, è stata eseguita utilizzando il modello solido del convoglio forestale articolato, caricato con legname di lunghezza pari a 12,2 metri.

Nella figura 2.25, viene visualizzata una simulazione 2D del convoglio, che esegue la manovra di svolta su un tornante con raggio “R” pari a 6 metri. Nella figura 2.26, viene illustrata la manovra effettiva in ambiente.

L'illustrazione è stata eseguita utilizzando linee colorate, per indicare:

- con linea tratteggiata nera, la traiettoria del raggio “R” nella mezzeria della carreggiata;
- con linea tratteggiata gialla, la traiettoria del raggio “R min.r1” della ruota anteriore interna del rimorchio;
- con linea continua blu, la traiettoria del raggio “R massimo” della ruota anteriore esterna della trattrice.

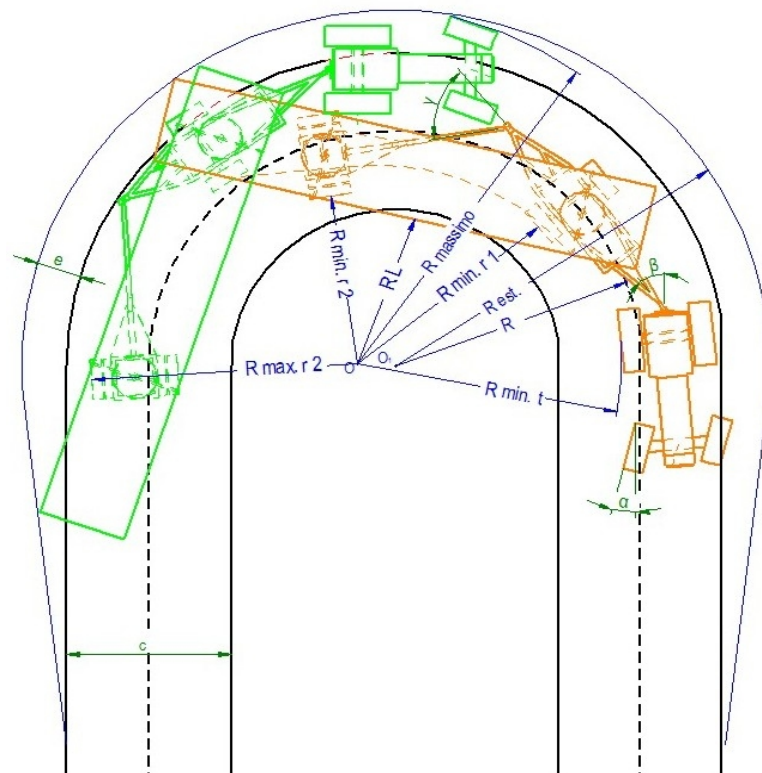


Figura 2.25: simulazione 2D di manovra del convoglio forestale, su tornante con raggio R=6 m.



Figura 2.26: illustrazione di manovra del convoglio forestale su tornante.

## 2.8 DISEGNO TRAIETTORIA DEI RAGGI DI CURVATURA IN TORNANTI CON RAGGIO DI CURVATURA CENTRO STRADA VARIABILE DA 6 A 12 METRI

La simulazione e l'analisi della traiettoria di svolta del convoglio forestale su tornanti con diversi raggi di curvatura, è stata eseguita lavorando in ambiente CAD, con il software Solid Edge® versione ST4.

Per lo studio della manovra del convoglio forestale, sono stati costruiti dei disegni:

- della geometria dei diversi tornanti;
- del modello 2D e 3D dell'intero convoglio forestale.

All'interno delle tabelle del software, sono stati inseriti di volta in volta i valori numerici:

- per l'angolo di sterzata " $\alpha$ " della trattrice;
- per il raggio "R3".

Il software è provvisto di un automatismo, ed effettua una elaborazione algoritmica, che permette di calcolare i valori degli angoli " $\beta$ " e " $\gamma$ ".



Fatto questo, si procede a vincolare la figura del convoglio, e con appositi comandi CAD, è possibile far ruotare il modello 2D del convoglio forestale rispetto al centro di istantanea rotazione "O".

Questa modalità, ci ha permesso di realizzare il tracciato della manovra di svolta del convoglio. Con il modello della sagoma di ingombro del convoglio forestale, ci è stato possibile verificare la percorribilità dello stesso sui diversi tornanti con raggio variabile.

La simulazione della manovra di svolta, ci ha permesso di raffigurare sulla tavola 2D, la fascia di ingombro del convoglio, e contemporaneamente verificare l'effettiva transitabilità su ciascun tornante.

E' stato osservato che le dimensioni costruttive della fascia di ingombro, dipendono dal modello della sagoma di ingombro del convoglio forestale e dal raggio "R" del tornante. Non dipendono, invece dalla traiettoria delle ruote.

Nella figura 2.27, viene illustrata una simulazione di manovra del convoglio forestale su tornante con raggio "R" pari a 8 metri.

Si evince da questa illustrazione, che la geometria del tornante ha come centro di costruzione il punto "O1", mentre il tracciato del convoglio forestale, ruota attorno al centro "O".

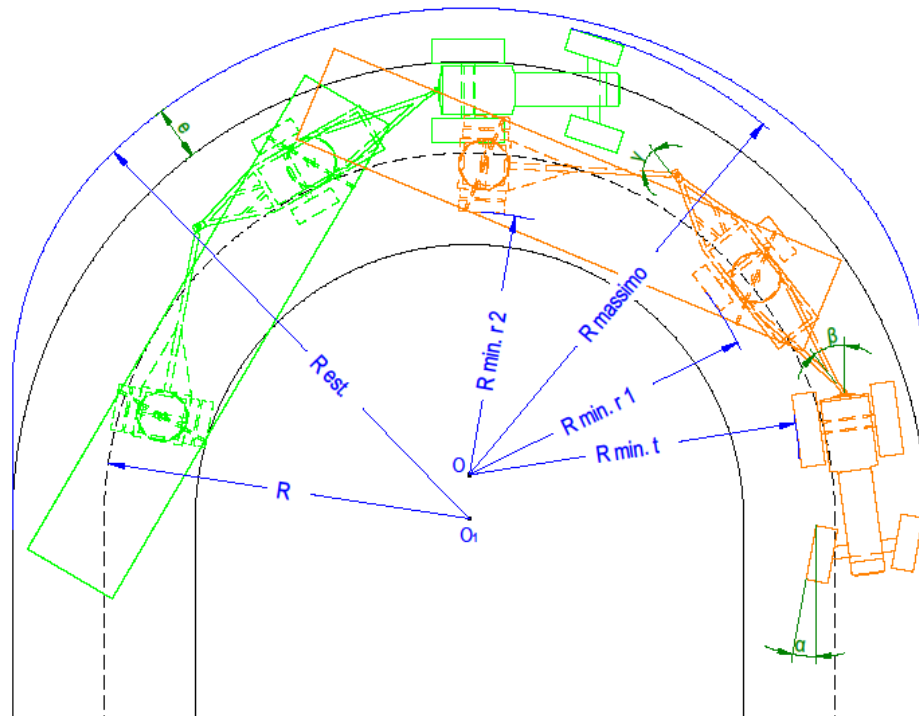


Figura 2.27: simulazione di manovra del convoglio forestale, su tornante con raggio  $R=8$  m.



### 3 RISULTATI

Il rimorchio forestale articolato, con il suo doppio sterzo, ha dimostrato una soluzione efficace, permettendo la diminuzione del raggio di curvatura e l'incremento della manovrabilità, indipendentemente dalla lunghezza del legname. Il telaio articolato, tramite una cerniera centrale al rimorchio, controlla meccanicamente e adatta la direzione delle ruote gemellari posteriori.

Lo studio basato sulle simulazioni al CAD del modello di sagoma del convoglio (figura 3.1), ha permesso di analizzare: le dimensioni della fascia di ingombro massimo per la manovra, il raggio minimo e l'allargamento supplementare della curva.

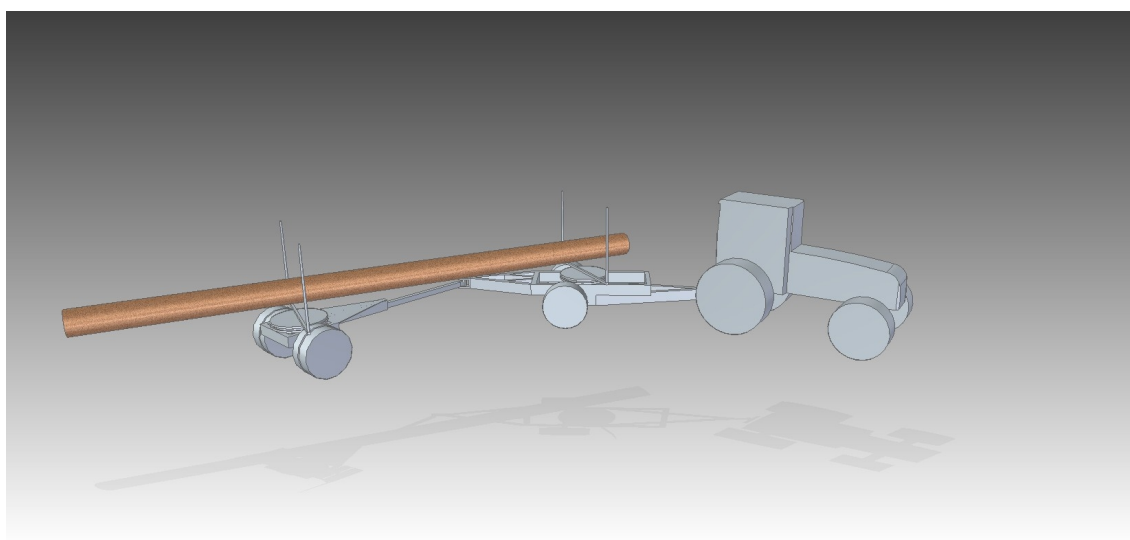


Figura 3.1: modello 3D complessivo del convoglio forestale articolato.

#### 3.1 DETERMINAZIONE DEL RAGGIO DI CURVATURA MINIMO CHE CONSENTE AL COMPLESSO TRATTRICE-RIMORCHIO DI PROCEDERE SENZA MANOVRE

La rete stradale rappresenta una questione chiave per l'efficienza dei trasporti di legname. In montagna le strade forestali sono spesso strette, con curve e tornanti frequenti. Per tanto, sono necessari sistemi di trasporto che sfruttano il più piccolo raggio di curvatura. Per il trasporto ci si avvale della combinazione di una trattoria con rimorchio.

In generale il sistema combinato garantisce la manovrabilità con lunghezze del legname fino a 6 metri. Quando le lunghezze superano gli 8÷10 metri, la manovrabilità peggiora sensibilmente.

Il prototipo del modello di rimorchio con telaio a doppio sterzo, è stato progettato con l'asse anteriore controllato con ruote motrici, e con l'asse posteriore non controllato, ma libero di ruotare rispetto ad una cerniera a snodo.

Quando il rimorchio transita una curva, la distanza tra le ralle di articolazione resta vincolata dalla posizione rigida del legname, mentre il timone telescopico esegue una estensione nella fase di rotazione dei due assali.

Quando la trattrice manovra il rimorchio intorno a una curva, si deve porre attenzione alla traiettoria delle ruote del convoglio e alla traccia della fascia di ingombro.

Conoscendo il passo tra le ruote della trattrice, il passo tra le ruote del rimorchio, la larghezza dei pneumatici, è possibile calcolare il raggio minimo "R min.r2" di curvatura, eseguito dal rimorchio.

Il raggio minimo di curvatura deve essere poi confrontato con il raggio interno "R int." della curva, e la seguente condizione viene verificata se il "R int." è  $\leq$  al "R min."

Il raggio massimo "R massimo" di curvatura del convoglio, deve essere invece confrontato con il raggio esterno "R est." della curva, e la seguente condizione viene verificata se il "R est." è  $\geq$  a "R massimo".

Chiaramente, la proiezione dell'ingombro determinato dalla lunghezza dei tronchi, non deve uscire dalla carreggiata tracciata fra il "R int." e il "R est." della curva.

Il presente studio, è stato realizzato con l'utilizzo di un software CAD per la progettazione e modellazione solida 3D. Con tale software sono state simulate le diverse dinamiche del rimorchio, per comprendere le traiettorie di svolta, la manovrabilità, e il ruolo della cerniera di snodo centrale.

La posizione della cerniera, non ha alcun effetto sul raggio di curvatura dell'assale anteriore del rimorchio. Invece, la posizione della cerniera, ha un effetto notevole sul raggio di curvatura dell'assale posteriore del rimorchio.

In termini di raggio di curvatura, più vicina è la cerniera all'assale anteriore e minore risulta il raggio di curvatura tracciato dalle ruote posteriori (figura 3.2).

Tale risultato ci porta ad una conclusione, che più vicina è la cerniera all'assale anteriore e migliore è la manovrabilità.

Questo risultato ci porta ad una conclusione che non è corretta, in quanto, per una migliore manovrabilità del convoglio, non è necessario conoscere solo il raggio minimo “R min.r2” di curvatura. Piuttosto, occorre conoscere anche la differenza massima fra il raggio “R min.r2” e il raggio “R massimo” (figura 2.26).

Questa differenza “ $\Delta R$ ” massima, è il parametro che rappresenta la larghezza della carreggiata, quella necessaria al convoglio per eseguire la manovra di curva.

Chiaramente, maggiore risulterà la differenza “ $\Delta R$ ” e minore risulterà il raggio “R int.” interno della curva, come nel caso della manovra su tornante con “R” pari a 6 metri (figura 3.14).

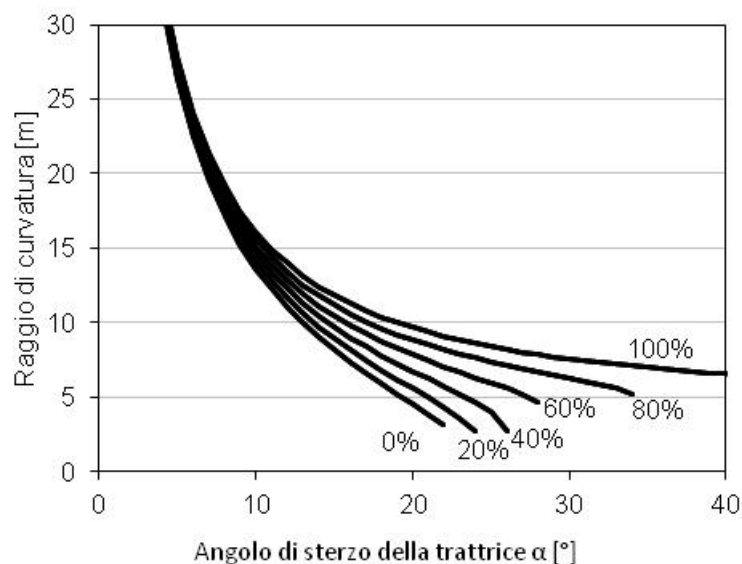


Figura 3.2: rappresentazione del variare del raggio di curvatura, al variare del passo, in funzione dell'angolo di sterzo “ $\alpha$ ”.

Le simulazioni ci hanno anche permesso di elaborare l'ipotesi, di posizionare la cerniera ad una distanza variabile rispetto all'assale anteriore del rimorchio.

Le simulazioni sono state eseguite, per distanze variabili fra il 40% e l'80% del passo (di lunghezza 6440 mm) degli assali del rimorchio.

La distanza ottimale verificata, è vicina al 60%.

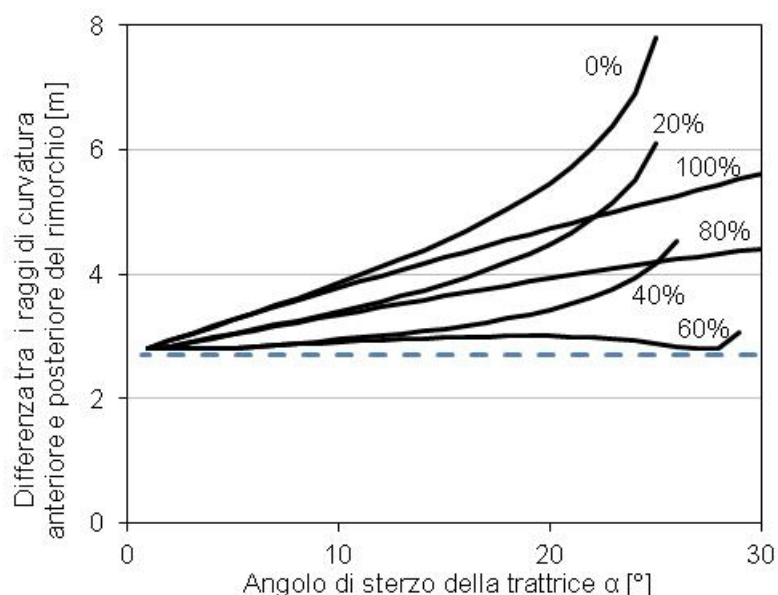


Figura 3.3: rappresentazione della variazione della differenza “ $\Delta R$ ”, al variare del passo, in funzione dell'angolo di sterzo “ $\alpha$ ”.

Nella figura 3.3, viene rappresentata la differenza “ $\Delta R$ ” in funzione del raggio “ $R_4$ ” di curvatura anteriore del rimorchio, la linea tratteggiata blu indica il limite inferiore rappresentato dalla larghezza dell'assale anteriore.

Per la verifica della buona manovrabilità del convoglio forestale, è stata presa in considerazione non solo la posizione delle ruote rispetto alla geometria della strada, ma anche le dimensioni della fascia di ingombro massimo del convoglio, con particolare attenzione alla dinamica della cerniera e delle ralle di articolazione.

Infatti, lo spostamento dinamico e laterale della cerniera, deve essere il minimo possibile, in quanto un piccolo ostacolo lungo la traiettoria di manovra, potrebbe causare un blocco della parte posteriore del rimorchio e portarlo fuori strada. Inoltre, l'ingombro massimo e orizzontale del legname deve essere controllato e minimizzato, in modo da ridurre le probabilità di interferenze con gli ostacoli, lungo il fianco esterno della carreggiata.

Nelle simulazioni realizzate, per valutare lo scostamento laterale della cerniera centrale e la fascia di ingombro massimo del legname, è stato considerato l'interasse tra gli assali del rimorchio pari ad una lunghezza di 6440 mm. Nuovamente è stato studiato l'effetto della cerniera di snodo centrale, cioè variando la posizione da un minimo di 0% ad un massimo di 70% del passo. I risultati sono riassunti nel grafico sottostante (figura 3.4).

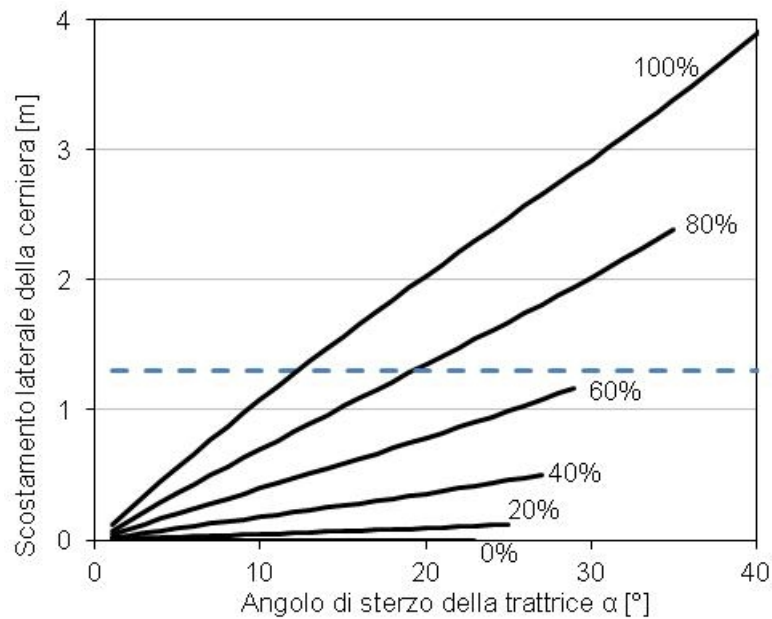


Figura 3.4: rappresentazione dello scostamento laterale della cerniera, al variare del passo, in funzione dell'angolo di sterzo “ $\alpha$ ”.

La linea tratteggiata blu, indica il limite inferiore rappresentato dalla metà della larghezza dell'assale anteriore, se lo spostamento supera tali valori, allora si può supporre che la cerniera sporga dalla proiezione del telaio del rimorchio.

Nella posizione 0% della cerniera, si ottengono le condizioni di un rimorchio standard (agricolo) a due assi con unica ralla anteriore, dove lo spostamento è costantemente uguale a zero, indipendentemente dal raggio di curvatura dell'assale anteriore.

Nelle condizioni in cui, la posizione della cerniera si sposta verso l'indietro del rimorchio, aumentano i valori di sporgenza, trovando il massimo ad una distanza superiore al 60% del passo.

L'altra simulazione, è stata realizzata per analizzare la traiettoria della proiezione orizzontale e sporgente dei tronchi di legname.

Viene considerata, la differenza fra il raggio “RL” minimo di curvatura tracciato dai tronchi e il raggio “R min.r2” minimo interno tracciato dalla ruota gemellare posteriore.

I risultati sono riportati nella figura seguente (figura 3.5).

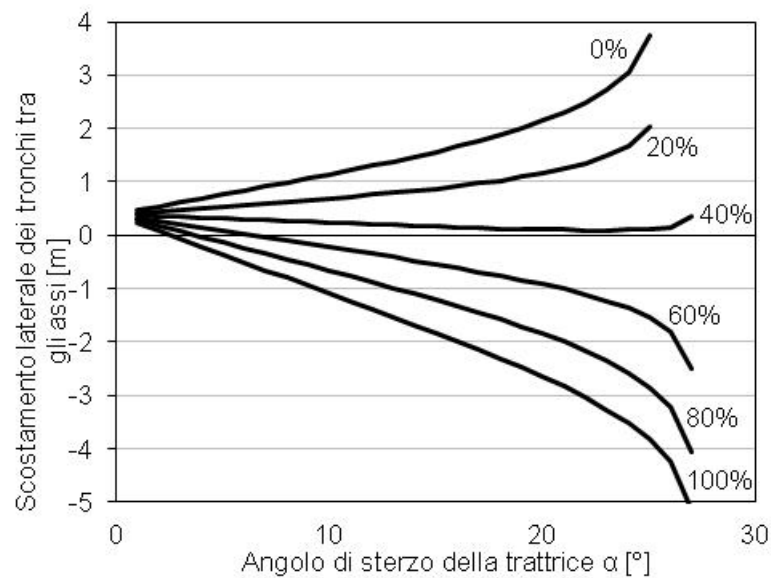


Figura 3.5: rappresentazione della differenza tra il raggio “R min.r2” minimo di curvatura e il raggio “RL” minimo interno dei tronchi, al variare del passo, in funzione dell’angolo di sterzo “ $\alpha$ ”.

Per ridurre al minimo la probabilità di interferenze con ostacoli esterni, la proiezione dei tronchi deve essere sempre entro la traiettoria delle ruote. Questa condizione non è sempre possibile, soprattutto quando si eseguono le manovre con un rimorchio articolato.

In realtà, è stato osservato che quando la posizione della cerniera si sposta all’indietro, aumenta la probabilità di interferenza con gli ostacoli esterni. In quanto, lo spostamento relativo ai tronchi di legname, rispetto alla traiettoria della ruota gemellare interna, diventa negativo.

In altre parole, come la cerniera si avvicina all’assale posteriore, il raggio “RL” minimo interno dei tronchi (vedere figura 2.25), diventa minore del raggio “R min.r2” minimo di curvatura interno della ruota gemellare.

Per mantenere sempre la differenza positiva, cioè per evitare interferenze con gli ostacoli esterni, la cerniera di snodo deve essere mantenuta ad una distanza inferiore al 40% del passo, rispetto all’assale anteriore.

Un’altra considerazione, è stata posta sul raggio massimo di curvatura prodotto dall’ingombro sporgente dei tronchi di legname.

La traiettoria maggiore si ottiene, solo quando i tronchi sono lunghi, e le estremità sporgono dalla parte posteriore del rimorchio.



La differenza, fra il raggio "R est." esterno massimo di curvatura tracciato dai tronchi, e il raggio "R max.r2" massimo di curvatura esterno della ruota gemellare (vedere figura 2.25), è stata quantificata e rappresentata nella figura 3.6 .

Per la simulazione sono stati considerati dei tronchi di legname di lunghezza 12 metri, con una sporgenza posteriore di 4 metri.

Chiaramente, è stato riscontrato che su curve con raggio stretto, l'allargamento "e" supplementare è superiore (figura 3.14).

Tale effetto viene in qualche modo ridotto se la cerniera si avvicinasse all'asse posteriore. L'effetto è più evidente con tronchi lunghi, e diventa meno evidente con tronchi più corti.

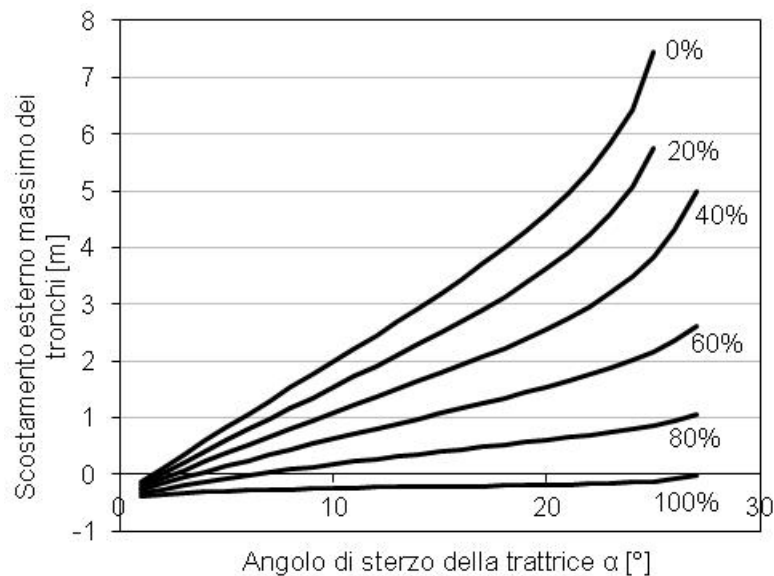


Figura 3.6: rappresentazione della differenza tra il raggio "R max.r2" massimo di curvatura delle ruote gemellari, e il raggio "R est." massimo esterno dei tronchi, al variare del passo, in funzione dell'angolo di sterzo " $\alpha$ ".

Le condizioni di variazione dei tre angoli di sterzo del convoglio, è stata calcolata con le formule matematiche, e verificata con la simulazione al CAD.

Si riscontra, che al variare dell'angolo di sterzo " $\alpha$ ", varia di conseguenza gli angoli " $\beta$ " e " $\gamma$ ", come rappresentato dal grafico che segue (figura 3.7).

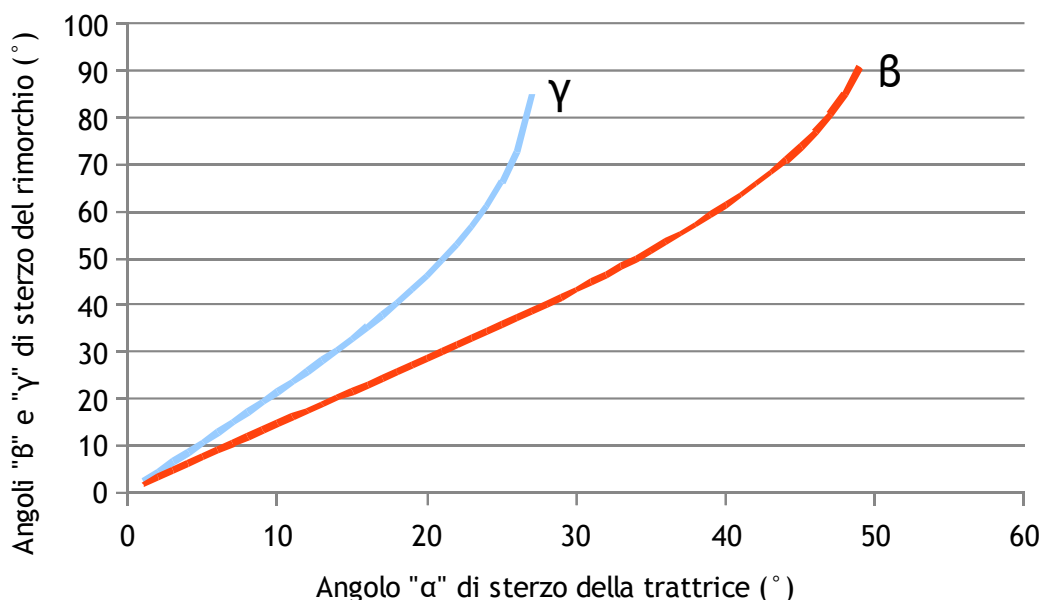


Figura 3.7: variazione degli angoli di sterzo "β" e "γ", in funzione di "α".

Le simulazioni, ci hanno permesso di ottenere gli angoli "α" di sterzata massimi, per la trattrice, di cui:

- 22°, per manovra su tornante, con convoglio articolato carico di legname;
- 30°, per manovra su tornante e su piazzola di inversione, con convoglio articolato scarico di legname.

Nel primo caso, dove l'angolo di sterzo supera i 22°, la trattrice può trasmettere condizioni di instabilità al rimorchio, a tal punto che potrebbe rovesciarsi.

Nel secondo caso, dove l'angolo di sterzo supera i 30°, la ruota motrice posteriore della trattrice intercetta il timone anteriore del rimorchio, provocando il blocco della manovra.

Con le simulazioni, sono stati messi in relazione i seguenti parametri: la lunghezza "p" (vedere figura 2.24) del passo tra gli assali del rimorchio, e il raggio "R" di curvatura del tornante.

Per il passo "p", sono state utilizzate tre lunghezze, rispettivamente: di 5440 mm, di 6440 mm e di 7440 mm.

Nelle tabelle 3.8, 3.9 e 3.10, si riassumono i risultati numerici ottenuti dalle simulazioni di manovra del convoglio articolato carico di legname.

A seconda della lunghezza del passo “p”, il raggio “R est.” di curvatura, viene determinato dalla lunghezza sporgente del legname sul lato posteriore del rimorchio, e può risultare maggiore o minore del valore del raggio “R massimo” di curvatura, che viene determinato dalla linea di traiettoria delle ruote anteriori della trattrice.

Nel caso in cui, il passo sia lungo 5440 mm, risulta un raggio “R est.” maggiore del raggio “R massimo”.

E' stato osservato che la differenza “ΔR”, cioè il parametro che rappresenta la larghezza di carreggiata necessaria al convoglio forestale articolato di completare la curva, varia in funzione: dell'angolo “α” di sterzata della trattrice, dalla lunghezza del passo “p” tra gli assali del rimorchio, dalla posizione della cerniera di snodo centrale.

In questa specifica analisi, la larghezza necessaria “ΔR” viene calcolata per differenza, tra il raggio esterno più ampio tracciato dal convoglio e il raggio interno della curva.

Dai risultati delle simulazioni, si esprime la seguente considerazione: l'allargamento “e” supplementare della carreggiata, è necessario sui tornanti con “R” 6 e 8 metri, qualora venga trasportato legname di lunghezza  $\geq 11$  metri.

Tabella 3.8: risultati numerici ottenuti dalle simulazioni di manovra del convoglio, con lunghezza interasse tra gli assali pari a 5440 mm.

R(m)	α(°)	B(°)	γ(°)	R int.(m)	R est.(m)	R massimo(m)	R min.r2(m)	R min.r1(m)	R min.t(m)	ΔR(m)	e(m)	c(m)
6	20	33,60	45,50	4	10,173	9,206	5,350	5,633	6,427	6,173	2,173	4
8	18	29,83	39,00	6	11,033	10,086	6,444	6,637	7,332	5,033	1,033	4
10	15	24,40	30,50	8	12,716	11,800	8,486	8,592	9,136	4,716	0,716	4
12	13	20,90	25,70	10	14,240	13,400	10,253	10,327	10,784	4,240	0,240	4

Tabella 3.9: risultati numerici ottenuti dalle simulazioni di manovra del convoglio, con lunghezza interasse tra gli assali pari a 6440 mm.

R(m)	α(°)	B(°)	γ(°)	R int.(m)	R est.(m)	R massimo(m)	R min.r2(m)	R min.r1(m)	R min.t(m)	ΔR(m)	e(m)	c(m)
6	20	33,27	47,42	4	9,098	9,154	4,370	5,583	6,370	5,154	1,154	4
8	18	29,51	42,01	6	9,698	11,018	5,778	6,567	7,281	5,018	1,018	4
10	14	22,42	31,87	8	12,320	12,558	8,918	9,293	9,913	4,558	0,558	4
12	13	19,04	27,05	10	13,885	13,918	10,462	10,847	11,277	3,918	-0,082	4

Tabella 3.10: risultati numerici ottenuti dalle simulazioni di manovra del convoglio, con lunghezza interasse tra gli assali pari a 7440 mm.

R(m)	α(°)	B(°)	γ(°)	R int.(m)	R est.(m)	R massimo(m)	R min.r2(m)	R min.r1(m)	R min.t(m)	ΔR(m)	e(m)	c(m)
6	18,5	30,75	66,50	4	7,620	9,820	4,120	6,380	7,090	5,820	1,820	4
8	16	26,20	50,40	6	9,777	11,120	6,490	7,870	8,460	5,120	1,120	4
10	14	22,60	41,40	8	11,525	12,550	8,380	9,400	9,900	4,550	0,550	4
12	12,5	20,10	35,70	10	13,051	13,910	10,030	10,848	11,276	3,910	-0,090	4

I risultati riassunti nelle tabelle, ci permettono di dedurre, che all'aumentare del passo “p”, diminuisce il raggio “R min.r2” di curvatura minima del rimorchio e, chiaramente si riduce l'allargamento “e” supplementare della carreggiata. Viceversa, al diminuire del passo “p”, aumenta il raggio “R min.r2” di curvatura e di conseguenza diventa maggiore l'allargamento “e” supplementare della carreggiata.

Il passo tra gli assali, di lunghezza 5440 mm, consente al convoglio di eseguire una manovra con raggi di curvatura inferiori, però il carico che grava sull'assale posteriore del rimorchio aumenta rispetto agli altri passi.

Fra le tre lunghezze di passo, il miglior risultato è stato ottenuto dalla lunghezza di passo pari a 6440 mm, perché garantisce una buona manovrabilità, e non permette che il sovraccarico gravi sull'assale posteriore.

Le simulazioni al CAD, hanno dato anche la possibilità di confrontare le manovre di svolta fra un rimorchio forestale articolato e un rimorchio standard (agricolo).

Il passo “p”, è stato fissato per entrambi i rimorchi, pari ad una lunghezza di 6440 mm.

Nel riquadro sottostante (tabella 3.11), si riassumono i risultati numerici ottenuti dalle simulazioni di manovra.

Tabella 3.11: risultati numerici ottenuti dalle simulazioni di manovra, fra il convoglio con rimorchio forestale articolato e il convoglio con rimorchio standard.

<b>R(m)</b>	<b><math>\alpha(^{\circ})</math></b>	<b>R int.(m)</b>	<b>R est.(m)</b>	<b>R massimo(m)</b>	<b><math>\Delta R(m)</math></b>	<b>e(m)</b>	<b>c(m)</b>
6	17	4	11,736	11,736	7,736	3,736	4
8	15	6	12,650	12,650	6,650	2,650	4
10	13	8	13,450	13,450	5,450	1,450	4
12	11,5	10	15,000	15,000	5,000	1,000	4

Dal confronto dei risultati della tabella 3.9 e della tabella 3.11, si evince che: nel caso di un convoglio con rimorchio standard, l'allargamento “e” supplementare della carreggiata, risulta maggiore rispetto all'allargamento determinato da un convoglio con rimorchio forestale articolato. La stessa considerazione vale anche per il raggio “R massimo” e “R est.”.

Ulteriori risultati, sono stati ottenuti misurando la velocità del sistema di trasporto. Il rilievo con il GPS, e la successiva elaborazione di correzione differenziale dei dati acquisiti in *post-processing*, ha permesso di verificare le velocità di percorrenza della trattrice e del rimorchio forestale articolato lungo il percorso, seguito sia a pieno carico che scarico. Sono stati estratti in modo casuale 30 velocità lungo il tragitto, per le tre condizioni omogenee di tratti stradali percorsi:

- fondo asfaltato e pendenza inferiore a 8%;
- fondo migliorato e pendenza inferiori a 8%;
- fondo migliorato con pendenza superiori a 8%;

per entrambe le condizioni, di viaggio a pieno carico e viaggio scarico.

I risultati riepilogativi delle velocità medie, sono riportati in tabella 3.12 e in figura 3.13.

Tabella 3.12: riepilogo dati rilevati dal sistema di trasporto.

Fondo	Pendenza	Direzione	Mezzo	Media	Mediana	Dev.St.	Minimo	Massimo
-	%	-	-	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h
Asfalto	< 8	Discesa	Scarico	35,50	35,24	2,22	32,50	38,64
Asfalto	< 8	Salita	Carico	23,01	23,97	3,02	17,48	26,96
Migliorato	< 8	Salita	Scarico	12,76	12,26	2,87	8,35	19,01
Migliorato	< 8	Discesa	Carico	5,51	5,58	1,27	3,13	7,72
Migliorato	> 8	Salita	Scarico	7,89	7,18	1,70	5,47	11,96
Migliorato	> 8	Discesa	Carico	4,04	3,90	0,94	2,49	6,04

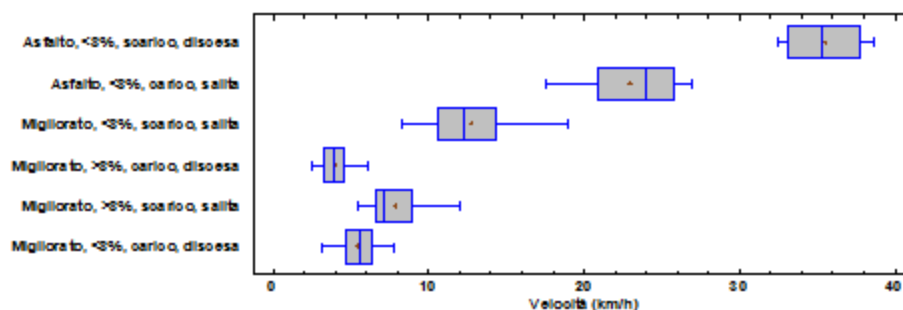


Figura 3.13: grafico della velocità di percorrenza per tipologia di tratto stradale.

Per ultima analisi, è stata valutata la possibilità di utilizzare un'altra trattrice per trainare il rimorchio forestale e per condurre la manovra di svolta. Possiamo affermare, che esiste la possibilità qualora vengono rispettate le seguenti condizioni: la potenza della trattrice deve essere tale da sviluppare la motricità necessaria per la trazione (vedere capitolo 2.1), e inoltre la trattrice deve essere dotata di quattro ruote motrici. Le dimensioni di ingombro della trattrice non sono influenti sulla dimensione della fascia di ingombro massimo.

### 3.2 CARATTERISTICHE DI TORNANTI PER IL TRANSITO DEL VEICOLO

Nelle figure 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, si riportano i risultati grafici delle simulazioni eseguite sul convoglio forestale articolato, mentre esegue la manovra di svolta su tornante con raggio “R” di curvatura variabile da 6 a 12 metri.

Nelle illustrazioni sono state visualizzate le traiettorie con delle linee colorate:

- con la linea blu in grassetto e a tratto continuo, si indica la traiettoria del raggio “R3” di curvatura dell'assale anteriore della trattrice;
- con le linee rosse in grassetto e a tratto continuo, sul tornante con raggio “R” pari a 6 metri, si indica la traiettoria del raggio “R min.r2” di curvatura interna della ruota gemellare posteriore, e la traiettoria del raggio “R massimo” di curvatura esterna della ruota anteriore della trattrice;
- con le linee blu in grassetto e a tratto continuo, sul tornante con raggio “R” pari a 8 metri, si indica la traiettoria del raggio “R min.r2” di curvatura interna della ruota gemellare posteriore, e la traiettoria del raggio “R massimo” di curvatura esterna della ruota anteriore della trattrice;
- con la linea blu e a tratto continuo, si indica l'allargamento “e” supplementare della curva, ottenuto dal raggio “R massimo” di un rimorchio forestale articolato;
- con la linea nera e tratteggiata, si indica la linea di mezzeria della carreggiata, rappresentata dal raggio “R”;
- con le linee nere e a tratto continuo, si indicano i margini della carreggiata, per i rettifili e per la curva;
- con la linea magenta e tratteggiata, si indica l'allargamento “e” supplementare della curva, ottenuto dal raggio “R massimo” di un rimorchio agricolo standard;
- con le linee gialle e a tratto continuo, si indica la fascia di ingombro massimo del convoglio forestale articolato.

Nelle figure che seguono, la sagoma del modello del convoglio forestale articolato, viene rappresentata con una immagine all'ingresso e una all'uscita dalla curva, e con un'immagine intermedia in fase di curva.

Per mezzo di linee colorate, vengono raffigurate: le traiettorie effettive delle ruote, e la fascia di ingombro massimo.

Le simulazioni, ci portano a concludere, che le svolte del convoglio, su tornanti con raggio “R” pari a 6 metri, sono di difficile manovrabilità.

Tali tornanti possono essere transitati agevolmente, se la carreggiata ha una larghezza maggiore di 4 metri, e se il valore dell'allargamento "e" supplementare è maggiore di 1 metro su tutta la lunghezza del tornante. In questi tornanti, la pendenza consigliata della carreggiata, dovrà risultare inferiore del 8%.

Invece, su tornanti con raggio "R" pari a 8 metri, si riscontra una buona manovrabilità del convoglio, anche con pendenze variabili e maggiori del 8%, vedere figura 3.15.

Infatti, sui tornanti con raggio "R" pari a 8 metri, sussistono le condizioni per far sì che la fascia di ingombro del convoglio sia minima, e la manovrabilità di svolta sia buona.

Anche sui tornanti con raggio "R" di 10 e 12 metri, la manovrabilità del convoglio risulta ottima.

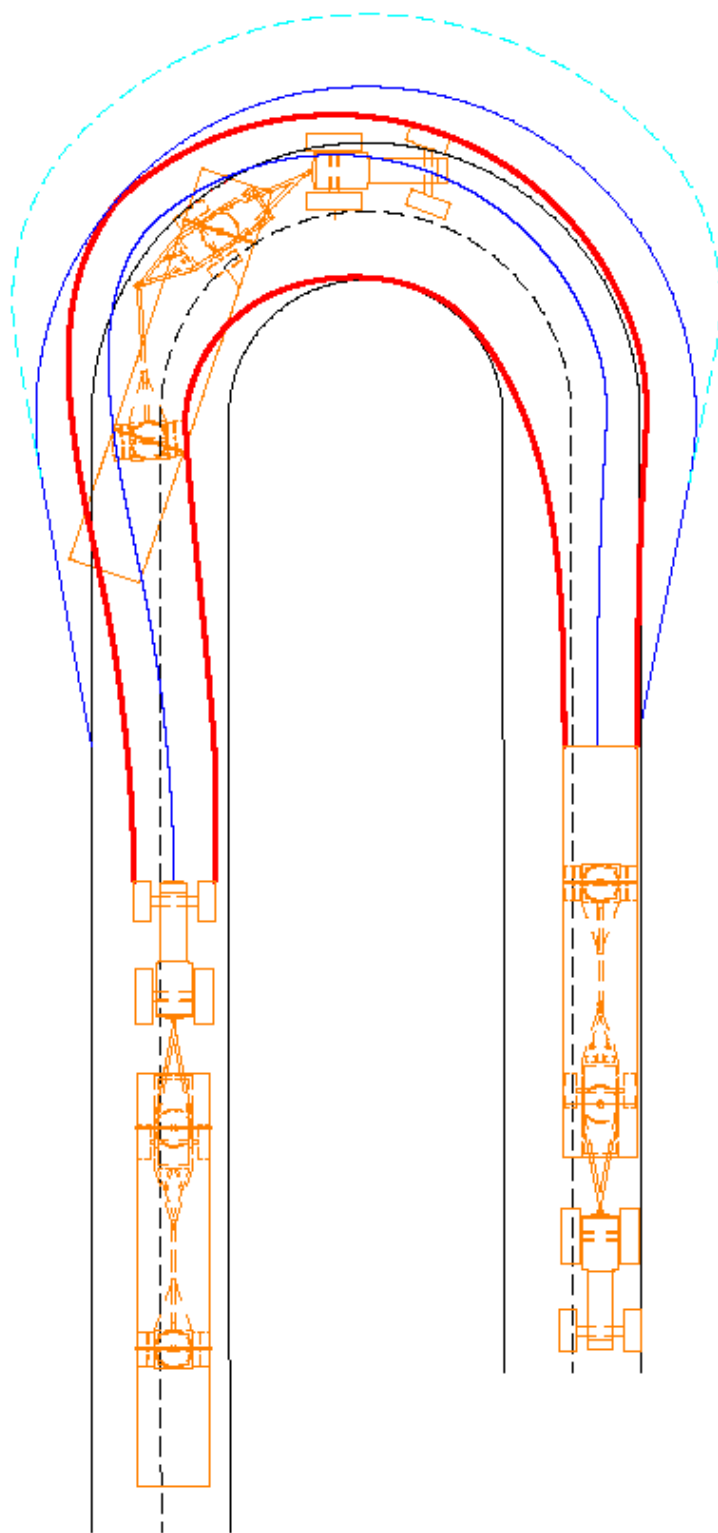


Figura 3.14: simulazione 2D della traiettoria, su tornante con raggio "R" pari a 6 metri.



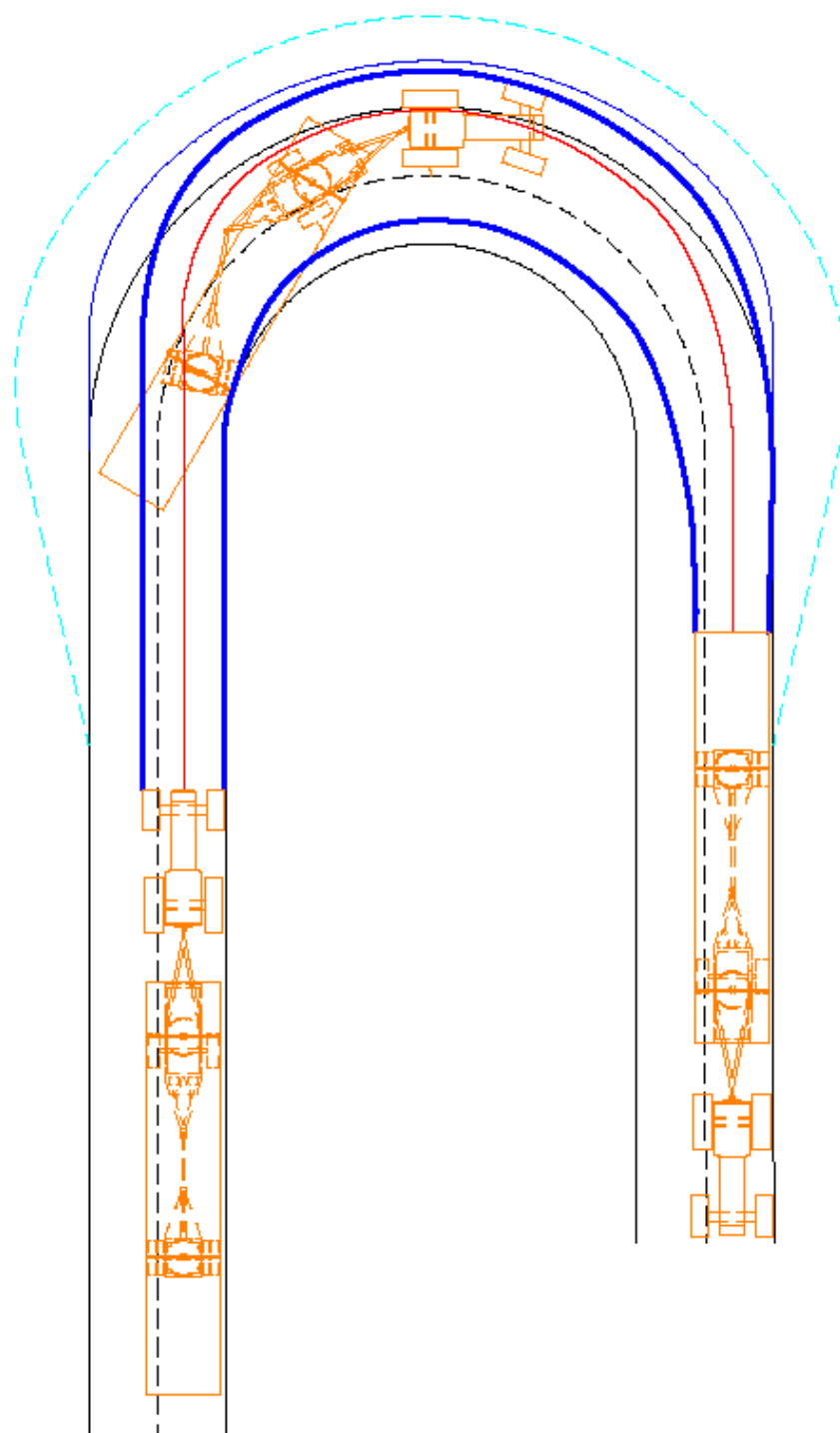


Figura 3.15: simulazione 2D della traiettoria, su tornante con raggio "R" pari a 8 metri.

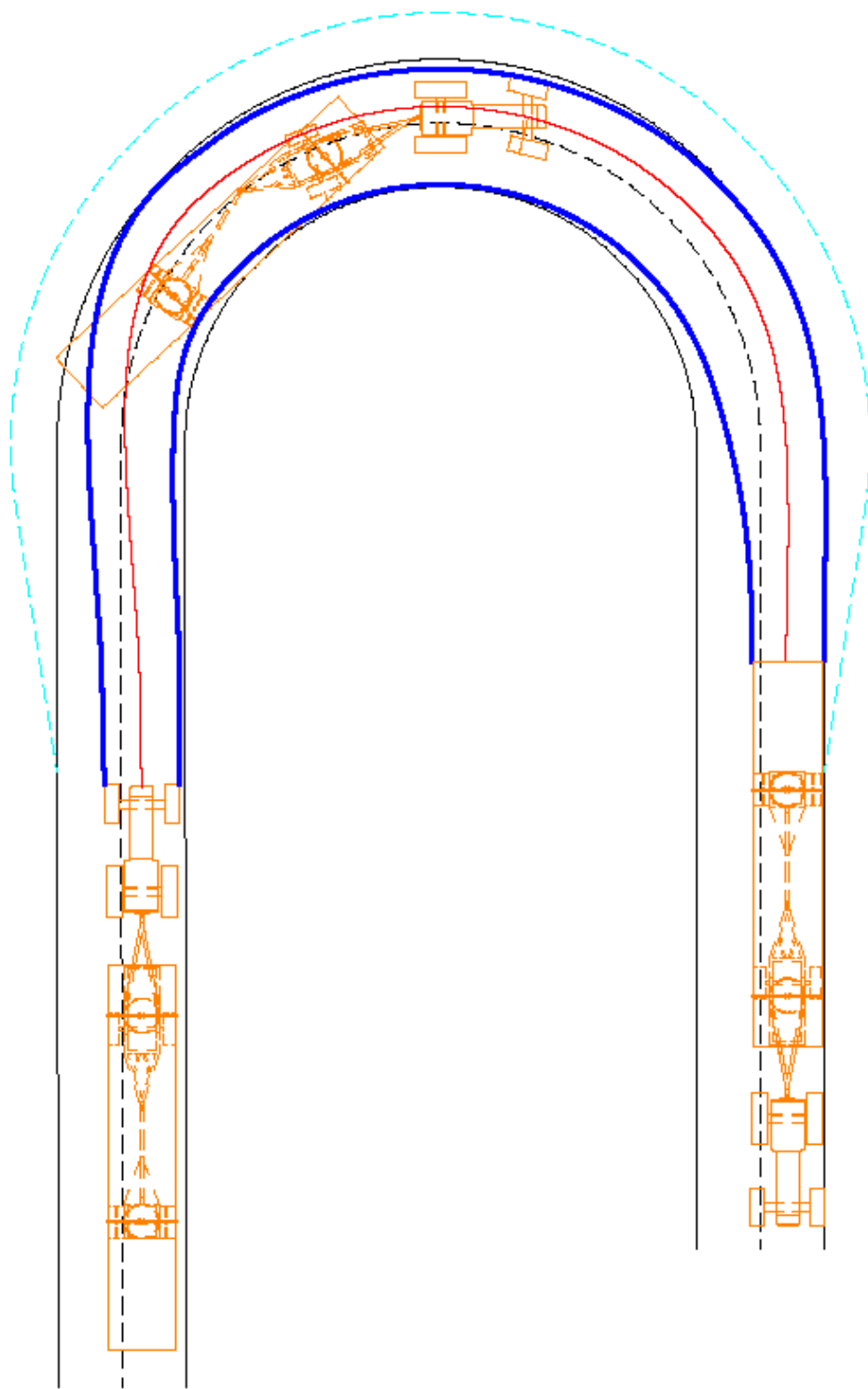


Figura 3.16: simulazione 2D della traiettoria, su tornante con raggio “R” pari a 10 metri.

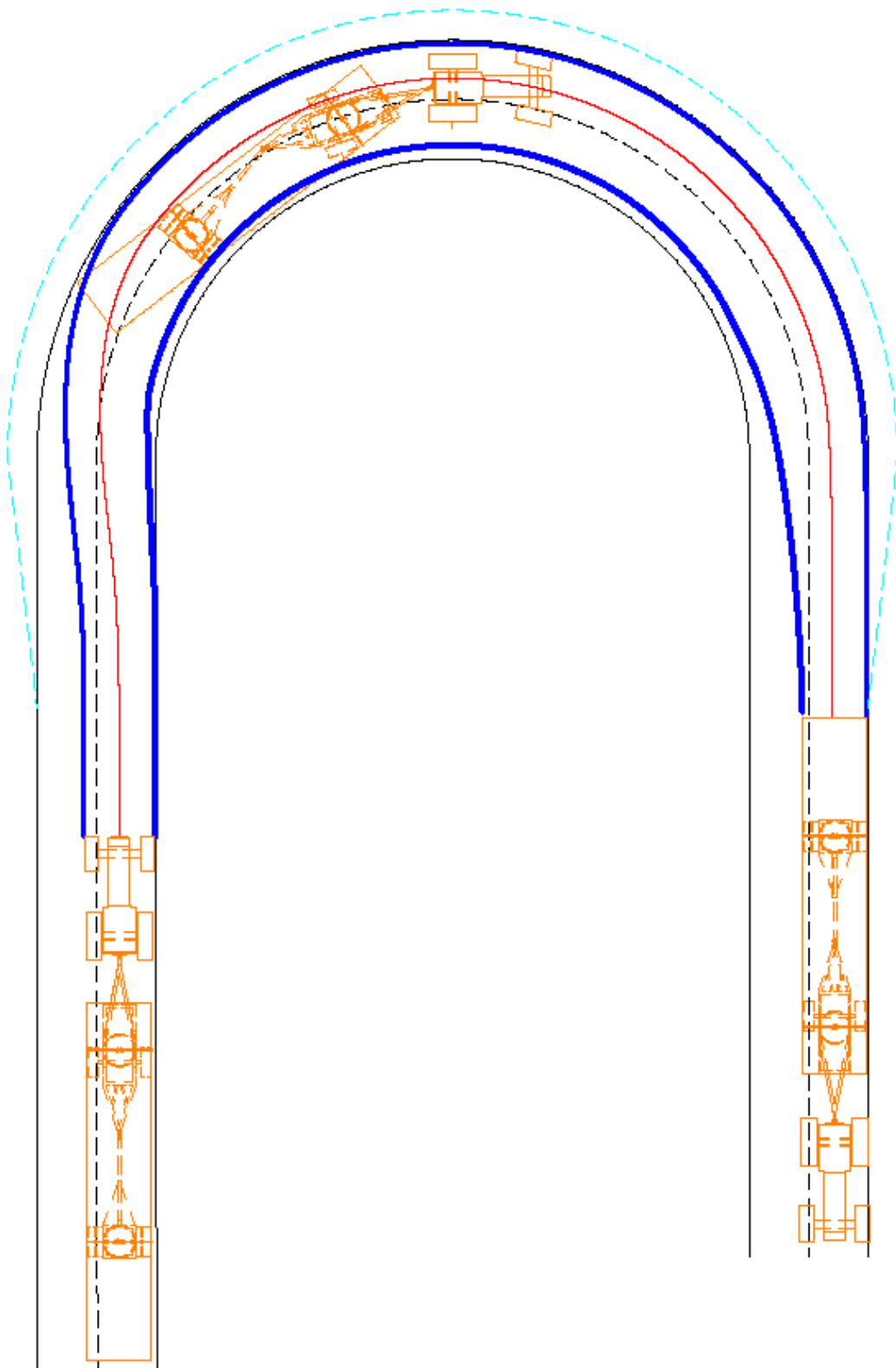


Figura 3.17: simulazione 2D della traiettoria, su tornante con raggio "R" pari a 12 metri.



## 4 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Il convoglio forestale articolato, è una soluzione tecnica efficiente per il trasporto di legname con lunghezze eccezionali, ed è efficace per la riduzione dei costi generali di trasporto.

Il rimorchio articolato permette manovre di svolta con raggi minimi di curvatura, con una migliore manovrabilità, indipendentemente dalla lunghezza del legname.

Di seguito vengono esposti dei valori critici di carattere tecnico, da considerare per eventuali interventi di miglioramento nel caso di una riprogettazione meccanica del rimorchio articolato.

Nella fase di manovra del convoglio su tornante con raggio "R" pari a 6 metri, si evince uno strisciamento con attrito tra il pneumatico delle ruote gemellari posteriori del rimorchio e il fondo stradale. In tal modo, non viene permesso il normale rotolamento delle ruote e l'attrito che si genera, potrebbe provocare il ribaltamento del rimorchio con tutto il carico di legname. Si potrebbe migliorare la manovra, con l'installazione di ruote auto sterzanti per mezzo di un sistema idraulico. Le ruote auto sterzanti, risultano spesso utili nella fase di manovra in retromarcia del rimorchio su tornanti.

Da un confronto tra le dimensioni del rimorchio e quelle del carico di legname, si osserva che il carico di legname non viene distribuito equamente sugli assali del rimorchio. Il carico maggiore, grava sull'assale posteriore del rimorchio e corrisponde al valore del 70% sul totale del carico. Questa situazione di carico non distribuito, non agevola la capacità di trazione motrice della trattrice.

Il baricentro anteriore del rimorchio, precisamente nel punto "G1" (figura 2.22), coincide con l'asse di rotazione della ralla di articolazione. In condizioni di normalità, la distanza "a1", fra il punto "B" e il baricentro "G1", deve essere compresa fra 100 e 200 mm.

Dai rilievi dimensionali del rimorchio articolato, si riscontra la distanza "a1" pari a un valore di 400 mm.

Una posizione ottimale del baricentro, può garantire l'ottima manovrabilità del veicolo durante la fase di traino. In quanto, l'asse del punto di baricentro funge da cerniera di rotazione. Nella fase costruttiva dei rimorchi, è buona tecnica porre l'asse del baricentro in posizione anteriore, rispetto all'asse delle ruote del rimorchio, in modo che il rimorchio segua il baricentro.

Nel rimorchio articolato, la lunghezza “a1” è pari a 400 mm, e risulta un valore doppio rispetto al parametro di normalità di 200 mm. Ne consegue, una riduzione della manovrabilità della parte anteriore del rimorchio, ma anche una maggiore manovrabilità della parte posteriore del rimorchio, soprattutto quando la manovra viene eseguita su tornante e a pieno carico di legname.

E' stato osservato, nella manovra di svolta del convoglio forestale articolato su tornante con raggio “R” pari a 8 metri, che l'assale delle ruote gemellari posteriori del rimorchio, assume un assetto sbilanciato e propenso verso l'interno del tornante, ne consegue un effetto torsionale sul timone. Le condizioni del fondo stradale vanno ad influenzare questo fenomeno. Infatti, molto spesso, il fondo stradale è sconnesso e ha una pendenza trasversale negativa. Queste condizioni, non consentono un regolare e costante sostegno alle ruote del rimorchio nella fase di transito.

Per bilanciare l'assetto dell'assale posteriore del rimorchio, sarebbe opportuno che le ruote fossero libere di adattarsi al fondo stradale. Perciò, un sistema a bogie, potrebbe permettere tale adattamento.

In ogni caso, per ridurre l'effetto torsionale sul timone, è necessario permettere all'occhione della cerniera di snodo centrale, di ruotare liberamente.

## BIBLIOGRAFIA

Bodria L., Pellizzi G., Piccarolo P. 2006. Meccanica Agraria, Volume I. Bologna: Edagricole - Edizioni Agricole de Il Sole 24 ORE Edagricole s.r.l. .

Bodria L., Pellizzi G., Piccarolo P. 2006. Meccanica Agraria, Volume II. Bologna: Edagricole - Edizioni Agricole de Il Sole 24 ORE Edagricole s.r.l. .

Buzzella. 2012. Veicol Dynamics Diseign. Appunti di lezione. Eth, Zurigo.

Canale S., Leonardi S., Pappalardo G. 2012. Verifica delle traiettorie veicolari in corrispondenza delle intersezioni a raso. Proposte di adeguamento dei criteri di progettazione. <http://www.stradelandia.it/pubdown/46.pdf> Consultato on-line: 20.12.2012.

Cavalli R., Cappellari E., Grigolato S. 2010. Metodologia per la valutazione delle esigenze silvo-pastorale in un contesto montano. L'Italia Forestale e Montana 65 (3): 313-330.

Cavalli R., Grigolato S., Fedel D. 2010. Viabilità e approvvigionamento di biomasse legnose forestali.

Cavalli R. 2011. La viabilità forestale e la meccanizzazione forestale nelle aree natura 2000. Università degli Studi di Padova.

Cielo P., Gottero F., Morera A., Terzuolo P. 2003. La viabilità agro-silvopastorale: elementi di pianificazione e progettazione. IPLA - Regione Piemonte, 106 pp.

Cividini R. 1991. Elementi di Tecnologia Forestale. Bologna: Edagricole. 463 p.

D.M. 14 novembre 1997 - Attuazione della direttiva 97/27/CE del 22 luglio 1997 del Parlamento europeo e del Consiglio concernente le masse e le dimensioni di alcune categorie di alcuni veicoli a motore e dei loro rimorchi e che modifica la direttiva 70/156/CEE (Gazz.Uff. 6 maggio 1998, n.103).

De Col E. 2012. Cronaca - Corriere delle Alpi.

Dystra D.P., Heinrich R. e Harcharic D.A. 1996. FAO model code of forest harvesting practice: Food and Agriculture Organization of the United Nations: Roma.

ENAMA. 2011. Sintesi delle norme di Circolazione stradale riguardanti le macchine agricole. Grafiche Trusiani srl: Tivoli. 64p.

Epstein R., Rönqvist M. e Weintraub A. 2007. Forest Transportation. In Weintraub, C. Romero, T. Bjorndal, R. Epstein & J. Miranda (Eds.) Handbook Of Operations Research In Natural Resources. Springer US 99:391-403.

Esposito T., Mauro R., Corradini M. 2007. Le intersezioni stradali e le nuove norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni.

FPIinnovationsks. 2011. Biomass trucks and resources road standard. Advantage report 13 (2). <http://www.feric.ca> Consultato on-line: 20.12.2012.

Grigolato S. 2012. Logistica e viabilità forestale. Corso di Laurea in Scienze Forestali e Ambientali, Anno I semestre II. Università degli studi di Padova.

Guicciardi M. 1998. Dinamica del Veicolo. Torino: Città Studi Edizioni.

Hippoliti G. 1976. Sulla determinazione delle caratteristiche della rete viabile forestale. L'Italia Forestale e Montana, n.6.

Hippoliti G. 1994. Le utilizzazioni forestali. Firenze: CUSL.

Hippoliti G. 1998. Precisazioni su alcune caratteristiche di strade e piste forestali. Monti e Boschi, n. 6.

Hippoliti G. 2002. Appunti di meccanizzazione forestale. Firenze: Società Editrice Fiorentina.

Kuonen V. 1983. Wald und Güterstrassen: Planung Projektierung Bau. Eigenverlag: PFAFFHAUSEN. p.742 AAVV. 2012. New Zealand Forest Road Engineering Manual. NZ Forest Owners Association: Wellington p. 150.



Marchi E., Spinelli R. 1997. L'impatto ambientale delle strade forestali. L'Italia forestale e montana, anno LII, n. 4.

Medici P. 2011. Vehicle Dynamic and Trajectory. Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione di Parma.

Rindi A., Papini S., Pugi L., Auciello J. 2007. Appunti del Corso di Meccanica del Veicolo. Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Sezione di Meccanica Applicata, Università di Firenze.

Simwanda M., Wing M.G. E Sessions J. 2011. Evaluating global positioning system accuracy for forest biomass transportation tracking within varying forest canopy Western Journal of Applied Forestry. 26:165-173.

Stagni E. 1968. Meccanica della locomozione. Bologna: Casa Editrice Patron.

Veal M.W., Taylor S.E., McDonald T.P., McLemore D.K. E Dunn M.R. 2001. Accuracy of tracking forest machines with GPS. Transactions of the ASAE. 44:1903-1911.

## SITI INTERNET

[Zaccaria, 2012 - www.zaccariarimorchi.com](http://www.zaccariarimorchi.com)

[Mattedi, 2012 - www.mattedi-rimorchi.com](http://www.mattedi-rimorchi.com)

[Galvagni, 2012 - www.galvagnirimorchi.it](http://www.galvagnirimorchi.it)

[Bernardi, 2012 - www.bernardimacchine.it](http://www.bernardimacchine.it)

[Tridec, 2012 - www.tridec.com](http://www.tridec.com)

[Riedler, 2012 - www.ridler.com](http://www.ridler.com)

[Omar, 2012 - www.omarrimorchi.it](http://www.omarrimorchi.it)