

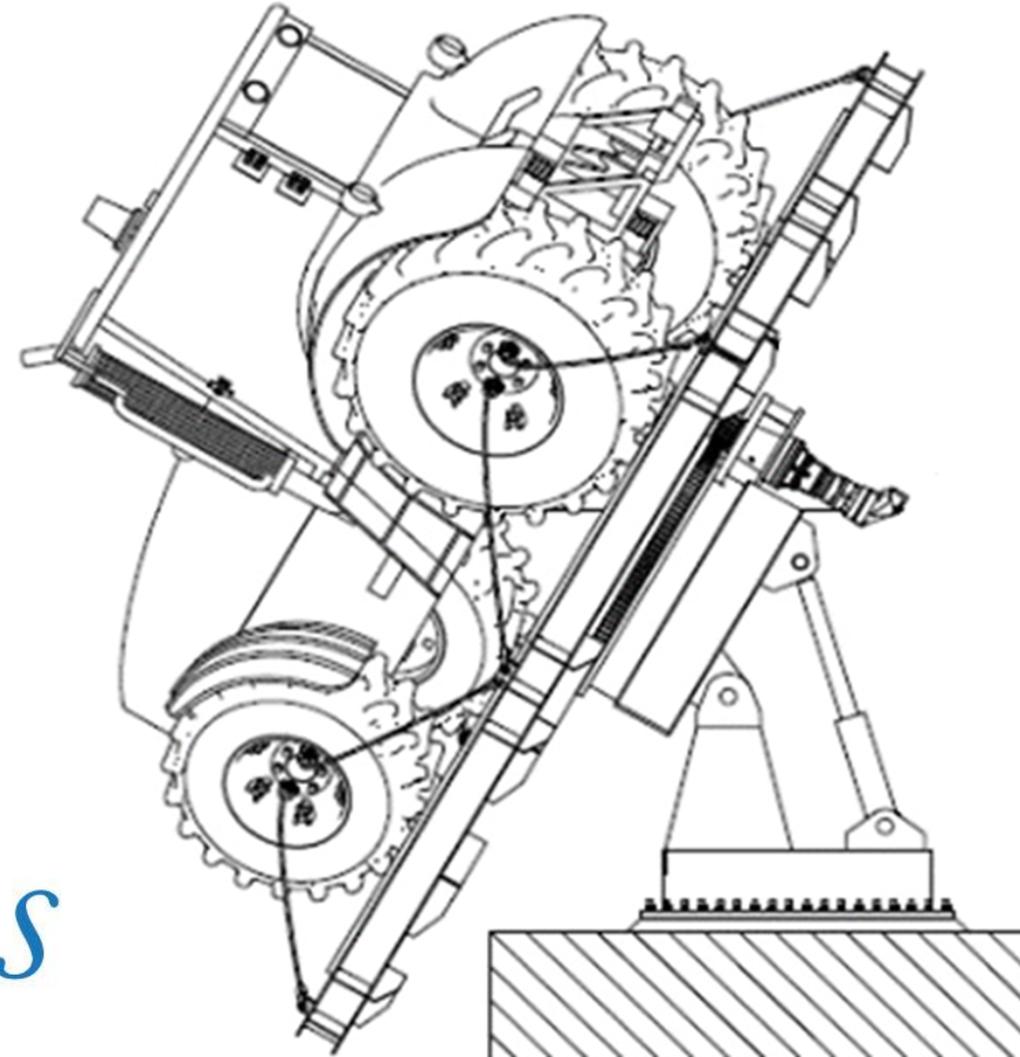
# La sicurezza delle macchine agro-forestali contro il rischio di ribaltamento

---

EIMA Campus – Bologna 9 Novembre 2024

Giovanni Carabin, PhD  
[giovanni.carabin@unibz.it](mailto:giovanni.carabin@unibz.it)

- Introduzione
- Stabilità delle macchine
- Sistemi di protezione
- Sistemi di misura e certificazione
- Applicazioni e aspetti futuri

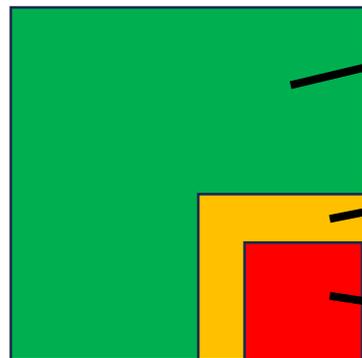
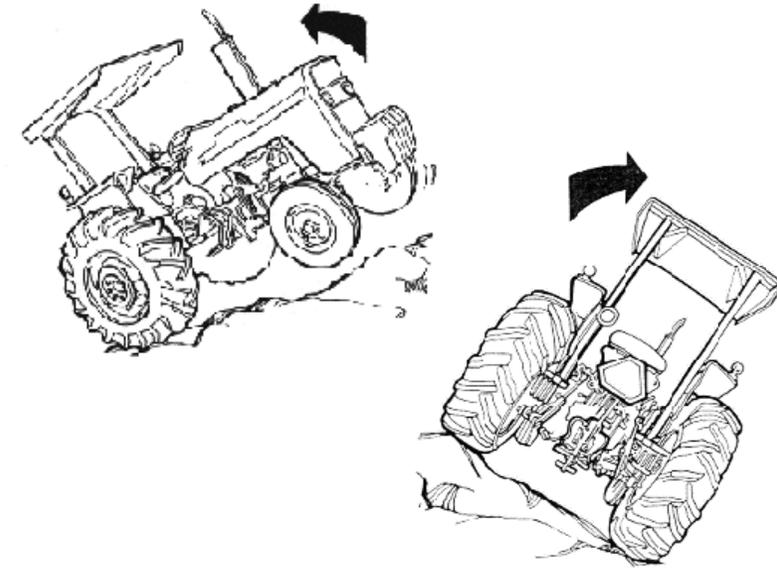


# Introduzione

- **29/10/2024 - Casperia (RI)**  
[Si ribalta con il trattore e muore. Ad accorgersene è stato un passante](#)
- **16/10/2024 - Tenno (TN)**  
[Tenno, si ribalta col trattore mentre lavora. Incidente fatale per 83enne](#)
- **16/10/2024 - Roncà (VR)**  
[Tragedia a Roncà: agricoltore in gravi condizioni dopo ribaltamento del trattore](#)
- **15/10/2024 - Palo del Colle (BA)**  
[Settantenne si ribalta con il trattore a Palo del Colle: ricoverato in prognosi riservata](#)
- **10/09/2024 - Bergamo (BG)**  
[Si ribalta con il trattore mentre aiuta il fratello impantanato in un campo. 58enne grave a Bergamo](#)
- **08/08/2024 - Postiglione (SA)**  
[Si ribalta con il trattore in campagna: non ce l'ha fatta il 74enne elitrasmportato al Ruggi](#)
- **24/07/2024 - Brisighella (RA)**  
[Muore schiacciato dal trattore mentre lavora](#)
- **16/07/2024 - Strangolagalli (FR)**  
[Si ribalta con il trattore e muore, mercoledì i funerali di Luciana Arduini](#)
- **14/07/2024 - Cles (TN)**  
[Cles, 56enne muore schiacciato dal suo trattore. L'allarme dato dalla famiglia](#)
- **04/06/2024 - Livo (TN)**  
[Tragedia a Livo: il trattore si ribalta, perde la vita Federico Agosti di 78 anni](#)



- Il settore agricolo contende da sempre a quello edilizio il triste primato degli incidenti mortali sul lavoro.
- La principale causa di decesso è dovuta al ribaltamento del trattore
- In media **100-140 incidenti fatali all'anno in Italia dovuti al ribaltamento dei mezzi agricoli.**
- Dal 2008 è stato istituito un osservatorio dedicato al monitoraggio di tali incidenti presso il DiSAA dell'Università di Milano.



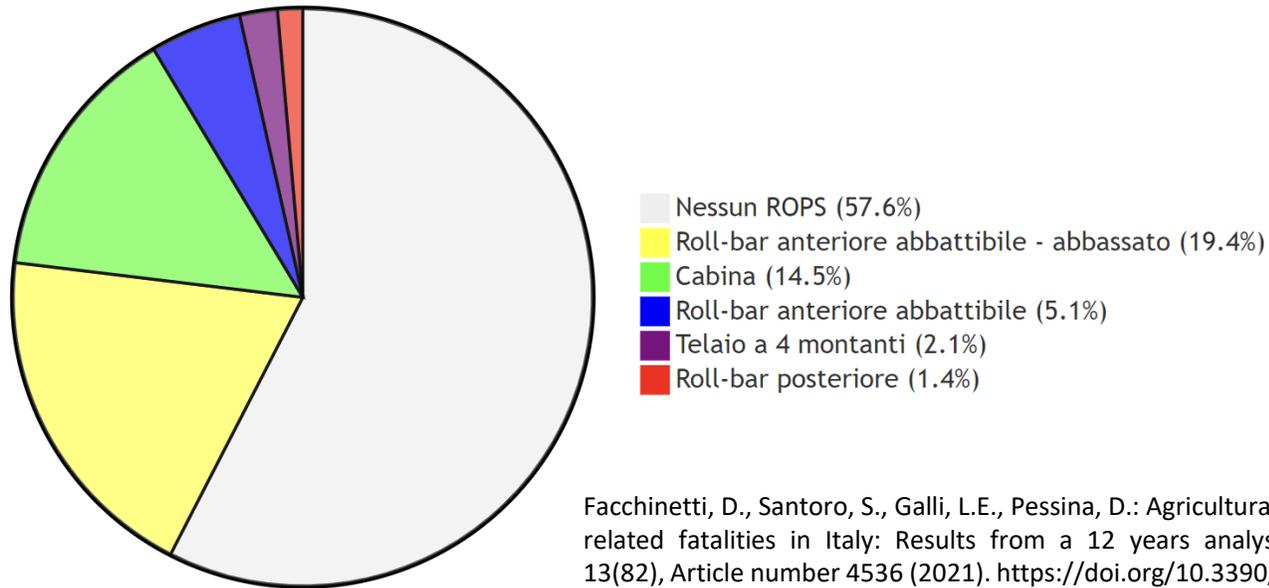
735 incidenti mortali in agricoltura nel periodo 2018-2022.

Operazioni con macchinari, in particolare trattori (22%).

Incidenti dovuti al ribaltamento (circa 50%)



Tipi di ROPS montati sui trattori agricoli coinvolti in incidenti mortali con ribaltamento in Italia nel periodo 2008-2014.



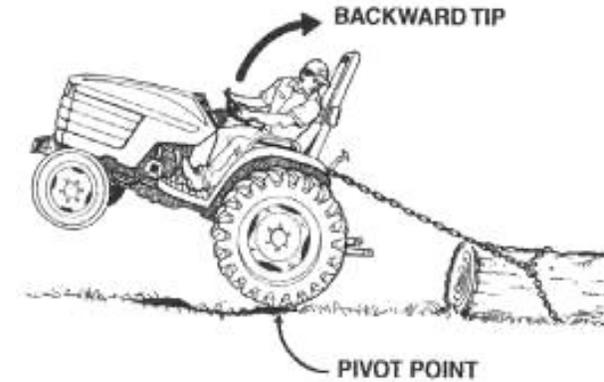
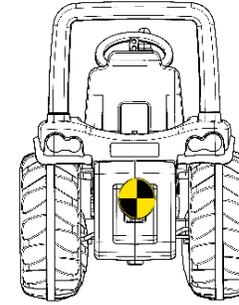
Facchinetti, D., Santoro, S., Galli, L.E., Pessina, D.: Agricultural tractor roll-over related fatalities in Italy: Results from a 12 years analysis. Sustainability 13(82), Article number 4536 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13084536>

- I **trattori vecchi e usurati** (in Italia 1,7 milioni di trattori con un'età media di 26 anni), spesso **privi di strutture di protezione** antiribaltamento (ROPS) e di cinture di sicurezza, contribuiscono in modo significativo agli incidenti mortali.
- Anche quando i ROPS sono presenti, spesso vengono rimossi o lasciati in **posizione di riposo**.

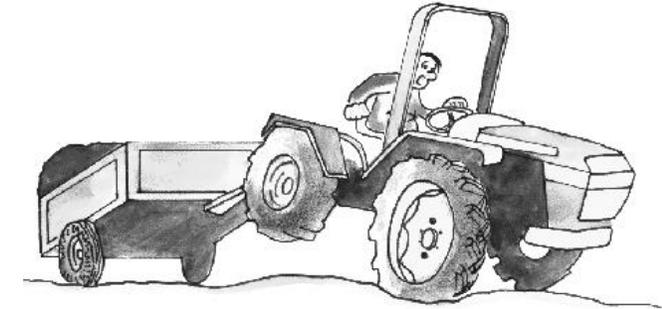
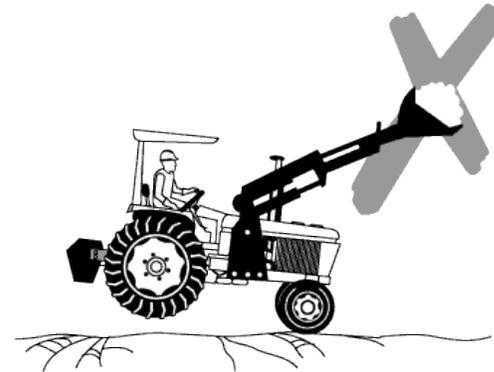


○ Le principali cause di ribaltamento sono relative a:

○ **architettura del trattore** (centro di massa elevato, carreggiata stretta, sviluppo di coppie motrici elevate).



○ **condizioni operative** (accoppiamento con carichi gravosi a sbalzo, inerzia di macchine trainate non frenate, manovre errate).



○ **caratteristiche del terreno** (pendenze accentuate, superficie irregolare, buche, cunette, dislivelli, ecc).



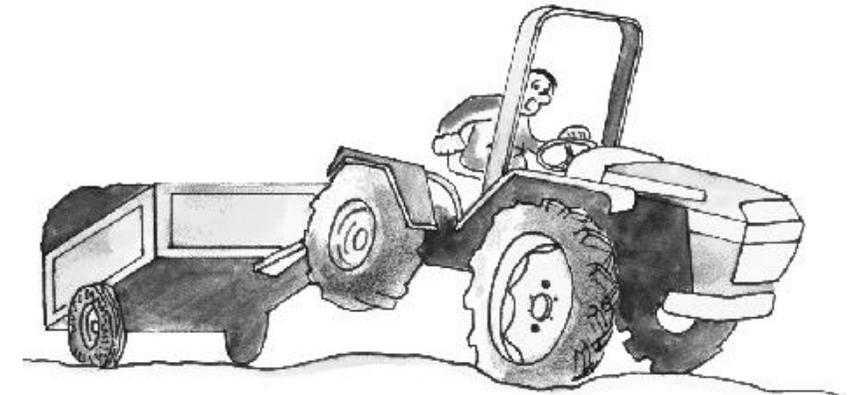
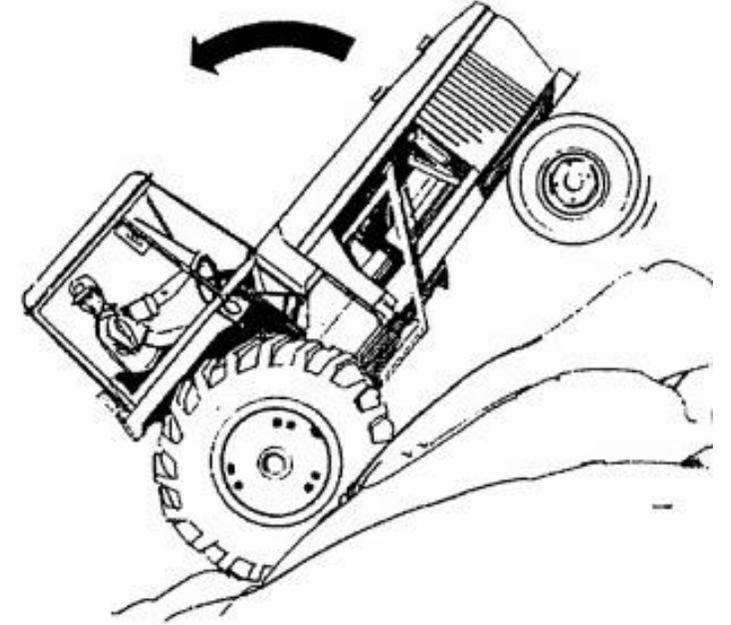
## Tipologie ribaltamento

- Ribaltamento laterale (75% dei casi)
  - Coricamento laterale (rotazione  $< 180^\circ$ )
  - Rotolamento continuo (rotazione  $> 180^\circ$ )



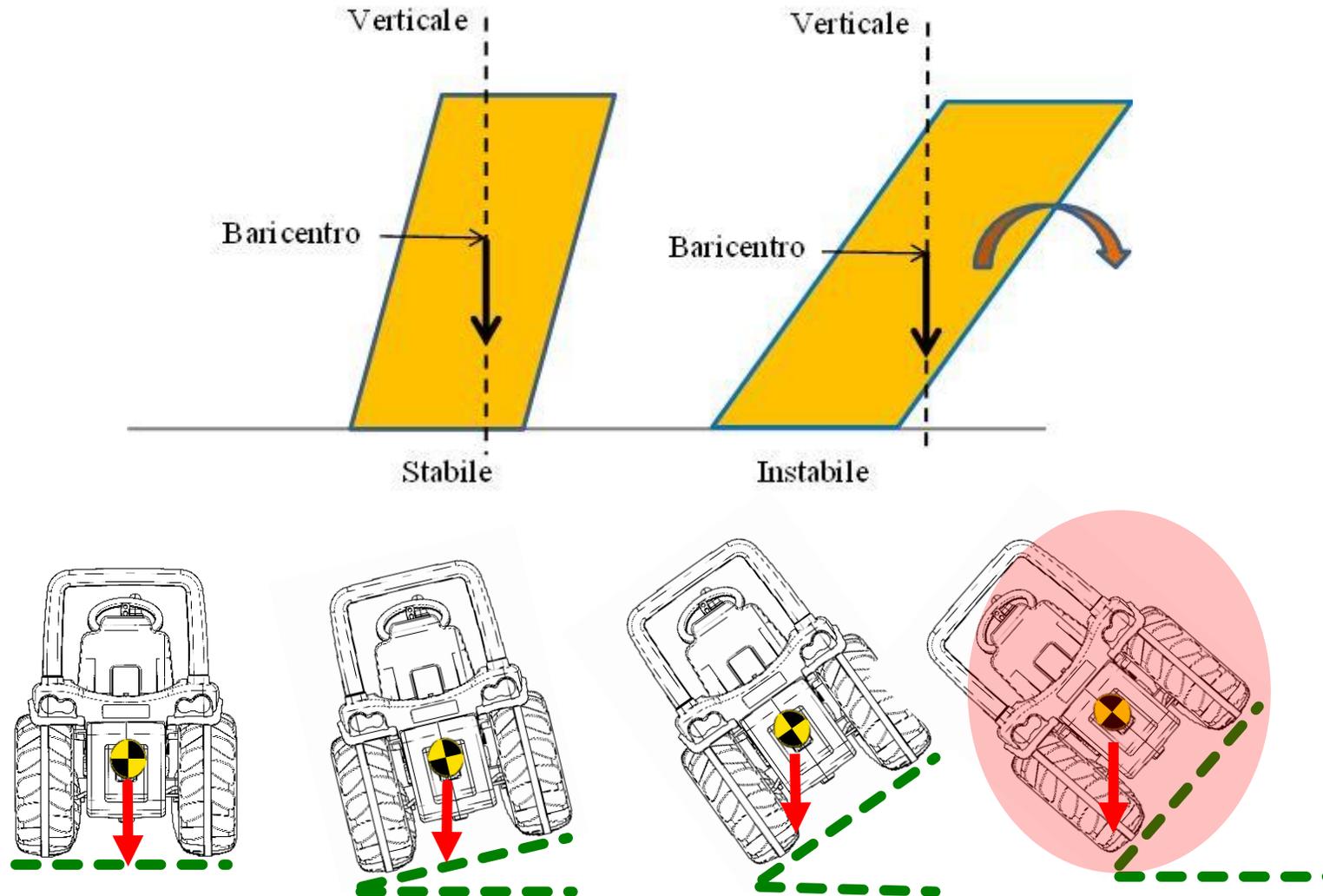
## Tipologie ribaltamento

- Impennamento (20% dei casi)
- Capovolgimento anteriore (5% dei casi)
- In realtà, la gran parte degli incidenti avviene con una **combinazione di queste dinamiche.**



# Stabilità delle macchine

- L'instabilità ha inizio quando la proiezione del **centro di massa (CoG)** esce dall'**area di appoggio**.



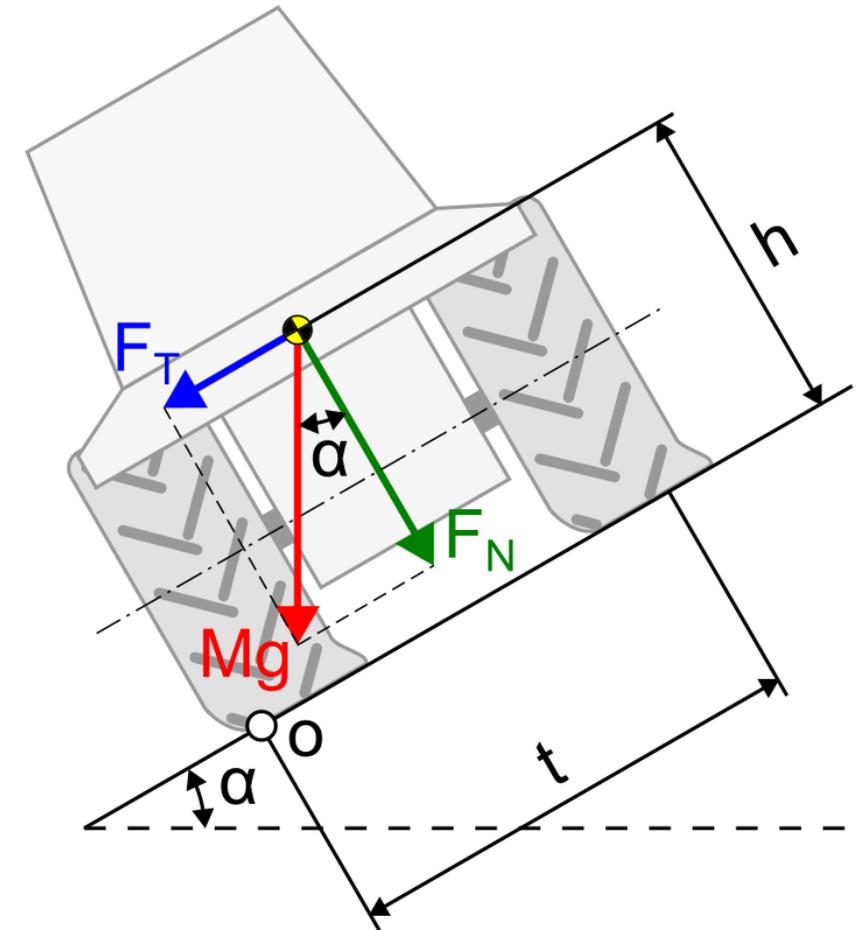
- Equilibrio alla rotazione rispetto al polo O:

$$F_T \cdot h = F_N \cdot \frac{t}{2}$$

- Si ricava quindi:

$$\frac{F_T}{F_N} = \tan \alpha = i = \frac{t}{2h}$$

- Per avere una **macchina stabile** (i.e. pendenze limite elevate) si devono favorire trattori con un'ampia carreggiata (i.e.  **$t$  grande**) ed altezza del centro di massa limitata (i.e.  **$h$  piccola**).

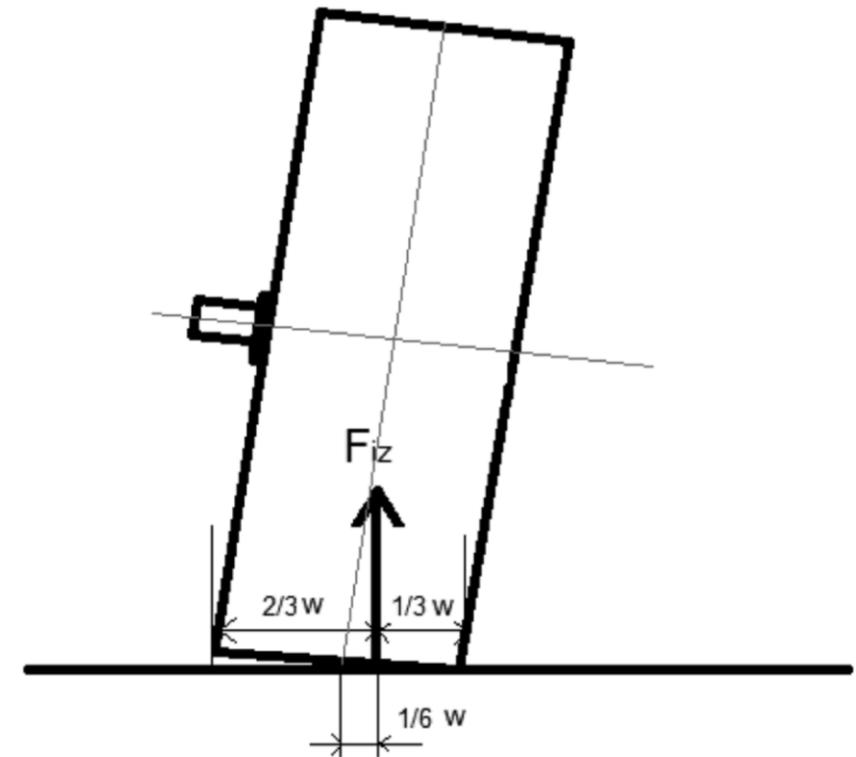
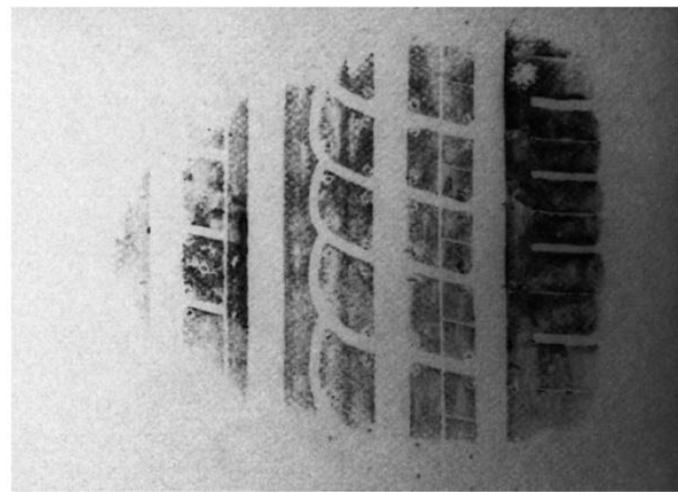
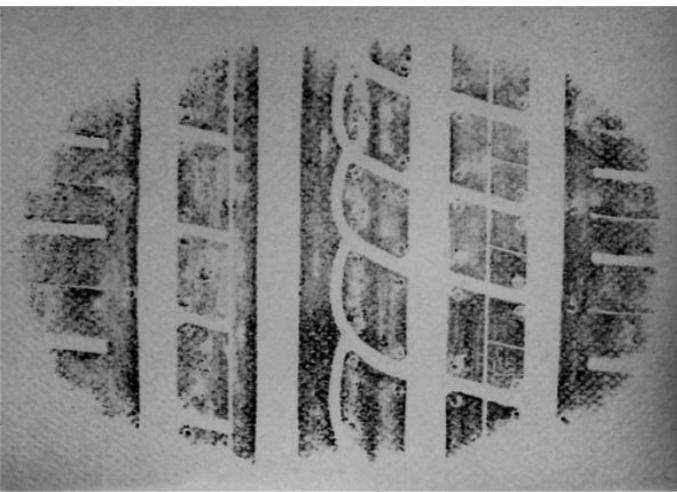


$t$ : carreggiata  
 $h$ : altezza centro di massa  
 $\alpha$ : angolo pendenza  
O: polo

## Ribaltamento laterale

Dov'è posizionato il polo O?

- Se le ruote fossero indeformabili (**corpo rigido**), si troverebbe in corrispondenza del bordo esterno (rivolto a valle) dello pneumatico.
- Nella realtà lo **pneumatico si deforma** a seconda della **pendenza** e dell'**orientamento** del trattore.
- Nei ribaltamenti laterali si può considerare di posizionare questo punto al **75% della larghezza dello pneumatico**.



Giorgio Previati, Massimiliano Gobbi, Giampiero Mastinu. Mathematical models for farm tractor rollover prediction. International Journal of Vehicle Design (IJVD), Vol. 64, No. 2/3/4, 2014

○ In linea generale si possono considerare i seguenti valori di **pendenza massima di operatività** (per trattori senza zavorre):

○ Trattori a 2 ruote motrici

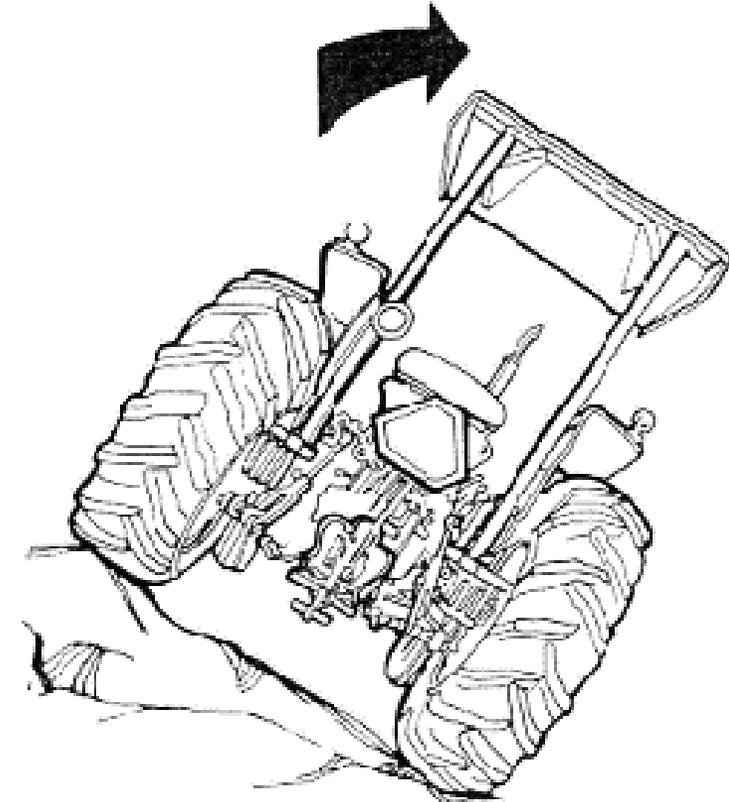
$$i = 25 \div 30\% \quad \alpha = 14^\circ \div 16,7^\circ$$

○ Trattori a 4 ruote motrici

$$i = 30 \div 35\% \quad \alpha = 16,7^\circ \div 19,3^\circ$$

○ Trattori cingolati

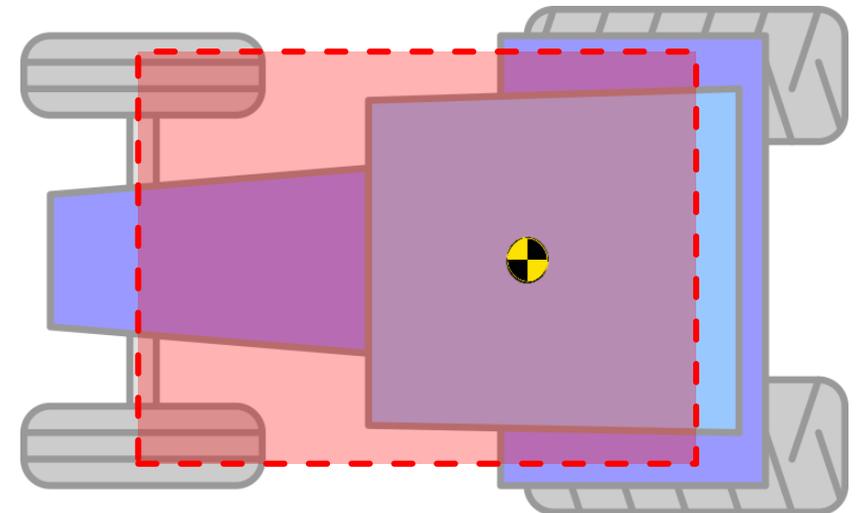
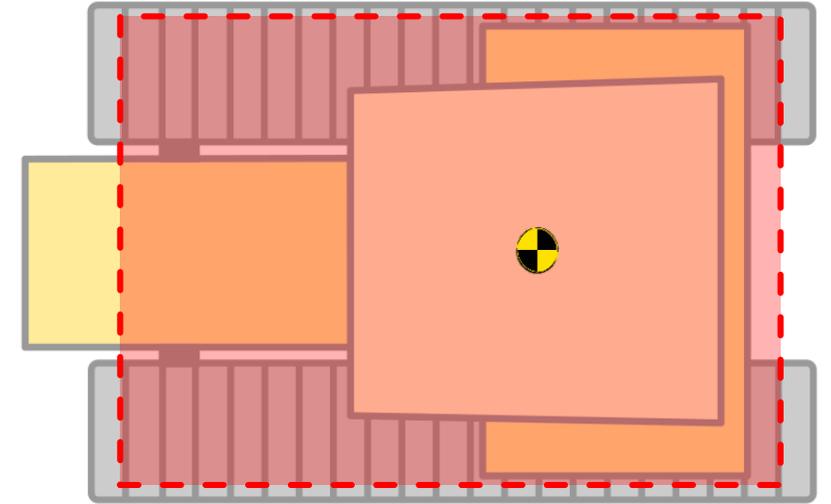
$$i = 50 \div 55\% \quad \alpha = 26,5^\circ \div 28,8^\circ$$



- Sebbene il ribaltamento **laterale** sia il **più critico**, in generale un trattore si può ribaltare in **ogni direzione** a seconda di **come sta percorrendo la pendenza** e dell'entità di questa pendenza.
- La stabilità può ancora essere studiata per via geometrica.
- Definizione dell'**area di appoggio**.
- Si ha **equilibrio** fintanto che la **proiezione del centro di massa** rimane all'interno di questa area.

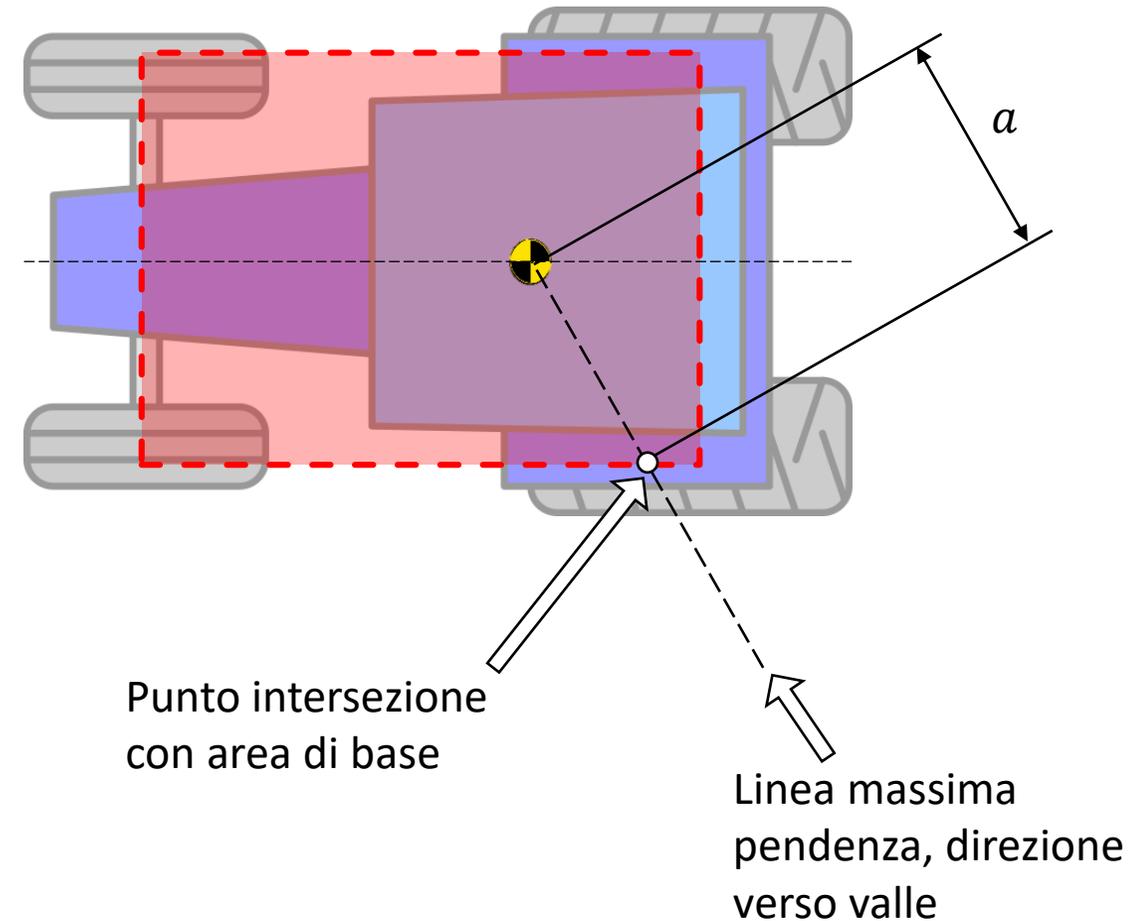


- Per un trattore con **telaio rigido** si definisce con area base di stabilità come:
  - Per un **trattore cingolato** sarà il rettangolo che include le due impronte a terra dei cingoli.
  - Per un trattore a **4 ruote** (con telaio rigido) sarà il quadrilatero i cui vertici sono i punti di contatto ruota/terreno.



# Ribaltamento generico

- La pendenza massima si può determinare con considerazioni geometriche.

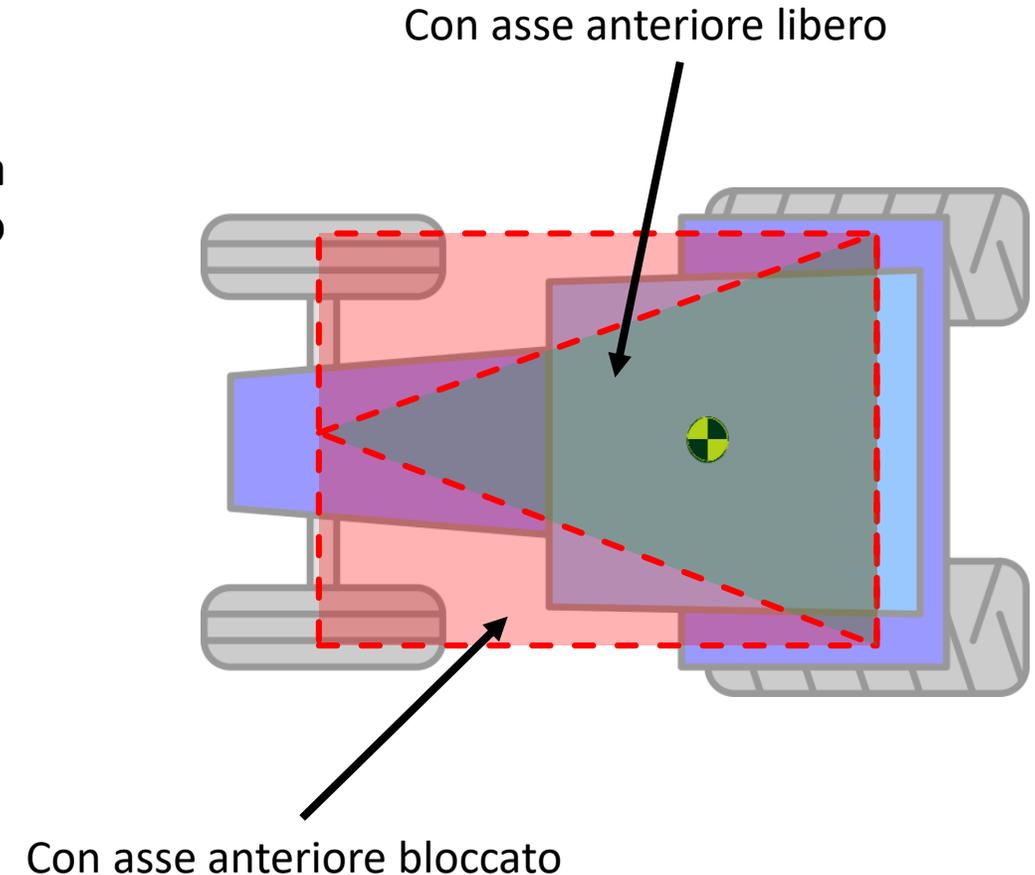


$$\tan \alpha = i = \frac{a}{h}$$

Altezza centro di massa

## Ribaltamento generico

- In genere l'asse anteriore è libero di ruotare (**asse anteriore pivotante**) per adattarsi alla conformazione del terreno).
- L'area di stabilità si riduce ad un **triangolo**.
- Non appena l'asse anteriore, ruotando, raggiunge la posizione finale (**fermo meccanico**), il comportamento della macchina si riconduce a quello precedente.



**Asse anteriore libero (instabilità fase I)**



Pendenza limite: 26°

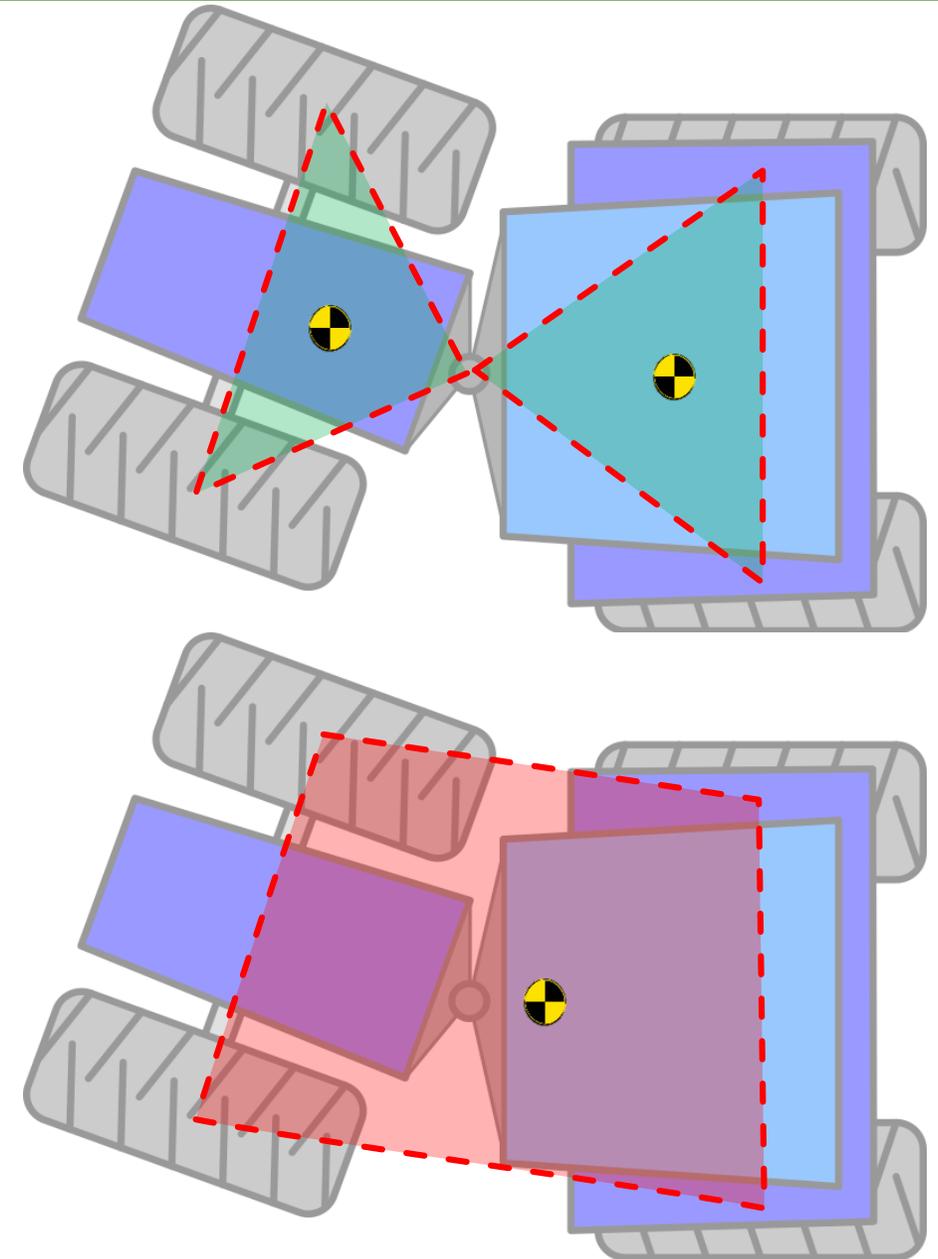
**Asse anteriore bloccato (instabilità fase II)**



Pendenza limite: 34°

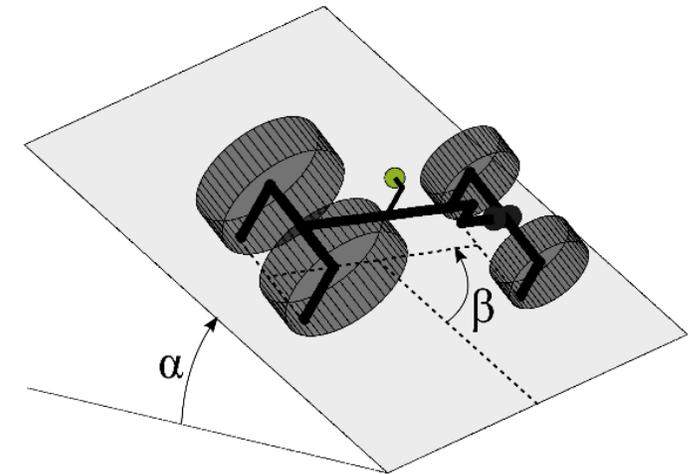
## Ribaltamento generico

- Nel caso di **telai articolati**, l'area di stabilità diventa più complessa e varia la sua forma in funzione dell'angolo di sterzo.
- In particolare è costituita da **due triangoli** con vertice comune nel giunto centrale.
- Anche in questo caso la **rotazione di rollio** del giunto centrale arriva a fine corsa o può essere **bloccata** con dei sistemi meccanici e/o idraulici. In questo caso l'area diventa un quadrilatero irregolare.
- La forma del quadrilatero **varia con l'angolo di sterzo!**

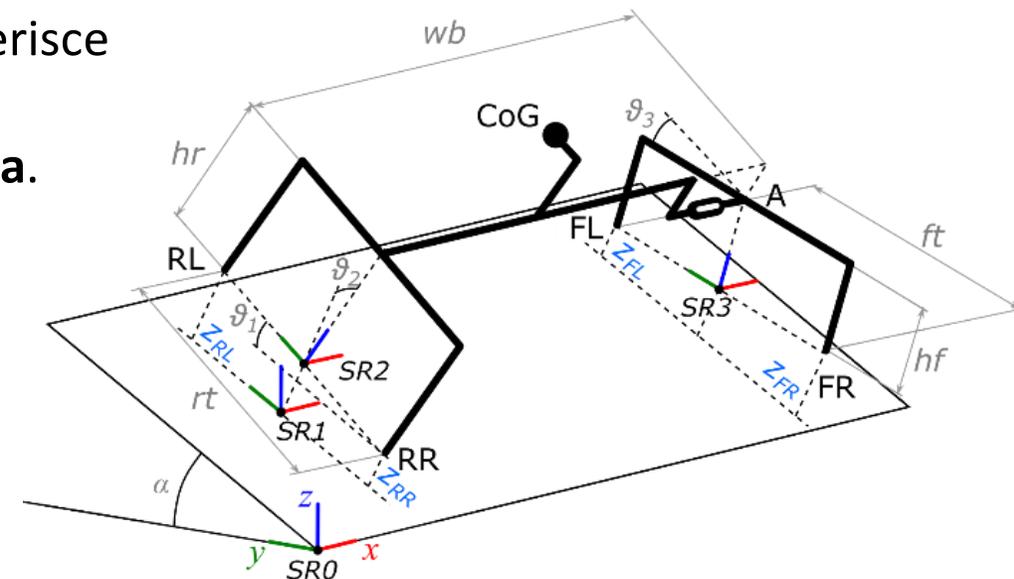


# Ribaltamento generico

- L'approccio geometrico diventa complicato e limitante nel caso di configurazioni e scenari più complessi (e.g. trattore che supera un ostacolo).
- Approccio alternativo:
  - **Modello cinematico** del telaio
  - Calcolo forze scaricate a terra da ogni pneumatico (**equilibrio meccanico**).
  - Man mano che la pendenza aumenta, la massa si trasferisce dalle ruote a monte verso quelle a valle.
  - L'**instabilità** inizia quando una di queste **forze diventa nulla**.



$$\begin{cases}
 r_3: & (F_{FL,z} + F_{FR,z}) wb - Mg_x CoG_z + Mg_z CoG_x = 0 \\
 r_2: & (F_{RL,z} + F_{RR,z}) wb + Mg_x CoG_z + Mg_z (wb - CoG_x) = 0 \\
 r_1 \text{ front:} & (F_{RL,z} - F_{RR,z}) \frac{rt}{2} + (F_{RL,y} + F_{RR,y}) hf - Mg_y (CoG_z - hf) + Mg_z CoG_y = 0 \\
 r_1 \text{ rear:} & (F_{FL,z} - F_{FR,z}) \frac{ft}{2} + (F_{FL,y} + F_{FR,y}) hf = 0
 \end{cases}$$

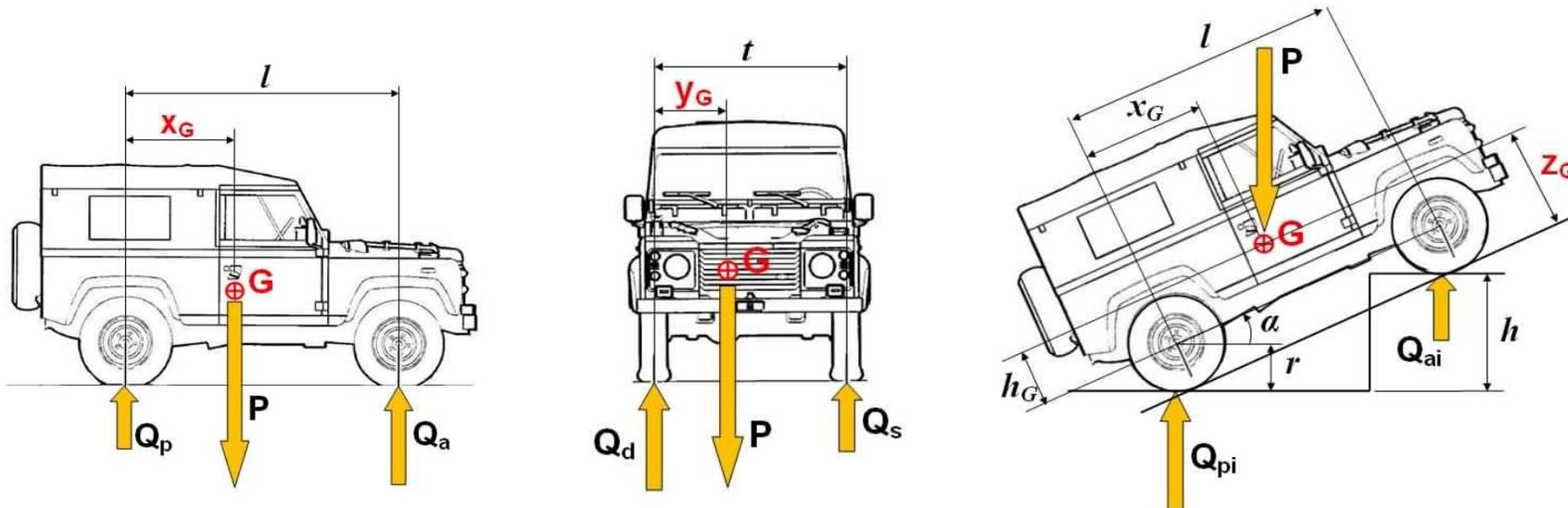


# Determinazione posizione centro di massa

- Il calcolo dell'angolo massimo di stabilità presuppone di conoscere le **dimensioni caratteristiche della macchina** e la **posizione del centro di massa**.

## Metodo basato sulla pesatura delle singole ruote

- Misura della forza scaricata a terra da ogni ruota in diverse inclinazioni della macchina.
- Calcolo della posizione del centro di massa basandosi su considerazioni di equilibrio meccanico.



## Metodo basato sulla misura del periodo di oscillazione

- La misura del periodo di oscillazione permette di calcolare l'altezza del centro di massa ed il momento d'inerzia.
- Alternativamente la posizione del centro di massa può essere calcolata a partire dall'angolo assunto dalla piattaforma all'equilibrio.

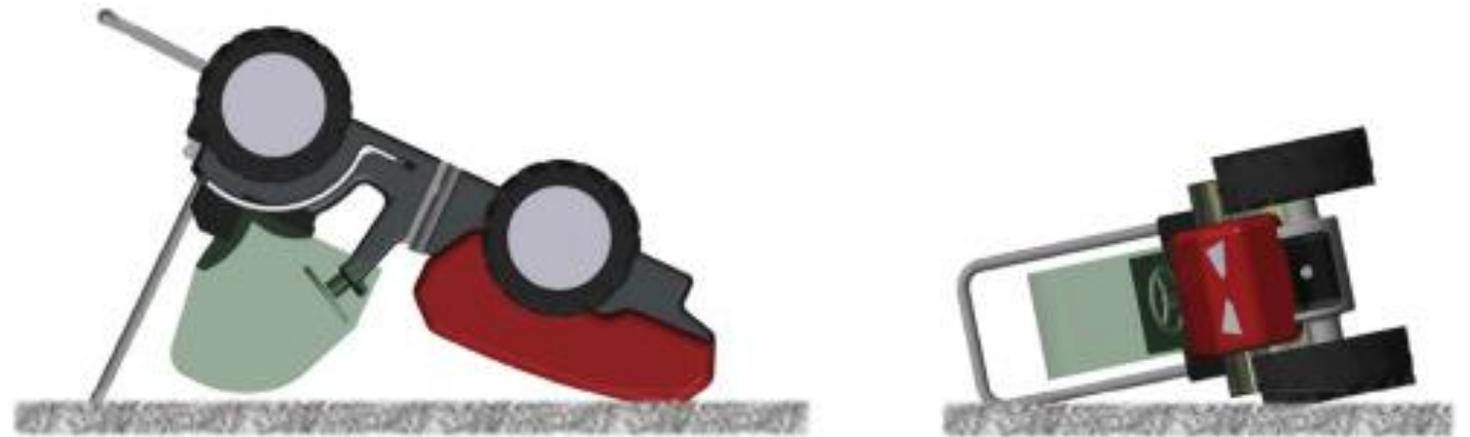
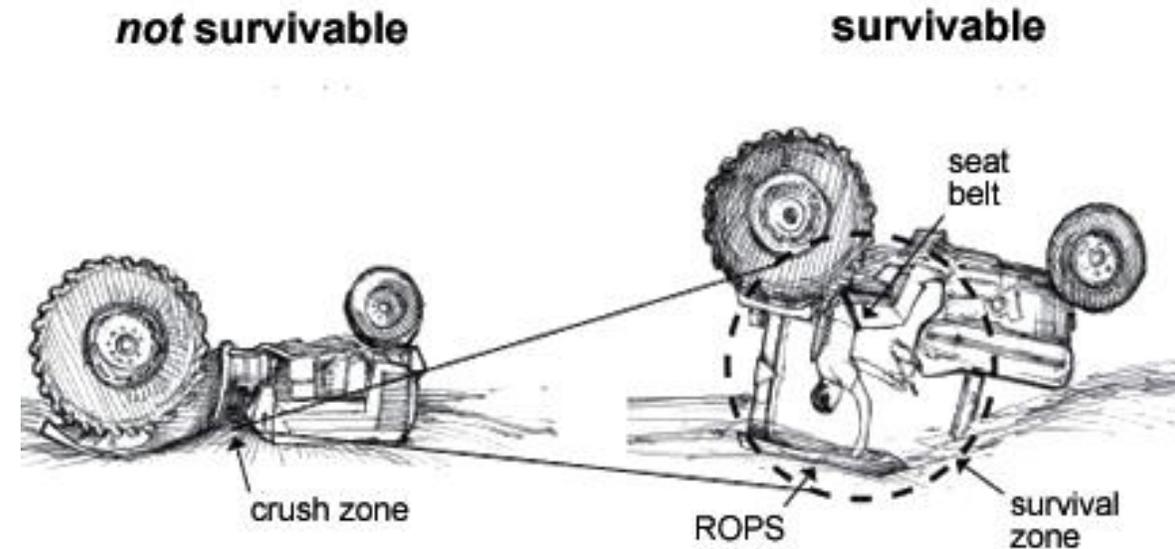


# Sistemi di protezione

- Il comportamento è il primo (e più importante) aspetto da considerare per la sicurezza:
  - Scegliere la macchina più adeguata
  - Non effettuare manovre pericolose
  - Usare (nel modo adeguato) e controllare l'efficienza dei dispositivi di sicurezza passivi ed attivi
- Sistemi di **protezione passiva**: dispositivi che non prevengono l'accadimento dell'incidente, ma evitano o limitano i danni a carico all'operatore.
- Sistemi di **protezione attiva**: dispositivi che prevengono l'accadimento dell'incidente.



- Strutture di protezione **ROPS (Roll-Over Protective Structure)**.
- Presenza ed uso di opportune **cinture di sicurezza** di tipo addominale.
- Mantenimento di un determinato **volume di sicurezza** intorno al posto di guida in cui l'operatore possa permanere in caso di ribaltamento, scongiurando gravi lesioni.



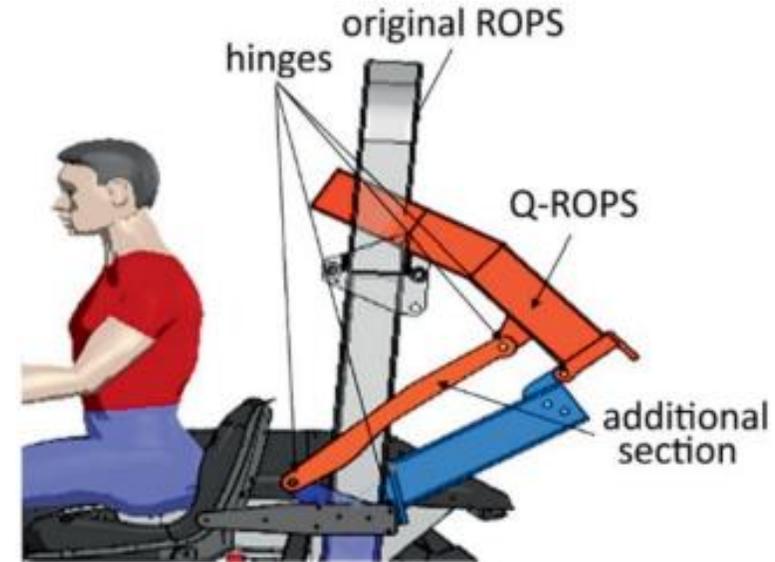
## Telaio tubolare a 2 montanti (roll-bar)

- Anteriore o posteriore
- Con montanti **abbattibili**: per trattori a carreggiata stretta per lavorare sotto chioma tra i filari delle coltivazioni specializzate.



## Telaio tubolare a 2 montanti (roll-bar)

- Con montanti **abbattibili**
- **ROPS agevolati** (abbattimento e sollevamento richiedono una forza limitata  $<100N$ ).
- **AutoROPS** (si sollevano automaticamente in caso di ribaltamento).



Gattamelata, D., Vita, L., Puri, D., Pessina, D., Galli, L.E. (2024). An Assisted Folding Rear Rollbar for Agricultural Tractors: The QROPS. In: Berruto, R., Biocca, M., Cavallo, E., Cecchini, M., Failla, S., Romano, E. (eds) SHWA 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 521. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-63504-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-63504-5_19)



Roberto Ruiz Jurio, Air-Rops

## Telaio tubolare a 4 montanti

- Con o senza piattaforma sospesa.



## Cabine

- Telaio di sicurezza a 2 o più montanti al quale viene applicata la struttura (lamiera e vetro)
- Cabina sospesa chiusa, climatizzata, insonorizzata e protetta anche contro le vibrazioni e la penetrazione di sostanze chimiche nocive.



# Sistemi di protezione passiva

ROPS compatte per lavori sotto chioma.



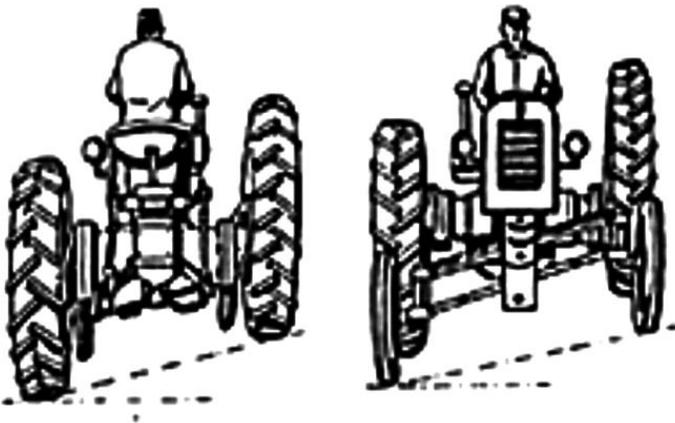
- **Segnalazione** ottica e/o acustica di raggiungimento di pendenze eccessive (in genere laterali).
- **Interruzione** della mandata di **combustibile** o stacco del moto alle ruote.
- Applicazione di **puntoni laterali** ad espulsione automatica.

Non sempre affidabili o comunque non molto precisi nell'intervento.



- Uso di **assi snodati autolivellanti**.
- Sistemi di **blocco snodo** centrale o dell'asse anteriore pivotante.

Sistemi in generale costosi.  
Sono comunque sempre associati a  
dispositivi di sicurezza passivi.



# Sistemi di misura e certificazione

- Sin dal 1° gennaio **1974** in Italia è stato introdotto, prima per i trattori convenzionali e in momenti successivi per le altre tipologie (trattori da vigneto e trattori cingolati), l'**obbligo di montaggio di una struttura di protezione omologata**.

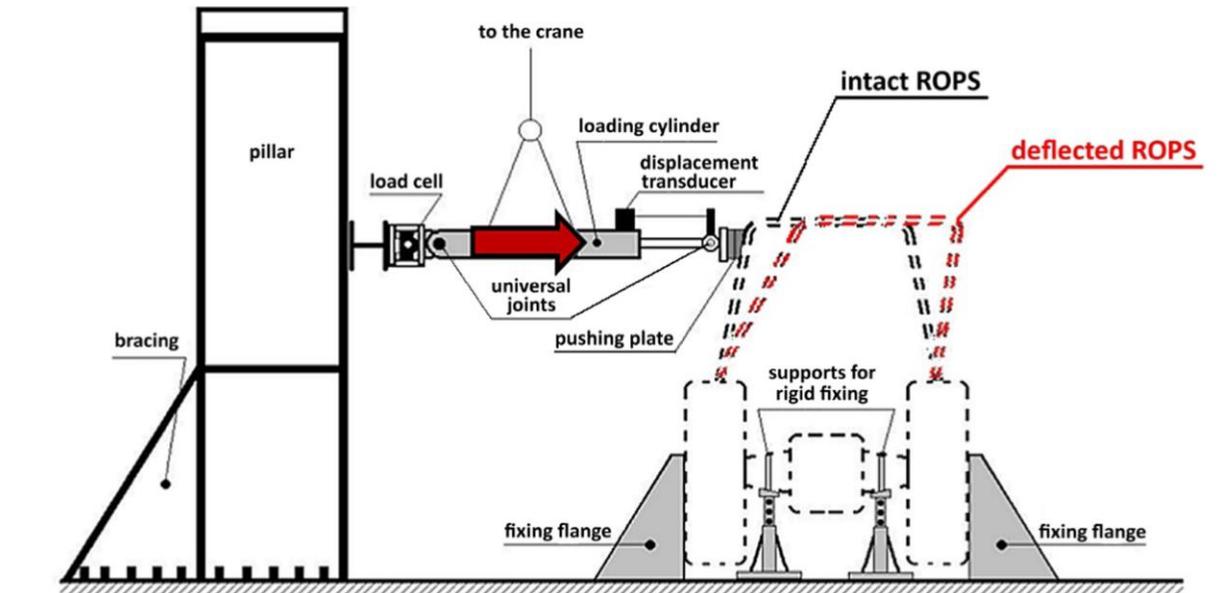
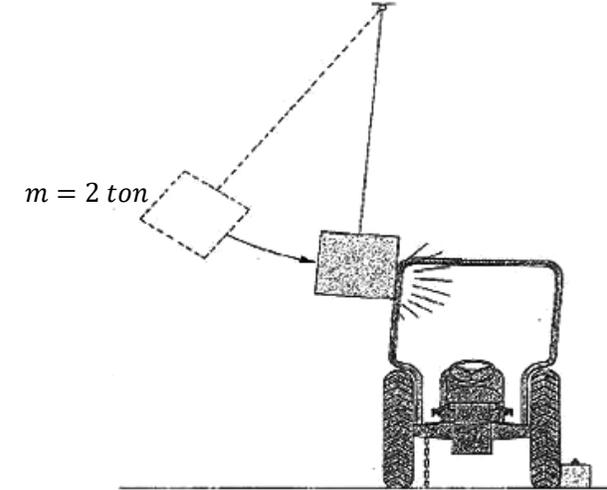
Circolari del Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale n. 201 del 26.01.73 e n. 209 del 29.09.73

- A partire dal 1978 fu affrontato anche il problema di tutti i trattori, ancora circolanti, venduti prima del 1974.
- Dal **2008** è vietata la **fabbricazione, la vendita, il noleggio e la concessione in uso** di attrezzature di lavoro, dispositivi di protezione individuale o impianti **non conformi alla normativa tecnica**.

Allegato V del D. Lgs. n. 81/08



- Necessario testare ed omologare i sistemi di sicurezza prima della loro immissione sul mercato.
- **Prove di robustezza delle ROPS**, attraverso prove di resistenza stabilite da norme specifiche, applicate su **un esemplare prototipo** della serie che si vuole commercializzare.
- Prove **dinamiche** o **statiche** che **emulano** le possibili **sollecitazioni** cui sarà soggetto un ROPS nel caso di ribaltamento (laterale, posteriore ed anteriore).



## Prova dinamiche

- Massa colpisce la struttura trasversalmente e longitudinalmente scaricando una determinata energia (dipendente dalla massa del trattore).



## Prova statiche

- Struttura viene caricata (e deformata) in diverse direzioni con una sollecitazione/energia dipendente dalla massa del trattore.
- Il test è superato se nessun componente del ROPS invade il volume di sicurezza.



- Normativa prevede delle **prove di ribaltamento laterale** per determinare l'**angolo di stabilità massimo**.
- Questa prova è richiesta in particolare per i trattori a carreggiata stretta (e.g. trattori da frutteto).
- Queste prove ottenute tramite test standard di ribaltamento (statico) laterale attraverso l'utilizzo di **piattaforme inclinabili**.
- Queste prove sono importanti per determinare valutare il comportamento della macchina e degli eventuali sistemi di sicurezza attivi.



## Piattaforma test stabilità

- **Piattaforma inclinabile e ruotabile** in grado di orientare il trattore in ogni direzione.
- Piano di supporto diviso in **4 pianali**, ognuno dei quali integra una serie di **celle di carico** per misurare la forza di contatto di ogni ruota.
- Ogni pianale può essere alzato o abbassato indipendentemente per emulare la presenza di **ostacoli o buche**.
- Piano di supporto coperto da una speciale griglia che previene lo scivolamento della macchina durante il test.

Inclinazione ( $\alpha$ ): up to 55°

Rotazione ( $\beta$ ):  $\pm 180^\circ$

Spostamento pianali: 0÷300mm

Area di test: 6x4m

Payload: 10t



# Mappe di stabilità

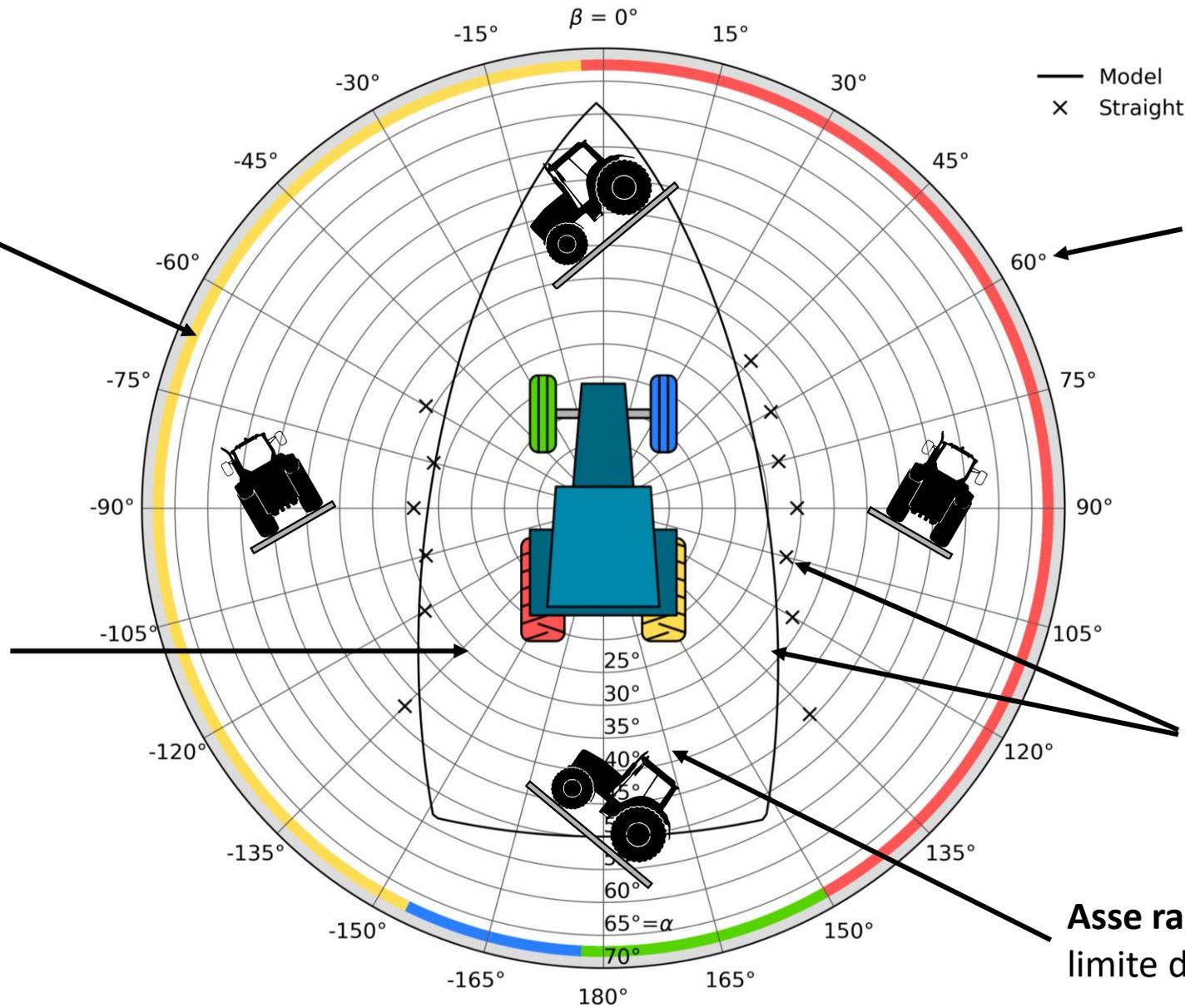
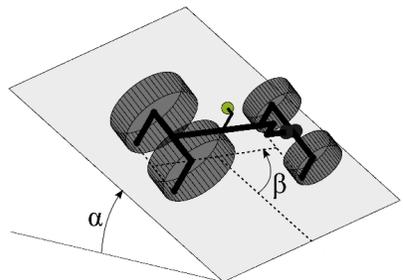
Anello esterno: ruota che perde il contatto

Asse angolare: orientazione macchina

Il trattore è stabile se all'interno dell'area.

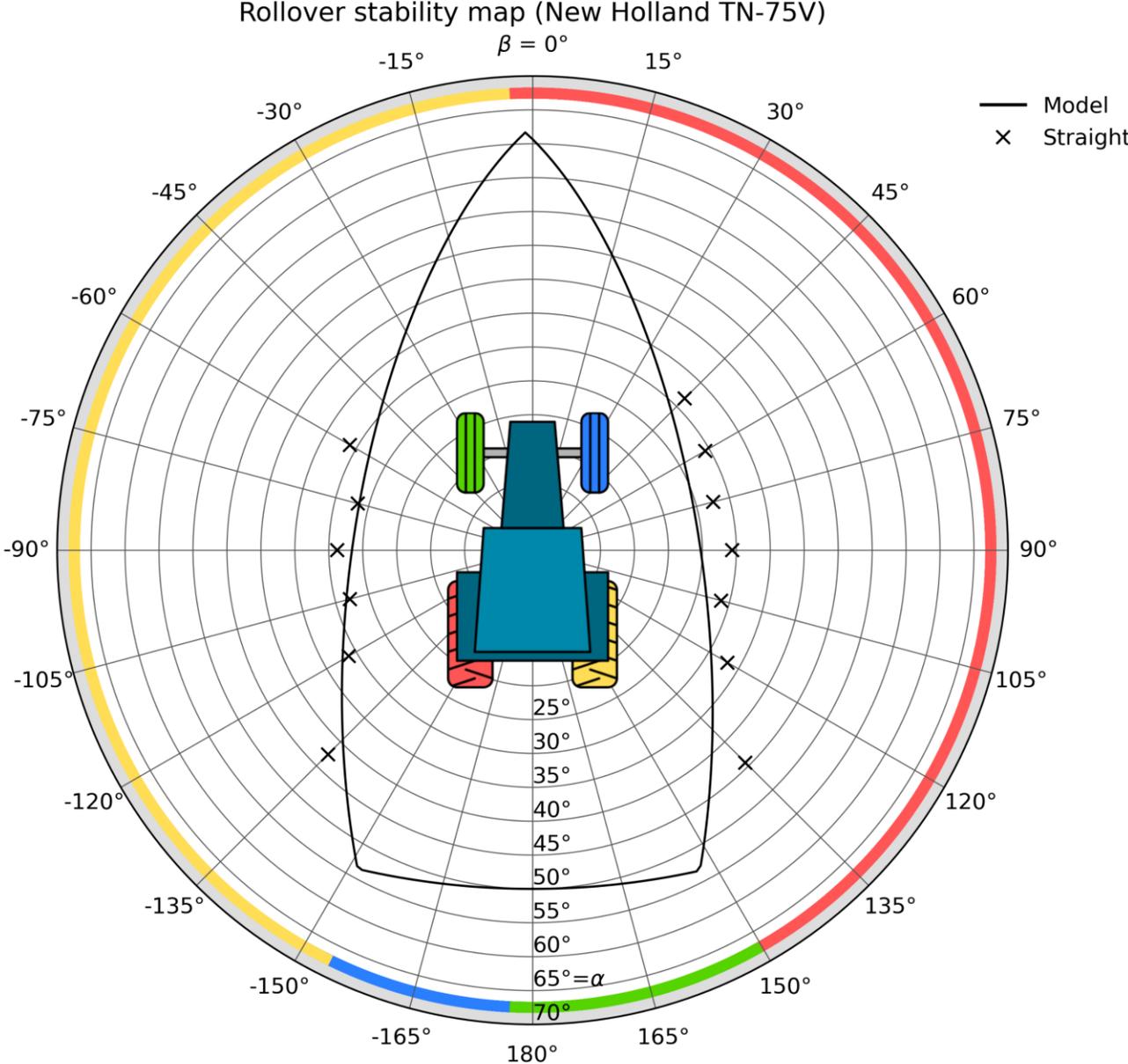
Simulazione e dati sperimentali

Asse radiale: angolo limite di stabilità



## Confronto tra diverse tipologie di trattore

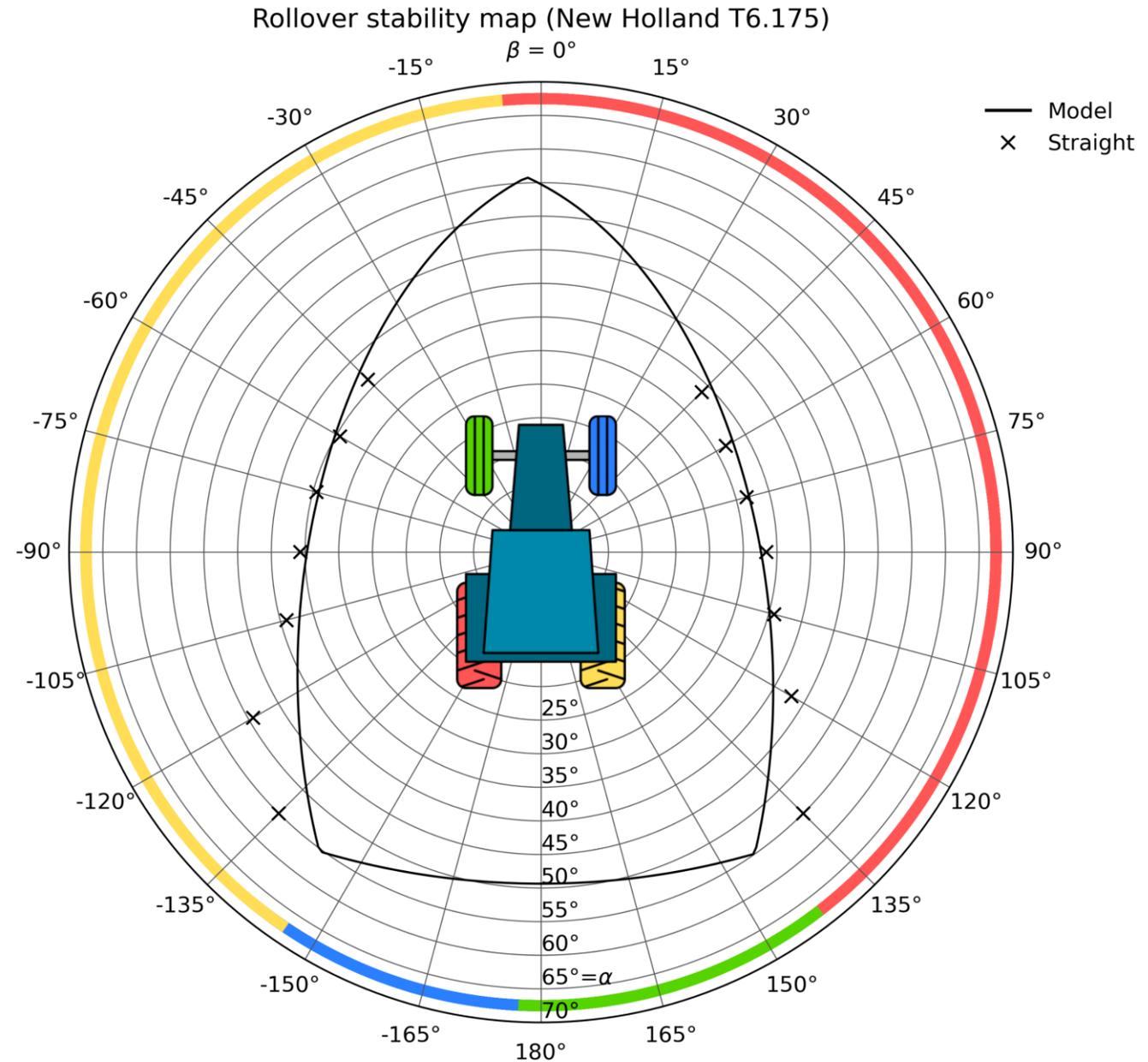
- Trattore per frutteto (New Holland TN-75V)



# Prove di ribaltamento (statico)

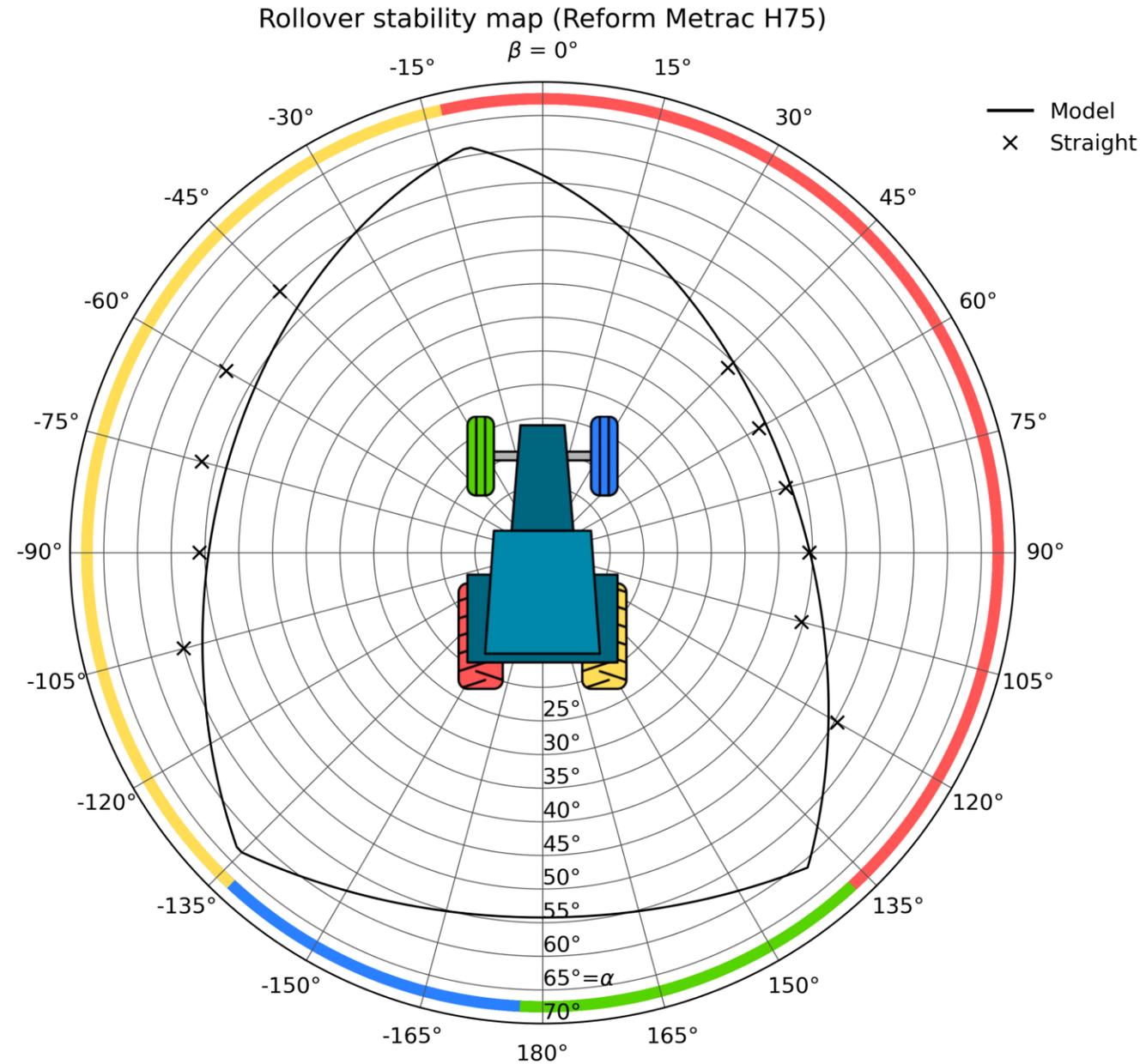
## Confronto tra diverse tipologie di trattore

- Trattore convenzionale (New Holland T6.175)



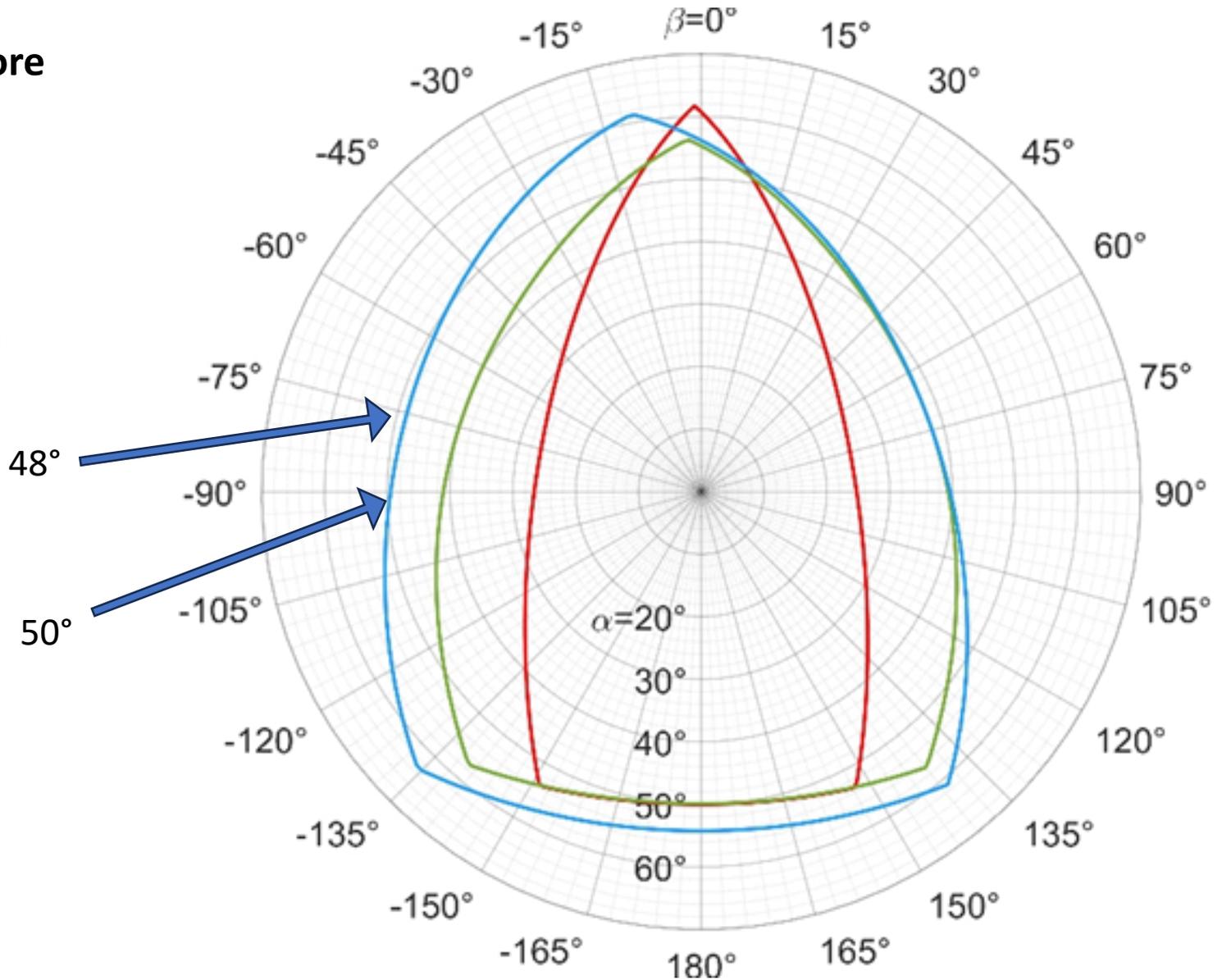
## Confronto tra diverse tipologie di trattore

- Trattore specialistico per la montagna (Reform Metrac H75)



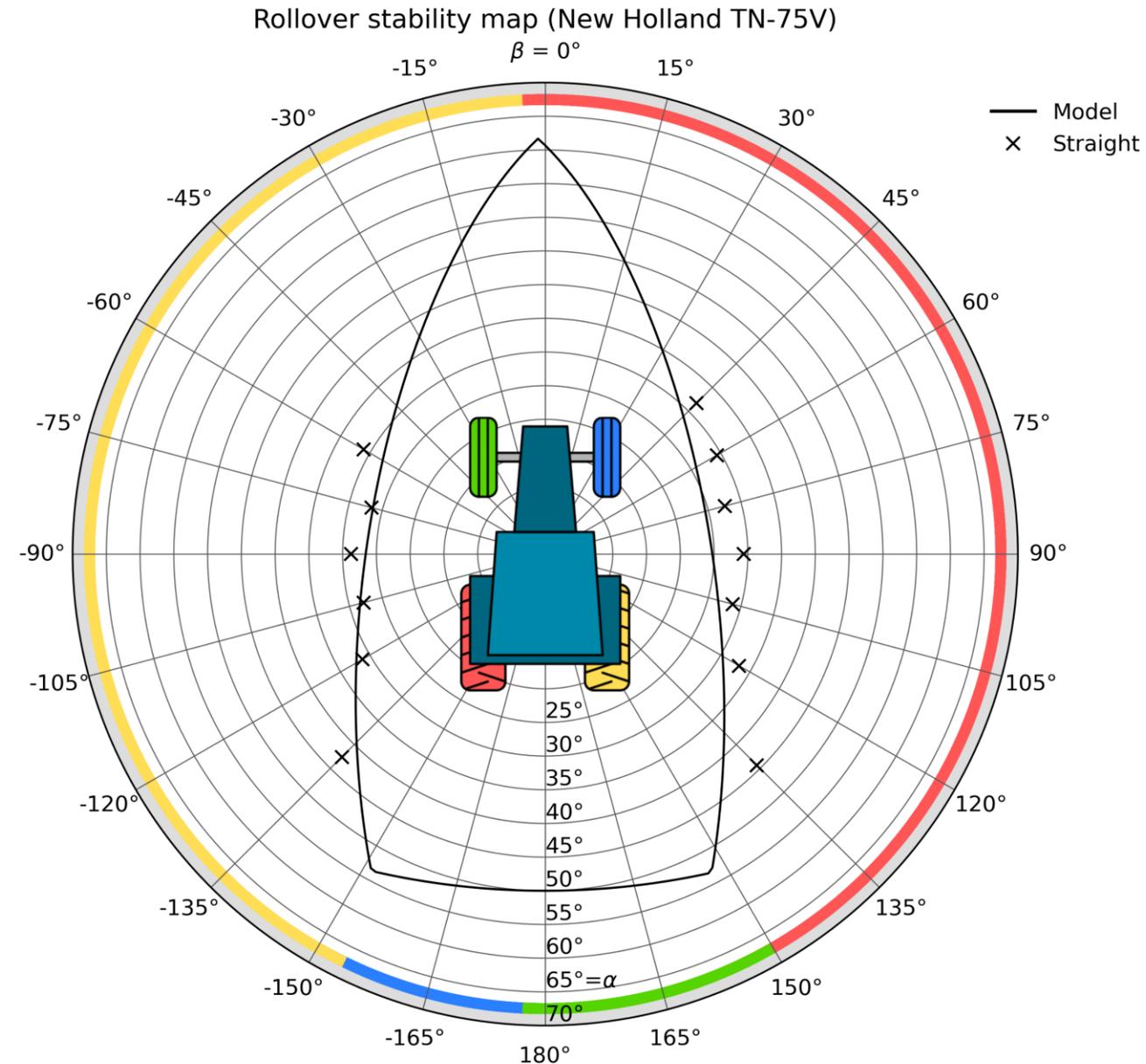
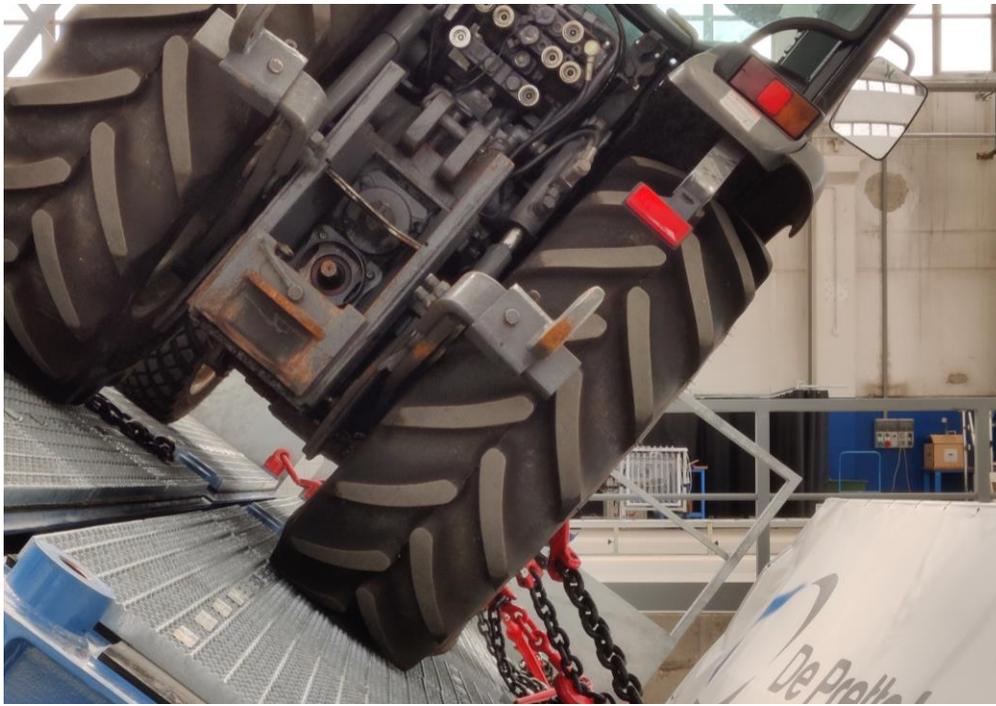
## Confronto tra diverse tipologie di trattore

- Trattore per frutteto
- Trattore convenzionale
- Trattore specialistico per la montagna

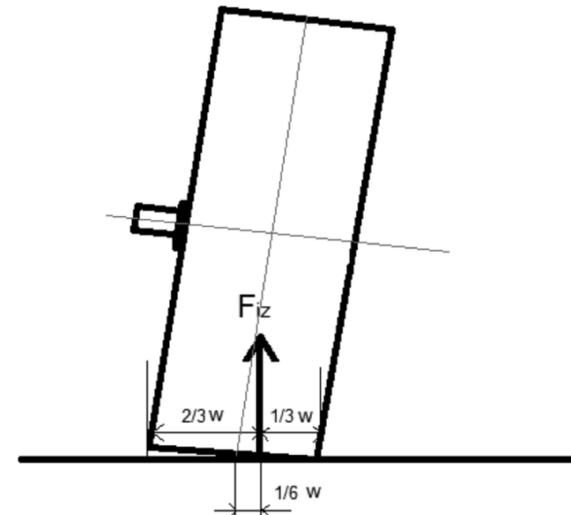


# Influenza pneumatici

- Modello matematico considerato si basa sull'assunzione che le **ruote siano corpi rigidi**.
- Modello teorico segue con **buona approssimazione** l'andamento delle prove sperimentali.
- **Deformazione pneumatici** ha una grande influenza.



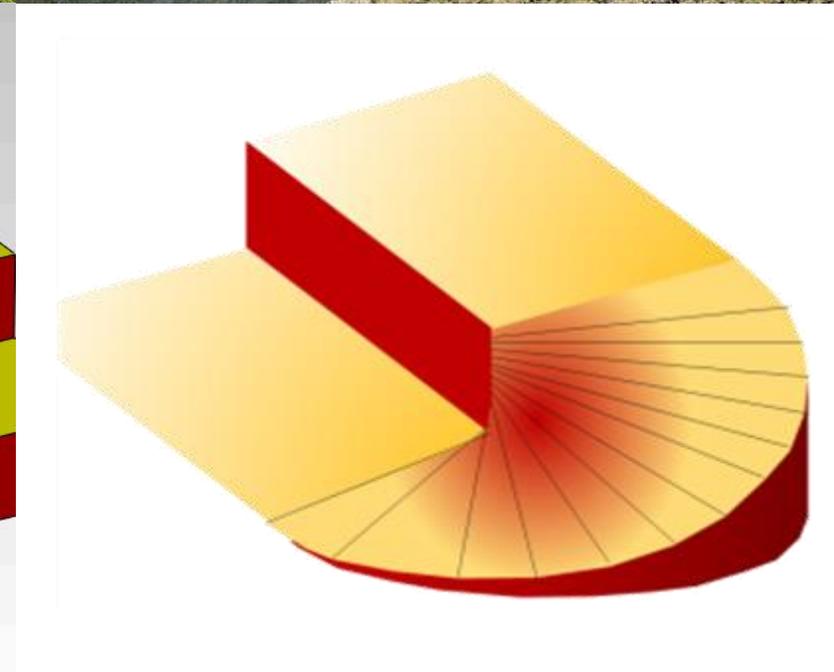
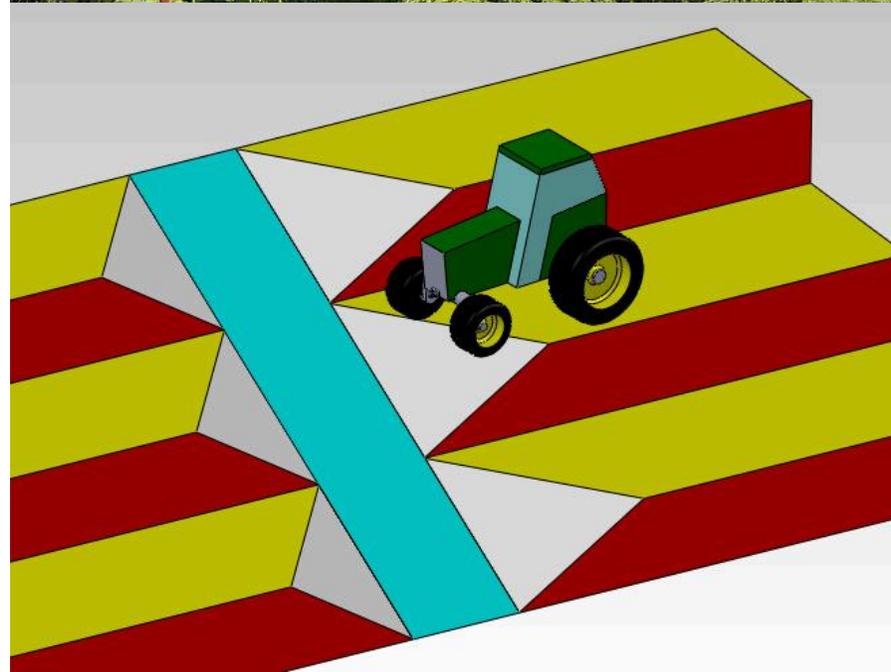
- Norma prevede di posizionare il polo di rotazione del **ribaltamento laterale** al **75%** dello spessore dello pneumatico.
- Perché proprio il 75%?
- È veramente sempre una costante fissa?
- Cosa succede nei ribaltamenti non propriamente laterali?
- Serie di esperimenti per valutare come si sposta il **centro di contatto** tra **ruota e terreno**, al variare dell'**orientamento** del trattore, della **pendenza** e delle **caratteristiche** dello pneumatico.



# Traiettorie particolari

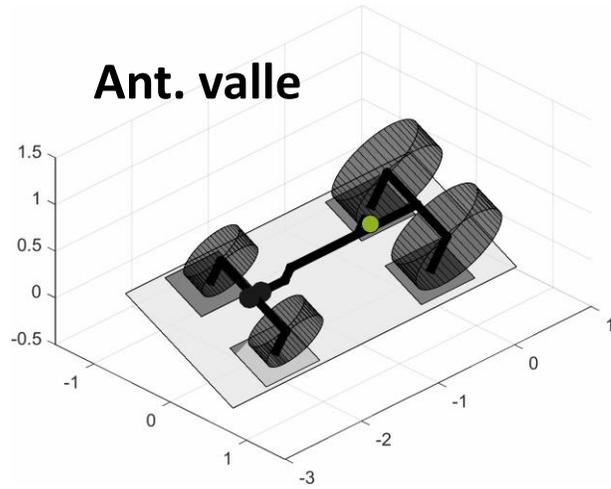
Test stabilità su percorsi particolari:

- **Variazione di pendenza** tra due blocchi terrazzati per via di una strada di accesso.
- **Traiettoria ad elica** che congiunge due filari successivi in un terrazzamento.

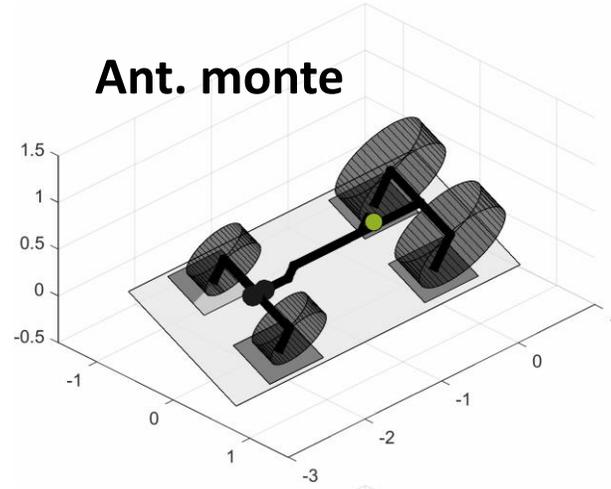


# Presenza di ostacoli

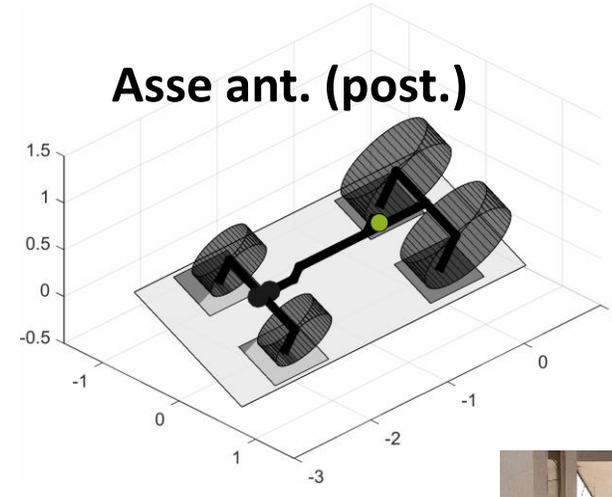
### Ant. valle



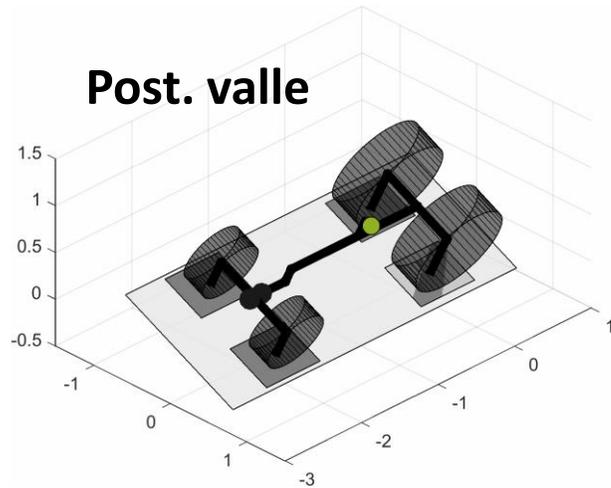
### Ant. monte



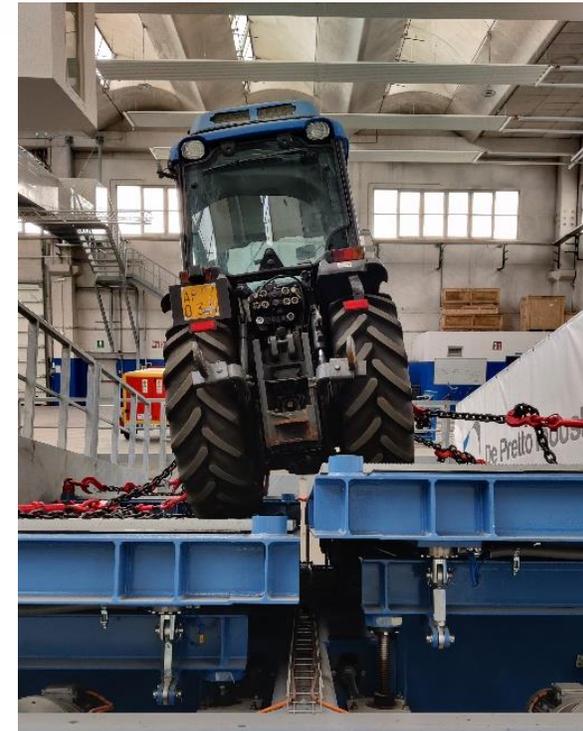
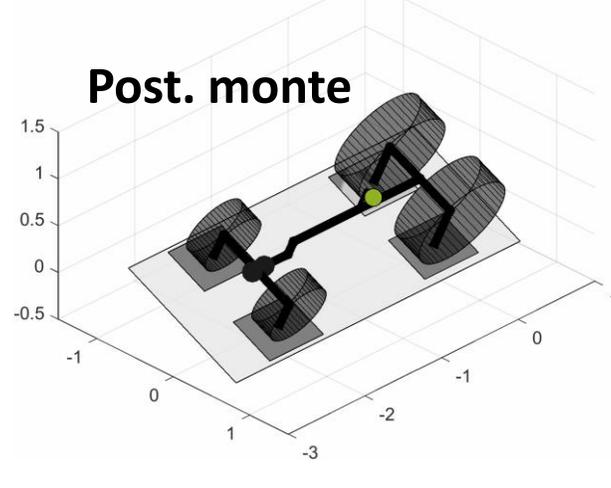
### Asse ant. (post.)



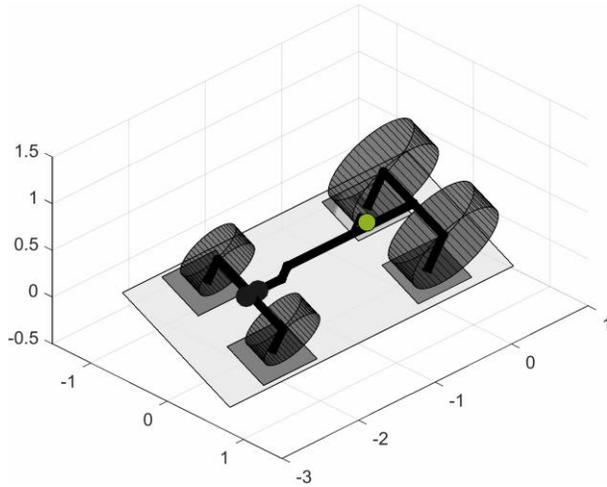
### Post. valle



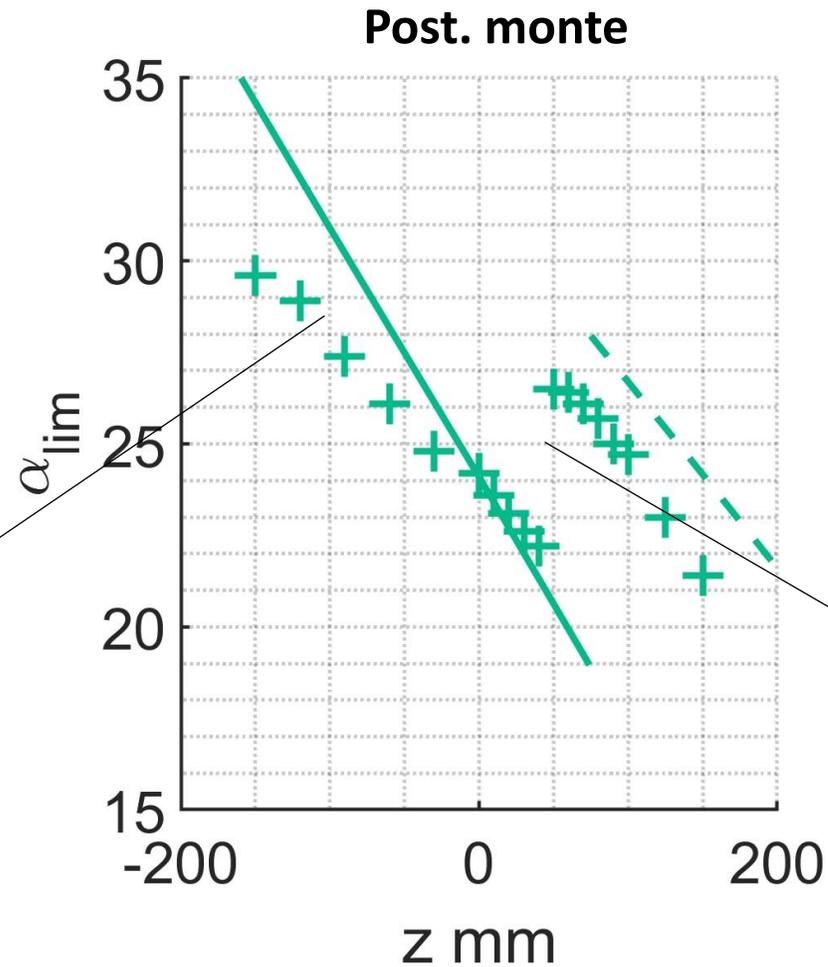
### Post. monte



# Presenza di ostacoli

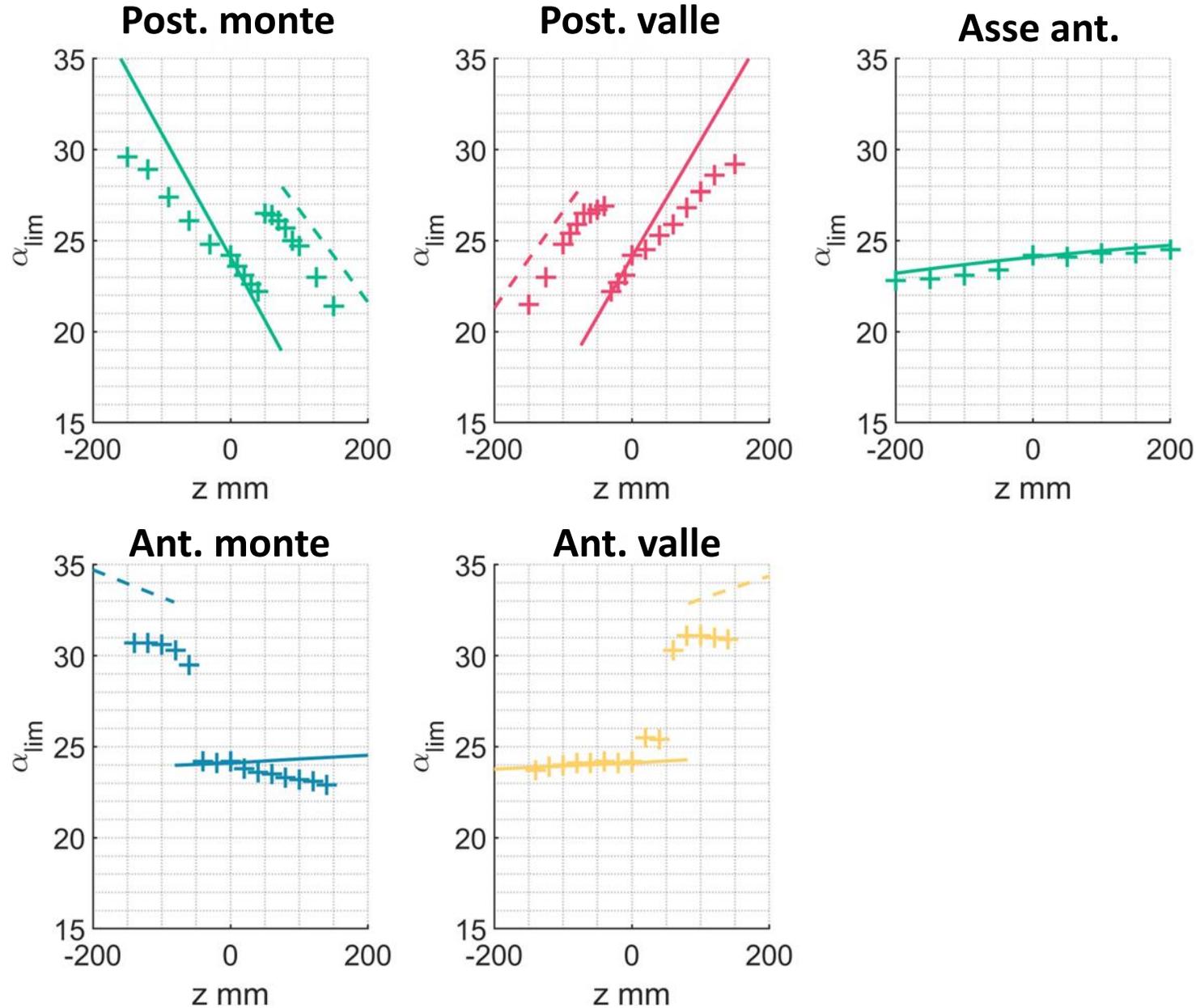


Stabilità decresce all'aumentare dell'altezza dell'ostacolo.



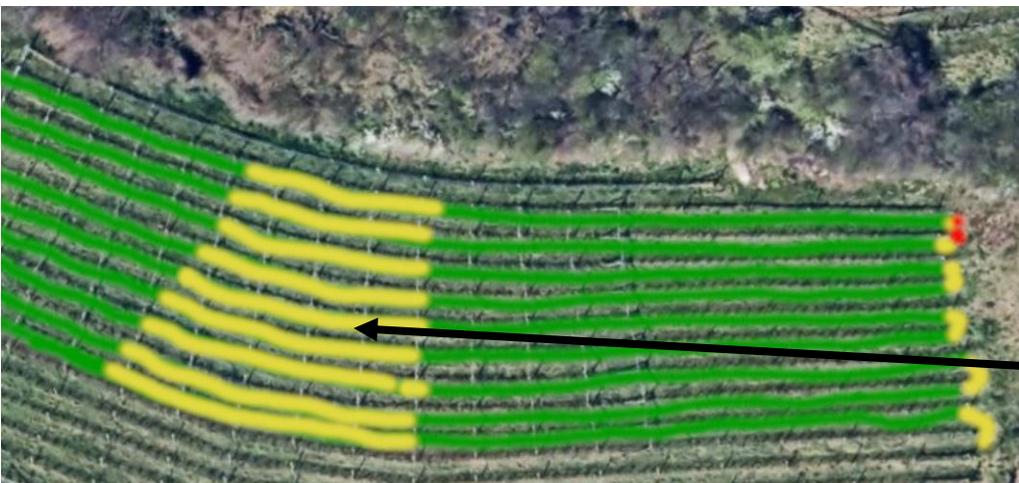
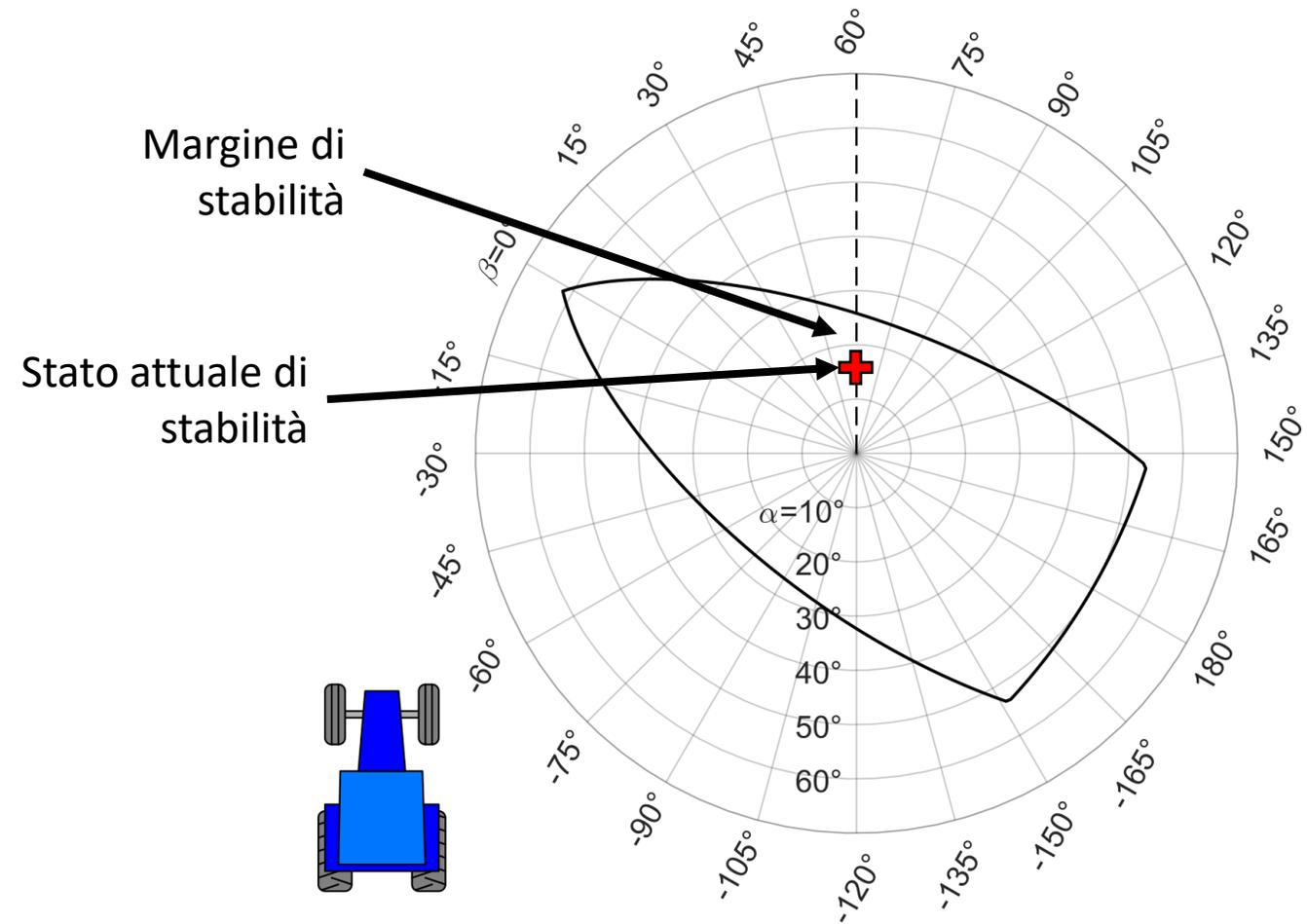
- Instabilità di fase I
- - - Instabilità di fase II
- + Dati sperimentali

Zona di transizione: passaggio da stabilità di fase I a fase II.



# Applicazioni e aspetti futuri

- Mappe di stabilità come **tabelle di ricerca**. (mappe di differenti macchine, in diverse configurazioni ed in diversi scenari operativi).
- Sviluppo di sistemi di monitoraggio della sicurezza
  - Sistemi di monitoraggio e **allerta** stato di stabilità della macchina.
  - Mappatura **aree di rischio** in un terreno/vigneto.



Area con maggior rischio di instabilità

- Un modo per rimuovere il problema del rischio di ribaltamento è quello di **rimuovere fisicamente l'operatore** dalla macchina.
- **Trattori autonomi e sistemi robotici**
- **Però...**
  - Nelle zone montuose (i.e. più a rischiose) **difficoltà nel funzionamento** (e.g. terreno irregolare, filari non regolari, perdita segnale GNSS per la navigazione).
  - In questo contesto è più facile pensare a **sistemi collaborativi** uomo-robot o comunque **sistemi teleoperati**.
  - Si dovrà garantire che la macchina non si **ribalti ed investa l'operatore**.
  - **Sistemi robotici** integrano di default una moltitudine di **sensori** (lidar, sensori inerziali, ecc.) che possono essere sfruttati per determinare lo **stato di stabilità** ed **intervenire direttamente** sul comando della macchina (**si toglie l'uomo dall'anello di controllo**).



Grazie per l'attenzione!

