Corso di

MECCANIZZAZIONE AGROFORESTALE

Prof. D. Pessina – a.a. 2021/22

Probema-tipo n. 5

Calcolare la velocità massima (Vmax) a cui un trattore da 160 CV può trasportare un rimorchio a due assi tradizionale della massa complessiva a pieno carico di 10000 kg su una strada sterrata forestale in discrete condizioni con una pendenza del 12%.

Obiettivo del problema: accertare che tutte le 3 verifiche di potenza, aderenza e stabilità risultino positive.

Priorità delle verifiche: trattandosi di un trasporto, il fattore limitante per questa operazione risulta essere la potenza disponibile del trattore (Pu) rispetto a quella richiesta per il regolare funzionamento della macchina operatrice (Pmo).

Quindi l'ordine di priorità delle verifiche da eseguire è:

- 1. Pu ≥ Pmo
- 2. A ≥ T
- 3. Stabilità

SVOLGIMENTO

Dati:

Potenza trattore: 160 CV = 117,6 kW (1 CV = 0,735 kW e anche 1 kW = 1,36 CV)

Massa rimorchio: 10000 kg Pendenza della strada: 12 %

Trattandosi di un'operazione di trasporto piuttosto gravosa, è opportuno ipotizzare l'impiego di un trattore 4 RM (anche perché di questa classe di potenza gli esemplari 2 RM sono ormai piuttosto rari...)

VERIFICA 1: Pu ≥ Pmo

Calcolo della potenza utile del trattore Pu

La potenza utile **Pu** di un trattore è calcolata moltiplicando la potenza motore **Pmot** per il rendimento globale η_g , calcolato tramite il bilancio dinamico:

 $Pu = Pmot * \eta_g$

Il bilancio dinamico considera 5 parametri:

- 1. η autodislocamento: trattandosi di un trasporto su strada sterrata (non specificando il problema nulla in merito, si suppone asciutta), ma di tipo forestale, quindi con fondo non regolare e per di più in pendenza, $\eta = 0.88$.
- 2. η trasmissione: vista la classe di potenza del trattore, è probabilmente installata una trasmissione power shift di gamma: $\eta = 0.85$
- 3. η presa di potenza: la presa di potenza non è in funzione: $\eta = 1$
- **4.** η impianto idraulico: vista la classe di potenza del trattore, è probabilmente installato un impianto idraulico di tipo Load Sensing: $\eta = 1$
- 5. η slittamento: trattandosi di un trasporto in salita su una strada sterrata in condizioni discrete (quindi non ottimali...), è possibile ipotizzare uno slittamento di una certa entità: η = 0,9

Calcolo del rendimento globale ng

- Metodo matematico (moltiplicazione dei singoli rendimenti):

$$\eta_g = 0.88 * 0.85 * 1 * 1 * 0.9 = 0.67$$

- Metodo degli "impegni di potenza IP" (somma dei singoli impegni di potenza):
- $\eta_g = 100\% (12\% + 15\% + 0\% + 0\% + 10\%) = 100\% 37\% = 63\% \rightarrow 0,63$

Nota:

Avendo applicato due metodi di calcolo diversi, logicamente i risultati sono diversi. Tuttavia, poichè anche i valori dei singoli rendimenti sono stati stimati, la differenza che emerge tra i due risultati può essere considerata accettabile, per cui i due metodi possono essere considerati equivalenti.

Senza dubbio, il metodo matematico è quello più rigoroso ed esatto, ma il suo calcolo non è immediato (e non può essere mnemonico), come invece lo è quello degli impegni di potenza.

Considerando allora η_g = 0,67, la potenza utile del trattore è:

Pu = Pmot *
$$\eta_g$$
 = 117,6 kW * 0,67= 78,8 kW

Calcolo della potenza richiesta alla macchina operatrice Pmo

In generale, Pmo comprende due componenti, ovvero la potenza che il trattore eroga tramite la pdp per far funzionare gli organi lavoranti dell'operatrice e quella necessaria al traino, ovvero la cosiddetta potenza al gancio Pg. Quindi, in generale:

$$Pmo = Ppdp + Pg$$

In questo specifico caso, la pdp non è in funzione, per cui Ppdp = 0, e quindi:

In prima approssimazione, la potenza al gancio Pg è calcolata come la trazione T moltiplicata per la velocità V.

Tuttavia bisogna considerare due fattori che entrano contestualmente in gioco:

1. il surplus di potenza necessario per far partire il cantiere trattore+operatrice trainata, in pratica per vincere il cosiddetto "attrito di primo distacco";

2. il surplus di potenza necessario per accelerare il cantiere trattore+operatrice, partendo da fermo (V = 0) fino alla massima velocità di percorrenza (Vmax). In particolare, questo secondo fattore diventa importante per i cosiddetti "trasporti veloci", che si considerano convenzionalmente tali quando il cantiere viaggia a velocità superiori a 20 km/h. Di fatto, si escludono i lavori di campo (che vengono eseguiti a velocità inferiori, a volte anche di molto), mentre si considera la maggior parte dei trasferimenti su strada pubblica.

La sommatoria di questi due fattori da quindi origine ad un coefficiente maggiorativo, chiamato "K", che assume pertanto valori sempre superiori a 1. **Per semplificare**, è opportuno allora considerare K = 1 quando il trasporto non è "veloce" (ovvero inferiore a 20 km/h) e K = 1,5 nel caso opposto (trasporto con $V \ge 20$ km/h). Quindi:

In questo specifico problema V è proprio l'incognita, che in questo caso è la velocità massima che il trattore può sviluppare, per cui d'ora in poi verrà definita Vmax.

Ora occorre calcolare la trazione richiesta dal rimorchio, trainato in salita, in pendenza.

Nel caso di un trasporto in salita (ma peraltro anche in discesa...) occorre scindere il vettore forza peso del rimorchio (Grim) in due componenti ortogonali (cioè perpendicolari tra di loro) con riferimento alla strada in pendenza (corrispondente ad un piano inclinato).

Queste due componenti sono definite rispettivamente Gx (componente parallela al piano inclinato) e Gy (componente perpendicolare al piano inclinato), effettuando sia geometricamente (vedi figura), sia soprattutto matematicamente una scomposizione vettoriale.

Ciò perché in questa condizione la forza peso del rimorchio esercita contestualmente due azioni:

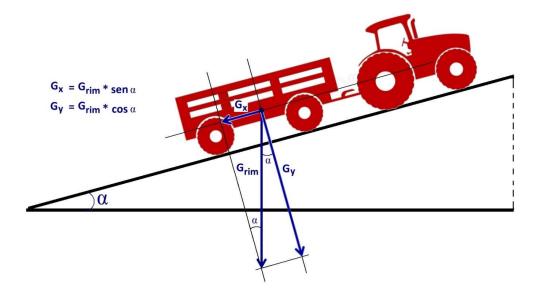
- Gy è la componente della forza peso che "fa attrito" sulla strada e sarà quindi quella parte del peso del rimorchio che, moltiplicata per il coefficiente di resistenza al rotolamento, definirà la resistenza al rotolamento;
- Gx invece è la componente della forza peso che è da vincere per trainare il rimorchio in salita, per cui si sommerà alla resistenza al rotolamento.

Per effettuare il calcolo delle due componenti vettoriali è necessario considerare la pendenza della strada, che normalmente è espressa in percentuale, convertendola in un angolo espresso in gradi; occorre quindi primariamente trasformare il valore percentuale in valore assoluto e successivamente calcolarne l'arco tangente (N.B. = esercitarsi bene con la calcolatrice per quest'ultimo calcolo!).

Quindi, nel caso specifico:

$$\alpha = \text{arctg } 12\% \rightarrow \alpha = \text{arctg } 0,12 = 6,84^{\circ}$$

Il teorema del piano inclinato prende in considerazione i triangoli rettangoli simili, come nella figura seguente:



In pratica:

a) il piano inclinato (cioè la strada in pendenza), b) il piano orizzontale e c) il relativo dislivello formano un triangolo rettangolo che è simile (ovvero ha gli angoli uguali) dei due triangoli rettangoli formati dal vettore forza peso Grim e dalle sue due componenti Gx e Gy, avendo in comune l'angolo α . Ciò è deducibile dalla figura (che, si fa notare, ovviamente "non è in scala", ovvero per chiarezza espositiva l'angolo α nel disegno è molto maggiore di 6,84°...).

Pertanto, per la trigonometria:

- in un triangolo rettangolo, un cateto è uguale all'ipotenusa per il seno dell'angolo opposto, quindi:
 Gx = Grim * sen α;
- 2. in un triangolo rettangolo, un cateto è uguale all'ipotenusa per il coseno dell'angolo adiacente, quindi: **Gy = Grim * cos α.**

Per cui, nel caso del presente problema:

```
Grim = 10000 kg * 9,81 = 98100 N

Gx = Grim * sen \alpha = 98100 N * sen 6,84° = 11683 N

Gy = Grim * \cos \alpha = 98100 N * \cos 6,84° = 97402 N
```

Si ribadisce che per calcolare la trazione globale richiesta dal rimorchio è necessario quindi considerare non solo la componente del peso del rimorchio perpendicolare al piano inclinato (Gy), ma anche quella che deve essere vinta per il trasporto in salita Gx. Infatti, ciò è facilmente deducibile considerando che, se libero da vincoli, il rimorchio lasciato in folle sulla strada in pendenza si muoverebbe verso il basso, proprio per l'effetto di Gx.

Pertanto, per un trasporto in salita, sono due le forze che devono essere vinte, ovvero Gx e l'attrito che si sviluppa tra le ruote e la strada, che viene calcolato a partire da quella parte di peso del rimorchio che effettivamente in questa situazione grava sulle ruote (cioè Gy) per il coefficiente di resistenza al rotolamento Cr.

In definitiva, la trazione T totale richiesta dal rimorchio è:

$$T = Gx + (Gy * Cr * \beta)$$

dove β è il coefficiente di variabilità della superficie sulla quale transita il rimorchio (in questo caso β = 1,1), e il coefficiente di resistenza al rotolamento è Cr = 0,1 dato che la strada sterrata è senza dubbio in buone condizioni, ma ha un profilo irregolare, in quanto di tipo forestale:

$$T = 11683 N + (97402 N * 0.1 * 1.1) = 22397 N$$

A questo punto, poiché il quesito del problema riguarda la velocità massima Vmax a cui il trattore con il rimorchio al traino potrebbe avanzare, è necessario considerare che tutta la potenza disponibile Pu sia sfruttata con questo fine, per cui:

$$Pu = Pg$$

Pu è già stata calcolata, e pertanto occorre ricavare Vmax dall'equazione della potenza al gancio Pg:

$$Pg = T * Vmax * K \rightarrow Vmax = Pg / (T * K)$$

ATTENZIONE!

La Potenza al gancio nell'equazione Pg =T * Vmax * K è espressa in Watt (W) non in kilowatt (kW). È quindi necessario effettuare la relativa conversione per poter calcolare correttamente la velocità.

Quindi:

е

VERIFICA $2:A \ge T$

La seconda verifica riguarda la capacità di tiro del trattore (l'Aderenza) per garantire il regolare avanzamento del cantiere.

L'Aderenza (A) dipende sostanzialmente da due variabili:

- il peso aderente del trattore
- l'efficacia del contatto tra terreno e organi di propulsione.

Trattandosi di un trattore a 4 RM (per cui: Ga = G) la formula standard può essere raccolta come segue:

$$A = (Ga * Ca) - (G * Cr) \rightarrow A = Ga * (Ca - Cr)$$

dove:

Ca : esprime l'efficacia del contatto tra pneumatici e terreno. Trattandosi di una strada forestale sterrata a profilo irregolare: Ca = 0,45

Cr: identifica la difficoltà del trattore ad avanzare. Si tratta logicamente della medesima strada del rimorchio, per cui Cr = 0.1

Il peso del trattore può essere calcolato applicando il rapporto peso/ potenza per le versioni a 4 RM = 550 N/kW

$$A = 64680 N * (0,45 - 0,1) = 22638 N$$

La trazione richiesta dal rimorchio è già stata calcolata: T = 22397 N per cui:

A>T La condizione è soddisfatta

Nota:

si osservi che, in questo specifico caso, l'ottimizzazione dell'accoppiamento trattore+operatrice è particolarmente efficace, perché a fronte di uno sfruttamento completo della potenza (ovvero: Pu = Pg) si verifica anche uno sfruttamento pressocché completo della capacità di tiro (cioè dell'Aderenza) del trattore. Infatti, A = 22638 Ne T = 22397, per cui $A \approx T$.

VERIFICA DI STABILITÀ

Si tratta di una lavorazione con un'operatrice trainata, per cui tale verifica si considera soddisfatta individuando la tipologia di gancio agricolo idoneo di cui deve essere dotato il trattore.

In questo caso, il rimorchio trainato è del tipo a due assi tradizionale, che in condizioni normali (cioè in un trasporto in piano) NON scarica peso sul gancio di traino del trattore.

In un trasporto in salita, tale condizione viene confermata, perché semmai è una parte del peso del trattore che si scarica sull'occhione e sul timone del rimorchio. Pertanto, facendo riferimento alla tabella CUNA NC 338-02 che codifica le caratteristiche prestazionali del gancio di traino, potrebbe essere sufficiente allo scopo un gancio di categoria D.

Tuttavia, dopo aver effettuato il trasporto in salita, il complesso trattore+operatrice dovrà percorrere presumibilmente il medesimo tratto di strada in discesa, magari comunque con un carico, per evitare di effettuare un viaggio a vuoto. Pertanto, in questa seconda condizione si potrà verificare un trasferimento di peso dal rimorchio sul gancio di traino, che renderebbe inidoneo il gancio di categoria D (ma anche il D1). In definitiva, la scelta più oculata (anche per garantire al trattore la massima versatilità di accoppiamento con altri rimorchi) sarà quella di **prevedere un gancio di categoria D2 o, meglio ancora, D3**. E, guarda caso, questo è proprio ciò che avviene nella realtà operativa...