Angelo Dei

Discesa con paracadute emisferico

Movimento di un corpo in un fluido, fluidodinamica e resistenza aerodinamica nell'aria durante la caduta libera, paracadute, velocità e tempi di discesa.

Seconda edizione
dicembre 2010

Indice generale

Discesa con paracadute emisferico

Premessa

Quanto descritto in questo documento è soltanto una discussione matematica di ciò che accade in generale ad un corpo che attraversa un fluido, ed in particolare ad un paracadute emisferico durante la discesa.
Non vi è nessuna rilevanza pratica per un paracadutista, e niente che possa aiutare a lanciarsi meglio o a perfezionare la tecnica di caduta, tuttavia vengono spiegati i concetti fisici che da Leonardo da Vinci ad oggi hanno appassionato ed avvicinato molte persone al sogno, che sembrava una cosa impossibile legata esclusivamente alla leggenda di Icaro.

Lavoro ed Energia

Sono due concetti simili e complementari, in quanto il lavoro è la capacità di produrre energia e l'energia è la capacità di compiere un lavoro, da qui la teoria del moto perpetuo, un esempio di questo è il pendolo in quanto formato da una massa vincolata ad un perno alla quale forniamo energia con lo spostamento della mano, alzando la massa compiamo un lavoro facendogli acquisire energia potenziale, aprendo la mano l'energia potenziale si trasformerà gradualmente in energia cinetica, ritrovandosi nel punto più basso con massima velocità ed energia potenziale minima, e poi in alto dalla parte opposta con velocità nulla ma energia potenziale massima, ed il ciclo si ripete e lo farebbe all'infinito se non fosse per gli attriti del perno e dell'aria.
Ed è proprio l'attrito dell'aria protagonista di questo racconto, un corpo qualsiasi in caduta libera è sottoposto ad una forza ed un'accelerazione costante, quindi in teoria la sua velocità aumenterebbe all'infinito, in realtà invece l'aria opponendo resistenza riesce a rallentare fino a stabilizzare la caduta, o come nel caso di alcune meteore a portare queste all'autocombustione grazie alla trasformazione di parte dell'energia in calore per effetto dell'attrito.

Energia potenziale e cinetica

Se prendo un sasso e lo sollevo da terra, ho compiuto un lavoro, in fisica il lavoro è dato dalla forza impiegata per lo spostamento effettuato nella stessa direzione della forza, fornendo al sasso stesso un'energia potenziale; se lascio cadere il sasso questo trasformerà la sua energia potenziale in energia cinetica acquistando velocità, cadendo su della sabbia al momento dell'impatto farà una buca tanto più profonda quanto da più in alto lo lascio cadere, o a parità di altezza quanto più grande sarà la sua massa, vediamo perché.

$$L=F\cdot S \qquad F=m\cdot a \qquad S=\frac{v^2}{2a} \qquad L=ma\frac{v^2}{2a} \qquad \boxed{L=\frac{1}{2}mv^2} \qquad L=Ep+Ec$$

Abbiamo il lavoro ***L*** che è dato dalla forza ***F*** per lo spostamento ***S***, a sua volta la forza è data dalla massa per l'accelerazione, mentre lo spostamento nel caso della caduta libera è il quadrato della velocità diviso il doppio dell'accelerazione, arrivando alla formula generale del lavoro che equivale all'energia potenziale ***Ep*** acquisita e all'energia cinetica ***Ec*** che si svilupperà una volta lasciato cadere il sasso, a conferma del fatto che sono tutti fenomeni legati tra loro.
Notiamo alcune cose interessanti, innanzi tutto il passaggio dell'energia potenziale all'energia cinetica non è istantaneo, ma avviene gradualmente, all'inizio avremo *Ep* massima e *Ec* zero, lungo

la caduta l'*Ep* trasferirà gradualmente all'*Ec* la sua energia sino a che a terra *Ep* sarà zero ed *Ec* sarà massima e verrà usata totalmente per creare la buca per terra, pertanto possiamo affermare che *Ep+Ec=L* e cioè l'energia in gioco è uguale al lavoro svolto per crearla e che la somma delle energie è costante in quanto al diminuire di una aumenta dello stesso valore l'altra.
Altra cosa da notare riguardo all'energia prodotta è che se raddoppio la massa avrò il doppio dell'energia, mentre se raddoppio la velocità, e questo posso farlo spostando più in alto il sasso, l'energia sarà quattro volte di più perché la velocità è elevata al quadrato.

Resistenza aerodinamica

Quello che ho detto nel paragrafo precedente non è del tutto vero, l'energia al momento dell'impatto a terra non è proprio uguale a quella di partenza, ma leggermente minore, in quanto una parte è stata perduta sotto forma di calore per l'attrito con l'aria, per l'esempio del sasso la quantità persa è talmente irrisoria che non vale la pena di parlarne, ma se ripeto l'esperimento da un'altezza molto elevata o, visto che siamo in tema, prendo un paracadutista lanciato in caduta libera da 4500 metri allora il fenomeno comincia ad acquistare una valenza maggiore.
Un corpo in movimento in un fluido incontra una resistenza fluidodinamica, quella che comunemente chiamiamo attrito, i fattori che influenzano questo dato sono la natura del fluido e del corpo insieme alla forma e alla velocità.
Nel caso in cui il fluido sia l'aria, la resistenza si chiama aerodinamica ed avremo la seguente relazione:

$$R=\frac{1}{2}Cr\,\rho\,v^2 A \qquad \rho=\frac{massa}{volume}\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$$

dove:

- R = resistenza aerodinamica
- Cr = coefficiente di resistenza aerodinamica (penetrazione)
- ρ = (lettera greca rho) densità dell'aria
- A = area della superficie esposta all'aria
- v = velocità del corpo

ricordo che la densità è il rapporto tra la massa ed il volume di una sostanza, e nel caso dell'aria il valore varia in funzione della pressione atmosferica e della temperatura, assumendo un valore medio di circa 1,2 Kg/m^3.
Inoltre la formula della resistenza è valida per qualsiasi sostanza fluida basta sostituire alla parola aria il fluido interessato.
Riepilogando un corpo che cade immerso nell'aria incontra una resistenza che è influenzata dalla sua forma (*Cr*, che in industria automobilistica e noto come *Cx*), dalla superficie esposta all'aria e soprattutto dalla sua velocità.
La resistenza equivale esattamente ad una forza, anche se virtuale perché indotta dal movimento, ed aumenta con il quadrato della velocità, è chiaro che, aumentando la velocità, ci sarà un momento in cui la forza della resistenza andrà in equilibrio alla forza di gravità (*P=mg*), dal quel momento in poi, come è noto dal primo principio della dinamica la velocità non aumenterà più ma assumerà un andamento costante prendendo il nome di velocità limite (*Vl*),

$$\frac{1}{2}Cr\,\rho\,v^2 A=m\,g \qquad Vl=\sqrt{\frac{2\,m\,g}{Cr\,\rho\,A}}$$

ecco perché un paracadutista in caduta libera che assume la forma ad angelo (X orizzontale) si stabilizza su un valore di circa 200 Km/h (questo valore non l'ho mai misurato, si tramanda oralmente tra paracadutisti, ma indipendentemente dall'esattezza del dato quello che conta è la correttezza della teoria), invece per quanto riguarda il paracadute che scende a velocità costante è noto a tutti.

Paracadute

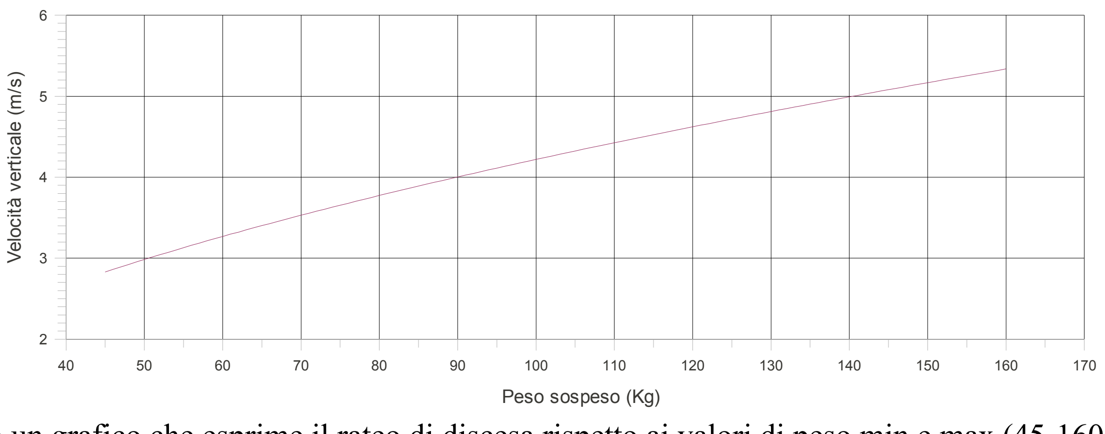
Il paracadute emisferico è nato per frenare la caduta, quindi la sua natura non è propriamente basata sull'attrito radente, ma ingabbia l'aria nella calotta e la comprime fino a creare una superficie fluida orizzontale, se si creasse una superficie orizzontale rigida non sarebbe stabile, qualcosa di simile è fatto dal paracadute ad ala che è un ibrido dei due, ha dei cassoni che ingabbiano l'aria per garantire un minimo di discesa verticale ma l'ala, come suggerisce la parola stessa, si basa sulla portanza e quindi sulla velocità orizzontale.
Ma torniamo al nostro tondo (l'emisferico) qual'è il suo coefficiente di resistenza aerodinamica *Cr*? proviamo a calcolarlo, per farlo utilizzerò i dati del paracadute americano SET-10 della Strong Enterprises.
I dati che abbiamo a disposizione sono:

Superficie di resistenza aerodinamica: 72 m^2
Velocità di discesa: 4 m/s con un peso di 90 Kg

$$Cr = \frac{2\,m\,g}{\rho\, v^2 A} \qquad Cr = \frac{2 \cdot 90 \cdot 9{,}81}{1{,}2 \cdot 4^2 \cdot 72} = 1{,}28$$

Il *Cr* è un numero puro e quindi adimensionale, conoscere il suo valore ci permette di stabilire quale sarà la velocità di discesa verticale conoscendo il nostro peso comprensivo di equipaggiamento, ad esclusione del solo paracadute dorsale (circa 14 Kg) poiché il contenitore (bag) rimane appeso all'aereo e la calotta una volta aperta non pesa più, mentre l'imbraco è poca cosa.

$$v = \sqrt{\frac{2\,m\,g}{Cr\,\rho\,A}} \quad \text{ovvero conoscendo i dati:} \quad v = \frac{\sqrt{m}}{2{,}37}$$



Ecco un grafico che esprime il rateo di discesa rispetto ai valori di peso min e max (45-160 Kg)

Decelerazione

Supponiamo di avere un veicolo che procede ad una velocità costante di 90 Km/h, ad un certo istante l'autista preme il pedale del freno per arrestare la macchina, e diciamo che compie una frenata costante arrestando l'auto in uno spazio di 75 m.
Proviamo a calcolare il valore della decelerazione, che abbiamo supposto costante, ed i valori di velocità e spazio alle posizioni intermedie di 2 e 4 secondi.
Innanzi tutto per aderire al Sistema Internazionale, trasformiamo la velocità da Km/h a m/s:

$$90\frac{Km}{h}=\frac{90}{3{,}6}=25\,m/s$$

calcoliamo il tempo che ci vorrà all'auto per fermarsi:

$$t=\frac{2S}{v} \qquad t=\frac{2\cdot 75}{25}=6\,sec$$

mentre la sua decelerazione sarà:

$$a=\frac{vf-vi}{t} \qquad a=\frac{0-25}{6}=-4{,}17\,m/s^2$$

la decelerazione, proprio perché tale, è negativa e questo significa che per ogni secondo che passa la velocità di 4,17 m/s viene perduta e non il contrario.
La velocità agli intermedi, si calcola sottraendo dalla velocità iniziale (25 m/s) la velocità di decelerazione:

$v=vi+a\cdot t$ poiché l'accelerazione è negativa: $v=25-4{,}17\cdot t$

lo spazio percorso sarà invece composto dalla velocità inerziale e la decelerazione:

$S=vi\cdot t+\frac{1}{2}a\cdot t^2$ ossia: $S=25\cdot t-\frac{4{,}17}{2}\cdot t^2$

Quindi per i nostri intermedi di 2 e 4 secondi:

$v=25-4{,}17\cdot 2=16{,}66\,m/s\ \ (60\,Km/h)$ e $v=25-4{,}17\cdot 4=8{,}32\,m/s\ \ (30\,Km/h)$

$S=25\cdot 2-\frac{1}{2}\cdot 4{,}17\cdot 2^2=41{,}66\,m$ e $S=25\cdot 4-\frac{1}{2}\cdot 4{,}17\cdot 4^2=66{,}64\,m$

Quindi facciamo una tabella riassuntiva:

tempo	*secondi*	0	2	4	6
spazio	*metri*	0	41	66	75
velocità	*m/s*	25	16	8	0
	Km/h	90	60	30	0

Formule utili:

$$v=a\,t \qquad v=\sqrt{2\,a\,S} \qquad t=\frac{v}{a} \qquad t=\sqrt{\frac{2S}{a}} \qquad t=\frac{2\,s}{v} \qquad S=\frac{a\,t^2}{2} \qquad S=\frac{v^2}{2\,a} \qquad a=\frac{v}{t} \qquad a=\frac{v^2}{2S}$$

Moto uniformemente accelerato:

$$vf=vi+a\cdot t \qquad S=vi\cdot t+\frac{1}{2}a\cdot t^2 \qquad t=\frac{vf-vi}{a} \qquad vf^2=vi^2+2\cdot a\cdot S \qquad a=\frac{vf^2-vi^2}{2S}$$

Energia massa e forza

Quello visto fino ad ora è solo una relazione di proporzionalità tra le componenti di velocità, spazio e tempo ma non tiene conto delle forze che ci sono in gioco, rendendo uguale un'automobile ad un camion, ma sappiamo bene che una macchina che si muove lentamente posso anche provare a fermarla con le mani, con un camion è molto meglio se non ci provo nemmeno.
Anche un semplice sasso, se lo tengo in mano è un conto ma se me lo tirano addosso fa male, eppure è lo stesso sasso, cosa è cambiato? Semplicemente che con la velocità il sasso ha acquistato energia, lo stesso avviene con i veicoli, quando sono in movimento acquisiscono energia cinetica in maniera proporzionale alla loro massa, ecco perché il camion non si ferma con le mani, ma soprattutto con la velocità.
Vediamo ora lo stesso esempio di prima ma con un approccio per gli addetti ai lavori, per fare questo abbiamo bisogno di un ulteriore dato, conoscere la massa del veicolo, quindi supponiamo che l'auto pesi 800 Kg:
Qual'è l'energia cinetica acquisita dall'auto?

$$Ec=\frac{1}{2}mv^2 \qquad Ec=\frac{800\cdot 25^2}{2}=250\,000\ joule$$

il joule (j) è l'unità di misura dell'energia e del lavoro, che sono equivalenti, di per se non dice molto, ma si intuisce che più ce n'è e più energia si ha.
Ora se vogliamo fermare la macchina, dobbiamo esaurire tutta l'energia accumulata, utilizzandola per compiere un lavoro, di questo se ne occupano i freni che con l'attrito trasformano l'energia in calore, che è a sua volta un'altra forma di energia e che viene utilizzata per riscaldare l'aria che circonda i freni, vediamo quale forza sviluppano i freni:

$$L=F\cdot S \qquad F=\frac{L}{S} \qquad F=\frac{250000}{75}=3333\quad newton(N)$$

Il lavoro è dato dalla forza applicata per lo spostamento, in questo caso i freni devono esercitare una forza costante di 3333 newton per tutti i 75 metri al fine di esaurire i 250000 joule di energia accumulati con la velocità.
Calcoliamo ora la decelerazione della frenata, che forzeremo negativa in quanto antagonista in verso alla velocità che ha generato l'energia:

$$F=m\cdot a \qquad L=m\cdot a\cdot S \qquad a=-\frac{L}{mS} \qquad a=-\frac{250000}{800\cdot 75}=-4{,}17\,m/s^2$$

Il tempo invece sarà:

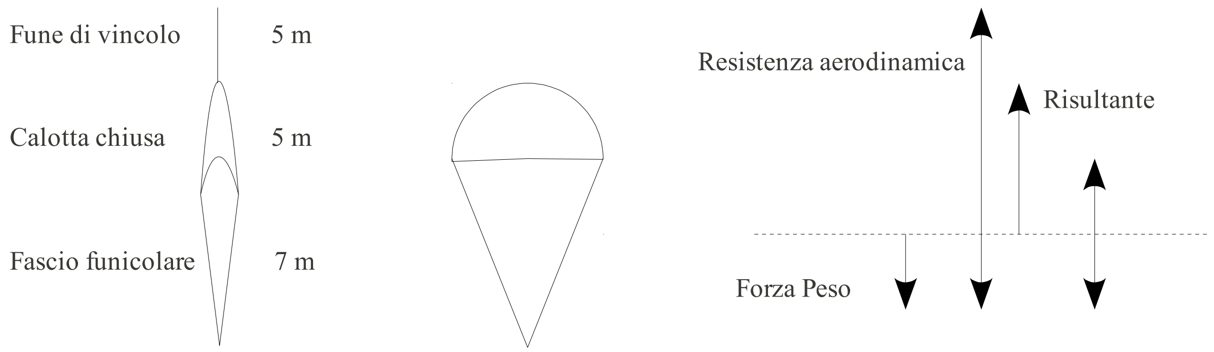
$$a=\frac{v}{t} \qquad F=m\frac{v}{t} \qquad t=\frac{mv}{F} \qquad t=\frac{800\cdot 25}{3333}=6\quad secondi$$

ed abbiamo ritrovato i valori calcolati con l'altro sistema, a conferma della validità di entrambi i metodi.
L'energia ed il lavoro non tengono conto del tempo impiegato, mentre la potenza è l'energia sviluppata o usata nell'unità di tempo, quindi se volessi conoscere la potenza che è servita per fermare la macchina:

$$P=\frac{L}{t} \qquad P=\frac{250000}{6}=41666\,Watt$$ ovvero circa 41,7 KW oppure 57 cavalli (HP)

Discesa con paracadute

Tutto quello visto fino ad ora ci è servito come premessa per poter capire come interagiscono tra di loro nel mondo reale le forze e l'energia, e comprendere cosa accade al paracadute dal momento dell'uscita dall'aereo fino all'atterraggio, vediamo di rimettere insieme tutti i tasselli.
Consideriamo come dati sempre il paracadute SET-10 con un paracadutista che pesa in totale 90 Kg e quindi con velocità di discesa 4 m/s.
Il paracadute è composto dalla fune di vincolo agganciata al cavo statico dell'aereo, una calotta inizialmente ripiegata e dalle funicelle che compongono il fascio funicolare, la calotta una volta estratta dal nastro di vincolo si apre, ingabbia l'aria durante la discesa producendo una forza di resistenza aerodinamica contrastante la forza peso, quella dovuta alla gravità che fa precipitare il paracadutista, contenendo la calotta una massa d'aria superiore alla massa del paracadutista, anche la forza prodotta sarà superiore a quella gravitazionale, al contrario di un'automobile che per frenare tolgo il piede da l'acceleratore e quindi annullo la spinta, in una caduta la forza peso è sempre presente e costante, di fatto è anche la forza che tenendo la calotta in trazione la mantiene gonfia, questo produce la forza di resistenza che è inizialmente elevata e svolge un lavoro antagonista all'energia cinetica accumulata nella caduta libera, facendo diminuire la stessa velocità di caduta, diminuendo la velocità diminuisce proporzionalmente anche la forza di resistenza, fino a che quest'ultima sarà uguale alla forza peso annullandola e creando per equilibrio una velocità di discesa costante, nel caso specifico nostro di 4 m/s.



Alcuni dubbi potrebbero esistere sulla natura dell'aria, ci è difficile pensare che abbia un peso, ma pur essendo leggera ha una propria massa, infatti grazie alla forza di gravità crea la pressione atmosferica, tanto che se non avessimo dell'aria all'interno del nostro corpo per contrastare la pressione atmosferica, verremmo schiacciati come succede in fondo al mare con la pressione dell'acqua; un altro dubbio potrebbe venire sulle forze in gioco, essendo la resistenza aerodinamica superiore in modulo alla forza peso, potrebbe venire da pensare che il paracadutista sia trascinato verso l'alto, ma anche se la sensazione può essere quella in quanto il nostro corpo basa l'equilibrio sulle forze di accelerazione, in realtà come i freni dell'auto stiamo contrastando l'energia che si è accumulata nella caduta, e quindi siamo sempre in discesa.

Dettagli

Come sappiamo il lancio è di tipo vincolato, quindi abbiamo la fune di vincolo agganciata all'aereo con una lunghezza di circa 5 metri (anche se circa 1 metro rimane all'interno dell'aereo), che sfila la calotta la quale ripiegata è circa 5 metri e le funicelle lunghe 7 metri, dunque in totale 5+5+7=17 metri, allora per 17 metri siamo in caduta libera e non siamo sostenuti da nulla, a questo punto il paracadute è completamente sfilato ma chiuso, si rompe la fettuccia sul foro apicale e comincia l'apertura della calotta, occorreranno circa 2 secondi affinché la calotta sia completamente aperta (salvo malfunzionamenti), dove avverrà una frenatura parziale. Non potendo stabilire a priori quanto sia la reale resistenza all'aria in questi ultimi 2 secondi, come considerazione logica potremo stabilire una media considerando il primo secondo come caduta libera e il secondo successivo come se il paracadute fosse completamente aperto.

Per 17 metri di caduta libera quanto tempo impiego?

$$t=\sqrt{\frac{2S}{g}} \qquad t=\sqrt{\frac{2\cdot 17}{9{,}81}}=1{,}86 \ \ \mathit{secondi}$$

diciamo 2 secondi, tanto cambia poco, poi abbiamo detto di considerare 1 altro secondo di caduta libera e quindi un totale di 3 secondi.

Quanto spazio ho percorso dopo 3 secondi e che velocità ho raggiunto?

$$S=\frac{1}{2}g\,t^2 \qquad S=\frac{1}{2}9{,}81\cdot 3^2=44\,\mathit{metri} \ \ ; \ \ v=g\,t \qquad v=9{,}81\cdot 3=29{,}43\,\mathit{sec}$$

Dopo 3 secondi di caduta sono a 44 metri ad una velocità di quasi 30 m/s e la mia energia cinetica sarà:

$$Ei=\frac{1}{2}m\,v^2 \qquad Ei=\frac{1}{2}90\cdot 29{,}43^2=38976\ \mathit{joule} \ \ \text{(energia iniziale)}$$

per decelerare alla velocità di 4 m/s dovrò arrivare all'energia finale di:

$$Ef=\frac{1}{2}m\,v^2 \qquad Ef=\frac{1}{2}90\cdot 4^2=720\,\mathit{joule} \ \ \text{(energia finale)}$$

il lavoro svolto per rallentare sarà:

$$F\cdot S=Ei-Ef \ \ \text{e da qui lo spazio occorrente} \ \ S=\frac{Ei-Ef}{F}$$

Ma quanto vale la forza F? La calotta del paracadute quando aperta, ingabbia l'aria che per sua natura possiede una certa massa, abbiamo visto dal peso specifico che è di circa 1,2 Kg per m^3, poiché la forza è data dalla massa per l'accelerazione, e poiché la calotta appena aperta è in caduta libera impatta la massa d'aria con accelerazione g ovvero, per associazione di idee possiamo considerare la calotta ferma e la massa d'aria che la spinge verso l'alto.

Quanta aria è contenuta nella calotta? Proviamo a calcolare il volume come se fosse una semisfera, tenendo conto che il raggio della calotta è all'incirca 4,7 metri:

$$\frac{\mathit{volume}}{2}=\frac{2}{3}\pi\,r^3 \qquad \frac{2}{3}\pi\,4{,}7^3=217\,m^3 \ \ \text{(volume semisfera)}$$

se in 1 metro cubo ci sono 1,2 Kg di aria, la massa e quindi la forza saranno:

$$m=1{,}2\cdot m^3=1{,}2\cdot 217=260\,Kg \ \ ; \ \ F=m\cdot g=260\cdot 9{,}81=2550 \ \ \mathit{newton}$$

poiché la forza **F** ha verso contrario alla forza peso **P**, quest'ultima andrà sottratta, inoltre durante la frenatura diminuendo la velocità, diminuirà anche la forza dell'aria che preme sulla calotta andando a equilibrare la forza peso:

$$P=m\,g \qquad P=90\cdot 9{,}81=882{,}9 \ \ \mathit{newton} \ \ \text{(forza peso circa 883 N)}$$

infine la forza sulla calotta passando da F a P non è costante, quindi consideriamo un valore medio

$$F = \frac{2550 - 883}{2} = 833{,}5\ N$$ (valore medio di forza per la decelerazione)

allora lo spazio che ci vuole per raggiungere la velocità costante sarà:

$$S = \frac{Ei - Ef}{F} \qquad S = \frac{38976 - 720}{833{,}5} = 45{,}9\ \ metri$$ (spazio per rallentare)

per rallentare occorrono 46 metri, e per farlo avrò una decelerazione media di:

$$a = \frac{vf^2 - vi^2}{2S} \qquad a = \frac{4^2 - 29{,}43^2}{2 \cdot 46} = -9{,}2\, m/s^2$$ (decelerazione media)

in quanto tempo coprirò lo spazio di 46 metri?

$$t = \frac{vf - vi}{a} \qquad t = \frac{4 - 29{,}43}{-9{,}2} = 2{,}76\ \ secondi$$ (tempo per rallentare)

abbiamo percorso fino ad ora 44 + 46 = 90 metri, e ci siamo stabilizzati ad una velocità di 4 m/s, rimangono ancora 500 – 90 = 410 metri a velocità costante di 4 m/s.

$$t = \frac{s}{v} \qquad t = \frac{410}{4} = 102{,}5\ \ secondi$$ (tempo rimanente)

Tabella riepilogativa:

	Spazio	***tempo***	***velocità***
	metri	*secondi*	*m/s*
Uscita	17	2	18
Apertura	27	1	30
Decelerazione	46	3	-
Discesa	410	102	4
Totale	*500*	*108*	

Nella tabella sono riassunte le varie fasi del lancio, all'uscita dall'aereo siamo in caduta libera per 17 metri, la fune di vincolo ha estratto il paracadute, comincia l'apertura della calotta, prima che si sia aperta totalmente abbiamo percorso circa 44 metri di discesa raggiungendo la velocità di 30 m/s (108 Km/h), magari qualcosa di meno, in quanto il paracadute anche se non completamente aperto compie già un'azione frenante, a questo punto comincia la fase di decelerazione con uno shock di apertura di -0,9 G (-9,2/9,81), per arrivare alla velocità di discesa di 4 m/s percorriamo 46 metri in circa 3 secondi, rimangono da percorrere 410 metri alla velocità di discesa di 4 m/s.
Conclusione per il lancio da 500 metri abbiamo impiegato circa 108 secondi.
Riguardo allo shock di apertura, è stato calcolato su un valore medio di accelerazione, infatti l'apertura avviene in maniera graduale, se l'apertura fosse istantanea avremo uno shock molto più elevato, come è successo al sottoscritto con un MC1-1C dove i cosciali mi hanno lasciato un livido nero, ma non mi lamento visto che la zona interessata è vicina a parti anatomiche di natura più importante.

E se i secondi tra uscita ed apertura fossero 4? 1 in più rispetto a prima, proviamo a ricalcolare i valori della tabella:

$$v = g\,t = 9{,}81 \cdot 4 = 39{,}24\,m/s \quad ; \quad S = \frac{1}{2}\,g\,t^2 = \frac{9{,}81 \cdot 4^2}{2} = 78{,}48\,m$$

$$Ec = \frac{1}{2}\,m\,v^2 = \frac{1}{2}\,90 \cdot 39{,}24^2 = 69290\,joule \quad ; \quad S = \frac{69290 - 720}{833{,}5} = 82{,}2\,m$$

$$a = \frac{vf^2 - vi^2}{2\mathrm{S}} = \frac{4^2 - 39{,}24^2}{2 \cdot 82} = -9{,}3\,m/s^2 \quad \text{(-0,9G) ;} \quad t = \frac{vf - vi}{a} = \frac{4 - 39{,}24}{-9{,}3} = 3{,}79\,secondi$$

	Spazio	***tempo***	***velocità***
	metri	*secondi*	*m/s*
Uscita	17	2	18
Apertura	61	2	39
Decelerazione	82	4	-
Discesa	340	85	4
Totale	*500*	*93*	

Rammento che il vento non influenza ne' la velocità verticale e ne' il tempo di discesa, vedere per questo il mio "*Elementi di fisica di base applicata al paracadutismo*", anche se provoca un atterraggio più duro, ma per questo vale sempre la frase: *gambe unite e capovolta*.

Angelo Dei