



**UNIVERSITA' "MEDITERRANEA" DI REGGIO CALABRIA
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE**

**CORSO DI
INFRASTRUTTURE AEROPORTUALI ED ELIPORTUALI**

**LECTURE 05
LE MANOVRE DI DECOLLO E DI ATTERRAGGIO**

Docente: Prof. Ing. Marinella GIUNTA

LE MANOVRE DI DECOLLO ED ATTERRAGGIO

LO STUDIO DELLE MANOVRE DI DECOLLO E ATTERRAGGIO E' IMPORTANTE PER POTER DEFINIRE LA LUNGHEZZA DA ASSEGNARE ALLA PISTA IN FUNZIONE DELL' AERO PRESO COME RIFERIMENTO (AEREO CRITICO).

La MANOVRA DI DECOLLO richiede una maggiore lunghezza della pista perché:

1. il carico massimo del velivolo è maggiore che nella fase di atterraggio in quanto comprende anche il peso del carburante;
2. durante la fase di atterraggio alcuni fattori quali la presenza di freni aerodinamici, la possibilità per i turboreattori di invertire il getto e l' azione dei freni delle ruote consentono elevate decelerazioni.



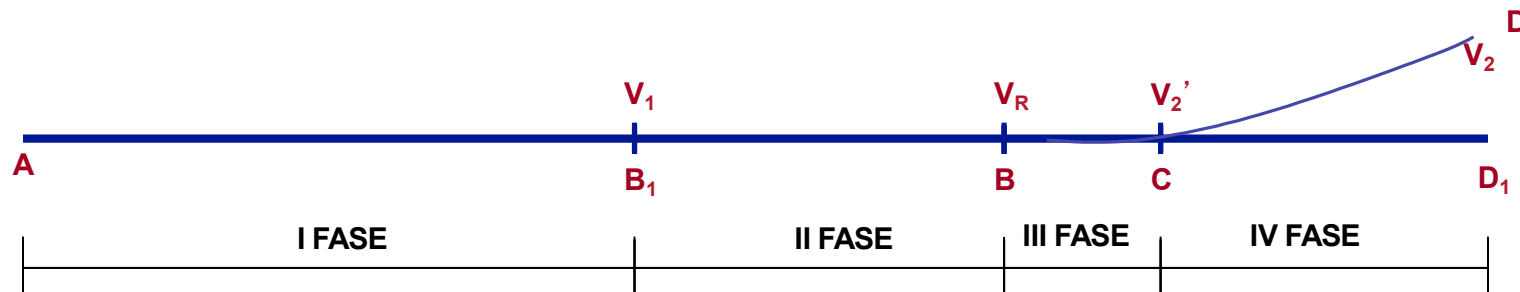
LUNGHEZZA DELLA PISTA = f (MANOVRA DI DECOLLO)

IL DECOLLO (TAKE-OFF)

La manovra di decollo ha inizio quando l'aereo, posto sulla linea di volo nella pista, ricevuto il consenso dalla Torre di Controllo, incrementa la spinta dei motori ed aumenta la velocità fino a raggiungere la portanza che consente il distacco dal suolo.

Durante la fase di decollo l'aereo attraversa diverse fasi di velocità:

1. “**Velocità di decisione**” o “**velocità critica**” V_1 , indicata dalla casa costruttrice nel manuale di ciascuna aereo;
2. “**Velocità di rotazione**” V_R , alla quale il pilota alza la ruota di prua;
3. “**Velocità di distacco**” o “**velocità iniziale di salita**” V_2' , che è la minima velocità consentita al pilota per raggiungere un'altezza convenzionale di 10,70 m al termine della pista. In genere si pone pari a $1,2 V_S$ dove V_S è la “**velocità di stallo**”.
4. “**Velocità sicurezza al decollo**” V_2 , valore minimo della velocità che l'aereo deve possedere sull'ostacolo convenzionale posto a 10,70 m al di sopra del fine pista. Tale velocità è data dai regolamenti.



IL DECOLLO (TAKE-OFF)

DECOLLO NORMALE



LUNGHEZZA DI CAMPO CARATTERISTICA

V_R = velocità di rotazione (definita dalla casa costruttrice)

V_1 = velocità decisionale

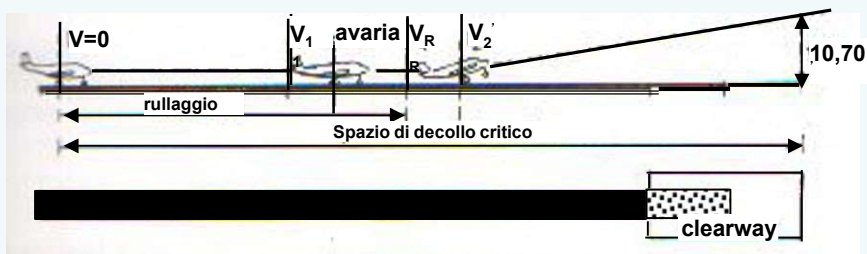
$V_2 = 1,2$ velocità di stallo

DECOLLO INTERROTTO



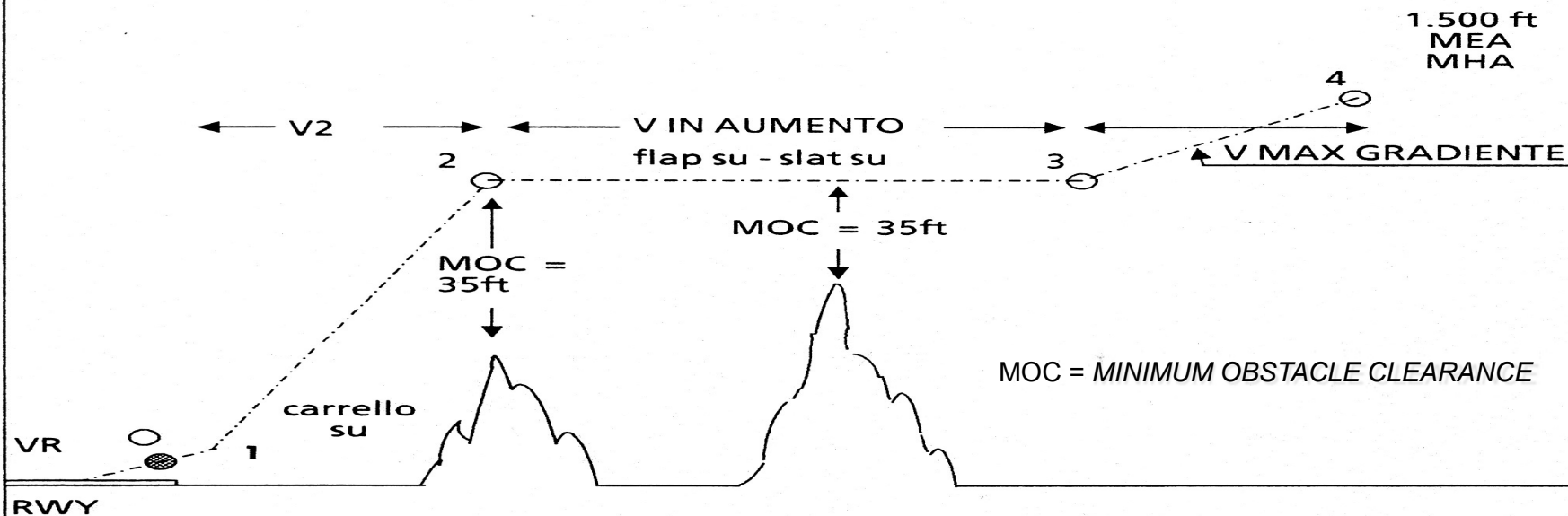
STOPWAY = prolungamento della pista da utilizzare per l'arresto nel caso di decollo interrotto

DECOLLO CRITICO



CLAERWAY = prolungamento della pista privo di ostacoli, di lunghezza pari alla metà dello spazio necessario all'aereo in fase di decollo critico per raggiungere l'altezza di 10,70 m.

TRAIETTORIA DI DECOLLO CON MOTORE OPERATIVO



(0) - (1) - (2) - (3) - (4) = **TRAIETTORIA DECOLLO**
 (0) = punto su TODA a 35 ft e $V = V2$
 (4) = fine traiettoria decollo (H minima = 1.500 ft)

- 1° SEGMENTO = (0) - (1) = retrazione carrello e $V = V2$
- 2° SEGMENTO = (1) - (2) = salita e
- 3° SEGMENTO = (2) - (3) = livellamento per accelerazione
- 4° SEGMENTO = (3) - (4) = salita a V max gradiente e velivolo pulito

GRADIENTI

MINIMI

== > 2° SEGMENTO

== > 4° SEGMENTO

== > 2.4 % (2 MOTORI)

== > 2.7 % (3 MOTORI)

== > 3 % (4 MOTORI)

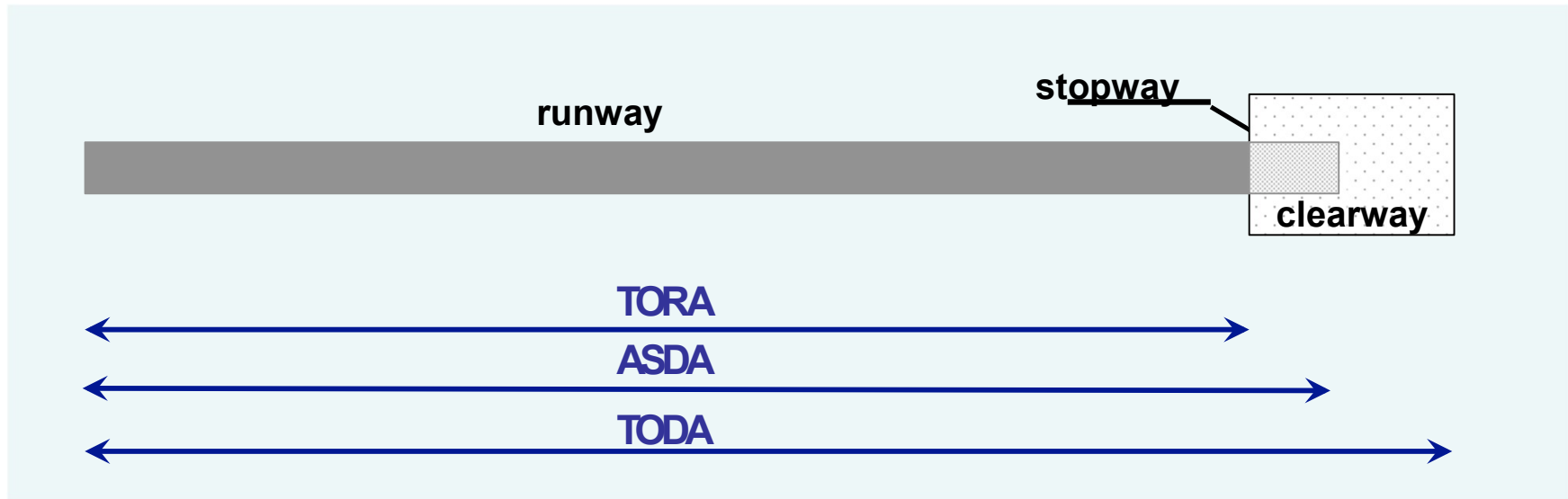
== > 1.2 % (2 MOTORI)

== > 1.4 % (3 MOTORI)

== > 1.5 % (4 MOTORI)

MOC in tutte le fasi = 35 ft.

DISTANZE DICHIARATE DELLA PISTA



TORA (Take-Off Run Available): corsa disponibile per aereo a decollo normale

TODA (Take-Off Distance Available): TORA + clearway

ASDA (Accelerate Stop Distance Available): TORA + stopway

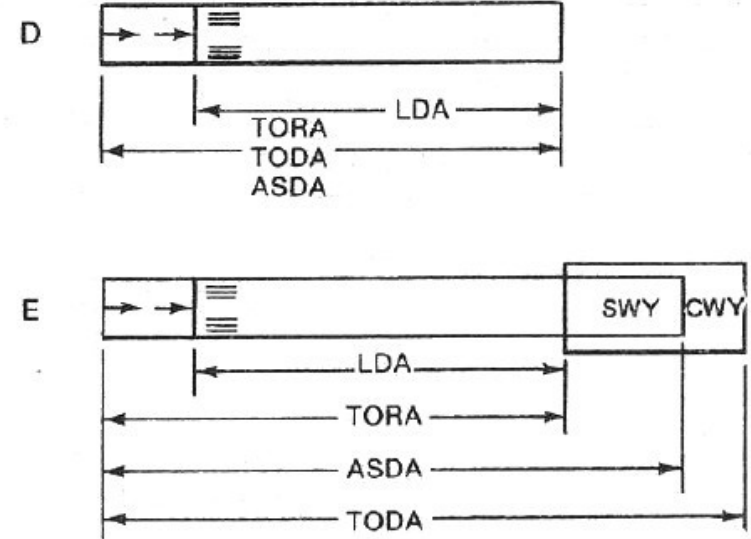
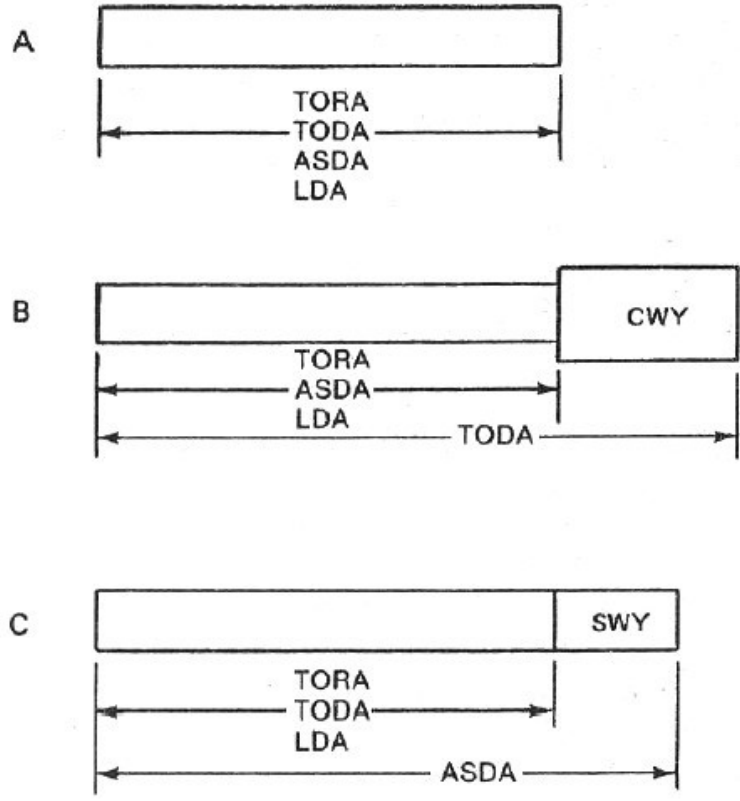
LDA (Landing Distance Available): può non coincidere con la TORA

TORA = TODA = ASDA



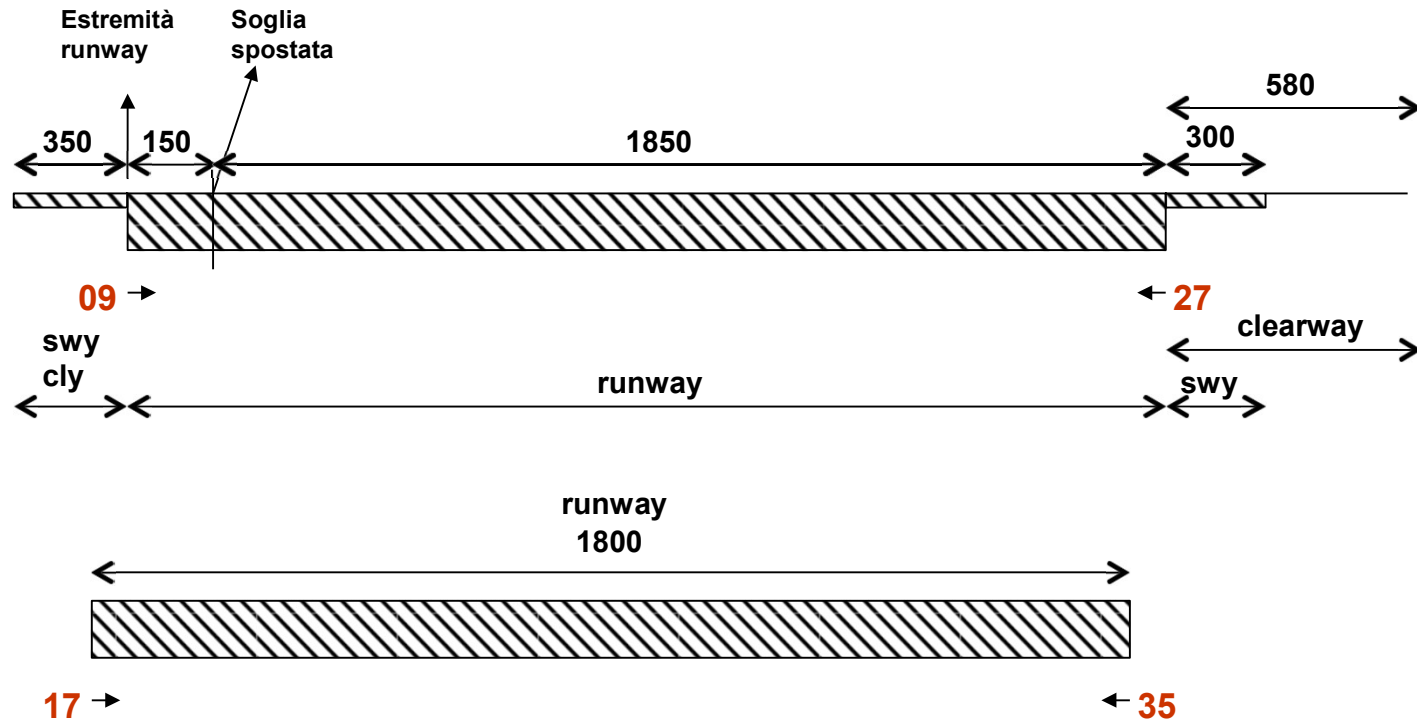
**LUNGHEZZA DELLA PISTA
BILANCIATA**

DISTANZE DICHIARATE DELLA PISTA



NOTA: tutte le distanze dichiarate sono riportate per operazioni condotte da sinistra a destra

DISTANZE DICHIARATE DELLA PISTA



| runway | TORA (m) | ASDA (m) | TODA (m) | LDA (m) |
|--------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 09 | 2000 | 2300 | 2580 | 1850 |
| 27 | 2000 | 2350 | 2350 | 2000 |
| 17 | not usable | not usable | not usable | 1800 |
| 35 | 1800 | 1800 | 1800 | not usable |

IL DECOLLO (TAKE-OFF)

Lo spazio di decollo è funzione di quattro fattori:

1. Un **fattore personale** dovuto all'abilità del pilota;
2. Un **fattore meccanico** dipendente dalle caratteristiche dell'aereo;
3. Un **fattore climatico** che dipende dalle condizioni meteorologiche. I decolli e gli atterraggi avvengono, infatti, sempre con vento frontale in quanto in tal modo si riducono i percorsi di decollo e di atterraggio;
4. Un **fattore di campo** dipendente dalle condizioni ambientali dell'aeroporto (quota di campo, temperatura, pendenza della pista).

SPAZIO DI DECOLLO

$$S_d = S_1 + S_2 + S_3$$

S_1 = spazio percorso nella fase di **rullaggio**

$$V_i = 0 \quad V_f = V_R \text{ (velocità di rotazione)}$$

$$\frac{Q}{g} \frac{dv}{dt} = T - \left[f \left(Q - \frac{1}{2} C_{p,\rho} S v^2 \right) + \frac{1}{2} C_{r,\rho} S v^2 \right]$$

S_2 = spazio percorso nella fase di **manovra**

$$V_i = V_R \quad V_f \text{ (velocità di stacco)} = 1,2V_s \text{ (velocità di stallo)}$$

$$S_2 = V \times t_m = V \times 2s$$

S_3 = spazio percorso nella fase di **salita**

$$S_2 + S_3 = 500 - 600 \text{ m}$$

FATTORI CHE INFLUENZANO LO SPAZIO DI DECOLLO

Quota di campo h (s.l.m.)

Temperatura ambiente T

Vento

Pendenza longitudinale della pista

$$V_{dh} = V_{do} / (\delta)^{1/2} \quad \delta = \rho / \rho_0 \quad \delta = f(T)$$

V_{dh} = velocità di involo a quota h

V_{do} = velocità di involo a quota $h = 0$

SPAZIO DI DECOLLO

FATTORI CHE INFLUENZANO LO SPAZIO DI DECOLLO

Quota di campo h (s.l.m.)

La velocità di sostentamento dipende dalla densità dell'aria, densità che varia al variare della quota di campo. Pertanto lo spazio di decollo varia con la quota di campo.

Le Norme ICAO stabiliscono di adottare incrementi successivi del 7% ogni 300 m di altitudine sul livello del mare.

Temperatura ambiente T

La temperatura dell'aria influenza la densità dell'aria e quindi anche lo spazio di decollo.

Le Norme ICAO consigliano di aumentare la lunghezza della pista dell'1% per ogni grado in più oltre i 15°C.

La temperatura di riferimento è la media delle massime temperature giornaliere del mese più caldo.

Vento

Le operazioni di decollo ed atterraggio vanno eseguite contro vento e mai con forte vento trasversale, al fine di ridurre la velocità minima assoluta di sostentamento.

La velocità trasversale critica è 22 Km/h per piccoli aeroplani ad elica e di 30-36 Km/h per aerei a reazione. La lunghezza della quale va incrementata la pista si ricava da diagrammi.

Pendenza longitudinale della pista

Non ci sono indirizzi univoci sugli incrementi da assegnare alla pista. Si suggerisce un incremento percentuale compreso tra l'8% ed il 10% per ogni unità di livelletta espressa in percento. Se $i=+1\%$ incremento = 100 m.

L' ATTERRAGGIO (LANDING)

1° FASE – DISCESA LIBERA

Il velivolo perde quota gradatamente con il minimo consumo di carburante e senza disturbo per i viaggiatori. La velocità si mantiene costante. Se la quota di tangenza è elevata, l' aeromobile può percorrere anche centinaia di chilometri.

2° FASE – DISCESA DI AVVICINAMENTO

Avista o strumentale. Un tempo si eseguiva mediante circuitazione dell' aeroporto in modo da iniziare l' avvicinamento finale allineando l' aereo all' asse pista (center line). L' altezza e la distanza dalla soglia raggiunti durante questa fase devono essere compatibili con la possibilità di giungere al punto di contatto con la pista con una traiettoria di opportuna inclinazione (circa 3°). In questa fase si riduce la potenza di propulsione e si inseriscono gli ipersostentatori.

3° FASE – ARROTONDAMENTO O AVVICINAMENTO AL SUOLO

L' aereo con carrello abbassato si presenta alla quota di 10,70 m (35 ft) sulla soglia della pista con gli ipersostentatori completamente azionati in modo da aver raggiunto la velocità di stallo in posizione cabrata. Superato il punto di contatto (touch down) a 300 m dalla soglia avviene il rullaggio sulla pista e l' uscita nella prima via di uscita rapida utile.

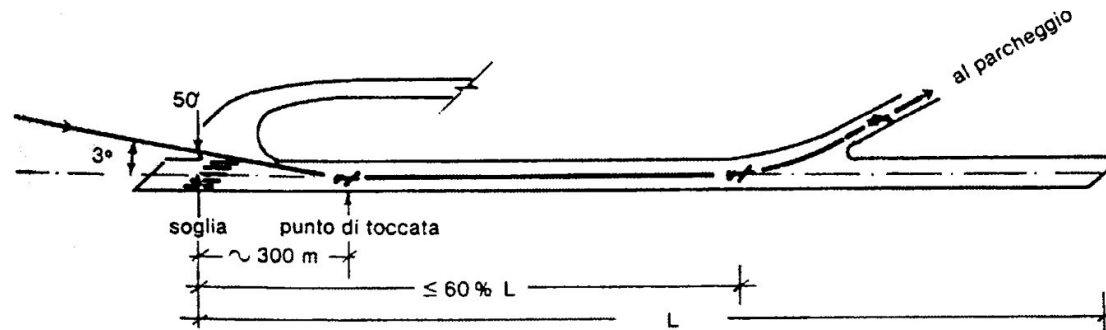
L' ATTERRAGGIO (LANDING)

3° FASE – ARROTONDAMENTO O AVVICINAMENTO AL SUOLO

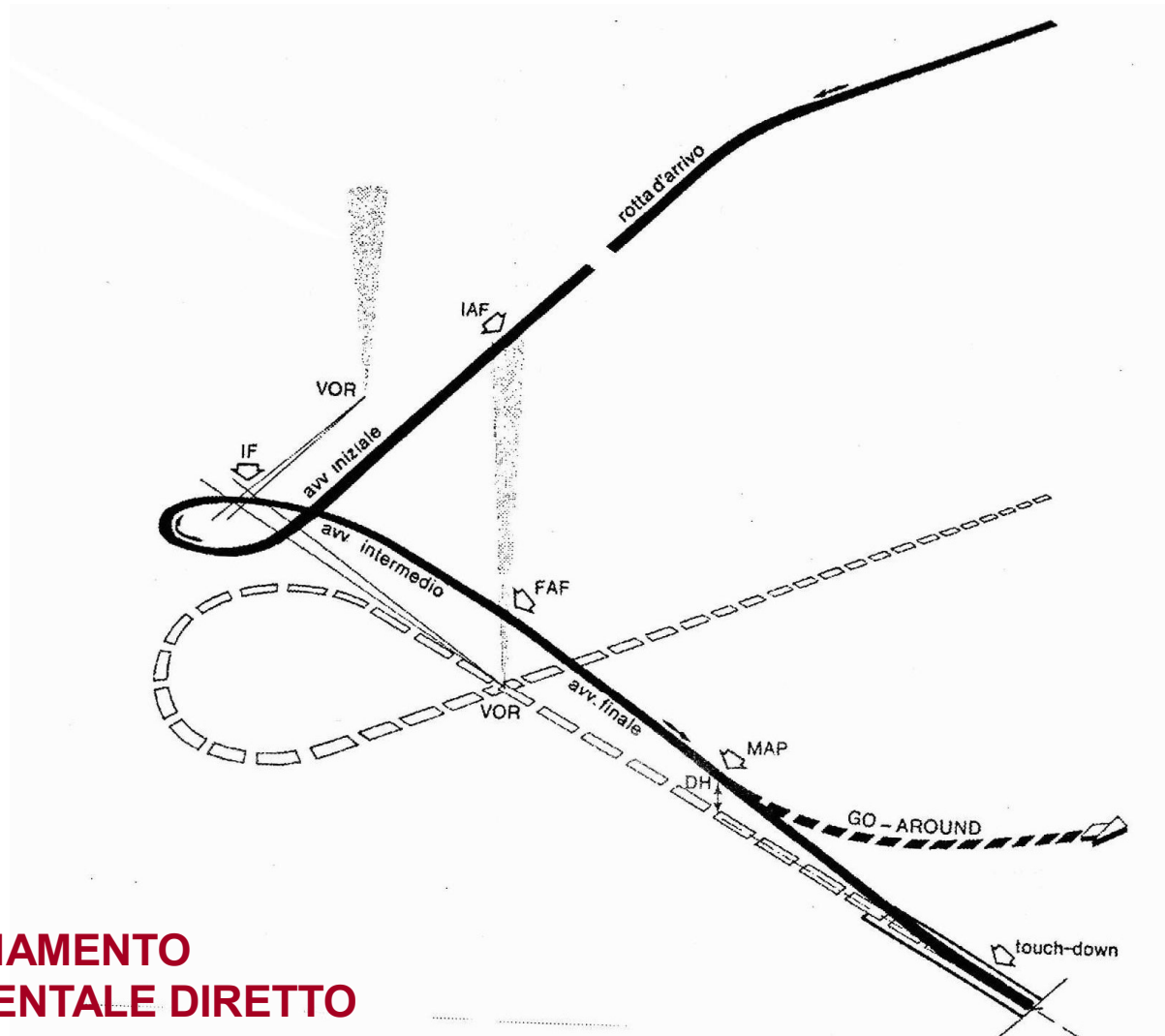
Attraversando la soglia della pista (in corrispondenza della quale l' aereo con la parte più bassa si trova a 50 piedi (circa 15 m) da terra) il pilota effettua la “richiamata”, ossia provoca il rialzarsi del muso per ridurre l' angolo della traiettoria di discesa, e lentamente toglie potenza.

La velocità di presentazione in soglia deve essere ottimale in relazione al peso dell' aeromobile. Superando tale velocità di qualche nodo l' atterraggio potrà risultare più dolce ma richiederà una maggiore lunghezza di pista.

In base ai regolamenti ICAO ogni aeromobile che atterra su una data pista, attraversando la soglia a 50 piedi ed alla velocità ottimale prevista, deve essere in grado di arrestarsi nell' ambito del 60% della lunghezza disponibile per l' atterraggio (LDA)

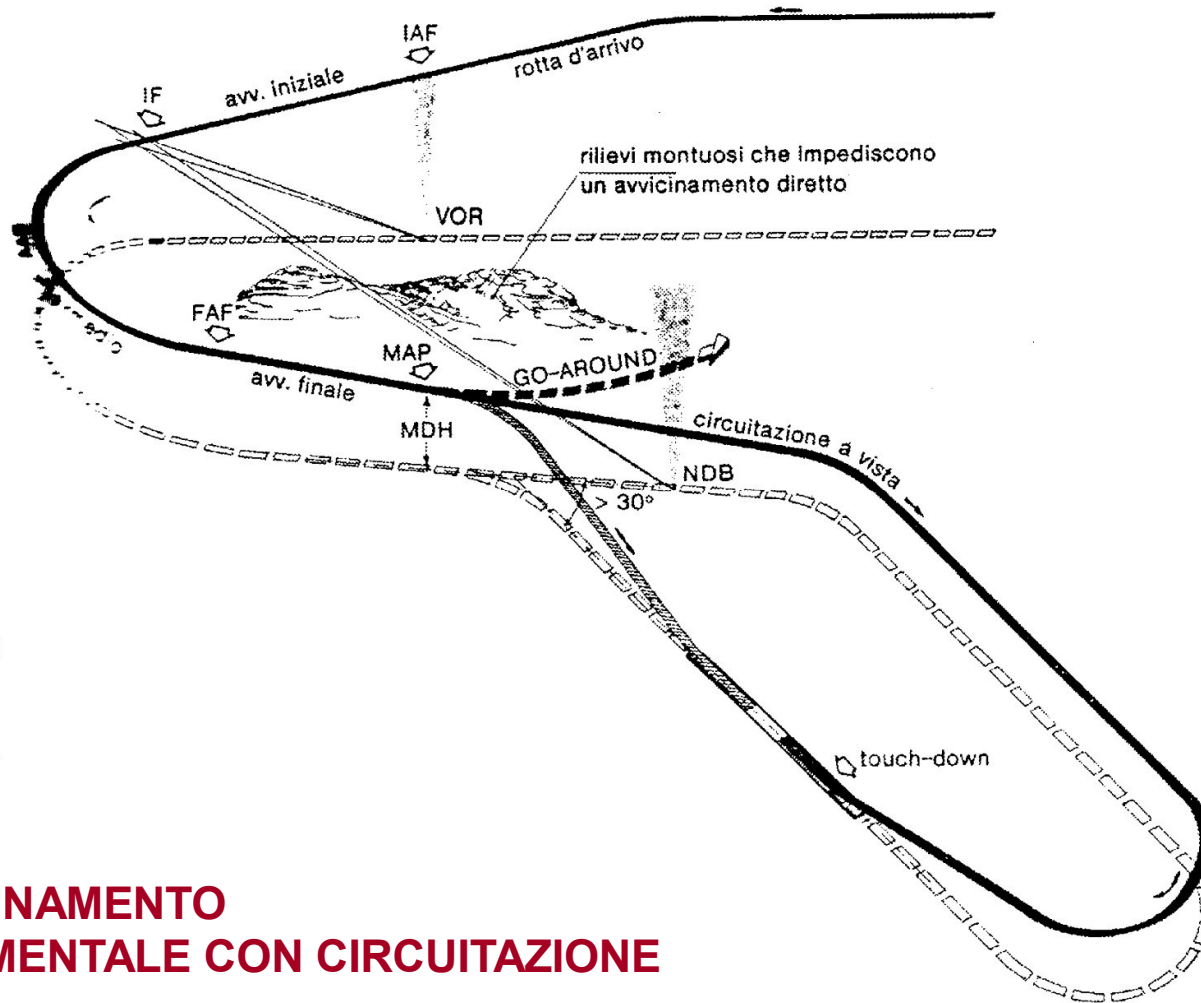


L' ATTERRAGGIO (LANDING)



**AVVICINAMENTO
STRUMENTALE DIRETTO**

L' ATTERRAGGIO (LANDING)



**AVVICINAMENTO
STRUMENTALE CON CIRCUITAZIONE**

SPAZIO DI ATTERRAGGIO

$$S_a = S_1 + S_2 + S_3$$

S_1 = spazio percorso nella fase di **avvicinamento al suolo**

S_2 = spazio percorso nella fase di **manovra**

S_3 = spazio percorso nella fase di **rullaggio**

$$\frac{Q}{g} \frac{dv}{dt} = - \left[fQ + \frac{1}{2} (C_r - fC_p) \rho S v^2 \right]$$
$$S_3 = \frac{v_a^2}{2g} \frac{\ln(f / \mu)}{f - \mu} \quad \mu = \frac{C_r}{C_p}$$

Esempio:

avvicinamento al suolo: $p = 2\%$ altezza su soglia pista $h = 10,70$ m $S_1 = 535$ m

manovra: v_a (velocità di sostentamento) = 250 Km/h $t = 2$ sec $S_2 = 139$ m

rullaggio: $f = 0,3$ $\mu = 0,4$ $S_3 = 707$ m

$$S_a = S_1 + S_2 + S_3 = 535 + 139 + 707 = 1381 \text{ m}$$

SPAZIO DI ATTERRAGGIO

Le condizioni e la misura dell'aderenza

Nonostante l'aereo possieda diversi sistemi per la frenatura (spoiler, flap, reverser, etc) esso smaltisce una rilevante aliquota della sua energia cinetica mediante i freni applicati alle ruote.

E' fondamentale pertanto un consistente e appropriato coefficiente di aderenza tra pneumatici e pavimentazione

L'ICAO raccomanda di misurare frequentemente il coefficiente di attrito per due ragioni:

1. Poterlo comunicare ai piloti che così lo utilizzeranno per valutare le distanze di atterraggio necessarie;
2. Dare la possibilità alle autorità aeroportuali di valutare in largo anticipo se l'attrito sta raggiungendo valori troppo bassi e dunque programmare adeguati interventi (pulizia, risagomatura, irruvidimento).

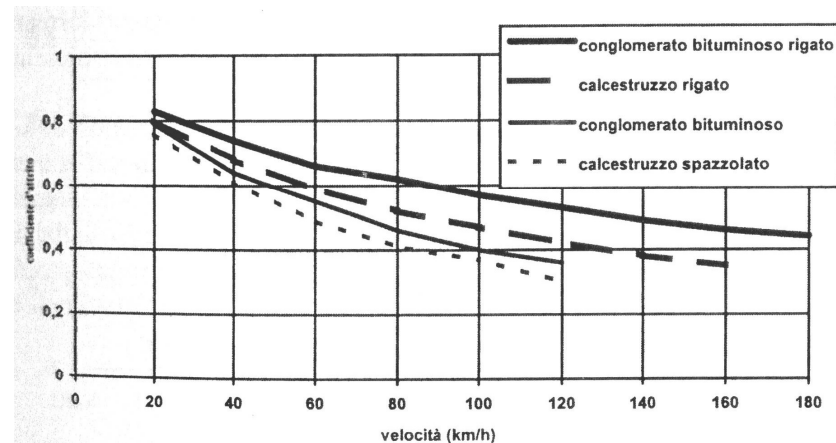


figura 4.6 *Variazione del coefficiente d'attrito su piste di volo bagnate di diverso tipo al variare della velocità.*

DISTANZE RICHIESTE DELL' AEROMOBILE

TOD (Take-Off Distance)

max

Distanza orizzontale tra la testata pista e il punto in cui il velivolo raggiunge l' altezza di 10,70 m con il motore critico inoperativo a partire da V_1

Distanza c.s. con tutti i motori attivi maggiorata del 15%

TOR (Take-Off Run)

max

Distanza orizzontale tra la testata pista e il punto intermedio tra quello in cui avviene il distacco e quello in cui il velivolo raggiunge l' altezza di 10,70 m con il motore critico inoperativo a partire da V_1

Distanza c.s. con tutti i motori attivi maggiorata del 15%

ASD (Accelerate Stop Distance)

Distanza orizzontale tra testata pista e il punto di completo arresto con avaria al motore critico alla velocità V_1

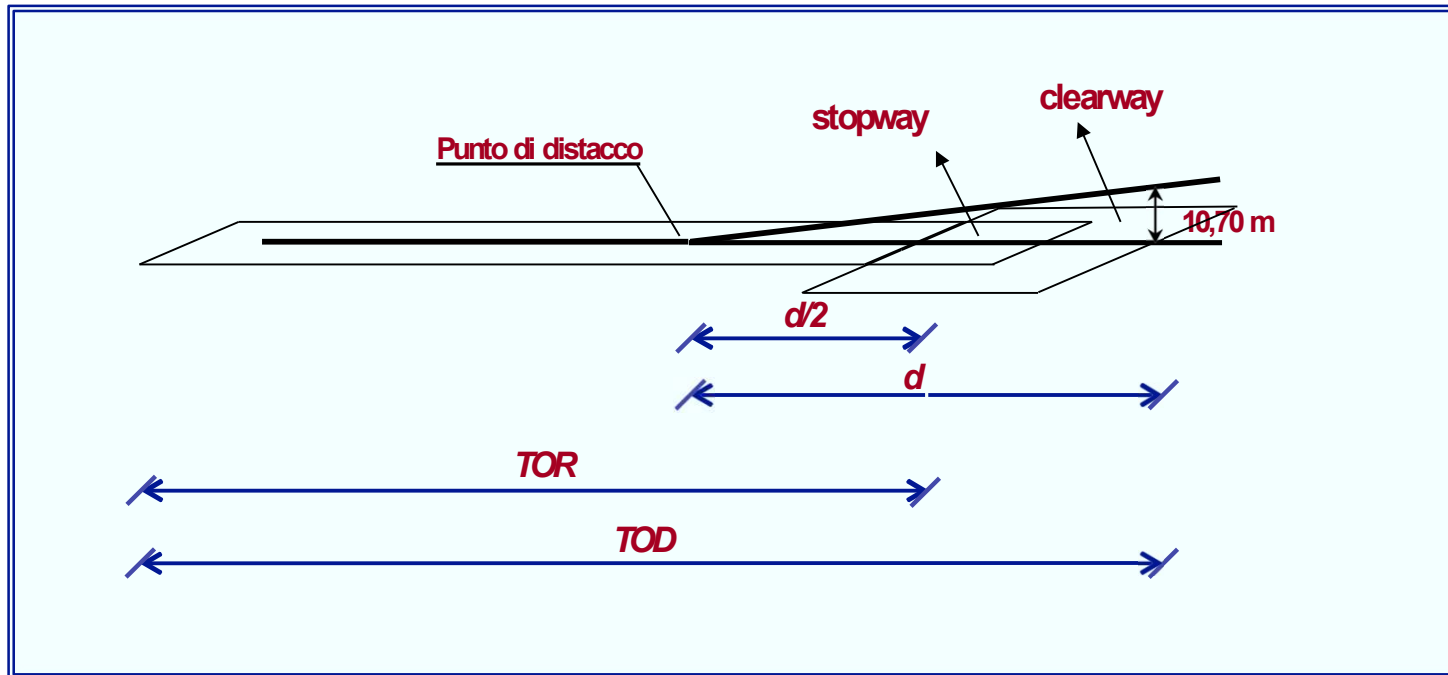
LDR (Landing Distance Required)

max

Distanza orizzontale necessaria all' aereo, in discesa con angolo di 3° , a fermarsi sulla pista bagnata con tutti i motori operativi a partire dal punto in cui l' altezza del veicolo é di 10,70 m, aumentata del 15%

Distanza c.s. nel caso di motore critico inoperativo maggiorata del 10%

DISTANZE RICHIESTE DELL' AEROMOBILE



DIAGRAMMI DI PRESTAZIONE

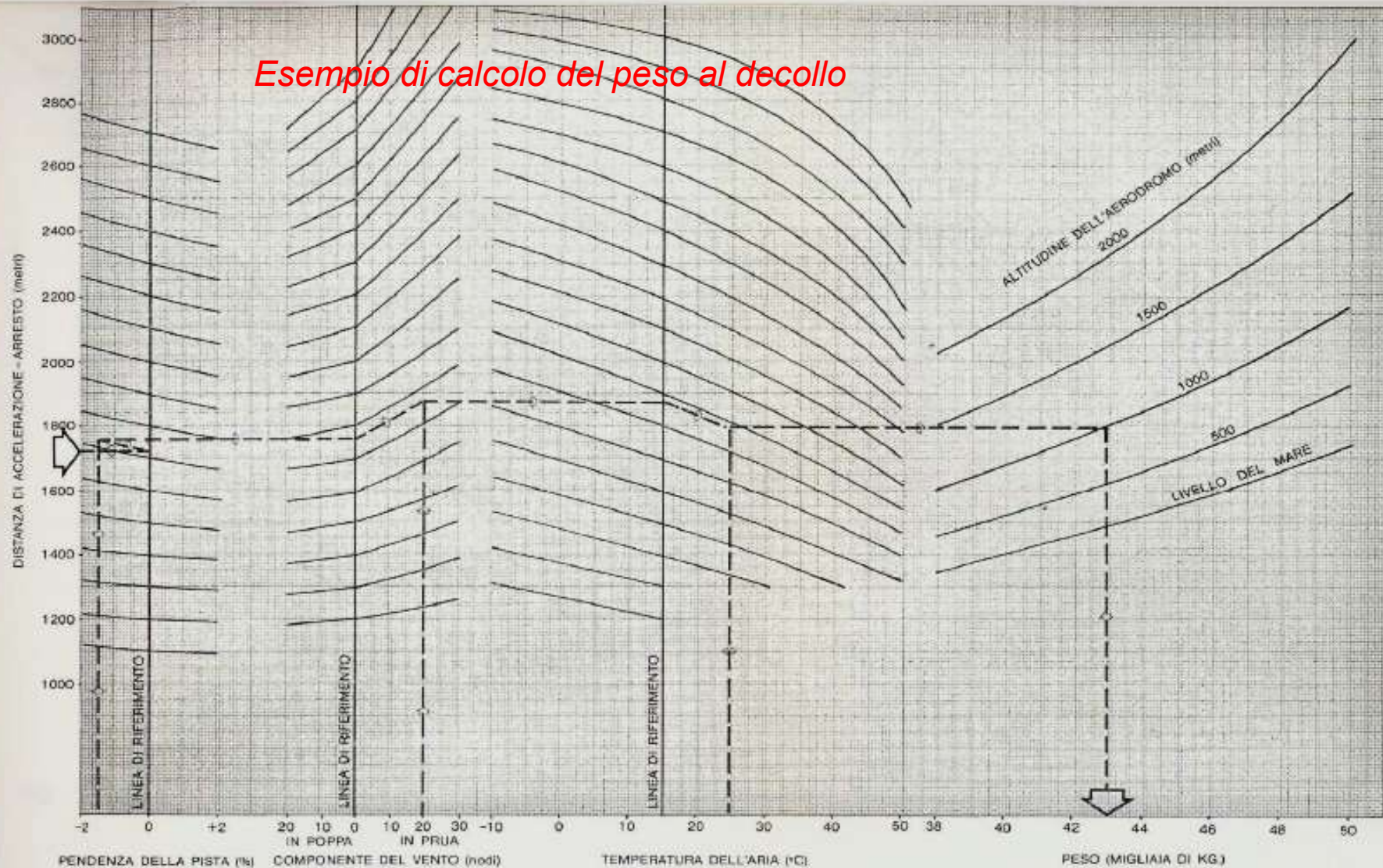
Le distanze richieste variano per ogni aeromobile al variare delle condizioni in cui avviene il decollo; i parametri che concorrono al raggiungimento di tali distanze per un dato a/m sono il peso e l'assetto al decollo, la temperatura atmosferica, la quota della pista, l'intensità e la direzione del vento, l'uso o meno dell'impianto di condizionamento e dell'impianto antighiaccio, pendenza della pista e suo stato superficiale (asciutta, bagnata, innevata).

I controlli tesi a verificare la compatibilità fra distanze richieste dall'a/m e distanze disponibili della pista e la determinazione del peso massimo al decollo compatibile con la lunghezza di pista disponibile, vengono effettuati dal pilota prima del decollo, utilizzando apposite tabelle. Per rendersi conto di come ogni parametro influenzi l'entità delle distanze richieste al decollo da un dato a/m è necessario consultare le curve di prestazione ad esso relative, fornite dalle casa costruttrici.

Tali curve sono di grande aiuto anche in fase progettuale per determinare le lunghezze delle runway, stopway e clearway più opportune.

DIAGRAMMI DI PRESTAZIONE

Esempio di calcolo del peso al decollo

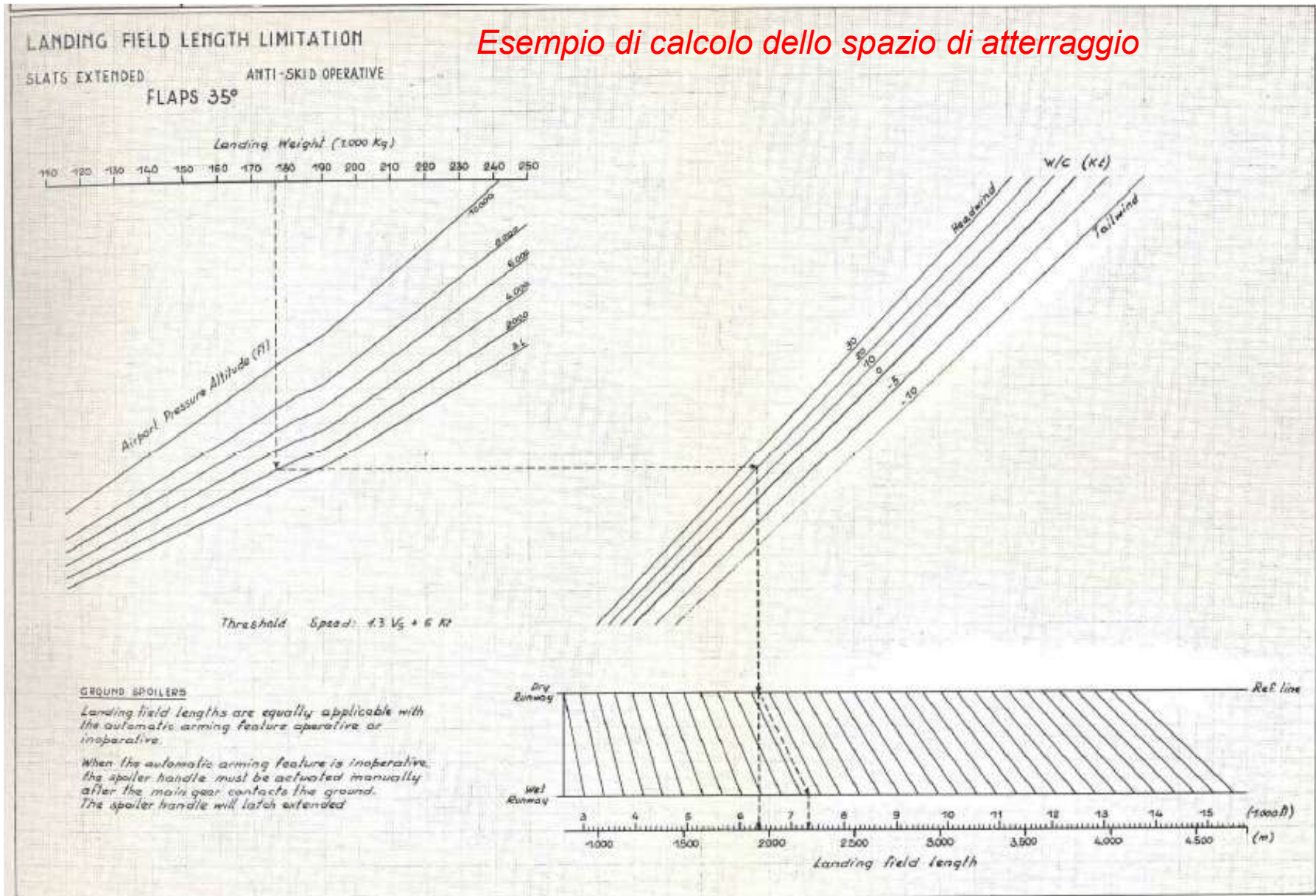


Esempio: Distanza di accelerazione - arresto: 1720 m
 Pendenza della pista: -1,5%
 Vento: 20 nodi in prua
 Temperatura: 25 °C
 Altitudine dell'aerodromo: 1000 m

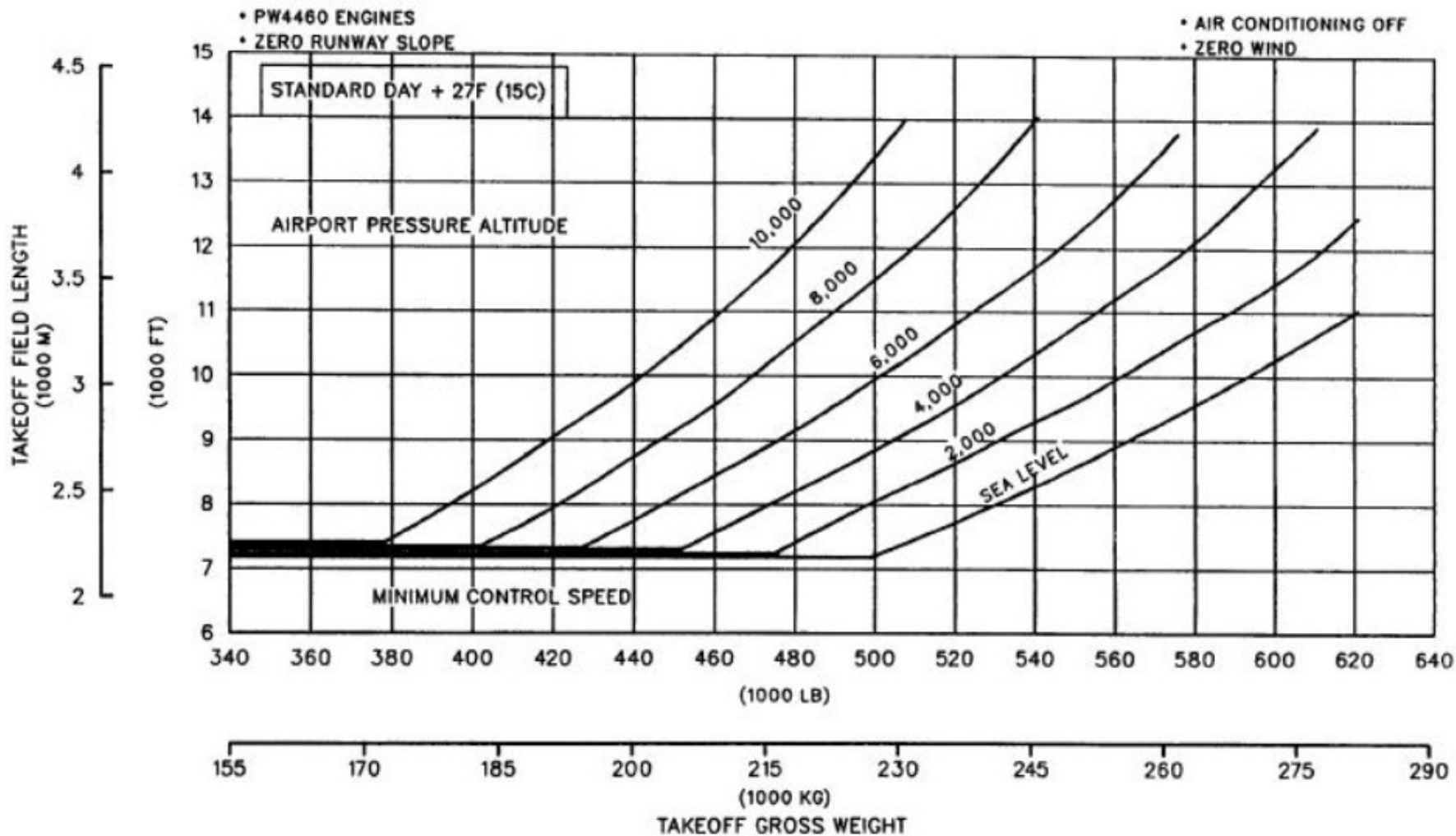
Dal punto corrispondente alla distanza di accelerazione-arresto di 1720 m si va orizzontalmente fino alla linea di riferimento, di cui parallelamente alle linee di guida fino ad una ascissa corrispondente ad una pendenza di pista del -1,5%, poi orizzontalmente fino all'altra linea di riferimento, parallelamente alle linee di guida fino all'ascissa "20 nodi" di vento in prua, orizzontalmente fino all'altra linea di riferimento, parallelamente fino alle linee di guida fino all'ascissa "25 °C" di temperatura dell'aria, orizzontalmente fino alla curva di 1000 m di altitudine ed infine verticalmente fino a leggere il peso permesso: 43000 Kg.

DIAGRAMMI DI PRESTAZIONE

Esempio di calcolo dello spazio di atterraggio



DIAGRAMMI DI PRESTAZIONE



3.3 FAR TAKEOFF FIELD LENGTH REQUIREMENTS
3.3.5 STANDARD DAY + 27F (15C)
MODEL MD-11 PW ENGINE

DIAGRAMMI PAYLOAD RANGE

La lunghezza di pista ha una influenza diretta sulla distanza che gli aeromobili che la impegnano possono coprire in volo. È pertanto necessario, data una lunghezza di pista, capire qual è il peso massimo che l'aereo può avere al decollo.

Il peso di un aereo infatti può essere molto diverso a seconda se esso ha imbarcato il massimo numero di passeggeri e di merci possibili per la sua capacità (carico pagante o payload) e se ha riempito o meno i serbatoi di carburante. Questi due pesi, tipici per ogni aeromobile, influenzano la distanza (range) che esso può compiere in volo.

La distanza che può percorrere un velivolo in volo dipende, oltre che dal peso del carico pagante e del carburante, anche da molteplici fattori, quali: le condizioni meteorologiche durante il volo, dalla quota di volo, dalla velocità e del vento. Le case costruttrici forniscono i diagrammi payload-range per una giornata standard e in assenza di vento.

- PW4460 ENGINES
- FAR INTERNATIONAL RESERVES 150 NM ALTERNATE PLUS MISSED APPROACH
- STEP CRUISE AT 31-35-39,000 FT AT MACH 0.82

- STANDARD DAY
- NO WIND
- OEW - 287,278 LB, 130,307 KG
- MTOW - 618,000 LB, 280,325 KG

