

www.ufficiometeo.it



ufficiometeo.it

CORSO DI METEOROLOGIA GENERALE E AERONAUTICA 8 - Fenomeni Pericolosi per il Volo

TURBOLENZA
WIND SHEAR
NEBBIA
TEMPORALI
ICING - FORMAZIONE DI GHIACCIO

Dr. Marco Tadini
meteorologo

U.M.A. Home Page - Ufficio Meteorologico Aeroportuale
www.ufficiometeo.it

FENOMENI PERICOLOSI PER IL VOLO

TURBOLENZA E WIND SHEAR

TEMPORALI

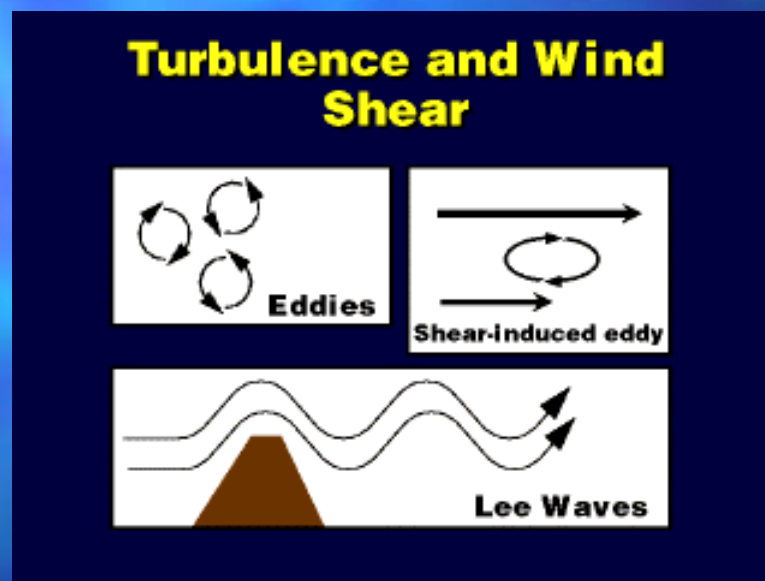
ICING

NEBBIA

TURBOLENZA E WIND SHEAR

- aeronauticamente considerati come fenomeni distinti
- in realtà l'una l'effetto e l'altro la causa di stesso fenomeno: **la deviazione indesiderata dell'aereo dalla propria traiettoria di volo con sobbalzi e scossoni (TURBOLENZA), provocata da rapida variazione in direzione e/o intensità del vento (WIND SHEAR)**
- per consuetudine:
 - TURBOLENZA fenomeno negativo in tutte le fasi di volo
 - WIND SHEAR fenomeno negativo solo a bassa quota (**LLWS**)

TURBOLENZA E WIND SHEAR



DEFINIZIONE DI TURBOLENZA

INSIEME DI SCOSSONI CUI È SOGGETTO UN AEREO IN
VOLO QUANDO INCONTRA CORRENTI ASCENDENTI
O DISCENDENTI O RAFFICHE DI VENTO

(bumpiness in flight)

- definizione ICAO:
 - basata sulle sensazioni dell'equipaggio e dei passeggeri
 - dipende da tipo e stato aeromobile e da reazione del pilota
 - non dipende dallo stato dell'atmosfera
 - turbolenza da moti disordinati o da circolazioni a piccola scala
 - turbolenza da moti atmosfera a scala tra 50 ft e 8000 ft

INTENSITÀ DELLA TURBOLENZA

- quattro classi secondo ICAO:
 - **LEGGERA**
 - momentanee e leggere variazioni di assetto e quota aereo
 - **MODERATA**
 - variazioni più intense ma aereo sotto controllo
 - **FORTE**
 - variazioni ampie e repentine
 - aereo momentaneamente non controllabile
 - **ESTREMA**
 - aereo violentemente sbattuto e totalmente incontrollabile
 - possibili danni irreparabili a struttura aereo

ORIGINE DELLA TURBOLENZA

■ CONVETTIVA

- correnti ascendenti o discendenti di origine convettiva

■ MECCANICA

- piccoli ostacoli al suolo investiti dal flusso del vento
- effetti dell'orografia sul flusso del vento
- scorrimento tra correnti di diversa velocità e/o direzione
- turbolenza in aria chiara (CAT)

■ DI SCIA

- fenomeno aerodinamico, non meteorologico

TURBOLENZA CONVETTIVA

- correnti ascendenti e discendenti di origine convettiva
- maggiore turbolenza:
 - nelle ore più calde del giorno, specialmente in estate
 - sui terreni montuosi o collinosi
- turbolenza segnalata spesso da nubi cumuliformi
 - nubi alla sommità della turbolenza
 - a partire dalla quota di condensazione
- turbolenza localizzata sotto e dentro i cumuli
 - volare al di sopra delle nubi
- evitare i cumulonembi:
 - forte turbolenza dentro, sotto e fino a 20 miglia di distanza
 - rateo di salita del CB superiore a quello di molti aerei
 - NON cercare di salirci al di sopra !

TURBOLENZA MECCANICA

■ DA ATTRITO

– su suolo libero

- caso di forte vento su terreni piatti
- attrito rallenta il vento negli strati bassi
- aria prende a ruotare formando vortici turbolenti
 - turbolenza da shear verticale del vento orizzontale

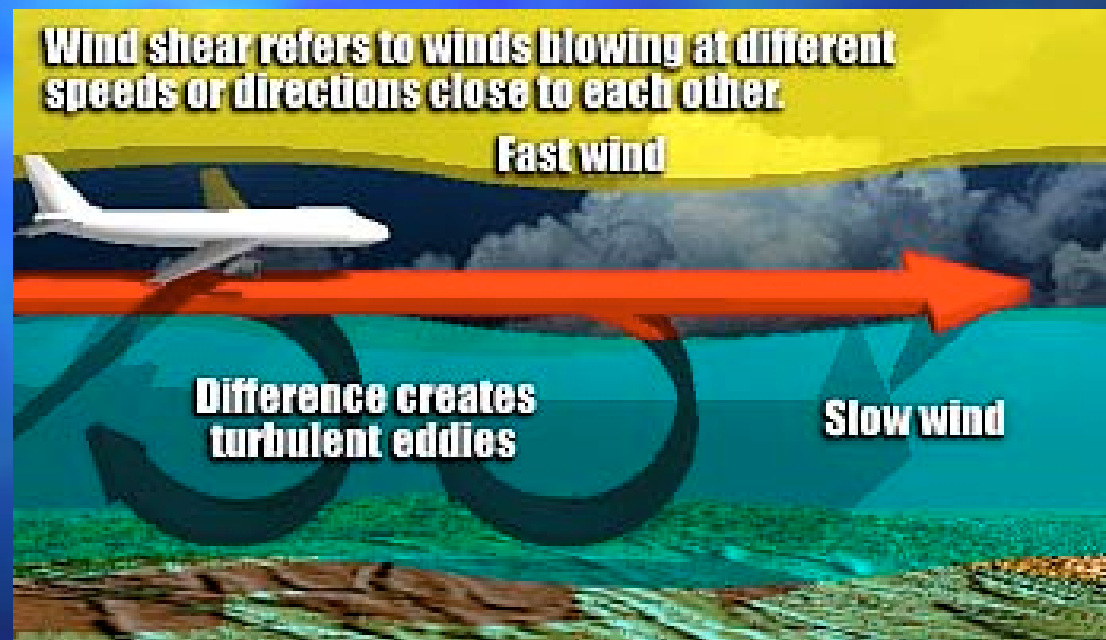
– scorrimento reciproco tra correnti

- diversità in intensità e/o direzione genera vortici turbolenti
 - turbolenza da shear verticale del vento orizzontale

■ PER PRESENZA DI PICCOLI OSTACOLI

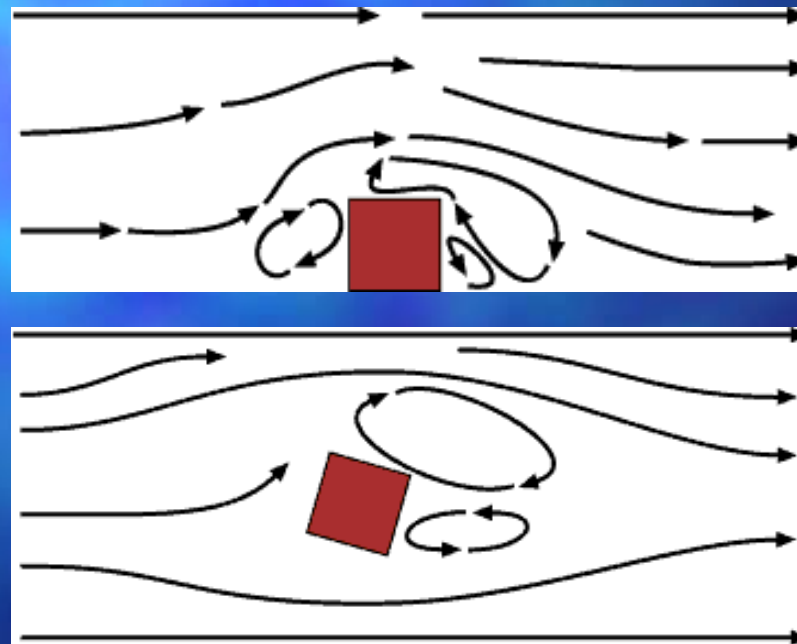
- caso di costruzioni aeroportuali in prossimità della pista
- scia di vortici sottovento a ostacoli

TURBOLENZA MECCANICA SCORRIMENTO RECIPROCO DI CORRENTI IN QUOTA



TURBOLENZA MECCANICA

PRESENZA DI PICCOLI OSTACOLI



TURBOLENZA MECCANICA

■ SOLLEVAMENTO OROGRAFICO

- caso di corrente d'aria che attraversa cresta di un rilievo
- aria risale il pendio di sottovento (**corrente ascendente**)
 - formazione di vortici turbolenti se pendio è irregolare
- sulla cresta del rilievo strozzamento della sezione di flusso
 - Bernoulli: aumento della velocità, diminuzione della pressione
 - attenzione all'altimetro: indica quote maggiori del reale !
- aria scende il pendio di sottovento (**corrente discendente**)
 - corrente provoca turbolenza e perdita di quota
 - intensità tanto più grande quanto maggiore irregolarità pendio
- **zona di influenza**
 - dipende da natura del terreno e orografia (isolata o catena)
 - estensione verticale circa un terzo altezza rilievo

TURBOLENZA MECCANICA

- ONDA STAZIONARIA o OROGRAFICA (MTW)
 - caso di sollevamento orografico quando:
 - catena montuosa perpendicolare a forte vento
 - strato di aria stabile al di sopra spartiacque della catena
 - vento teso perpendicolare alla catena
 - velocità vento di almeno 25 kt alla quota dello spartiacque
 - velocità vento in aumento con la quota fino alla tropopausa
 - strato stabile impedisce salita in quota corrente ascendente
 - corrente compressa contro spartiacque
 - inerzia corrente discendente porta vento a quota inferiore
 - vento riprende a risalire formando la prima cresta d'onda
 - vento forma creste d'onda di ampiezza decrescente
 - fenomeno termina con completo smorzamento onda

TURBOLENZA MECCANICA

- ONDA STAZIONARIA o OROGRAFICA (MTW)
 - stazionaria: le onde mantengono una posizione fissa
 - vi è propagazione dell'aria non dell'onda
 - turbolenza sottovento anche con dimensioni notevoli:
 - verticali: sino agli strati bassi stratosfera
 - orizzontali: anche 150 miglia dalla catena
 - se aria sufficientemente umida, onda visibile per:
 - nubi lenticolari
 - rotori
 - nube che incappuccia la montagna

TURBOLENZA MECCANICA

■ nubi lenticolari

- si formano sulle cuspidi dell'onda orografica
- alla quota degli altocumuli
- condensazione nella fase ascendente dell'onda
 - raffreddamento adiabatico sino alla temperatura di rugiada
- nubi si dissolvono nella fase discendente
 - riscaldamento da compressione adiabatica
- nubi da contorni lisci indicano assenza di turbolenza
 - ma sono presenti le forti correnti ascendenti e discendenti
 - catena montuosa perpendicolare a forte vento
- nubi da contorni frastagliati indicano turbolenza intensa

TURBOLENZA MECCANICA

■ rotori

- nubi di tipo cumuli o fractocumuli
- allineati dal lato sottovento lungo lo spartiacque
- base solitamente più in basso della montagna
- sommità anche sino alle nubi lenticolari
- forti ascendenze e discendenze interne ed in prossimità
 - anche dell'ordine di 5000 ft/min. (ca. 90 km/h)

■ nube cappuccio

- nube piatta
- ultimo tratto del sopravvento e precipita dal sottovento
 - tanto più lunga nube sottovento, tanto più forte discendenza
- per raffreddamento dell'aria tra strato stabile e spartiacque

TURBOLENZA MECCANICA

■ TURBOLENZA IN ARIA CHIARA (CAT)

- caso di turbolenza da scorrimento in alta quota (tropopausa)
- solitamente in aria priva di nubi
- quando correnti ascendenti raggiungono tropopausa
 - inversione termica blocca l'ascesa delle correnti
 - correnti costrette e deviare e scorrere orizzontalmente
 - scorrimento genera moto ondulatorio dell'aria
- CAT particolarmente forte se:
 - attività convettiva molto intensa
 - MTW in regioni montuose sottostanti

TURBOLENZA MECCANICA

■ TURBOLENZA IN ARIA CHIARA (CAT)

- CAT anche associata a particolari andamenti del vento:
 - correnti a getto
 - basse pressioni in quota
- CAT confinata in regioni limitate ed isolate (carte SWC)
- regioni di CAT hanno dimensioni tipiche:
 - spessore 2000 ft
 - larghezza 20 miglia
 - lunghezza 50 miglia
 - asse maggiore lungo la direzione del vento

TURBOLENZA DI SCIA

- NON è un fenomeno meteorologico
 - effetti su velivoli simili a turbolenza meteo
- generata dai vortici controrotanti alle estremità alari
 - effetto della differenza di pressione tra dorso e ventre ala
- vortici si allargano con rotazione opposta
 - raggiungono diametri ordine di grandezza apertura alare
 - per moto aereo, vortici distesi all'indietro (**trecce di Berenice**)

WAKE VORTEX o WAKE TURBULENCE

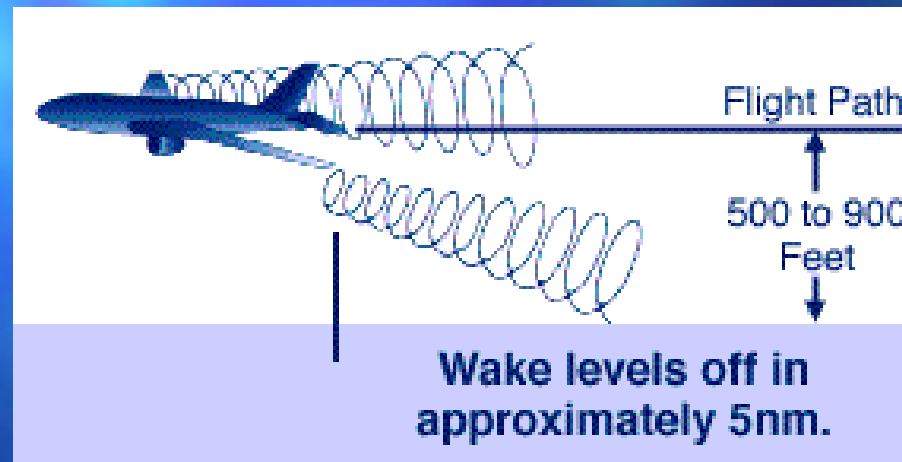


TURBOLENZA DI SCIA

- intensità dipende da:
 - peso, velocità, forma e assetto ala aeromobile generante
 - peso predominante (proporzionalità diretta con intensità)
- compromette manovrabilità aereo che incontra scia
 - specie se ha dimensioni inferiori a aereo generante
- adeguate separazioni al decollo/atterraggio e quota
 - decollo/atterraggio
 - considerare spostamento laterale vortici
 - in caso di vento forte vortici potrebbero interessare piste vicine
 - aeroporti con più piste parallele o perpendicolari
 - in quota
 - le scie si stabilizzano circa 900 ft sotto livello velivolo generante

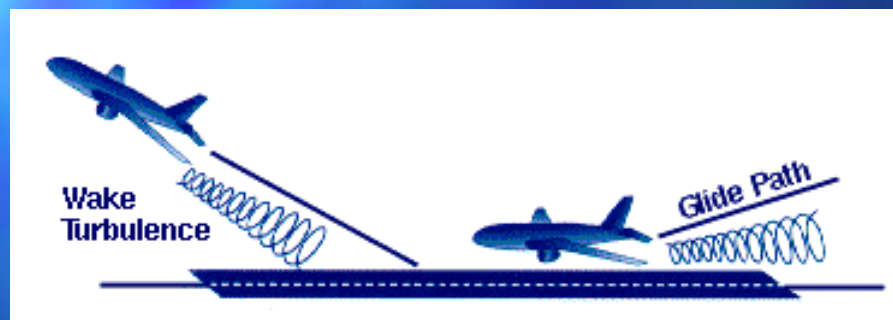
TURBOLENZA DI SCIA

FORMAZIONE DEI VORTICI DI SCIA IN QUOTA



TURBOLENZA DI SCIA

FORMAZIONE DEI VORTICI DI SCIA IN FASE DI DECOLLO E DI ATTERRAGGIO



TURBOLENZA DI SCIA

- elicotteri:
 - turbolenza maggiore rispetto ad aerei pari peso
 - forte turbolenza a bassa velocità (20 - 50 kt)
 - scia di elicotteri leggeri stessa grandezza elicotteri pesanti
 - rotore bipala crea turbolenza più forte rispetto rotori a più pale



TURBOLENZA DI SCIA

- classificazione in base categoria aereo generante:
 - HEAVY
 - aeromobili di peso oltre 136.000 kg
 - MODERATE
 - aeromobili di peso compreso tra 136.000 e 7.000 kg
 - LIGHT
 - aeromobili di peso inferiore ai 7.000 kg

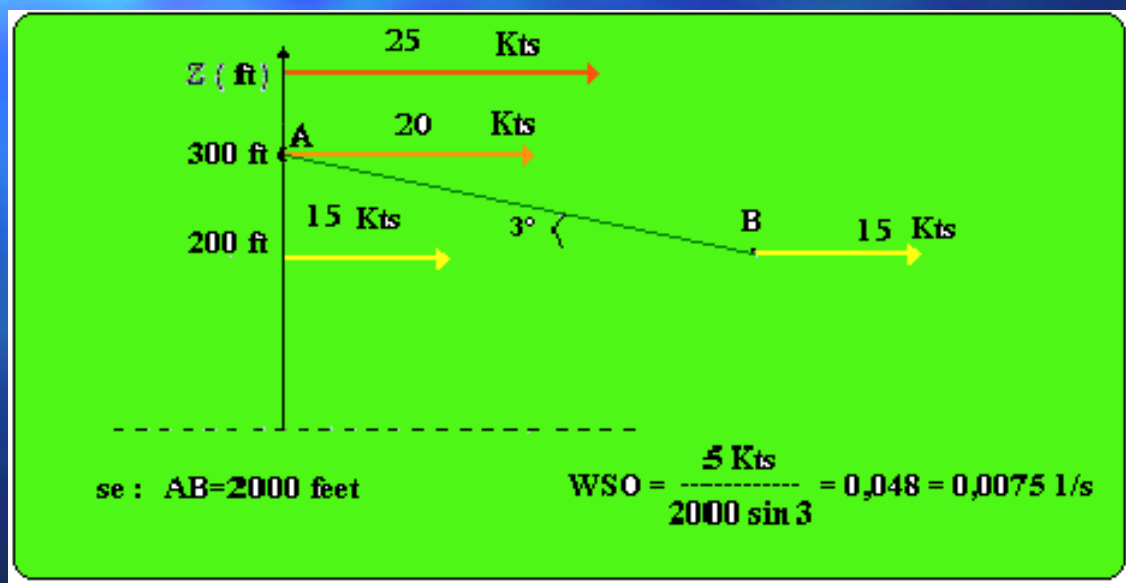
DEFINIZIONE DI WIND SHEAR

- “la locale variazione del vettore vento o di ognuno dei suoi componenti in una data direzione” (ICAO 1987)
- vettore differenza tra due vettori di vento osservati, diviso la distanza che separa i due punti di misura
- fondamentalmente suddiviso in tre tipi:
 - shear della componente orizzontale sull’asse verticale
 - shear della componente verticale sul piano orizzontale
 - shear della componente orizzontale sul piano orizzontale

CLASSIFICAZIONE DEL WIND SHEAR

shear della componente orizzontale sull'asse verticale

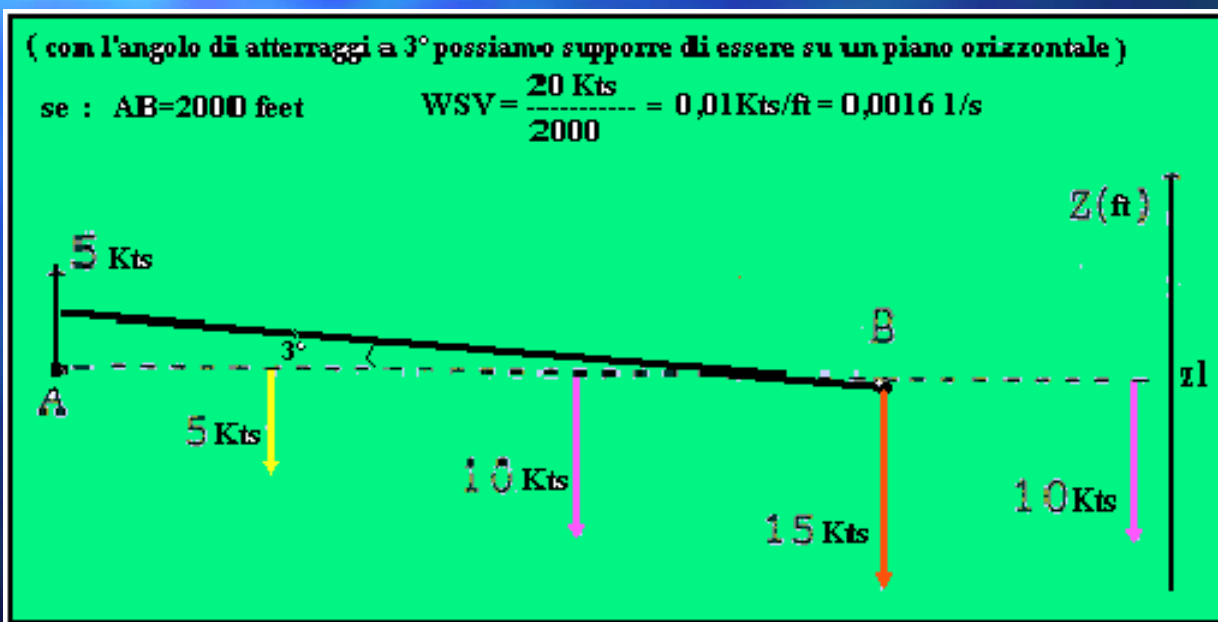
la variazione della velocità del vento orizzontale
 diviso la distanza tra i due punti di misura
 presi uno sopra l'altro



CLASSIFICAZIONE DEL WIND SHEAR

shear della componente verticale sul piano orizzontale

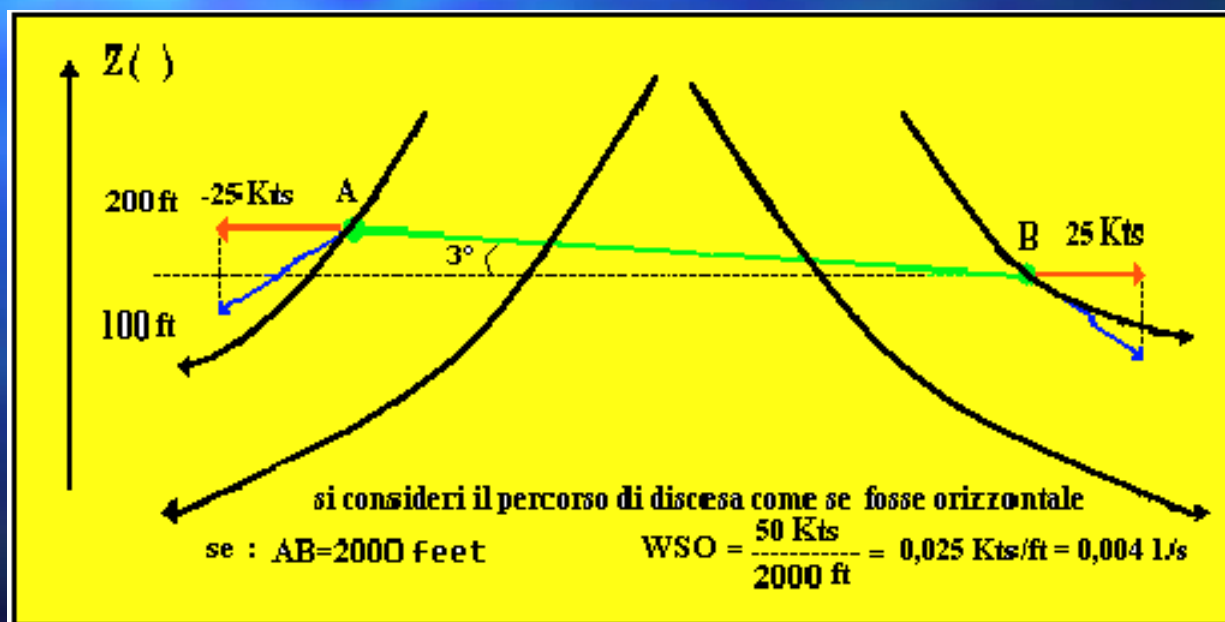
la variazione della velocità del vento verticale
diviso la distanza tra i due punti di misura
presi su di un piano orizzontale



CLASSIFICAZIONE DEL WIND SHEAR

shear della componente orizzontale sul piano orizzontale

la variazione della velocità del vento orizzontale
diviso la distanza tra i due punti di misura
presi su di un piano orizzontale



CLASSIFICAZIONE DEL WIND SHEAR

- anche in base alla durata dei fenomeni di shear
- **wind shear non transitorio**
 - persistenza su stessa area per lungo tempo (ore)
 - associato a fronti, fronti di brezza e onde orografiche
- **wind shear transitorio**
 - più pericoloso
 - maggiore intensità e minore vita media (minuti)
 - scala di grandezza ordine decine di metri
 - difficoltà nella previsione e segnalazione
 - da nubi temporalesche o convettive in genere

MISURA DEL WIND SHEAR

- unità di velocità / distanza
 - intensità della differenza di due vettori vento / distanza
- solitamente in: ($m/s / 30 m$) o in ($kt / 100 ft$)
 - entrambe dimensionate come $[s]^{-1}$
- ambito aeronautico: **shear rate** in kt / s
 - accelerazione percepita da aeromobile

CLASSIFICAZIONE E RIPORTI DI WIND SHEAR

- classificazione ICAO per intensità
 - leggero 0 - 4 kt/s
 - moderato 5 - 8 kt / s
 - forte 9 - 12 kt / s
 - severo > 12 kt / s
- ICAO Annesso III
 - i piloti possono, nel segnalare wind shear, usare le diciture **MOD**, **STRONG** o **SEV**, basandosi sulla loro esperienza di stime soggettive del wind shear incontrato
 - si raccomanda massima precisione e completezza dei rapporti

GENESI DEL WIND SHEAR

- il wind shear:
 - è un fenomeno improvviso
 - dovuto ad una drastica variazione del vento
 - può presentarsi a diverse quote nell'atmosfera
- il wind shear si genera in prossimità di:
 - correnti a getto
 - precipitazioni convettive con forti temporali
 - inversioni termiche
 - zone frontali
 - altre situazioni di discontinuità nel flusso del vento

WIND SHEAR ORIZZONTALE

RAPIDA VARIAZIONE DELLA COMPONENTE LONGITUDINALE DEL VENTO

- nel **fronte delle raffiche** associato ai temporali
 - discesa precipitazioni da CB trascina colonna aria fredda
 - aria impatta il suolo e espande lateralmente (fronte di raffiche)
 - fronte si incunea sotto aria calda richiamata dal basso da CB
- attraversando un **fronte freddo**
 - superficie frontale è più spessa del fronte di raffiche
 - aereo ha tempo di adattarsi alla variazione incontrata
 - possibili problemi per contemporanea rotazione del vento

WIND SHEAR ORIZZONTALE

- nel **flusso del vento attorno ad ostacoli notevoli**
 - edifici lungo la pista di un aeroporto
 - creano una “zona d’ombra” per il flusso del vento
- in altre **situazioni di discontinuità**
 - scorrimento reciproco tra correnti d’aria
 - la diversità in direzione e/o intensità genera vortici turbolenti
 - fronti in genere
 - fronti di brezza: transizione tra vento di brezza e vento al suolo

WIND SHEAR VERTICALE AD OGNI INCONTRO CON CORRENTI ASCENDENTI O DISCENDENTI

- effetti:
 - correnti ascendenti: aumento prestazioni aeromobile
 - correnti discendenti: diminuzione prestazioni aeromobile
- origine delle correnti discendenti più intense:
 - orografica (MTW, Foehn)
 - convettiva (temporali)
- correnti discendenti più violente:
 - quando superano velocità verticale di 720 ft/min a 300 ft GND
 - classificate in **downburst** o **microburst** secondo estensione
 - “micro” riferito a estensione orizzontale, NON intensità

DOWNBURST E MICROBURST

■ downburst

- diametro corrente discendente:
 - 3 o 4 miglia in quota
 - 15 miglia in prossimità del suolo

■ microburst

- diametro corrente discendente minore di due miglia
 - lunghezza media pista per aerei commerciali

■ osservate anche discendenze di maggior velocità

- 1800 ft/min a 200 ft GND

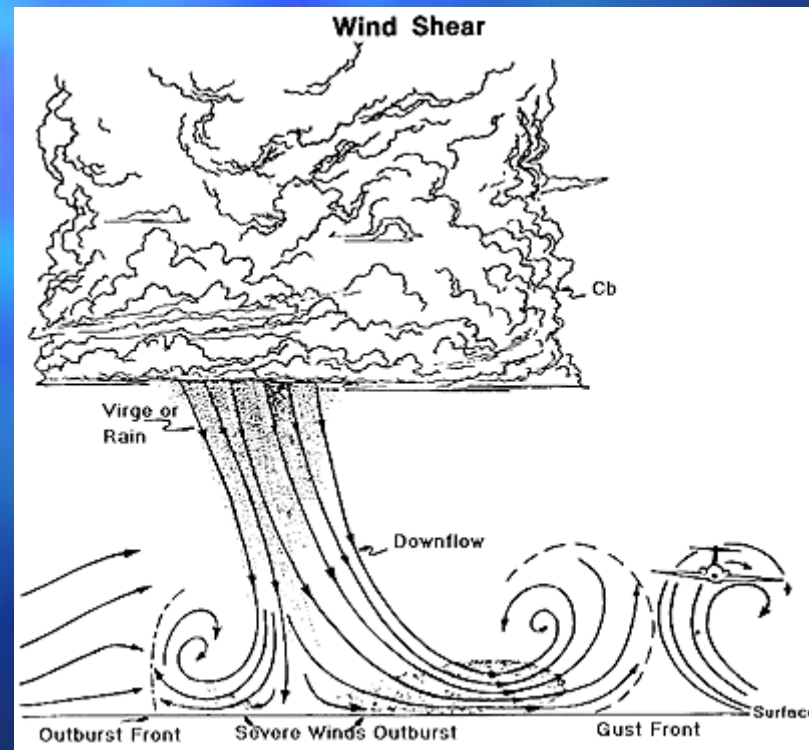
■ espansione laterale al suolo forma un anello vorticoso

- strato limite: zona d'attrito tra aria discendente e aria spostata
- si forma vorticosità contraria a quella dell'anello

DOWNBURST E MICROBURST

- **downburst**
 - generalmente associate a temporali
- **microburst**
 - anche nei violenti piovvaschi da TCU
 - da nubi verticali non ancora allo stadio di maturazione
 - da **virga** (pioggia che evapora prima di raggiungere il suolo)
 - comunque arrivo al suolo di colonna d'aria fredda senza pioggia
 - formazione di **microburst secca** con effetti simili a quelle normali
 - pericolo per mancanza di fenomeni visibili; virga associata a
 - ceiling alto
 - buona visibilità
 - mancanza di precipitazioni
 - venti superficiali deboli o moderati

WIND SHEAR IN CELLE TEMPORALESCE DOWNBURST E GUST FRONT



WIND SHEAR IN CELLE TEMPORALESCE MICROBURST



WIND SHEAR IN CELLE TEMPORALESCHES MICROBURST



WIND SHEAR IN CELLE TEMPORALESCHIE MICROBURST



EFFETTI DEL WIND SHEAR SU AEROMOBILI

- la pericolosità del wind shear dipende da:
 - tipo di aereo
 - fase di volo
 - scala del wind shear
 - durata del wind shear
 - intensità del wind shear
- **LLWS**: LOW LEVEL WIND SHEAR
 - più significativo per navigazione aerea
 - quando wind shear si presenta nei primi 600 m:
 - lungo il sentiero avvicinamento
 - fase terminale atterraggio
 - fase iniziale di decollo

EFFETTI DEL WIND SHEAR SU AEROMOBILI

■ wind shear orizzontale

- diminuzione e/o aumento vento di testa e/o coda
 - diminuzione vento testa o aumento vento coda
 - riduzione della portanza
 - abbassamento sentiero di avvicinamento o di decollo
 - aumento vento testa o diminuzione vento coda
 - aumento della portanza
 - innalzamento sentiero di avvicinamento o di decollo

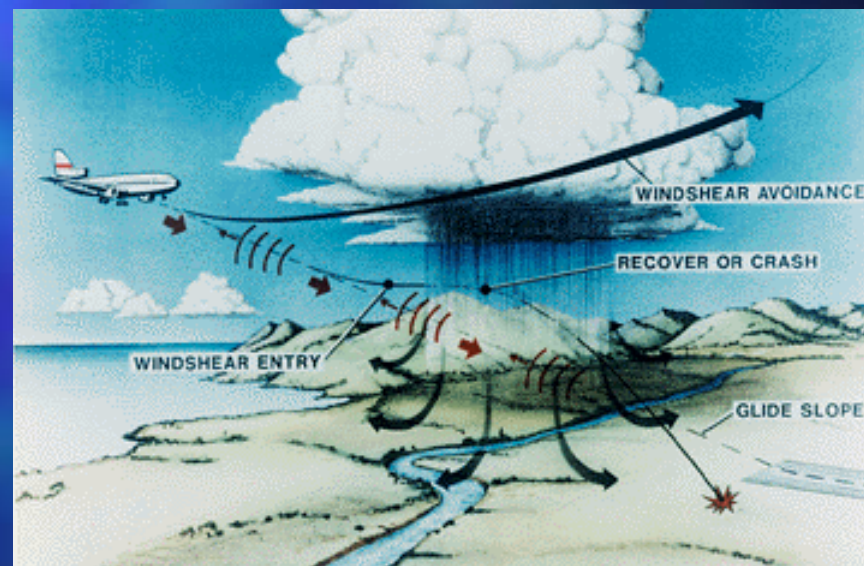
■ wind shear verticale

- correnti discendenti agiscono su angolo incidenza
 - diminuzione angolo porta a diminuzione portanza
 - abbassamento traiettoria aereo

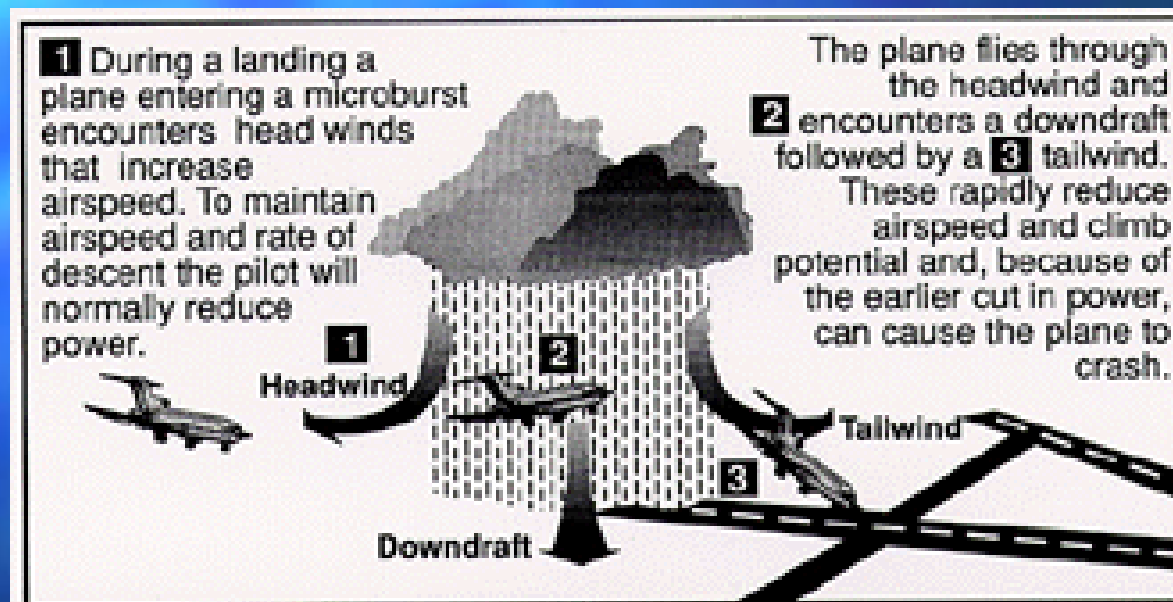
EFFETTI DEL WIND SHEAR SU AEROMOBILI

■ downburst

- sovrapposizione effetti tipici di shear orizzontale e verticale
- prima della downburst
 - aumento vento di testa
 - aumento portanza
- sotto la downburst
 - correnti discendenti
 - abbassamento traiettoria
- dopo la downburst
 - aumento vento di coda
 - riduzione portanza
 - **PERICOLO DI IMPATTO CON IL SUOLO !!**



EFFETTI DEL WIND SHEAR SU AEROMOBILI



RILEVAZIONE DEL WIND SHEAR

- forma più pericolosa di shear è il LLWS
 - lungo il sentiero di discesa o durante la fase di decollo
 - al di sotto dei 600 metri di altezza
- controllo su volume minimo avente
 - lunghezza tra 25 e 27 km
 - altezza di 600 metri
 - a 600 metri di altezza aerei a ~ 11.500 metri da soglia pista
 - considerando un angolo di discesa pari a circa 3°
- nessun sistema garantisce controllo di tale volume
- integrazione tra diversi sistemi
 - possibilità di previsione fino a 30 minuti

RILEVAZIONE DEL WIND SHEAR

- a terra
 - per deduzione con osservazione visuale di fenomeni correlati
 - nubi lenticolari e di rotore (w.s. orografico)
 - forte vento superficie (w.s. flusso attorno ostacoli)
 - polvere sollevata dal vento (w.s. flusso attorno ostacoli)
 - fumo sparpagliato (w.s. bassi strati)
 - strati di nubi con opposti movimenti
 - nubi temporalesche
 - trombe d'aria e trombe marine
 - per deduzione con osservazioni strumentali non dedicate
 - radar meteo tradizionali (tracciamento di celle temporalesche)
 - immagini satellitari (osservazione di celle temporalesche)

RILEVAZIONE DEL WIND SHEAR

- a terra
 - per osservazione diretta con sistemi dedicati
 - LLWSAS
 - RADAR Doppler
 - SODAR
 - LIDAR
- sugli aeromobili
 - per osservazione diretta con sistemi dedicati
 - RADAR a microonde
 - LIDAR Doppler
 - sensori a infrarosso

OSSERVAZIONE DI WIND SHEAR DA TERRA

■ LLWSAS

- sistema di anemometri disposti ad anello più uno nel centro
- copertura dell'ordine dell'area aeroportuale
- valori medio e max del vento su ciclo di 10 s per ciascuno
- confronto tra anemometri periferici e centrale
- allarme w.s. se variazione vento orizzontale oltre soglia
- valore soglia tipico 15 kt
- limiti del sistema:
 - solo wind shear orizzontale
 - non visibili effetti verticali (downburst)
 - non visibili effetti locali (microburst)
 - non prevedibile avvicinamento del fenomeno

OSSERVAZIONE DI WIND SHEAR DA TERRA

■ RADAR Doppler

- radar meteo a 3,2 cm (banda X), 5 cm (C) o 10 cm (S)
- effetto Doppler
 - emissione segnale a data frequenza
 - frequenza segnale di eco varia se riflesso da oggetto in moto
 - variazione proporzionale a componente radiale velocità
- vantaggi del sistema
 - osservazione aria estesa in tre dimensioni
 - individuazione celle temporalesche
 - determinazione movimento e contenuto in acqua
- limiti del sistema:
 - solo componente radiale della velocità
 - non efficace in aria chiara
 - necessita presenza di traccianti (gocce d'acqua)
 - radar che rilevano turbolenza da variazioni indice rifrazione aria

OSSERVAZIONE DI WIND SHEAR DA TERRA

■ SODAR

- analogo al radar ma con onde acustiche
 - scattering onde acustiche per variazione indice rifrazione aria
 - variazioni di temperatura o turbolenza dell'aria
- può lavorare in modalità Doppler
 - velocità radiale particelle d'aria incontrate dall'onda
 - costruzione di profili di vento in funzione della quota
- limiti sistema:
 - direzionale, non lavora sua rea estesa
 - sensibile ai rumori esterni
 - no su aeroporti a grande traffico

■ LIDAR

- analogo al radar ma con impulsi laser
- può lavorare in modalità Doppler
- usati soprattutto nella ricerca

OSSERVAZIONE DI WIND SHEAR DA TERRA

PRESTAZIONI	LLWAS	TDWR	RWP	IRDR
Con Temporali	Ottimo	Molto buono	Molto buono	Modesto
Con Aria umida	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Molto buono
Con Aria secca	Ottimo	Modesto	Modesto	Ottimo
Interferenze da Clutter marino e terrestre	Esente	Fortemente influenzato fino a 400 metri d'altezza	Fortemente influenzato fino a 50 metri d'altezza	Esente
In presenza di nubi e nebbia	Ottimo	Molto buono	Molto buono	Fortemente limitato
Scansione in Volume	Nessuna scansione	0-90° in elevazione	Nessuna scansione	0-90° in elevazione
		0-360 in azimut		0-360 in azimut
Short Range Side Lobes	N/A	Modesto	Modesto	Ottimo
Rilevamento sopra i 10 metri di altezza	Fortemente limitato	Limitato fino a circa 400 metri	Limitato fino a circa 50 metri	Limitato fino a circa 50 metri
Controllo Remoto	Possibile	Possibile	Possibile	Possibile

OSSERVAZIONE DI WIND SHEAR IN VOLO

■ radar a microonde

- invia un segnale frontalmente all'aereo
- sente le gocce di umidità
- l'eco rappresenta moto delle gocce, quindi velocità vento
- limiti sistema:
 - funziona in aria umida (necessità di traccianti)
 - in atterraggio risente del clutter di suolo

■ LIDAR Doppler

- le particelle riflettenti sono gli aerosol
- meno soggetto ai clutter di suolo
- limiti sistema:
 - funziona in aria chiara (i traccianti sono gli aerosol)
 - non funziona nei forti rovesci di pioggia

OSSERVAZIONE DI WIND SHEAR IN VOLO

■ sensori a infrarosso

- misura variazioni di temperatura frontalmente aereo
- sistema semplice ed economico
- limiti sistema:
 - non è una misura diretta della velocità vento

UN ESEMPIO DI SISTEMA INTEGRATO

WIND SHEAR AND TURBULENCE WARNING SYSTEM

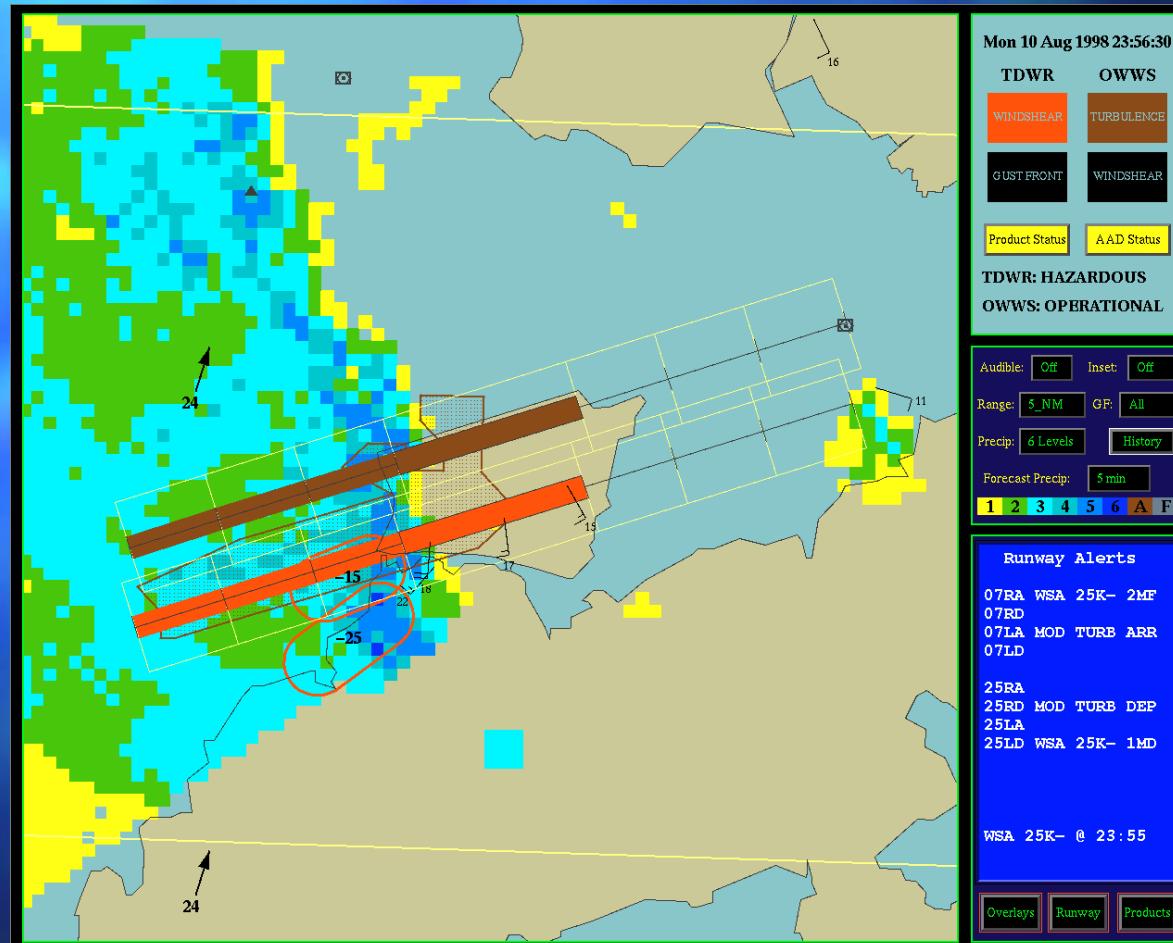
HONG KONG INTL. APT. - CHEK LAP KOK

Il WTWS integra dati meteorologici di vari sistemi e sorgenti, un sistema LLWAS (6 anemometri posti intorno alle piste, 8 sulla collina circostante e postazioni off-shore), 1 TDWR , 2 RWP installati nelle zone di approccio orientale ed occidentale, 1 Doppler Lidar , 1 modello predittivo meteo numerico e un array di stazioni di osservazioni.

HONG KONG INTL. APT. DISLOCAZIONE SENSORI WTWS

- + anemometri
- TDWR
Terminal Doppler
Weather Radar
- RWP
Radar Wind Profiler





TEMPORALI

- perturbazione locale caratterizzata da:
 - non lunga durata
 - fenomeni elettrici (lampi e tuoni)
 - forti raffiche vento
 - violente correnti verticali
 - forti rovesci pioggia (anche grandine)
- ⇒ **FORTE PERICOLO PER IL VOLO**

TEMPORALI

- associati a nubi cumuliformi a forte sviluppo verticale
 - cumulonembi (CB)
- cumulonembi originati da:
 - attività convettiva (**temporali di massa**)
 - singoli CB ben visibili a distanza
 - transito di fronte freddo (**temporali frontali**)
 - più nubi temporalesche distanziate da 1 a 3 km
 - fronte di nubi di un centinaio km

TEMPORALI

- composti da insieme di cellule temporalesche
 - diametro cellule inferiore ai 10 km
- sviluppo singola cellula in tre distinte fasi (**ciclo vitale**)
 - fase di formazione o di cumulo
 - fase di massimo sviluppo
 - fase di dissolvimento

TEMPORALI

- fase di formazione o di cumulo
 - forti correnti ascensionali (10 - 15 m/s)
 - cumulo diviene progressivamente cumulonembo
 - interno nube aumento numero e dimensione gocce e cristalli
 - sostenuti da forti correnti ascensionali
 - non esistono correnti discensionali
 - sommità nube raggiunge i 7 - 9 km
 - inizio correnti discensionali
 - fine fase cumulo

TEMPORALI

- fase di massimo sviluppo
 - massime dimensioni nube
 - correnti ascensionali ordine di 20 - 30 m/s
 - gocce dimensioni tali da superare spinta ascensionale
 - inizio precipitazioni a carattere rovescio
 - lampi, tuoni, possibile grandine
 - comparsa correnti discendenti di aria fredda
 - limitate inizialmente a parte inferiore nube
 - graduale estensione a parte superiore
 - correnti discendenti uscenti da base nube impattano suolo
 - si allargano procedendo di qualche miglio arrivo nube

TEMPORALI

- fase di dissolvimento
 - esaurimento spinta ascensionale
 - prevalenza moti discendenti
 - dissolvimento parte superiore nube
 - piogge perdono carattere di rovescio
 - temperatura interna nube in equilibrio con esterna
 - cessano le downburst

TEMPORALI

- effetti secondari temporale
 - fulmini
 - temporale genera sempre fulmini
 - corto circuito quando potere isolante aria diviene insufficiente
 - scariche tra nube e nube, nube e suolo, nube e cielo sereno
 - scariche tra nube e suolo favorite dal **potere delle punte**
 - accumulo di ioni positivi su oggetti a punta (alberi, piloni, spigoli)
 - le punte si ricoprono di luce bluastra: **fuochi di S.Elmo**
 - tuono
 - onda urto da riscaldamento esplosivo aria causato da fulmine
 - udibile fino a circa 15 km da temporale
 - se x sono i secondi trascorsi tra fulmine e tuono
 - x per 340: distanza approssimativa del temporale in metri
 - diviso 3: in chilometri

ICING - CONTAMINAZIONE DA GHIACCIO
FORMAZIONE DEPOSITO GHIACCIO SU AEROMOBILE
IN VOLO NELLE NUBI
IN VOLO IN ARIA CHIARA
A TERRA

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- due condizioni fondamentali:
 - presenza di gocce acqua in stato di sovraraffusione
 - temperatura ambiente/superfici aeromobile inferiore a 0°C
- acqua sovraraffusa
 - liquida pur con temperatura inferiore a 0°C
 - stato raggiungibile con lente diminuzioni temperatura
 - possibile per tensione superficie pellicola che avvolge goccia
 - tensione tanto maggiore quanto minore diametro goccia
 - gocce grosse sovraraffuse solo a temperature appena sotto 0°C
 - gocce piccole sovraraffuse anche a -20°C

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- gocce di acqua sovraraffusa:
 - frequenti tra 0° e -15°C
 - tra -15°C e -20°C acqua tende a divenire ghiaccio
 - sotto -20°C quasi solo aghi di ghiaccio
- condizione di sovraraffusione:
 - stato equilibrio critico facilmente perturbabile
 - ogni perturbazione provoca immediato ghiacciamento
 - contatto con corpo solido
 - superfici aeromobile
 - ghiaccio aderisce al corpo perturbante
 - accumulo di ghiaccio su parti aeromobili più esposte al moto

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- temperatura ambiente/superfici aeromobile:
 - congelamento libera 80 cal/gr acqua (**calore latente**)
 - calore liberato rallenta velocità processo di congelamento
 - se temperatura ambiente di poco inferiore a 0°C:
 - più sensibile il rallentamento congelamento
 - ogni goccia ha tempo di spalmarsi su superficie aeromobile
 - le gocce si fondono assieme prima di congelare
 - formazione di ghiaccio ben aderente, compatto e solido
 - **ghiaccio vetrone**
 - se temperatura ambiente molto bassa
 - gocce congelano comunque prima di unirsi
 - formazione ghiaccio friabile
 - **ghiaccio granuloso**

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- conclusioni:
 - icing in nube pericoloso tra 0°C e -10°C
 - più frequente tra -4°C e -10°C
 - temperature inferiori a -10°C ghiaccio più friabile
 - eccezioni nei cumuli imponenti e cumulonembi
 - osservati forti icing a -20°C e -30°C
 - temperature inferiori a -45°C non esiste problema icing
 - numero gocce sovr Raffuse praticamente nullo
 - cristalli ghiaccio libera in aria sono ininfluenti per icing
 - non aderiscono superfici aeromobile

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- nubi pericolose per icing:
 - cumuli e cumulonembi
 - alto contenuto di gocce
 - nembostrati e altostrati
 - parte inferiore per maggiore densità gocce acqua
 - sotto la nube con in presenza di precipitazioni congelatesi
 - strati e stratocumuli
 - con temperature molto basse
 - nubi stratiformi in generale
 - in caso di lunga permanenza in nube

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- altre condizioni che favoriscono icing:
 - nubi con predominante movimento ascendente aria
 - icing al di sopra dei rilievi (ascendenze orografiche)
 - fronti
 - notevoli movimenti ascendenze aria
 - frequente presenza di precipitazioni congelantesi

ICING IN VOLO IN ARIA CHIARA

- ghiaccio al carburatore
 - aria aspirata nel carburatore si espande raffreddandosi
 - anche benzina sottrae calore all'aria per evaporare
 - se entra aria umida:
 - può raffreddarsi sotto 0°C e sotto il punto di rugiada
 - depositi di ghiaccio diminuiscono la sezione di aspirazione
 - diminuzione potenza del motore
 - aumento dei depositi ghiaccio in caso di pioggia
 - rimedi:
 - termometro per temperatura carburatore
 - dispositivo riscaldamento del carburatore
 - inserirlo comunque in prossimità di 0°C

ICING A TERRA

- icing su aeromobile a terra
 - Stoccolma, 1991: caso MD81
 - atterra dopo lungo volo in quota
 - lasciato la notte all'aperto con:
 - molto carburante nei serbatoi alari
 - temperatura ambiente prossima a 0°C
 - forte umidità atmosferica
 - leggera precipitazione
 - forte formazione di ghiaccio su superfici alari
 - al decollo blocchi di ghiaccio si staccano e colpiscono motori
 - spegnimento dei motori e principio incendio
 - atterraggio emergenza da quota di 800 ft e velocità 196 kt
 - atterraggio riuscito, nessuna vittima, aereo distrutto

ICING A TERRA

- spiegazione:
 - carburante possiede elevata inerzia termica
 - mantiene temperature inferiori a 0°C dopo ore volo in quota
 - le superfici alari si raffreddano per contatto
 - icing anche a temperature ambiente dell'ordine di 10°C
 - icing aggravato da eventuali precipitazioni
 - quasi sempre ghiaccio si stacca al decollo
 - elevato rischio di:
 - ingestione dei motori
 - gravi danni a strutture aeromobile

PRINCIPALI TIPI DI GHIACCIO

- **ghiaccio brinoso**
 - aspetto di cristalli ghiaccio leggero, simile a brina
 - si forma in aria chiara per sublimazione vapore acqueo
 - a terra e in volo; base per formazione altri tipi di ghiaccio
- **ghiaccio granuloso**
 - struttura opaca, porosa
 - congelamento piccole gocce acqua sovraffusa
 - nelle nubi e nella pioviggine, tra -10°C e -20°C
 - es. parte superiore cumulonembi
- **ghiaccio vetrone**
 - ghiaccio chiaro, compatto, trasparente, aderente
 - congelamento grosse gocce acqua sovraffusa
 - nelle nubi tra 0°C e -10°C
 - es. parte centrale cumulonembi

EFFETTI DEL GHIACCIO SU AEROMOBILE

- classificazione ICAO per l'intensità dell'icing
- **moderate** formazioni di ghiaccio
 - quando sono tali da far considerare desiderabile una variazione di prua e/o di quota
- **forti** formazioni di ghiaccio
 - quando sono tali da far considerare essenziale una variazione immediata di prua e/o di rotta

EFFETTI DEL GHIACCIO SU AEROMOBILE

- **alterazione del flusso aerodinamico**
 - profili aerodinamici deformati da accumuli di ghiaccio
 - diminuzione della portanza e aumento della resistenza
 - aumento della velocità di stallo
 - riduzione della trazione dell'elica
 - riduzione dell'efficacia delle superfici di coda
- **ostruzione delle prese d'aria di alimentazione**
 - diminuzione della potenza erogata dai motori
 - fino a quando aria aspirata non più sufficiente per combustione
- **mancanza di visibilità anteriore**
- **ostruzione della presa dinamica**
 - indice anemometrico a zero o su valori inattendibili
 - blocco avvisatore di stallo
- **disturbi a comunicazioni**
 - comunicazioni radio e ricezione segnali di radionavigazione
 - per accumulo di ghiaccio su antenne

PROCEDURE DI DECONTAMINAZIONE

- procedure di **de-icing**
 - rimuovere contaminazioni già in atto
- procedure di **anti-icing**
 - proteggere superfici pulite da future contaminazioni
- sistemi antighiaccio
 - meccanici
 - termici

NEBBIA

- fenomeno meteorologico di riduzione della visibilità
 - visibilità < 1 km
- nube con base a contatto del suolo
 - aria umida
 - nuclei di condensazione
 - raffreddamento
 - aria sovrastante il terreno raggiunge la saturazione
 - umidità contenuta nell'aria condensa
- umidità descritta in termini di **grandezze igrometriche**
 - **umidità assoluta**
 - **umidità specifica**
 - **rapporto di mescolanza**
 - **umidità relativa**

GRANDEZZE IGROMETRICHE

- descrivono la quantità vapore acqueo nell'aria
 - sola fase aeriforme con esclusione parti liquida e solida
- **umidità assoluta**
 - grammi di vapore contenuti in un metro cubo di aria
- **umidità specifica**
 - rapporto tra la massa di vapore e la massa di aria umida nella quale il vapore è contenuto
- **rapporto di mescolanza**
 - rapporto tra la massa di vapore e la massa aria secca con la quale il vapore è mescolato
- **umidità relativa**
 - rapporto tra la quantità di vapore presente nella massa d'aria e la quantità massima di vapore che, a parità di temperatura, la massa d'aria può contenere

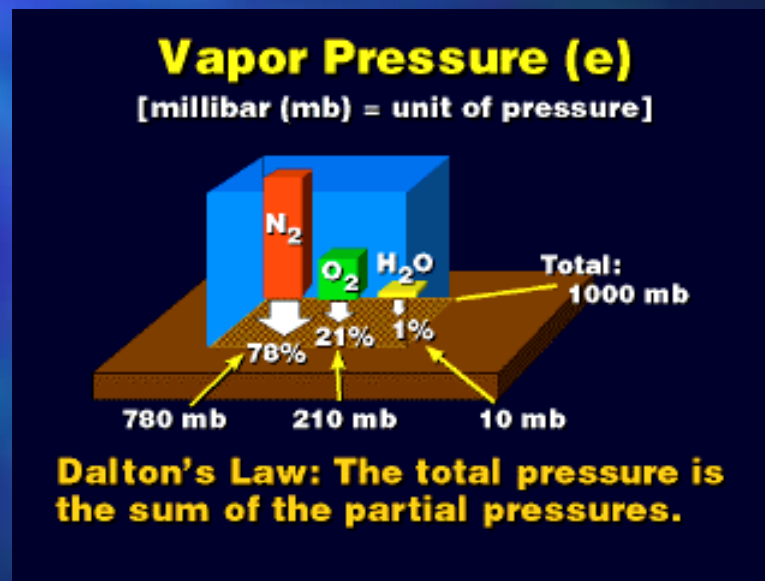
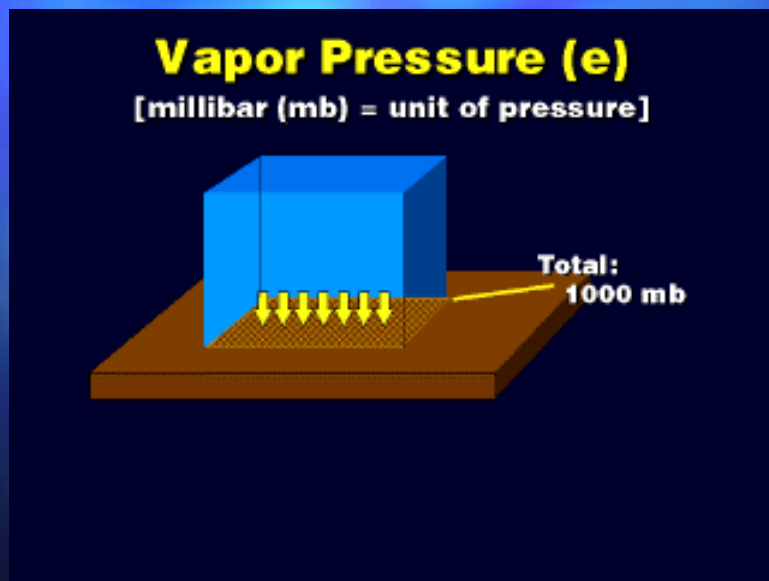
PRESSIONE DI VAPORE E SATURAZIONE

- **Pressione di Vapore PV e Legge di Dalton**
 - pressione parziale esercitate dalle molecole di vapore
 - in una miscela ogni gas esercita una pressione parziale
 - **Dalton: pressione della miscela è somma di pressioni parziali**
 - 1013.2 hPa somma pressioni parziali dei gas atmosferici
 - PV proporzionale a quantità di vapore in atmosfera
- **Pressione di Vapore Saturo PVS**
 - PV delle molecole di vapore in condizione di **saturatione**
- **saturatione**
 - numero di molecole che lascia la superficie di separazione tra acqua e vapore uguale a numero di molecole che torna alla superficie (equilibrio tra evaporazione e condensazione)

PRESSIONE DI VAPORE E SATURAZIONE

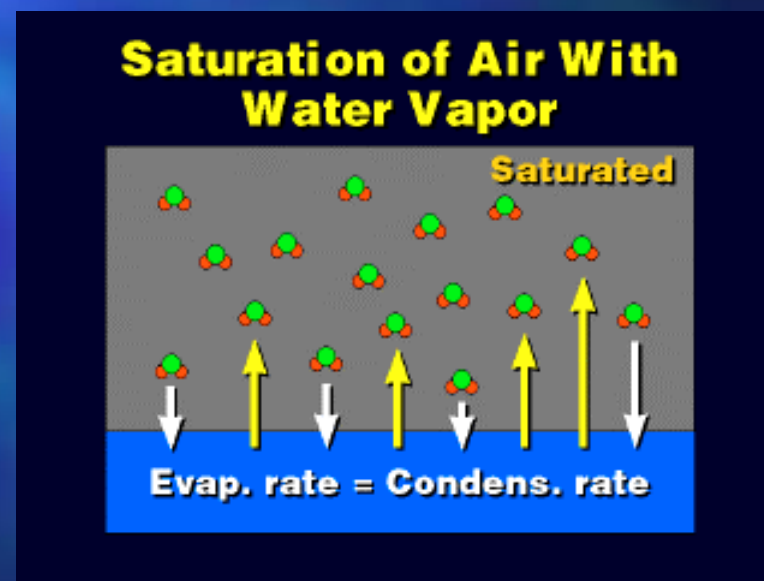
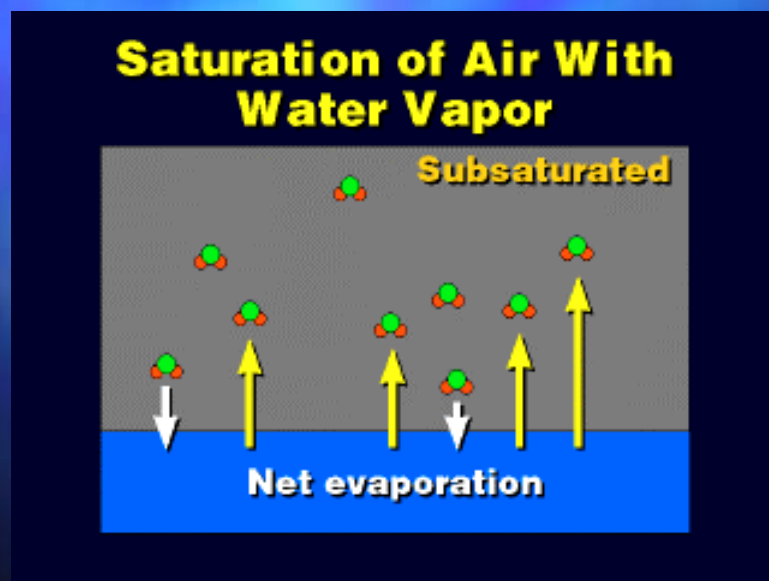
PRESSIONE DI VAPORE E

LEGGE DI DALTON



PRESSIONE DI VAPORE E SATURAZIONE

SATURAZIONE: EQUILIBRIO TRA NUMERO DI MOLECOLE CHE LASCIANO E CHE TORNANO ALLA SUPERFICIE DI SEPARAZIONE ACQUA / ARIA



UMIDITA' RELATIVA

- determina di quanto l'atm è prossima a saturazione
 - vapore presente rispetto al necessario per saturazione

$$UR (\%) = (PV / PVS) \times 100$$

- non rappresenta "quanto" vapore è presente in atm
 - masse d'aria con UR=100% ma diversa umidità assoluta
- se UR=100% temperatura è al **punto di rugiada**
 - **temperatura di rugiada** o **punto di rugiada**: temperatura a cui si ha inizio della condensazione se aria raffreddata a pressione costante senza aggiunta o sottrazione di vapore

NEBBIA

- classificazione in base al processo di formazione
 - diversi processi di saturazione coinvolti
- **nebbie da raffreddamento**
 - nebbia da irraggiamento
 - nebbie da avvezione e da trasporto
 - nebbie da sollevamento o scorrimento ascendente
- **nebbie da evaporazione**
 - nebbie frontali
 - nebbie di vapore

NEBBIA DA IRRAGGIAMENTO

- prevalentemente durante la notte o all'alba
 - spessore sottile (ordine del centinaio di metri)
 - spesso in forma di **banchi**
- in presenza di:
 - terreno molto freddo
 - cielo sereno
 - aria umida e calma
- condizioni favorevoli per **inversione termica al suolo**
 - suolo irradia calore nello spazio
 - di notte irraggiamento non compensato da radiazione solare
 - forte abbassamento temperatura del suolo
 - se aria umida raffreddamento sufficiente per la saturazione

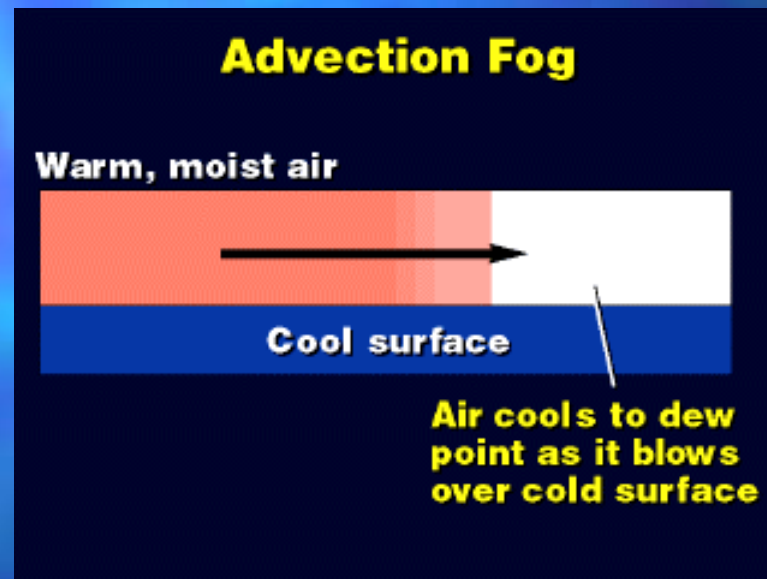
NEBBIA DA IRRAGGIAMENTO

- nebbia da **effetto alba**
 - inversione termica con deposito di sola rugiada o brina
 - primi raggi del sole scaldano terreno ma non aria
 - rugiada evapora poi ricondensa nell'aria fredda sovrastante
- dissolvimento con riscaldamento solare
 - innalzamento della temperatura
 - rimescolamento dell'aria
 - distruzione strato di inversione

NEBBIA DA AVVEZIONE

- **avvezione** indica spostamento orizzontale dell'aria
 - necessaria presenza di vento
- aria calda e umida si sposta su superficie fredda
 - indifferentemente terreno o acqua
- nebbia se temperatura aria al punto di rugiada
 - spessore fino a qualche centinaio di metri
 - maggiore persistenza rispetto a irraggiamento
- due specie di nebbie da avvezione
 - **nebbie marittime**
 - aria da zona calda verso zona fredda oceanica
 - **nebbie costiere**
 - aria calda marittima verso terraferma fredda
 - anche sulle rive di piccole distese acqua (laghi)

NEBBIA DA AVVEZIONE



ALTRE NEBBIE DA RAFFREDDAMENTO

■ NEBBIA DA TRASPORTO

- si forma in zone propizie ed è poi trasportata dal vento

■ NEBBIA DA SOLLEVAMENTO

- anche detta di pendio o scorrimento ascendente
- aria umida in risalita lungo un pendio
- aria si raffredda adiabaticamente al punto di rugiada
- condensazione provoca formazione di Strati
 - Strati toccano il suolo in un punto del pendio
 - oltre il punto il pendio è interessato da nebbia
 - con pendenze poco accentuate, nebbia anche molto estesa

NEBBIA DA EVAPORAZIONE

■ NEBBIA FRONTALE

- associata al passaggio di un fronte caldo
- evaporazione precipitazioni in sottostante aria fredda
- aggiunta di vapore provoca saturazione dell'aria fredda
- formazione di nebbia pre-frontale
- può interessare zone molto estese per lungo tempo

■ NEBBIA DI VAPORE

- quando aria fredda si sposta su superficie di acqua più calda
- evaporazione di parte del vapore
- il vapore condensa nell'aria fredda sovrastante
 - effetto di "mare fumante"
- durata e persistenza inferiore alle nebbie da avvezione

PREVISIONE DELLA NEBBIA

- nebbie da irraggiamento
 - aria umida nei bassi strati
 - cielo sereno o poco nuvoloso
 - temperatura del suolo
 - natura del terreno
 - vento debole
 - utilizzo del **sondaggio termodinamico**
- nebbie da avvezione
 - analisi sinottica
 - afflusso di aria caldo-umida
 - analisi locale
 - raffreddamento superficiale

VISIBILITA' R.V.R.

- La **portata visuale di pista** (**R**unway **V**isual **R**ange) è definita come la massima distanza, nella direzione del decollo o dell'atterraggio, alla quale la pista o le luci di pista o gli appositi contrassegni che la delimitano sono visibili da una posizione situata sopra un determinato punto sul suo asse, ad un'altezza corrispondente al livello medio degli occhi del pilota al punto di impatto. A tale scopo, un'altezza di circa 5 metri è considerata come corrispondente al livello medio degli occhi del pilota al punto di contatto.
- È una *valutazione* della visibilità in decollo o atterraggio
- NON È previsione precisa di visibilità reale

ALTRE VISIBILITA' AEROPORTUALI

■ Meteorological Visibility MOR

- **giorno**: massima distanza alla quale un oggetto di notevoli dimensioni, nero alla radiazione visibile, può essere visto sullo sfondo del cielo all'orizzonte
- **notte**: massima distanza alla quale può essere vista una lampada di moderata intensità

■ Approach Light Contact Height ALCH

- Altezza del punto del sentiero di discesa dal quale il pilota vede, e continuerà a vedere, almeno cinque barre luminose del sentiero di avvicinamento

■ Slant Visual Range SVR

- Numero di barre luminose del sentiero di avvicinamento che il pilota vede da un punto del sentiero posto ad un'altezza di 30 m dal suolo

OSSERVAZIONI RVR

- utilizzo di trasmissometri
 - proiettore solidamente orientato verso ricevitore
 - misura del fattore di trasmissione T lungo linea orizzontale (fino ad un max di 150 m)
 - comparazione tra intensità ricevuta e inviata
 - trasformazione di T in RVR considerando:
 - luci ed altri riferimenti di pista
 - sensibilità occhio umano in diverse condizioni di luce ambiente
- precisione richiesta:
 - per valori fino a 500 m: ± 50 m
 - per valori tra 500 e 1000 m: ± 100 m
 - per valori superiori a 1000 m: ± 200 m