

## **BREZZA MARINA E RAFFICA DI VENTO – STUDIO DI UN CASO**

### **Generalità - Definizione di raffica**

L'insorgere di raffiche del vento ha un duplice interesse: per la meteorologia sinottica indica la presenza di un peculiare stato dell'atmosfera nelle sue condizioni termiche e dinamiche; per la meteorologia aeronautica rappresenta una situazione di pericolo nell'ambito della sicurezza della navigazione. È bene, a questo punto, ricordare che la *raffica* ha una precisa definizione ICAO / OMM (Annex 3 / Technical Regulations), e cioè: *“Si definisce raffica una variazione positiva dell'intensità del vento di almeno 10 nodi, a partire dall'intensità media – di dieci minuti – e della durata compresa tra 1 e 20 secondi”*.

### **Regime anemometrico dei venti a raffiche in Italia**

Si rammenta che nel messaggio METAR vengono riportate le intensità e direzioni del vento medio e l'intensità della raffica (e.g.: LPPT 031100Z **34023G34KT** CAVOK 24/10 Q1018). In linea generale, la presenza di venti a raffiche è – in assoluto – un evento non molto frequente rispetto all'insieme dei fenomeni meteorologici che si verificano su una certa località, ma con una rimarchevole differenza fra le località stesse. Quelle più esposte ai venti a raffiche sono le Stazioni della Sardegna, mentre a Catania, Venezia e Pescara il fenomeno è poco frequente. Fra le stagioni, l'inverno è il periodo più ricco di venti a raffiche; l'estate la più tranquilla e ad essa sono quasi equivalenti le stagioni intermedie. Esistono aree con caratteristiche particolari. Sulle coste dell'Adriatico settentrionale, i venti a raffiche, se presenti, provengono quasi sempre dal quadrante di Nord Est ; sulle coste liguri, è tipica la circolazione relativa alle aree di bassa pressione che si creano sottovento: vento da Nord Est a Genova e da Sud Ovest a Pisa, con regime di raffica; sul mare e sul Canale di Sardegna le raffiche si verificano quasi sempre dal IV quadrante; sullo Stretto di Sicilia provengono prevalentemente dal II quadrante; lungo la Penisola, invece, sono presenti da tutte le direzioni. I venti che, in generale, si presentano a raffiche sono quelli che provengono dal IV quadrante, seguiti da quelli provenienti dal II quadrante, in tutte le stagioni dell'anno, eccetto in primavera, quando i due quadranti succitati si equivalgono.

### **Studio di un caso**

Questo scritto si divide in due parti: la prima, illustrando una condizione meteorologica riscontrata durante un volo, descrive una situazione che è talvolta incontrata dai piloti dell'aviazione generale (GAT), normalmente operanti con velivoli certificati (si intende: non ultraleggeri) non wide-body: situazione che, però, può essere estesa anche a questi ultimi, con qualche variante, come vedremo nel seguito. Viene interpretata e commentata la situazione rilevata in funzione delle condizioni meteorologiche sinottiche esistenti durante l'evento. La seconda parte, prendendo spunto dalla prima, mostra una trattazione matematica, sebbene non esaustiva, del fenomeno di raffica del vento sui velivoli secondo un'ottica aerotecnica, nell'intento di sottolineare la pericolosità meteorologica del fenomeno di raffica del vento sull'operatività aeronautica, segnatamente nelle fasi più delicate del volo: decollo, salita iniziale, avvicinamento, avvicinamento finale ed atterraggio.

### **Prima parte**

La circostanza succitata si riferisce al giorno 20 luglio 2021. Chi scrive è decollato dall'aeroporto di Roma/Urbe alle ore 1358 (ora locale) con un velivolo CESSNA 172 N. Nella posizione di parcheggio, TWR Ground ha comunicato i dati dell'ultimo METAR (22003 170V290 CAVOK 32/14 Q1013); nella posizione di allineamento e decollo la Torre di controllo (TWR) ha correttamente comunicato il vento in superficie in atto: VRB02KT (CAVOK, 33/13 Q1012). L'orientamento della pista è 16/34 (160°/340°). Il decollo è avvenuto senza difficoltà, eccetto una leggera turbolenza termica. Il volo si è regolarmente svolto nelle zone di lavoro dell'Aeroporto in questione. La situazione meteorologica generale sull'Italia, alle ore 1200 UTC era caratterizzata da una pressione livellata, quindi a debole circolazione in superficie, come illustrato dai METAR. La situazione

sinottica in quota non mostrava una situazione diversa dalla superficie. Alla quota della 850 hPa, la relativa topografia assoluta delle ore 1200 UTC mostrava un campo livellato: l'alta topografica sull'Inghilterra aveva un valore di 1560 mgp, mentre il valore successivo (1500 mgp) si trovava sulla regione euroasiatica; sull'Europa centrale e sull'Italia era presente un'isoipsa intermedia (1530 mgp).

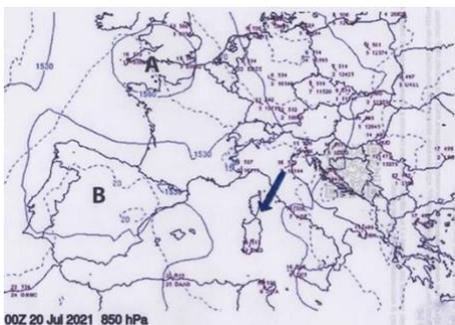


Fig.1

Il dato interessante, per la corrente esposizione, risiedeva nella circolazione (in quota), che si presentava con una, seppur debole, componente settentrionale (fig.1). Durante l'avvicinamento, mentre il QNH rimaneva invariato (1012 hPa) il vento tendeva ad aumentare, con direzione prevalente dal III quadrante e punte da 270°. Alle 1415 circa (ora locale), poco prima dell'immissione in circuito d'atterraggio e prima dell'ultimo punto di riporto disposto dalla TWR, il vento comunicato (*spot wind*) risultava da 230° 14 nodi; all'atto dell'immissione in circuito d'atterraggio per la pista 16 e durante il sottovento sinistro, il vento (*spot wind*) proveniva da 230°, intensità 15 nodi, raffica 19 nodi. La situazione perdurava durante la virata base, il finale, il corto finale e l'atterraggio. La componente del vento al traverso, calcolata con il regolo *Jeppesen*, era di 17 nodi sotto raffica, 13.5 nodi come *spot wind* e 7 nodi come componente frontale. Il valore limite del *cross wind* per il velivolo è di 15 nodi. Dati i valori del vento al traverso prossimi al limite operativo, l'atterraggio è stato impegnativo. L'aspetto speculativo dell'evento fin qui descritto risiede nell'inaspettato valore elevato della raffica: come su menzionato, si tenta una spiegazione di esso in relazione alla situazione sinottica, rappresentando l'avvenimento in un'ottica d'ausilio per il difficile lavoro del previsore nell'elaborazione del TAF e nell'intento di sottolineare l'importanza del caso per i membri di equipaggio di volo, durante la pianificazione di quest'ultimo, segnatamente durante la stagione estiva.

### **Seconda parte - Raffica Istantanea**

Si tratta di una raffica con struttura omogenea, ovvero avente in tutti i suoi punti la stessa intensità  $V_r$ , ipotizzando che il velivolo venga investito istantaneamente ed in modo completo. Presumiamo che un aeromobile in volo rettilineo orizzontale con moto uniforme e velocità  $V_v$  venga interessato da una raffica istantanea la cui intensità faccia un angolo  $\phi$  con la velocità del velivolo (fig. 2). La raffica darà luogo ad una

variazione della velocità, dell'angolo di incidenza e, pertanto, del coefficiente di portanza. La velocità dell'aeromobile varierà da  $V_y$  a  $U_y$

$$U_y^2 = V_y^2 + V_r^2 + 2 V_y V_r \cos \phi \quad (1)$$

La variazione del coefficiente di portanza sarà data da:

$$\Delta C_p = C_p' \Delta \alpha = C_p' \frac{V_r}{V_y} \text{sen } \phi P_0 \quad (2)$$

$C_p'$  esprime il valore di  $\frac{dC_p}{d\alpha}$ , ovvero,  $C_p'$  è il coefficiente angolare di portanza ( $C_p = C_p' \Delta \alpha$ ) (fig. 2)

La portanza:  $P_0 = \frac{1}{2} C_{p0} \rho S V_r^2$  varierà, a causa della raffica, a:  $P = \frac{1}{2} \rho S (C_{p0} + \Delta C_p) U_y^2$  ovvero:

$$P = \frac{1}{2} \rho S (C_{p0} + C_p' \frac{V_r}{V_y} \text{sen } \phi) U_y^2 \quad (3)$$

Considerando che la variazione dell'incidenza è improvvisa e rapida, l'incremento  $\Delta C_p$  del coefficiente di portanza è, in effetti, molto minore di quello risultante da  $C_p' \Delta \alpha$ ; la nuova circolazione scaturente dall'incremento di portanza dell'ala non s'instaura immediatamente: in ultima analisi, la portanza e la sollecitazione sull'ala è molto minore di quella discendente dalla (3). Purtroppo, esiste un altro fatto che dà luogo ad un incremento di portanza: questo elemento consta nelle modificazioni dell'incidenza causate dalla deformazione elastica dell'ala. Con l'aumento dell'incidenza, la risultante aerodinamica si sposta verso l'avanti e di conseguenza sull'ala si verifica un momento torcente in verso cabrante che, a sua volta, causa un aggiuntivo aumento della portanza. Tale incremento di portanza ha lo stesso ordine di grandezza del decremento dovuto al ritardo nell'instaurarsi della circolazione intorno all'ala. Possiamo, quindi, tralasciare i due fenomeni, considerare valida la (3) ove, dividendo per il peso del velivolo ( $Q$ ), abbiamo l'espressione del fattore di carico:  $\mu = \frac{\text{Portanza } P}{\text{Peso velivolo } (Q)}$ , ovvero:

$$\mu = \frac{\rho (C_{p0} + C_p' \frac{V_r}{V_y} \text{sen } \phi) U_y^2}{2 \frac{Q}{S}} \quad (4)$$

Dopo alcuni passaggi, che si tralasciano per brevità, si giunge alla:

$$\mu = 1 + \frac{1}{V_y} (2 V_r \cos \phi + \frac{\rho C_p' V_y}{2 \frac{Q}{S}} - V_r \text{sen } \phi) \quad (5)$$

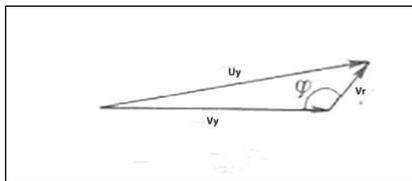


Fig.2

Nella (5) il fattore di carico  $\mu$  è espresso dalla somma di due fattori: il primo dipende dalla componente  $V_r \cos \phi$  relativa all'intensità della raffica che agisce nella direzione del moto del velivolo (raffica orizzontale); questa può avere la stessa direzione di moto dell'aeromobile, oppure direzione contraria, ma poiché è piccola in raffronto alla velocità di questo ultimo, ha un'influenza trascurabile sulla risultante aerodinamica. La componente  $V_r \text{sen } \phi$  è in direzione ortogonale alla traiettoria (raffica verticale) e possiede conseguenza prevalente: può essere, a sua volta, ascendente

o discendente. Trascurando gli effetti della raffica orizzontale e considerando quella verticale, si osserva che con l'angolo  $\phi = 90^\circ$ ,  $\sin \phi = 1$ ; pertanto il fattore di carico sarà:

$$\mu = 1 + \frac{\rho C_p' V_r V_y}{2 \frac{Q}{S}} \quad (6)$$

Quindi,  $\mu$  cresce con l'aumentare delle due velocità, decresce con il crescere del carico alare  $\frac{Q}{S}$  e con quote di volo crescenti. Il valore massimo del fattore di carico  $\mu$  sarà espressa da:

$$\mu_M = \mp 1 + \frac{\rho C_p' V_r V_y}{2 \frac{Q}{S}} \quad (7)$$

Dove il segno + si riferisce alla raffica scendente ed il segno – a quella discendente.

### Vento di gradiente e brezza di mare

Generalmente si ritiene che un caldo giorno assolato, sulla costa, costituisca invariabilmente una situazione meteorologica favorevole ad una robusta brezza di mare, ma non è così: segnatamente, nelle coste del Mediterraneo e del vicino entroterra, durante l'estate, si può riscontrare brezza oppure no. L'esperienza prova che, spesso, durante un giorno assolato si possono registrare 12-13 nodi di brezza marina ed il giorno successivo, più caldo, 2-3 nodi. Il fattore chiave – in ogni situazione ed in qualunque località – è il *vento di gradiente*. La brezza di mare non richiede, per innescarsi, un grande innalzamento della temperatura sulla terraferma e, quindi, una marcata differenza fra quest'ultima e la temperatura superficiale dell'acqua del mare, in quanto 2 o 3 gradi sono sufficienti; piuttosto, la brezza è fortemente dipendente dalla circostanza per cui il vento di gradiente spiri o no in direzione del mare aperto. Un vento di gradiente diretto verso quest'ultimo è un ausilio per il flusso di ritorno del ramo alto – in quota – della cellula che costituisce la circolazione di brezza (marina) e finché il primo non acquisti una certa intensità (il limite massimo è 25 nodi), la brezza non trova ostacoli a ben manifestarsi nel ramo in superficie, opposto a quello in quota. Lo spessore di tale cellula è di circa 1000 m. Se, invece, il vento di gradiente (a tale quota e poco più in alto) fosse diretto verso l'interno della costa, esso si opporrebbe al succitato flusso di ritorno, che è necessario per alimentare la brezza marina in superficie: in tal caso, quest'ultima non si svilupperebbe o risulterebbe molto debole.

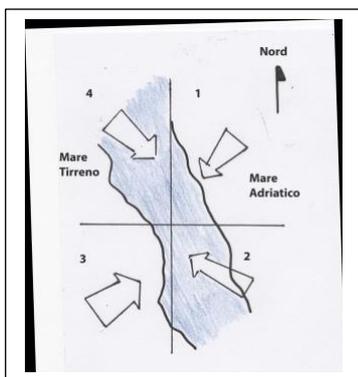


Fig. 3

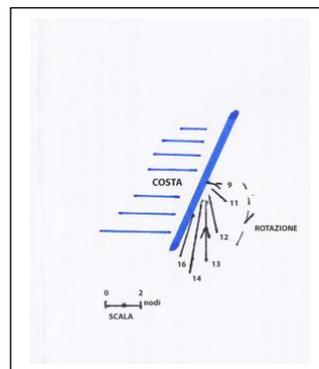


Fig. 4

Si osservi, schematicamente, il modello di brezza in questione: in Italia, ad esempio, sulla costa tirrenica (fig.3), i venti di gradiente favorevoli allo sviluppo della brezza marina provengono dai quadranti 1 e 2; quelli sfavorevoli dalle direzioni opposte (3 e 4); sulla costa adriatica, invece, i venti di gradiente favorevoli, provengono dai quadranti 3 e 4; quelli sfavorevoli dalle direzioni 1 e 2. La sequenza "classica" degli eventi consiste in un vento che da prima mattina spira verso il mare aperto (ultima parte della "brezza di terra"); successivamente, allorché la terra si riscalda, tale vento si affievolisce e scompare, facendo luogo all'inizio

della brezza di mare, il che si verifica prima di mezzogiorno. All'inizio, questo flusso diretto verso la terraferma spira quasi direttamente alla costa, ma allorché la pressione al livello del mare, sulla terraferma, tende a scendere, la brezza marina cresce d'intensità ed inizia ad avere una rotazione in senso orario (*veering*). Nel primo-medio pomeriggio essa raggiunge la massima intensità ed è diretta verso la linea di costa con un angolo di  $30\div 50^\circ$ , dopodiché l'intensità decresce, sebbene la sua rotazione suddetta continui sempre in *veering*. Questo effetto rotatorio è spesso denominato "*effetto girasole*" (fig.4). La distanza alla quale la brezza marina penetra all'interno della terraferma dipende da: a) la durata e l'intensità della radiazione solare; b) L'altezza alla quale viene distribuito il calore solare; c) La direzione e l'intensità del flusso generale del vento in quota e d) La temperatura superficiale dell'acqua del mare. Alle latitudini temperate viene considerata una *profonda* penetrazione  $40\div 50$  miglia nautiche.

Gen. Gian Carlo Ruggeri

settembre 2023