

# INDICE

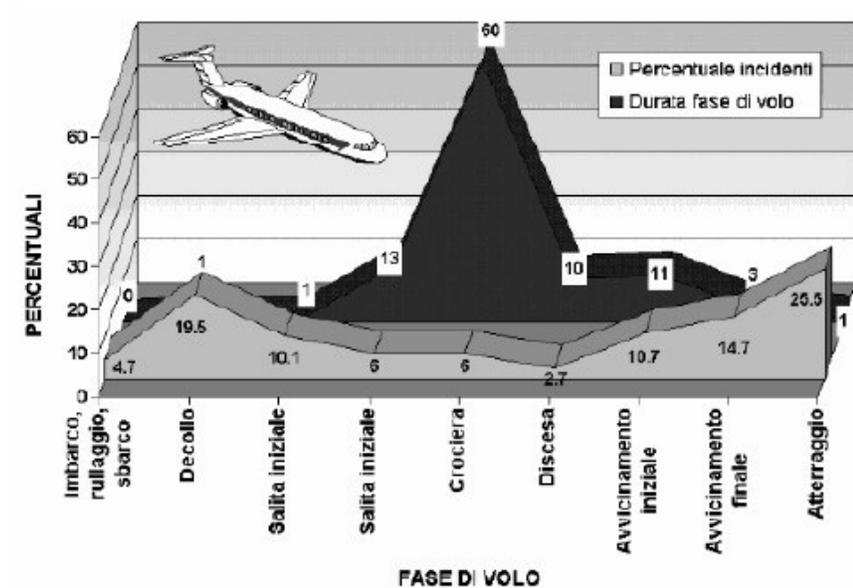
<b>INTRODUZIONE</b>	<b>4</b>
<b>1 L'INTERAZIONE DEL VELIVOLO CON LA SUPERFICIE DELLA PISTA</b>	<b>5</b>
1.1. Le operazioni a terra dei velivoli	5
1.2. La reazione della sovrastruttura e l'aderenza	6
1.3. Il coefficiente di aderenza massimo $m_{max}$	8
1.4. Pressione sotto l'impronta di un pneumatico su una pista bagnata	9
1.5. Curve aderenza/velocità	14
1.6. Calcolo dello spazio necessario all'atterraggio	15
1.7. Calcolo della distanza di accelerazione e arresto	17
<b>2 FATTORI CHE INFLUENZANO LE CARATTERISTICHE DI ADERENZA</b>	<b>25</b>
2.1. Le condizioni superficiali delle piste di volo	25
2.2. La presenza di contaminanti	26
2.3. L'aquaplaning	27
2.4. L'aquaplaning dinamico: la velocità critica	30
2.5. Effetto dello spessore del film d'acqua sull'aquaplaning	32
2.6. La rugosità superficiale	34
2.7. La regolarità	35
<b>3 IL MONITORAGGIO DELLE CARATTERISTICHE DI ADERENZA</b>	<b>36</b>
3.1. Normativa di riferimento	36
3.2. I "planning levels": la manutenzione e la sicurezza delle operazioni	37

3.3.	Segnalazioni	39
3.4.	Finalità e condizioni dei rilievi	42
3.5.	Localizzazione dei rilievi	43
3.6.	La frequenza delle misurazioni	44
3.7.	Misure dell'aderenza di tipo "locale"	45
3.8.	Misure dell'aderenza di tipo "continuo": CFME	46
3.9.	Strumenti di misura	47
<b>4</b>	<b>ELABORAZIONE ED INTERPRETAZIONE DEI DATI</b>	
	<b>SPERIMENTALI</b>	<b>71</b>
4.1.	La gestione dei dati	71
4.2.	Le linee guida dell'I.C.A.O.	73
4.3.	C.A.A. (Civil Aviation Authority): valutazione della "100 meters rolling average"	74
4.4.	Lo STANAG 3634 N.A.T.O.: valutazione del "minimum 100 meters rolling average"	76
4.5.	La programmazione delle rimozioni dei depositi di gomma: procedura del <i>Department of Air Force – USAF</i>	79
4.6.	Raccolta dei dati sperimentali	82
4.7.	Criteri di confronto	83
4.8.	Inserimento in un data base di gestione della manutenzione	84
<b>5</b>	<b>RISULTATI DELLE ELABORAZIONI</b>	<b>86</b>
5.1.	Software utilizzato – caratteristiche dei tratti di estremità	86
5.2.	La fase intermedia di elaborazione: "smooth out" dei dati	87
5.3.	Confronto tra i risultati	88

<b>6</b>	<b>L'IMPLEMENTAZIONE DI UN PROGRAMMA DI MONITORAGGIO PER LE INFRASTRUTTURE AEROPORTUALI</b>	<b>__ 92</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>_____ 97</b>

# INTRODUZIONE

Il fenomeno dell'aderenza in campo aeroportuale, ancor di più che in campo stradale, ha un'enorme importanza in ambito di sicurezza. La rilevazione del coefficiente di aderenza rappresenta uno degli interventi mirati alla sicurezza ed assume particolare rilievo per il controllo ed il monitoraggio delle condizioni relative alle piste aeroportuali. In particolare, l'azione frenante dei velivoli in atterraggio o in decollo è strettamente legata a tale parametro. È proprio in queste due fasi, seppur molto più brevi rispetto all'intero volo, che si concentra la maggioranza degli incidenti come i dati statistici confermano; da qui l'importanza dell'aderenza sulle piste aeroportuali.



# 1 L'INTERAZIONE DEL VELIVOLO CON LA SUPERFICIE DELLA PISTA

## 1.1. LE OPERAZIONI A TERRA DEI VELIVOLI

I velivoli sono, per definizione, macchine progettate per sfruttare le forze aerodinamiche al fine di avanzare nell'atmosfera. Nella fase di volo in senso stretto essi sono soggetti alle quattro forze (Peso, Spinta, Portanza e Resistenza) che ne determinano il moto; ciò nonostante, ogni "volo" è preceduto e seguito dalle operazioni di decollo e atterraggio, durante le quali il velivolo si comporta come un veicolo terrestre, soggetto, oltre alle forze prima citate, anche alla Reazione verticale e alla Resistenza all'avanzamento offerta dalla sovrastruttura su cui si muove. Queste ultime possono considerarsi, rispettivamente, come le componenti verticale ed orizzontale della Reazione che la sovrastruttura di volo trasferisce al velivolo tramite il carrello principale e il carrello di prua. Sebbene le fasi ora descritte incidano relativamente poco in termini di tempo sull'attività svolta dal velivolo, le manovre che vengono attuate durante il loro svolgimento sono particolarmente delicate in termini di sicurezza. Oltre alle operazioni propriamente dette di decollo e atterraggio, il velivolo si muove sull'infrastruttura anche per trasferirsi dalla cosiddetta *area di manovra* (comprendente RUNWAY e TAXIWAYS) ai piazzali di parcheggio e manutenzione, che, insieme all'area di manovra formano *l'area di movimento*. In questo tragitto il velivolo interagisce con la sovrastruttura di volo, che, per questo motivo, deve essere oggetto di un apposito piano di gestione e manutenzione, al fine di monitorarne con continuità

ed efficienza le caratteristiche prestazionali necessarie per garantire un adeguato livello di sicurezza.

## **1.2. LA REAZIONE DELLA SOVRASTRUTTURA E L'ADERENZA**

Il movimento a terra dei velivoli è caratterizzato dall'interazione con l'infrastruttura. Le fasi durante le quali la componente orizzontale della Reazione della sovrastruttura, con particolare riferimento all'utilizzo della RUNWAY, esplica i suoi effetti sono le seguenti:

1. *Decelerazione dei velivoli dopo l'atterraggio o il mancato decollo;*

nel caso dell'atterraggio, esaurito l'effetto dei freni aerodinamici, che diminuisce con la velocità, il velivolo viene rallentato, fino all'eventuale arresto, mediante la frenatura delle ruote, così come avviene nei veicoli terrestri. Il funzionamento dei sistemi antiskid, di cui è dotata la maggior parte dei velivoli commerciali, avviene solo quando la portanza e la velocità sono sotto determinati valori; questa procedura è necessaria perché il pneumatico, affinché possa lavorare senza il pericolo di cedimenti, necessita di determinate condizioni di velocità e peso supportato (che si traduce in forza normale alla superficie di contatto).

2. *Mantenimento del controllo direzionale durante la corsa a terra nella fase di decollo o in atterraggio, in particolare in presenza di vento al traverso, spinta asimmetrica dei propulsori o altri problemi tecnici;*

La componente orizzontale della Reazione della sovrastruttura può essere ulteriormente scomposta lungo le direzioni parallela e perpendicolare all'asse del velivolo. Mentre la prima è responsabile della resistenza

all'avanzamento e, adeguatamente incrementata, della frenatura del velivolo, la seconda si oppone alle forze laterali che, per motivi diversi, interessano il velivolo.

### 3. *Rotolamento delle ruote del carrello al momento della toccata.*

La resistenza all'avanzamento, che, come sarà in seguito descritto, si genera ed agisce all'interfaccia pneumatico/pavimentazione, produce, in virtù del braccio rispetto all'asse della ruota, un momento sulla stessa che ne causa il rotolamento mentre il velivolo avanza con la sua velocità di traslazione.

Come accennato, l'interazione tra la sovrastruttura e il velivolo si esplica all'interfaccia tra pneumatico e pavimentazione. Il fenomeno attraverso il quale si trasmettono forze da una ruota in moto di rotolamento al supporto prende il nome di *aderenza*. Allo stato attuale, l'aderenza è considerata un fenomeno al quale non si è ancora data una spiegazione sufficiente (i primi studi sistematici sono quelli di Blockett del 1813)<sup>1</sup>. Comunemente ci si limita a verificare sotto quali condizioni essa si verifica. La funzione dell'aderenza è, dunque, quella di trasmettere forze nel piano della pavimentazione tra questa e la ruota. Le forze possono appartenere al piano della ruota o a quello perpendicolare ad essa. Si parlerà, nei due casi rispettivamente, di *aderenza longitudinale* e di *aderenza trasversale*.

L'*aderenza longitudinale* interessa le ruote che si trovano sotto l'azione del Peso e di una forza tangenziale nel piano della ruota stessa (positiva se di trazione, negativa se di frenatura). Si verificano le condizioni di aderenza se la ruota soggetta alle due forze rotola anziché slittare.

Commento [v.v1]: Vedi asm

---

<sup>1</sup> Vedi I.C.A.O. Airport Service Manual, part 2

L'aderenza trasversale interessa le ruote che sono sotto l'azione del Peso e di una forza tangenziale perpendicolare al piano della ruota stessa (e, quindi, alla direzione del moto). Si verificano le condizioni di aderenza trasversale se la ruota continua ad avanzare nel suo piano anziché slittare lateralmente.

A differenza del fenomeno dell'attrito, nell'aderenza manca il moto relativo tra le superfici a contatto; poiché il suo valore, alle basse velocità, coincide con quello dell'attrito di primo distacco, essa può considerarsi un attrito potenziale.

Volendo misurare quantitativamente il fenomeno è possibile definire un *coefficiente di aderenza*: date due superfici in moto relativo, il coefficiente di aderenza è pari al rapporto tra la forza tangenziale che mantiene tale moto uniforme e la forza, perpendicolare alle superfici, che ne determina il contatto<sup>2</sup>.

### 1.3. IL COEFFICIENTE DI ADERENZA MASSIMO

$m_{max}$

Dal punto di vista teorico, lo studio del moto della ruota di un velivolo viene descritto attraverso il fenomeno della “ruota condotta”. Si definisce, pertanto, uno “slittamento” pari al rapporto tra la velocità periferica del pneumatico e quella di traslazione del velivolo:

$$S_{\%} = \frac{\omega \cdot r_p}{v_T}$$

Al variare della percentuale di slittamento è possibile osservare come varia il coefficiente di aderenza, che può essere valutato con strumenti che misurano il

---

<sup>2</sup> Vedi Airport Service Manual, part 2

rapporto tra la forza orizzontale agente sulla ruota e il carico verticale. La Fig. 1-1 mostra l'andamento del coefficiente di aderenza  $\mu$  in funzione della percentuale di slittamento. Poiché ogni velivolo opera con modalità diverse di frenatura e, quindi, con una percentuale di slittamento che varia tra 0% e 100% (corrispondenti alla situazione di ruota libera e ruota bloccata) si adotta come parametro di riferimento il valore massimo delle misurazioni che normalmente si ottiene in corrispondenza di una percentuale di slittamento compresa tra il 10 e il 20%.

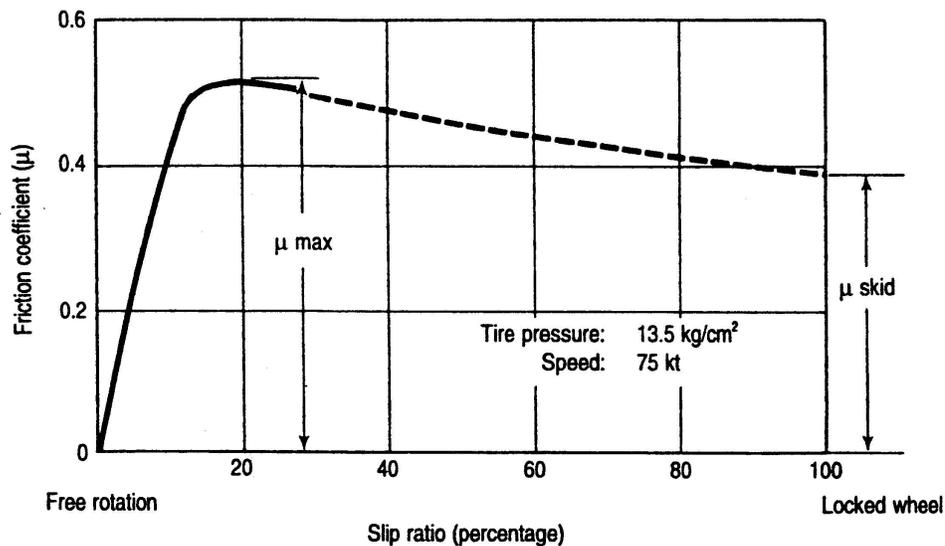


Fig. 1-1 Relazione tra la percentuale di slittamento e il coefficiente di aderenza di una pista in condizioni wet

#### 1.4. PRESSIONE SOTTO L'IMPRONTA DI UN PNEUMATICO SU UNA PISTA BAGNATA

Come verrà approfondito successivamente, l'aderenza diventa un fattore critico quando la pista è bagnata (condizioni "wet"). E', quindi, utile riportare lo studio

dell'interazione pneumatico/superficie in tali condizioni. In particolare si studia la distribuzione delle pressioni sull'area di impronta del pneumatico che rotola sulla pista sotto un carico verticale fissato. Naturalmente, la componente verticale della risultante della distribuzione equilibrerà il carico sulla ruota, mentre gli sforzi tangenziali governeranno il moto di rotolamento, trasmettendo tra velivolo e sovrastruttura eventuali forze di frenatura. Quando è presente, l'acqua intrappolata tra pneumatico e sovrastruttura va in pressione trasferendo, così, parte del carico verticale. In corrispondenza della superficie occupata dal fluido non potranno essere trasferiti sforzi tangenziali. Si comprende, in definitiva, come la superficie totale su cui possono distribuirsi gli sforzi tangenziali diminuisce in condizioni "wet". L'interpretazione teorica del fenomeno prevede la formazione di tre zone sotto l'impronta del pneumatico, caratterizzate da differenti comportamenti.

Con riferimento alla Fig. 1-2, nella Zona 1 l'impatto del pneumatico con la superficie del fluido genera una pressione sufficiente a vincerne l'inerzia. Una significativa quantità di fluido viene espulsa con effetto spray oppure spinta attraverso la scolpitura del battistrada e gli interstizi offerti dalla macrotessitura della pavimentazione. Tutta la superficie della Zona 1 presenta un sottile velo di fluido che si interpone tra pneumatico e pavimentazione; l'effetto frenante che ne risulta è ascrivibile all'azione di rallentamento dell'acqua. La pressione che si genera in questa zona è la principale causa di due fenomeni:

- 1. la superficie di contatto del pneumatico subisce un'inflessione verso l'interno, la cui estensione dipende dalla pressione di gonfiaggio, dalla velocità di avanzamento e dalla deflessione verticale del pneumatico.*

2. *nella fase di rotolamento si verifica uno spostamento in avanti del centro di pressione con riferimento all'area di contatto pneumatico/sovrastuttura. L'entità dello spostamento del centro di pressione dalla posizione statica (in corrispondenza dell'asse della ruota) aumenta con la velocità, con l'altezza dello strato di fluido e con la sua densità. Nella fase di frenatura, si genera un'ulteriore redistribuzione delle tensioni, tale che il centro delle pressioni si sposta indietro. In definitiva, il centro delle pressioni generate nell'area di contatto, in condizioni "wet", può trovarsi davanti o dietro rispetto all'asse della ruota.*

La Zona 2 è una regione di transizione. Dopo che la maggior parte del fluido è stata spostata, un sottile film rimane tra il pneumatico e la pavimentazione. Nella parte posteriore della Zona 1 e nella Zona 2 gli effetti viscosi impediscono un rapido allontanamento del fluido. Tali effetti viscosi sono anche necessari per mantenere in pressione il fluido. Il sottile film si rompe in corrispondenza dei punti in cui la pressione locale è alta – per esempio in corrispondenza delle asperità della superficie. In presenza di taluni fluidi con effetti lubrificanti, il coefficiente di aderenza della gomma su superfici dure decade significativamente rispetto alla condizione "dry". In definitiva, la forza tangenziale che può generarsi in presenza di un film di fluido è bassa. Nel modello non si considera il contributo della forza che si genera in questa sezione.

La Zona 3 è la regione in cui predomina un contatto asciutto; in questa regione si origina il maggior contributo alla forza frenante. La tendenza allo scivolamento evidenziata dagli elementi del battistrada posizionati nella parte posteriore della

zona di contatto può essere incrementata dalla presenza del fluido ai lati dell'area di contatto.

In condizioni "wet", il coefficiente di aderenza tra pneumatico e sovrastruttura dipende dalle dimensioni relative delle Zone 1, 2 e 3. Queste sono influenzate da:

1. rugosità superficiale;
2. temperatura della zona di contatto;
3. spessore dello strato di fluido;
4. densità del fluido;
5. viscosità del fluido;
6. scolpitura del battistrada;
7. proprietà di isteresi del pneumatico;
8. pressione di gonfiaggio del pneumatico;
9. tempo che un elemento del battistrada impiega a percorrere l'area di contatto.

La Fig. 1-2 mostra gli effetti della velocità di avanzamento sul rapporto tra l'estensione delle Zone 1, 2 e 3. La Fig. 1-2b si riferisce agli effetti di una velocità di avanzamento maggiore di quella cui si riferisce la Fig. 1-2a, così che la Zona 1 si estende più indietro all'interno dell'area di contatto e le Zone 2 e 3 occupano una regione a forma di zoccolo di cavallo nella parte posteriore. In Fig. 1-2c, ad una velocità ancora più alta, il contatto con la sovrastruttura è quasi completamente perso. In queste condizioni, il pneumatico sviluppa una forza di aderenza minima. In Fig. 1-2d, infine, il pneumatico si muove ad una velocità tale che la Zona 1 si estende a tutta l'area di contatto. In questo caso non si mantiene più contatto asciutto con la superficie e si assiste al fenomeno dell'*aquaplaning*.

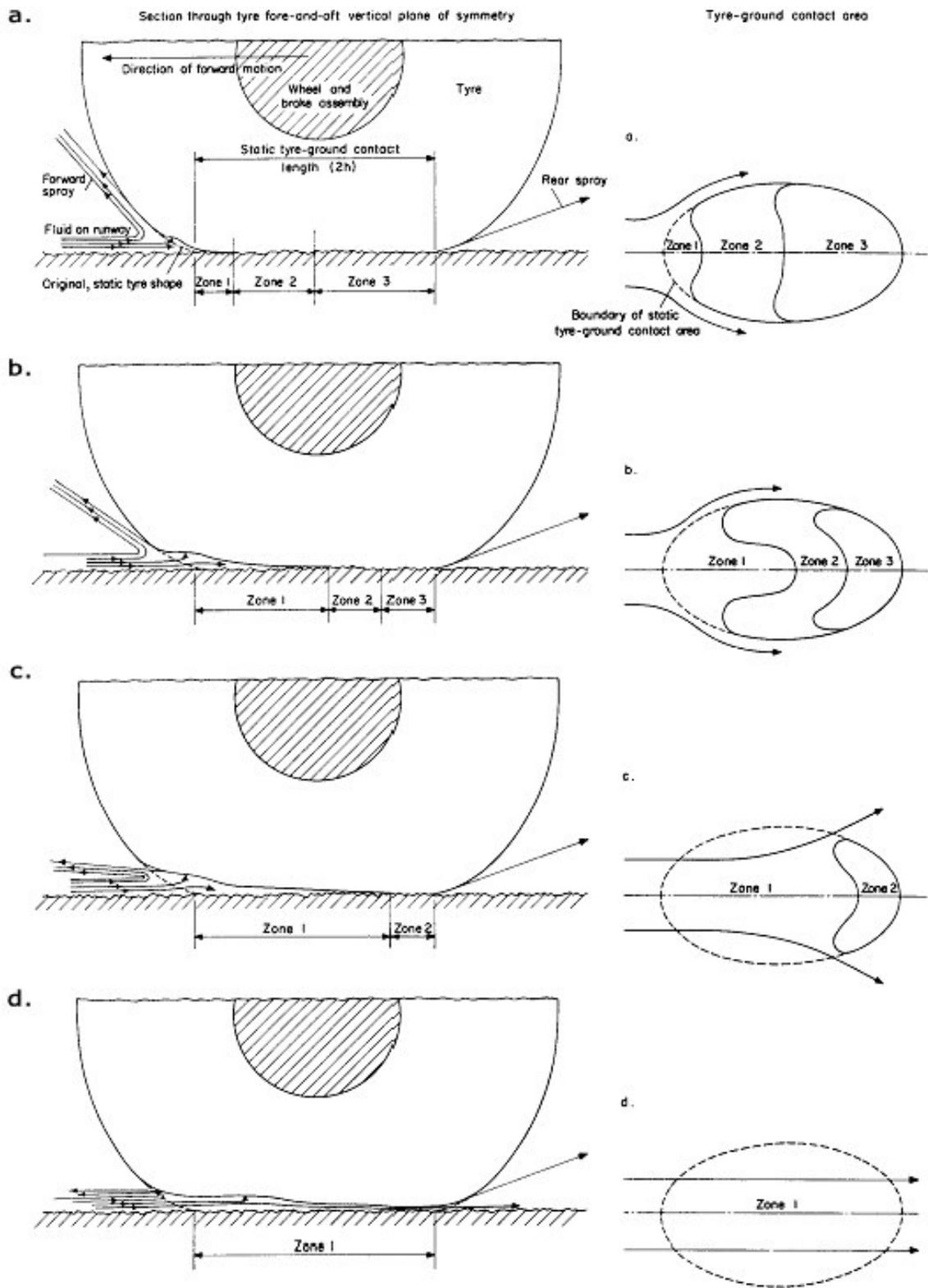


Fig. 1-2 Modello di interazione pneumatico - pavimentazione

## 1.5. CURVE ADERENZA/VELOCITÀ

Gli effetti della velocità sul fenomeno del rotolamento sono spiegabili con il fatto che l'espulsione dell'acqua attraverso la scolpitura del battistrada e gli interstizi che caratterizzano la sovrastruttura, così come la rottura del film di fluido, descritta al paragrafo precedente, richiedono un certo tempo per giungere a completamento. Con l'aumentare della velocità diminuisce il tempo che un elemento del battistrada impiega a percorrere l'area di contatto pneumatico/suprastruttura e, di conseguenza, diminuisce il tempo a disposizione perché tali fenomeni possano avere luogo. In definitiva, ne risulta un decremento della forza che si oppone al moto relativo tra pneumatico ed infrastruttura. La Fig. 1-3 mostra l'andamento del coefficiente di aderenza  $m$  con la velocità di avanzamento dell'aeromobile per quattro differenti materiali utilizzati per la sovrastruttura. Per tutti si osserva un abbattimento del valore del coefficiente di aderenza con l'aumentare della velocità. Per le curve A e B, caratterizzate da una granulometria "aperta", il decadimento è meno accentuato che per le curve C e D, a granulometria "chiusa". Da queste osservazioni si evince la stretta dipendenza del coefficiente di aderenza dalla macrorugosità della finitura superficiale della sovrastruttura. Questo risultato assume particolare rilievo nella progettazione dei metodi di indagine, in quanto, per riconoscere un problema di aderenza legato ad una macrorugosità superficiale inadeguata, è necessario condurre prove di aderenza a velocità differenti. D'altra parte, il confronto tra i differenti materiali mette in evidenza l'effetto della microrugosità, legata all'acutezza degli spigoli del singolo inerte, che permette di "mordere" la gomma del pneumatico in condizioni "dry" ovvero di rompere il film di fluido in condizioni "wet".

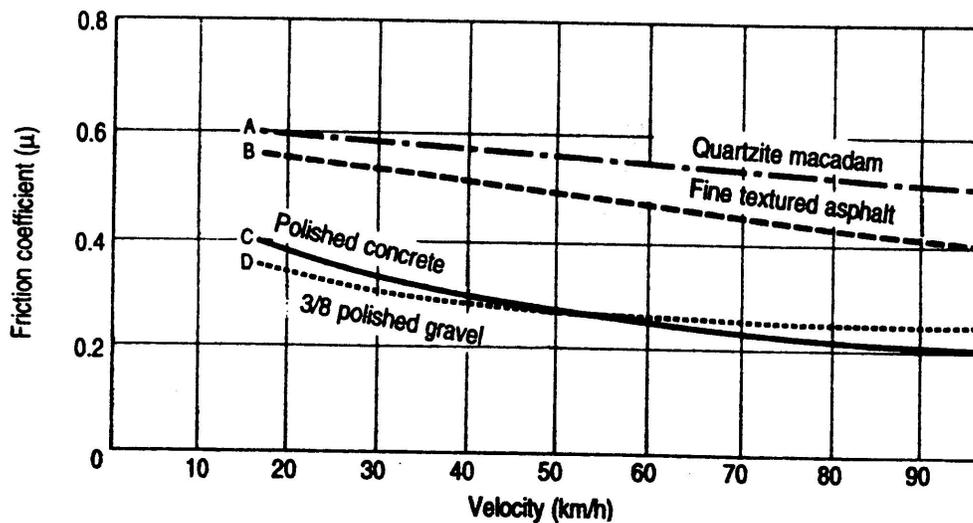


Fig. 1-3 Curve aderenza/velocità per strati superficiali realizzati con materiali differenti

## 1.6. CALCOLO DELLO SPAZIO NECESSARIO ALL'ATTERRAGGIO

Le prestazioni della sovrastruttura correlate alle caratteristiche di aderenza superficiale si riferiscono, principalmente, alla capacità di offerta ai velivoli di arrestarsi in sicurezza, ovvero in spazi compatibili con la lunghezza della pista. Lo spazio necessario ad effettuare un atterraggio in sicurezza  $S_a$  viene diviso in tre contributi:

$$S_a = S_1 + S_2 + S_3$$

essendo:

- $S_1$  spazio di avvicinamento al suolo è lo spazio necessario al velivolo in atterraggio per portarsi da un'altezza di 10,70m (35ft) in corrispondenza della soglia pista (aereo con flaps e freni aerodinamici azionati, alla velocità di sostentamento);

**Commento [v.v2]:** NB  
SOTTOLINEARE CHE CON  
L'ADERENZA AGIAMO SOLO  
S3

- $S_2$  spazio di manovra ;
- $S_3$  spazio di rullaggio per la frenatura.

Per il calcolo di  $S_3$  si considera l'equazione della trazione:

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

per la fase di atterraggio  $T=0$ , ottenendo:

$$\frac{Q}{g} \frac{dv}{dt} = - \left[ f \left( Q - \frac{1}{2} C_p \rho S v^2 \right) + \frac{1}{2} C_r \rho S v^2 \right]$$

Poiché nel momento in cui le ruote del carrello toccano la pista il velivolo è ancora completamente sostenuto, risulta:

$$Q = m \cdot g = \frac{1}{2} C_p \rho S v_a^2$$

in cui  $v_a$  è la velocità minima di sustentamento, e posto  $dt=ds/v$ , dividendo per  $Q$ , si ottiene:

$$\frac{v dv}{g ds} = - \left[ f + \left( \frac{C_r}{C_p} - f \right) \frac{v^2}{v_a^2} \right]$$

Questa espressione, integrata fra  $v=0$  e  $v=v_a$ , posto anche  $C_r/C_p=m$ , fornisce

l'espressione di Glauert:

$$\frac{2gS_3}{v_a^2} = \frac{\ln \frac{f}{\mu}}{f - \mu}$$

Da questa espressione si osserva che lo spazio di rullaggio per la frenatura diminuisce con l'aumentare dei valori di  $f$  e  $m$ .

Il coefficiente di resistenza  $f$  viene aumentato fornendo gli aerei di freni alle ruote, ipotizzando in ogni caso che la pista sia bagnata, cioè considerando valori di  $f$  relativamente bassi;  $m$ , invece, aumenta mediante l'introduzione di freni

aerodinamici ( con freni a forcola il valore di  $m$  può arrivare a 0,4, mentre per l'ala ordinaria risulta  $m=0,13\div 0,18$  e con un deflettore semplice si ha  $m=0,20\div 0,22$ ).

Il valore dello spazio di atterraggio, quindi, risulterà dalle seguenti valutazioni:

- *avvicinamento al suolo*: supposto che la pendenza in discesa sia del 2% e che l'aereo si presenti sulla testata pista alla quota di 10,70m, prima di toccare la pista stessa, percorrerà uno spazio  $S_1=535m$ ;
- *manovra*: ammesso che sia  $v_a=250Km/h =69,44m/s$ , lo spazio per raggiungere la posizione cabrata ( $t_m\approx 2s$ ) sarà  $S_2=139m$ ;
- *spazio di rullaggio per la frenatura*: ipotizzando  $f=0,3$  e  $m=0,4$ , risulta, con la formula di Glauert,  $S_3=707m$ .

Complessivamente lo spazio di atterraggio, nel caso in esame, risulta:

$$S_a = 535 + 139 + 707 = 1381m$$

## 1.7. CALCOLO DELLA DISTANZA DI ACCELERAZIONE E ARRESTO

Fase I – Il velivolo, inizialmente fermo in testata pista, sottoposto alla spinta  $T$  dei motori, percorre la pista stessa, inclinata di un angolo  $\alpha$ , accelerando fino a raggiungere la *velocità di decisione*  $V_1$ . Si riporta, di seguito, il calcolo della distanza  $S_1$  percorsa dal velivolo in questa operazione.

La spinta fornita dai motori varia con legge lineare rispetto alla velocità, diminuendo al crescere di quest'ultima:

$$T = T_0(1 - \chi V)$$

essendo:

- $T$ , la spinta totale in kg in un generico istante dal decollo, alla velocità  $V$ ;

- $T_0$ , la spinta totale in kg dei motori *a punto fisso*, ovvero con velivolo fermo ed in assenza di vento;
- $V$ , la velocità in m/s dell'aereo al generico istante  $t$ ;
- $C$ , un coefficiente in  $m^{-1} \text{ sec.}$ , che tiene conto della diminuzione di spinta di tutti i motori per effetto dell'aumento di velocità.

L'equazione del moto accelerato del velivolo che percorre la pista inclinata di  $\alpha$  sull'orizzontale si scrive:

$$\left(\frac{Q}{g}\right)\left(\frac{dV}{dt}\right) = T - R - Q \sin \alpha - f(Q \cos \alpha - P)$$

dove:

- $Q$  è il peso in kg dell'aereo che decolla;
- $g$ , l'accelerazione di gravità;
- $R$ , la resistenza aerodinamica;
- $f$ , il coefficiente di resistenza al rotolamento;
- $P$ , la portanza dell'aereo alla velocità  $V$ .

**Commento [v.v3]:** Vedi ESDU

In considerazione delle modeste pendenze ammesse per le piste di volo, può risciversi:

$$\left(\frac{Q}{g}\right)\left(\frac{dV}{dt}\right) = T - R - iQ - f(Q - P)$$

avendo posto:  $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx i$  (pendenza della pista) e  $Q \cos \alpha \approx Q$ .

Riportiamo le espressioni della resistenza e della portanza relative alla configurazione del velivolo nella prima fase di corsa a terra:

$$P = \frac{1}{2} \rho C'_p S V^2$$

$$R = \frac{1}{2} \rho C'_r S V^2$$

I coefficienti  $C'_p$  e  $C'_r$  sono relativi alla medesima configurazione del velivolo e sono deducibili dalla *curva polare del velivolo* in corrispondenza dello stesso angolo di apertura degli ipersostentatori. Sostituendo le espressioni di R e P nell'equazione del moto si ottiene:

$$\left(\frac{Q}{g}\right)\left(\frac{dV}{dt}\right) = T_0(1 - \chi V) - \frac{1}{2}\rho(C'_r S V^2) - iQ - f\left(Q - \frac{1}{2}\rho(C'_p S V^2)\right)$$

da cui si ricava:

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{T_0}{Q}\right)g(1 - \chi V) - \frac{1}{2}g\rho C'_r\left(\frac{S}{Q}\right)V^2 - ig - \left(\frac{gf}{Q}\right)\left(Q - \frac{1}{2}\rho(C'_p S V^2)\right)$$

in cui:

- $(T_0/Q) = \tau_0$ , spinta totale per unità di peso, nel caso di aereo a punto fisso
- $Q/S = q$  [kg/m<sup>2</sup>] esprime il carico alare

Con le opportune sostituzioni e semplificazioni si ottiene:

$$\frac{dV}{dt} = g[\tau_0 - (i + f)] - \tau_0 V g \chi - \left[\frac{(C'_r - f C'_p)}{2q}\right] \rho g V^2$$

Ponendo:

$$\begin{aligned} g[\tau_0 - (i + f)] &= m_1 \\ g\chi\tau_0 &= n_1 \\ \rho g \left[\frac{(C'_r - f C'_p)}{2q}\right] &= r_1 \end{aligned}$$

l'equazione differenziale si semplifica a:

$$\frac{dV}{dt} = m_1 - n_1 V - r_1 V^2$$

la velocità  $V$  può esprimersi in funzione della velocità di stallo  $V_s$  mediante un opportuno coefficiente riduttivo  $f$ , per cui risulta:  $V = f V_s$ .

Per determinare la lunghezza del tratto di pista percorso dal velivolo si considera

l'espressione dello spazio percorso nel generico istante  $dt$ :

$$\begin{aligned} ds &= V(t) dt \\ dt &= dV / (m_1 - n_1 V - r_1 V^2) \\ ds &= \frac{V(t)}{(m_1 - n_1 V - r_1 V^2)} \cdot dV \end{aligned}$$

da cui, integrando nel dominio della velocità:

$$S_1 = \int_0^{t_1} V dt = \int_0^{V_1} (V dv) / (m_1 - n_1 V - r_1 V^2)$$

con opportuno cambio di variabile:

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_0^{\varphi_1} \frac{(\varphi V_s) d(\varphi V_s)}{(m_1 - n_1 \varphi V_s - r_1 \varphi^2 V_s^2)} = -\frac{V_s^2}{r_1 V_s^2} \int_0^{\varphi_1} \frac{\varphi d\varphi}{\left( \frac{r_1 \varphi V_s^2}{r_1 V_s^2} + \frac{n_1 \varphi V_s}{r_1 V_s^2} - \frac{m_1}{r_1 V_s^2} \right)} \\ S_1 &= -\frac{1}{r_1} \int_0^{\varphi_1} \frac{\varphi d\varphi}{\varphi^2 + \frac{n_1}{r_1 V_s} \varphi - \frac{m_1}{r_1 V_s^2}} \end{aligned}$$

si pone:

$$\begin{aligned} a &= \frac{n_1}{r_1 V_s}; \\ b &= \frac{m_1}{r_1 V_s^2}. \end{aligned}$$

da cui:

$$S_1 = -\frac{1}{r_1} \int_0^{\varphi_1} \varphi d\varphi / (\varphi^2 + a\varphi - b)$$

Dette  $x'_1$  e  $x'_2$  le radici dell'equazione al denominatore si ha:

$$\frac{\varphi}{(\varphi^2 + a\varphi - b)} = \frac{\varphi}{(\varphi - \xi'_1)(\varphi - \xi'_2)}$$

Siano  $A$  e  $B$  due costanti tali che risulti:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi}{(\varphi - \xi'_1)(\varphi - \xi'_2)} &= \frac{A}{(\varphi - \xi'_1)} + \frac{B}{(\varphi - \xi'_2)} = \\ &= \frac{A(\varphi - \xi'_2) + B(\varphi - \xi'_1)}{(\varphi - \xi'_1)(\varphi - \xi'_2)} = \frac{A\varphi + B\varphi - A\xi'_2 - B\xi'_1}{(\varphi - \xi'_1)(\varphi - \xi'_2)} \end{aligned}$$

ovvero:

$$A\varphi + B\varphi - A\xi'_2 - B\xi'_1 = (A + B)\varphi - A\xi'_2 - B\xi'_1 = \varphi$$

$A$  e  $B$  assumeranno, dunque, le espressioni:

$$\begin{cases} A + B = 1 \\ A\xi'_2 + B\xi'_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{\xi'_1}{\xi'_1 - \xi'_2} \\ B = -\frac{\xi'_2}{\xi'_1 - \xi'_2} \end{cases}$$

per cui l'integrale assume la forma:

$$\int_0^{\varphi_1} \varphi \, d\varphi / (\varphi^2 + a\varphi - b) = \int_0^{\varphi_1} \left[ \left( \frac{\xi'_1}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot \frac{1}{\varphi - \xi'_1} \right) - \left( \frac{\xi'_2}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot \frac{1}{\varphi - \xi'_2} \right) \right] d\varphi$$

risolvendo:

$$\begin{aligned} \int_0^{\varphi_1} \varphi \, d\varphi / (\varphi^2 + a\varphi - b) &= \frac{\xi'_1}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot [\ln(\varphi - \xi'_1)]_0^{\varphi_1} - \frac{\xi'_2}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot [\ln(\varphi - \xi'_2)]_0^{\varphi_1} = \\ &= \frac{\xi'_1}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot [\ln(\varphi_1 - \xi'_1) - \ln(-\xi'_1)] - \frac{\xi'_2}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot [\ln(\varphi_1 - \xi'_2) - \ln(-\xi'_2)] = \\ &= \frac{1}{\xi'_1 - \xi'_2} \cdot \left[ \ln\left(\frac{\xi'_1 - \varphi_1}{\xi'_1}\right) \xi'_1 - \ln\left(\frac{\xi'_2 - \varphi_1}{\xi'_2}\right) \xi'_2 \right] \end{aligned}$$

in definitiva:

$$S_1 = -\frac{1}{r_1(\xi'_1 - \xi'_2)} \cdot \left[ \ln\left(1 - \frac{\varphi_1}{\xi'_1}\right) \xi'_1 - \ln\left(1 - \frac{\varphi_1}{\xi'_2}\right) \xi'_2 \right]$$

Fase II – Il caso estremo è che il guasto si verifichi in corrispondenza della velocità di decisione  $v_j$ . In questa condizione il pilota decide ancora di abortire il decollo e arrestare il velivolo sulla parte di pista non percorsa. Il moto del

velivolo, superata la  $v_1$  è ancora rettilineo uniformemente accelerato, ma la spinta, e di conseguenza l'accelerazione, saranno ridotte a causa dell'avaria intervenuta. Si tiene conto di ciò mediante un opportuno coefficiente riduttivo che moltiplica la spinta per unità di peso:

$$\begin{aligned} m_2 &= g[\mu\tau_0 - (i + f)] \\ n_2 &= \mu g \chi \tau_0 \\ r_2 &= \rho g \left[ \frac{(C'_r - fC'_p)}{2q} \right] = r_1 \end{aligned}$$

Si osserva che  $r_2$  non varia in quanto dipende solo dall'assetto del velivolo e non dalla spinta fornita dai motori. Si ricava, dunque, la distanza  $S_2$  percorsa dal velivolo dal momento in cui si manifesta l'avaria al motore critico e che, per il caso più gravoso ai fini del calcolo dell'*ASD (Accelerate Stop Distance)* richiesta dal velivolo, coincide con il momento in cui il velivolo raggiunge la velocità  $V_1$ . Dall'equazione del moto accelerato, tralasciando i passaggi già esplicitati, si ottiene l'espressione dell'accelerazione per la fase II:

$$a_2^i = \left( \frac{dV}{dt} \right)_2^i = m_2^i - n_2^i V - r_2^i V^2$$

e, quindi:

$$dt = dV / (m_2^i - n_2^i V - r_2^i V^2)$$

Esprimendo la velocità in funzione della  $V_s$ , i valori relativi agli estremi del tratto percorso in questa seconda fase sono:

$$\begin{aligned} V_1 &= \phi_1 V_s ; \\ V_2^i &= \phi_2^i V_s . \end{aligned}$$

**Commento [v.v4]:** NB qui ho considerato il caso peggiore, sul libro di teocchetti si tratta il caso generale, calcolando la  $V_1$ , cioè la velocità a cui si manifesta l'avaria.

in cui il termine  $f_2^i$ , che indica il rapporto tra la velocità di stallo e la velocità raggiunta dal velivolo prima di iniziare la procedura di arresto, si determina a partire dall'espressione del tempo relativo alla fase II:

$$t_2^i = \frac{1}{\xi_1'' - \xi_2''} \cdot \ln \frac{(\varphi_2^i - \xi_1'')(\varphi_1 - \xi_2'')}{(\varphi_2^i - \xi_2'')(\varphi_1 - \xi_1'')}$$

Il tempo  $t_2^i$  è il tempo che il pilota impiega per avviare la procedura di arresto del velivolo. Fissato tale valore dalla relazione precedente è possibile ricavare l'unica incognita presente, ovvero  $f_2^i$ ; le altre grandezze sono tutte determinate:

- $f_1$  è il rapporto tra velocità di stallo e velocità di decisione, entrambe deducibili dalle caratteristiche del velivolo;
- $x''_1$  e  $x''_2$  dipendono, attraverso  $m_2$ ,  $n_2$  e  $r_2$  dalla pendenza della pista, il coefficiente di aderenza e dall'efficienza aerodinamica del velivolo.

Nota il valore di  $f_2^i$  si può calcolare la distanza percorsa dal velivolo nella fase II:

$$\begin{aligned} S_2^i &= -\frac{1}{r_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2^i} \frac{\varphi d\varphi}{\varphi^2 + \frac{n_2^i \varphi}{r_2^i V_s} - \frac{m_2^i}{r_2^i V_s^2}} = \\ &= -\frac{1}{r_2^i (\xi_1'' - \xi_2'')} \cdot \left( \xi_1'' \ln \frac{1 - \varphi_2^i / \xi_1''}{1 - \varphi_1 / \xi_1^i} - \xi_2'' \ln \frac{1 - \varphi_2^i / \xi_2''}{1 - \varphi_1 / \xi_2^i} \right) \end{aligned}$$

In alternativa, si può adottare un calcolo semplificato: la velocità  $V_2^i$  è la velocità raggiunta dal velivolo nel tempo necessario al pilota per iniziare la fase di frenatura. Il tempo di reazione può assumersi tanto breve da ammettere che l'accelerazione  $a_2^i$  è costante nel tratto percorso in questa seconda fase. Risulta, dunque:

$$V_2^i = V_1 + a_2^i \cdot t_2^i$$

dove:

- $V_1$ , velocità alla quale si manifesta l'avaria al motore critico (coincidente, nel caso estremo, con la velocità di decisione);
- $a'_2$ , accelerazione durante la fase II, ritenuta costante in virtù dei brevi tempi di reazione ipotizzabili necessari al pilota per avviare la procedura di arresto;
- $t'_2$ , tempo intercorrente tra l'avaria e l'avvio della procedura di arresto del velivolo.

La distanza percorsa può trovarsi mediante:

$$S_2^i = t_2^i \left( V_1 + \frac{V_2^i}{2} \right)$$

Fase III – La terza fase prevede l'arresto del velivolo mediante l'utilizzo dei freni. Il moto si svolge in modo sostanzialmente identico a quanto avviene nella fase di rullaggio e frenatura nella manovra di atterraggio, con la differenza che gli estremi di integrazione dell'equazione differenziale del moto sono, in questo caso, rappresentati dalla velocità di decisione (anziché la velocità minima di sostentamento) e, analogamente all'atterraggio, dalla velocità nulla.

## 2 FATTORI CHE INFLUENZANO LE CARATTERISTICHE DI ADERENZA

### 2.1. LE CONDIZIONI SUPERFICIALI DELLE PISTE DI VOLO

Le caratteristiche *funzionali* esprimono la capacità di una pista di supportare in sicurezza le operazioni che si svolgono su di essa e consentire che esse si svolgano nel rispetto del comfort degli utenti. E' importante, a tale scopo, la valutazione della *regolarità* e dell'*aderenza*. Entrambe sono legate all'andamento del profilo longitudinale della sovrastruttura, ma dipendono da fattori che si manifestano su diversa scala. Così, ad esempio, su una pista che presenta un'adeguata regolarità superficiale può operare un velivolo con alte velocità di decollo e atterraggio senza il pericolo che brusche variazioni di assetto provochino senso di disagio nei passeggeri o, addirittura, ne compromettano la stabilità e, quindi, la sicurezza. Le caratteristiche *prestazionali* devono, poi, essere commisurate all'utilizzo che si fa dell'infrastruttura; ad esempio, una pista in terra può essere adeguata per le operazioni di un velivolo da trasporto tattico militare, ma assolutamente inadatta per velivoli militari da combattimento.

In relazione alle condizioni superficiali di una pista, devono essere valutate le caratteristiche geometriche, che caratterizzano fisicamente l'infrastruttura, e la presenza di *contaminanti*, che possono inficiare, anche sensibilmente, le prestazioni dei velivoli.

## 2.2. LA PRESENZA DI CONTAMINANTI

L'interazione velivolo/pista dipende sensibilmente dalla presenza di materiale di diversa natura che, interponendosi tra pneumatico e sovrastruttura, influenza il comportamento all'interfaccia. La prima classificazione relativa ai diversi materiali estranei presenti su una pista distingue *contaminanti* e *detriti*; i primi sono depositi (come neve, neve sciolta, ghiaccio, acqua stagnante, fango, polvere, sabbia, olio e gomma) su una pavimentazione aeroportuale, il cui effetto è dannoso per le caratteristiche di aderenza di quest'ultima; un detrito è un frammento di materiale sciolto (come sabbia, pietre, carta, legno, metalli e frammenti della pavimentazione), che è dannoso per le strutture o i motori del velivolo, ovvero può compromettere l'efficienza dei sistemi dell'aeroplano se impatta contro parti strutturali o se è risucchiato nei motori. Il danno causato dai detriti è anche conosciuto come F.O.D. (Foreign Object Damage). In questa sede ci si limita alla trattazione delle problematiche relative ai contaminanti. Gli effetti di questi ultimi afferiscono sia la fase di decollo sia la fase di atterraggio. Nella prima, la presenza di contaminanti determina un effetto frenante per la corsa del velivolo, che nei casi estremi potrebbe essere incompatibile con la lunghezza della pista disponibile. In questa ipotesi si potrebbe intervenire limitando il carico pagante e, conseguentemente, la distanza di decollo richiesta. Nel secondo caso, in modo più evidente, la distanza di atterraggio viene sensibilmente incrementata per via dell'abbattimento dei valori di aderenza di una pista interessata da contaminanti. In presenza di acqua o nevischio, inoltre, diventa consistente il pericolo di *flame out* dei motori conseguente all'ingestione del contaminante che viene sollevato per effetto *spray* durante la corsa del velivolo. Tali considerazioni inducono a preferire procedure volte ad eliminare i contaminanti presenti sulla

Commento [v.v5]: Vedi Asm

pista, piuttosto che impiegare risorse nella determinazione accurata dei valori di aderenza della pista di volo.

### **2.3. L'AQUAPLANING**

In presenza di una pista bagnata o con consistenti spessori d'acqua, il moto può avvenire in due condizioni differenti. L'aderenza "normale" è la situazione in cui, a causa della presenza di acqua su una pista, il coefficiente di aderenza è ridotto al di sotto di quello disponibile sulla pista quando essa è asciutta. Questo perché l'acqua non può essere completamente espulsa dalla zona compresa tra il pneumatico e la pavimentazione e, di conseguenza, il contatto tra pneumatico e pavimentazione è solo parziale. C'è, conseguentemente, una marcata riduzione della forza che si oppone al moto relativo tra pneumatico e pavimentazione poiché il restante contatto si esplica tra pneumatico e acqua, inefficace a trasferire sforzi tangenziali. Un coefficiente di aderenza accettabile su una pista bagnata o coperta d'acqua è, quindi, possibile se si rimuove o si rompe il film d'acqua che tende a separare pneumatico e pavimentazione. Al crescere della velocità diminuiscono il tempo di contatto e, quindi, quello disponibile per far completare il processo di espulsione dell'acqua; il coefficiente di aderenza, in definitiva, tende a diminuire al crescere della velocità.

Una seconda possibilità che può verificarsi è il fenomeno dell'*aquaplaning*, definita dal fatto che gli pneumatici dell'aeroplano sono per larga parte separati dalla superficie della pista dal film di acqua. In queste condizioni, il coefficiente di aderenza diventa trascurabile e le azioni frenante e sterzante della ruota sono virtualmente inefficaci. In letteratura si definiscono tre tipi di aquaplaning, due legati alle modalità con cui nell'acqua del film si genera una pressione e l'altro

legato alla vulcanizzazione della gomma delle ruote. In generale, la riduzione dell'aderenza su una superficie quando essa è bagnata e la riduzione dell'aderenza all'aumentare della velocità dell'aeroplano, sono spiegati dall'effetto combinato della pressione viscosa e dinamica a cui è soggetta l'interfaccia pneumatico/superficie. L'interpretazione teorica dei fenomeni che portano all'instaurarsi dei regimi di pressione descritti è riportata al paragrafo 1.4, in cui si distingue una zona di pressione dinamica e una zona di pressione viscosa.

In caso di aquaplaning viscoso, la perdita di aderenza può manifestarsi a velocità relativamente basse, a causa dell'effetto della viscosità che impedisce all'acqua di allontanarsi da sotto l'impronta del pneumatico. Comunque, è necessaria una pista con una superficie molto liscia e tale condizione si può riscontrare nelle aree che sono state ricoperte dalla gomma depositata dagli pneumatici durante la fase di toccata o in zone soggette all'azione levigatrice del traffico. L'aquaplaning viscoso è associato alle piste umide e bagnate e a quelle ricoperte da ghiaccio non secco e, una volta attinto, può persistere fino a velocità molto basse. L'aquaplaning viscoso può manifestarsi durante la fase di frenatura, di decollo mancato o di rullaggio a terra.

L'aquaplaning dinamico si manifesterà ad una determinata velocità che è funzione della pressione del pneumatico. Il fenomeno dipende dall'effetto inerziale dell'acqua per cui la pressione verso il basso del pneumatico (pari alla pressione di gonfiaggio) non è sufficiente a spostare l'acqua dalla superficie di impronta nel breve tempo di contatto. L'aquaplaning dinamico può verificarsi su una pista con una macrotessitura inadeguata per velocità inferiori alla velocità critica di aquaplaning, a condizione che sia presente un'altezza del fluido sufficiente. Esso è associato alla copertura della pista con un'altezza del fluido apprezzabile e si

manifesta ad una velocità che è direttamente funzione della pressione di gonfiaggio. Più alta è la pressione di gonfiaggio più alta è la velocità cui si manifesta l'aquaplaning dinamico. Comunque, l'effetto negativo di un'eccessiva pressione di gonfiaggio sarà quello che l'aderenza sul bagnato in generale diminuirà nel campo di velocità fino all'aquaplaning. L'aquaplaning dinamico si manifesta con le alte velocità dell'atterraggio e della corsa a terra durante il decollo. Si è riscontrato che uno spessore di soli 0,5 mm di acqua è sufficiente per generare l'aquaplaning dinamico. Questa altezza d'acqua, relativamente modesta, può formarsi durante violenti temporali oppure nelle pozzanghere dovute alle irregolarità della superficie.

Il fenomeno del *rubber reversion* presenta ancora molti aspetti non chiariti, ma gli orientamenti attuali indicano che il vapore surriscaldato che viene generato tra l'impronta del pneumatico e la superficie della pista ad una temperatura di circa 200°C provoca la fusione dell'area di battistrada interessata. Un'ipotesi è che la gomma fusa funga da sigillante impedendo l'allontanamento del vapore ad alta pressione. In seguito ad incidenti in cui si è accertato si sia verificato il *rubber reversion*, si è potuto osservare sulla superficie della pista le impronte bianche tipiche dell'azione di ripulitura del vapore. Il *reverted rubber aquaplaning* può svilupparsi in ogni situazione e ad ogni velocità quando il pneumatico avanza in assenza di rotolamento (a ruota frenata o no) per un periodo di tempo prolungato. Di conseguenza, evitare il bloccaggio delle ruote diventa una contromisura importante per impedire questo fenomeno.

## 2.4. L'AQUAPLANING DINAMICO: LA VELOCITÀ CRITICA

Esistono due criteri in base ai quali definire l'instaurarsi del fenomeno di aquaplaning e, di conseguenza, altrettanti sono i criteri in base a cui definire la velocità critica alla quale il fenomeno si manifesta. Se la velocità di aquaplaning è definita come quel punto in cui la curva, che rappresenta l'andamento della resistenza offerta dal fluido rispetto alla velocità, attinge il suo massimo, questa non coinciderà con la velocità, attinta la quale, il pneumatico cessa di rotolare. Aldilà degli aspetti formali, ai fini pratici, ciò che interessa è sapere quando il grip tra pneumatico e pavimentazione è insufficiente a garantire il rotolamento della ruota. In questa condizione risulta ormai impegnata (e superata) tutta l'aderenza disponibile e, di conseguenza, da questo punto in poi, non è possibile effettuare alcun tipo di frenata. E' probabile che vi sia ancora un contatto residuo con la pavimentazione, ma insufficiente, alla velocità in esame, a garantire il rotolamento della ruota. Quando nessuna parte del pneumatico è in contatto con la pavimentazione, la velocità si avvicina di più al punto in cui la resistenza del fluido cessa di aumentare (cioè al picco della curva continua in Fig. 2-1).

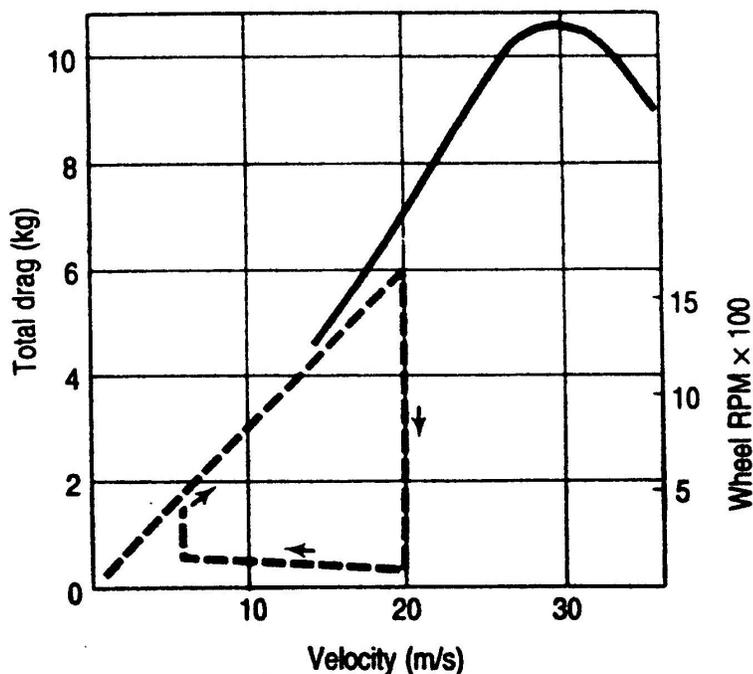


Fig. 2-1 Andamento della resistenza e della velocità di rotazione in funzione della velocità di traslazione in condizioni di aquaplaning

E' stato stabilito sperimentalmente che la situazione di aquaplaning dinamico può ritenersi instaurata ad una velocità che è funzione della pressione di gonfiaggio del pneumatico espressa in kPa:

$$v_{cr} = (624 \cdot p) Km / h$$

$$v_{cr} = (356 \cdot p) Kt$$

Il fenomeno presenta ancora oggi aspetti non completamente chiariti. Si è riscontrato, inaspettatamente, durante prove di aderenza con un aeroplano dotato di strumentazioni adeguate, in corrispondenza delle condizioni di aquaplaning, un valore del coefficiente di aderenza pari a 0,05 misurato a freni azionati. La registrazione della velocità della ruota ha mostrato che vi era una resistenza al

rotolamento insufficiente a far rotolare la ruota ogni volta che il freno automatico entrava in funzione.

L'aquaplaning è un fenomeno instabile: una volta attinta e superata la velocità critica, prima che la ruota rotoli nuovamente rispetto al suolo, essa deve essere rallentata ben al di sotto della velocità di innesco del fenomeno. Questo fenomeno è chiaramente mostrato in tests con una ruota da 23 cm di diametro condotti dall'Università di Bristol come mostrato in Fig. 2-1.

Si noterà che, per una pressione di 206,8 kPa e un peso di 90 Kg, il pneumatico attinge l'aquaplaning approssimativamente a 23 m/s ma non riprende velocità al suolo finché la velocità non viene ridotta a 9 m/s. Una variazione del carico sulla ruota fa variare anche la sua velocità di aquaplaning, se si assume che quest'ultima sia la velocità a cui la ruota cessa di rotolare.

## **2.5. EFFETTO DELLO SPESSORE DEL FILM D'ACQUA SULL'AQUAPLANING**

Al fine di determinare come lo spessore d'acqua necessario per l'insorgere del fenomeno di aquaplaning varia con la scabrezza delle superfici, lo "United Kingdom College of Aeronautics" ha condotto una serie di test su pavimentazioni in calcestruzzo trattate superficialmente con spazzole (non metalliche) o scanalate (*grooved*). Ricreando delle pozzanghere d'acqua sulle superfici in corrispondenza delle wheel track e attraverso un sensore di misura posizionato nella pista, è stato possibile determinare l'altezza da terra di un pneumatico in aquaplaning sulla pista. La Fig. 2-2 è stata ottenuta diagrammando lo spessore dello strato di acqua in funzione dell'altezza del pneumatico sulla pista.

Si è potuto verificare che, una volta instauratosi l'aquaplaning, per esempio in corrispondenza di una pozzanghera, il pneumatico non riprende contatto con la pista in presenza di più di 0,6 mm di acqua se, con superficie in calcestruzzo trattato con spazzole, la pressione del pneumatico è pari a 827 kPa. Maggiore è la pressione, maggiore è lo spessore dello strato d'acqua necessario per l'aquaplaning. Inoltre, maggiore è la rugosità della macrotestitura superficiale, maggiore è lo spessore d'acqua necessario a mantenere le condizioni di aquaplaning. Queste prove hanno anche rivelato che il fenomeno può instaurarsi in millisecondi dal momento in cui si attinge lo spessore critico di acqua. La predisposizione di un buon drenaggio superficiale e di un'opportuna scabrezza sono i requisiti essenziali per minimizzare il rischio di aquaplaning e per migliorare, globalmente, le caratteristiche di aderenza.

Poiché lo spessore d'acqua iniziale varia con la scabrezza superficiale, è importante monitorare questa caratteristica con metodi standardizzati. L' *"Airport Service Manual"*, in tal senso, considera il metodo dell'altezza equivalente in sabbia o grasso. Dall'Annesso 14, invece, ricaviamo la prescrizione che la profondità della macrotestitura misurata per una superficie nuova o ripavimentata non deve essere inferiore ad 1 mm.

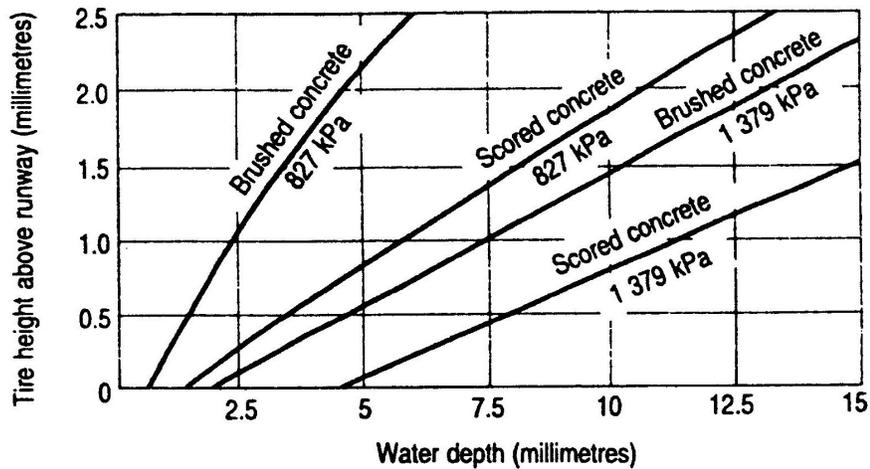


Fig. 2-2 Distanza del pneumatico dalla superficie in condizioni di aquaplaning

## 2.6. LA RUGOSITÀ SUPERFICIALE

Nel paragrafo 1.4 è stata descritta l'interazione tra pneumatico e sovrastruttura in presenza di acqua. Quest'ultima riesce ad esplicare i suoi effetti solo attraverso sforzi normali, essendo impossibile la reazione a sforzi di taglio. D'altra parte, perché l'acqua possa andare in pressione, sarebbe necessario un confinamento della stessa. Sebbene pneumatico e sovrastruttura non ricreino realmente tale situazione, l'azione combinata di velocità, macrotessitura della superficie e scolpitura del pneumatico, simula l'effetto di confinamento necessario a instaurare il regime di pressioni in grado di influenzare il comportamento del pneumatico in movimento sulla pista.

E' chiaro che l'aquaplaning dinamico e viscoso si manifesteranno solo se vi è uno spessore d'acqua sulla pista tale da non poter essere rimossa dall'area di impronta del pneumatico abbastanza velocemente da permettere un contatto "asciutto". Questo diventa allora un problema di drenaggio ed è principalmente legato macrotessitura della pista, mentre la scolpitura del battistrada contribuirà

relativamente poco al drenaggio dell'impronta del pneumatico. Un pneumatico con una scolpitura adeguata fornisce ulteriori canali di drenaggio la cui efficacia, comunque, diminuisce con il consumarsi della scolpitura. Attualmente si concorda sul fatto che il rischio di aquaplaning può essere fortemente abbattuto fornendo una micro e macrotessitura adeguate alla superficie della pista di volo. Ulteriori approfondimenti a riguardo si ritrovano nell' *"Airdrome design Manual, Part 3 – Pavements"*.

## **2.7. LA REGOLARITÀ**

In considerazione della pericolosità della presenza di acque meteoriche sulla pista di volo, si è già detto che è necessario favorirne l'allontanamento attraverso un adeguato drenaggio e una sufficiente rugosità. Il primo si ottiene mediante la realizzazione di una sezione trasversale con opportune pendenze, tra l'altro prescritte dalle normative sia italiana (Regolamento E.N.A.C.) sia internazionale. Le stesse normative impongono anche il rispetto di limiti sulle pendenze longitudinali, tali da impedire la formazione di impluvi in cui l'acqua possa ristagnare. A causa, però del deterioramento della superficie possono crearsi pericolosi avvallamenti, in cui si formano, specialmente durante eventi meteorologici importanti, pozzanghere in grado di provocare l'aquaplaning. In base a tali considerazioni, così come verrà nel seguito meglio specificato, assumono importanza i rilievi effettuati in condizioni di pioggia naturale, in quanto mettono in evidenza problematiche non rilevabili con metodi standardizzati.

# 3 IL MONITORAGGIO DELLE CARATTERISTICHE DI ADERENZA

## 3.1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

L'I.C.A.O., ha dedicato l'intera parte 2 dell'"*Airport Service Manual*" al monitoraggio e alla gestione condizioni superficiali delle piste di volo in cui sono trattate a largo spettro le problematiche relative alla manutenzione. In particolare, in relazione al monitoraggio delle caratteristiche di aderenza, vengono definite prescrizioni operative connesse con limiti dei valori riscontrabili da campagne prove. Come verrà descritto in seguito, in base ai valori riscontrati, l'I.C.A.O. prevede la segnalazione delle scarse caratteristiche di aderenza ai naviganti attraverso appositi NOTAM, la programmazione della manutenzione delle superfici di volo, ovvero l'immediato intervento volto al ripristino delle caratteristiche di aderenza. Altra importante indicazione fornita dall'"*Airport Service Manual*" è relativa alla correlazione esistente tra i vari strumenti di misura presenti sul mercato. Ne deriva, in sostanza, che, per la valutazione dell'aderenza, può essere utilizzato uno degli strumenti segnalati dall'I.C.A.O. oppure sarà cura dell'Autorità Aeroportuale effettuare e mettere a disposizione degli utenti uno studio atto a correlare lo strumento utilizzato con quelli già approvati.

La *Federal Aviation Administration* tratta il problema dell'aderenza nella *Advisory Circular 150/5320-12C - "MEASUREMENT, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF SKID-RESISTANT AIRPORT PAVEMENT SURFACES"* .

Tra i vari aspetti trattati, che in definitiva recepiscono nell'ambito della regolamentazione U.S.A. le raccomandazioni I.C.A.O., in questa sede viene specificata una frequenza delle operazioni di monitoraggio che, non essendo altrove indicata, viene presa a riferimento anche in ambito internazionale.

Proprio dall'analisi delle prescrizioni contenute nell' *"Airport Service Manual"* e nell'*AC 150/5320-12C* è stata redatta la circolare E.N.A.C. APT-10 "Rilevazione dei valori di aderenza delle piste di volo in presenza di acqua". In particolare, del primo documento sono state recepite le prescrizioni operative, i valori di soglia per i vari provvedimenti che ne conseguono e la correlazione tra i vari strumenti. Del secondo, invece, è stata recepita la tabella che fornisce la frequenza con cui devono essere effettuati i monitoraggi in funzione del traffico presente sull'aeroporto.

### **3.2. I "PLANNING LEVELS": LA MANUTENZIONE E LA SICUREZZA DELLE OPERAZIONI**

Come già descritto, la valutazione della sicurezza relativa all'effetto frenante ottenibile su una pista di volo si effettua mediante il confronto tra un valore sperimentale ricavato da campagne prova e un valore di riferimento. Questa operazione, per quanto semplice dal punto di vista concettuale, necessita di una procedura ben articolata e capace di distinguere vari livelli di sicurezza in funzione dei quali adottare una serie di provvedimenti via via più restrittivi con il deteriorarsi delle caratteristiche superficiali della pista. Tali provvedimenti variano dalla pubblicazione in AIP dei valori di aderenza in condizioni "wet", all'emissione di NOTAM, alla programmazione di interventi manutentivi, all'esecuzione immediata di questi ultimi, alla chiusura della pista in condizioni

critiche per l'aderenza. In considerazione di quanto detto, sono definiti tre differenti valori per tre condizioni differenti:

- a) *Un valore di progetto che stabilisce il minimo livello di aderenza per una pista nuova o ripavimentata;*
- b) *Un livello di manutenzione, al di sotto del quale devono essere programmate azioni manutentive;*
- c) *Un livello minimo di aderenza al di sotto del quale deve essere reso noto che la pista bagnata può essere sdrucchiolevole e devono effettuarsi gli opportuni interventi manutentivi.*

Il primo definisce il valore dell'aderenza superficiale di progetto per una pavimentazione nuova o una pista ripavimentata. Il secondo definisce il livello, attinto il quale, è necessario pianificare un intervento di manutenzione volto al ripristino delle caratteristiche di aderenza. Attinto il terzo livello non è possibile rimandare oltre gli interventi.

La definizione dei "planning levels" è attualmente affidata all'I.C.A.O., in modo che ogni aeroporto possa fornire informazioni standardizzate sulle condizioni della pista di volo agli utilizzatori delle infrastrutture. Ai fini delle informazioni ai naviganti, il format dell'informazione prevede che la pista sia divisa in tre tratti, rispettivamente A, B e C. Allo scopo di segnalare le informazioni alle unità di servizio aeronautico, il segmento A è sempre associato con il numero identificativo di pista più basso. Nel fornire, invece, indicazioni al pilota prima dell'atterraggio, ci si riferisce ai segmenti come alla prima, seconda o terza parte della pista. La prima parte indica sempre il primo terzo della pista che l'aeroplano incontra in atterraggio.

### 3.3. SEGNALAZIONI

In considerazione dell'influenza sulle condizioni di sicurezza, l'I.C.A.O. stabilisce che è necessario segnalare la presenza di neve, neve sciolta o ghiaccio su una pista o su una taxiway. Per riuscire a segnalare contaminanti meteorologici con un certo grado di affidabilità e coerenza, si deve stabilire un metodo uniforme per descriverli. Si riportano, di seguito, le definizioni di neve sciolta e neve inserite nell'Annesso 14, Volume 1.

Slush. Neve satura d'acqua che se calpestata violentemente viene spostata con uno spruzzo; densità relativa: da 0,5 a 0,8.

*Nota. – Le combinazioni di ghiaccio, neve e/o acqua persistente possono, specialmente in presenza di pioggia, nevischio o neve, produrre sostanze con densità relative maggiori di 0,8. Tali sostanze, a causa del loro alto contenuto in ghiaccio e acqua, avranno un aspetto più trasparente che opaco e, all'aumentare della densità relativa, sarà chiaramente distinguibile dalla neve sciolta.*

Neve (posata)

Neve secca. Neve che può essere spazzata dal vento se fresca o, se compattata con le mani, si separa nuovamente al suo rilascio; densità relativa: minore di 0,35 non incluso.

Neve bagnata. Neve che, se compattata con le mani, si tiene insieme e tende a formare una palla di neve; densità relativa: da 0,35 a 0,5 non incluso.

Neve compatta. Neve che è stata compressa in una massa solida che resiste ad ulteriori compressioni restando compatta o si frantuma in pezzi tozzi se sollevata; densità relativa: 0,5 e oltre.

Nel riportare la presenza di "slush", neve secca, bagnata o neve compatta su una pista, si dovrebbe effettuare anche una valutazione dello spessore medio per ogni segmento della pista di lunghezza pari ad un terzo della stessa con

un'approssimazione di 0,3 cm per lo “*slush*”, di circa 2 cm per neve secca, 1 cm per neve bagnata.

Se è previsto che le operazioni si svolgano in presenza di precipitazioni nevose, oltre ad un apposito piano aeroportuale finalizzato alla rimozione della neve, sarà necessario monitorare frequentemente il coefficiente di aderenza riscontrabile in pista tra un'operazione di rimozione e la successiva.

Prima di definire la metodologia di utilizzo dei valori di aderenza ai fini operativi, e cioè mettere i piloti a conoscenza delle condizioni della superficie della pista, è necessario riflettere sul fatto che l'informazione da fornire al pilota deve essere per sintetica e tale da permettere a quest'ultimo di non trovarsi ad affrontare una situazione inattesa. A poco servirebbe, in tal senso, comunicare al pilota i valori letti da uno strumento a terra, in considerazione del fatto che il dato “grezzo” è necessariamente correlato al progetto e alla costruzione dello strumento di misura dell'aderenza, alle condizioni della pavimentazione che deve essere testata e dalla velocità tenuta durante la prova. Un esempio è riportato nella Tabella 3-1, estratta dall'*A.S.M. I.C.A.O.* e sviluppata da dati di aderenza raccolti solo con neve compatta e ghiaccio; per quanto detto in precedenza non dovrebbe, quindi, essere considerata in termini di valori di  $\mu$  assoluti validi per tutte le condizioni di contaminanti. Se la pavimentazione è interessata da neve e/o ghiaccio e l'azione frenante è riportata come “*good*”, i piloti dovrebbero attendersi di trovare condizioni non buone come quelle relative ad una pista con la superficie della pavimentazione asciutta e pulita (su cui l'aderenza è ben maggiore in ogni caso). Il valore “*good*” è un valore comparativo e indica che gli aeroplani non dovrebbero presentare difficoltà di controllo direzionale o di frenata durante l'atterraggio.

Di seguito si riportano le procedure di segnalazione delle condizioni della pista previste dall'APT 10 dell'ENAC:

- *Al fine di garantire una idonea ed adeguata informazione agli operatori la Circostrizione Aeroportuale, verificata la conformità dei dati forniti dalla società di gestione aeroportuale con i presenti criteri, assicura l'emissione dell'informazione aeronautica mediante pubblicazione nell'AIP dei livelli minimi di aderenza ammissibili, correlati al tipo di dispositivo di misurazione impiegato. Quando il coefficiente di attrito di una pista scende al di sotto di questo livello pubblicato, la relativa informazione di "slippery runway" è resa nota a cura della Circostrizione Aeroportuale mediante NOTAM. A tal fine i soggetti responsabili della gestione delle infrastrutture di volo devono comunicare alla Circostrizione Aeroportuale i valori di aderenza inferiori al minimo pubblicato determinati durante l'applicazione del programma di verifiche di cui al paragrafo 5 della presente circolare o che dovessero registrarsi per motivi contingenti. I valori di aderenza rilevati vanno comunque comunicati con la frequenza minima di cui all'Appendice B tabella A-4-3<sup>3</sup>, colonna M. L'informazione aeronautica diffusa mediante NOTAM riporterà il valore minimo ammissibile, il valore misurato medio su ciascun terzo di pista, la velocità di rilevamento, il tipo di apparecchiatura impiegato, l'entità della presenza acqua su ciascun terzo di pista (damp, wet, water patches, flooded). Il ritorno a condizioni di aderenza superiori al minimo sarà comunicato con le medesime modalità.*

---

<sup>3</sup> N.B. La circolare APT-10 è riportata in allegato

<b>Measured coefficient</b>	<b>Estimated braking action</b>	<b>Code</b>
<b>0.40 and above</b>	<b>Good</b>	<b>5</b>
<b>0.39 to 0.36</b>	<b>Medium to good</b>	<b>4</b>
<b>0.35 to 0.30</b>	<b>Medium</b>	<b>3</b>
<b>0.29 to 0.26</b>	<b>Medium to poor</b>	<b>2</b>
<b>0.25 and below</b>	<b>Poor</b>	<b>1</b>

Tabella 3-1 Indicazione dell'azione frenante in funzione del coefficiente medio misurato

### **3.4. FINALITÀ E CONDIZIONI DEI RILIEVI**

E' necessario effettuare un distinguo al fine di individuare quali siano le condizioni in cui effettuare i rilievi. Questi possono essere utilizzati per pianificare gli interventi manutentivi oppure per fornire ai piloti informazioni sulle condizioni che troveranno durante l'atterraggio. Nel primo caso il rilievo sarà effettuato in condizioni standard di velocità e con uno spessore del film d'acqua controllato. La frequenza di tali misurazioni si stabilisce così come descritto in seguito. Quando, invece, si osservano condizioni atmosferiche particolari, come intense precipitazioni, specialmente dopo lunghi periodi senza piogge significative, oppure temperature basse e/o precipitazioni nevose è necessario effettuare rilievi in condizioni reali. Questa tipologia di rilievo mette in evidenza problematiche altrimenti non rilevabili, quali, ad esempio, la presenza avvallamenti ovvero l'impossibilità della pista di smaltire altezze di pioggia particolarmente rilevanti. Tali misurazioni possono essere effettuate anche in seguito alle segnalazioni di difficoltà legate alla frenatura degli aeromobili fornite dagli utenti dell'aeroporto.

### 3.5. LOCALIZZAZIONE DEI RILIEVI

Le misure di aderenza sono effettuate lungo due tracce parallele alla pista, cioè una traccia da ogni parte della mezzeria ad approssimativamente 3 m dalla stessa o alla distanza interessata dal maggior numero di operazioni. Lo scopo della prova è di determinare il valore del coefficiente di aderenza  $m$  per i segmenti A, B e C. Nei casi in cui si utilizza uno strumento a misurazione continua, i valori significativi di  $m$  sono ottenuti dai valori di aderenza registrati per ogni segmento. Se si utilizza uno strumento di misura di tipo locale, la distanza tra ciascun punto della prova non deve essere superiore approssimativamente al 10% della lunghezza utilizzabile della pista. Se si è stabilito che una singola linea di prova su ogni lato della pista fornisce un'adeguata copertura della stessa, ne segue che si ricaveranno tre valori per ogni lato. I risultati delle prove e i valori significativi dell'aderenza calcolati, possono essere immessi in un format simile a quello mostrato in [fig. 5.5](#). Quando fattibile, le figure per i valori di aderenza della stopway dovrebbero essere disponibili a richiesta.

Nel riportare la presenza di neve secca, bagnata o neve sciolta su una pista, si dovrebbe effettuare anche una valutazione dell'altezza media dello spessore per ogni segmento della pista di lunghezza pari ad un terzo della stessa con un'approssimazione di circa 2 cm per neve secca, 1 cm per neve bagnata e 0,3 cm per neve sciolta.

Type of equipment	Time	Location	Programme No.			
Date of test	Wind	Direction				
Weather	Condition prior to test					
Runway						
Surface description						
Surface texture tests	Grease (mm)	Water (seconds)				
Position 1						
Position 2						
Position 3						
Tire wear test	Rubber loss (grams)					
Left						
Right						
Total						
Tests conducted by	Towing vehicle (if applicable)					
Method of wetting	Depth of water (mm)					
Length covered by trace	Test speeds					
Starting at	Ending at					
Distance of run from centre line						
Friction results						
Speed km/h	32	65	95	130	145	160
1st third						
Middle third						
3rd third						
Recorder chart reference number and means of identification of individual run and speed:						
Speed km/h	32	65	95	130	145	160
Section of runway 45 m from centre line giving lowest coefficient of friction (excluding paint markings)						

*Note.— The original recorder chart or a print of it must be attached to this form.*

Tabella 3-2 Format per l'acquisizione e l'archiviazione dei dati ricavati durante le prove

### 3.6. LA FREQUENZA DELLE MISURAZIONI

Nell'ipotesi in cui si avessero dati a sufficienza, sarebbe possibile costruire curve di degrado dell'aderenza per ogni aeroporto. Queste, in quanto desunte da rilievi su uno specifico aeroporto, terrebbero conto del traffico presente e di tutte le condizioni ambientali che contribuiscono al degrado delle caratteristiche rilevate.

Dalla conoscenza delle curve di degrado sarebbe possibile pianificare con efficienza gli interventi manutentivi, ovvero intensificare i monitoraggi con l'approssimarsi dei valori rilevati ai valori di soglia.

Quando non fossero disponibili le curve di degrado cui si è fatto riferimento, è possibile rifarsi alla Tabella 3-1 dell'AC 150/5320-12C dell'F.A.A., basata sul numero di atterraggi di velivoli turbo-jet per ogni testata, successivamente ripresa e completata dal documento I.C.A.O. 9137 con il traffico espresso in peso annuale dei velivoli transitati per ogni testata,

Friction maintenance programme schedule based on level of turbo-jet aeroplane operations for each runway end – Chart C

Daily turbo-jet aeroplane arrivals for runway end (H)	Annual aeroplane weight for runway end (million kg) (K)	Minimum friction survey frequency (M)	Minimum rubber removal frequency (N)
less than 15	less than 447	once per year	once every 2 years
16 to 30	448 to 838	once every 6 months	once every year
31 to 90	839 to 2.404	once every 3 months	once every 6 months
91 to 150	2.405 to 3.969	once every month	once every 4 months
150 to 210	3.970 to 5.535	once every 2 weeks	once every 3 months
greater than 210	greater than 5.535	once every week	once every 2 months

Notes:

1. Airports that exceed 31 daily turbo-jet aeroplane arrivals are more critical with respect to friction deterioration caused by rubber accumulation due to increased aeroplane activity
2. In addition to daily turbo-jet aeroplane arrivals for runway ends, other factors should be considered by the airport operator when determining rubber removal such as the type and age of pavement, annual climate conditions, time of year, number of wide-body aeroplanes that operate on the runways and length of runways

**Tabella 3-3 Frequenza dei rilievi prescritta dall'F.A.A. e recepita dall'I.C.A.O. e dall'ENAC**

### **3.7. MISURE DELL'ADERENZA DI TIPO "LOCALE"**

In base alla strumentazione a disposizione è possibile effettuare misure di tipo "locale" o "spot", ovvero misure in continuo. Oltre alla strumentazione utilizzata, la differenza tra le due tipologie risiede nel numero di campionamenti effettuabili nell'ambito di ogni indagine in relazione al tempo utile per quest'ultima. Negli

aeroporti a più intenso traffico le operazioni di rilievo non possono rallentare le operazioni in quanto spesso si opera ai limiti della capacità delle infrastrutture, ne segue la necessità che tali rilievi siano effettuati nel minor tempo possibile.

Le misure di tipo locale possono essere effettuate con strumenti classici come il British Pendulum, che ormai trova un modesto impiego solo in campo stradale in quei punti in cui gli strumenti trainati non riescono a raggiungere le velocità richieste per l'effettuazione delle prove.

Un'altra tipologia di strumenti sono i decelerometri. Questi misurano la decelerazione che si riesce ad imprimere al veicolo su cui tali strumenti vengono montati. Tale misura, quindi, è fortemente influenzata dal veicolo e dalla sua modalità di frenatura.

Come verrà descritto in seguito, accanto ai decelerometri meccanici-analogici tradizionali, si stanno diffondendo decelerometri elettronici digitali.

### **3.8. MISURE DELL'ADERENZA DI TIPO "CONTINUO": CFME**

Gli strumenti attualmente più idonei all'effettuazione dei rilievi sono i cosiddetti "*Continuous Friction Measurement Equipment*". I vantaggi che offrono rispetto agli strumenti di tipo "spot" sono diversi. In primo luogo essi permettono di raccogliere dati lungo tutta la pista semplicemente percorrendo quest'ultima con un veicolo strumentato (ovvero trainando il carrello strumentato) con un notevole risparmio di tempo.

Il tipo di apparecchiatura consente di fissare opportunamente ed in maniera univoca la percentuale di slittamento, in modo da interpretare al meglio il

significato dei valori registrati. Le prove possono condursi a velocità differenti, così che possono essere messe in rilievo problematiche che si manifestano con l'aumentare della velocità stessa, come i problemi di macrotessitura. Questa strumentazione, inoltre, è quasi sempre completata da un sistema idraulico in grado di "innaffiare" la pista in maniera opportuna, così da ricreare il velo idrico di 1 mm così come richiesto dalla norma. Normalmente questi strumenti effettuano registrano un valore ogni 10 m e restituiscono i dati su interfacce differenti per ogni strumento; è preferibile che i dati siano registrati in formato digitale, in modo che gli stessi possano essere utilizzati per successive elaborazioni. In è riportato un esempio di come possono essere riportati i dati rilevati.

### **3.9. STRUMENTI DI MISURA**

Vi sono attualmente molti strumenti di misura in uso in tutto il mondo.

#### **Profilometri**

Nell'ambito degli strumenti di misura per la macrorugosità, le apparecchiature profilometriche meritano una considerazione particolare in quanto tali dispositivi stanno conducendo ad una progressiva sostituzione delle misurazioni effettuate con il metodo volumetrico. I parametri forniti da tali attrezzature non sempre sono comparabili tra loro, ma hanno una buona correlazione con i risultati ottenuti con il metodo volumetrico.

I profilometri sono apparecchiature che forniscono un profilo digitale della tessitura di tipo bidimensionale, essi vengono impiegati sulla pavimentazione ad una velocità di misura maggiore o uguale a 60km/h. I profilometri sono

sostanzialmente apparecchiature che sfruttano tecnologie di “non contatto” che possono essere classificate, in base al principio di funzionamento, come:

- Dispositivi a funzionamento laser (Laser Profilometer);
- Profilometri ad ultrasuoni (Ultrasonic Profilometer).

Per quanto riguarda il profilometro laser, esso è costituito da due elementi fondamentali: una sorgente di emissione ed un captatore – trasduttore. Il dato di output è un segnale amplificato dell'altezza  $h$  cioè della distanza che intercorre tra la sorgente di emissione e il punto di incidenza del laser sulla pavimentazione. Lo strumento di misura è alloggiato su un veicolo che, avanzando lungo una direzione parallela all'asse longitudinale del piano di via, permette di associare a ciascuna delle altezze misurate il valore della distanza orizzontale percorsa per cui si riesce ad ottenere la restituzione grafica del profilo bidimensionale  $z(x)$ .

Gli strumenti laser possono operare con diverse tipologie del laser stesso:

Point Laser. Gli strumenti, equipaggiati con questo tipo di laser, forniscono l'altezza tra il laser e la pavimentazione in un punto preciso. Il numero di laser può variare da strumento a strumento; il profilometro della Greenwood, nella fattispecie, ne monta 40. Molto più veloci degli strumenti ad ultrasuoni, questi registrano il profilo trasversale, a intervalli di 10mm, lungo la strada.

Scanning Laser. La misura, restituita da questi laser, è molto simile ad un profilo continuo. Un esempio di apparecchiatura che monta tale sistema è il Ladar; questo strumento è in grado di testare la pavimentazione per una larghezza di 3.5m con un singolo laser montato ad un'altezza dal suolo di 2.3 m. Vengono effettuate misure su 950 punti lungo il profilo trasversale, ad intervalli di 25mm lungo la pavimentazione. Per quanto riguarda le prestazioni fornite da tali strumenti esse sono correlate alla dimensione della sezione del raggio, in particolare per

apprezzare classi di tessitura con lunghezze d'onda sempre più piccole bisogna utilizzare raggi laser con diametro medio sempre minore.



*Profilometro Laser – Greenwood*

### **Decelerometri**

I decelerometri più diffusi sono il “*Tapley Meter*” e il “*Brakemeter- Dynameter*”; essi forniscono un controllo locale in condizioni di pista coperta da ghiaccio o neve. Gli altri cinque strumenti menzionati ( il “*Mu-meter*”, il “*Runway Friction Tester*”, lo “*Skiddometer*”, il “*Surface Friction Tester*” e il “*Grip Tester*”) forniscono una traccia continua dei valori dell’aderenza e per questo sono indicati con il termine di *Continuous Friction Measurement Equipment*” (*CFME*).

Sebbene i modi di operare degli strumenti i misura in continuo siano differenti, essi presentano dei componenti standardizzati. Nel condurre un rilievo dell’aderenza per un programma di manutenzione, essi utilizzano lo stesso pneumatico liscio per la misura dell’aderenza, di misura 4.00 – 8 (16x4.0,6 ply, RL2) con l’eccezione del *Grip Tester* che utilizza un pneumatico liscio di misure 10x4.5-5. Il pneumatico per la misura dell’aderenza montato sul *Mu-meter* opera ad una pressione di gonfiaggio di 70 kPa mentre il *Grip Tester* utilizza una pressione di gonfiaggio di 140 kPa. I tre strumenti rimanenti utilizzano una

pressione di gonfiaggio di 210 kPa per il pneumatico di prova. Tutti utilizzano lo stesso campo di variazione dell'aderenza, che va da 0,0 a 1,0 e forniscono medie per ogni 150 m della lunghezza di pista rilevata. Con l'eccezione del *Mu-meter* e del *Grip Tester*, gli altri tre strumenti di misura forniscono, in opzione, misure con pressioni di gonfiaggio del pneumatico di 700 kPa, misura 4.00 – 8 (16x4.0, 6 ply, RL2), sia con battistrada scolpito, sia con scanalature longitudinali. Questo pneumatico è utilizzato per scopi operativi quando le superfici delle pavimentazioni sono ricoperte da solo ghiaccio o da sola neve. Un'altra opzione disponibile per il *Mu-meter*, il *Runway Friction Tester* e il *Surface Friction Tester* è una tastiera che consente all'operatore che utilizza l'attrezzatura la flessibilità di registrare comandi, messaggi, note sulle osservazioni effettuate durante lo svolgimento della prova. Tutti questi strumenti di misura sono equipaggiati con un sistema di bagnatura automatico che fornisce un determinato spessore d'acqua davanti alla ruota con cui si effettuano le misure. I rilievi dell'aderenza possono essere condotti con velocità fino a 130 km/h.

L'efficacia delle misure di aderenza dipende fortemente dal personale che è responsabile della conduzione dei veicoli strumentati. Un'adeguata formazione professionale sulle operazioni, la manutenzione e le procedure per la conduzione delle misure di aderenza è essenziale per assicurare affidabilità ai dati di aderenza. Inoltre, è necessario un aggiornamento periodico per rivedere, migliorare e certificare che l'operatore mantenga un alto profilo di competenza. In caso contrario, il personale non manterrà il suo livello di esperienza nel tempo e perderà la familiarità con le nuove tecniche di calibrazione, manutenzione e operative. Tutti gli strumenti di misura necessitano di un controllo periodico della calibrazione per assicurarsi che essa sia mantenuta entro i valori di tolleranza

indicati dal costruttore. La calibrazione deve riguardare anche il sistema idraulico per la bagnatura, in modo da assicurare che il flusso di acqua si mantenga entro le tolleranze ammesse per ottenere un determinato spessore del velo idrico davanti al pneumatico utilizzato per la misura in tutto il campo delle velocità del veicolo. Si riportano di seguito alcune considerazioni sui vari strumenti in commercio e riconosciuti dall'I.C.A.O. (*Airport Service Manual, part 2*)

*a. MU-METER*

Il *Mu-meter* è un carrello dal peso di 245 Kg progettato per misurare la forza laterale generata sul pneumatico di misura che avanza sulla superficie della pavimentazione con un angolo di 15°. Il carrello è costituito da una sezione triangolare su cui sono montate due ruote per la misura dell'aderenza e una ruota posteriore. La ruota posteriore garantisce stabilità al carrello durante le operazioni. La Fig. 3-2 mostra la configurazione generale del carrello. Un carico verticale di 78 Kg è generato da una zavorra e trasmessa tramite un ammortizzatore su ciascuna delle ruote per la misura dell'aderenza. Le ruote di misura operano ad una percentuale di slittamento pari al 13,5%. In aggiunta alle due ruote di misura, il *Mu-meter* presenta una ruota posteriore con pneumatico a battistrada scolpito, di misura 4.00 – 8 (16x4.0, 6 ply, RL2). Il pneumatico opera ad una pressione di gonfiaggio di 70 kPa. Il *Mu-meter*, essendo uno strumento su carrello, necessita di un mezzo di traino e, se è richiesto un sistema di bagnatura automatico, si deve montare un serbatoio d'acqua sul mezzo di traino per fornire l'acqua agli ugelli.

Il sensore di distanza utilizzato è un codificatore foto elettrico stagno montato sull'asse della ruota posteriore del carrello. Il sensore di distanza legge gli impulsi digitali come incrementi di un millesimo per ogni rotazione della ruota, e le

trasmette ad un traduttore di segnale che genera un segnale ogni volta che il carrello avanza di un metro. La cella di carico è un trasduttore elettronico montato tra le parti mobili e fisse della struttura portante a triangolo. La cella di carico legge le piccole variazioni di tensione sulle ruote per la misura dell'aderenza. Il "signal conditioner" è montato sulla sezione fissa e amplifica i dati analogici ricevuti dalla cellula di carico [m] e i dati digitali del sensore di distanza [m]. I segnali provenienti dalla ruota posteriore forniscono sia informazioni sulla distanza sia, combinati con gli incrementi di tempo reale, misure della velocità.



**Fig. 3-1 Accessori informatici per il MU-METER**

Il computer viene collocato nel mezzo di traino ed è un processore che utilizza due unità di calcolo per mostrare, calcolare, registrare e processare i dati relativi ai valori di  $m$  ricevuti dalla cella di carico e dal sensore di distanza. L'elaborazione del processore consiste in una mappa continua dei valori di aderenza per l'intera lunghezza ispezionata. L'operatore può scegliere una delle seguenti scale prima di stampare la mappa. Sulla carta, 25mm sono equivalenti approssimativamente a 20m, 40 m, 85 m, 170 m, e 340 m. Le scale più grandi possono essere utilizzate per condurre indagini specifiche per aree dove si sospettano potenziali problemi.

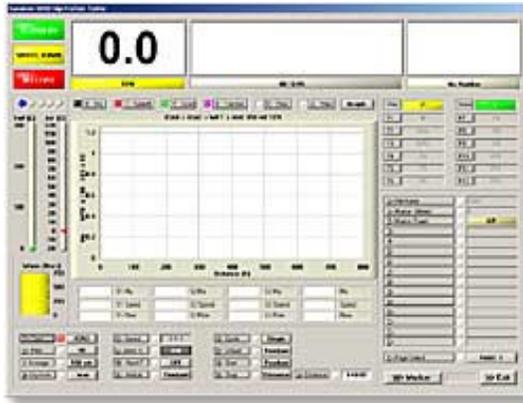


**Fig. 3-2 Mu - meter**

*b. RUNWAY FRICTION TESTER*

Il *Runway Friction Tester* è un veicolo di tipo monovolume che ha la quinta ruota connessa con l'asse posteriore tramite una trasmissione con guida a catena. La Fig. 3-4 mostra la configurazione del van. La trazione è, in questo caso, anteriore ed è richiesto un propulsore con potenza tale da garantire accelerazioni sufficienti a raggiungere le velocità di prove in brevi spazi nonostante il freno rappresentato dalla ruota di prova. La ruota per la misura dell'aderenza è progettata per lavorare ad una percentuale di slittamento costante del 13 %. La modalità di prova utilizza un trasduttore di forza su due assi (orizzontale e verticale) che misura sia la forza resistente sia il carico verticale sulla ruota di prova. Questo metodo elimina la necessità di filtrare le deviazioni del veicolo e gli effetti del deterioramento del pneumatico, fornendo istantaneamente misure dell'aderenza dinamica. Un carico verticale di 136 Kg è generato sulla ruota di prova tramite pesi montati su un

doppio ammortizzatore a molla accoppiato. Il *Runway Friction Tester* è fornito con un sistema automatico di bagnatura e un serbatoio d'acqua.



**Fig. 3-3** Interfaccia grafica del software utilizzato

La velocità del veicolo e la distanza percorsa sono computate con un computer digitale a partire dagli impulsi generati da un sensore ottico. La resistenza e il carico verticale sulla ruota di prova sono registrate mediante un trasduttore per misure di forza

su due assi e amplificate per l'input al computer. Il computer digitale recepisce questi valori approssimativamente cinque volte per ogni metro di percorrenza e ne ricava il coefficiente di aderenza dinamico. Il coefficiente di aderenza in relazione alla velocità del veicolo (e in opzione con il relativo flusso di acqua) è conservato nella memoria del computer digitale.

Effettuando il rilievo dell'aderenza, i dati sono processati e mandati ad una stampante che fornisce una striscia continua con la mappa dei valori di  $\mu$  e delle velocità registrati. I valori medi di  $\mu$  sono stampati lungo la mappa. La trasmissione continua durante lo svolgimento della prova ad appropriati intervalli fino a quando l'intera lunghezza sia stata monitorata. Sono disponibili tre scale a scelta dell'operatore: 25 mm equivalgono approssimativamente a 30 m, 90 m, 300 m.



**Fig. 3-4 Runway Friction Tester**

*c. SKIDDOMETER*

Lo *Skiddometer BV-11* è un carrello equipaggiato con una ruota per la misura dell'aderenza progettata per operare ad una percentuale di slittamento fissa variabile tra il 15 e il 17 %, a seconda della configurazione del pneumatico della prova. La Fig. 3-6 mostra l'aspetto generale del carrello da 360 Kg. Esso è costituito da una sezione saldata sui quattro lati sorretta da due ruote con sospensioni indipendenti. Le tre ruote sono interconnesse mediante catene a rulli e ruote dentate, con una trasmissione tale da forzare la ruota centrale, con cui vengono effettuate le misure, a ruotare alla percentuale di slittamento desiderata rispetto alla velocità di traslazione sulla pavimentazione. Un carico verticale di 105 Kg è applicato alla ruota di prova mediante un peso collegato ad essa mediante una molla e un ammortizzatore. Poiché lo *Skiddometer* è montato su un carrello, necessita di un veicolo per il traino. Se è richiesto un sistema automatico

di bagnatura, si deve montare un serbatoio d'acqua sul veicolo di traino insieme ad una linea di distribuzione dell'acqua fino agli ugelli che sono montati davanti alla ruota di prova del *BV11 Skiddometer*.

La coppia applicata alla ruota dello strumento di misura è misurata da uno speciale trasduttore di coppia. La velocità del carrello è misurata mediante un tachimetro azionato da una delle catene a rulli. Un cavo tra il carrello e il mezzo di traino trasmette il segnale analogico ad un registratore collocato all'interno del veicolo. La Fig. 3-5 mostra il computer MI-90 dello Skiddometer.



**Fig. 3-5 Display installato all'interno dell'abitacolo**

I dati raccolti in un rilievo dell'aderenza sono processati da un computer digitale e registrati su una mappa come traccia continua dei valori dell'aderenza per l'intera lunghezza indagata. Sono disponibili per l'operatore quattro scale per misurare le distanze sulla mappa: 25 mm corrispondenti approssimativamente a 112 m, 225 m, 450 m e 900 m.



**Fig. 3-6 Skiddometer BV-11**

*d. SURFACE FRICTION TESTER*

Il *Surface Friction Tester* è un'automobile che utilizza una quinta ruota collocata nei pressi del bagagliaio per misurare il coefficiente d'aderenza. La Fig. 3-7 mostra la configurazione del *Surface Friction Tester*. L'automobile è a trazione anteriore ed è disponibile in opzione un motore turbocompresso. La ruota per le misure è progettata per operare ad una percentuale di slittamento fissa, compresa tra il 10 e il 12 %, a seconda del tipo di pneumatico utilizzato nella prova. Essa è connessa all'assale posteriore, con ruote indipendenti, con una catena di trasmissione che è retrattile idraulicamente. Sulla ruota per le misure è applicato un carico verticale di 140 Kg generato da un peso e collegato mediante una molla e un ammortizzatore. Il *Surface Friction Tester* è fornito con un sistema automatico di bagnatura e un serbatoio montato al posto dei sedili posteriori dell'automobile.

La coppia agente sulla ruota per le misure e la distanza percorsa sono immesse in un computer digitale, dove le informazioni vengono tradotte in termini di coefficiente d'aderenza  $m$ . Il flusso del segnale elettrico negli estensimetri contenuti nel sensore di coppia collocato sulla ruota per le misure è influenzato da ogni minima variazione della tensione della catena di trasmissione. Quindi, ogni variazione delle forze di aderenza è monitorata dal computer digitale che misura queste variazioni della corrente elettrica e converte il segnale analogico in dati relativi al coefficiente di aderenza. I valori di  $m$  sono registrati in continuo nel computer digitale, e al termine della prova, sono stampati su una mappa come traccia continua dei valori di  $m$  per l'intera lunghezza indagata. Le velocità tenute durante la prova così come i dati identificativi della prova stessa sono riportati sulla mappa. La scala per le distanze misurate sulla carta è 25 mm per 100 m. Può essere fornita una tastiera, opzionale, per l'operatore.



**Fig. 3-7 Surface Friction Tester**

*e. GRIP TESTER*

Il Grip Tester è un carrello ruotato leggero dal peso di 83 Kg che necessita di un mezzo di traino. Il metodo impiegato prevede una singola ruota a battistrada liscio che è mantenuta ad una percentuale di slittamento del 14,5% rispetto alla velocità

di avanzamento tramite una catena che trasmette il moto dall'asse delle due ruote principali. I sensori sono sistemati sull'asse della ruota singola utilizzata per le misure e forniscono dati in continuo che sono riportati sulla strumentazione del carrello. I dati sono anche trasmessi ad un computer, che, normalmente, viene trasportato nell'abitacolo del mezzo di traino. Il computer può mostrare i valori di aderenza come letture istantanee, come media tra due punti, come media su ogni terzo di pista, o come media sull'intera lunghezza di pista. Può, inoltre, mostrare il diagramma delle letture dell'aderenza rispetto alla distanza percorsa. Tale diagramma può essere stampato per una archiviazione o può essere memorizzato in un PC. Il Grip Tester è illustrato in Fig. 3-8.



**Fig. 3-8 Grip Tester**

*f. DECELEROMETRI*

I decelerometri forniscono le informazioni più affidabili quando una pavimentazione è coperta da neve compatta o da ghiaccio. I decelerometri non dovrebbero essere utilizzati su pavimentazioni bagnate e le prove non dovrebbero

esse effettuate quando la pavimentazione è coperta da neve soffice o asciutta con un'altezza superiore a 51 mm o con neve sciolta che supera i 13 mm di altezza.

Poiché i decelerometri devono essere montati all'interno di un veicolo, tali veicoli devono soddisfare determinati requisiti per assicurare che le misurazioni siano affidabili e significative. Veicoli accettabili sono le grandi berline, le station wagon, automobili medie o grandi, furgoni e pulmini, veicoli a trazione anteriore o integrale, e veicoli dotati di *anti-locking braking system (ABS)* sull'asse posteriore.

Gli pneumatici del veicolo possono influenzare significativamente la prova. Conseguentemente, il consumo del battistrada non deve superare il 50% e la pressione di gonfiaggio deve essere sempre mantenuta nei limiti indicati dal costruttore. I freni del veicolo devono sempre essere tarati per ottenere una frenatura bilanciata. Il veicolo deve presentare una tendenza minima al beccheggio e un soddisfacente controllo direzionale durante la frenata. Il decelerometro dovrebbe essere fissato al veicolo in modo tale che esso non possa essere spostato da qualunque movimento del veicolo stesso. Il decelerometro dovrebbe essere installato nel veicolo secondo le indicazioni del costruttore. E' necessario prendere un certo numero di letture per ottenere una valutazione ragionevole delle condizioni della pavimentazione della pista. La lunghezza totale della pista viene divisa in tre porzioni uguali – zona di toccata, zona centrale e zona di uscita-. Un minimo di tre prove alla velocità di 35 Km/h deve essere effettuato in ogni segmento. Si dovrebbe determinare un valore medio di  $m$  per ogni zona. I valori mediati di  $m$  sono sempre registrati nella direzione di atterraggio degli aeroplani.

Nell'eseguire i rilievi devono essere utilizzate le seguenti procedure:

1. I freni dovrebbero essere azionati in maniera sufficiente da bloccare le ruote e poi rilasciati immediatamente. Il tempo per cui le ruote restano bloccate non dovrebbe superare il secondo.
2. Il decelerometro utilizzato dovrebbe registrare o indicare la massima forza frenante che si registra durante la prova.
3. Valori isolati molto alti o molto bassi possono essere trascurati nel calcolo dei valori medi.

Il principale svantaggio dei decelerometri consiste nel fatto che essi necessitano che, poichè il veicolo con cui si effettua la prova deve essere accelerato fino alle velocità stabilite, e ciò richiede delle distanze finite, gli intervalli a cui possono essere effettuate le letture sono necessariamente più grandi di quelli che possono essere presi per strumenti di misura in continuo. Di conseguenza, questi strumenti possono considerarsi solo come strumenti per misure locali.



**Fig. 3-9 Brakemeter**

### *Brakemeter-Dynometer*

Il *Brakemeter-Dynometer* è costituito da un pendolo finemente bilanciato libero di reagire ad ogni cambio di velocità e di direzione, che funziona attraverso un treno di ingranaggi che fa ruotare un ago intorno ad un disco graduato (vedi fig. 5-12).

Il disco è graduato in percentuali di “g”, che è lo standard generalmente accettato per l’espressione di accelerazioni e decelerazioni. Per smorzare le vibrazioni, lo strumento è riempito con un fluido insensibile alla temperatura. Lo strumento, che necessita di un mezzo di locomozione, dovrebbe essere utilizzato sempre con un piedistallo. Questo strumento dovrebbe essere utilizzato esclusivamente su piste coperte da ghiaccio e/o neve compatta. Non è consigliato per operazioni sul bagnato. Le procedure per la conduzione delle prove sono riportate in 5.11.7.

### Tapley Meter



Sono disponibili sul mercato due versioni del Tapley Meter. Il Tapley Meter originale è un decelerometro meccanico standard mentre la nuova versione è il Tapley Electronic Airfield Friction Meter. Entrambi necessitano di un veicolo da trasporto e sono raccomandati solo per l’utilizzo su piste coperte da ghiaccio e/o neve. Non sono

indicati per operazioni sul bagnato.

### Decelerometri meccanici

La versione meccanica è un decelerometro basato su un piccolo pendolo, calibrato dinamicamente e smorzato con olio, chiuso in una cassa stagna. Il pendolo è collegato magneticamente ad un meccanismo ad ingranaggi al quale è attaccata una scala circolare che riporta i valori in percentuale di “g”. Una lancetta ferma l’indicatore sul massimo valore raggiunto al termine della prova. Il meccanismo è racchiuso in una cassa di alluminio e la scala presenta una copertura in vetro. L’intero insieme è montato su una base piatta stampata. Ogni misuratore è testato

staticamente e calibrato dinamicamente prima che sia emesso il certificato di calibrazione. Quando lo strumento è utilizzato in un rilievo di aderenza, viene piazzato sul fondo del veicolo. I dati devono essere visibili, letti e registrati dall'operatore, e le medie per ogni segmento corrispondente ad un terzo della pista devono essere registrate e calcolate manualmente.

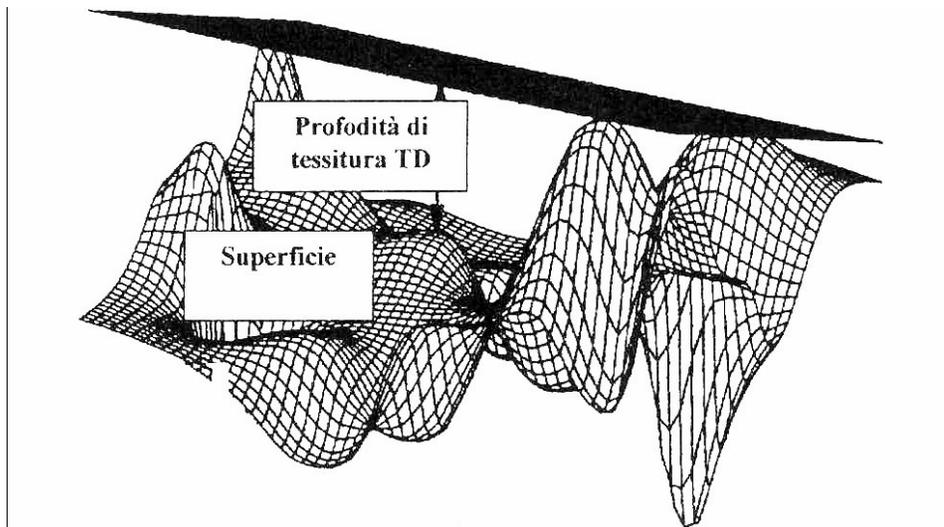
### *Decelerometro elettronico*

L'*Electronic Airfield Friction Meter* fornisce la registrazione dei dati raccolti durante il rilievo dell'aderenza, incluse le medie per ogni segmento pari ad un terzo della lunghezza della pista. Il misuratore consta di decelerometro basato su un pendolo attivo, semiautomatico, registratore, che opera con gli stessi principi del *Decelerometro Meccanico Tapley*. Nel prepararsi ad effettuare un rilievo, l'operatore piazza il misuratore sulla scocca del veicolo di traino. L'attuatore viene fissato al pedale del freno, mentre il modulo di comando viene attaccato al finestrino del veicolo davanti al guidatore mediante una ventosa oppure in un'altra posizione da cui sia facilmente leggibile dall'operatore. Le connessioni elettriche sono collegate alla batteria dell'automobile o ad una batteria separata. La strumentazione è ora pronta per effettuare la prova sulla pista. Il decelerometro elettronico viene testato in fabbrica secondo lo standard *Tapley Meter*. Questi strumenti dovrebbero essere utilizzati solo su una pista coperta da ghiaccio e/o neve compatta.

Le principali grandezze necessarie alla caratterizzazione delle ampiezze d'onda sono definite dalle norme ISO 13473. Sostanzialmente, queste grandezze, sono, in parte, riferite ad una rappresentazione tridimensionale della superficie della pavimentazione  $F(x,y,z)$  e, per la restante parte, ad un profilo bidimensionale  $z(x)$ . Tali grandezze vengono definite, nelle norme ISO e AIPCR, come si riporta di

seguito:

- *Profondità di tessitura – Texture Depth (TD)* : si definisce, partendo da una rappresentazione tridimensionale della superficie, come la distanza tra la superficie stessa ed un piano passante per i tre punti più alti omogeneamente distribuiti all'interno di un'area dello stesso ordine di grandezza di quella caratteristica del contatto pneumatico - pavimentazione. Nell'accezione AIPCR la profondità di tessitura viene definita come distanza media tra le superfici indicate nella norma ISO, inoltre le tre particelle più alte che individuano il piano tangente devono essere "ben distanziate". Nella figura seguente si riporta un esempio di rappresentazione tridimensionale della profondità di tessitura.

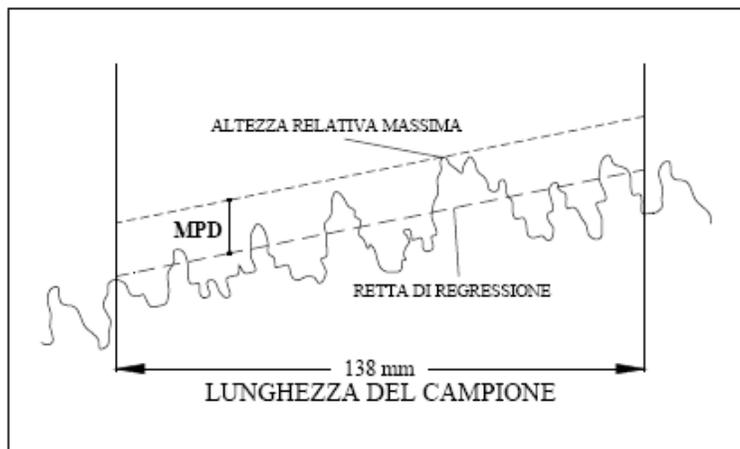


*Rappresentazione della profondità di tessitura (TD)*

- *Profondità di Profilo – Profile Depth (PD)*: nel caso di rappresentazione bidimensionale, cioè nello studio di un profilo, la profondità è data dalla distanza tra i punti del profilo stesso ed i punti di una retta orizzontale passante per la posizione più alta della sagoma bidimensionale. Tale valutazione può essere effettuata prendendo una qualsiasi sezione, longitudinale o trasversale della

pavimentazione, di grandezza pari alle dimensioni dell'area di contatto tra pneumatico e pavimentazione.

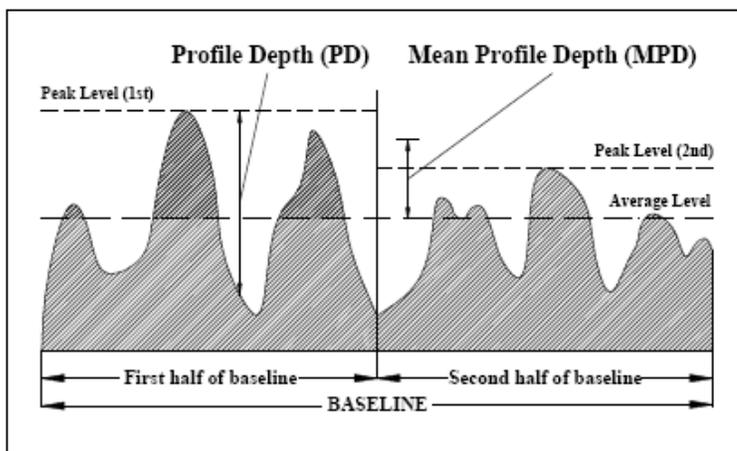
*Profondità media del profilo (Mean Profile Depth, MPD):* è il valore medio della profondità di profilo calcolata su di una distanza di riferimento assegnata. Nell'interpretazione fornita dall'AIPCR, il concetto di profondità media del profilo è stato introdotto ponendolo pari alla media fra i punti del profilo ed una retta tangente alla sommità della particella più sporgente nel campione considerato. Come altre grandezze precedentemente introdotte il calcolo deve essere effettuato su di un profilo longitudinale o trasversale dello stesso ordine di grandezza dell'interfaccia pneumatico - pavimentazione.



*Rappresentazione della profondità media del profilo (MPD) secondo l'A.I.P.C.R.*

Considerando l'interpretazione ISO, invece, la profondità media del profilo (MPD) viene determinata con la seguente espressione:

$$MPD = \frac{PeakLevel(1st) + PeakLevel(2nd)}{2} - AverageLevel$$



*Calcolo della Profondità Media di Profilo secondo lo schema ISO*

Tale calcolo viene effettuato su un campione di riferimento di lunghezza  $100mm \pm 10mm$ , detto *baseline*. Tale tratto di misura viene diviso a sua volta in due parti uguali, rispettivamente prima e seconda metà della baseline, per ciascuna delle quali si individua il punto di picco, primo e secondo Peak Level. Il valore della profondità media del profilo viene calcolato come media aritmetica dei due valori di picco a cui si sottrae il valore medio del profilo Average Level.

*Profondità di tessitura stimata – Estimated Texture Depth*: il valore della profondità di tessitura relativa alla superficie può essere stimato utilizzando il parametro MPD riferito al profilo bidimensionale; ciò è possibile attraverso una funzione di trasformazione fra le due grandezze MPD ed ETD. In tal modo è possibile effettuare una valutazione quantitativa della profondità media di tessitura MTD, stimata analiticamente con il parametro ETD sulla base del valore della profondità media del profilo MPD, misurato sulla superficie reale. Nell'interpretazione ISO 13473, l'equazione di trasformazione è la seguente:

$$ETD = 0.2mm + 0.8MPD$$

dove ETD ed MPD sono espresse in millimetri. L'impiego di questa equazione fornisce valori di ETD che approssimano bene i valori di MTD misurati. L'errore che si commette utilizzando l'equazione di trasformazione dovrebbe essere statisticamente inferiore alle imprecisioni imputabili ad operatori diversi impiegati per la prova dell'altezza in sabbia.

### **Armonizzazione delle misure**

Tra le apparecchiature utilizzate, di cui sopra, alcune fanno uso di diversi principi di misura, altre, seppur utilizzano lo stesso principio, si differenziano in alcuni dettagli che influenzano le proprie misure. Innanzi tutto, la maggior parte delle apparecchiature lavora a differenti velocità; inoltre, occorre considerare la tessitura della superficie di prova che, a sua volta, influisce sulle misure in accoppiamento alle velocità di prova stesse. Un primo tentativo di standardizzazione è stato intrapreso dal CEN con il gruppo TC227/WG5, con lo scopo di sviluppare un processo che definisse una procedura uniforme per la misura dinamica dell'aderenza. Tale ipotesi non ha avuto molto successo, in quanto ogni singolo paese ha preferito continuare con le proprie procedure. Per tale motivo, si è fatta strada una nuova filosofia: ossia cercare un processo che sia in grado di convertire i risultati, ottenuti con le differenti apparecchiature, in valori su una stessa scala, cosicché ogni paese potesse continuare ad utilizzare il proprio metodo, ma allo stesso tempo offrirsse loro la possibilità di correlare le varie misure ottenute con metodi diversi. Inoltre, poiché l'aderenza non è una misura costante, ma dipende da molti fattori, non c'è una misura di aderenza che possa essere comparato ad altre misure effettuate con strumenti diversi; quindi risulta necessaria una scala che possa utilizzare una "media" di tutti i macchinari come risultato "corretto". Se ogni apparecchiatura potesse essere collegata a

questa scala, tenendo conto delle proprie caratteristiche, allora l'armonizzazione richiesta potrebbe essere realizzata.

Anticipandone in bisogno, nel 1992, il PIARC ha condotto un *esperimento internazionale* in cui sono stati confrontati i differenti metodi e le differenti apparecchiature in uso per le misure di aderenza in campo stradale e aeroportuale. L'esperimento ha indicato che virtualmente tutte le apparecchiature partecipanti possono essere armonizzate utilizzando una singola equazione che lega i risultati ad una scala comune, a condizione che fosse assegnata prima una misura di macrotessitura. Questa scala proposta prende il nome di *IFI* (International Friction Index).

Una nuova analisi sulla base dei dati forniti dall'esperimento internazionale e con integrazione di ulteriori prove è stata effettuata tra il 1997 e il 1998 dal Governo Federale Belga. L'obiettivo è stato adattare la definizione di IFI in maniera più specifica al sottoinsieme di strumentazioni utilizzate in Europa considerando tra l'altro nuovi tipi di pavimentazioni (ad esempio pavimentazioni drenanti) non considerati dall'esperimento del PIARC. Come risultato di tale analisi, risulta la proposta un coefficiente *EFI* (European Friction Index) che fornisce l'armonizzazione ricercata tra i vari tipi di strumentazione utilizzata in Europa. Tale coefficiente, analogamente all'IFI, costruito sui risultati ottenuti dall'esperimento internazionale del PIARC e la ricerca Belga, applica una "media" tra tutte le apparecchiature usate in Europa per definire una scala comune e utilizza modelli matematici che rappresentano l'effetto della tessitura e della velocità per correggere i valori misurati ad una velocità ed un'apparecchiatura particolare portandoli sulla scala comune ad una velocità di riferimento. Inoltre è stato riconosciuto che, affinché il modello funzioni, l'apparecchiatura utilizzata

deve essere calibrata correttamente alla scala ed è necessario che la scala rimanga stabile. Ciò dovrebbe garantire a nuove apparecchiature di poter esser aggiunte in futuro.

Partendo da questo lavoro, nel 1998 è stata presentata una proposta dal CEN che ha definito sia l' EFI che una procedura per la calibratura dei dispositivi di misura basati sull'indice stesso.

Tuttavia, dopo molte esamine e seguenti revisioni del modello originario, il gruppo ha ritenuto necessario tentare di proporre una procedura di calibrazione prima di formalizzare il modello standard. Gli interrogativi rimanevano principalmente sulla riproducibilità dei valori EFI acquisiti con le varie apparecchiature e la frequenza di calibratura delle attrezzature stesse necessaria per mantenere la precisione desiderata.

Anche aspetti non tecnici come i costi e la difficoltà della pratica di tale metodo, hanno richiesto un riesame.

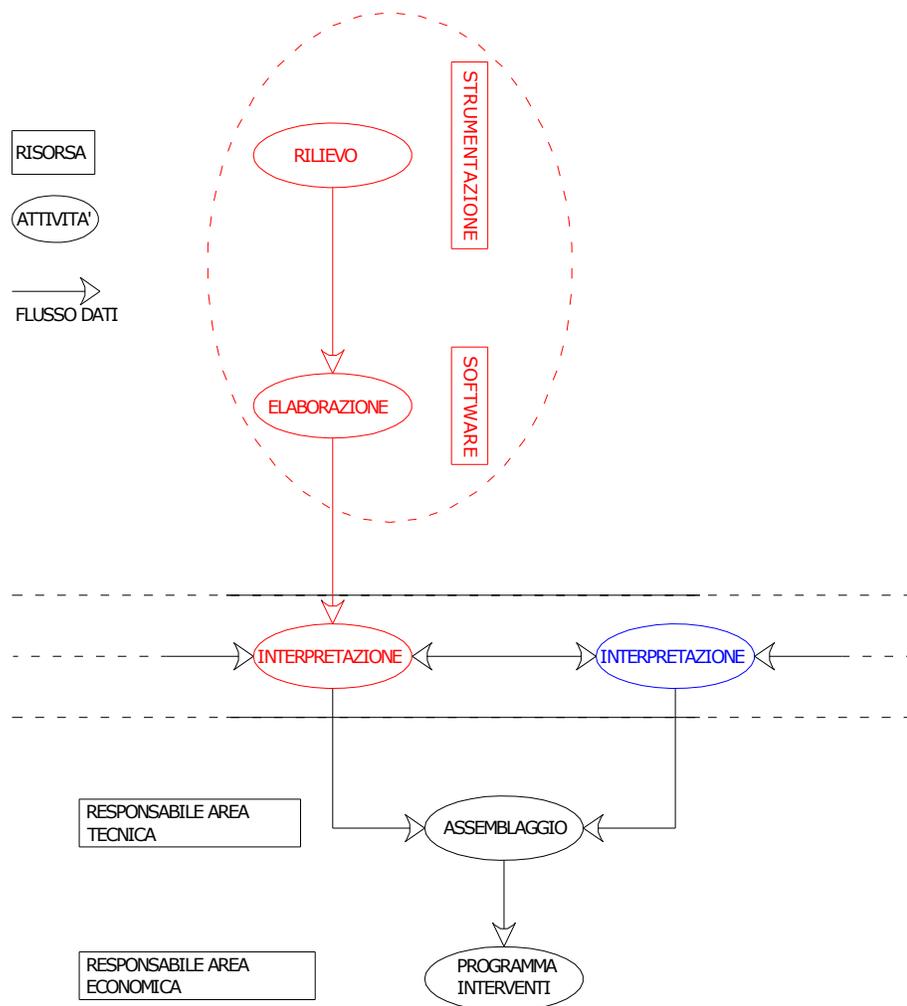
A tal ragione, i Direttori del FEHRL avevano affidato, già dal 1997, ad un gruppo di lavoro il progetto "*European Harmonisation of Friction, Texture and Evenness Measurements*" con lo scopo di sviluppare delle regole di base per l'utilizzo dei dispositivi di misura utilizzati in Europa focalizzandosi maggiormente sulle macchine di nuova generazione. Poiché c'erano dei forti dubbi sulla validità dell'EFI finora studiato, si cercava di approfondire meglio con nuove analisi. Lo scopo di tale progetto era dunque: migliorare il modello su cui era basato l'EFI, che mette in relazione il coefficiente d'attrito con la velocità e la tessitura; dimostrare dunque l'attendibilità della procedura proposta dal CEN attraverso la calibrazione tra i vari laboratori e le varie apparecchiature utilizzate in Europa e proporre un metodo alternativo.

Infine, l'esigenza dell'introduzione di un parametro comune che permettesse di comunicare ai piloti, inequivocabilmente, le condizioni operative della pista, soprattutto in presenza di ghiaccio o neve, portò alla nascita del "*Joint Winter Runway Friction Measurement Program*" - *JWRFMP*, un programma di ricerca condotto per sette anni, a partire dal 1996, da un insieme di enti e Paesi in collaborazione congiunta. Lo scopo principale di questo programma di ricerca era, come detto prima, quello di ricavare un indice inequivocabile di misura dell'aderenza delle piste; a tale indice si diede il nome di "*International Runway Friction Index*" (IRFI).

# **4 ELABORAZIONE ED INTERPRETAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI**

## **4.1. LA GESTIONE DEI DATI**

Come già osservato precedentemente, con i rilievi di aderenza ci si prefiggono i due scopi relativi alla diffusione di dati aeronautici e alla programmazione della manutenzione. Nel primo caso è già stato chiarito che a partire dai dati forniti dalla strumentazione si deve giungere, tramite una procedura standardizzata, alla definizione di un giudizio qualitativo utilizzabile dagli equipaggi di volo. Nel secondo caso, invece, il risultato dell'elaborazione deve supportare il personale tecnico nelle decisioni relative alla gestione della manutenzione, ovviamente influenzate da aspetti economici oltre che propriamente tecnici. In questo caso il format dell'elaborazione assume un aspetto decisamente importante, in quanto deve essere compatibile con il sistema generale di gestione della manutenzione. Anche nel caso in cui la gestione è direttamente demandata alla responsabilità di un tecnico, senza, quindi, un sistema informatico di supporto alle decisioni, sarà importante che le informazioni siano elaborate in modo da poter essere utilizzate da quest'ultimo.



**Fig. 4-1 Schema attività di indagine**

Lo schema riportato in Fig. 4-1 mostra le attività e le risorse impiegate in un *P.M.S. (Pavement Management Sistem)*: il controllo dell'aderenza è solo una parte delle attività, i cui risultati sono "assemblati" insieme a quelli riguardanti altre caratteristiche della pavimentazione, quali la capacità portante, lo stato dei sottoservizi, eventuali impianti inglobati nel pacchetto stesso della pavimentazione. Un P.M.S. assiste nelle decisioni il sia il responsabile dell'area tecnica, fornendo un sistema integrato di programmazione indagini, acquisizione dati, elaborazione, interpretazione, assemblaggio dei risultati provenienti dalle

diverse caratteristiche monitorate, sia il responsabile dell'area economica, che deve ottimizzare gli interventi manutentivi attraverso un'attenta programmazione degli stessi.

## **4.2. LE LINEE GUIDA DELL'I.C.A.O.**

L'annesso 14, al paragrafo 2.9 relativo alle condizioni dell'area di movimento e relative installazioni, prescrive che siano comunicati al Servizio Informazioni Aeronautiche (AIS) i dati relativi a dette condizioni ed ai servizi di Traffico Aereo (ATS) le analoghe informazioni di interesse operativo in modo che ne siano informati gli aeromobili in arrivo e in partenza da un aeroporto. Le suddette condizioni devono essere monitorate ed i dati risultanti devono essere resi noti agli operatori; tra questi dati vi sono quelli relativi all'aderenza su pista bagnata, ed in particolare quelle relative alla situazione di pista sdruciolevole (*slippery runway*). La procedura per le segnalazioni è stata descritta al paragrafo 3.3.

Nel capitolo 3 dell'annesso 14 – “*caratteristiche fisiche*”, dal punto 3.1.21 al punto 3.1.25, figurano standard e raccomandazioni sulle caratteristiche costruttive e sulle misurazioni da effettuare sulle piste in relazione alle caratteristiche di attrito, in presenza di acqua.

Infine nel capitolo 9 - emergenze ed altri servizi, paragrafo 9.4, è prescritto che la verifica periodica dei livelli di aderenza sulle piste sia effettuata con attrezzatura di tipo autobagnante e che certi inquinanti tra cui i depositi di gomma, siano rimossi al fine di garantire buone condizioni di aderenza ed evitare il rischio di scendere al di sotto del livello minimo stabilito.

In particolare al paragrafo 9.4.5 si prescrive che “*la manutenzione correttiva deve essere effettuata nel caso che le caratteristiche di aderenza, sull'intera pista o su*

*parti limitate di essa, risultassero inferiori al livello indicato dalle normative dello Stato.*

*Nota. - Una sezione di una pista di volo di lunghezza pari a 100 m, può essere considerata significativa per le operazioni di manutenzione e di prova.”*

Per quel che attiene le “normative dello Stato”, si ricorda che con la delibera n. 16 del 5 aprile 2001, l’E.N.A.C. ha disposto che in materia di progettazione, costruzione ed esercizio delle infrastrutture aeroportuali si applicano gli standard dell’annesso 14 I.C.A.O.. In definitiva, l’indicazione che può trarsi dall’annesso 14 è che per “*parte limitata di pista*” può intendersi un tratto di lunghezza pari a 100 m. A questo punto rimane da determinare la procedura con cui, a partire dai dati forniti dallo strumento di misura, è possibile, mediante un’elaborazione, valutare i tratti secondo quanto prescritto dall’I.C.A.O..

### **4.3. C.A.A. (CIVIL AVIATION AUTHORITY): VALUTAZIONE DELLA “100 METERS ROLLING AVERAGE”**

La Civil Aviation Authority inglese, tramite la C.A.P. 683, terza edizione del 14 maggio 2004, definisce una procedura alternativa alla definizione di una semplice media, al fine di valutare le condizioni di aderenza della pista. Si osserva, in prima battuta, che gli strumenti C.F.M.E. rilevano il coefficiente di aderenza lungo una linea per tutta la lunghezza della pista, restituendo un valore medio ogni 10 m. Ciò consente di calcolare una media “scorrevole” su 100 m. Questa procedura può essere meglio compresa pensando ad un cursore che scorre, a scatti di 10 m, lungo la pista. Il valore che caratterizza un tratto di 10 m è la media

dei valori rilevati nei tratti interessati dal cursore di 100 m. Questa operazione va poi ripetuta per le tre *porzioni* in cui va idealmente suddivisa la pista per la sua larghezza. Se per ogni *porzione* viene condotto più di un rilievo al fine di coprire più efficacemente la larghezza interessata, il valore caratterizzante il tratto di 10 m per ogni *porzione* è la media dei valori calcolati per ogni rilievo effettuato nella *porzione* come descritto in precedenza. Il risultato finale prevede di assegnare un valore caratteristico per ognuna delle tre porzioni in cui è stata suddivisa la pista per la sua larghezza. Un format tipico è il seguente:

Airport	
Runway	
Date	

Description	Applicable Runs	Friction Level
Friction Level for Central Portion	Run Numbers:	
Friction Level for Outer Portion (Right)	Run Numbers:	
Friction Level for Outer Portion (Left)	Run Numbers:	
Overall Friction Level	Average Value taken from all Standard Runs	

Is any portion of the runway below the MFL?	YES/NO
Remarks	
Action to be taken	
Recommended date of next assessment	

Questo tipo di rilievo può risultare particolarmente indicato per monitorare le condizioni di aderenza in aeroporti che presentano condizioni asimmetriche di deterioramento delle caratteristiche. Un esempio è l'aeroporto di Olbia (Italia), in cui, a causa di un vento predominante al traverso, i depositi di gomma provocati

dai velivoli risultano più evidenti sulla parte di pista posta sottovento; ciò si spiega considerando il maggior carico gravante sulle ruote del carrello poste sottovento dovuto al momento imbardante provocato dal vento al traverso.

#### **4.4. LO STANAG 3634 N.A.T.O.: VALUTAZIONE DEL “MINIMUM 100 METERS ROLLING AVERAGE”**

La N.A.T.O., tramite la N.S.A. (*NATO STANDARDIZATION AGENCY*), promulga, anche in tema di infrastrutture, degli STANAG (*STANDARDIZATION AGREEMENT*), cui le Forze Armate dei vari Stati aderenti all'organizzazione devono conformarsi. In particolare, per le modalità di controllo delle caratteristiche di aderenza delle superfici di volo, è stata promulgato lo STANAG 3634 “*RUNWAY FRICTION AND BRAKING CONDITIONS*”, giunto alla quarta edizione. Al fine di verificare la fattibilità e la correttezza delle prescrizioni in esso contenute, i Stati membri dell'organizzazione hanno stabilito di analizzare lo “*study draft 1*”, redatto dalla Gran Bretagna, per poi raccogliere e discutere le eventuali osservazioni.

Lo “*study draft 1*” si riferisce alle indicazioni, contenute nell'*Airport Service Manual I.C.A.O.*, di effettuare le prove di aderenza ad una distanza distanza di 3 m dalla mezzeria e da entrambe le parti; in ogni caso, il numero e la localizzazione delle prove deve essere tale da tener conto della concentrazione delle tracce lasciate dai velivoli in corrispondenza delle “*wheel path*”. Lo

STANAG prescrive di determinare il numero minimo di prove da effettuare attraverso la seguente tabella<sup>4</sup>:

	Larghezza Nominale della Pista (m)	Larghezza Nominale della Pista (ft)	Numero Minimo di Passaggi da ogni Lato della Mezzeria
1	18	60	3
2	23	75	4
3	30	100	4
4	45	150	5
5	60	200	6
6	90	300	10

**Tabella 4-1 Frequenza delle misurazioni**

La seconda interpretazione delle indicazioni I.C.A.O. fornita dallo “*study draft 1*” riguarda il modo di elaborare l’informazione sull’aderenza fornita dagli strumenti di misura per definire un valore caratterizzante la pista da confrontare con i limiti imposti dall’I.C.A.O.. Lo STANAG prescrive che tale elaborazione sia effettuata sulla base del “*Minimum 100 meters rolling average*”, la cui procedura è da definirsi sotto la responsabilità di ogni Stato membro. Contestualmente viene fornita la seguente procedura con cui calcolare il “*Minimum 100 meters rolling average*”.

- a) Si calcola un valore (medio) dell’aderenza per ogni tratto di 10 m lungo la pista, a partire dai dati raccolti dallo strumento di misura, per ogni passaggio effettuato, intendendo per passaggio il rilievo dell’aderenza lungo una striscia per tutta la lunghezza della pista. Dividendo quest’ultima in tre parti nel senso della sua larghezza, si assume che vi***

---

<sup>4</sup> Durante la redazione della presente Tesi, è in corso la redazione di una nuova edizione dello STANAG in cui i valori riportati nella Tabella 4-1 subiranno delle modifiche

*siano almeno 2 rilievi per ogni parte; per ogni 10 m di pista si possono calcolare, dunque, due valori medi per quel tratto, a partire dai dati raccolti con ognuno dei rilievi. Di questi due valori si ricava la media, che caratterizzerà, per ogni terzo della larghezza della pista, il tratto di 10 m considerato.*

- b) Su una distanza di 100 m si può calcolare un valore medio dei valori, assegnati con la fase precedente, ai tratti di 10 di pista per ognuno delle tre parti in cui essa era stata divisa nel senso della larghezza. Per ogni segmento di 10 m possono essere calcolati dieci di tali valori medi, al passare del “cursore” di 100 m lungo la pista con incrementi di 10 m, in modo tale che il tratto di 10 m in esame sia sempre interessato dal “cursore”. Il “minimum 100 meters rolling average” per un particolare incremento di 10 m è il minimo di tali dieci valori medi. E’ accettato che alcuni dati, tra quelli relativi agli incrementi di 10 m, sulla base di considerazioni ingegneristiche, possano essere ignorati. In tal caso, è raccomandato che non meno di 8 di tali valori medi siano utilizzati per calcolare la minima media su 100m.*
- c) I passaggi standard per il rilievo dovrebbero partire prima e finire dopo l’area da testare al fine di consentire di stabilizzare i dati e la procedura.*
- d) A questo punto, per ognuna delle tre parti in cui è stata divisa la pista per la sua larghezza, si può riportare, anche graficamente, con una rappresentazione tipo “codice a barre”, la situazione della pista ogni 10 m. Il criterio per stabilire se è necessario o meno un intervento volto al ripristino delle caratteristiche superficiali è quello di controllare se*

*esistono zone con coefficiente di aderenza al di sotto dei limiti imposti, comprendenti più di dieci tratti, ovvero più lunghe di 100 m.*

Così come per il criterio proposto dal C.A.A., è possibile determinare, con una elaborazione di questo tipo, asimmetrie nelle caratteristiche di aderenza che devono essere evitate in quanto potenzialmente pericolose.

#### **4.5. LA PROGRAMMAZIONE DELLE RIMOZIONI DEI DEPOSITI DI GOMMA: PROCEDURA DEL DEPARTMENT OF AIR FORCE – USAF**

Nel maggio 2004 il *DEPARTMENT OF THE AIR FORCE* statunitense, tramite l’*“Engineering Technical Letter 04-10”* ha stabilito una procedura interna finalizzata all’utilizzo dei rilievi di aderenza per la programmazione delle operazioni di *sgommatura* delle piste. In precedenza la necessità dell’intervento era stabilita dall’*“airfield manager”*, ovvero il responsabile delle infrastrutture in un Aeroporto in base alla propria esperienza e in seguito ad una ispezione visiva della pista. Per standardizzare queste operazioni ed evitare che, a causa della soggettività delle valutazioni, si ricorresse troppo spesso oppure troppo raramente sull’infrastruttura, è stato definito un metodo che, a partire dai rilievi di aderenza, senza sostituirsi alle valutazioni relative agli interventi di carattere generale, fornisce un supporto alle decisioni relative all’intervento di *sgommatura*. Le condizioni che possono definirne la necessità non riguardano solo il deteriorarsi del *grip* nelle zone di accumulo della gomma, ma anche quelle relative alla visibilità della segnaletica orizzontale. Le linee guida contenute nella *Engineering Technical Letter* si basano sulla seguente tabella:

Test Device	65 km/h (40 mph)		95 km/h (60 mph)	
	Action Level	Planning Level	Action Level	Planning Level
Airport Surface Friction Tester	0.50	0.60	0.34	0.47
BV-11 Skidometer	0.50	0.60	0.34	0.47
GripTester Friction Tester	0.43	0.53	0.24	0.36
Mu Meter	0.42	0.52	0.26	0.38
RUNAR (operated at fixed 16% slip)	0.45	0.52	0.32	0.42
Runway Friction Tester (M 6800)	0.50	0.60	0.41	0.54
Safegate Friction Tester	0.50	0.60	0.34	0.47
Tatra Friction Tester	0.48	0.57	0.42	0.52

**Tabella 4-2 Valori di soglia in funzione della programmazione delle rimozioni dei depositi di gomma sulle piste**

La procedura considera, al fine di definire critica una situazione riscontrata sulla superficie di volo, l'estensione delle zone caratterizzate da scarse caratteristiche di aderenza, ammettendo che, nel caso di zone limitate con bassi valori di  $m$  non si necessita di interventi manutentivi, mentre estese zone con *grip* insufficiente rappresentano un problema serio per la sicurezza e necessitano di interventi tempestivi. Si riportano di seguito le indicazioni contenute nel documento citato:

- valori di aderenza al di sotto del *Planning Level* per tratti di 152 m (500 piedi). *Quando il valore medio di  $m$  su superficie bagnata con rilievi effettuati a 65 e a 95 Km/h è al di sotto del Planning Level, ma superiore all'Action Level definito nella Tabella 4-2 per un tratto di 152 m, ma entrambi i tratti adiacenti di 152 m presentano valori al di sopra o coincidenti con quelli del Planning Level, non sono richieste azioni correttive. In questa situazione le caratteristiche di aderenza della*

*pavimentazione si stanno deteriorando, ma la situazione è ancora accettabile.*

- *valori di aderenza al di sotto del *Planning Level* per tratti di 305 m (1000 piedi). Quando il valore medio di *m* su pavimentazione bagnata in un'area caratterizzata da depositi di gomma, con rilievi effettuati alle velocità di 65 e 95 Km/h è al di sotto del *Planning Level* definito nella Tabella 4-2 per una distanza di 305 m o più, il responsabile delle infrastrutture deve programmare un intervento di sgommature prima del successivo rilievo di aderenza.*
- *valori di aderenza al di sotto dell' *Action Level*. Quando il valore medio di *m* su una superficie bagnata, in un'area interessata da depositi di gomma, con rilievi effettuati a 65 e 95 Km/h è al di sotto dell'*Action Level* definito Tabella 4-2, per un tratto lungo 152 m e entrambi i segmenti adiacenti risultano al di sotto del *Planning Level*, allora si dovrà intraprendere immediatamente un intervento di sgommatura ed emettere un NOTAM che segnali la condizioni di scarsa aderenza.*

Oltre alla procedura descritta, il documento del *DEPARTMENT OF THE AIR FORCE* pone l'accento su una questione importante ai fini della qualità dei dati rilevati, ovvero l'addestramento del personale. Questa attività dovrebbe essere efficacemente sostenuta, in quanto è necessario acquisire competenze ed esperienza per garantire dei rilievi affidabili.

Un'ultima osservazione riguarda la frequenza dei rilievi fissata dall'F.A.A. con la Tabella 3-3; in particolare, in considerazione del fatto che le frequenze stabilite derivano da un'ipotesi di traffico medio operante su una certa pista, quando l'incidenza del traffico "*wide body*", tra cui anche il C-130, supera il 20%, è

opportuno effettuare rilievi con una frequenza maggiore. Come criterio può adoperarsi quello di utilizzare la frequenza prescritta per la fascia di traffico che precede quella in questione.

## **4.6. RACCOLTA DEI DATI SPERIMENTALI**

Al fine di confrontare i metodi di elaborazione esposti precedentemente, si è effettuata una raccolta di dati sperimentali presso aeroporti in cui vengono condotte con regolarità prove di aderenza sulle piste di volo. I dati sono stati forniti su supporto cartaceo in forma di diagrammi. I diagrammi riportano sull'asse delle ascisse la progressiva della pista in corrispondenza di cui, sull'asse delle ordinate, è riportato il valore del coefficiente di aderenza misurato. Ogni 100 m è riportato anche il valore della velocità istantanea del mezzo di prova. Per poter procedere alle elaborazioni è stato necessario riportare i valori leggibili sui diagrammi in un *data base*, nella forma di Fig. 4-2. I dati disponibili sono relativi a prove effettuate alla velocità di 95 Km/h, ed ogni prova consiste di un solo rilievo per ogni direzione. Lo strumento utilizzato è il *RUNWAY FRICTION TESTER*.

Ai fini dell'individuazione delle zone della pista maggiormente consumate e per individuare l'influenza della segnaletica sull'aderenza è stato utilizzata l'apparecchiatura di prova Adhéra assieme al profilometro Greenwood, per la misura della macrorugosità.



Con i dati a disposizione, inoltre, mentre è stato possibile testare il modo diverso di calcolare il valore di riferimento proposto, rispettivamente, dallo STANAG e dalla C.A.A., gli stessi non hanno permesso di testare l'influenza della prescrizione dello STANAG relativa al numero minimo di rilievi da effettuare per ognuna delle parti in cui la pista deve essere divisa nel senso della sua larghezza.

#### **4.8. INSERIMENTO IN UN DATA BASE DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE**

In questa sede si darà solo cenno alla fase, successiva a quella descritta, del Piano di Manutenzione Programmata di cui il rilievo delle condizioni di aderenza è solo una delle attività di monitoraggio. In particolare, i risultati dell'elaborazione devono confluire in un *data base* in cui sono presenti anche i risultati derivanti dalle altre attività di indagine svolte nell'ambito del Piano. Su questo *data base* è basato il supporto alle decisioni che si intende fornire al tecnico responsabile della manutenzione delle infrastrutture. Tale supporto sarà tanto più avanzato quanto più è evoluto il software a disposizione per il trattamento dei dati contenuti nel *data base*. Per la definizione di questo software assumono particolare importanza i *criteri decisionali*; se nell'ambito di una attività semplice, quale lo stabilire se un parametro prestazionale soddisfa o meno un requisito, può essere sufficiente l'applicazione dei concetti elementari dell'algebra di Boole, con operatori condizionali (del tipo "IF"..."THEN") e algebrici ( $>$ ,  $<$ ,  $=$ ), quando si vogliono contemplare, nell'ambito di una decisione, istanze provenienti da valutazioni su caratteristiche differenti, espresse in formati differenti e che determinano soluzioni che, per quanto differenti, sono strettamente dipendenti, allora è necessario ricorrere a due tipi di soluzione. La prima è relativa alla formulazione

di criteri di equivalenza nella valutazione dei diversi parametri prestazionali. In questo modo è possibile valutare le condizioni dell'infrastruttura secondo il criterio del livello di servizio; questo metodo fornisce la possibilità di stabilire in maniera univoca il momento in cui le condizioni generali dell'infrastruttura non rispondono più alla domanda di prestazione richiesta. E' da sottolineare che, al di là di quelli connessi con la sicurezza, i limiti entro cui definire utilizzabile un'infrastruttura sono una scelta "politica" relativa al livello di prestazione che si vuole garantire e da mediare con le risorse finanziarie a disposizione. Questo metodo, però, non risolve il problema della programmazione degli interventi. Il fatto che si analizzano contemporaneamente problematiche che necessitano di soluzioni diverse, ma tali che alcune ne comprendono già altre, rende indispensabile una valutazione basata su procedure di analisi sequenziali, che considerano interventi man mano più profondi e ne valutano di volta in volta l'efficacia.

# 5 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

## 5.1. SOFTWARE UTILIZZATO – CARATTERISTICHE DEI TRATTI DI ESTREMITÀ

I dati raccolti secondo quanto descritto al § 4.6 sono stati trattati con un foglio di calcolo comunemente disponibile sul mercato. Particolare attenzione è stata posta nella valutazione dei tratti di estremità di pista. E' bene notare che le misurazioni dovrebbero avvenire con velocità fissate degli strumenti di prova; nei tratti iniziali della pista, però, quando la configurazione di quest'ultima non prevede una stopway pavimentata, diventa difficile, quando non impossibile, raggiungere le velocità necessarie alle misurazioni. D'altra parte, per caratterizzare un tratto di 10 m, in entrambe le procedure esposte precedentemente, si fa riferimento ai tratti di pista che seguono e precedono per una lunghezza pari a 50 m e 100 m, rispettivamente nel caso della procedura C.A.A. e STANAG. Si riportano, di seguito, gli accorgimenti utilizzati per omogeneizzare i dati sull'intera lunghezza indagata.

Nel caso della procedura proposta dalla C.A.A. le medie per gli ultimi 50 m di pista, simmetricamente per l'inizio e la fine, sono state calcolate su un numero di dati decrescenti da dieci (per il quinto tratto di pista di lunghezza pari a 10 m) a cinque (per il primo tratto).

Nel caso della procedura STANAG, in applicazione di quanto riportato nel metodo proposto, si è riportato un numero minimo di 8 valori (medi) da cui sulla base di cui calcolare il “*minimum 100 meters rolling average*”. Sono stati scartati,

quindi, i valori medi calcolati per i due tratti più estremi per la definizione del “*minimum 100 meters rolling average*” per il primo tratto di 10 m. Per il secondo tratto, invece, è stato scartato il primo di tali valori medi. In tutti i casi, e, quindi, fino al decimo tratto, i minimi sono stati ricavati da medie calcolate anche con meno di dieci valori.

## 5.2. LA FASE INTERMEDIA DI ELABORAZIONE: “SMOOTH OUT” DEI DATI

La prima fase di elaborazione restituisce un profilo dell’aderenza lungo la pista più leggibile, in quanto si passa da valori puntuali a valori medi. Come si può osservare dalla Fig. 5-2, l’elaborazione con il metodo STANAG fornisce, sezione per sezione, un valore inferiore a quello risultante dall’elaborazione con il metodo C.A.A.. Questa situazione non può automaticamente significare che il metodo STANAG sia più cautelativo, in quanto nella fase successiva, cioè quella in cui i valori elaborati saranno confrontati con i valori di soglia, la lunghezza dei tratti da considerare ai fini della manutenzione è diversa nei due metodi.

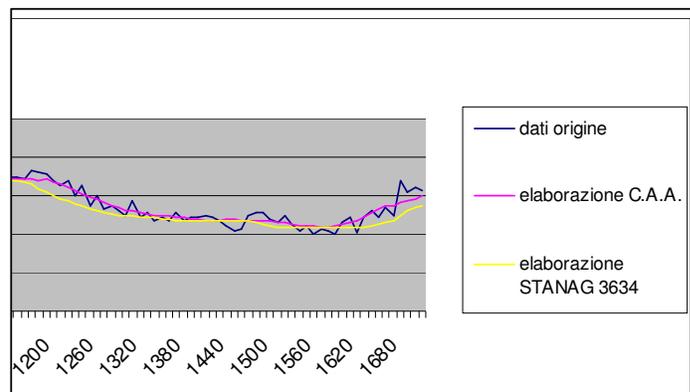


Fig. 5-1 Profili di aderenza ottenuti con dati elaborati e non elaborati

### 5.3. CONFRONTO TRA I RISULTATI

In base alle elaborazioni effettuate, si riporta nella Tabella 5-1 e nella Tabella 5-2 un estratto con le lunghezze dei tratti che presentano caratteristiche di aderenza inferiori al “*Maintenance Planning Level*”, e per i quali sarebbe necessario programmare un intervento manutentivo:

<b>PISTA NORD</b>		
<b>rilievo</b>	<b>lunghezza tratto di intervento</b>	
	<b>elaborazione CAA</b>	<b>elaborazione STANAG</b>
1	360 m	350 m
2	0 m	0 m
3	360 m	350 m
4	0 m	0 m
5	0 m	0 m
6	120 m	230 m
7	0 m	0 m
8	0 m	0 m
9	0 m	0 m
10	0 m	0 m
11	0 m	0 m
<b>n° interventi</b>	<b>3</b>	<b>3</b>

Tabella 5-1 Pista Nord – Risultati elaborazioni

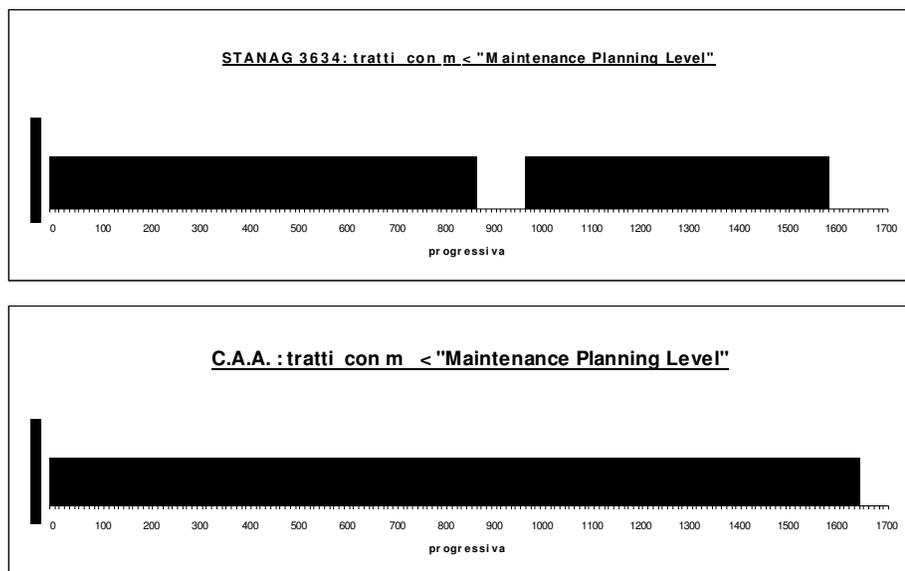
<b>PISTA SUD</b>		
<b>rilievo</b>	<b>lunghezza tratto di intervento</b>	
	<b>elaborazione CAA</b>	<b>elaborazione STANAG</b>
1	350 m	340 m
2	260 m	250 m
3	250 m	240 m
4	360 m	340 m
5	0 m	0 m
6	120 m	110 m
7	0 m	0 m
8	0 m	0 m
9	0 m	0 m
10	140 m	140 m
11	0 m	0 m
<b>n° interventi</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

Tabella 5-2 Pista Sud – Risultati elaborazioni

Come si evince dalle tabelle, il metodo C.A.A. restituisce in quasi tutti i casi lunghezze maggiori su cui intervenire. Tuttavia questa differenza, in quanto si aggira sull'ordine di grandezza delle decine di metri, non costituisce un fattore discriminante, attesa la finalità di queste indagini, volte a programmare gli interventi, che, una volta attuati, interesseranno tratti ben più ampi di quelli strettamente necessari per ottimizzare i tempi di fermo per lavori dell'infrastruttura. Diversa è la considerazione che può trarsi per il caso riportato in Fig. 5-2, da cui si evince che, indipendentemente dalla lunghezza dei tratti risultati non conformi, il metodo STANAG 3634 ha rilevato un tratto di pista non rilevato, invece, dal metodo C.A.A.. Questa circostanza merita senz'altro di essere considerata elemento discriminante di scelta, poiché suggerisce che un metodo risulta più "cautelativo" dell'altro. Questa proprietà, applicata all'utilizzo di un P.M.S. che preveda un regolare monitoraggio dell'aderenza, permette di rilevare in anticipo situazioni critiche. Un'altra considerazione che può trarsi è che il metodo STANAG fornisce un preavviso del raggiungimento delle condizioni critiche. In entrambe le metodologie di elaborazione, infatti, l'interfaccia con l'utente è di tipo binario (il risultato finale per il tratto di prova di 10 m è "adeguato" o "non adeguato", con una rappresentazione tipo "bar code" ad elementi bianchi o neri). D'altra parte, una rappresentazione del genere è stata preferita ad una più qualitativa (ottenibile, ad esempio, utilizzando dei colori per mettere in evidenze le zone critiche) per evitare differenze interpretative; la rappresentazione binaria consente, infatti, di determinare univocamente l'evenienza o meno della condizione critica. Nel caso dell'elaborazione secondo il metodo C.A.A., al presentarsi, per il primo tratto di 10 m, della segnalazione del raggiungimento del valore di soglia (il che si traduce, in termini di interfaccia

utilizzata, nell'apparizione della prima barra bianca sulla "bar code" che identifica la pista), è necessario programmare l'intervento di manutenzione. Il parametro associato a quel tratto di 10 m è stato, infatti, calcolato sulla base di una lunghezza di pista pari a 100 m a cavallo di quel tratto, e questo implica che quel tratto di 100 m non soddisfa le caratteristiche richieste dalla normativa I.C.A.O. e, per la sua lunghezza, rappresenta pericolo e, in ultima analisi, è necessario prendere i provvedimenti conseguenti.

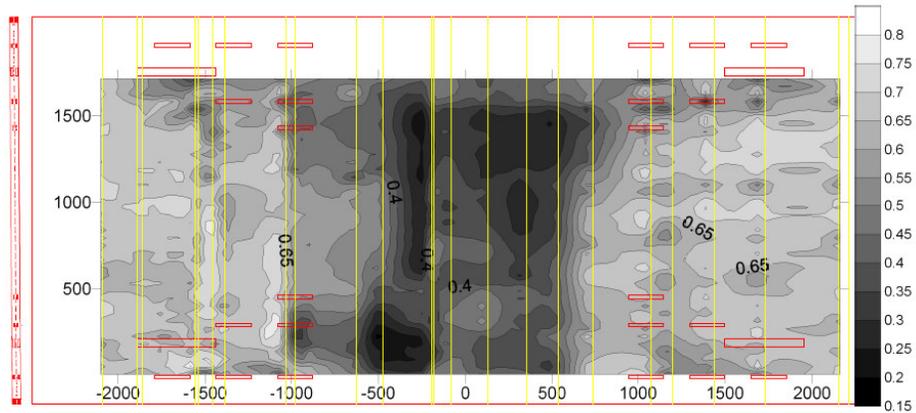
A differenza di quanto accade per questo metodo, la procedura secondo lo STANAG 3634, pur mantenendo le proprietà legate all'espressione binaria del risultato, offre la possibilità di preavvertire l'insorgere della condizione critica, senza averla ancora attinta. Quando sull'interfaccia grafica (il "bar code") compare il primo tratto bianco, infatti, si evince che le caratteristiche stanno deteriorandosi, ma si potrà attendere il superamento del valore di soglia del decimo tratto consecutivo, prima di attingere la condizione critica.



**Fig. 5-2– Confronto tra metodo C.A.A. e STANAG: capacità di evidenziare zone critiche**

Notevoli risultati sono stati raggiunti utilizzando l'attrezzatura ad alto rendimento Adhéra.

Si è notata la non perfetta simmetria delle zone di maggior consumo, ed inoltre si è notato che in corrispondenza della segnaletica l'aderenza diminuisce notevolmente. A titolo esemplificativo si riporta la figura seguente.



Variabilità dell'aderenza lungo la pista.

Dall'analisi dei dati si evidenzia l'opportunità di individuare una metodologia di rilievo che tenga conto dello spettro di traffico per il rilievo dei valori di aderenza lungo la pista.

Pertanto è raccomandabile che le autorità aeroportuali costruiscano un database disaggregato per il rilievo del traffico.

## **6 L'IMPLEMENTAZIONE DI UN PROGRAMMA DI MONITORAGGIO PER LE INFRASTRUTTURE AEROPORTUALE**

In Italia la quasi totalità degli aeroporti nascono come aeroporti militari aperti poi, in un secondo momento al traffico civile. Attualmente in esercizio si hanno

- aeroporti militari,
- aeroporti a traffico misto,
- aeroporti civili

Le infrastrutture militari, nell'accezione del termine che indica quelle che servono velivoli militari "operativi", sono soggette ad un traffico diverso, naturalmente, da quello civile. Le caratteristiche di tale traffico, composto da velivoli complessivamente più leggeri di quelli commerciali, ma con pressioni di gonfiaggio maggiori (e, quindi, pressioni puntuali più alte sulla pavimentazione), sottopongono la pavimentazione, in maniera particolare, al problema del deposito di gomma. D'altra parte, poiché a confronto con un aeroporto commerciale, il traffico annuale tipico di un aeroporto militare è molto più contenuto, è bene gestire in modo critico il controllo delle caratteristiche, fissando in modo opportuno lo scopo pratico ad esso conseguente, ovvero la programmazione degli interventi di rimozione dei depositi di gomma. A meno di problematiche estese anche ad altre caratteristiche della pavimentazione, un intervento di questo tipo è normalmente in grado di riportare l'aderenza a valori accettabili. Da un punto di vista della sicurezza, inoltre, in molti casi, per i jet militari è previsto un sistema di arresto mediante apposite barriere. Da non trascurare, inoltre, che in molti casi

gli aeroporti militari sono ormai adibiti all'utilizzo anche da parte di aviazione leggera. A titolo indicativo, si ricorda che l'APT-10 ENAC è applicabile ad aeroporti con traffico passeggeri superiore a 600.000/anno. Tradurre questo dato in numero di operazioni/anno non è affidabile, in quanto i dati a disposizione sono molto variabili. Per esempio:

AEROPORTO	PASS/ANNO	OPS/ANNO
ANCONA FALCONARA	497.306	14.391
LAMEZIA TERME	1.265.153	14.263

**Tabella 6-1 Dati di traffico – in passeggeri e n° operazioni per anno<sup>5</sup>**

Come si evince dalla Tabella 6-1, per i due aeroporti considerati, ad un numero simile di operazioni, corrispondono due dati di traffico passeggeri uno il doppio dell'altro.

Sebbene, dunque, non sia possibile tradurre con precisione il dato di traffico proposto dall'ENAC, è possibile ipotizzare che il traffico significativo ai fini del deterioramento delle caratteristiche di aderenza sia quello generato da velivoli di tipo jet (ovvero velivoli operativi) e dai velivoli da trasporto.

La situazione attuale riguardante le infrastrutture militari si presenta molto complessa dal punto di vista della gestione della manutenzione in virtù della sempre più frequente presenza di aeroporti di tipo “misto”, ovvero militari, ma aperti al traffico civile. In questo caso, la gestione e l'onere economico della manutenzione dovrebbero essere regolati dall'atto amministrativo relativo alla concessione dell'infrastruttura al gestore. Come è possibile rilevare, inoltre, dai dati di traffico disponibili, il traffico generato da velivoli civili è in costante

---

<sup>5</sup> Fonte: annuario statistico ENAC 2004

aumento, mentre quello militare ha una tendenza alla stabilità. Secondo queste premesse, è ipotizzabile che l'attività di monitoraggio di tali aeroporti sia devoluta ai gestori civili.

Per le infrastrutture aeroportuali militari è possibile pensare ad una gestione centrale delle attività di monitoraggio, in modo da creare un team con le appropriate competenze che potranno essere sfruttate su tutto il territorio. Nell'ambito di un'organizzazione di questo tipo si inserirebbe il programma per il monitoraggio dell'aderenza delle piste di volo. Si trattano di seguito le problematiche da affrontare per la definizione di un programma di tal genere, proponendo alcune soluzioni.

#### 1. Le infrastrutture da monitorare.

L'individuazione delle infrastrutture da monitorare è un punto determinante nel processo, in quanto il numero e l'ubicazione degli aeroporti su cui effettuare le indagini condizioneranno le scelte successive, in particolare riguardo alla convenienza o meno di gestire l'attività in proprio o in *out-sourcing*.

Punto imprescindibile per una corretta valutazione è la registrazione dei dati di traffico. Attualmente vengono riportati e sono disponibili i dati relativi al numero di atterraggi e decolli sulle piste, ma non sono riportate le tipologie dei velivoli che generano il traffico. In considerazione della difficoltà di applicare calcoli statistici per disaggregare i dati disponibili, sarebbe preferibile avere a disposizione anche la suddivisione del traffico per tipo di velivolo. I dati attualmente raccolti hanno il format riportato in Tabella 6-2

MESE	DECOLLI												ATTERAGGI														
	Linea/Chart		Militari				Aviazione Generale				Decolli Militari	Decolli Civili	TOTALE dei Decolli	Linea/Chart		Militari				Aviazione Generale				Atterr. Militari	Atterr. Civili	TOTALE degli Atterggi	
	Nazion.	Intern.	Nazion.	Intern.	Nazion.	Intern.	Nazion.	Intern.	Nazion.	Intern.				Nazion.	Intern.	Nazion.	Intern.	Nazion.	Intern.								
	IFR	VFR	IFR	VFR	IFR	VFR	IFR	VFR				IFR	VFR	IFR	VFR	IFR	VFR	IFR	VFR								
Gen			243				136			243	136	379					264		139			264	139	403			
Feb			268				161			268	161	429					299		159			299	159	458			
Mar			373				236			373	236	609					397		236			397	236	633			
Apr			395				280			395	280	635					351		275			351	275	626			
Maggio			452				260			452	260	712					478		262			478	262	740			
Giugno			429				300			429	300	729					426		302			426	302	728			
Luglio			513				338			513	338	851					539		332			539	332	871			
Agosto			248				135			248	135	383					294		139			294	139	433			
Settembre			463				242			463	242	705					505		238			505	238	743			
Ottobre			356				284			356	284	640					384		282			384	282	666			
Novembre			0				0			0	0	0					0		0			0	0	0			
Dicembre			0				0			0	0	0					0		0			0	0	0			
<b>TOTALE</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3700</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2372</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3700</b>	<b>2372</b>	<b>6072</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3937</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2364</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3937</b>	<b>2364</b>	<b>6301</b>

TOTALE Generale	TOTALE Militari	TOTALE Civili	Tot. Civili Internaz. IFR-VFR	TOTALE GENERALE MILITARI	TOTALE MOVIMENTI IFR MILITARI	Tot. Civili	Civ. Internaz.	Civ. Naz.
12373	7637	4736	0	0	0	0	0	0

Tabella 6-2 DATA BASE traffico

dal quale non si evince neanche se il traffico è generato da velivoli ad ala fissa o rotante.

2. L'effettuazione delle prove/acquisizione della strumentazione.

Il secondo punto da stabilire riguarda il modo con cui svolgere le indagini: se con risorse interne o esterne.

Nella valutazione economica saranno considerati i costi della strumentazione, della relativa manutenzione, del team di specialisti, della loro formazione e aggiornamento, delle spese di missione legata all'attività; in ogni caso sarà determinante il numero e l'ubicazione degli aeroporti che rientreranno nel programma.

3. Le procedure.

Sia che le prove siano condotte in proprio, sia che vengano effettuate in *outsourcing*, è importante redigere un protocollo di prova, in cui siano chiaramente indicate tutte le procedure da seguire in merito alla localizzazione dei rilievi, alla

velocità da tenere, al numero di passaggi da effettuare, il format con cui deve essere comunicato e archiviato il risultato della prova stessa. Nel caso in cui le prove siano condotte con risorse interne, il rispetto di un tale protocollo sarà propedeutico alla definizione di una attività secondo i criteri di qualità. Nel caso dell'affidamento all'esterno, il protocollo di prova così definito diventerà condizione tecnica allegata al vincolo contrattuale che si instaura con il soggetto esecutore della prova.

#### 4. L'elaborazione.

Con le premesse effettuate, si arriva al punto di avere dei dati di aderenza pronti per l'elaborazione. Per quanto detto precedentemente riguardo le finalità dei rilievi nel caso di infrastrutture militari, è opportuno che l'elaborazione sia effettuata secondo quanto previsto dalla procedura proposta dal *Department of Defense*. Questa attività, inoltre, è gestibile con risorse limitate anche all'interno della F.A., indipendentemente dal soggetto che effettua le prove, dando per certa la rispondenza del formato dei dati comunicati con quanto prescritto nelle condizioni tecniche prima menzionate.

# 7 CONCLUSIONI

## 7.1. STANDARDIZZAZIONE DEL METODO DI ELABORAZIONE

Nell'ottica del controllo dei metodi di gestione della manutenzione al fine di garantire un adeguato livello di sicurezza, la standardizzazione delle procedure gioca un ruolo fondamentale. Premesso che , in linea generale, il livello di sicurezza che ci si prefigge di raggiungere è da considerare un obiettivo politico, in funzione dello sviluppo economico e sociale del contesto in cui si opera, il ruolo di una direttiva tecnica è quello di individuare e descrivere i metodi necessari a garantire il livello di sicurezza richiesto. E', questo, un approccio prescrittivo, nell'ambito del quale la standardizzazione ha un ruolo essenziale, in quanto solo attraverso una chiara ed esaustiva indicazione delle procedure da seguire, e tramite il controllo della loro applicazione, è possibile garantire l'ottenimento degli obiettivi fissati. Questo approccio, inoltre, impone che gli operatori siano in grado di gestire la problematica della manutenzione, a differenza di un approccio mirato al solo controllo di determinati parametri sulle infrastrutture. In quest'ultima ipotesi si può controllare puntualmente il soddisfacimento di determinate condizioni, ma ciò non garantisce una gestione di qualità dell'attività manutentiva.

La definizione esaustiva di una procedura standardizzata anche nel caso del monitoraggio delle caratteristiche di aderenza delle piste di volo si muove in questa direzione, garantendo, con la sua applicazione, che la manutenzione

relativa a questa caratteristica funzionale sia effettuata con criteri tali da rispettare le condizioni di sicurezza.

## **7.2. METODO DI ELABORAZIONE**

Dal confronto effettuato, i metodi analizzati hanno fornito risultati paragonabili. Questa situazione conforta circa l'attendibilità dei due metodi. Per ciò che riguarda l'eventuale prescrizione da parte degli Enti che si occupano della normazione nel settore, attesa la validità di entrambi, il problema si pone nei termini di prescrivere un metodo standard, piuttosto che nella scelta di quale metodo adottare. In ogni caso, come già evidenziato, il metodo STANAG fornisce la possibilità di un maggiore controllo del dell'andamento nel tempo delle caratteristiche funzionali, il che influisce positivamente soprattutto sull'efficacia dell'eventuale sistema di gestione della manutenzione (*P.M.S.*) adottato dall'operatore.

## **7.3. DATA BASE CENTRALIZZATO**

Nell'ambito della ricerca e degli studi, sulla base dei quali effettuare modifiche e aggiornamenti dei parametri con cui si gestisce il livello di sicurezza come accennato precedentemente, sarebbe opportuno raccogliere, a livello centrale, quindi presso l'Ente preposto al controllo e alla normazione del settore, non solo i risultati delle indagini, ma anche i dati origine. In questo modo si avrebbe a disposizione una quantità di dati significativa per studi e ricerche volte anche a definire curve di degrado standard

## BIBLIOGRAFIA

### Aderenza

- S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia. *Il fenomeno dell'aderenza in campo stradale, Ferroviario ed Aeroportuale*, corso di Fondamenti di Infrastrutture Viarie, a.a. 2001/2002.
- S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia. *Il ruolo dell'aderenza superficiale nella definizione delle caratteristiche di sicurezza delle piste aeroportuali*.
- World Road Association PIARC Technical Committee on Surface Characteristics C1.
- F. Buhmann, W.B. Horne. *A Method for Rating Skid Resistance and Micro/Macrotexture Characteristics of Wet Pavements*.
- Q.V. Bui, J.P. Ponthot. *Estimation of rubber sliding friction from aspering interaction modelling*.
- *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*, AIPCR – 01.04-T, 1995.
- E.S.D.U. *Development of a Comprehensive Method for Modelling Performance of Aircraft Tyres Rolling or Braking on Dry and Precipitation-Contaminated Runways (TP 14289E)* Maggio 2003.
- A.S.T.M. *Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces using Mu-Meter*, No. E670-87.
- A.S.T.M. *Standard Test Method of Measuring Surface Macrotexture Depth using a Volumetric Technique* Standard No. E965-96 American Society for Testing and Materials Book of Standards Part 04.03.
- A.S.T.M. *Practice for Calculating the International Runway Friction Index*, Standard No. E2100-00 American Society for Testing and Materials Book of Standards Part 04.03.
- A.S.T.M. *Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*, Standard No. E1960-98 American Society for Testing and Materials Book of Standards Part 04.03.
- A.S.T.M., D 5340-04, *Standards test method for airport pavement condition index surveys*
- ASTM, E274-90, *Standard test method for skid resistance of paved surface using a full-scale tire, in annual book of ASTM standards, section 4 – construction, volume 04.03 road and paving materials; pavement management technology*
- T.J. Yager. *Aircraft/Runway Friction Performance Studies*, Second International Symposium on Road Surface Characteristics
- I.C.A.O. *Airport Services Manual – Part 2 Pavement Surface Conditions* Third Edition 1994.
- N.A.T.O. *Stanag 3634 – Runway Friction and Breaking Conditions*.
- C.A.A. *Cap 683 – The Assessment of Runway Surface Friction for Maintenance Purposes* 14 Maggio 2004.
- *An Evaluation of Winter Operational Runway Friction Measurement Equipment, Procedures and Research*, 25 Gennaio 1995.
- J.C. Wambold. *Joint Winter Runway Friction Measurement Program (JWRFMP) 2000 Testing and Data Analysis*, Transportation Development

- Centre, Transport Canada, TP140626E, Ottobre 2001.
- J.C. Wambold. *Joint Winter Runway Friction Measurement Program (JWRFMP) 2001 Testing and Data Analysis*, Transportation Development Centre, Transport Canada, TP14192E, Giugno 2002.
  - *Joint Winter Runway Friction Program Accomplishments* – The Virginia Department of Transportation and Virginia Tech Pavement Evaluation 2002 Conference – Ottobre 2002
  - T.C. *Overview of the Joint Winter Runway Friction Measurement Program (TP 13361)* – Novembre 2004
  - J.C. Wambold. *International Runway Friction Index (IRFI): Development Technique and Methodology*, Transportation Development Centre, Transport Canada, TP 14061E, Settembre 2001.
  - A.I.P. Canada. *AIR 1-11 section 1.6.6. Canadian Runway Friction Index* Aprile 2004.
  - J.B. Croll. *Evaluation of Aircraft Braking Performance on Winter Contaminated Runways and Prediction of Aircraft Landing Distance Using the Canadian Runway Friction Index*, National Research Council Canada, LTR-FR-183 TP 13943E Giugno 2002.
  - A.S.F.T. Airport Surface Friction Tester. *Friction Testing 1944-97*.

### **Ingegneria aeroportuale**

- G. Iacopino, A. Rossi Dal Fiume. *Elementi di Progettazione Aeroportuale*.
- N. Ashford, P.H. Wright. *Airport Engineering* – Ed. Wiley Interscience Publication 1984.
- I.C.A.O. *Aerodromes, Annex 14 – Aerodrome Design and Operations*. Luglio 2000.
- N.A.T.O. *Stanag 3634 – Study Draft 1* 30 Giugno 2004.
- E.N.A.C. *APT-10* 22 Novembre 2001.
- NATO, *Approved criteria and standards for airfield, October 1999*
- PIETRO GIANNATTASIO, *Il progetto delle pavimentazioni aeroportuali, Napoli, 1981*
- ICAO, *Aerodrome Design Manual – part3 – Pavements, doc 9157 – AN /901*
- ICAO, *International standards and recommended practices – Aerodromes, Annex 14 to the convention on International Civil Aviation*
- ICAO, *Airport Service Manual – part 3 – Airport Maintenance Practices, doc 9137- AN/898*
- *AIRPORT SERVICE MANUAL, part 2 – Doc. 9137 – AN/898 I.C.A.O.*
- *ANNEX 14 – I.C.A.O.*
- *Advisory Circular 150/5320-12C – Federal Aviation Administration*
- K.J. Balkwill *Development of a Comprehensive Method for Modelling Performance of Aircraft Tyres Rolling or Braking on*

Dry and Precipitation- Contaminated Runways – ESDU , May 2003

- Circolare E.N.A.C. APT-10
- 
- 
- TOCCHETTI A., *infrastrutture aeroportuali, II Ed. ESI*
- ICAO, *Airport Service Manual – part2 – pavement surface conditions doc 9137-AN/898*
- FAA *advisory circular AC:150/5320-12C, Measurement, construction and maintenance of skid resistance airport pavement surface*
- FAA *advisory circular AC: 150/5380-6, appendici A e B, versione italiana a cura di L. Domenichini, manuale per l' esecuzione visiva di rilievi di pavimentazioni aeroportuali*

### **Manutenzione**

- S. Caroli. *Compendio Tecnico Sgommatatura*, Ed. Società Aeroporti di Roma.
- Alitalia. *Informazione tecnico Operativa N. 40 – Take-Off and Landing on Contamineted Runways*, Direzione operativa volo.
- F.A.A. *Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements* – U.S. Department of Transportation.
- CNR, *Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale, 1986*
- FAA *advisory circular AC: 150/5358-7, Pavement Management System*
- FAA *AC150/5580-6: Guide lines and procedures for Maintenance of Airport Pavements*
- MONISMITH,PMS: *Consideration in airport pavement management, in: Research in Airports Pavements, department of civil engineerig, University of California*

### **Regolarità**

- GERARDI T., *the effect on Runway roughness on aircraft operations, pubblicato su: Aircraft Pavement Technology*

### **Gestione**

- R. Passatore, F. D'Amico. *La sicurezza nel trasporto aereo*, Ministero dei Trasporti, Direzione Generale programmazione, organizzazione e coordinamento – Roma.
- A.M. Reparto Addestramento Assistenza al Volo. *Legislazione Aeronautica* Edizione 2002.
- F.A.A. *Advisory Circular 150/5320-12C* 18 Marzo 1997.

- M.Y. SHAHIN, *Pavement Management for airports, roads and parking lots*, Chapman & Hall, 1994
- DAVID W. ROLSTON “*Principles of artificial intelligence and expert systems development*”, McGraw-Hill Book Company, 1988
- GIAQUINTO Tiziana, *Applicazione di un software relazionale al sistema informativo della manutenzione*, pubblicato su : *Osservatorio, Ingegneria Ferroviaria*
- P. ATZENI & S. CERI, *Basi di dati*

#### **Varie**

- P. Ferrari, F. Giannini. *Ingegneria stradale Vol. 1 – Geometria e progetto di strade*.
- G. Mazzuolo. *Appunti di tecnica ed economia dei trasporti*.
- T. Esposito, R. Mauro. *La geometria stradale*.
- P. FERRARI e F. GIANNINI, *Corso stradale e pavimentazioni*, Isedi, 1979
- AASHTO *guide for design of pavement structures*, published by the America Association of State Highway and transportation Officials
- AIPCR, *Valutazione della capacità portante e risanamento delle pavimentazioni*
- AIPCR, *Atti del XXIII convegno nazionale stradale*
- S. LUCENTE, *Analisi comparata*, Musolino, 1980

#### **All. 1 - Esempio di elaborazione di dati rilevati**

## AEROPORTO

<b>AREA: MANUTENZIONE INFRASTRUTTURE E SISTEMI</b>		<b>POST HOLDER: dir. _____</b>	<b>MONITORAGGIO ADERENZA SUPERFICIALE</b>
<b>data:</b> _____	<b>ora:</b> _____	<b>operatore:</b> _____	<b>rilevo:</b> _____ ? programmato ? a richiesta
<b>Strumento:</b> _____		<b>calibrazione trasduttori:</b>   SI ? NO	<b>calibrazione ugelli:</b>   SI ? NO
<b>velocità rilievo:</b> ? 65 Km/h   95 Km/h		<b>autoinnaffiamento:</b> ? SI   NO	<b>spessore velo idrico:</b>   1,00 mm ? 0,5 mm
<b>Design Objective Level</b>		<b>Maintenance Planning Level</b>	
65 Km/h		65 Km/h 0,6	
95 Km/h		95 Km/h 0,47	
		<b>Minimum Friction Level</b>	
		65 Km/h 0,5	
		95 Km/h 0,34	

### Civil Aviation Authority

### STANAG 3634

PROGRESSIVA	m	100 Meters Rolling Average	Maintenance Planning Level	Minimum Friction Level	Minimum 100 Meters Rolling Average	Maintenance Planning Level	Minimum Friction Level
0	0,77	0,7233	1	1	0,6970	1	1
10	0,74	0,7186	1	1	0,6720	1	1
20	0,84	0,7075	1	1	0,6480	1	1
30	0,71	0,7111	1	1	0,6240	1	1
40	0,68	0,6970	1	1	0,6070	1	1
50	0,6	0,6809	1	1	0,5950	1	1
60	0,69	0,6564	1	1	0,5860	1	1
70	0,63	0,6436	1	1	0,5700	1	1
80	0,74	0,6164	1	1	0,5610	1	1
90	0,57	0,6027	1	1	0,5210	1	1
100	0,52	0,5873	1	1	0,5210	1	1
110	0,5	0,5809	1	1	0,5110	1	1
120	0,6	0,5673	1	1	0,5090	1	1
130	0,54	0,5564	1	1	0,5060	1	1
140	0,56	0,5255	1	1	0,4980	1	1
150	0,51	0,5118	1	1	0,4850	1	1
160	0,53	0,5082	1	1	0,4710	1	1
170	0,54	0,5145	1	1	0,4650	0	1
180	0,51	0,5018	1	1	0,4630	0	1
190	0,4	0,4918	1	1	0,4610	0	1
200	0,42	0,4745	1	1	0,4610	0	1
210	0,48	0,4709	1	1	0,4610	0	1
220	0,57	0,4700	1	1	0,4610	0	1
230	0,46	0,4655	0	1	0,4610	0	1
240	0,43	0,4655	0	1	0,4610	0	1
250	0,37	0,4764	1	1	0,4610	0	1
260	0,47	0,4891	1	1	0,4610	0	1
270	0,52	0,5036	1	1	0,4610	0	1
280	0,49	0,5100	1	1	0,4610	0	1
290	0,51	0,5227	1	1	0,4720	1	1
300	0,52	0,5455	1	1	0,4820	1	1
310	0,56	0,5655	1	1	0,4900	1	1
320	0,64	0,5755	1	1	0,4970	1	1
330	0,64	0,5791	1	1	0,5150	1	1
340	0,6	0,5955	1	1	0,5320	1	1
350	0,68	0,6145	1	1	0,5630	1	1
360	0,59	0,6291	1	1	0,5750	1	1
370	0,58	0,6418	1	1	0,5810	1	1
380	0,56	0,6455	1	1	0,5880	1	1
390	0,67	0,6482	1	1	0,6040	1	1
400	0,72	0,6545	1	1	0,6240	1	1
410	0,68	0,6555	1	1	0,6360	1	1
420	0,7	0,6655	1	1	0,6420	1	1

430	0,68	0,6727	1	1	0,6460	1	1
440	0,67	0,6845	1	1	0,6520	1	1
450	0,67	0,6900	1	1	0,6520	1	1
460	0,69	0,6882	1	1	0,6620	1	1
470	0,7	0,6909	1	1	0,6740	1	1
480	0,66	0,6891	1	1	0,6840	1	1
490	0,69	0,6964	1	1	0,6860	1	1
500	0,73	0,7055	1	1	0,6870	1	1
510	0,7	0,7136	1	1	0,6890	1	1
520	0,71	0,7218	1	1	0,6900	1	1
530	0,68	0,7282	1	1	0,6900	1	1
540	0,76	0,7345	1	1	0,6990	1	1
550	0,77	0,7473	1	1	0,7090	1	1
560	0,76	0,7445	1	1	0,7160	1	1
570	0,78	0,7491	1	1	0,7240	1	1
580	0,77	0,7509	1	1	0,7350	1	1
590	0,73	0,7573	1	1	0,7280	1	1
600	0,83	0,7509	1	1	0,7250	1	1
610	0,7	0,7455	1	1	0,7130	1	1
620	0,75	0,7400	1	1	0,7120	1	1
630	0,73	0,7318	1	1	0,7080	1	1
640	0,75	0,7255	1	1	0,7080	1	1
650	0,69	0,7236	1	1	0,7070	1	1
660	0,71	0,7109	1	1	0,7070	1	1
670	0,7	0,7118	1	1	0,7070	1	1
680	0,69	0,7127	1	1	0,7070	1	1
690	0,7	0,7109	1	1	0,7070	1	1
700	0,71	0,7109	1	1	0,7040	1	1
710	0,69	0,7118	1	1	0,7010	1	1
720	0,71	0,7118	1	1	0,7010	1	1
730	0,76	0,7082	1	1	0,7010	1	1
740	0,71	0,7036	1	1	0,6930	1	1
750	0,75	0,7018	1	1	0,6820	1	1
760	0,7	0,7000	1	1	0,6700	1	1
770	0,71	0,7027	1	1	0,6590	1	1
780	0,66	0,6991	1	1	0,6500	1	1
790	0,64	0,6845	1	1	0,6430	1	1
800	0,68	0,6773	1	1	0,6400	1	1
810	0,69	0,6627	1	1	0,6340	1	1
820	0,72	0,6555	1	1	0,6320	1	1
830	0,67	0,6445	1	1	0,6200	1	1
840	0,6	0,6400	1	1	0,6200	1	1
850	0,63	0,6382	1	1	0,6200	1	1
860	0,59	0,6373	1	1	0,6200	1	1
870	0,62	0,6291	1	1	0,6200	1	1
880	0,59	0,6245	1	1	0,6200	1	1
890	0,61	0,6209	1	1	0,6200	1	1
900	0,62	0,6245	1	1	0,6200	1	1
910	0,67	0,6264	1	1	0,6200	1	1
920	0,6	0,6345	1	1	0,6200	1	1
930	0,67	0,6391	1	1	0,6200	1	1
940	0,63	0,6473	1	1	0,6230	1	1
950	0,64	0,6545	1	1	0,6240	1	1
960	0,65	0,6600	1	1	0,6300	1	1
970	0,68	0,6600	1	1	0,6360	1	1
980	0,67	0,6682	1	1	0,6440	1	1
990	0,68	0,6700	1	1	0,6510	1	1
1000	0,69	0,6773	1	1	0,6580	1	1
1010	0,68	0,6809	1	1	0,6590	1	1
1020	0,67	0,6864	1	1	0,6660	1	1
1030	0,69	0,6836	1	1	0,6680	1	1
1040	0,69	0,6845	1	1	0,6740	1	1
1050	0,71	0,6764	1	1	0,6740	1	1
1060	0,68	0,6800	1	1	0,6740	1	1
1070	0,71	0,6736	1	1	0,6740	1	1
1080	0,65	0,6764	1	1	0,6740	1	1
1090	0,68	0,6773	1	1	0,6740	1	1
1100	0,59	0,6773	1	1	0,6740	1	1
1110	0,73	0,6791	1	1	0,6740	1	1
1120	0,61	0,6827	1	1	0,6740	1	1
1130	0,7	0,6827	1	1	0,6740	1	1
1140	0,7	0,6855	1	1	0,6740	1	1
1150	0,69	0,6827	1	1	0,6660	1	1
1160	0,73	0,6909	1	1	0,6570	1	1

