

# Impiego dei conglomerati bituminosi modificati per le piste di volo dell'aeronautica militare italiana e calcolo strutturale mediante il software "LEDFAA"

## *The use of modified bitumen on Italian Aviation runways and structural calculation through the software LEDFAA*

**CAP. ANTONELLO GERMINARIO, TEN. ENRICO CIMAGLIA**  
8° Reparto Genio Campale dell'Aeronautica Militare Italiana

### Riassunto

L'impiego di velivoli militari *fighter*, caratterizzati da elevate pressioni di contatto, spinge l'Aeronautica Militare Italiana verso l'impiego di conglomerati bituminosi modificati ad alto modulo. L'applicazione della nuova metodologia di calcolo prevista dall'ICAO, pone tuttavia l'Aeronautica Militare nell'impossibilità di dimensionare adeguatamente le pavimentazioni flessibili con il Metodo ACN/PCN, il quale non prevede la possibilità di impiegare materiali differenti da quelli *standard*.

Nel presente lavoro, dopo aver verificato le prestazioni dei conglomerati bituminosi modificati, sono state condotte una serie di prove cicliche di trazione indiretta con lo scopo di individuare i valori del Modulo Resiliente per i conglomerati bituminosi tipo usura e binder confezionati con bitume 50/70 e modificato. Attraverso l'impiego del software *Layered Elastic Design*, introdotto dalla *Federal Aviation Administration*, è stato possibile dimensionare una serie di pavimentazioni flessibili realizzate con conglomerati bituminosi modificati e confrontarle, in termini di vita utile, con le corrispettive realizzate con conglomerati bituminosi 50/70. In generale, il programma restituisce risultati che rivelano miglioramenti evidenti in termini di vita utile con l'incremento delle caratteristiche meccaniche dei bitumi utilizzati. Le considerazioni di carattere economico, invece, portano alla conclusione che l'impiego di bitumi modificati, a parità di spessore, comporta incrementi in termini di vita utile della pavimentazione fino ad un massimo di circa il 50%, a fronte di un aumento di costo dell'ordine del 20%.

### Summary

*The new military aircrafts fighters, characterized by high contact pressures, suggests the Italian Aviation to use high module bituminous mixes. However, the application of the new calculation methodology foreseen by the ICAO, did not allow the Italian Aviation to adequately design the flexible pavements by the Method ACN/PCN, which does not foresee the use of different (and not standard) materials.*

*This paper presents the results of several cyclic surveys of indirect traction, after the study of modified bitumen performances, to individuate the Resilient Module values for bituminous mixes, as wear and binder layers, realized with standard 50/70 pen bitumen or modified binders. Through the employ of the software Layered Elastic Design, introduced by the Federal Aviation Administration, it was possible to design a series of flexible pavements, realized with modified bitumen, and to compare them, in terms of useful life, with those realized with 50/70 pen bitumen. In general, the program gives results revealing evident ameliorations in terms of useful life, with the improvement of mechanical characteristics. Economical considerations also lead to the conclusion that the use of modified bitumen, with the same thickness, means an increasing of the useful life of pavements, up to about 50%, against an increasing of costs of about 20%.*

## 1. Premessa

La valutazione delle capacità portanti di una sovrastruttura di volo, ed in particolare delle piste di volo, delle piste di rullaggio e delle bretelle di collegamento, costituisce uno dei parametri di maggior rilievo nella classificazione degli aeroporti. La valutazione di tali capacità permette, da un lato, di imporre limitazioni di sicurezza per l'impiego delle pavimentazioni stesse da parte dei velivoli e, dall'altro, di programmare un'accurata manutenzione volta a ottimizzare la massima operatività dell'aeroporto stesso.

Agli stati membri delle Nazioni Unite è stato richiesto di calcolare e pubblicare la portanza delle pavimentazioni aeroportuali utilizzando il Metodo ACN/PCN introdotto dall'ICAO (International Civil Aviation Organization) nel 1983. L'importanza di tale metodologia è stata incrementata dall'introduzione dell'ultima generazione di velivoli commerciali dotati di carrelli principali a sei ruote (carrelli tridem), come il Boeing 777 e l'Airbus A380, che ha portato le autorità aeroportuali alla necessità di capire se tali velivoli possano operare sulle piste da loro gestite, pur accorciandone la vita utile programmata, o debbano essere rifiutati.

Un altro fattore rilevante è costituito dal fatto che questa metodologia è attualmente allo studio da parte della NATO (North Atlantic Treaty Organization) che sta prendendo in considerazione l'ipotesi di impiegarla in ambito militare allo scopo di confrontare gli indici di portanza delle proprie basi al fine di rendere possibile una più precisa ed efficiente pianificazione delle missioni.

In ambito militare, il passaggio dal "vecchio" Metodo LCN al "nuovo" Metodo ACN/PCN non risulta semplice. Come si specificherà in seguito, l'impiego di velivoli militari tattici quali il Tornado, nella versione Multi Role Combat Fighter, l'F-16 Strike Eagle e, recentemente, l'EFA-Typhoon, caratterizzati da elevate pressioni di contatto e da alte temperature del *Jet Blast*, pone l'Aeronautica Militare Italiana nell'impossibilità di dimensionare adeguatamente le pavimentazioni flessibili con la metodologia ACN/PCN. Inoltre, l'impossibilità di impiegare materiali differenti da quelli *standard*, attualmente previsti nel Metodo ACN/PCN, pone forti limitazioni nella sua applicazione a livello mondiale. Per trovare una soluzione a queste problematiche, il

Laboratorio Principale Prove e Sperimentazioni dell'8° Reparto Genio Campale dell'Aeronautica Militare Italiana, sito nell'Aeroporto di Ciampino, ha condotto una mirata sperimentazione con lo scopo di trovare una strada alternativa per la caratterizzazione dei conglomerati bituminosi modificati ad alto modulo in modo da poterli adoperare nel calcolo strutturale delle pavimentazioni flessibili, secondo quanto previsto dal Metodo ACN/PCN.

## 2. La normativa vigente

### 2.1. Il Metodo LCN

Gli aeroporti destinati ad accogliere il traffico esclusivamente militare seguono la direttiva NATO - *Nato Approved Criteria and Standards for Airfields* del 1999. In essa viene fatto costante riferimento alla metodologia LCN (Load Classification Number) che è un metodo di classificazione delle piste aeroportuali e dei velivoli, che consente di stabilire un raffronto tra la capacità portante della pavimentazione e le caratteristiche dei velivoli. Con tale metodo la capacità portante della pavimentazione viene espressa con un numero, detto *indice LCN*, che consente di stabilire se sono ammissibili sulla pavimentazione aerei aventi carichi e pressioni di gonfiaggio delle ruote diversi da quelli per i quali essa è stata progettata. L'ipotesi fondamentale, posta alla base del Metodo LCN, è che la rottura della pavimentazione dipende, entro determinati limiti, dal carico su singola ruota equivalente e dalla superficie di impronta del pneumatico.

La STANAG 7131, pubblicata in ambito NATO nel settembre 2003, con il codice provvisorio *AEP-46A*, nasce proprio con lo scopo di affiancare al Metodo LCN il Metodo ACN/PCN che, inizialmente concepito per essere impiegato nell'ambito dell'aviazione civile, sta prendendo piede anche in campo militare.

### 2.2. Il Metodo ACN/PCN

Le attività di verifica e controllo degli aeroporti civili o militari che siano aperti al traffico civile sono invece connesse con le nuove direttive del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti che, con Decreto del 23 maggio 2002 - "Recepimento dell'Annesso n° 14 Aero-

dromi, Terza Edizione del luglio 1999 e successivi emendamenti”, applica le disposizioni previste in materia di progettazione, costruzione ed esercizio delle infrastrutture aeroportuali destinate alle operazioni di volo degli aeromobili (Art. 1).

L'Annesso 14 rimanda le specifiche all'*Aerodrome Design Manual - Part 3 - Pavements* dell'ICAO che definisce le metodologie per la verifica delle sovrastrutture di volo. Esso fa a sua volta riferimento alle circolari AD 150/5335/5 - *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN* del 1983 e AD 150/5320/6D - *Airport Pavement Design and Evaluation* del 1995 per le metodologie di prova.

Il metodo è strutturato in maniera tale che una pavimentazione, con un particolare valore del PCN, può sopportare, senza restrizioni sul peso, un velivolo che ha un valore dell'ACN minore o uguale del PCN della pavimentazione. Lo stesso Annesso 14 designa il Metodo ACN/PCN come l'unico metodo approvato per la valutazione della portanza di una pavimentazione per aerei con massa superiore a 12.500 libbre (5.700 kg). Tale scelta è derivata solo dalla necessità di uniformare i dati relativi alle caratteristiche delle pavimentazioni dei diversi Stati membri riportati nelle AIPs (Aeronautical Information Publications). In tal senso l'ICAO non ha specificato una guida su come l'Autorità Aeroportuale debba arrivare alla determinazione del PCN, proprio per l'assenza di un unico metodo di progettazione e valutazione delle pavimentazioni codificato ed accettato a livello internazionale.

### 3. Confronto tra il metodo LCN e il metodo ACN/PCN

#### 3.1. La normativa

A differenza della metodologia LCN, la nuova metodologia risulta estremamente semplice ed immediata. È sicuramente da apprezzare il tentativo fatto dall'ICAO di uniformare in tutto il mondo la metodologia con la quale identificare il valore finale che individua la portanza della pavimentazione, o meglio, la metodologia con la quale un qualunque valore di portanza viene poi rapportato in un'unica scala. Però, tale sforzo è valido solo da un punto di vista procedurale; esso infatti

solleva numerosi dubbi di carattere teorico. Innanzitutto la specificazione fatta nell'*Aerodrome Design Manual - Part 3 - Pavements* secondo cui tale metodo di calcolo non è pensato per la progettazione ma solo per la scrittura sulle riviste aeronautiche, getta una oscura ombra sull'intera metodologia (Art. 1.1.2.1.).

Va infatti notato che il Metodo ACN/PCN mira soltanto alla pubblicazione dei dati sulla resistenza delle pavimentazioni nelle AIPs (Aeronautical Information Publications); esso non è pensato per la progettazione o la valutazione delle pavimentazioni né tanto meno contempla l'uso di uno specifico metodo di un'autorità aeroportuale per il progetto o la valutazione di pavimentazioni.

#### 3.2. "Progettazione" e "verifica" delle superfici di volo

La metodologia LCN utilizza un differente approccio nel caso si tratti di "progettazione" di una nuova pavimentazione oppure di "verifica" di una pavimentazione esistente. In particolare, la progettazione avviene attraverso un procedimento semiempirico, ossia impiegando una serie di coefficienti di trasformazione che permettano l'equivalenza tra strati costituiti da differenti materiali ed uno strato *standard*, e la verifica avviene attraverso un procedimento sperimentale, ossia mediante l'esecuzione in sito di prove di carico diretto su piastra. Tale metodologia non permette la progettazione delle pavimentazioni flessibili nelle quali siano impiegati nuovi materiali, delle cui caratteristiche meccaniche il progettista può tenere conto solo attraverso la propria esperienza personale; ne consente invece la verifica: la prova di carico, per sua costituzione intrinseca, tiene conto dell'intero pacchetto costituente la pavimentazione, indipendentemente dalla conoscenza della stratigrafia e dalle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti.

Nella metodologia ACN/PCN la valutazione del carico ammissibile avviene tramite la stessa procedura impiegata per la progettazione o meglio per la "valutazione" (Metodo del Dimensionamento Inverso, Art. 3.6.3.). Ciò, di fatto, impone che per le due fasi si applichi la stessa identica procedura che, per forza di cose, non può che dare sempre risultati positivi. In alternativa a tale procedura, sarebbe possibile prevedere l'im-

piego di prove di carico diretto. Come specificato dall'ICAO, la metodologia ACN/PCN ammette la determinazione della portanza delle pavimentazioni attraverso prove di carico diretto con piastra (Art 3.6.4.1.); in particolare viene specificato che tra le differenti metodologie, il Metodo LCN costituisce un eccellente esempio di metodo statico diretto. Sfortunatamente, la procedura di prova non viene specificata dall'ICAO né tanto meno si fa riferimento a come calcolare l'indice PCN dal valore del carico di rottura.

### 3.3. Carico su singola ruota equivalente e pressione di gonfiaggio: il caso dei velivoli militari

A differenza della metodologia LCN, nella metodologia ACN/PCN il carico su singola ruota equivalente è sostituito dal carico su gamba di forza; tale sostituzione rappresenta un notevole passo in avanti perché permette di considerare le reali tensioni generate da una combinazione di ruote multiple (doppie, tandem, doppio tandem) e di eliminare il carico su singola ruota equivalente che rappresentava, in realtà, una grossa approssimazione del Metodo LCN.

I concetti di pressione di gonfiaggio e area di impronta vengono completamente trascurati nella metodologia ACN/PCN. Infatti, secondo l'ICAO, la pressione ha poca influenza sulle pavimentazioni in calcestruzzo che di solito possono ammettere alte pressioni. Nel caso di pavimentazioni flessibili, invece, si ammette che la pressione possa essere limitata a seconda della qualità del conglomerato e delle condizioni climatiche, ma in che modo ciò debba avvenire non è specificato.

Questa forte semplificazione deriva dal fatto che, in realtà, il Metodo ACN/PCN è stato sviluppato per uniformare gli indici di portanza degli aeroporti civili, i cui velivoli presentano ruote con pressioni di gonfiaggio contenute, o comunque non paragonabili con quelle dei caccia.

Infatti, nel caso di velivoli civili, i risultati della ricerca sulle pavimentazioni e l'analisi dei risultati di numerosi test confermano che, tranne casi di pavimentazioni non tradizionali e particolari velivoli, gli effet-

ti della pressione dei pneumatici sono effettivamente secondari rispetto al peso e alla distanza tra le ruote e pertanto si possono trascurare (Art. 1.1.3.2.).

Secondo l'ICAO, quindi, esistono "velivoli particolari" che eludono questa regola; in realtà tutti i velivoli militari *fighter* quali caccia-intercettori, caccia-bombardieri e velivoli da combattimento in genere sono da considerarsi tali e per essi non è possibile trascurare la pressione di gonfiaggio che, al contrario, è la principale causa di degrado delle pavimentazioni, in particolar modo nel caso di quelle flessibili. A scopo dimostrativo, nella Fig. 1 viene riportata l'impronta lasciata dal velivolo EFA-Typhoon su una pavimentazione flessibile al termine di una prova motori precedente il decollo.

### 3.4. Coefficienti di equivalenza delle pavimentazioni flessibili: il problema dei nuovi materiali

Nel Metodo del Dimensionamento Inverso i coefficienti di equivalenza proposti per la valutazione dei materiali utilizzati per gli strati superiori delle pavimentazioni flessibili (base, binder e usura) sono prefissati e non lasciano al progettista nessuna libertà di scelta. In particolare, tali coefficienti, seppure dipendenti dalle caratteristiche meccaniche del materiale costituente lo strato (Art. 4.2.3.4.), non sono messi in correlazione con le caratteristiche stesse, ma vengono fissati a prescindere da esse.



Fig. 1 Impronta lasciata dal velivolo EFA-Typhoon su una pavimentazione flessibile tradizione



Inoltre, l'impiego di nuovi materiali in campo aeroportuale, quali conglomerati bituminosi modificati, non è attualmente previsto dalle specifiche ICAO né sono previsti i relativi coefficienti di correlazione; pertanto la possibilità di adoperare conglomerati bituminosi modificati è in parte ostacolata dalla impossibilità di sfruttare appieno le elevate caratteristiche meccaniche.

## 4. Validazione del CLB modificato ad alto modulo

Lo scopo di questa sperimentazione è quello di caratterizzare meccanicamente il conglomerato bituminoso modificato, progettato secondo i capitolati dell'A.M.I., in modo da poterlo utilizzare in campo aeroportuale secondo quanto prescritto dalle normative NATO e ICAO, che, come specificato in precedenza, prevedono l'impiego di materiali *standard* quali base, binder e usura per la realizzazione delle pavimentazioni flessibili. Le sperimentazioni sono state concentrate sul conglomerato bituminoso tipo usura e binder in quanto ad essi è affidato il compito primario di resistere ai carichi concentrati e di diffondere le tensioni ai sottostanti strati di base. Al calcolo strutturale è stata inoltre affiancata una valutazione economica.

### 4.1. Materiali

Nella fase iniziale, allo scopo di verificare che le prestazioni del conglomerato bituminoso 50/70 e modificato verificassero le prescrizioni di capitolato dell'Aeronautica Militare Italiana, sono stati confezionati due serie di provini di conglomerato bituminoso tipo usura realizzati con bitume 50/70 e con bitume modificato.

- **Legante:** un primo gruppo è stato realizzato impiegando un bitume di base 50/70 che è stato aggiunto agli aggregati nel quantitativo del 6% rispetto al peso degli aggregati. Un secondo gruppo è stato realizzato impiegando un bitume modificato, costituito da bitume di base 50/70 modificato con SBS lineare-radiale nella percentuale del 6,5%.
- **Aggregati:** il materiale granulare ritenuto idoneo ad essere impiegato quale scheletro litico del conglomerato bituminoso è stato lo stesso per tutti i tipi di conglomerato bituminoso. Si è così proceduto ad

eseguire il campionamento dei materiali lapidei presso un'unica cava per la costituzione della curva granulometrica del conglomerato bituminoso tipo usura, prelevando aggregati lapidei appartenenti a quattro granulometrie differenti: sabbia (0÷3 mm), pietrischetto (3÷5 mm), pietrisco (5÷7 mm), pietrisco (7÷12 mm).

- **Preparazione dei provini:** il primo passo è stato quello di studiare una curva granulometrica che rispondesse alle caratteristiche riportate nelle voci di capitolato dell'Aeronautica Militare Italiana che, come le direttive NATO, prescrivono un conglomerato particolarmente chiuso e con caratteristiche di stabilità Marshall molto alte. La miscela finale degli aggregati così costituita contiene, nella frazione più grossa, aggregati di natura basaltica per almeno il 30% del totale in peso (UNI-EN 1097-6) calcolato sul peso totale della miscela, filler compreso, così come richiesto dalle voci di capitolato elaborate dal Laboratorio Principale Prove e Sperimentazioni dell'Aeronautica Militare.

### 4.2. Confezionamento delle miscele

Per la realizzazione dei provini, sono state utilizzate due tecniche di costipamento: il costipamento Marshall secondo UNI EN 12697-30 in risposta a quanto previsto dalle attuali normative europee, e il costipamento mediante pressa giratoria secondo UNI EN 12697-31 per verificare la rispondenza dei valori di resistenza con quelli previsti dalle attuali voci di capitolato dell'Aeronautica Militare. Successivamente sono stati sottoposti a compressione Marshall secondo UNI EN 12697-34 oppure a rottura diametrale secondo la UNI EN 12697-23.

Le miscele sono state ottimizzate, in accordo al capitolato A.M.I. ed in rispetto alla normativa NATO, con la procedura Marshall. In particolare, nell'ipotesi di riprodurre condizioni simili a quelle che si verificano nel mescolatore dell'impianto di confezionamento dei conglomerati bituminosi modificati, si è proceduto al riscaldamento degli aggregati fino ad una temperatura di circa 180°C; tale temperatura è stata mantenuta per circa 1 ora provvedendo successivamente alla miscelazione del bitume modificato alla temperatura di 170°C. La percentuale di polimero è stata fissata per tutte le miscele in un intervallo compreso tra il 6% e l'8% (modificata *hard*) del peso di bitume, calcolato precedentemen-

te sulla base del quantitativo di aggregati. Per quanto riguarda i conglomerati 50/70, le temperature degli aggregati e del bitume sono state fissate rispettivamente in 170°C e 150°C. La miscelazione è stata condotta a mano per circa 1 minuto per entrambe le miscele (bitume 50/70 e bitume modificato). Al termine delle operazioni di miscelazione sono stati ottenuti quattro gruppi di conglomerati: due (uno confezionato con bitume 50/70 e uno con bitume modificato) da compattare con il metodo Marshall e due (uno confezionato con bitume 50/70 e uno con bitume modificato) per la compattazione mediante pressa giratoria.

#### 4.3. Risultati ed analisi delle prove di laboratorio

- ▶ Peso nell'unità di volume: i valori del peso di volume (Norma UNI EN 12697-6) nel caso di compattazione Marshall sono stati 2,417 g/cm<sup>3</sup> (CLB 50/70) e 2,419 g/cm<sup>3</sup> (CLB modificato) mentre quelli ottenuti nel caso di compattazione con pressa giratoria sono stati 2,419 g/cm<sup>3</sup> (CLB 50/70) e 2,424 g/cm<sup>3</sup> (CLB modificato).
- ▶ Prova Marshall: i conglomerati bituminosi ottenuti con il procedimento precedentemente descritto sono stati sottoposti alla prova Marshall secondo quanto riportato dalla Norma UNI EN 12697-34. I risultati ottenuti da questa prima serie di prove hanno confermato un valore atteso della stabilità Marshall per un conglomerato bituminoso modificato tipo usura pari o superiore a 1800 daN. In particolare si è ottenuto un valore pari a 2073 daN. Inoltre, a conferma dei miglioramenti ipotizzati, si è osservato dai risultati che l'aggiunta del bitume modificato ha portato ad un aumento della stabilità Marshall da 1563 daN a 2073 daN (incremento pari al 33% rispetto al conglomerato bituminoso 50/70).
- ▶ Compattazione con pestello Marshall e rottura a trazione indiretta: la seconda serie di provini è stata sottoposta alla compattazione con pestello Marshall ed alla successiva rottura a trazione indiretta secondo quanto riportato dalla Norma UNI EN 12697-23. Nel caso della rottura a trazione indiretta i risultati ottenuti hanno mostrato valori della resistenza a trazione indiretta coerenti con quelli attesi dopo compattazione con il sistema Marshall per un conglomerato bituminoso modificato tipo usura,

cioè pari o superiore a 14 daN/cm<sup>2</sup>. Il valore di soglia è stato superato da tutti i provini sottoposti alla prova di trazione (15,57 daN/cm<sup>2</sup>); analogamente al caso precedente risulta evidente la differenza tra conglomerato bituminoso modificato e conglomerato bituminoso 50/70 (12,35 daN/cm<sup>2</sup>): l'incremento rilevato è stato del 26%.

- ▶ Compattazione con pressa giratoria e rottura a trazione indiretta: l'ultima serie di prove riguarda la valutazione delle resistenze a trazione indiretta dopo compattazione con pressa giratoria; i provini esaminati a tale fine sono stati confezionati con fustelle da 150 mm. La terza serie di provini è stata sottoposta a rottura a trazione indiretta secondo quanto riportato dalla Norma UNI EN 12697-23. Nel caso della rottura a trazione indiretta i risultati ottenuti hanno mostrato valori della resistenza a trazione indiretta coerenti con quelli attesi per un conglomerato bituminoso tipo usura, cioè pari o superiore a 10 daN/cm<sup>2</sup> per un conglomerato bituminoso 50/70 e a 16 daN/cm<sup>2</sup> per un conglomerato bituminoso modificato. Il valore di soglia è stato superato da tutti i provini sottoposti alla prova di trazione (18,00 daN/cm<sup>2</sup>); analogamente al caso precedente risulta evidente la differenza tra conglomerato bituminoso modificato e conglomerato bituminoso 50/70 (13,94 daN/cm<sup>2</sup>): l'incremento rilevato è stato del 29%.

## 5. Sperimentazione: confronto tra prestazioni di pavimentazioni aeroportuali mediante LEDFAA

Il passo successivo alla caratterizzazione dei conglomerati bituminosi è stato quello di confrontare le prestazioni delle pavimentazioni realizzate con bitume 50/70 e modificato in termini di vita utile, sulla base dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo del *software* LEDFAA (Layered Elastic Design – Federal Aviation Administration), il quale consente l'introduzione di materiali diversi da quelli *standard* proposti dalla FAA (Federal Aviation Administration) identificabili attraverso parametri meccanici misurabili da prove di laboratorio.

### 5.1. Prove di laboratorio per la caratterizzazione dei CB attraverso il Modulo Resiliente

Allo scopo di utilizzare il software LEDFAA, è stato necessario introdurre nel programma il valore del Modulo Resiliente di ciascuna tipologia di conglomerato bituminoso, tipo binder e tipo usura, e per ciascuna tipologia di bitume, 50/70 e modificato. Sono stati quindi realizzati 28 provini in conglomerato bituminoso da testare secondo quanto previsto dalla Norma ASTM D 4123-82. Le prove sono state condotte presso il laboratorio del D.I.T. dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

Due provini di ciascuna tipologia sono stati impiegati per avere conferma della costanza dei risultati rispetto a quanto rilevato in precedenza e descritto nei relativi paragrafi per cui sono stati impiegati medesimi aggregati, curve granulometriche e tipologie di bitumi.

La normativa di riferimento suggerisce di condurre una prova di rottura a trazione indiretta su un paio di provini e di impiegare un'aliquota del carico di rottura (compresa tra il 10% e il 50%) per l'esecuzione della prova ciclica di trazione indiretta da cui calcolare il modulo resiliente; per questo motivo, due provini di ciascuna tipologia sono stati impiegati per la misura della resistenza a trazione indiretta e i rimanenti tre per la misura del modulo resiliente vero e proprio. In particolare, i parametri impostati sono stati i seguenti:

- ▶ carico ciclico: 10% del carico di rottura;
- ▶ frequenza: 1 Hz;
- ▶ temperatura di prova: 25 °C;
- ▶ numero di ripetizioni: 30.

La norma impone di misurare il carico ciclico applicato e contemporaneamente la deformazione assiale (verticale) e diametrale (orizzontale); inoltre essa suggerisce di attendere che le deformazioni verticali ed orizzontali si siano stabilizzate, cosa che solitamente accade dopo cinque ripetizioni di carico; nel caso specifico si è deciso di prendere a riferimento la decima ripetizione di carico per ciascuna prova assumendo per essa i valori di carico, di deformazione verticale e trasversale.

Le figure che seguono (Fig. 2-3-4) sono di ausilio per la compressione dei valori calcolati da ciascuna prova ciclica. Una volta individuati su ciascun grafico i valori del carico ciclico  $P$  e delle deformazioni  $\Delta H_T$  e  $\Delta V_T$ , è stato calcolato il valore del modulo resiliente secondo le equazioni:

$$v_{RT} = 3,59 \frac{\Delta H_T}{\Delta V_T} - 0,27 \quad E_{RT} = \frac{P (v_{RT} + 0,27)}{t \Delta H_T}$$

in cui:

- $v_{RT}$  = modulo totale di Poisson, in %;
- $\Delta H_T$  = deformazione orizzontale, in mm;
- $\Delta V_T$  = deformazione verticale, in mm;
- $P$  = carico ciclico, in newton;
- $t$  = altezza del provino, in mm;
- $E_{RT}$  = modulo resiliente totale, in MPa.

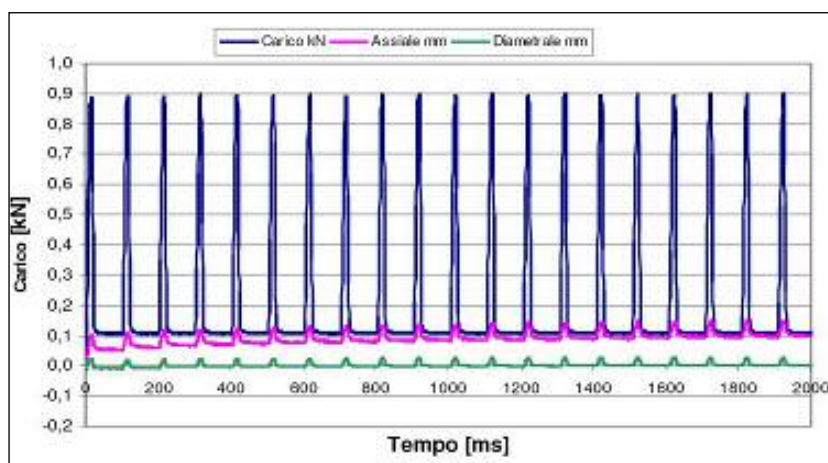


Fig. 2 Curva tempo-carico per la prova ciclica di trazione indiretta

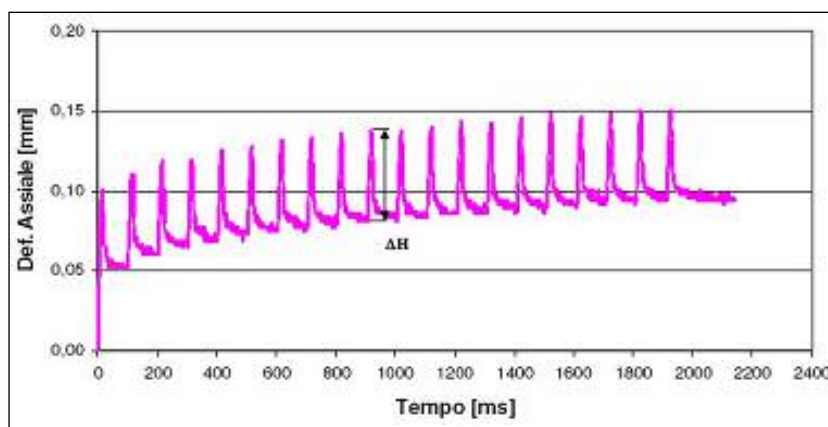


Fig. 3 Curva tempo-deformazione assiale per la prova ciclica

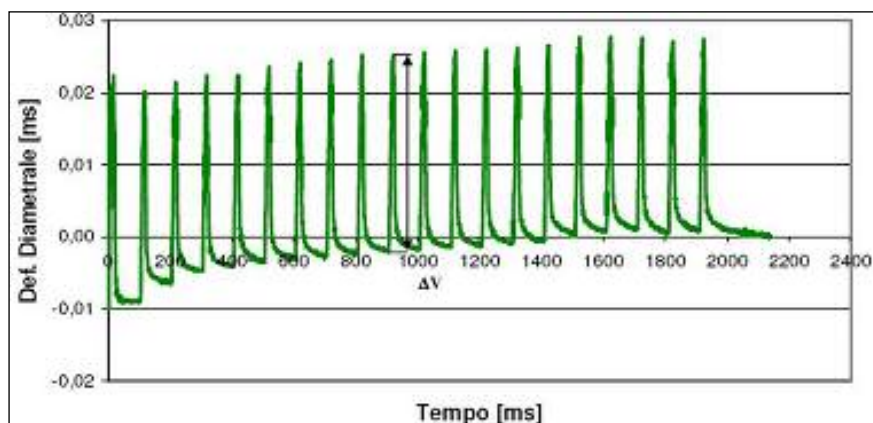


Fig. 4 Curva tempo-deformazione diametrale per la prova ciclica

I valori di tutti i moduli resilienti così calcolati sono riportati in Tab. 1.

Tab. 1 Valori dei moduli ottenuti dalle prove

Materiale	Carico P [N]	Verticale $\Delta V_T$ [mm/100]	Orizzontale $\Delta H_T$ [mm/100]	Poisson $\nu_{RT}$ [%]	Altezza t [mm]	Modulo $E_{RT}$ [MPa]	MEDIA $E_{RT}$ [MPa]
Usura Trad	1225	0,0521	0,0330	2,0039	51,2	1649	
Usura Trad	1218	0,0542	0,0200	1,0547	51,8	1557	1477
Usura Trad	1325	0,0750	0,0231	0,8357	51,8	1224	
Usura Mod	1945	0,0771	0,0124	0,3074	51,2	1769	
Usura Mod	1934	0,0813	0,0281	0,9708	51,7	1652	1813
Usura Mod	1924	0,0667	0,0398	1,8722	51,3	2019	
Binder Trad	900	0,0563	0,0256	1,3624	52,3	1097	
Binder Trad	871	0,0688	0,0203	0,7893	51,9	876	1036
Binder Trad	887	0,0542	0,0097	0,3725	51,8	1134	
Binder Mod	1321	0,0647	0,0259	1,1671	52,7	1391	
Binder Mod	1353	0,0583	0,0128	0,5182	52,0	1602	1391
Binder Mod	1325	0,0750	0,0231	0,8357	53,7	1181	

### 5.2. Il software LEDFAA

Il software LEDFAA, di cui è attualmente disponibile la versione 1.3 del maggio 2004, applica le procedure di progettazione basate sulla teoria del multistrato elastico, valide sia per pavimentazioni rigide e flessibili sia per il calcolo dei ricoprimenti (overlays). Il processore di calcolo è costituito dal "LEAF", un programma sviluppato appositamente per l'applicazione della metodologia LED. Le procedure applicate sono descritte nel Capitolo 7 della Circolare AC 150/5320-6D, la quale rappresenta lo standard di progettazione per la FAA.

Il software è stato introdotto per sopprimere alla inaffidabilità dei risultati ottenuti dai nomogrammi di progetto FAA nel calcolo delle sollecitazioni trasmesse alle pavimentazioni dai nuovi aerei con configurazioni di carrello *Triple Dual Tandem* (TDT), quali il Boeing 777 e l'Airbus A-380. Il programma effettua il dimensionamento a fatica della pavimentazione modellando le azioni agenti in termini di "Fattore di danno Cumulativo" (CDF) secondo la Regola di Miner e sostituisce il concetto di "Aereo di Progetto" utilizzato nel classico Metodo FAA.

### 5.3. Applicazione del software LEDFAA

Com'è noto il software consente due tipologie di calcolo:

- il dimensionamento degli strati della pavimentazione, una volta che siano stati assegnati gli spettri di traffico, i parametri meccanici degli strati, la portanza del sottofondo e la vita utile della sovrastruttura;
- il calcolo della vita utile della pavimentazione, una volta che siano stati assegnati i parametri di traffico, gli spessori e le caratteristiche meccaniche degli strati.

È stata utilizzata la seconda modalità di output con l'intento di stabilire una

procedura per il confronto e la valutazione delle prestazioni di pavimentazioni realizzate con bitumi dalle diverse caratteristiche reologiche. In particolare è stata ottenuta una metodologia di stima dell'incremento di prestazioni dovuto all'utilizzo di bitumi modificati nel confezionamento degli strati di conglomerato.

Tale studio è stato possibile grazie all'opportunità di introdurre nel programma strati *non-standard* FAA, caratterizzabili mediante un unico parametro meccanico, l'Elastic Modulus, che corrisponde al Modulo Resiliente, valutabile mediante la prova dinamica su provini cilindrici di cui al paragrafo precedente (Norma ASTM D 4123-82).



Sono stati quindi fissati i parametri costituenti le condizioni al contorno per l'analisi, ed in particolare:

- ▶ spettro di traffico: è stato assunto uno spettro di traffico annuale tipico per aeroporti militari:
  - 3000 aerei tattici (tipo F-16);
  - 3000 aerei da trasporto tattici (tipo C-130);
  - 1500 aerei da trasporto strategico (tipo Boeing 767 200-ER);
- ▶ portanza del sottofondo: è stato assunto un valore di riferimento pari a CBR=8%;
- ▶ caratteristiche della fondazione: è stata assunta una fondazione tipica in misto cementato (CTB - P304) con spessore pari a 30 cm;
- ▶ caratteristiche degli strati di conglomerato: sono stati considerati i moduli resilienti ottenuti dalle analisi di laboratorio effettuate su provini confezionati con bitumi 50/70 e modificati per la realizzazione di due strati di conglomerato bituminoso tipo binder ed usura, che completano la pavimentazione tipo analizzata.

Facendo variare i moduli resilienti e gli spessori degli strati entro intervalli tipici, sono stati ottenuti una serie di abachi che evidenziano le variazioni di prestazioni ottenute in termini di vita utile delle pavimentazioni così realizzate.

In particolare sono state redatte due famiglie di curve:

- ▶ curve con spessore di usura fissa (50 mm) e spessore di binder variabile (50÷110 mm);
- ▶ curve con spessore di binder fisso (80 mm) e spessore di usura variabile (50÷80 mm).

In tal modo, riportando sugli stessi abachi le curve per le diverse combinazioni di conglomerati 50/70 e modificati, si ottiene un immediato raffronto visivo delle prestazioni in termini di vita utile.

Si noti come i risultati riportati nella **Fig. 5**

Legenda Figure	
UT	Usura Tal Quale 50/70
UM	Usura Modificata
BT	Binder Tal Quale 50/70
BM	Binder Modificato

sono disposti su curve che individuano miglioramenti evidenti in termini di vita utile con l'incremento delle caratteristiche meccaniche dei bitumi utilizzati.

Si noti inoltre come l'utilizzo di un'usura modificata influisca in modo minore sull'incremento di prestazione rispetto all'utilizzo di strati di binder modificati. L'impiego di usura modificata potrebbe però essere legato anche alla risoluzione di problematiche legate alle caratteristiche superficiali più che a quelle di portanza alle quali apporterebbe comunque un evidente miglioramento, riducendo le sollecitazioni degli strati sottostanti. L'incremento di vita utile inoltre migliora a parità di spessori e al crescere di questi ultimi, il che denota come l'utilizzo di bitumi modificati sia meno conveniente in pavimentazioni con spettri di traffico esigui e spessori ridotti.

La **Fig. 6** raffigura l'incremento della vita utile della pavimentazione al variare dello spessore dell'usura. Si

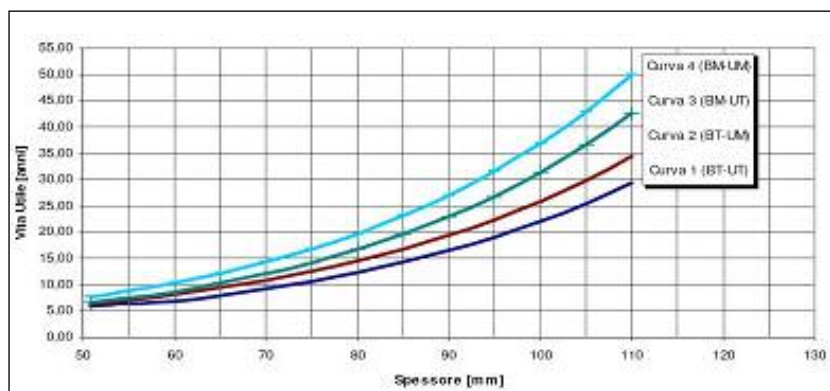


Fig. 5 Curve a spessore di binder variabile ed usura fissa (50 mm)

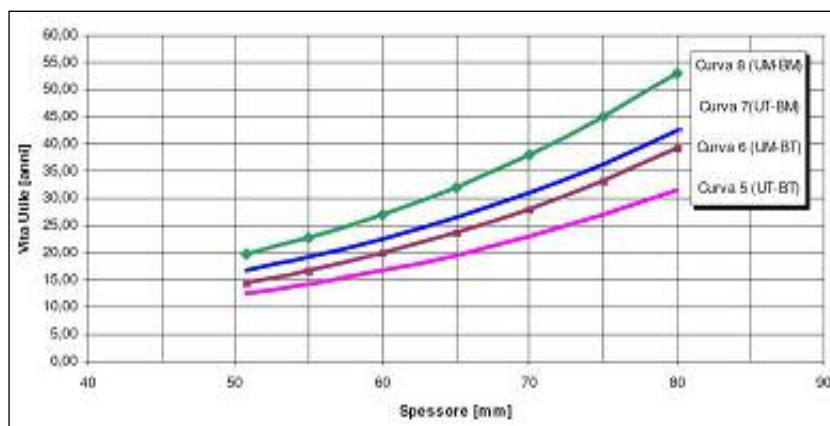


Fig. 6 Curve a spessore di usura variabile e binder fisso (80 mm)

noti il notevole incremento di prestazioni dato dall'alto modulo che caratterizza lo strato di usura modificato. Ad esempio, per una vita utile *standard* di 20 anni, a parità di spessore di usura 50/70 da 50 mm, occorrono circa 85 mm di conglomerato bituminoso modificato tipo binder e 97 mm di conglomerato bituminoso 50/70 tipo binder, che si riducono a 90 mm con l'utilizzo di una usura modificata.

#### 5.4. Andamento della vita utile in funzione dei moduli resilienti e degli spessori degli strati: interpolazione dei risultati sperimentali

La regolarità dei punti sperimentali spinge alla ricerca di una funzione analitica in grado di interpolare i risultati ottenuti dall'elaborazione con il LEDFAA al fine di ottenere un'espressione mediante la quale valutare in modo immediato, seppure indicativamente, la prevedibile vita utile della pavimentazione in funzione delle caratteristiche degli strati componenti. Si è così ricorsi alle tecniche di regressione individuando quella con coefficiente di correlazione maggiore.

La funzione cercata è risultata essere quella di tipo esponenziale, di equazione:

$$y = a \cdot b^x$$

in cui:

y= vita utile, in anni;

x= spessore dello strato variabile, in mm.

Si nota quindi la notevole influenza dello spessore, che compare all'esponente, sulla vita utile della pavimentazione. Dalle considerazioni puramente indicative che si possono effettuare da una numerosità così bassa di campioni si conclude che:

- ▶ la curva rappresenta uno strumento di valutazione indicativo ma immediata dell'influenza della tipologia e delle caratteristiche meccaniche degli strati componenti sulle prestazioni in termini di vita utile della pavimentazione;
- ▶ il parametro b, base della potenza, determina in modo prevalente la posizione della curva nel piano e presenta oscillazioni di valore contenute e attestatesi su due soglie, legate apparentemente alla tipologia di strato a spessore variabile (valori minori per strati 50/70 e maggiori per strati modificati);
- ▶ il parametro a, coefficiente moltiplicativo, che influenza in modo meno spinto la posizione della

curva, sembra essere legato alla tipologia di strato a spessore fisso, (valori minori per strati 50/70 e maggiori per strati modificati) e presenta una variazione riconducibile al valore dei moduli resilienti degli strati.

Alle valutazioni in termini prestazionali sono state affiancate quelle di carattere economico, connesse all'utilizzo di materiali non commerciali, in modo da evidenziare le modalità di variazione corrispondenti ed inserire un ulteriore elemento di scelta nella progettazione della struttura della pavimentazione.

Allo scopo di fornire i primi elementi di valutazione sono stati calcolati, a partire dagli elenchi prezzi di riferimento corrente elaborati dall' 8° Reparto Genio Campale, i costi unitari delle differenti tipologie di pavimentazione analizzate.

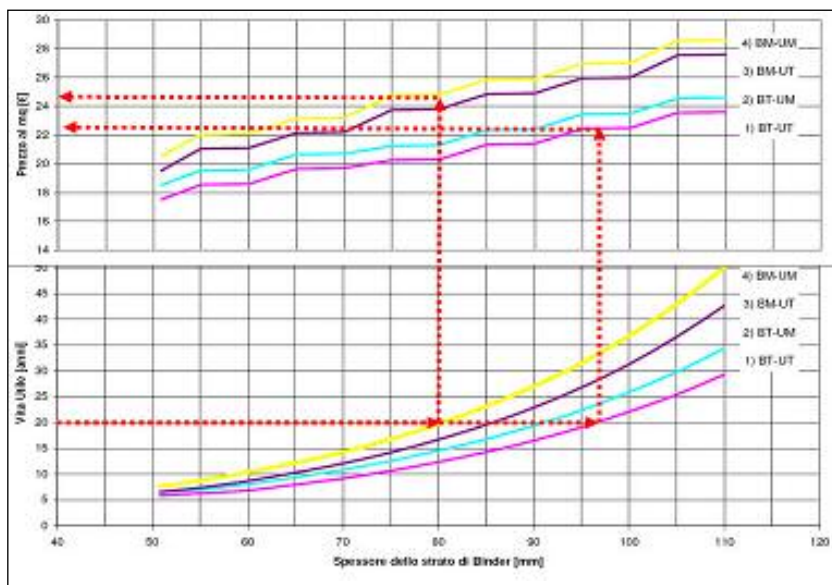
Considerando il solo caso delle curve a spessore di binder variabile ed usura fissa sono state riportate a cascata anche le curve relative ai costi di realizzazione delle diverse tipologie dei pacchetti ipotizzati.

Si nota subito come tali curve siano crescenti, senza intersezioni, e posizionate nello stesso ordine delle curve relative alla vita utile. Questo porta a concludere che all'aumento di prestazioni corrisponde in ogni caso un aumento proporzionale dei costi di realizzazione. Allo scopo di chiarire questo aspetto è stato tracciato un percorso sulla **Fig. 7**, ottenuto ipotizzando due tipologie di pacchetto che forniscono, nelle ipotesi assunte, una vita utile di 20 anni. In particolare, utilizzando uno strato di usura *standard* da 50 mm occorrono 96 mm di binder 50/70, mentre utilizzando uno strato di usura modificata occorrono 80 mm di binder modificato. I pacchetti ipotizzati corrispondono rispettivamente ad un costo totale di realizzazione al m<sup>2</sup> pari a 22,80 € e 24,80 €.

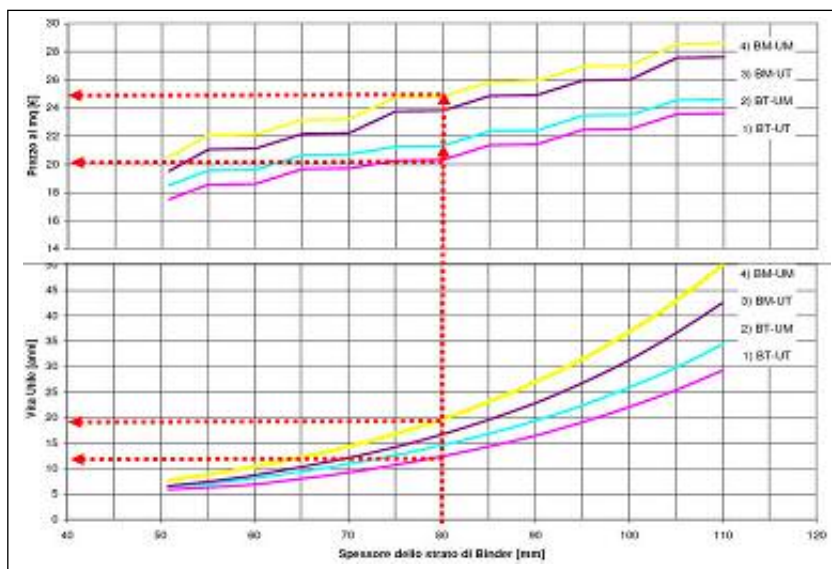
Fissando invece (**Fig. 8**) gli spessori degli strati di binder pari a 80 mm e variando le tipologie dei bitumi costituenti, si ottiene, per pavimentazioni realizzate con strati di usura e binder modificati, una vita utile pari a 12,5 che si eleva a 18,5 anni per pavimentazioni realizzate completamente con bitumi modificati.

A fronte di un incremento di prestazione pari a circa il 48% si richiede quindi un incremento del costo di realizzazione, che passa da 20,50 € a 25,00 €, pari al 21%.

Le considerazioni svolte portano alle seguenti osservazioni:



**Fig. 7** Andamento dei costi di realizzazione e della vita utile della pavimentazione in funzione degli spessori e delle tipologie di materiali costituenti



**Fig. 8** Andamento dei costi di realizzazione e della vita utile della pavimentazione in funzione degli spessori e delle tipologie di materiali costituenti

► è possibile ottenere le stesse prestazioni della pavimentazione realizzata con bitumi modificati mediante l'utilizzo di strati di maggior spessore realizzati con conglomerati bituminosi *standard*, ottenendo un risparmio massimo sui costi di realizzazione dell'ordine del 10%;

► l'impiego di bitumi modificati, a parità di spessore, può portare ad incrementi in termini di vita utile della pavimentazione fino ad un massimo di circa il 50%, a fronte di un aumento di costo dell'ordine del 20%.

Si conclude quindi che:

- nei casi in cui non si verificano particolari esigenze di contenimento degli spessori, ad esempio nelle nuove realizzazioni, l'utilizzo di bitumi tradizionali consente l'ottenimento di economie di costi seppur contenute;
- nei casi in cui si presentano vincoli realizzativi o si richiedono particolari caratteristiche meccaniche aggiunte (ad esempio elevate caratteristiche meccaniche o particolari requisiti di aderenza), l'utilizzo di bitumi modificati consente l'ottenimento di sensibili incrementi prestazionali a fronte di accettabili incrementi dei costi di realizzazione.

## 6. Conclusioni

Lo scopo del presente studio è il calcolo strutturale di pavimentazioni aeroportuali flessibili realizzate con conglomerati bituminosi modificati. L'impiego di velivoli militari tattici caratterizzati da elevate pressioni di contatto spinge l'Aeronautica Militare Italiana verso l'impiego di conglomerati bituminosi modificati ad alto modulo, ma l'applicazione della nuova metodologia di calcolo prevista dall'ICAO pone l'Aeronautica Militare nell'impossibilità di dimensionare adeguatamente le pavimentazioni flessibili con il Metodo ACN/PCN, il quale

non prevede la possibilità di impiegare materiali differenti da quelli *standard*. In particolare, i coefficienti di equivalenza proposti per la valutazione dei materiali utilizzati per gli strati superiori delle pavimentazioni flessibili (base, binder e usura) sono prefissati dall'ICAO e non lasciano al progettista nessuna libertà di scelta. ►

Dopo aver verificato le prestazioni dei conglomerati bituminosi modificati, sono state condotte quattro serie di prove cicliche di trazione indiretta con lo scopo di individuare, per ciascuna tipologia di conglomerato (usura e binder) e per ciascuna tipologia di bitume (50/70 e modificato hard), il valore del Modulo Resiliente.

I valori dei moduli così ottenuti sono stati utilizzati nel software LEDFAA, il quale consente l'introduzione di materiali diversi da quelli *standard* proposti dall'ICAO.

Infine sono state confrontate, in termini di vita utile, le prestazioni delle pavimentazioni realizzate con bitume 50/70 e modificato.

In generale, il programma restituisce risultati che rivelano miglioramenti evidenti in termini di vita utile con l'incremento delle caratteristiche meccaniche dei bitumi utilizzati. Risulta anche come l'utilizzo di un'usura modificata influisca in modo minore sull'incremento di prestazione rispetto all'utilizzo di strati di binder modificati. L'incremento di vita utile inoltre migliora, a parità di spessori, al crescere di questi ultimi, il che denota come l'utilizzo di bitumi modificati sia meno conveniente in pavimentazioni con spettri di traffico esigui e spessori ridotti.

Le considerazioni di carattere economico, invece, portano alla conclusione che l'impiego di bitumi modificati, a parità di spessore, comporta incrementi in termini di vita utile della pavimentazione fino ad un massimo di circa il 50%, a fronte di un aumento di costo dell'ordine del 20%.

## Bibliografia

- ▶ I.C.A.O. – Aerodrome Design Manual - Part 3 - Pavements, 1977 e Second Edition, 2003.
- ▶ I.C.A.O. - Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation-Aerodromes, 2004.
- ▶ NATO - Approved Criteria and Standards for Airfields, October 1999.
- ▶ AEP-46 A, Study Draft 2, NATO, September 2003.
- ▶ AASHTO - Guide for design of pavement structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- ▶ FAA Advisory Circular AC: 150/5320-6D - Airport Pavement Design and Evaluation, 2004.
- ▶ FAA Advisory Circular AC: 150/5335-5 - Standardized method of reporting airport pavement strength-PCN, 1983.
- ▶ FAA Advisory Circular AC: 150/5380-6A - Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements, 2003.
- ▶ FAA Advisory Aircular AC: 150/5320-16 Airport pavement design for the Boeing 777 airplane, 1995.
- ▶ K. DEBORD, E. GERVAIS - Precise Method for estimating Pavement Classification Number - Doc. D6-822203, Boeing Commercial Airplane Group Airport Technology Organization, 1998.
- ▶ Capitolato dell'Aeronautica Militare Italiana.
- ▶ Norma ASTM D 4123-82 - Standard test method for indirect tension test for Resilient Modulus of bituminous mixtures. ■

