

SITEBSi srl

Rassegna del bitume

RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE

ESTRATTO DAL N° **07/88**

**Metodi empirici e metodi "razionali" per il dimensionamento delle
sovrastutture aeroportuali di tipo flessibile**

Mariano Cupo Pagano
Università di Roma "La Sapienza"

Sandro Bartolucci

Metodi empirici e metodi "razionali" per il dimensionamento delle sovrastrutture aeroportuali di tipo flessibile

Mariano Cupo-Pagano
Sandro Bartolucci

PREMESSA

Per quanto apparentemente identiche, dal punto di vista costruttivo, a quelle stradali, le sovrastrutture aeroportuali richiedono un approccio specifico per le sostanziali differenze che influiscono sul loro dimensionamento.

Nei due casi, i carichi indotti dalle ruote sono nettamente diversi: per una coppia di ruote gemellate, si possono raggiungere le 40-45 tonnellate per i carrelli di aeromobili (con pressioni di gonfiaggio di 13-14 daN/cm²), rispetto alle 6-7 tonnellate (con pressioni di gonfiaggio di circa 7 daN/cm²) negli assi dei carichi stradali.

D'altra parte occorre tener conto del numero di ripetizioni dei carichi, decisamente minore di quello che si verifica nelle strade, sia come conseguenza dei volumi di traffico possibili sulle piste aeroportuali (dipendenti dalla capacità dell'aeroporto), sia a causa della dispersione trasversale delle traiettorie (sulla striscia impegnata della pista, molto più ampia della singola corsia stradale).

L'analisi di queste differenze, da parte degli Enti preposti al controllo dell'Aviazione civile e dei Corpi militari interessati, ha portato allo sviluppo di metodi di dimensionamento specifici per le pavimentazioni aeroportuali.

I più conosciuti ed utilizzati sono due: quello Americano, pubblicato nel 1978 dalla F.A.A. (Federal Aviation Administration), e quello Francese, pubblicato nel 1983 dal S.T.B.A. (Service Technique des Bases Aériennes).

Il presente studio si propone di esaminare il confronto dei risultati del dimensionamento di una pista aeroportuale, effettuato con ambedue i metodi suddetti, al fine di individuarne le differenze, in termini di spessore degli strati, sia per la determinazione degli stati tensionali indotti dai carichi ai vari livelli della sovrastruttura (passo necessario per la previsione della vita utile), sia per una stima economica dei costi di costruzione, oggi non più scindibili da quelli della manutenzione straordinaria, per garantire un adeguato livello di portanza per tutta la vita utile della sovrastruttura.

1. IL METODO F.A.A.

Il metodo consente il dimensionamento di sovrastrutture destinate a qualunque classe di traffico aeroportuale civile, e prevede soluzioni con pavimentazioni sia rigide, sia flessibili. Nel presente studio, saranno prese in considerazione esclusivamente sovrastrutture di quest'ultimo tipo.

I parametri presi in conto dal metodo sono:

- il CBR di progetto del sottofondo, mediante il quale si esprimono le caratteristiche di portanza del piano di appoggio della sovrastruttura;

- il peso totale dell'aeromobile, considerato nel suo valore massimo al decollo;
- le caratteristiche del carrello di atterraggio (configurazione e numero di ruote per gamba di forza);
- il numero di decolli annui, espressi come media annuale lungo la vita utile stabilita per la pista (20 anni).

Gli abachi forniti dal metodo consentono di ricavare lo spessore totale equivalente della sovrastruttura, specificandone il valore per gli strati di base, e di manto (collegamento e usura).

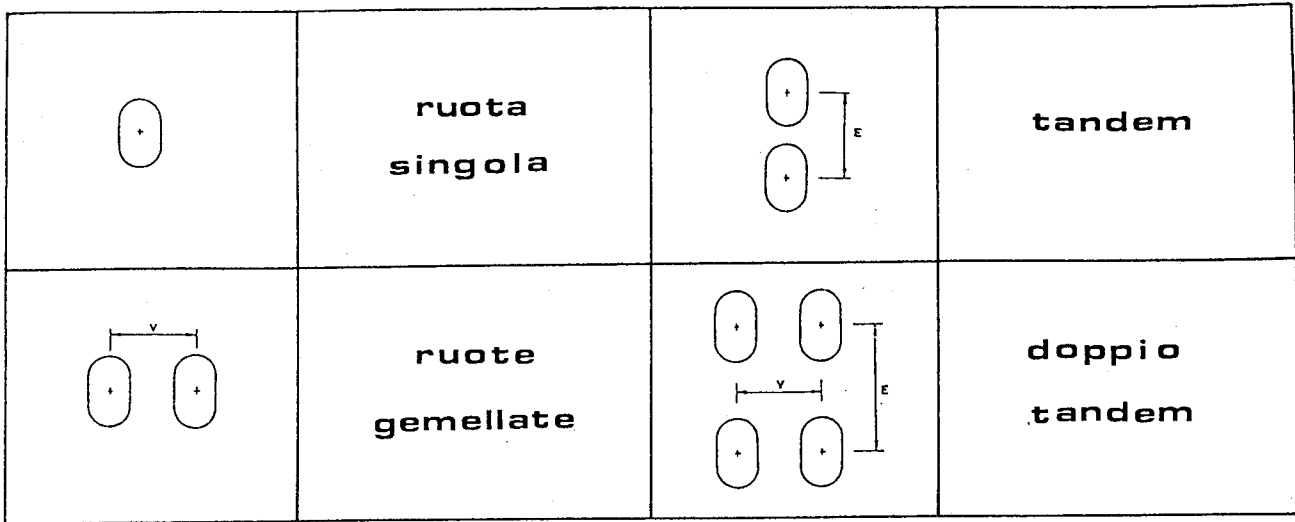


Fig. 1

Esistono abachi diversi, in funzione delle configurazioni di carrello più usate (Figura 1):

- carrello a ruota singola (single wheel), per aerei dell'aviazione generale;
- carrello a ruote gemellate (dual wheel) per aerei del tipo B727, F28;
- carrello doppio tandem (dual tandem) per aerei del tipo Concorde, A 300.

Sono stati realizzati anche abachi speciali per aeromobili "avide body", ovvero con configurazioni di carrello non standard, del tipo:

- B 747
- DC 10
- L1011.

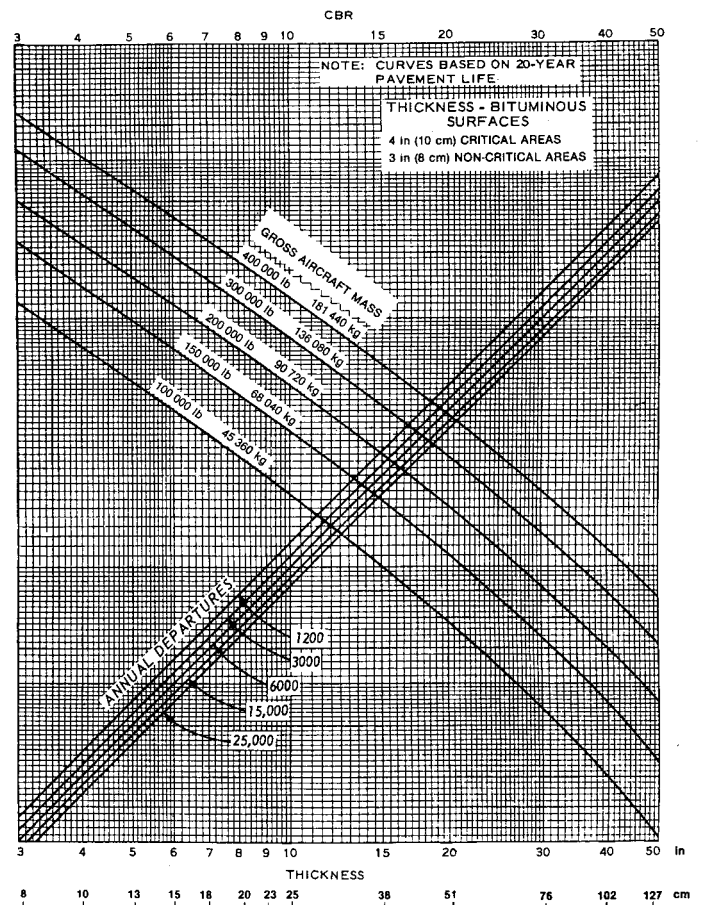
Per determinare lo spessore totale equivalente della sovrastruttura, si entra nell'abaco (Figura 2) col valore del CBR del sottofondo; si traccia la verticale per detto punto fino ad intersecare la curva relativa al peso (in libbre) dell'aeromobile preso in esame; si considera l'intersezione dell'orizzontale per detto punto con la curva relativa al traffico previsto (da 1200 a 25000 decolli/anno). La verticale da quest'ultimo punto individua lo spessore totale equivalente sull'asse delle ascisse.

Lo spessore del manto (usura e collegamento) viene suggerito da un'annotazione sullo stesso abaco, in funzione del tipo di carrello considerato: generalmente risulta di 10 cm, tranne che per il B 747 (13 cm).

Lo spessore complessivo degli strati di base e di manto si ottiene dallo stesso abaco utilizzato per il dimensionamento dello spessore totale, entrando con il valore del CBR = 20% (valore assunto dalla FAA come minimo per uno strato di fondazione). Detraendo lo spessore equivalente del manto dallo spessore così ottenuto, si ottiene lo spessore equivalente dello strato di base.

La F.A.A. attribuisce una grande importanza al contributo strutturale dello strato di base; pertanto ne fa oggetto di una verifica dello spessore, mediante un abaco aggiuntivo (Figura 3) nel quale, entrando con lo spessore totale equivalente già determinato, ed intersecando, con un'orizzontale, la retta rappresentativa del CBR del sottofondo, si determina lo spessore minimo da realizzare per la base;

Fig. 2.



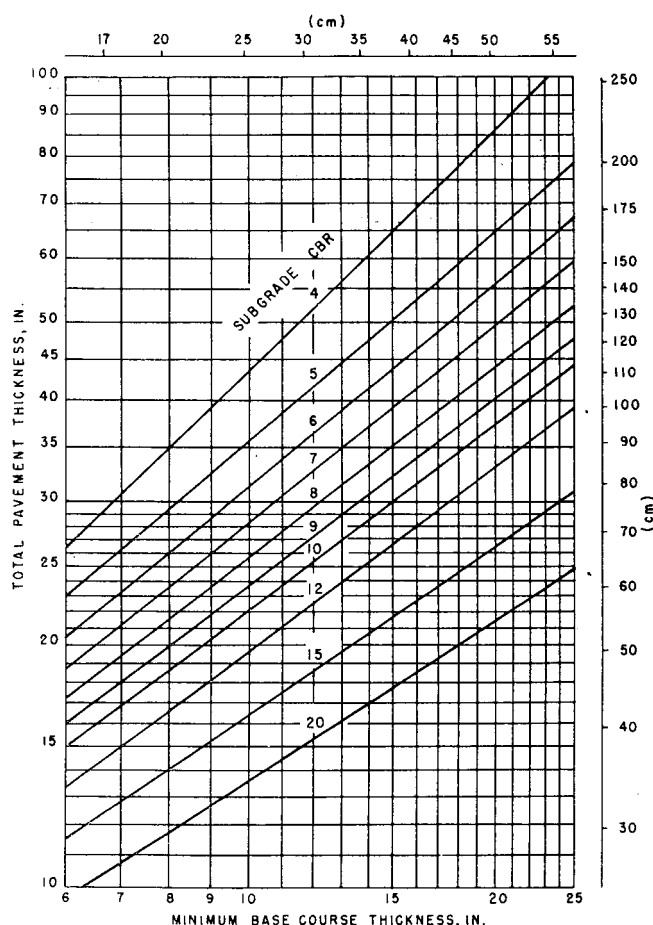


Fig. 3

valere che deve essere assunte nel progetto senza variare le spessore totale. Ne consegue che, semmai, andrà ridette le spessore della fondazione.

Nell'eventualità che si vegliane utilizzare materiali diversi da quelli considerati nella stesura degli abachi, l'F.A.A. suggerisce l'uso di opportuni coefficienti divisorii per la determinazione degli spessori dei vari strati (Tabella I).

Tab. I-A. Coefficienti d'equivalenza per strati di fondazione stabilizzata.

Materiali	Intervallo coefficienti d'equivalenza
Conglomerato bituminoso per strati superficiali	1.7 - 2.3
Misto bitumato a caldo per strato di base	1.7 - 2.3
Misto bitumato a freddo per strato di base	1.5 - 1.7
Misto bitumato a freddo mescolato in sito	1.5 - 1.7
Misto cementato per strato di base	1.6 - 2.3
Terra-cemento per strato di base	1.5 - 2.0
Misto di frantumazione	1.4 - 2.0
Misto granulare naturale	1.0

Nel definire i coefficienti d'equivalenza, il CBR del misto granulare naturale per strato di fondazione è stato assunto pari a 20.

Tab. I-B. Coefficienti d'equivalenza per strati di base stabilizzata.

Materiali	Intervallo coefficienti d'equivalenza
Conglomerato bituminoso per strati superficiali	1.2 - 1.6
Misto bitumato a caldo per strato di base	1.2 - 1.6
Misto bitumato a freddo per strato di base	1.0 - 1.2
Misto bitumato a freddo mescolato in sito	1.0 - 1.2
Misto cementato per strato di base	1.2 - 1.6
Terra-cemento per strato di base	N/A (non utilizzabile)
Misto di frantumazione	1.0
Misto granulare naturale	N/A (non utilizzabile)

I coefficienti d'equivalenza indicati sono conseguenti all'aver assunto un CBR = 80 per il misto di frantumazione per lo strato di base.

Gli spessori così desunti dagli abachi sono relativi alle "zone critiche" della pista; il metodo FAA prevede che, per le zone mene impegnate dal passaggio degli aeromobili, le spessore totale venga ridette al 90% e al 70%, a seconda della zona di pista.

Nel presente studio si farà riferimento al dimensionamento delle sole zone critiche, affinché possa evidenziarsi, in ferma più sintetica, il confronto dei risultati ottenuti con criteri di dimensionamento diversi. Per le stesse motivo non verranno utilizzati i coefficienti di omogeneizzazione per trasformare i passaggi di aeromobili di varie tipo in passaggi di un singolo tipo di aeromobile: per ciascun confronto tra i due diversi metodi di dimensionamento, si farà riferimento ad un traffico costituito da un solo tipo di aeromobile.

2. IL METODO STBA

Anche il metodo dell'Ente Tecnico francese permette di dimensionare pavimentazione sia rigide, sia flessibili, per qualunque tipo di traffico civile. Sono previste due procedure diverse:

- dimensionamento forfettario
- dimensionamento ottimizzato

La prima ipotizza che la pista sia percorsa esclusivamente da un tipo di aeromobile; pertanto prevede l'utilizzo degli abachi dell'aeromobile relative.

La seconda prende in considerazione tutti gli aeromobili presenti nella composizione di traffico aeroportuale, prevedendo quindi l'omogeneizzazione dei carichi mobili.

Ovviamente, in conformità a quante sopra esplicitate, si è utilizzate il prime metodo.

I parametri che entrane in gioco sono:

- il CBR di progetto del sottofondo;
- il carico P per gamba di forza dell'aeromobile;
- il carico "pesate" P', ottenuto dal carico P divise per un coefficiente che tiene conto della posizione, ovvero della utilizzazione, dell'area pavimentata (ad esempio, per il centro pista, tale coefficiente è = 1);

— il carico normale di calcolo P'', ottenuto dal carico P', secondo l'espressione:

$$P'' = P'/CT$$

dove CT è un coefficiente adottato per tener conto dell'affaticamento della pavimentazione, calcolabile mediante l'espressione:

$$CT = 1,2 - 0,2 \cdot \log n$$

in cui "n" è definito come "numero di movimenti giornalieri reali" dell'aeromobile sulla pista. Il metodo prevede una vita utile della pavimentazione di 10 anni, ma suggerisce anche un criterio che consenta una vita utile di 20 anni.

L'STBA ha predisposto un insieme di abachi per il dimensionamento della sovrastruttura aeroportuale, ciascuno valido per un tipo di aereo, di cui è riportato un esempio in Figura 4.

AIRBUS A 300 B4

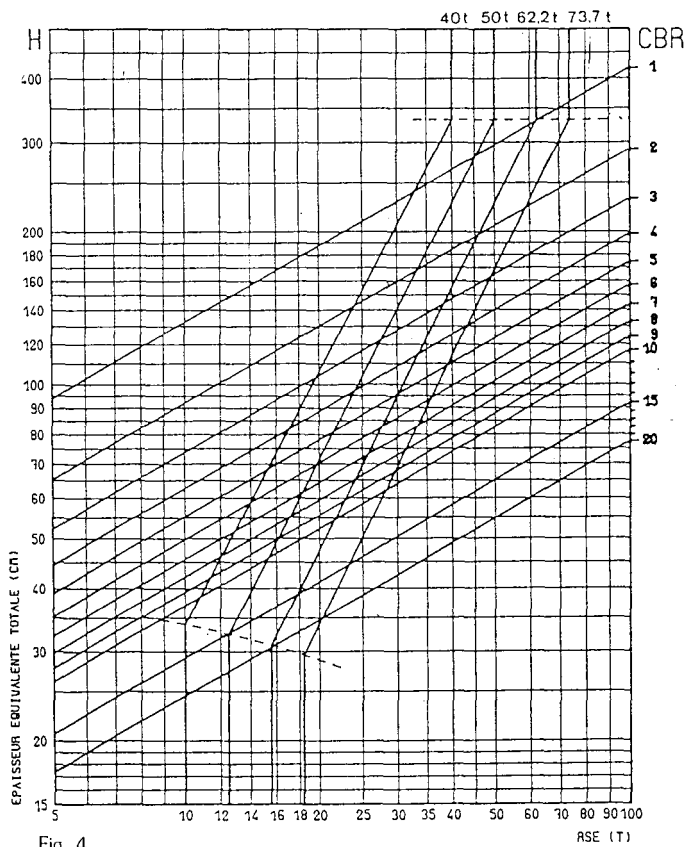


Fig. 4

La lettura dell'abaco di dimensionamento è simile a quella degli abachi FAA: entrando con il carico normale di calcolo (per gamba di forza) P'', si percorre la linea corrispondente fino ad intersecare la retta relativa al CBR del sottofondo. Dal punto di intersezione si traccia l'orizzontale, che consente di leggere, sull'asse delle ordinate, lo spessore equivalente totale della sovrastruttura.

Dall'abaco si ottiene il solo spessore equivalente totale; per determinare lo spessore degli strati legati, si utilizza un altro abaco, valido nella generalità dei casi, dal quale, noti

lo spessore totale della sovrastruttura ed il CBR del sottofondo, si ricava lo spessore complessivo equivalente del manto e della base (Figura 5).

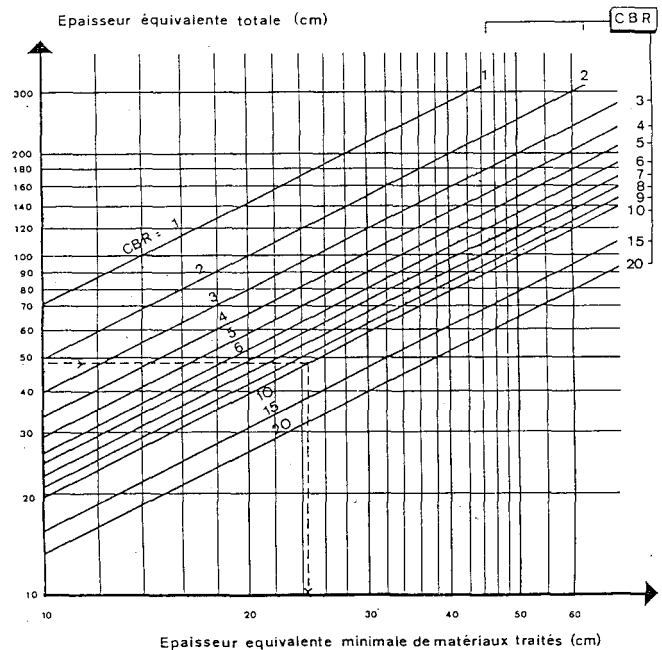
Per ottenere gli spessori reali dei singoli strati, occorre servirsi dei coefficienti di equivalenza indicati dal STBA (Tabella II).

Tab. II.

Materiali	Coefficienti d'equivalenza CE
Conglomerato bituminoso	2
Misto bitumato a caldo	1,5
Misto bitumato con emulsione	1,2
Misto cementato o stabilizzato con leganti idraulici	1,5
Misto di frantumazione a granulometria imposta	1
Sabbia stabilizzata con leganti idraulici	1
Misto naturale a granulometria non imposta (tout venant di cava)	0,75
Sabbia	0,5

Da notare che il metodo di dimensionamento non riporta in alcun punto indicazioni circa lo spessore da adottare per il manto; esso, nei dimensionamenti del presente studio, è stato desunto da alcuni esempi di sviluppo numerico presentati nel secondo volume delle istruzioni STBA.

Fig 5



3. IL CONFRONTO DEI DUE METODI DI DIMENSIONAMENTO

Per un primo approccio di confronto, è stato preso in esame un aeromobile di peso relativamente elevato, di uso corrente sulle rotte internazionali: l'Airbus A 300 B4 (Tabella III).

Tab. III.

tipo A/M	MTOW* (Kg)	Carico per gamba (Kg)	Press. gonfiaggio (daN/cm ²)	Tipo carrello
Airbus A300 B4	157000	73005	14.41	doppio tandem

* Maximum Take Off Weight = Peso massimo al decollo

Il dimensionamento della sovrastruttura flessibile, con ambedue i metodi (FAA e STBA), è stato effettuato facendo variare i parametri fondamentali: la portanza del sottofondo ed il traffico annuale sulla pista.

La portanza del sottofondo è stata caratterizzata mediante il CBR di progetto, in un intervallo di valori compresi tra 3 e 20. Il traffico è stato individuato prevedendo le tre diverse condizioni di 1200, 6000, 25000 decolli annui, corrispondenti, per l'uso del metodo STBA, a 7, 33, 137 movimenti giornalieri.

Per consentire l'eliminazione di ulteriori variabili, si è proceduto al dimensionamento delle sovrastrutture adottando, in ambedue i metodi, lo stesso tipo di materiale per ciascuno degli strati; pertanto tutte le sovrastrutture sono costituite da:

- un manto realizzato con uno strato di usura ed uno strato di collegamento, in conglomerato bituminoso;
- uno strato di base in misto bitumato;
- uno strato di fondazione in misto granulare di frantumazione.

Con le due procedure precedentemente indicate, i dimensionamenti hanno fornito i valori degli spessori totali reali, indicati nei diagrammi delle Figure 6, 7 e 8, per le tre diverse classi di traffico.

Le sostanziali differenze che, in ciascun grafico, appaiono immediatamente dall'osservazione dei due andamenti degli spessori totali, in funzione del CBR di sottofondo, pos-

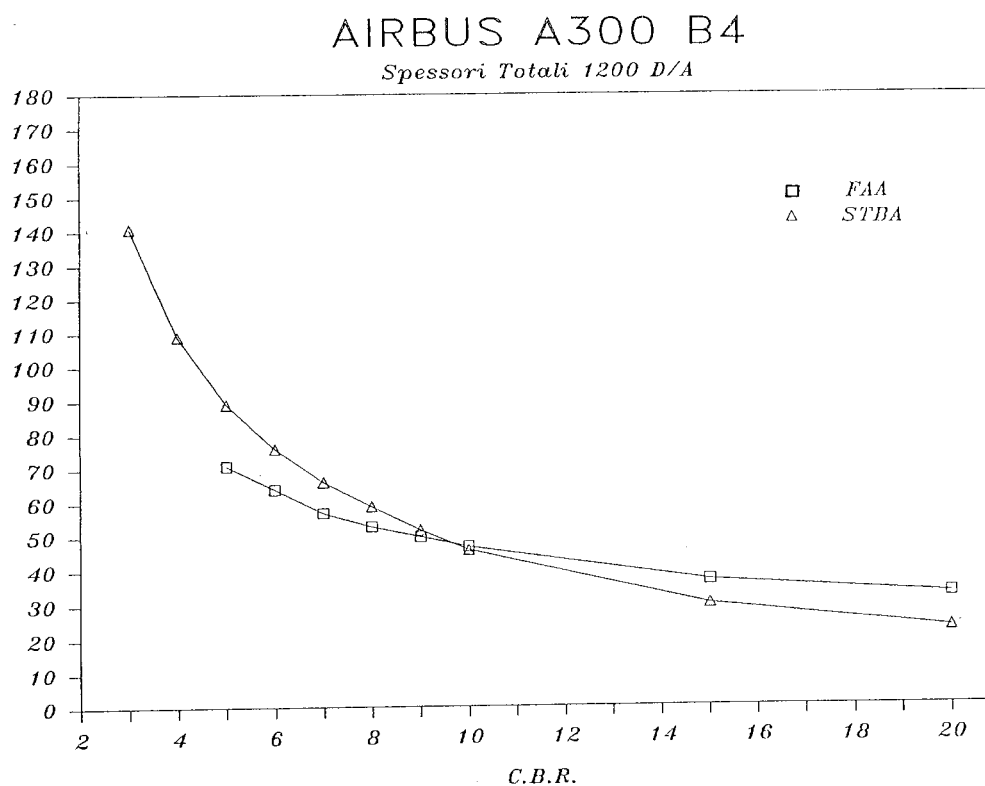
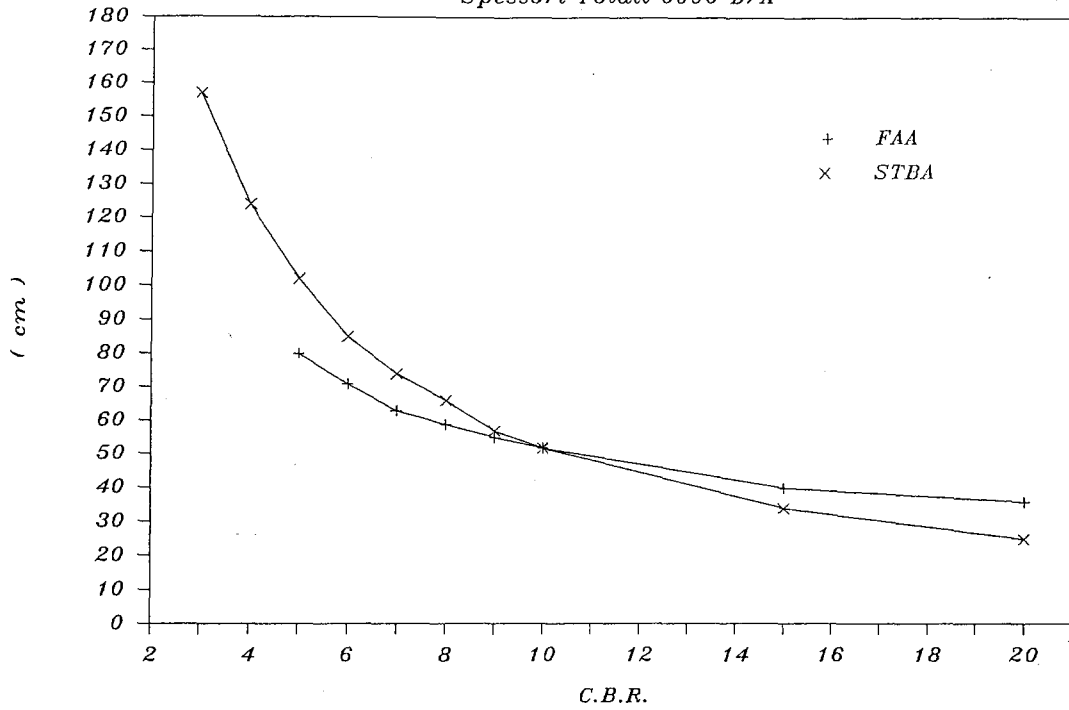


Fig 6

AIRBUS A300 B4

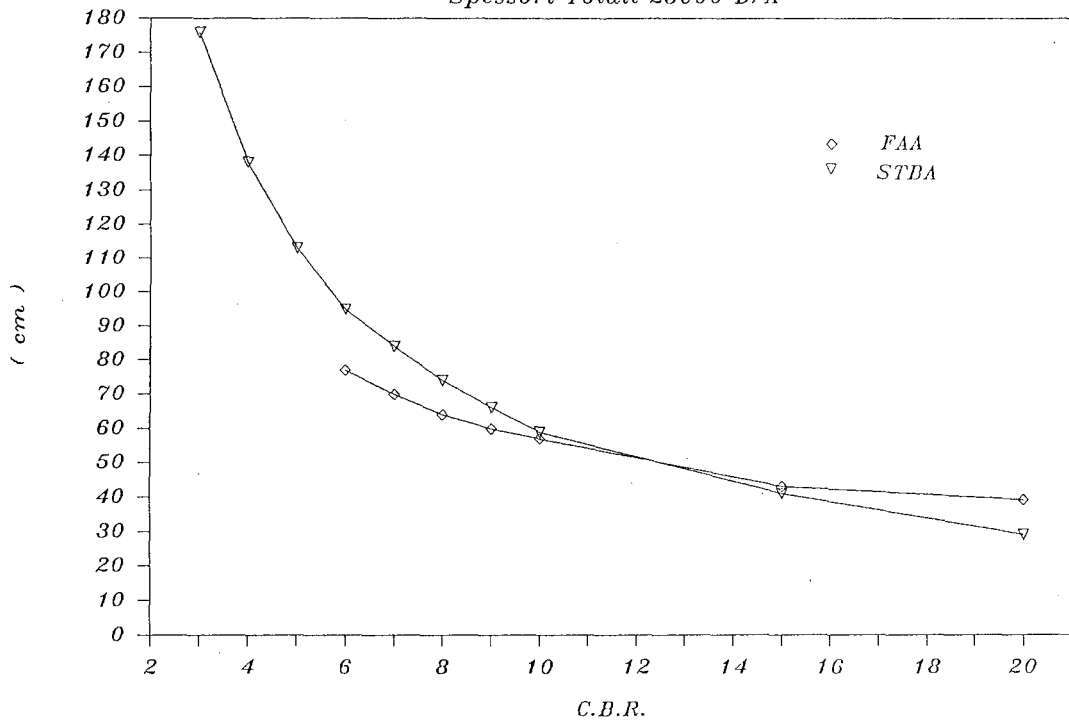
Spessori Totali 6000 D/A



Figg. 7 e 8

AIRBUS A300 B4

Spessori Totali 25000 D/A



sono essere maggiormente evidenziate dall'esame dei grafici relativi ai dimensionamenti degli spessori degli strati di base e di fondazione, secondo i metodi F.A.A. e S.T.B.A. (Figure 9 e 10), determinati in funzione del traffico e del CBR di sottofondo.

Si evidenzia subito il notevole, maggiore spessore dello strato di base in misto bitumato secondo il dimensionamento F.A.A., praticamente indipendente dalle caratteristiche del sottofondo; per contro, conseguentemente, lo spessore dello strato di fondazione, per l'F.A.A. risulta molto più modesto.

Alla luce dei suddetti andamenti, e tenuto conto che gli spessori del manto risultano sostanzialmente costanti in ambedue i metodi, sia al variare del CBR, sia al variare della classe di traffico annuale, appare evidente la motivazione della prevalenza del maggiore spessore calcolato con un metodo o con l'altro, a seconda che ci si trovi nella zona con CBR bassi o elevati.

Per i valori più bassi della portanza del sottofondo, si ottengono spessori totali superiori operando col metodo S.T.B.A. mentre, per CBR più elevati, prevalgono gli spessori calcolati col metodo F.A.A.

Una chiara rappresentazione dello spessore totale e degli spessori dei singoli strati è rappresentata nelle Figure 11,

12, 13 e 14, indicanti i dimensionamenti effettuati con i due metodi, per l'intervallo di valori di portanza precedentemente preso in esame, in funzione della minima e massima classe di traffico considerata.

Le forti differenze tra gli spessori totali a cui si perviene utilizzando i metodi F.A.A. ed S.T.B.A. non consentono di apprezzare immediatamente la maggiore o minore portanza dell'una soluzione rispetto all'altra, anche perché, nelle soluzioni dei due diversi metodi, mentre per il manto figurano spessori pressoché costanti al variare del CBR del sottofondo (e non molto dissimili tra i due metodi), secondo l'F.A.A. lo spessore dello strato di base è sempre notevolmente maggiore, a scapito dello strato di fondazione, che risulta decisamente potenziato nel metodo S.T.B.A.

Per effettuare un confronto, rappresentativo delle capacità portanti, delle due sovrastrutture ottenibili con i due diversi metodi, avendo prefissato determinate ipotesi di progetto (CBR di sottofondo e classe di traffico), si è ritenuto di indagare sugli stati tensionali indotti nei vari strati, fino al sottofondo, per verificare, attraverso un'opportuna legge di fatica, quale delle due soluzioni comportasse una maggiore vita utile della pavimentazione.

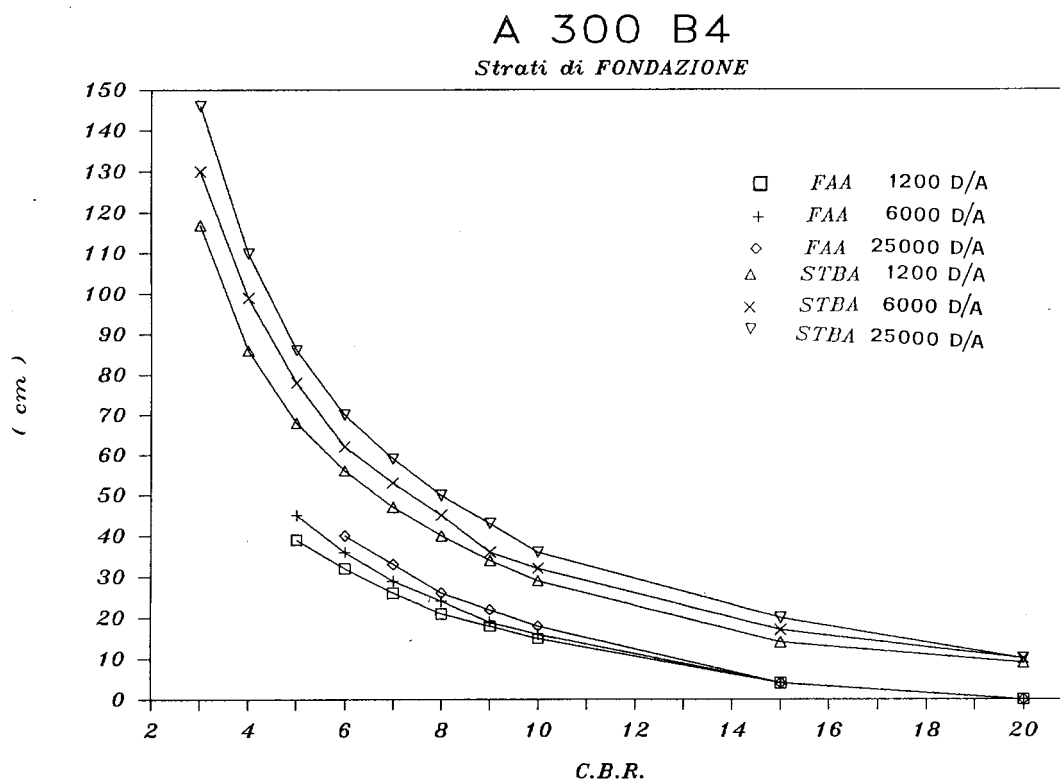


Fig 9

A 300 B4

Strati di BASE

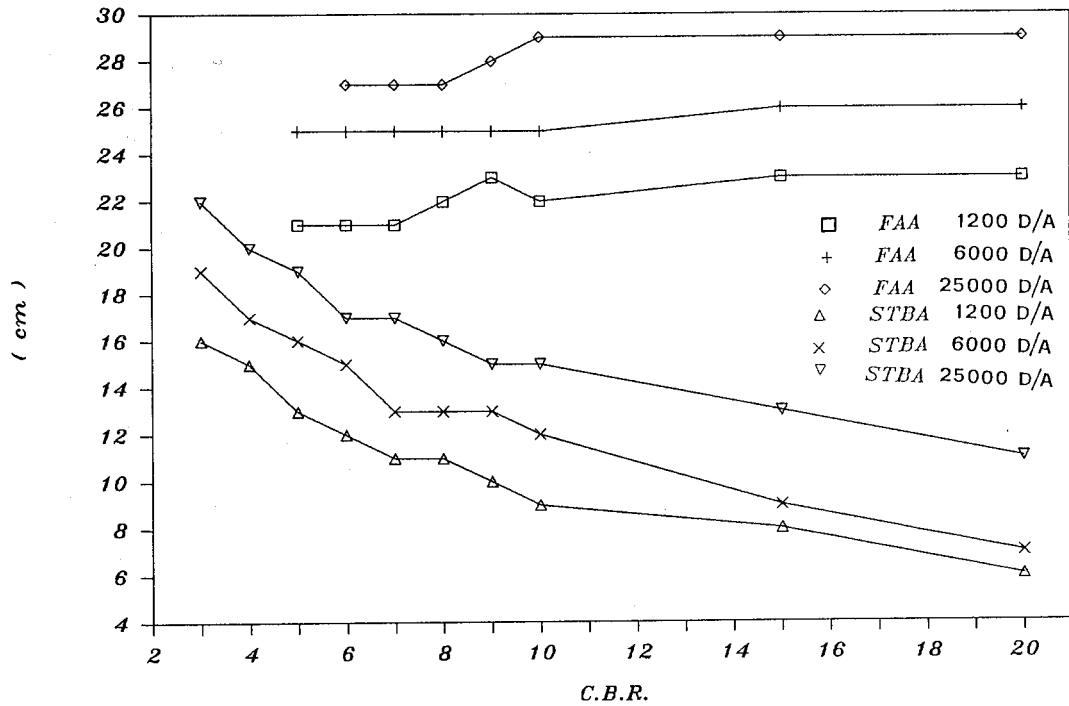


Fig 10

Airbus A300 F.A.A. 1200 D/A

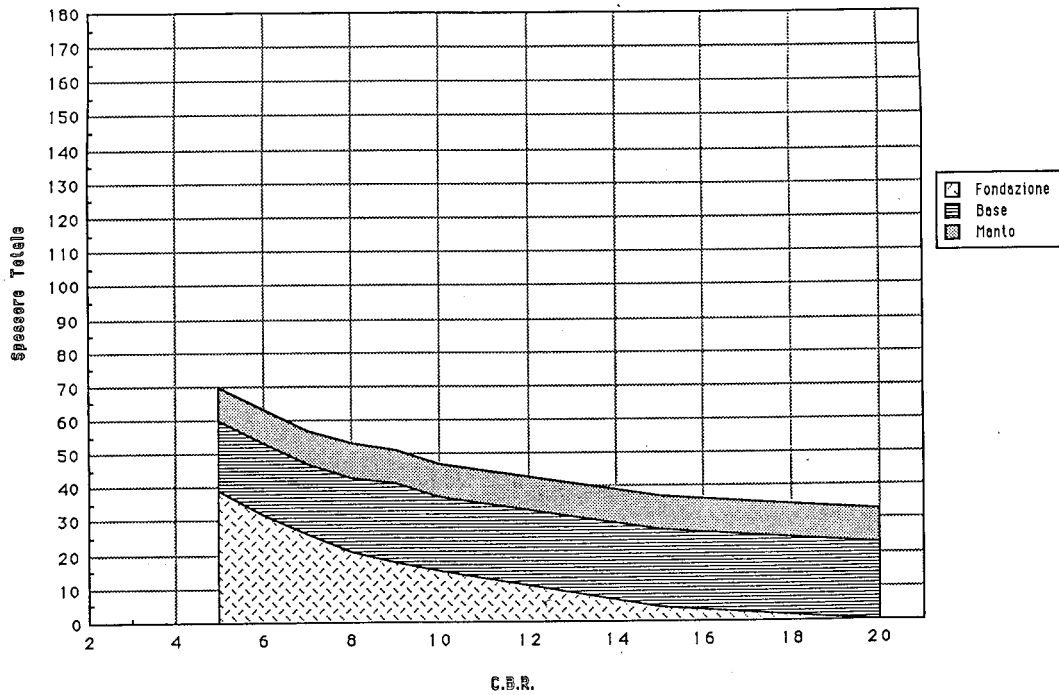


Fig. 11

Airbus A300 F.A.A. 25000 D/A

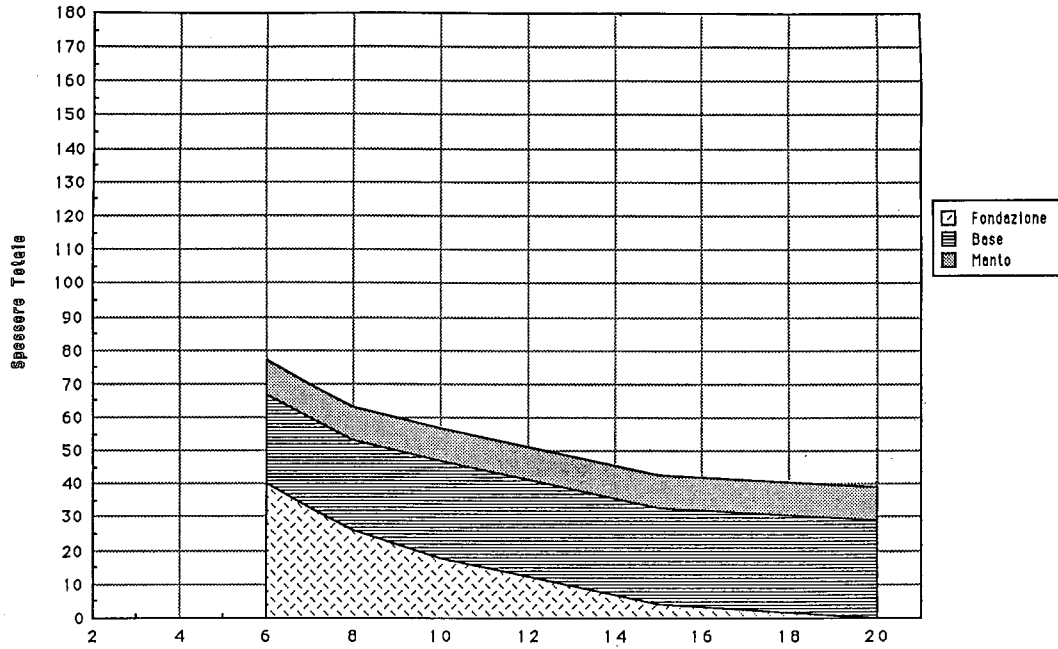


Fig. 12

C.B.R.

Airbus A300 S.T.B.A. 1200 D/A

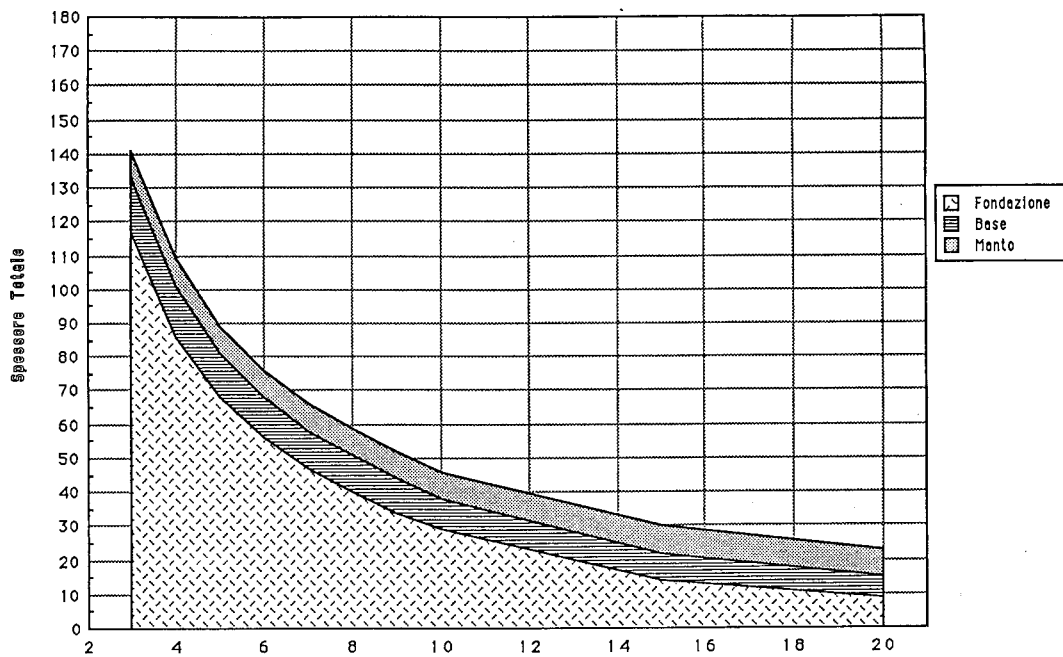


Fig. 13

C.B.R.

Airbus A300 S.T.B.A. 25000 D/A

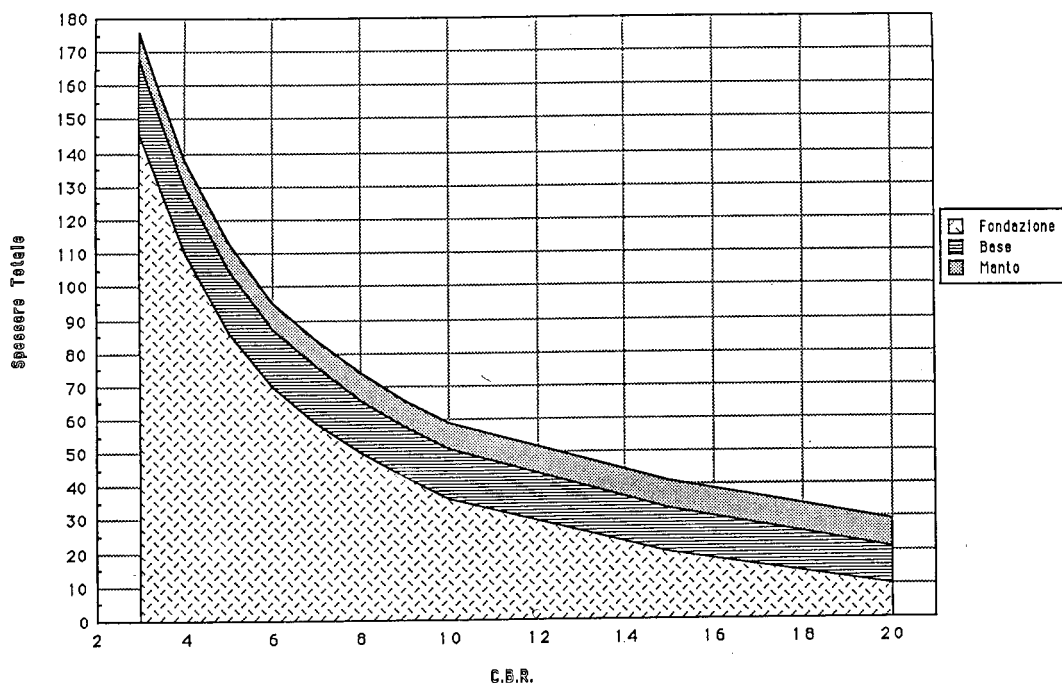


Fig. 14

Al fine di ottenere un primo riferimento di confronto, e nell'ipotesi semplificativa di comportamento elastico lineare per i materiali di tutti gli strati, è stato utilizzato il modello del multistrato elastico, determinando le tensioni e le deformazioni nei punti più interessanti della sovrastruttura, mediante il noto programma BISAR.

Con tale programma, avendo definito:

- il numero degli strati ed il relativo spessore;
- il modulo elastico ed il coefficiente di Poisson di ciascuno strato;
- il numero, la posizione e l'intensità dei carichi sullo strato superficiale;

si ottengono i valori delle tensioni (σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz}) e delle deformazioni (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} e ϵ_{zz}) nei punti desiderati.

I valori caratterizzanti i materiali dei vari strati, inseriti nel programma di calcolo, sono quelli riportati nelle Tabelle IV-a e IV-b.

È sembrato interessante rivolgere l'attenzione alle tensioni orizzontali indotte sulla faccia inferiore dello strato di base (il più profondo degli strati legati), responsabile del comportamento a fatica, ad opera delle ripetizioni dei massimi sforzi di trazione per flessione indotti dal traffico veicolare.

I valori massimi di dette tensioni, con le relative deformazioni unitarie, sono riportati in Tabella V.

Tab. IV-A. Caratteristiche strato di base

Stagione	Modulo dinamico (daN/cm ²)	Coefficiente di Poisson
Estate	18000	0.43
Primavera	35000	0.40
Autunno	65000	0.36
Inverno	85000	0.34

Tab. IV-B. Caratteristiche manto.

Stagione	Modulo dinamico (daN/cm ²)	Coefficiente di Poisson
Estate	12000	0.44
Primavera	25000	0.41
Autunno	60000	0.34
Inverno	90000	0.34

CBR	Decolli/anno	Stagione	FAA				STBA			
			Spessore cm		q (da N/cm ²)	ε (%)	Spessore cm		q (da N/cm ²)	ε (%)
			Totale	Manto + base			Totale	Manto + base		
4	1200	Est.					109	23	21.9	$7.9 \cdot 10^{-4}$
		Prim.					»	»	28.6	$5.3 \cdot 10^{-4}$
		Aut.					»	»	34.4	$3.5 \cdot 10^{-4}$
		Inv.					»	»	36.7	$2.9 \cdot 10^{-4}$
	25.000	E					128	28	17.1	$6.2 \cdot 10^{-4}$
		P					»	»	22.2	$4.1 \cdot 10^{-4}$
		A					»	»	26.8	$2.7 \cdot 10^{-4}$
		I					»	»	28.7	$2.3 \cdot 10^{-4}$
7	1200	E	57	31	13.8	$5.1 \cdot 10^{-4}$	66	19	20.0	$7.7 \cdot 10^{-4}$
		P	»	»	18.8	$3.5 \cdot 10^{-4}$	»	»	28.9	$5.5 \cdot 10^{-4}$
		A	»	»	23.1	$2.3 \cdot 10^{-4}$	»	»	36.4	$3.8 \cdot 10^{-4}$
		I	»	»	24.7	$1.9 \cdot 10^{-4}$	»	»	39.2	$3.2 \cdot 10^{-4}$
	25000	E	70	37	10.8	$3.9 \cdot 10^{-4}$	84	25	15.3	$5.9 \cdot 10^{-4}$
		P	»	»	14.8	$2.7 \cdot 10^{-4}$	»	»	21.3	$4.1 \cdot 10^{-4}$
		A	»	»	18.5	$1.9 \cdot 10^{-4}$	»	»	26.5	$2.8 \cdot 10^{-4}$
		I	»	»	19.9	$1.6 \cdot 10^{-4}$	»	»	28.5	$2.3 \cdot 10^{-4}$
10	1200	E	47	32	11.8	$4.4 \cdot 10^{-4}$	46	17	17.3	$7.2 \cdot 10^{-4}$
		P	»	»	16.3	$3.1 \cdot 10^{-4}$	»	»	27.7	$5.4 \cdot 10^{-4}$
		A	»	»	20.2	$2.1 \cdot 10^{-4}$	»	»	36.7	$3.9 \cdot 10^{-4}$
		I	»	»	21.6	$1.7 \cdot 10^{-4}$	»	»	40.1	$3.3 \cdot 10^{-4}$
	25000	E	57	39	9.0	$3.4 \cdot 10^{-4}$	59	23	13.8	$5.6 \cdot 10^{-4}$
		P	»	»	12.6	$2.3 \cdot 10^{-4}$	»	»	20.7	$4.0 \cdot 10^{-4}$
		A	»	»	15.8	$1.6 \cdot 10^{-4}$	»	»	26.6	$2.8 \cdot 10^{-4}$
		I	»	»	17.0	$1.4 \cdot 10^{-4}$	»	»	28.8	$2.3 \cdot 10^{-4}$

- Tensioni calcolate sulla faccia inferiore dello strato di Base

- Le tensioni riportate sono quelle massime e sono sempre quelle orizzontali (q_x o q_y). Le deformazioni (ε) sono quelle corrispondenti.

La legge di fatica utilizzata per valutare la vita utile della pavimentazione, in termini di passaggi di carrelli di aeromobili, discende direttamente dalle formulazioni ottenute separatamente da Verstraeten (attraverso prove di laboratorio) e da Finn (mediante prove su strada). Entrambi i criteri sono stati condensati in un'unica formulazione che tenga conto contemporaneamente di tutti i parametri influenzanti la formazione e la propagazione delle fessurazioni (lesioni) negli strati legati, nonché dell'effetto benefico dei tempi di riposo che favoriscono l'autoriparazione, almeno parziale, delle lesioni.

La legge adottata risulta:

$$N_{Fh} \cdot N_o = (E^*)^{\alpha'} \cdot \sigma^{\beta'} \cdot 10^{\gamma'} \cdot 1,373 \cdot e^{1,089 \cdot n} \cdot h^{-0,152 + 0,476 \cdot n}$$

dove:

N_o è il numero di ripetizioni necessarie perché si giunga all'inizio della fessurazione, individuato dall'espressione:

$$N_o = 10^{(6 + 4,761904762 \cdot \log(\lambda \cdot Vb/Vb + Vv) \cdot 4,761904762 \cdot \log e)}$$

N_{Fh} = numero di ripetizioni necessario perché si giunga ad una fessurazione superficiale pari a quella ipotizzata ($\leq 10\%$ o $\geq 45\%$)

E^* = modulo dinamico del conglomerato bituminoso (daN/cm²)

σ = massima tensione di trazione alla base degli strati legati

h = spessore degli strati legati

n = parametro dipendente dalle caratteristiche degli strati legati

λ = coefficiente dipendente dal tipo di bitume usato, e che è possibile porre in relazione con il tenore di asfalteni o con la T_{pa}

Vb = percentuale in volume di bitume nel conglomerato

Vv = percentuale di vuoti nel conglomerato

ϵ = deformazione massima di trazione

α' = $\alpha \cdot n/5$ dove $\alpha = 2,436827267064028$

β' = $\beta \cdot n/5$ dove $\beta = 3,283538616128064$

γ' = $(\gamma \cdot n/5) + 0,847 \cdot (1-n/5)$ dove:

$$\gamma = -2,241807129708 \text{ con fessurazione } \leq 10\%$$

$$\gamma = -2,1021021075 \text{ con fessurazione } \geq 45\%$$

Al fine dell'applicazione della legge di fatica, è stato necessario considerare, come unico, l'insieme degli strati legati, accreditandolo di caratteristiche meccaniche intermedie tra quelle del manto e dello strato di base. Si è ritenuto di poter accettare tale approssimazione, tenuto conto della coincidenza pratica, nei due metodi, degli spessori dello strato di manto, anche in considerazione dell'interesse di semplice confronto tra risultati di dimensionamenti effettuati con i due diversi metodi.

Per l'insieme degli strati legati a bitume, sono state assunte le seguenti caratteristiche meccaniche, differenziandole secondo i periodi stagionali, come risulta dalla Tabella VI.

Tab. VI. Caratteristiche meccaniche degli strati legati.

Stagione	Modulo dinamico (daN/cm ²)	Coefficiente di Poisson
Estate	15000	0.43
Primavera	30000	0.40
Autunno	62500	0.36
Inverno	87500	0.32

Le tensioni e le deformazioni unitarie calcolate col programma BISAR, unitamente ai valori dei moduli dei materiali, desunti dalla precedente tabella, hanno consentito di applicare il criterio della verifica a fatica, utilizzando la legge del danno cumulato (Miner), cioè di controllare se:

$$\sum n_i / N_i \leq 1$$

dove:

n_i = numero di ripetizioni del carico previste sulla pavimentazione in esame nella singola stagione, per l'insieme delle annualità di vita utile programmata.

N_i = numero di ripetizioni, ricavabile dalla legge di fatica per ciascun arco stagionale, in grado di determinare l'ammaloramento prefissato (10% o 45%).

Negli usuali procedimenti di calcolo, ovviamente, se la verifica non è soddisfatta per il numero di passaggi previsti (cioè $\sum n_i / N_i > 1$), occorre ridimensionare gli strati, potenziando opportunamente lo spessore della sovrastruttura.

Gli abachi di ambedue i metodi di calcolo, nei quali si entra col numero di partenze totali, sono stati concepiti tenendo conto dell'effettiva dispersione trasversale delle traiettorie sulla pista aeroportuale, che, diversamente dalla corsia stradale, beneficia, in tal senso, di una minore concentrazione di punti in cui si verificano le ripetizioni dei carichi mobili.

Conseguentemente, nelle verifiche a fatica effettuate nel presente studio, le partenze totali sono state trasformate in "ricoprimenti", mediante l'uso dei coefficienti divisorii, che vengono forniti: dalla F.A.A., in dipendenza della configurazione del carrello di atterraggio; dal S.T.B.A. attraverso l'indicazione di un valore unico, costante, per qualunque tipo di aeromobile; tali coefficienti sono indicati nella Tabella VII.

Tab. VII.

Carrello	F.A.A.	S.T.B.A.
Ruota singola	5.18	
Ruote doppie (gemellate)	3.48	
	tutti:	3.65
Doppio tandem	1.84	
B 747	1.85	
DC 10/30	1.69	

In considerazione della notevole differenza tra i valori dei coefficienti proposti da i due metodi, si è ritenuto opportuno effettuare la verifica anche con i valori dei ricoprimenti desumibili da un coefficiente suggerito dall'USACE (United States Army Corps Engineers):

$$n = N \cdot r \cdot d \cdot t / 100 \cdot L$$

dove:

n = numero di ricoprimenti

N = numero di partenze

t = % di traffico interessante una striscia di pista larga L

r = numero di ruote per gamba di forza

d = diametro dell'area d'impronta, supposta circolare

L'USACE suggerisce di adottare t = 75% ed L = 2,5 m.

Le verifiche sono state effettuate sui dimensionamenti relativi ai valori di traffico minimo e massimo (tra quelli assunti nella presente indagine: 1200 e 25000 decolli/anno), prendendo in esame le caratteristiche del sottofondo individuate dai valori di CBR = 4, 7 e 10.

4. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Nella Tabella VIII sono riportati i risultati delle verifiche a fatica, effettuate utilizzando la legge di Miner per la valutazione del danno cumulato.

Tab. VIII. Airbus A300 B4. Valori danno cumulato.

C.B.R.		F.A.A.		S.T.B.A.	
		Ricoprimenti secondo coefficienti Metodo	Ricoprimenti secondo USACE	Ricoprimenti secondo coefficienti Metodo	Ricoprimenti secondo USACE
1200 Dec./anno	4	—	—	0.37	0.66
	7	0.14	0.12	0.48	0.85
	10	0.09	0.08	0.49	0.85
25000 Dec./anno	4	—	—	2.88	5.04
	7	1.14	1.00	2.91	5.10
	10	0.66	0.59	2.92	5.11

Premesso che il metodo F.A.A., per l'Airbus 300, non fornisce soluzioni per valori del CBR di sottofondo inferiori a 5, si evidenzia una netta differenza di risultati, in dipendenza delle due diverse classi di traffico considerate.

Per la classe di traffico di 1200 decolli/anno, per le soluzioni ottenute da ambedue i metodi, la verifica è soddisfatta, considerando i ricoprimenti ottenibili, sia con i coefficienti specifici dei due metodi, sia con il criterio U. S. A. C. E.

Il dimensionamento F.A.A. sembra risultare addirittura esuberante, come desumibile dall'esiguo valore dell'indice del danno cumulato.

Per la classe di traffico di 25.000 decolli/anno, la verifica del dimensionamento F.A.A. è soddisfatta; il valore dell'indice consente di attribuire, alla sovrastruttura, una capacità portante adeguata alle sollecitazioni del traffico previsto nella sua vita utile.

Per il dimensionamento S.T.B.A., la verifica sembra indicare una carenza di capacità portante, con il raggiungimento del livello di danno cumulato prescelto in un tempo molto inferiore (di circa il 50%) a quello previsto come vita utile della sovrastruttura, nell'ipotesi assunta di incremento costante del traffico del 5% annuo.

CONCLUSIONI

Prescindendo dall'esame dei confronti di dimensionamenti effettuati per numerosi altri tipi di aeromobile (Fokker F 28, B 727 Adv., B 757/200, Concorde, DC 10/30, B 747/100, B 747/200) che sono stati analizzati in modo analogo, e di cui si riferirà in una successiva relazione conclusiva, possono già effettuarsi le seguenti considerazioni:

Le tensioni e le deformazioni, nei vari strati della sovrastruttura, sono state determinate utilizzando il BISAR, che effettua l'analisi nell'ipotesi di uno schema di multistrato elastico lineare. In effetti specialmente i materiali granulari non legati, presenti nello strato di fondazione e nel sottofondo, hanno un comportamento elastico, ma non lineare. Per tale motivo, attualmente alcuni ricercatori stanno lavorando per la messa a punto di un programma che permette di determinare le tensioni e le deformazioni nei vari strati di un modello elastico non lineare. Probabilmente la sua utilizzazione consentirà il raggiungimento di risultati diversi, più prossimi ai comportamenti reali, desumibili dall'applicazione di una legge di fatica.

Si ritiene comunque che l'individuazione di stati tensionali così diversi, quali quelli determinabili, in prima approssimazione, con il BISAR, nelle soluzioni progettuali desumibili con i due metodi a confronto, possano costituire un utile orientamento per l'apprezzamento delle due diverse filosofie con cui sono stati impostati i metodi F.A.A. e S.T.B.A.

Al contrario del metodo F.A.A., che prevede direttamente una vita utile di 20 anni, l'S.T.B.A. rivolge principalmente l'attenzione ad un orizzonte temporale di soli 10 anni: a conferma di una previsione a medio termine che richiede necessariamente un controllo, nel tempo, dell'effettiva condizione di portanza della pista, e per il mantenimento della quale potrebbero essere opportuni eventuali trattamenti di rinforzo.

In altri termini, l'intendimento di garantire le condizioni di portanza di una pista aeroportuale per tutto l'arco dei 20 anni, secondo il metodo F.A.A., permetterebbe di considerare detto metodo come un criterio di progettazione "a manutenzione zero", mentre la previsione cautelativa a 10 anni di vita utile, del metodo S.T.B.A., consentirebbe di valutarlo come un criterio di progettazione "a manutenzione progressiva".

BIBLIOGRAFIA

- 1) A. DEL FIUME, G. JACOPINO, E. PARATORE *Metodi tradizionali di calcolo per pavimentazioni aeroportuali*. Le Strade n. 5, Settembre-Ottobre 1977.
- 2) *Airport Pavement Design and Evaluation*. F.A.A. Advisory Circular 1978.
- 3) G. BEECKEN, R.O. KOOLE, W. VISSER *An Analytical Method of Testing Pavement Strength*. Airport Forum 6/1979.
- 4) G. TESORIERE *Strade ferrovie aeroporti*. Vol. II, Utet 1979.
- 5) G. DA RIOS, S. RINELLI *Su un nuovo metodo di calcolo di pavimentazioni aeroportuali di tipo flessibile*. Le Strade n. 1183, Marzo-Aprile 1979.
- 6) P. FERRARI, F. GIANNINI *Ingegneria stradale: corpo stradale e pavimentazioni*. Voi. II, S.E.D.I. 1979.
- 7) G. MORALDI *Appunti dalle lezioni di Tecnica dei Lavori Stradali*, 1980.
- 8) R. LE STRAT, B. FORZY *Synthèse et critique de méthodes françaises et étrangères d'évaluation de la force portante des chaussées d'aérodromes*. *Revue générale des routes et des aérodromes* n. 10/1982.
- 9) P. GIANNATTASIO *Il progetto delle pavimentazioni aeroportuali*. 1981.
- 10) ICAO: *Annex 14 Aerodrome design manual*, part. III, 1983.
- 11) P.Y. LANDOUER *Généralités sur le comportement, le dimensionnement et l'entretien des chaussées aéronautiques*. *Revue générale des routes et des aérodromes*, n. 597-5, 1983.
- 12) S.T.B.A., S.B.A., D.G.A.C. *Dimensionnement des chaussées*, 1983.
- 13) L. DOMENICHINI, A. MARCHIONNA *Analisi strutturale per il dimensionamento di pavimentazioni con strati di base-fondazione legati a calce*. *Riv. Autostrade* n. 6, 1984.
- 14) Y. CAMERES, P. LAURNOL *Les chaussées aéronautiques*. *Revue générale des routes et des aérodromes*, n. 613-11, 1984.
- 15) A. MARCHIONNA, M. CESARINI, M.G. FORNACI, M. MALGARINI *Modello di degradazione strutturale delle pavimentazioni*. *Riv. Autostrade*, numeri 1-3, 1985.