



**DIMENSIONAMENTO DELLE
SOVRASTRUTTURE AEROPORTUALI
RIGIDE A LASTRE E DI QUELLE
FLESSIBILI RAFFORZATE CON GEOGRIGLIE**

Ciro Caliendo

Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Salerno
Via Ponte Don Melillo-84084 Fisciano (Salerno)
Tel: +39 089.964140 - Fax: +39.089.964045
E-mail: ccaliendo@unisa.it

DIMENSIONAMENTO DELLE SOVRASTRUTTURE AEROPORTUALI RIGIDE A LASTRE E DI QUELLE FLESSIBILI RAFFORZATE CON GEOGRIGLIE

CIRO CALIENDO - Dipartimento di Ingegneria Civile – Università degli studi di Salerno

SOMMARIO

Si è valutata l'influenza della perdita di contatto con il supporto sull'entità dello stato tensionale di una tipica sovrastruttura aeroportuale rigida a lastre collaboranti. Per raggiungere l'obiettivo è stato messo a punto un modello di calcolo agli elementi finiti nel quale le barre di compartecipazione sono state schematizzate con elementi dotati di rigidità flessionale e tagliente, mentre la perdita di supporto fra le lastre e il piano di appoggio è stata affrontando individuando aree di distacco ed assegnando alle molle tese in esse contenute rigidità nulle. Dallo studio effettuato è emerso che applicando contemporaneamente i carichi da traffico e le variazioni termiche si ha uno stato tensionale che, soprattutto ai più alti valori dei gradienti termici, è sensibilmente maggiore di quello che si ricava col calcolo razionale approssimato che, come è noto, presenta dei limiti consistenti sia nella definizione del grado di compartecipazione delle lastre sia nell'applicazione impropriamente del principio di sovrapposizione degli effetti in quanto il terreno di supporto ha un comportamento lineare non resistente a trazione.

Si è valutata inoltre l'influenza della rigidità e posizione delle geogriglie sullo stato tenso-deformativo di una sovrastruttura aeroportuale di tipo flessibile. Anche per tale sovrastruttura è stato sviluppato un opportuno modello di calcolo agli elementi finiti nel quale la geogriglia è stata simulata con elementi monodimensionali dotati di sola rigidità estensionale. I risultati ottenuti mostrano che l'influenza della geogriglia è rilevante quando essa presenta valori di rigidità piuttosto alti (griglie in acciaio) e quando è posizionata nella parte bassa dello strato di base in conglomerato bituminoso.

ABSTRACT

The influence of the loss of support on the values of the stresses for a typical airport pavement with jointed concrete slabs has been evaluated in this paper. For the purpose a finite-element model has been setting up. The dowel bars have been simulated by means of elements having bending and shear stiffness (frames), while the loss of support has been taken into account individuating where the springs are in tension and assigning them a nought stiffness. The paper shows that, above all for the major temperature gradients, the stresses obtained by means of the combined action of the temperature and traffic loads are remarkably higher than those relative to an approximate rational calculation. The latter, as it is known, considers the separated action of the temperature and traffic loads (Eisemann and Westergaard theories) and then applies incorrectly the Effects Superposition Principle because the support has a linear behaviour that is not resistant to tension.

Furthermore the effects of the stiffness and position of geogrids on the values of the stresses and strains of a chosen airport asphalt pavement has been evaluated too. Also in this case a finite-element model has been developed. The geogrid has been simulated by means of truss elements. The work shows that the influence is considerable with geogrid having higher values of the elastic modulus (steel geogrid) and when the geogrid is near the bottom of the bituminous concrete base layer.

1. INTRODUZIONE

Le soluzioni che generalmente si adottano in campo aeroportuale per poter sostenere il traffico aereo vedono l'impiego di sovrastrutture di tipo rigido a lastre in calcestruzzo o flessibile. Le prime sono di solito utilizzate, come è noto, per la realizzazione dei piazzali di sosta degli aerei mentre quelle flessibili trovano largo impiego nelle piste di circolazione e/o piste di volo.

Il crescente traffico aereo, sempre più intenso e pesante, è causa di un più rapido deterioramento di tali sovrastrutture, sotto gli aspetti sia del danno strutturale che delle caratteristiche superficiali, il che comporta una maggiore frequenza degli interventi di manutenzione con conseguente diminuzione della qualità della circolazione e del livello di sicurezza dovuto all'apertura dei cantieri.

Per far fronte a tale crescente aggressività le soluzioni che generalmente si adottano in campo aeroportuale vanno dalla tradizionale pavimentazione rigida e flessibile caratterizzate da maggiori spessori a quelle più innovative che vedono per la flessibile l'impiego di geogriglie di rinforzo e/o l'utilizzazione di conglomerati bituminosi modificati con polimeri.

Nell'ambito del dimensionamento di tali sovrastrutture particolare interesse ha sempre suscitato il calcolo delle sovrastrutture rigide a lastre per le problematiche connesse al grado di compartecipazione delle lastre adiacenti e alla perdita di contatto col supporto. Per quanto concerne invece il proporzionamento delle sovrastrutture flessibili sono quelle rinforzate con geogriglie a destare una maggiore attenzione per l'influenza della rigidità e della posizione delle geogriglie sullo stato tenso-deformativo e quindi sulla durata strutturale.

Per il dimensionamento delle lastre in calcestruzzo vengono generalmente utilizzati metodi di calcolo razionali approssimati che consentono di prevedere le prestazioni della sovrastruttura, in relazione alla sua durata a fatica, mediante la valutazione dello stato tensionale provocato dal passaggio dei carichi e dalle variazioni termiche. Tali metodi presentano però dei limiti che consistono sia nella definizione del grado di compartecipazione delle lastre adiacenti sia nel valutare separatamente le tensioni dovute ai carichi da traffico da quelle delle variazioni termiche e nell'applicare quindi impropriamente il principio di sovrapposizione degli effetti in quanto il terreno di supporto ha un comportamento lineare non resistente a trazione. Per quanto attiene il dimensionamento delle sovrastrutture flessibili rinforzate con geogriglie non vi sono metodi approssimati né è possibile simulare la presenza della geogriglia in un ordinario calcolo basato sulla teoria del multistrato elastico.

In tale contesto si pone il presente lavoro che, con riferimento ad aerei di progetto particolarmente pesanti, si è posto gli obiettivi sia di valutare l'entità dello stato tensionale di una prescelta pavimentazione rigida a lastre, tenendo conto del grado di compartecipazione delle lastre e della non linearità del supporto, sia di stimare l'influenza della rigidità e della posizione delle geogriglie sullo stato tenso-deformativo di una determinata sovrastruttura flessibile.

Per il raggiungimento di tali obiettivi, visti i limiti dei metodi sopra esposti, sono stati messi a punto due modelli di calcolo agli elementi finiti relativi rispettivamente alle pavimentazioni di tipo rigido e flessibile per la cui risoluzione si è utilizzato un opportuno codice di calcolo. I calcoli sono stati svolti, a parità degli altri fattori che entrano in gioco nel dimensionamento, in differenti condizioni climatiche. Si è quindi effettuato, con riferimento alla sovrastruttura rigida, un confronto tra i valori delle tensioni ottenute col calcolo razionale rigoroso con quelle del calcolo razionale

approssimato; mentre il confronto tra lo stato tenso-deformativo della flessibile in presenza ed in assenza della geogriglia ha consentito di quantificare l'efficacia di quest'ultima.

2. PAVIMENTAZIONE RIGIDA A LASTRE

2.1 Impostazione dello studio

La pavimentazione rigida prescelta è costituita da lastre in calcestruzzo dello spessore di 30 cm e da uno strato sottostante in misto cementato dello spessore di 20 cm, quest'ultimo poggiante su di un terreno di sottofondo di ottima portanza (modulo elastico statico di 1000 daN/cm^2). Le barre di compartecipazione sono previste del diametro ϕ da 30 mm, con interasse di 30 cm e lunghe 50 cm.

Con riferimento a tale sovrastruttura, l'analisi agli elementi finiti ha preso le mosse da un'analisi di sensibilità del modello, la cui mesh ottimale è stata ottenuta confrontando, nell'ipotesi di piastra isolata e caricata dall'aereo di progetto, i risultati derivanti dal calcolo per varie dimensioni delle maglie con la soluzione analitica proposta da Westergaard.

Individuata la mesh, si è pensato di generare un modello completo a nove piastre per poter tener in conto della collaborazione tra di esse. Tale modello vede la schematizzazione delle piastre mediante elementi tridimensionali (solid), mentre il supporto è rappresentato mediante molle (springs) per la cui rigidità si è seguita la procedura in seguito descritta. La presenza delle barre di compartecipazione è stata rappresentata mediante l'impiego di elementi dotati sia di rigidità flessionale che tagliante (frames), mentre per simulare la perdita di supporto tra le lastre e il loro piano di appoggio si è pensato di individuare, per successivi processi iterativi, le aree di distacco e di assegnare alle molle tese in esse contenute rigidità nulle.

Per il valore della rigidità da assegnare al supporto delle lastre, espressa col modulo di reazione K , si è pensato di risolvere il modello del bi-strato elastico costituito dal misto cementato e dal terreno di sottofondo. Il corrispondente valore del modulo di reazione K all'interfaccia - valutato come rapporto tra la pressione applicata sulla superficie del bi-strato (0.7 daN/cm^2 distribuita su un'area circolare di raggio 38 cm) e la corrispondente deflessione elastica - è risultato di 14.5 daN/cm^3 .

Si sono studiati i casi per due posizioni dell'aereo di progetto (carico al centro piastra e carico sul bordo piastra) in quattro differenti condizioni climatiche.

Si è quindi effettuato un confronto in termini di entità delle tensioni tra i risultati ottenuti con la risoluzione di tale modello, in cui si è tenuto conto contemporaneamente dei carichi da traffico e delle variazioni termiche con quelli che, a parità degli altri fattori che entrano in gioco nel dimensionamento, si ricavano col calcolo razionale approssimato.

2.2 Modello di calcolo

Il modello completo presenta dimensioni in pianta $12*12 \text{ m}$ ed è costituito da nove piastre ognuna delle quali ha dimensioni di $4*4 \text{ m}$.

Nel modello le lastre sono state schematizzate mediante elementi tridimensionali a 8 nodi. Per la piastra centrale le dimensioni in pianta di tali elementi sono tutti $10*10 \text{ cm}$. La stessa schematizzazione è stata adottata anche in corrispondenza dei giunti per una larghezza complessiva di 80 cm a cavallo di ciascun giunto. La mesh diventa poi più ampia ($30*30 \text{ cm}$) nella rimanente parte delle altre otto piastre costituenti il modello. Il passaggio dagli elementi più piccoli a quelli più grandi è stato ottenuto inserendo

nelle zone di transizione degli elementi prismatici a base triangolare che assicurano la continuità dei nodi da una maglia all'altra. Le altezze di questi elementi sono state assunte pari a $1/8$ dello spessore della lastra.

Il supporto è stato rappresentato con molle agenti solo in direzione verticale e disposte sotto ciascun nodo delle maglie delle lastre. La possibilità delle barre di compartecipazione di poter scorrere, per effetto del ritiro e delle variazioni termiche, in una delle piastre giuntate è stata simulata vincolando gli elementi che le rappresentano (frames) per metà della loro lunghezza ad una piastra e consentendo alla parte rimanente il solo grado di libertà alla traslazione lungo il proprio asse.

Una vista del modello è contenuta in figura 1.

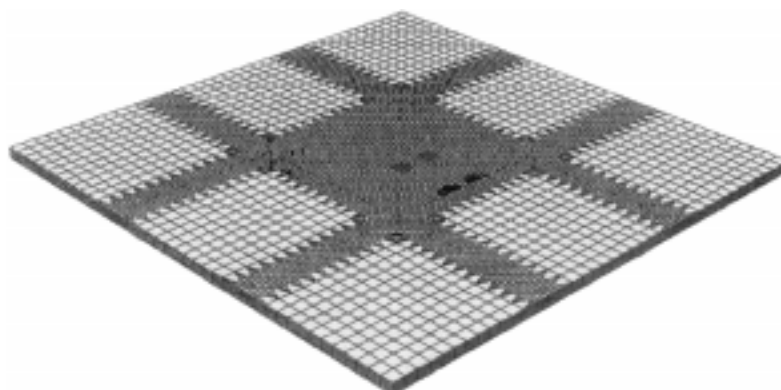


Figura 1- Vista del modello della sovrastruttura rigida a lastre.

Condizioni climatiche di riferimento

In tabella 1 sono riportate le condizioni climatiche cui ci si è riferiti nel calcolo. Con l'applicazione del modello di Barber si sono valutate le temperature e quindi i corrispondenti gradienti che si instaurano nelle piastre, contenuti anch'essi in tabella 1.

	Temperatura media stagionale dell'aria (°C)	Media stagionale escur. termica giornaliera (°C)	Radiazione solare media stagionale (Kcal/m ² .gg)	Velocità media del vento (Km/h)	Gradienti termici nella piastra (°C/cm)
Inverno	10	7	3223	20	0.27
Primavera	15	10	6120	18	0.49
Estate	25	11	6739	16	0.55
Autunno	19	9	4097	17	0.36

Tabella 1-Condizioni climatiche di riferimento e gradienti termici.

Caratterizzazione di materiali

Per il conglomerato cementizio costituente le lastre si è assunto un modulo elastico di 300.000 daN/cm² e un coefficiente di Poisson ν di 0.15.

Analisi di carichi

L'aereo di progetto prescelto è un DC 8. Esso ha un massa complessiva massima al decollo di 1578 kN, con un carico massimo per gamba di forza di 764.9 kN che scarica su quattro ruote la cui pressione di gonfiaggio è 13.4 daN/cm².

Il modello agli elementi finiti è stato caricato disponendo la suddetta gamba di forza in due distinte posizioni: a centro della piastra centrale oppure sul suo bordo. Per quanto riguarda il carico sul bordo va detto che si è qui considerata la condizione più gravosa che può verificarsi, cioè quella corrispondente al momento in cui durante il moto le due ruote posteriori della gamba di forza, le quali stanno impegnando il bordo, sono

soltanto per metà a contatto con le lastre. In tale situazione dette ruote scaricano il peso complessivo loro afferente su aree di impronta dimezzate.

2.3 Calcolo razionale approssimato

Per poter applicare il calcolo razionale approssimato si è valutato il cosiddetto carico su ruota singola equivalente (CRSE); inteso come quel carico che, a parità di pressione di gonfiaggio, produce nella sovrastruttura uno stato tensionale equivalente a quello indotto dalla gamba di forza multiruote. Esso è stato determinato seguendo la procedura proposta dalla F.A.A. e cioè in funzione del raggio di rigidità relativa della piastra, dell'entità del carico su gamba di forza, della superficie delle aree di impronta e della mutua distanza tra le ruote del carrello multiruote. Tale carico è risultato avere una massa di 255 kN ed agire su un'area circolare di 21 cm di raggio.

Per la valutazione delle massime tensioni di trazione all'intradosso della lastra per carico da traffico a centro piastra si è utilizzato Westergaard. Per quanto concerne la tensione a bordo piastra, poiché nel calcolo approssimato non risultano relazioni che consentano di tener direttamente conto della collaborazione delle piastre, si è utilizzata l'espressione analitica proposta da Westergaard per carico agente sul bordo di una piastra isolata e con area di impronta semicircolare. In essa si è tenuto conto di un grado di compartecipazione medio tra le lastre, ritenuto generalmente accettabile, pari a 75% imponendo una riduzione dell'entità del carico su ruota singola equivalente del 25%.

Per quanto concerne la valutazione della tensione di trazione dovuta ai gradienti termici si è utilizzato in merito al centro piastra la metodologia proposta da Eisemann che consente di tener conto della perdita di supporto. Per le tensioni di origine termica al bordo non risulta che vi siano metodi approssimati che consentano di valutarne l'entità tenendo conto del sollevamento della piastra. Il modo che è stato qui seguito vede una stima approssimata di tali tensioni ottenuta moltiplicando quelle trovate a centro piastra con Eisemann per dei coefficienti ricavati considerando in che rapporto stanno tra di loro le tensioni di origine termica a bordo piastra e quelle a centro piastra valutate col Bradbury (metodo che considera il pieno contatto lastra-piano di posa).

2.4. Analisi dei risultati e confronti

In tabella 2 sono riportate la massime tensioni di trazione all'intradosso della lastra in calcestruzzo – ricavate sia risolvendo il modello agli elementi finiti in cui si è tenuto conto contemporaneamente dello scarico della gamba di forza dell'aereo di progetto e dei gradienti termici sia quelle derivanti dal calcolo approssimato – per i quattro periodi climatici considerati e per le condizioni di carico al centro e al bordo piastra.

Gradiente termico (°C/cm)	Massima tensioni di trazione all'intradosso Della piastra per carico al centro (daN/cm ²)				Massima tensione di trazione all'intradosso per carico a bordo piastra (daN/cm ²)			
	Westergaard (A)	Eisemann (B)	Totale A + B	Razionale rigoroso	Westergaard (A) (*)	Eisemann (B) (**)	Totale A + B	Razionale rigoroso
0.27	31.86	6.01	37.87	39.8	34.62	5.09	39.71	43.5
0.36	“	6.02	37.88	43.1	“	5.11	39.73	47.1
0.49	“	6.03	37.89	48.72	“	5.12	39.74	51.95
0.55	“	6.04	37.90	49.2	“	5.13	39.75	52.3

Tabella 2 - Massime tensioni di trazione (daN/cm²) all'intradosso della lastra rispettivamente per carico al centro e al bordo piastra.

(*) Ricavata in maniera approssimata utilizzando Westergaard con una riduzione del carico su ruota singola equivalente del 25% per tener conto della collaborazione tra le piastre.

(**) Ricavata in modo approssimato moltiplicando le tensioni a centro piastra calcolate con Eisemann per dei coefficienti desunti dal rapporto tra le tensioni di origine termiche a bordo e a centro piastra valutate secondo il Bradbury.

Nelle figure 2 e 3 sono riportate gli andamenti delle massime tensioni di trazione all'intradosso della piastra, rispettivamente a centro e a bordo piastra, ottenute col calcolo razionale rigoroso e quello approssimato in funzione dei gradienti termici considerati.

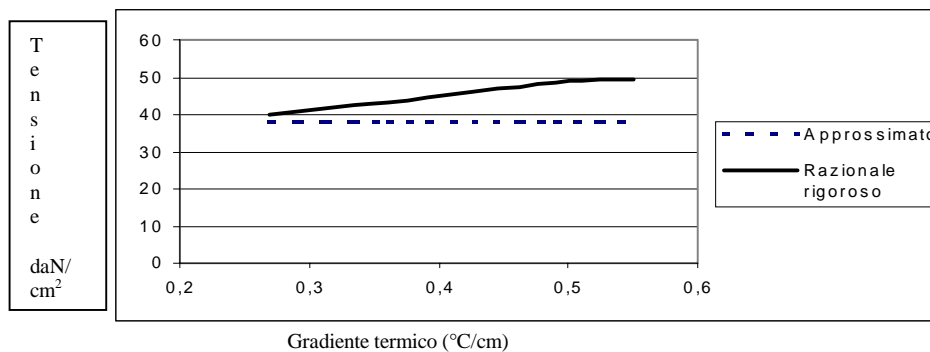


Figura 2- Massime tensioni di trazione (daN/cm²) all'intradosso della piastra per carico al centro in funzione del gradiente termico (°C/cm).

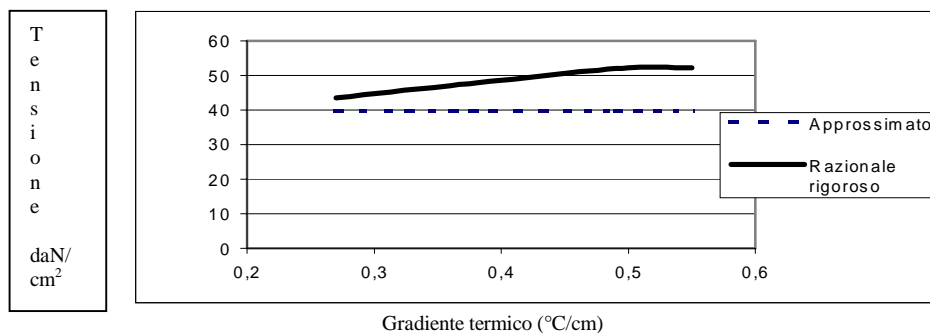


Figura 3- Massime tensioni di trazione (daN/cm²) all'intradosso della piastra per carico a bordo piastra in funzione del gradiente termico (°C/cm).

Esse mostrano che col calcolo razionale rigoroso si hanno tensioni sempre più forti di quelle del calcolo approssimato all'aumentare del gradiente termico. Ciò probabilmente è da attribuire al fatto che all'aumentare del gradiente, e a parità degli altri fattori che entrano in gioco nel dimensionamento, oltre ad avere tensioni da variazioni termiche maggiori di quelle ricavate col metodo approssimato (Eisemann fornisce sempre gli stessi valori indipendentemente dal gradiente termico, cfr. tab.5), col maggiore sollevamento della piastra si ha nel calcolo rigoroso che la risultante delle reazioni del terreno di supporto sulla piastra presenta un braccio maggiore di quello ottenibile col calcolo approssimato e quindi la sollecitazione flettente che si genera nella sezione di calcolo (centro piastra o sezione ortogonale al bordo) è più alta.

In pratica gli incrementi delle tensioni trovati sono sensibili e compresi tra circa il 5 e il 30 %.

Tali differenze risulteranno, molto probabilmente, molto più alte in termini di durata strutturale. Si pensi, per esempio, che nelle leggi di fatica che vengono generalmente utilizzate in campo stradale la relazione tra la tensione di esercizio cui è sollecitata la piastra in calcestruzzo e il numero di ripetizioni di carico sostenibile è di tipo esponenziale. Non è però ancora ben chiaro se tali leggi forniscono risultati sufficientemente attendibili anche in ambito aeroportuale.

3. PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE RINFORZATA CON GEOGRIGLIE

3.1 Metodologia di studio

La pavimentazione flessibile di tipo aeroportuale prescelta ha uno spessore complessivo di 70 cm. Essa è costituita da tre strati in conglomerato bituminoso di spessore 38 cm - in particolare da uno strato di usura da 5 cm, uno di collegamento anch'esso da 5 cm e una base di 28 cm - e da uno strato di fondazione in misto granulare non legato di 32 cm poggiante su un sottofondo con un modulo elastico dinamico di 700 daN/cm².

Nella schematizzazione agli elementi finiti la mesh ottimale della sovrastruttura è stata preliminarmente individuata confrontando in assenza di geogriglia, e con riferimento ad un determinato aereo di progetto, lo stato tenso-deformativo da esso fornito, per ciascuna condizione climatica considerata, con quello del multistrato elastico risolto col programma di calcolo BISAR. Definito il modello, si è previsto di svolgere i calcoli in presenza della geogriglia facendo cambiare la sua rigidità e posizione all'interno dello strato di base in conglomerato bituminoso. I calcoli sono stati svolti per tre diversi valori di rigidità della geogriglia, per quattro distinte posizioni della stessa all'interno dello strato di base e in quattro diverse condizioni climatiche.

L'entità dell'influenza delle geogriglie considerate e della loro posizione è stata valutata mettendo a confronto i valori delle tensioni e delle deformazioni ottenute risolvendo il modello agli elementi finiti in assenza e in presenza della geogriglia.

3.2 Modello

Il modello presenta dimensioni in pianta 5.2 *4.2 m. Tali dimensioni sono state individuate dopo aver verificato che lungo tali bordi le tensioni generate dalla gamba di forza dell'aereo di progetto, di cui in seguito si parla, sono trascurabili.

La pavimentazione è stata schematizzata con elementi tridimensionali ad 8 nodi di dimensioni molto fitte nelle aree di impronta delle ruote (2.5*2.5 cm) per poi diventare di dimensioni sempre maggiori allontanandosi da tali aree: 5*5cm, 10*10 cm ed infine 20*20 cm. Le altezze di tali elementi sono state assunte pari 1/2 dello spessore dello strato per quanto concerne l'usura e il binder, quindi uguali a 2.5 cm, mentre in merito alla base e alla fondazione sono stati assunti pari a 1 / 4 del loro spessore e cioè sono rispettivamente di 7 ed 8 cm.

Il sottofondo è stato rappresentato come un ulteriore strato dello spessore di 1.0m, profondità all'interno della quale si risentono ancora significativamente le sollecitazioni dovute ai carichi di traffico, sostenuto da appoggi fissi. La sua schematizzazione ha visto l'utilizzazione di elementi tridimensionali a 8 nodi di altezza pari a 25 cm.

La geogriglia è stata simulata con elementi monodimensionali dotati di sola rigidità estensionale (truss). Il modello finale è riportato in figura 4. Esso è costituito da 23380 elementi e 40107 nodi.

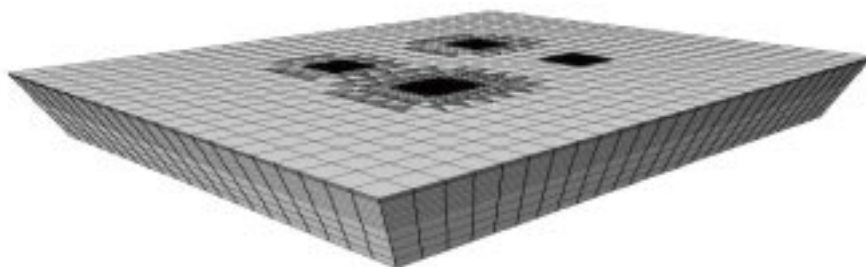


Figura 4 - Vista del modello della sovrastruttura flessibile studiata.

Caratterizzazione dei materiali

In tabella 3 sono riportati i valori assoluti del modulo complesso $|E^*|$ dei conglomerati costituenti la pavimentazione studiata in funzione della temperatura e della frequenza di carico degli aerei assunta pari a 4 Hz. In tabella sono anche contenuti i corrispondenti valori assoluti dei rapporti di Poisson $|\nu^*|$.

Temperature negli strati (°C)			Modulo complesso $ E^* $ (daN/cm ²)			$ \nu^* $
usura	Collegamento	base	Usura	Collegamento	base	
7.0	7.1	7.5	76000	77000	78000	0.36
17.8	17.7	17.4	28000	35000	41000	0.43
32.6	32.3	31.1	7400	8500	10000	0.49
20.5	20.3	19.9	23000	28000	33000	0.45

Tab.3- Caratteristiche dei conglomerati bituminosi considerati nel calcolo.

Per la fondazione e il sottofondo si è assunto un modulo dinamico rispettivamente di 2000 e 700 daN/cm² e un rapporto di Poisson rispettivamente di 0.45 e 0.35.

Analisi di carichi

L'aereo di progetto prescelto è un B-747 avente massa complessiva massima al decollo è di 3448 kN. Il suo carico massimo per gamba di forza, 808 kN che scarica su quattro ruote con pressione di gonfiaggio di 12.7 daN/cm², è stato utilizzato nei calcoli.

Rigidità delle geogriglie

Si sono considerate tre geogriglie aventi differente rigidità: due in poliestere con moduli elastici rispettivamente di $7.5 \cdot 10^4$ e $5 \cdot 10^5$ daN/cm² ed una in acciaio zincato avente ovviamente modulo di $2.1 \cdot 10^6$ daN/cm².

3.3 Analisi dei risultati

I calcoli sono stati innanzitutto svolti, con riferimento al carico massimo per gamba di forza sopra considerato, per i tre valori di rigidità della geogriglia detti e per una assegnata posizione della stessa all'interno dello strato di base al fine di individuare quella che ha una maggiore influenza.

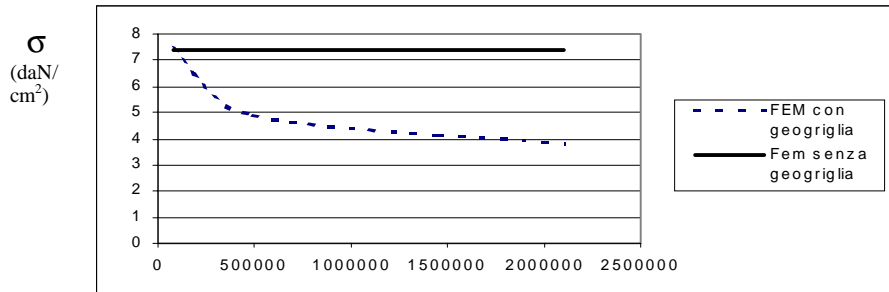
In tabella 4 sono riportati i valori delle tensioni e delle deformazioni orizzontali di trazione che si generano alla base dello strato di base della sovrastruttura studiata in funzione dei moduli della geogriglia, per una assegnata posizione della stessa (a 2 cm dalla base dello strato di base), con riferimento alle condizioni climatiche più basse e più alte considerate nello studio.

Condizione climatica di riferimento	Assenza di geogriglia		Geogriglia con $E=7.5 \cdot 10^4$ daN/cm ²		Geogriglia con $E=5 \cdot 10^5$ daN/cm ²		Geogriglia con $E=2.1 \cdot 10^6$ daN/cm ²	
	σ	ϵ	σ (daN/cm ²)	ϵ	σ (daN/cm ²)	ϵ	σ (daN/cm ²)	ϵ
Inverno	14.8	$1.27E^{-4}$	14.8	$1.26E^{-4}$	14.6	$1.25E^{-4}$	13.2	$1.14E^{-4}$
Estate	7.4	$5.08E^{-4}$	7.4	$5E^{-4}$	4.9	$4.68E^{-4}$	3.8	$3.25E^{-4}$

Tab.4- Tensioni e deformazioni di trazione alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso, per una assegnata posizione della geogriglia, in funzione del modulo della geogriglia nelle due condizioni climatiche estreme considerate.

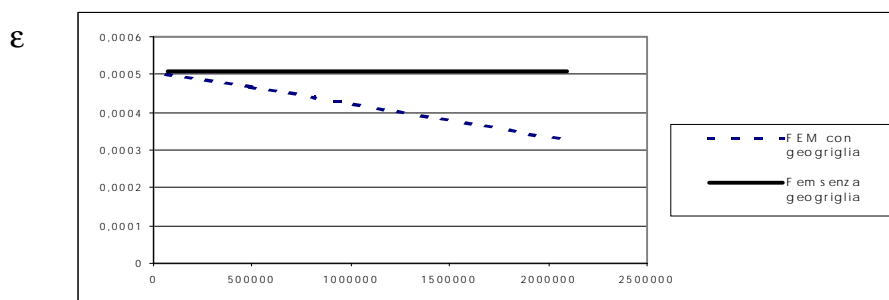
Si noti che l'incidenza maggiore si registra alle alte temperature di esercizio, cioè quando si hanno moduli dei conglomerati bituminosi più piccoli e quindi rigidità degli strati in cui sono utilizzati più bassi.

Con riferimento a tale periodo climatico, nelle figure 5 e 6 sono diagrammati i



Modulo della geogriglia

Figura 5 - Tensioni di trazione alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso alle alte temperature di esercizio, per una assegnata posizione della geogriglia (a 2 cm dall'intradosso della base), in funzione del modulo della geogriglia.



Modulo della geogriglia

Figura 6 - Deformazioni di trazione alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso alle alte temperature di esercizio, per una assegnata posizione della geogriglia (a 2 cm dall'intradosso della base), in funzione del modulo della geogriglia.

risultati ottenuti. Da queste figure si evince che all'aumentare del modulo della geogriglia si riduce l'entità dello stato tenso-deformativo alla base dello strato di base. L'influenza della geogriglia di basso modulo ($E = 7.5 \cdot 10^4$ daN/cm²) è in pratica nulla, mentre quella con un alto modulo (griglia in acciaio) gioca un ruolo rilevante.

In tabella 5 sono riportati, con riferimento alla geogriglia in acciaio, i valori delle tensioni che si riscontrano al variare della posizione della stessa all'interno dello strato di base con riferimento alle due condizioni climatiche estreme suddette.

Distanza tra la posizione Della geogriglia e l'intradosso dello strato di base (cm)	Geogriglia con $E=2.1 \cdot 10^6$ daN/cm ²			
	Inverno		Estate	
	σ (daN/cm ²)	ϵ	σ (daN/cm ²)	ϵ
2	13.2	1.14E-4	3.8	3.25E-4
4	13.5	1.16E-4	4.3	3.68E-4
6	13.7	1.19E-4	4.8	4.01E-4
10	13.9	1.2E-4	5.4	4.54E-4

Tabella 5- Tensioni e deformazioni di trazione alla base dello strato in conglomerato bituminoso, con riferimento alla griglia in acciaio, in funzione della posizione da essa assunta all'interno dello strato di base.

Nelle figure 7-10 sono diagrammati i risultati ottenuti.

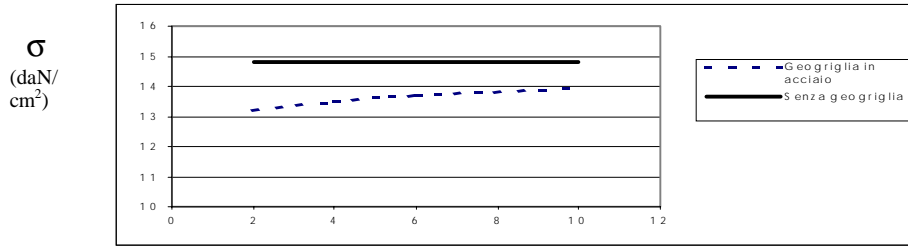


Figura 7 - Tensioni di trazione all'intradosso dello strato di base in conglomerato bituminoso alle basse temperature di esercizio, per la geogriglia in acciaio, in funzione della posizione della geogriglia stessa.

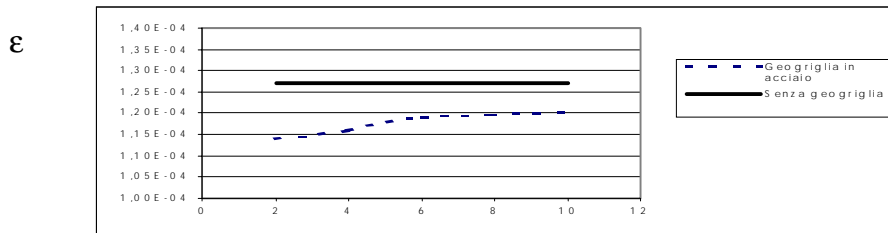


Figura 8 - Deformazioni di trazione all'intradosso dello strato di base in conglomerato bituminoso alle basse temperature di esercizio, per la geogriglia in acciaio, in funzione della posizione della geogriglia stessa

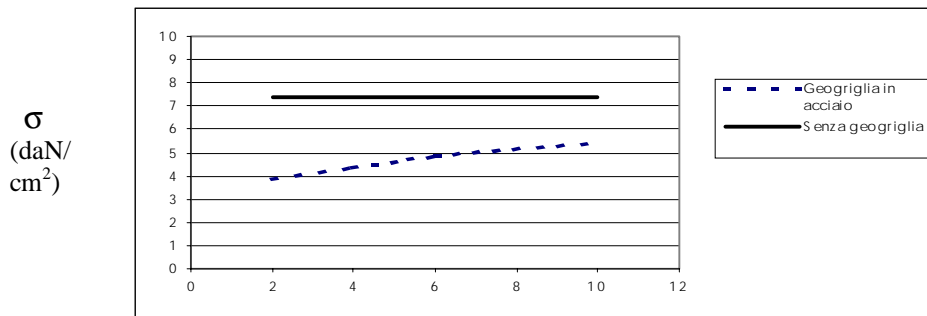


Figura 9 - Tensioni di trazione all'intradosso dello strato di base in conglomerato bituminoso alle alte temperature di esercizio, per la geogriglia in acciaio, in funzione della posizione della geogriglia stessa.

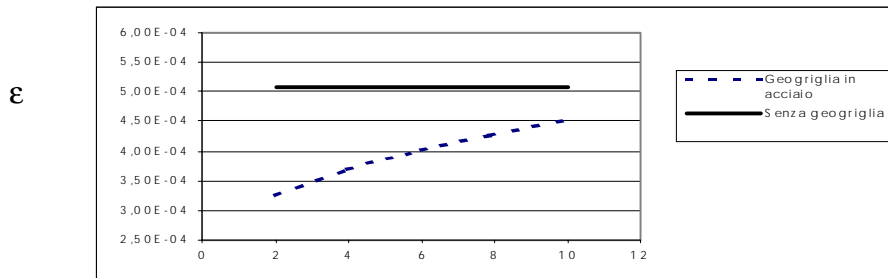


Figura 10 - Deformazioni di trazione all'intradosso dello strato di base in conglomerato bituminoso alle alte temperature di esercizio, per la geogriglia in acciaio, in funzione della posizione della geogriglia stessa.

Da tali figure si evince che all'aumentare della distanza della geogriglia in acciaio dalla base dello strato di base la riduzione dell'entità delle tensioni e delle deformazioni che si registrano all'intradosso di tale strato diventa sempre più contenuta. La posizione migliore appare essere quindi quella in cui la geogriglia è posizionata nella parte bassa dello strato base.

In realtà la posizione da assegnare ad una geogriglia all'interno di uno strato deve essere compatibile con la modalità di posa in opera per stese successive di tale strato. In genere si richiede per una singola stesa uno spessore di almeno $3/2$ del diametro massimo degli inerti. Pertanto tenendo conto delle dimensioni massime degli inerti del conglomerato per la base, lo spessore minimo di stesa risulta essere dell'ordine di 6 cm sul quale va posizionata la geogriglia detta. Per tale posizione si riscontra una riduzione delle tensioni compresa tra il 7 e il 35 % e per le deformazioni una diminuzione compresa tra circa il 5 e il 20%.

Una stima approssimata del numero di assi che causa la rottura per fatica della sovrastruttura studiata, effettuata utilizzando i risultati del calcolo e le ordinarie leggi di fatica, mostra che con la geogriglia in acciaio posizionata a 6 cm dall'intradosso della base si ha un numero di ripetizioni di carico sostenibili che è dell'ordine di 2 volte quello ottenuto in assenza di geogriglia. In verità il numero di ripetizioni di carico ammissibili è ancora più forte di quello stimato in quanto la geogriglia svolge anche la funzione di ritardare la risalita delle fessure. Una problematica che resta ancora aperta riguarda una più precisa valutazione dell'entità di tale contributo.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Si riportano di seguito le principali considerazioni conclusive che possono trarsi dal presente lavoro che ha interessato, in ambito aeroportuale, il calcolo razionale rigoroso di una tipica pavimentazione rigida a lastre e il suo confronto con i metodi approssimati, nonché lo studio di una pavimentazione flessibile rinforzata con geogriglie.

Col calcolo razionale rigoroso eseguito applicando contemporaneamente i carichi da traffico aereo e le variazioni termiche e tenendo conto della compartecipazione delle lastre e della perdita di supporto si ha nella lastra in calcestruzzo uno stato tensionale maggiore di quello che si ottiene col razionale approssimato che, come è noto, valuta separatamente le tensioni dovute ai carichi da quelle dovute alle variazioni termiche ed applica impropriamente il principio di sovrapposizione degli effetti in quanto il terreno di supporto costituisce un vincolo unilaterale non resistente a trazione.

Le differenze trovate in termini di entità delle tensioni aumentano al crescere del gradiente termico. Gli incrementi trovati sono compresi tra circa il 5 e il 30%. Le differenze trovate in termini di entità delle tensioni risulteranno, molto probabilmente, ancora più forti se si guarda alla durata strutturale. Si pensi, per esempio, che nelle leggi di fatica che vengono generalmente utilizzate in campo stradale la relazione tra la tensione di esercizio cui è sollecitata la piastra in calcestruzzo e il numero di ripetizioni di carico sostenibile è di tipo esponenziale. Non è però ancora ben chiaro se tali leggi forniscono risultati sufficientemente attendibili anche in ambito aeroportuale.

Per le considerazioni esposte è auspicabile che gli studi inerenti il calcolo razionale delle lastre in calcestruzzo in ambito aeroportuale si indirizzino di più sia verso una migliore valutazione delle tensioni, attualmente possibile per i supporti informatici sempre più evoluti, sia verso una più precisa valutazione della durata strutturale mediante prove a fatica e/o approcci teorici, il che oggi è più facile da realizzare grazie

ad attrezzature di laboratorio di tipo dinamico sempre più avanzate e/o a software di nuova generazione che consentono anche lo studio della meccanica della frattura.

Col calcolo razionale della sovrastruttura flessibile prescelta, effettuato in assenza ed in presenza di geogriglie di differente rigidità, si è trovato che le tensioni e le deformazioni che si generano alla base dello strato di base diminuiscono al crescere del modulo della geogriglia. L'influenza è in pratica trascurabile con le geogriglie di basso modulo elastico ($E = 7.510^4 \text{ daN/cm}^2$) mentre è rilevante con quelle in acciaio.

Si è inoltre trovato che all'aumentare della distanza della geogriglia dalla base dello strato di base la riduzione dell'entità delle tensioni e delle deformazioni diventa sempre più contenuta e quindi la sua efficacia è maggiore quando essa è ubicata nella parte bassa dello strato. Tenendo in conto le modalità di posa in opera per strati successivi del conglomerato bituminoso per strato di base, la posizione da assegnare alla geogriglia risulta essere quella che la vede posizionata a 6 cm dall'intradosso della base. Per tale posizione della geogriglia in acciaio si è trovata una riduzione delle tensioni compresa tra il 7 e il 35% ed una diminuzione delle deformazioni tra circa il 5 e il 20%.

Una problematica che resta ancora aperta è la valutazione dell'entità del contributo fornito dalla presenza della geogriglia nel ritardare la risalita delle fessure in superficie della sovrastruttura. Appare pertanto di interesse orientare di più la ricerca verso una più precisa valutazione di tale contributo mediante indagini sperimentali e/o lo studio del meccanismo di risalita delle fessure.

Bibliografia

Capitolo 2

- [1] Road Research Laboratory: "CONCRETE ROADS". Design and Construction". Her Majesty's Stationery Office. London 1995.
- [2] Barber, E.W.S. "Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports". Bull.168, HRB 1957.
- [3] S. Timoshenko, S.W.Krieger: "THEORY OF PLATES AND SHELLS". Mc Graw-Hill. New York 1959.
- [4] P. Giannattasio: "Il progetto delle pavimentazioni aeroportuali". Scuola di Specializzazione in Infrastrutture Aeronautiche. Lithorapid, Napoli 1981.
- [5] Yang H. Wang: "Pavement Analysis Design". Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [6] L. J.M. Houben: "Two-Dimensional Finite Element Analysis of Unreinforced Concrete Pavements". 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements. Siguenza, October 1995.
- [7] F.A.A. "Airport Pavement Design". Department of Transportation. Washington D.C. 1995.
- [8] K.D. Hjelmstad, J. Kim, Q.H.Zuo: "Finite Element Procedures for Three-Dimensional Pavement Analysis". Aircraft Pavement Technology. ASCE, 1997.
- [9] D.R.Brill, G. F. Hayhoe, X. Lee: "Three-Dimensional Finite Element Modeling of Rigid Pavement Structures". Aircraft Pavement Technology. ASCE, 1997
- [10] I.D. Parson, I.S. Eom, K.D.Hjelmstad: "Numerical Simulations of Load Transfer Between Doweled Pavement Slabs". Aircraft Pavement Technology. ASCE, 1997.

Capitolo 3

- [1] Barber, E.W.S. "Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports". Bull.168, HRB 1957.
- [2] P. Giannattasio: "Il progetto delle pavimentazioni aeroportuali". Scuola di Specializzazione in Infrastrutture Aeronautiche. Lithorapid, Napoli 1981.
- [3] Kunst, P.A.J.C., Kirschner R.: "Investigation on the Effectiveness of Synthetic Asphalt Reinforcements". Proceedings of the 2nd International RILEM Conference, 1993.
- [4] F.A.A. "Airport Pavement Design". Department of Transportation. Washington D.C. 1995.
- [5] E. Farinatti, G. Ferioli: "Geogriglie in poliestere nel rinforzo dei manti". Rivista Le Strade, luglio-agosto 1995.
- [6] S. Olivieri, S. Ucciardo, L.D. Russo, R. Roberti, R. Oliviero: "Ripristino con geosintetici di pavimentazioni della superstrada Firenze-Pisa-Livorno". IX Convegno Nazionale Geosintetici nelle costruzioni di terra. Bologna 1995.
- [7] Molenaar A.A.A., Nods M. "Design method for plain and geogrid reinforced overlays on cracked pavements". Proceedings of the 3rd International RILEM Conference, 1996.
- [8] J. Veys, N.V. Bekaert: "STEEL REINFORCEMENT FOR THE PREVENTION OF CRACKING AND RUTTING IN ASPHALT OVERLAYS". Proceedings of the 3rd International RILEM Conference, 1996.
- [9] G. Dondi: "Pavimentazioni flessibili con interstati sintetici". Quaderno AIPCR, Verona 1998.
- [10] A. Vanelstraete, D. Léonard, J. Veys: "STRUCTURAL DESIGN OF ROADS WITH STEEL REINFORCING NETTINGS". Belgian Road Research Centre.