

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Infrastrutture di trasporto



Analisi tenso - deformative di una pavimentazione rigida aeroportuale soggetta a carichi termici mensili, stagionali e giornalieri

Relatore

Prof. Ing. Federico Fiori

Laureanda:

Zanotti Maria Cristina Matricola 894297

Anno accademico 2018/19

Zanotti Maria Cristina: Analisi tenso-deformative di una pavimentazione rigida aeroportuale soggetta a carichi termici mensili, stagionali e giornalieri | Ingegneria Civile, Politecnico di Milano.

© Copyright Luglio 2019.

Politecnico di Milano

www.polimi.it

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

www.ingcat.polimi.it

*Qualunque cosa tu voglia fare o sognare di fare,
incominciala!
L'audacia ha in sé genio, potere e magia*

Johann Wolfgang Goethe

Ringraziamenti

*Desidero ringraziare innanzitutto il **prof. Ing. Federico Fiori**, relatore di questa tesi, per avermi sempre appoggiata in ogni scelta e per avermi sempre dedicato il suo prezioso tempo. Penso che uno dei motivi per cui ho chiesto di averLa come relatore sia dipeso proprio dal Suo modo di porsi nei confronti degli studenti sempre gentile e comprensivo. Grazie per avermi dato modo di concludere il mio percorso di studi con una tesi di questo tipo e per la fiducia che ha sempre riposto in me in questi mesi.*

*Ringrazio la mia **famiglia**, punto saldo per me per essermi stata vicina, per avermi capita e aiutata soprattutto in questo ultimo periodo. Grazie per tutto quello che mi avete insegnato e per la pazienza che avete sempre nei miei confronti, spero che siate un po' orgogliosi di me.*

*Ringrazio la società **Line spa**, per cui lavoro da quasi un anno per avermi sempre fatto sentire parte dell'azienda e non una semplice dipendente. Grazie per avermi dato modo di finire gli ultimi esami e per avermi seguita in questo percorso di apprendimento. Non avrei mai pensato che dalla candidatura per un tirocinio potesse nascere un rapporto di lavoro così solido. Un ringraziamento speciale alle persone con cui lavoro ogni giorno in special modo all'Ufficio Movimento e Pianificazione e ai Direttori aziendali per avermi dato piena fiducia in questi mesi.*

Abstract

Questo elaborato di tesi sperimentale ha come fine quello di studiare la caratterizzazione di una pavimentazione rigida aeroportuale soggetta a carichi termici mensili, stagionali e giornalieri.

Per la determinazione dei carichi termici sono state vagliate diverse ipotesi tra cui l'utilizzo di formule teoriche quali: Barber, Peyronne e la formula teorica sperimentale che associa queste ultime due risolvendo il problema della formula di Barber legato alla non considerazione delle ore comprese tra l'alba e il tramonto e viceversa; tale formula ha come autori Faraggi, Jofre e Kramer. Le formule teoriche elencate possono però essere legati a casi stagionali in quanto considerano dei parametri dipendenti da fattori stagionali. Tutte le formule sono state applicate andando a fissare il valore dello spessore e vedendo come la temperatura della pavimentazione varia nelle ore del giorno.

Per considerare come la pavimentazione si comporta a carichi termici giornalieri è stato sfruttato un articolo presente in letteratura di uno studio sperimentale in cui vengono calcolate le temperature giornaliere in funzione dello spessore della pavimentazione, tale studio è stato svolto presso l'università di Miami dagli autori: Zahidul Q.Siddique, Mustaque Hossain e Dave Meggers. In particolare essendo una pavimentazione abbastanza simile a quella presa come riferimento della FAA si sono poi applicati i carichi termici direttamente alla pavimentazione stessa.

Dato che questi carichi termici sarebbero dovuti poi essere associati ad un modello ad elementi finiti 3D sfruttando il programma Ansys, per determinare lo stato tensionale e deformativo, si è sfruttata la funzione di Analisi Transient Thermal per legare le temperature climatologiche alla pavimentazione. In particolare si sono analizzati tre casi di temperature derivanti dai dati climatologici e per ciascuno di esso si sono determinate 4 combinazioni di distribuzione di temperatura per determinare quale fosse la combinazione grado di fornire i risultati più simili alla realtà; la distribuzione che poi è stata presa in considerazione è pari alla distribuzione lineare di temperatura. I dati climatologici presi in considerazione sono riferiti alla stazione

metereologica di Milano Malpensa. In primo luogo infatti sono state considerati i tre casi riferiti a tale stazione e poi sono stati generalizzati.

Per la costruzione del modello si è sfruttato il programma ANSYS nella versione accademica scaricabile gratuitamente, l'unico limite di questo programma è dato dal numero massimo di nodi che possono essere utilizzati nella realizzazione della mesh. La pavimentazione che è stata presa come riferimento è dell'FAA con una semplificazione degli strati sottostanti la lastra in cls. Tale semplificazione è stata adottata in accordo con quanto riportato nell'elaborato di tesi: "Analisi tenso-deformativa di una pavimentazione rigida aeroportuale sottoposta a carichi di traffico" di Miriam Expósito Balastegui, con relatore il Prof. Ing. Federico Fiori.

Determinati tutte le tipologie di carichi termici giornalieri, mensili e stagionali e aver disegnato il modello in Ansys è stata utilizzata la funzione Analisi Transient Thermal per studiarne lo stato tensionale e deformativo.

L'elaborato di tesi è costituito da una introduzione alle sovrastrutture aeroportuali e stradali, successivamente nel Capitolo 1 si descrivono nel dettaglio le pavimentazioni aeroportuali sottolineando la differenza tra queste e le pavimentazioni stradali. Nel capitolo 2 vengono introdotte le pavimentazioni rigide mentre nel Capitolo 3 si sottolineano le caratteristiche e le proprietà delle pavimentazioni rigide aeroportuali. Il capitolo 4 è il cuore di questo elaborato di tesi in quanto vengono spiegati nel dettaglio i vari approcci utilizzati per la determinazione dei carichi termici e vi sono le applicazioni pratiche delle formulazioni teoriche, viene spiegato l'approccio tenuto per determinare i carichi termici utilizzando il modello Ansys mediante analisi transient thermal. Nel Capitolo 5 si descrive come si è costruito il modello Ansys basato su una pavimentazione aeroportuale rigida FAA e nel Capitolo 6 si descrivono le analisi transient strutturali di tutti i casi nominati in precedenza per determinare lo stato tensionale e deformativo. Infine nel capitolo 7 si riportano le conclusioni dedotte

Parole chiave

Pavimentazione rigida aeroportuale

Elementi finiti

Analisi temperature

Indice

RINGRAZIAMENTI	5
ABSTRACT.....	7
PAROLE CHIAVE	9
INTRODUZIONE ALLE SOVRASTRUTTURE	13
1- SOVRASTRUTTURE AEROPORTUALI.....	17
DIFFERENZE TRA LE PAVIMENTAZIONI RIGIDE E FLESSIBILI	22
2- PAVIMENTAZIONI RIGIDE.....	25
MODALITÀ COSTRUTTIVE DI UNA PAVIMENTAZIONE RIGIDA	28
DIFFERENZE TRA CAMPI DI APPLICAZIONE AEROPORTUALE E STRADALE	32
3- PAVIMENTAZIONI RIGIDE AEROPORTUALI.....	35
MODALITÀ COSTRUTTIVE DI UNA PAVIMENTAZIONE RIGIDA AEROPORTUALE.....	37
SPECIFICHE TECNICHE DEI MATERIALI DI UNA PAVIMENTAZIONE RIGIDA AEROPORTUALE	37
REQUISITI PAVIMENTAZIONE RIGIDA AEROPORTUALE	38
3.1 PROGETTAZIONE	39
<i>Dati di progetto per il dimensionamento.....</i>	<i>41</i>
4- DETERMINAZIONE CARICHI TERMICI	45
ANALISI TEMPERATURE CLIMATOLOGICHE	47
ANALISI TEMPERATURE REGistrate SULLA PAVIMENTAZIONE, FORMULAZIONI TEORICHE.....	49
ANALISI TEMPERATURE REGistrate SULLA PAVIMENTAZIONE, FORMULAZIONI TEORICHE AVANZATE.....	57
ANALISI TEMPERATURE REGistrate SULLA PAVIMENTAZIONE, DATI SPERIMENTALI	67
ANALISI TEMPERATURE REGistrate SULLA PAVIMENTAZIONE, MODELLO ANSYS- ANALISI TRANSIENT THERMAL	73
<i>Engineering data</i>	<i>78</i>
<i>Analysis settings</i>	<i>81</i>
<i>Calibrazione del modello, relazione modello-realtà: calcolo degli spostamenti.....</i>	<i>95</i>
<i>Andamento termico: dati input caso 1 analisi transient thermal.....</i>	<i>96</i>
<i>Andamento termico: dati output caso 1 analisi transient thermal.....</i>	<i>100</i>
<i>Andamento termico: dati input caso 2 analisi transient thermal.....</i>	<i>103</i>
<i>Andamento termico: dati output caso 2 analisi transient thermal.....</i>	<i>106</i>
<i>Andamento termico: dati output temperatura costante pari a 33°</i>	<i>109</i>
<i>Risultati calibrazione</i>	<i>112</i>
DETERMINAZIONE CASISTICHE DI STUDIO	114
5- MODELLAZIONE DI UNA PAVIMENTAZIONE RIGIDA AEROPORTUALE	117
PROVE ALLA BASE DEL MODELLO	119
4.1 PAVIMENTAZIONI DI RIFERIMENTO FAA	120
<i>Materiali</i>	<i>122</i>
<i>P501 PCC MIX</i>	<i>123</i>
<i>STRATO EQUIVALENTE.....</i>	<i>126</i>
<i>ACCIAIO.....</i>	<i>128</i>
4.2 MODELLAZIONE CON ANSYS	128
<i>Definizione della geometria.....</i>	<i>129</i>
<i>Definizione dei materiali.....</i>	<i>132</i>
<i>Definizione dei carichi dati dal peso proprio.....</i>	<i>135</i>

<i>Definizione delle connessioni, piani di simmetria, condizioni al contorno e sistema di coordinate globali</i>	136
<i>Definizione della Mesh</i>	136
6- ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL	139
<i>Analysis settings</i>	141
<i>Initial conditions</i>	142
DEFINIZIONE DEI CASI OGGETTO DI STUDIO	143
MODELLO ANSYS: CASI MENSILI E STAGIONALE	144
CASO 1- 30°C: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL	144
<i>Risultati dello studio tensionale</i>	145
<i>Risultati dello studio deformativo</i>	148
CASO 2- 40°C: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL	150
<i>Risultati dello studio tensionale</i>	151
<i>Risultati dello studio deformativo</i>	153
CASO 3- 50°C: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL	154
<i>Risultati dello studio tensionale</i>	155
<i>Risultati dello studio deformativo</i>	157
CONFRONTO CASI 30,40,50°C DETERMINATI CON MODELLO ANSYS	158
MODELLO FARAGGI, JOFRE E KRAMER: CASO STAGIONALE	162
<i>Risultati dello studio tensionale</i>	166
<i>Risultati dello studio deformativo</i>	168
ARTICOLO SIDDIQUE, HOSSAIN E MEGGERS: CASO GIORNALIERO	171
VARIAZIONE DI TEMPERATURA GIORNALIERA: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL	171
<i>Determinazione temperature utilizzate</i>	171
<i>Determinazione modello utilizzato</i>	174
<i>Determinazione casistiche di studio</i>	176
<i>Risultati dello studio tensionale</i>	177
<i>Risultati dello studio deformativo</i>	178
<i>Risultati dello studio tensionale</i>	181
<i>Risultati dello studio deformativo</i>	184
CONFRONTO CASI STAGIONALI E GIORNALIERI.....	185
7- CONCLUSIONI	193
BIBLIOGRAFIA	199
INDICE DELLE FIGURE	203
INDICE DELLE TABELLE	205

Introduzione alle sovrastrutture

Le prime sovrastrutture stradali in Italia risalgono all'epoca degli antichi Romani, grazie alla loro alta ingegneria gettarono le basi per la costruzione delle strade comprendendo anche la scelta dei tracciati da seguire e dei materiali da utilizzare.

All'epoca la costruzione della strada iniziava con lo scavo di due trincee poco profonde e parallele fra loro (sulci) che definivano la larghezza prescelta per la strada.

Come riportato nei "*Brevi appunti di edilizia romana*" a cura di Enrico Ciabatti [1], il terreno incoerente fra i due sulci veniva poi rimosso e lo scavo proseguiva fino a raggiungere un livello di terreno stabile, sul quale impostare opportunamente la pavimentazione.

Quest'ultima era composta da quattro strati diversi:

- lo *statumen*, corrispondente all'attuale fondazione, in pietre di dimensioni tali da poter essere movimentate a mano;
- la *runderatio*, o base, costituita da aggregato lapideo frantumato, legato con calce;
- il *nucleus*, composto di aggregato più piccolo del precedente, che costituiva il letto di posa del *pavimentum*;
- *pavimentum*, o strato di usura. Il *pavimentum* delle strade principali era realizzato con i basoli, grandi pietre aventi superficie piatta e forma a cuneo, in modo da penetrare solidamente nel terreno.

Le strade pavimentate con i basoli venivano chiamate *viae lapidibus stratae* ed erano in genere le vie più importanti. Su di esse era possibile viaggiare rapidamente.

Le strade secondarie *viae glareatae stratae* erano costruite, per quanto riguarda gli strati di fondazione e di base, con la medesima tecnica delle precedenti, mentre la pavimentazione superiore in basoli era sostituita da ghiaia compattata, chiamata *summa crusta*, opportunamente sagomata per il drenaggio delle acque piovane.

Un terzo tipo di strada, la cosiddetta *viae terraneae*, era caratterizzato dall'assenza di pavimentazione ed era probabilmente realizzata semplicemente compattando la terra naturale presente in situ.

Da questa prima introduzione si deduce che la schematizzazione costruttiva della sovrastruttura, soprattutto se si pensa alle *viae lapidibus stratae*, sia rimasta la stessa ma

mediante la ricerca si sono introdotti ed utilizzati materiali con un livello di prestazioni maggiori. Infatti all'inizio del XIX secolo, fece la sua comparsa in ambito costruttivo il catrame; le strade iniziarono a essere pavimentate con questa tecnica. Le prime miscele con catrame in situ furono estese in alcune strade di Londra e Madrid. Successivamente, negli Stati Uniti vennero utilizzate miscele fabbricate da rocce asfaltiche e asfalti naturali. Anche negli Stati Uniti furono costruite pavimentazioni rigide poiché avevano la necessità di strade percorribili per il trasporto di massa.

Successivamente grazie allo sviluppo dell'industria petrolifera fece la sua comparsa il bitume. Tuttavia, lo sviluppo tecnologico di questi materiali si verificò solo durante la Seconda Grande Guerra a causa della urgente necessità di costruzione delle piste aeroportuali militari.

I materiali in uso oggi tendono ad acquisire livelli di prestazioni sempre maggiori perché sfruttano sempre più le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche.

È rimasta invariata la tecnologia delle pavimentazioni ad elementi modulari, in pietra o in masselli di calcestruzzo, questi conservano invariata la struttura inventata dai Romani

1- Sovrastrutture aeroportuali

Le sovrastrutture aeroportuali rivestono un ruolo importante in quanto garantiscono l'operatività dell'aeroporto. In genere si può affermare che le sovrastrutture, chiamate anche pavimentazioni, assolvano tre compiti, ovvero:

- Costituire una struttura stabile nel tempo e poco deformabile in grado di sopportare i carichi ripetuti applicati dai carrelli degli aeromobili,
- Garantire la sicurezza della circolazione in relazione ai problemi di aderenza pneumatico-pavimentazione,
- Trasferire il carico al piano di posa compatibilmente con la portanza di quest'ultimo.

Si può inoltre affermare che una sovrastruttura aeroportuale debba essere regolare, impermeabile e che debba garantire condizioni di durabilità nel tempo.

Le pavimentazioni sono costituite da una successione di strati sovrapposti di materiali con caratteristiche fisiche e meccaniche differenti.

Nel campo aeroportuale, le pavimentazioni possono essere:

- Flessibili
- Rigide
- Semirigide.

Le pavimentazioni *flessibili* sono costituite da una serie di strati che, partendo dallo strato superficiale, può così essere schematizzata, Figura 1:

- Manto di conglomerato bituminoso composto da due strati, usura e binder,
- Base in conglomerato bituminoso,
- Fondazione in misto granulare
- Sottofondo costituito dal terreno naturale o dallo strato più superficiale del terreno di rilevato

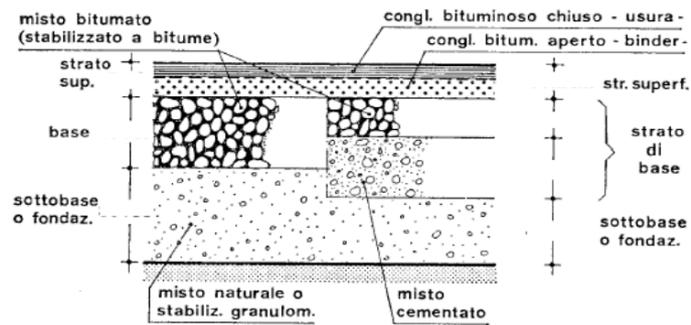


Figura 1: Pavimentazione flessibile

Le pavimentazioni **rigide** sono costituite da una serie di strati identica a quella delle flessibili, ma lo strato di base è legato con cemento, Figura 2.

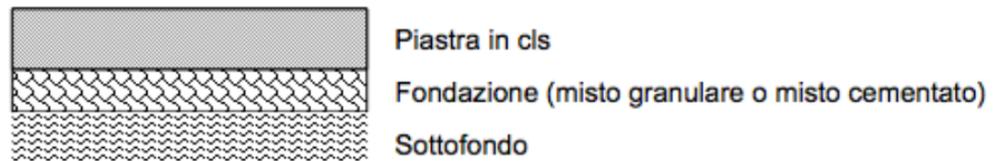


Figura 2: Pavimentazione rigida

Infine, le pavimentazioni **semirigide** sono costituite da una lastra in calcestruzzo posata su uno o più strati di fondazione in misto cementato e/o misto granulare o direttamente sul terreno di sottofondo.

Nel campo delle pavimentazioni in generale, esistono invece anche altre tipologie:

- Pavimentazioni **composite polifunzionali**: sono formate dall'unione dello strato di usura in conglomerato bituminoso di una pavimentazione flessibile posata sopra una lastra in calcestruzzo
- Pavimentazioni **modulari**: formate da elementi in pietra naturale o manufatti (in laterizio, calcestruzzo, etc) poggiati su un letto di sabbia o malta cementizia, uno strato di base e uno di fondazione.

A volte, possono essere presenti altri strati nelle pavimentazioni con funzioni specifiche come:

- Strato anticapillare: strato interposto tra la fondazione e il terreno di sottofondo allo scopo di interrompere l'eventuale risalita capillare di acqua proveniente dal sottofondo,
- Strato antigelo: strato interposto tra fondazione e sottofondo allo scopo di impedire che l'acqua atmosferica presente nella superficie della pavimentazione raggiunga un sottofondo gelivo,
- Drenante: strato interposto a convenienza tra due strati di una pavimentazione allo scopo di raccogliere e smaltire le acque che possono essere presenti in una pavimentazione, come le acque di falda o le acque di infiltrazione.
- Geotessile: materiale interposto tra fondazione e sottofondo allo scopo di evitare la contaminazione del materiale di fondazione.

Altro aspetto molto importante è il dimensionamento della pavimentazione che deve necessariamente tenere in conto, come riportato nell'approfondimento tratto dal manuale *"Pavimentazioni stradali, approfondimenti sulle pavimentazioni in calcestruzzo: un modello per confrontare i costi di primo impianto e manutenzione"*, pubblicato da Federbeton [2]: di queste condizioni:

- 1) Non omogeneità delle caratteristiche degli aerei: diversità del peso, della disposizione delle ruote, della pressione di gonfiaggio,
- 2) Per uno stesso aereo vi è una diversità del carico in relazione alle condizioni operative: decollo, atterraggio, limitazioni di carico,
- 3) La pista è sollecitata in maniera differente lungo la sua lunghezza.
- 4) La pista è diversamente sollecitata lungo la sezione trasversale per effetto della canalizzazione del traffico.

Ai fini del dimensionamento [2] diventa utile distinguere due zone importanti: zona critica e zona non critica. La **zona critica** è la zona dell'airside nella quale la portanza alare è nulla e il carico dell'aereo si scarica completamente sulla pavimentazione, per esempio zone di questo tipo sono le vie di rullaggio, i piazzali di sosta, le aree di attesa e le testate delle piste di volo. Le **zone non critiche** sono invece zone dell'airside nelle quali, intervenendo la portanza alare, il carico

dell'aereo si scarica parzialmente sulla pavimentazione per esempio si può pensare alle piste di volo e alle vie di uscita rapida.

In generale viene calcolato lo spessore della pavimentazione per le zone critiche e si attribuisce una aliquota di tale spessore alla pavimentazione di zone non critiche.

È molto importante un buon dimensionamento delle pavimentazioni perché ciò riduce gli interventi di manutenzione e aumenta la vita utile dell'intera infrastruttura.

Differenze tra le pavimentazioni rigide e flessibili

La differenza tra queste due tipologie di pavimentazioni è data dal meccanismo di trasferimento del carico sovrastante al terreno naturale.

Nelle pavimentazioni rigide, il carico è ripartito nel terreno coinvolgendo non solo l'area di carico ma anche una zona esterna ad essa abbastanza significativa; quindi la zona in cui il carico è ripartito risulta essere più estesa.

Nelle pavimentazioni flessibili il carico viene trasmesso al sottofondo mediante una serie di strati di rigidità decrescente verso il sottofondo, cioè il carico si trasmette in maniera graduale, si veda la Figura 3.

Si può inoltre aggiungere che le pavimentazioni rigide siano, a differenza delle flessibili, più fragili ma forniscono prestazioni più elevate; infatti hanno un migliore meccanismo di ripartizione del carico, elevata resistenza ai carichi, bassa suscettività termica, elevata durabilità. Inoltre, le pavimentazioni rigide sono più sensibili alle variazioni di portanza del sottofondo, quindi anche con modeste riduzioni di portanza possono riportare dei danneggiamenti gravi.

Un'altra importante differenza è legata al costo di costruzione. Le pavimentazioni rigide hanno un costo molto più elevato di quelle flessibili, compensata però dall'averne un'elevata sicurezza e dal richiedere una minore manutenzione.

Se ne deduce quindi che la scelta tra queste due pavimentazioni sia dipendente dalle proprietà del sottosuolo, dalle condizioni di traffico e dagli effetti ambientali a cui sarà sottoposta durante la sua vita.

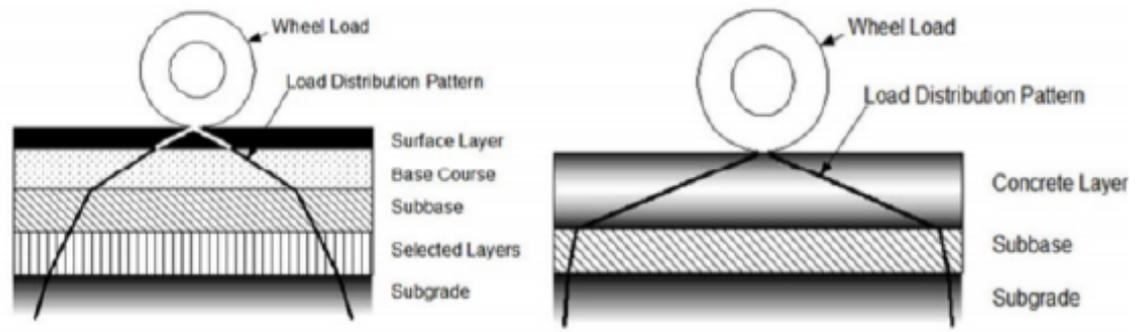


Figura 3: Meccanismo di trasferimento del carico. A sinistra pavimentazione flessibile, a destra pavimentazione rigida

2- Pavimentazioni rigide

In questo capitolo si andrà a sottolineare la composizione di una pavimentazione rigida soffermandosi sui giunti. Successivamente si vedranno i campi di impiego di questa tipologia di pavimentazione sottolineando le differenze tra il campo aeroportuale e stradale e in ultimo si descriveranno sinteticamente le modalità costruttive. Si è voluto dedicare un paragrafo alle sole pavimentazioni rigide in quanto oggetto di studio di questo elaborato di tesi.

Le pavimentazioni rigide vengono impiegate in ambito stradale, aeroportuale ed industriale. In particolare:

- Nell'ambito stradale: Autostrade e strade a grande traffico, viabilità secondaria, parcheggi, marciapiedi.
- Nell'ambito aeroportuale: Piazzali di sosta e piste.
- Nell'ambito industriale: Parcheggi, marciapiedi, pavimentazione dei magazzini.

Le pavimentazioni rigide, come già detto, sono costituite dalla sovrapposizione di una lastra in calcestruzzo con uno o più strati di fondazione legata o non legata. Le lastre in calcestruzzo possono essere armate o non armate.

In senso longitudinale invece tra le lastre in calcestruzzo si formano dei giunti. I giunti rivestono un ruolo di primaria importanza per la durabilità della pavimentazione e possono essere classificati in base a:

- Posizione
- Funzione

In base alla **posizione** esistono i giunti longitudinali e trasversali a seconda che siano nel senso di avanzamento del veicolo o nel senso ortogonale.

In base alla **funzione** i giunti possono essere distinti in:

- Giunto di costruzione: necessario quando il posizionamento delle due lastre limitrofe avviene in momenti temporali differenti, si realizzano quando si arresta il getto
- Giunto di contrazione e dilatazione: necessario al fine di fornire una fessurazione controllata alla pavimentazione quando questa si dilata o contrae a causa della diminuzione o aumento del contenuto di umidità o dell'aumento o diminuzione della temperatura.
- Giunto di isolamento: necessario per isolare la sovrastruttura quando si ha un cambio di pavimentazione o quando ci sono pavimentazioni che si intersecano.

I giunti hanno un ruolo primario nell'assicurare il trasferimento degli sforzi. Tra i giunti vengono realizzati dei meccanismi di compartecipazione delle lastre per permettere una collaborazione lavorativa e di trasferimento di carico tra le lastre.

La compartecipazione delle lastre avviene attraverso due meccanismi:

- Ingranamento – incastro tra gli aggregati: questa metodologia risulta efficiente per lastre con uno spessore inferiore ai 20 cm. Gli aggregati devono essere scelti in base alla qualità, forma e dimensione.
- Armatura: barre di trasferimento e compartecipazione

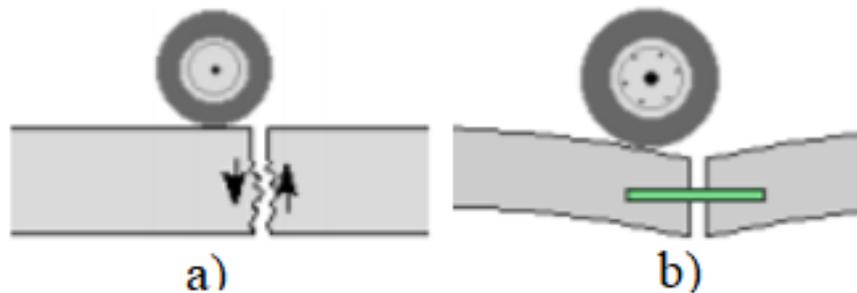


Figura 4: Meccanismi di trasferimento del carico tra le lastre

a) ingranamento b) barre d'armatura

Modalità costruttive di una pavimentazione rigida

Nelle pavimentazioni rigide, si possono distinguere 6 tipologie costruttive diverse:

- Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP): utilizza giunti di contrazione per controllare la fessurazione e non utilizza acciaio di rinforzo. La spaziatura trasversale tra i giunti è selezionata in modo tale che le sollecitazioni di temperatura e umidità non producano fessure intermedie tra i giunti. In genere, ciò comporta una spaziatura non superiore a circa 7,5 m. Le barre di compartecipazione (“Dowel bars”) sono tipicamente utilizzate nei giunti trasversali per agevolare il trasferimento del carico. Le barre di legatura (“Tie

bars”) sono generalmente utilizzate nelle giunzioni longitudinali, dove non si devono trasferire gli sforzi dovuti al carico veicolare.

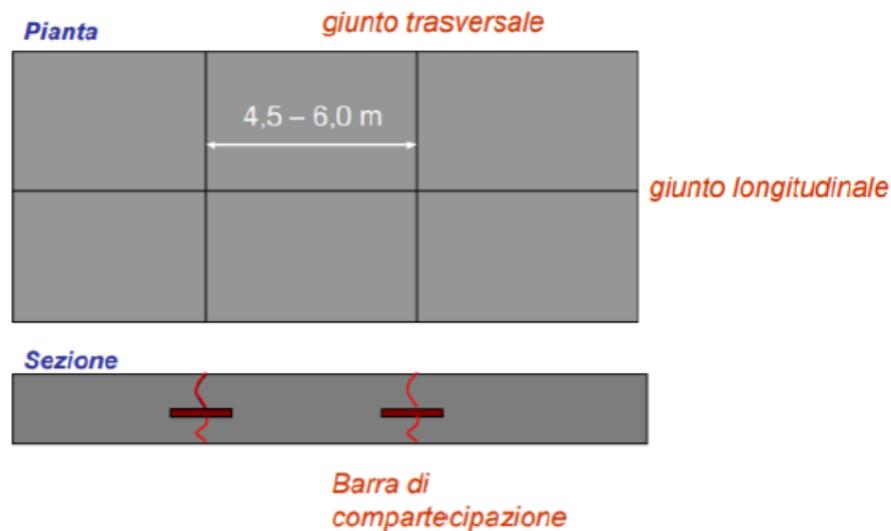


Figura 5: Jointed Plain Concrete Pavement

- **Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP):** utilizza giunti di Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP): utilizza giunti di contrazione e armatura di rinforzo per controllare le fessurazioni. La spaziatura trasversale tra i giunti è più lunga di quella per JPCP e varia tipicamente da circa 10 m a 20 m. Si prevede che le tensioni a causa di temperatura e umidità provocheranno il cracking tra i giunti, quindi acciaio di rinforzo o una maglia di acciaio viene utilizzata per tenere insieme queste fessure. Barre di compartecipazione sono tipicamente inserite nei giunti trasversali per facilitare il trasferimento del carico tra le lastre mentre il rinforzo in acciaio aiuta il trasferimento del carico attraverso le fessure.

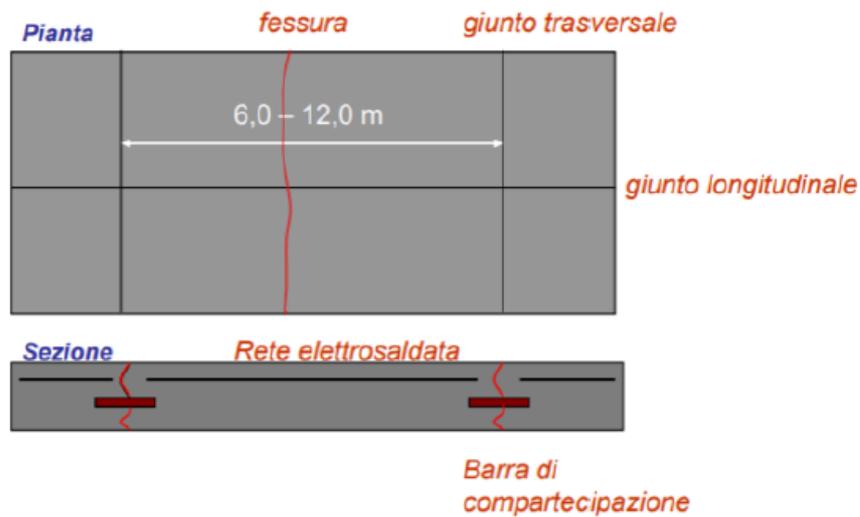


Figura 6: Jointed Reinforced Concrete Pavement

- **Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP):** è una pavimentazione in calcestruzzo unica in quanto non ha giunti di contrazione trasversali dovuto all'uso di un rinforzo longitudinale in acciaio. Detto rinforzo viene utilizzato per controllare la spaziatura delle fessure trasversali sottili che si formano nella pavimentazione (ogni 0,6 – 3 m) e l'apertura di queste e per mantenere elevati livelli di trasferimento del carico attraverso di loro. Il vantaggio principale di questa tipologia di pavimentazione è la mancanza di giunti trasversali che sono difficili da costruire, sono fonte di entrata di materiale esterno e richiedono manutenzione.

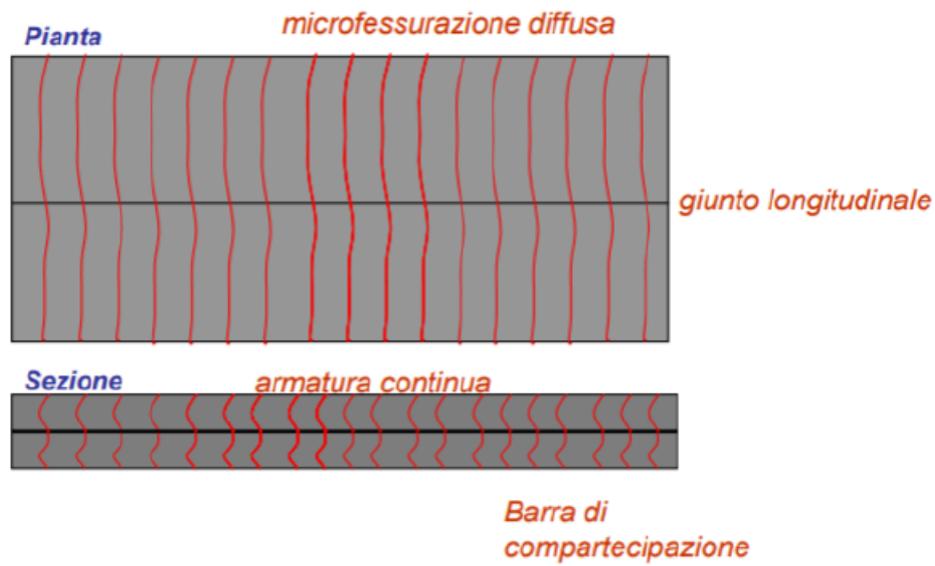


Figura 7: Continuously Reinforced Concrete Pavement

Esistono inoltre altre tre modalità costruttive:

- *Cast-In-Place Prestressed Concrete Pavement (CIP-PCP)*
- *Jointed Precast Concrete Pavement (JPrCP)*: sono pavimentazioni prefabbricate.
- *Prestressed Precast Concrete Pavement (PPCP)*: sono pavimentazioni prefabbricate.

Differenze tra campi di applicazione aeroportuale e stradale

Il campo aeroportuale e stradale si differenziano a causa dei differenti **carichi applicati** e per la **geometria del carico**.

In ambito stradale i carichi massimi non possono superare le 12 tonnellate per asse singolo; in ambito aeroportuale possono arrivare alle 90 tonnellate. Le pressioni di gonfiaggio in ambito aeroportuale sono comprese tra 14 e 20 bar invece in ambito stradale sono molto più basse e sono comprese tra i 2 e 6 bar.

Altro aspetto molto importante è dato dalla geometria del carico, i carrelli aerei hanno diverse configurazioni a seconda della tipologia di aereo che si differenziano dalla configurazione delle ruote di un veicolo stradale.

A seguito delle differenze dei carichi, gli spessori delle pavimentazioni sono quindi differenti. Lo spessore delle pavimentazioni aeroportuali è quindi senza dubbio superiore a quello delle pavimentazioni stradali per sopperire a carichi molto più elevati.

Altri aspetti interessanti che differenziano i due ambiti di progettazioni sono dati dalla velocità massima di percorrenza e dal volume di traffico.

La **velocità massima di percorrenza** in ambito aeroportuale può arrivare, nella fase di rodaggio, anche a superare i 300 km/h; invece in ambito stradale la velocità massima consentita è di 130 km/h. Analizzando invece il **volume di traffico** si può constatare che il numero dei carichi applicati per unità di tempo è maggiore nel settore stradale rispetto a quello aeroportuale.

Per quanto riguarda gli sforzi di taglio si può notare come questi siano maggiori in ambito aeroportuale proprio perchè legati a maggiori sollecitazioni e velocità più elevate; diventa quindi essenziale prestare attenzione ad un'ottima adesione tra gli strati di una pavimentazione flessibile soprattutto nelle aree di giro e frenatura.

Si può dedurre quindi che le differenze siano sostanzialmente legate alle diverse tipologie di carichi. Per quanto riguarda una pavimentazione stradale è importante conoscere il numero di

applicazioni di carico nella vita utile mentre invece nella progettazione aeroportuale serve determinare e conoscere le caratteristiche dell'aereo critico.

3- Pavimentazioni rigide aeroportuali

In questo capitolo si analizzeranno nel dettaglio le pavimentazioni rigide aeroportuali ed in particolare le modalità costruttive e le specifiche tecniche circa i materiali.

Si vuole comunque precisare che per la progettazione di una pavimentazione aeroportuale vi è la possibilità di realizzazione mediante pavimentazioni flessibili nelle quali, al posto dello strato della lastra in cls delle pavimentazioni rigide, è previsto uno strato di usura. Le specifiche tecniche dello strato di usura prevedono l'uso dell'Hot-Mix Asphalt (HMA) e del P-401/P-403. Un'altra possibilità costruttiva è data dalle pavimentazioni composite costituite da una pavimentazione rigida con una copertura in conglomerato bituminoso.

Modalità costruttive di una pavimentazione rigida aeroportuale

Tra le modalità costruttive citate a *pagina 11* del **Capitolo 2 Pavimentazioni rigide**, quelle utilizzate per le pavimentazioni aeroportuali sono:

- Jointed plain concrete pavement (JPCP);
- Pavimentazioni in calcestruzzo precompresso (CIP-PCP);
- Pavimentazioni in calcestruzzo prefabbricato (JPrCP e PPCP);
- Pavimentazioni in calcestruzzo rinforzato (JRCP);
- Pavimentazioni in calcestruzzo continuo (CRCP), in maniera più limitata alle altre

Specifiche tecniche dei materiali di una pavimentazione rigida aeroportuale

Analizzando del dettaglio come è costituita una pavimentazione rigida aeroportuale si possono mettere in luce i materiali costituenti. Come già detto nel **Capitolo 1 Sovrastrutture**, le pavimentazioni rigide sono costituite dalla sovrapposizione di tre strati:

- Piastra in cls
- Fondazione
- Sottofondo

Per quanto riguarda la **piastra in calcestruzzo** la specifica tecnica del materiale di riferimento è data dal Cemento Portland (PCC) E P-501.

Per quanto riguarda la **fondazione**, questa è costituita da un primo strato di base che può essere stabilizzato o non stabilizzato.

- Le basi non stabilizzate sono costituite da aggregati frantumati e non frantumati. In questo caso le specifiche tecniche prevedono l'uso del P-209, P-208, P-211
- Le basi stabilizzate sono costituite da aggregati frantumati e non frantumati stabilizzati con cemento o asfalto. In questo caso le specifiche tecniche prevedono l'uso del P-401/P-403, P-304, P-306.

Il secondo strato della fondazione può essere costituito da materiale granulare stabilizzato o non stabilizzato. In questo caso le specifiche tecniche prevedono l'uso del P-154, P-301, P-219.

Per quanto riguarda il **sottofondo**, questo può essere costituito da terreno naturale o modificato e in questo caso le specifiche tecniche prevedono l'uso del P-152, P-155, P-157 e P-158.

Tutte le specifiche tecniche citate sono state estratte dall'AC 150/5320-6f, FAA [13], se ne riporta ora in Tabella 1 un riassunto schematico.

Tabella 1: Specifiche tecniche AC 150/5320-6F, FAA- pavimentazione rigida aeroportuale

Strato	Specifica tecnica
Piastra in calcestruzzo	P-501
Fondazione:	
○ Base non stabilizzata	P-209, P-208, P,211
○ Base stabilizzata	P-401/P-403, P-304, P-306
○ Sottobase	P-154, P-301, P-219
Sottofondo	P-152, P-155, P-157, P-158

Requisiti pavimentazione rigida aeroportuale

Le pavimentazioni devono rispettare i seguenti requisiti:

- Stabilità: serve per garantire la resistenza all'azione abrasiva del traffico, alle condizioni metereologiche e agli altri fattori di deterioramento.
- Superficie liscia
- Resistenza allo slittamento
- Assenza di detriti o di altre particelle che possano bruciarsi o sollevarsi mediante il getto d'aria in uscita dagli aerei.

Nel capitolo precedente si sono messe in luce le particolarità costruttive legate all'ambito aeroportuale circa i carichi e le velocità massime di percorrenza che fanno sì di dover costruire una pavimentazione con uno spessore maggiore rispetto alla pavimentazione stradale. Questi due aspetti insieme ad altri fattori possono, se non controllati, influenzare i requisiti sopra citati.

Si riporta di seguito un elenco completo dei fattori che devono essere sempre tenuti sotto controllo in fase di progettazione e anche durante la vita utile della sovrastruttura.

- Caratteristiche dei carichi applicati, spiegati nel dettaglio nel capitolo precedente;
- Velocità massima di percorrenza, spiegata nel dettaglio nel capitolo precedente;
- Caratteristiche del sottofondo, ovvero del terreno naturale su cui si poggia la sovrastruttura;
- Caratteristiche degli strati della pavimentazione, in particolare ponendo attenzione allo strato superficiale, base e sottobase;
- Clima, in particolare il cambiamento di temperature stagionali comporta una differente reazione nella pavimentazione stessa.

3.1 PROGETTAZIONE

Dopo aver introdotto le specifiche tecniche dei materiali si passa ora a descrivere la progettazione vera e propria della sovrastruttura che comprende la determinazione degli spessori degli strati della pavimentazione. Come già anticipato gli spessori dipendono dai fattori sopracitati e quindi il processo di progettazione coinvolge molte variabili interagenti anche difficili da quantificare.

Come per i materiali, anche la progettazione deve rispettare delle specifiche tecniche. In particolare ci sono due organizzazioni differenti a seconda di dove viene costruita la pavimentazione aeroportuale.

La prima organizzazione è l'ICAO, International Civil Aviation Administration, questa è un'agenzia delle Nazioni Unite istituita dopo la Convenzione di Chicago del 1947. Stabilisce gli standard internazionali nel settore dell'aviazione e ad oggi conta 191 Stati membri.

La seconda organizzazione è la FAA Federal Aviation Administration, già citata circa le specifiche tecniche dei materiali in una pavimentazione rigida. Questa è un'autorità aeronautica degli Stati Uniti d'America, ha il compito di redigere i regolamenti federali sull'aviazione che sono vincolanti nelle operazioni di volo negli Stati Uniti.

Per la progettazione si seguiranno ancora le specifiche tecniche della FAA la quale ha sviluppato un insieme di tecniche che riguarda la progettazione e la costruzione delle pavimentazioni aeroportuali.

La progettazione della FAA si è evoluta nel tempo, all'inizio era basata su procedimenti classici di calcolo e disegno i quali utilizzavano la teoria di Westergaard per l'analisi tensionale delle lastre in cls con una distinzione in base al peso degli aerei che dovevano transitarci; maggiori o minori ai 13608 kg. Questa distinzione ad oggi non viene più fatta grazie all'uso di un programma denominato **FAARFIELD** acronimo di FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design che si basa sull'utilizzo di due metodi di calcolo differenti dai metodi classici. Per quanto riguarda una pavimentazione flessibile il metodo utilizzato è analisi elastica stratificata, la quale utilizza la deformazione verticale massima nella parte posteriore del sottofondo e la sollecitazione orizzontale massima nella parte inferiore dello strato di usura per determinare la vita strutturale.

Per quanto riguarda le pavimentazioni rigide, oggetto di studio di questo elaborato di tesi, la procedura di riferimento è *l'analisi tridimensionale agli elementi finiti*. In particolare viene utilizzata la sollecitazione orizzontale massima nella parte inferiore della lastra di calcestruzzo per prevedere la vita strutturale della pavimentazione. La sollecitazione orizzontale massima è determinata considerando sia il bordo della lastra in PCC che le condizioni di carico interno. Il programma fornisce quindi lo spessore richiesto della lastra per sopportare un determinato mix di traffico aerei. Il procedimento FAARFIELD è utilizzato attualmente per il dimensionamento della pavimentazione aeroportuale.

Dati di progetto per il dimensionamento

Il dimensionamento di una pavimentazione aeroportuale ed in generale una pavimentazione generica, richiede che vengano studiati e analizzati molti fattori. Di seguito verranno analizzati i fattori determinanti per un buon dimensionamento di una pavimentazione aeroportuale.

a) Caratteristiche di resistenza del sottofondo

La capacità di carico del sottosuolo è rilevante per conoscere la resistenza e le prestazioni dell'intera pavimentazione.

È quindi di notevole importanza cercare di aumentare la capacità portante del terreno del sottosuolo per incrementare la capacità portante della pavimentazione; infatti, nel caso di una buona capacità portante nel sottofondo, si possono ridurre gli spessori della pavimentazione con un notevole risparmio economico senza intaccare la qualità dei materiali.

b) Condizioni ambientali

Le condizioni ambientali sono strettamente legate ai dati di temperatura e piovosità. Le temperature servono per determinare le sollecitazioni igrometriche e la variazione di comportamento meccanico dei materiali in termini di sforzi-deformazioni. I dati legati alla piovosità servono invece per valutare e progettare i sistemi di drenaggio e per stimare l'umidità del sottofondo al fine di determinare le caratteristiche di portanza.

Nelle fasi di getto, indurimento e maturazione delle pavimentazioni bisogna prestare particolare attenzione al vento, sole, pioggia e gelo. Diventa quindi essenziale conoscere le condizioni metereologiche prima di iniziare le fasi di costruzione.

Le condizioni ambientali saranno oggetto di particolare attenzione in questo elaborato di tesi; si considereranno sia le condizioni iniziali di temperatura sia come questa sia differente nei vari strati della pavimentazione.

c) Carichi di traffico

In ambito aeroportuale si è definito come sia importante determinare il numero dei carichi effettivi e dei movimenti che vengono compiuti dagli aeromobili durante la vita utile. Per determinare i carichi di traffico bisogna considerare:

- *Distribuzione del carico dell'aeromobile sui carrelli*, questa dipende dalla posizione del baricentro dell'aereo. Il carico che grava sul terreno di appoggio può essere così determinato:

$$G_2 = \frac{G \cdot L_1}{L_1 + L_2}$$

in cui:

il rapporto $\frac{L_1}{L_1 + L_2}$ viene normalmente posto pari ad un valore compreso tra 0,90 e 0,95;

così

facendo è possibile dimensionare la pavimentazione considerando solamente il carrello principale di atterraggio.

Di seguito viene riportato in figura un dettaglio della distribuzione del carico di un aeromobile sui carrelli di atterraggio.

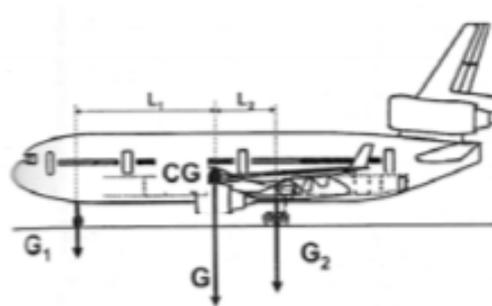


Figura 8: Particolare aeromobile per la determinazione del carico sui carrelli

- *Numero di ripetizioni di carico in ogni zona dell'aeroporto*, questo fattore viene determinato mediante l'utilizzo del grado di dispersione delle traiettorie. Questo ultimo dipende dalla larghezza della pavimentazione, dalla velocità e dalla deviazione standard.
- *Impronta della ruota sulla pavimentazione*, per semplificare il dimensionamento delle pavimentazioni si considerano le ruote come circolari. Questa approssimazione può essere fatta perché non comporta differenze nello studio tenso - deformativo della pavimentazione.

Il dimensionamento di una pavimentazione aeroportuale viene effettuato basandosi sulla determinazione dell'aereo critico ovvero l'aereo più gravoso in termini di sforzi agenti sulla pavimentazione tra tutti gli aerei che utilizzano tale pavimentazione in termini di frequenza.

Operativamente si tratta di rapportare la ripetizione di tutti i carichi a un numero di passaggi dell'aereo critico utilizzando dei coefficienti di equivalenza e fattori di conversione.

I *coefficienti di equivalenza* possono essere determinati come rapporto tra la capacità strutturale utilizzata da un determinato aereo i e l'aereo critico, ovvero:

$$F_i = \frac{d_i}{d_c}$$

in cui:

- F_i : coefficiente di equivalenza
- d_i : capacità strutturale utilizzata per ogni passaggio dell'aereo i
- d_c : capacità strutturale utilizzata per ogni passaggio dell'aereo critico

Un metodo alternativo per il calcolo dei coefficienti è sviluppato dall'FAA; i valori dipendono dalla tipologia di carrelli. Nella Tabella seguente verranno riportati i fattori di conversione e nelle due colonne precedenti le tipologie di carrello.

Tabella 2: Tabella fattori di conversione-metodo FAA

Conversione da :	Convertito in:	Fattore di conversione
Ruota singola	Ruote gemelle	0,8
Ruota singola	Doppio tandem	0,5
Ruote gemelle	Doppio tandem	0,6
Doppio tandem a ruote gemelle	Doppio tandem	1,0
Doppio tandem	Ruota singola	2,0
Doppio tandem	Ruote gemelle	1,7
Ruote gemelle	Ruota singola	1,3
Doppio tandem a ruote gemelle	Ruote gemelle	1,7

Il passaggio ultimo per il dimensionamento è determinare il traffico equivalente all'aereo di progetto utilizzando la seguente equazione:

$$\log N_1 = \log N_2 \cdot \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$$

in cui:

- N_1 : numero di decolli dell'aereo di progetto,
- N_2 : numero di decolli dell'aereo considerato,
- Q_1 : carico per ruota dell'aereo di progetto,
- Q_2 : carico per ruota dell'aereo considerato.

d) Caratteristiche dei materiali

Le caratteristiche dei materiali scelti determinano le risposte della pavimentazione alle varie sollecitazioni; è importante quindi scegliere con attenzione le caratteristiche dei materiali.

4- Determinazione carichi termici

Nel prossimo capitolo verranno definiti nel dettaglio le metodologie di calcolo per la determinazione dei carichi termici. Verranno riprese di seguito tutte le formulazioni ed articoli presenti in letteratura circa il calcolo delle temperature per determinare così i carichi termici da applicare al modello oggetto di studio.

Il comportamento di una pavimentazione aeroportuale, così come si può ben immaginare, cambia in funzione delle temperature. Ci sono delle differenze di comportamento nella pavimentazione tra il giorno e la notte, tra i mesi e tra le diverse stagioni.

In particolare si deve sottolineare che la temperatura climatologica esterna non ha nulla a che vedere con la temperatura registrata all'interno della pavimentazione. Si riporta, giusto per chiarezza e per una meglio comprensione della frase sopra scritta, l'analisi delle temperature climatologiche. Si anticipa già che le temperature climatologiche non sono funzione della profondità della pavimentazione, parametro rilevante per l'applicazione delle temperature come carichi termici ma sono legate ad altri parametri, quali: temperatura media e precipitazioni, numeri di giorni di pioggia, temperature massime registrate suddivise per mesi, quantità di precipitazioni e velocità del vento.

Analisi temperature climatologiche

Per capire meglio la differenza tra le temperature climatologiche esterne e le temperature registrate sulla pavimentazione, si riporta di seguito l'estrapolazione fatta dalla banca dati di temperature climatiche relativa all'ultimo trentennio della stazione meteorologica sita a Milano Malpensa. In particolare i dati sono stati ottenuti accedendo al portale "Meteoblue", *Banca dati stazioni meteorologiche d'Italia*, questo si occupa dal 2007, come citato nella descrizione del portale [3], di archiviare i dati meteorologici.

All'interno della banca dati si possono avere dati storici risalenti fino al 1985; come citato nella presentazione del portale, *'I dati derivano dal nostro modello meteorologico globale NEMS a circa 30 km di risoluzione e non può riprodurre in dettaglio effetti atmosferici locali come le isole di calore, correnti d'aria fredda, temporali o tornado ma riproduce con precisione le variazioni di temperatura'*.

In particolare dalla banca dati della stazione meteorologica è possibile scaricare i seguenti dati:

- Temperature medie e precipitazioni,
- Numero di giorni di pioggia, nuvolosi e soleggiati,
- Temperature massime registrate suddivise in mesi,

- Quantità di precipitazioni,
- Velocità del vento

In Figura 9 si riportano i risultati scaricabili dal portale relativi alla media delle temperature climatiche giornaliere relative al trentennio 1971-2000.

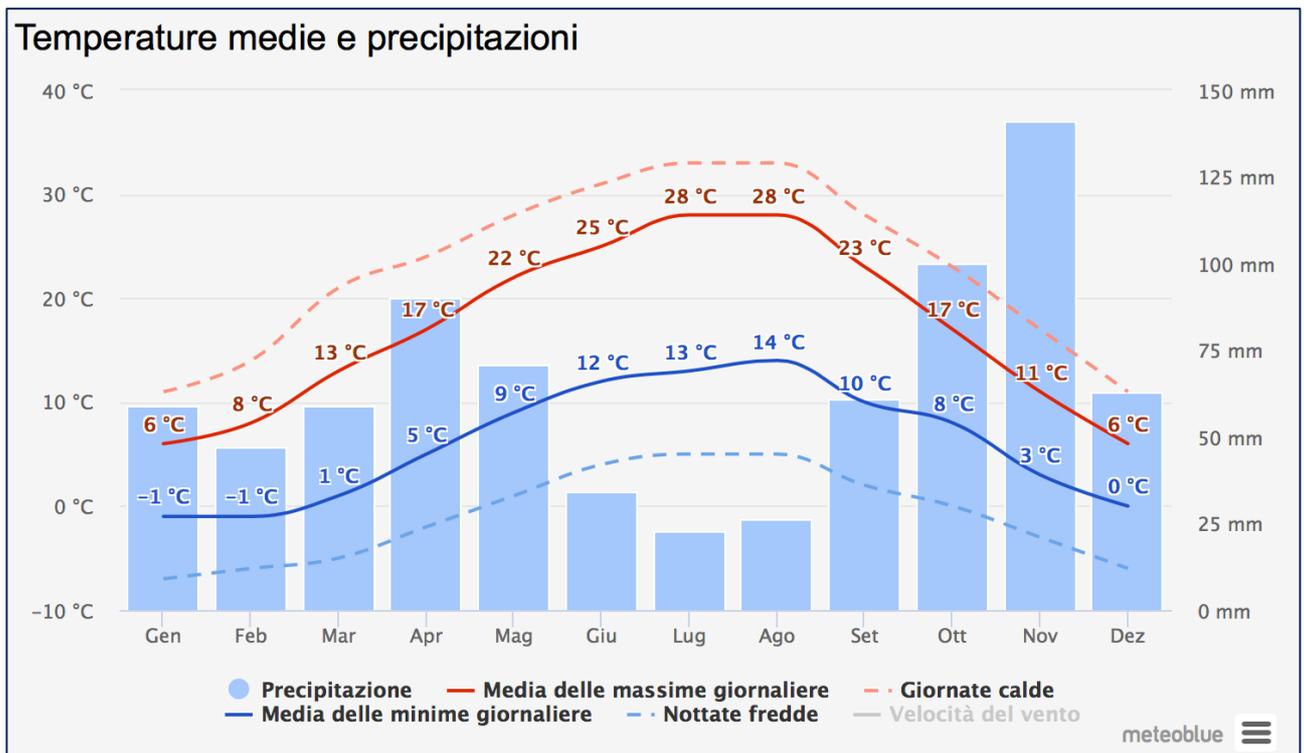


Figura 9: Risultati dalla stazione metereologica relativa all'aeroporto di Milano Malpensa relativi alle temperature giornaliere

Come si nota dalla figura soprariportata e come spiegato nel portale, La "media delle massime giornaliere" (linea rossa continua) mostra la temperatura massima di una giornata tipo per ogni mese nella stazione dell'aeroporto di Milano-Malpensa. Allo stesso modo, la "media delle minime giornaliere" (linea continua blu) indica la temperatura minima media.

I dati sono riferiti al trentennio 1971-2000 in quanto i dati più recenti erano disponibili solo a pagamento.

In conclusione dal grafico non è possibile conoscere come varia la temperatura in funzione della profondità della pavimentazione e il legame tra le temperature climatologiche e la temperatura

registrata sulla pavimentazione; per questo non saranno utilizzati all'interno dell'elaborato di tesi.

Analisi temperature registrate sulla pavimentazione, formulazioni teoriche

Dato il grosso limite legato all'analisi delle temperature climatologiche si è cercato in letteratura una metodologia di calcolo delle temperature funzione della profondità della pavimentazione o che determinasse le temperature registrate sulla pavimentazione.

Si introduce che per il calcolo della deformata termica si terrà in conto, per sovrapposizione di effetti, della deformazione indotta dal peso proprio della pavimentazione; questo tenderà a riportare le lastre nella condizione indeformata. Per fare ciò nel modello della pavimentazione, che verrà introdotto nel prossimo capitolo, verrà aggiunta la voce "peso proprio".

Il modello di Barber propone, come riportato nella tesi: "Modello di analisi strutturale, funzionale ed economica di pavimentazioni stradali in calcestruzzo", redatta da Ing. Laura Moretti con relatore la prof.ssa Ing. Paola di Mascio [4], una soluzione all'equazione del bilancio energetico basata sulla teoria generale della conduzione del calore in un corpo solido semi-indefinito con superficie orizzontale a contatto con l'aria. Tale formula è funzione della temperatura esterna dell'aria, della velocità del vento, dell'irraggiamento solare e delle proprietà termiche del materiale. La formulazione di Barber esprime la temperatura della pavimentazione come funzione di un generico istante t in un generico punto del corpo solido, z .

Di seguito si riporta la formula di Barber e si spiegano i vari parametri citati e se ne propone l'applicazione in due diversi spessori.

La formula proposta da Barber è la seguente:

$$T_{pav}(x,t) = T_m + R + \left(\frac{A_g}{2} + 3 \cdot R \right) \cdot F \cdot e^{-C \cdot x} \cdot \text{sen} \left(0.262 \cdot t - C \cdot x - \text{arctg} \left(\frac{C}{C + H} \right) \right)$$

in cui:

- T_m : temperatura media stagionale [$^{\circ}\text{C}$]
- R: contributo medio giornaliero della radiazione solare alla temperatura effettiva dell'ara espresso in $^{\circ}\text{C}$
- A_g : escursione media giornaliera [$^{\circ}\text{C}$]
- C: costante, funzione di: s,w,k
- H: costante, funzione di h_c e w
- b: coefficiente adimensionale di assorbimento della superficie della radiazione solare
- h_c : coefficiente di trasmissione termica espresso in $\text{Kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dipendete dalla velocità del vento espressa in m/s
- F: coefficiente che tiene in conto del coefficiente di trasmissione termica h, della conduttività termica k espressa e dalla diffusività d del calcestruzzo
- s: calore specifico, espresso in $\text{kCal/kg }^{\circ}\text{C}$
- w: densità del calcestruzzo in kg/m^3

In particolare si riportano le temperature medie stagionali, le escursioni medie giornaliere delle stesse stagioni riprese dalle *dispense del Corso di Tecnica delle pavimentazioni a cura dell'Ing. Toraldo* [5] necessarie per la determinazione della temperatura della pavimentazione utilizzando il modello Barber.

Di seguito si riportano, in Tabella 3, i dati riferiti all'Italia Settentrionale, in particolare: temperatura media stagionale, escursione media giornaliera, radiazione solare totale giornaliera e velocità media del vento. I dati sono ripresi dal Corso di Tecnica delle pavimentazioni a cura dell'Ing. Toraldo [5], in particolare la tabella sottoriportata è ripresa dallo studio di "Di Mascio e Domenichini", datato 1995 [6]:

Tabella 3: Dati riferiti all'Italia Settentrionale, ripresi dallo studio di "Di Mascio e Domenichini" anno 1995

Table 1 : Sample of climatic data for central Italy (Di Mascio and Domenichini 1995).

SEASON	Average air temperature T_m [°C]	Average daily variation in the air temperature A_g [°C]	Average daily radiation I [kCal / gg]	Average wind speed v [m/sec]
Winter	3÷5	5÷7	2718	13÷18
Spring	11÷13	8÷10	5785	12÷19
Summer	22÷24	10÷12	6507	9÷15
Autumn	13÷15	7÷9	3547	11÷17

Con il modello Barber si può quindi affermare che la temperatura della pavimentazione è funzione dello spessore della pavimentazione z e dell'istante di tempo t .

Per quanto concerne i parametri utilizzati nella formula, questi tengono in considerazione dei fattori funzione delle temperature medie stagionali ed escursioni medie giornaliere stagionali.

Si riporta di seguito la determinazione dei parametri della formula di Barber tenendo in conto le due stagioni limite: inverno ed estate.

Si riportano di seguito i dati di interesse dedotti dalla Tabella 3 e i relativi valori mediati:

T_m Temperatura media stagionale [°C]:

- inverno: 3-5 °C -> 4°C
- estate: 22:24°C -> 23°C

A_g Escursioni medie giornaliere [°C]:

- inverno: 5-7°C -> 6°C
- estate: 10-12°C ->11°C

V Velocità del vento [m/s]

- inverno 13-18 ->15m/s
- estate 11-17 -> 14m/s

I Radiazione solare giornaliera [kcal/gg]

- inverno 2718
- estate 6507

Sempre dalle dispense del Corso di Tecnica delle pavimentazioni [5], si riporta l'analisi dei dati necessari e relativi range utilizzabili:

- b : 0,60

- $s: 0,193-0,22 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \rightarrow 0,20 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$
- $k: 1,04-1,96 \text{ kcal/ore m } ^\circ\text{C} \rightarrow 1,50 \text{ kcal/ore m } ^\circ\text{C}$
- $w = 1800 \text{ kg/m}^3$

Calcolando i valori di:

$$- h_c = 4,882 * (1,3 + 0,4332 * V^{\frac{3}{4}}) = 22,06 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

in cui: V, velocità del vento, è preso pari alla media tra i valori inverno ed estate ovvero 14,5 m/s

$$- R = \frac{2}{3} * \frac{b}{24} * \frac{l}{h_c} = 3,50$$

in cui il valore l è preso come media tra i valori di inverno ed estate, pari a 4612 kcal/gg.

$$- H = h_c/k = 14,70 [1/\text{m}]$$

$$- C = \sqrt{\frac{0,131 * s * w}{k}} = 1,46 [1/\text{m}]$$

$$- F = \frac{H}{\sqrt{H+C^2+C^2}} = 3,37$$

Si riporta di seguito un calcolo esemplificativo della temperatura con il modello Barber, utilizzando i parametri appena calcolati, nel caso invernale ed estivo. Le temperature sono calcolate al di sotto della lastra in cls, di ipotetico spessore 40 cm. Di seguito i risultati ottenuti:

Stagione Inverno

Nella tabella seguente, si riportano i dati del caso invernale. La tabella riporta le ore del giorno e la temperatura della pavimentazione ottenuta dall'applicazione del modello di Barber.

Tabella 4: Applicazione modello di Barber- inverno

Ore del giorno [h]	T PAVIMENTAZIONE [°C]
0	8,14
1	8,18
2	8,33
3	8,60
4	9,00
5	9,53

6	10,17
7	10,89
8	11,66
9	12,40
10	13,04
11	13,49
12	13,70
13	13,62
14	13,27
15	12,70
16	11,99
17	11,22
18	10,47
19	9,79
20	9,22
21	8,76
22	8,43
23	8,23
24	8,14

Utilizzando i dati in Tabella 4 si può ottenere un grafico di variazione della temperatura sulla pavimentazione in funzione delle ore del giorno, si ricorda che lo spessore è stato definito come parametro fisso.

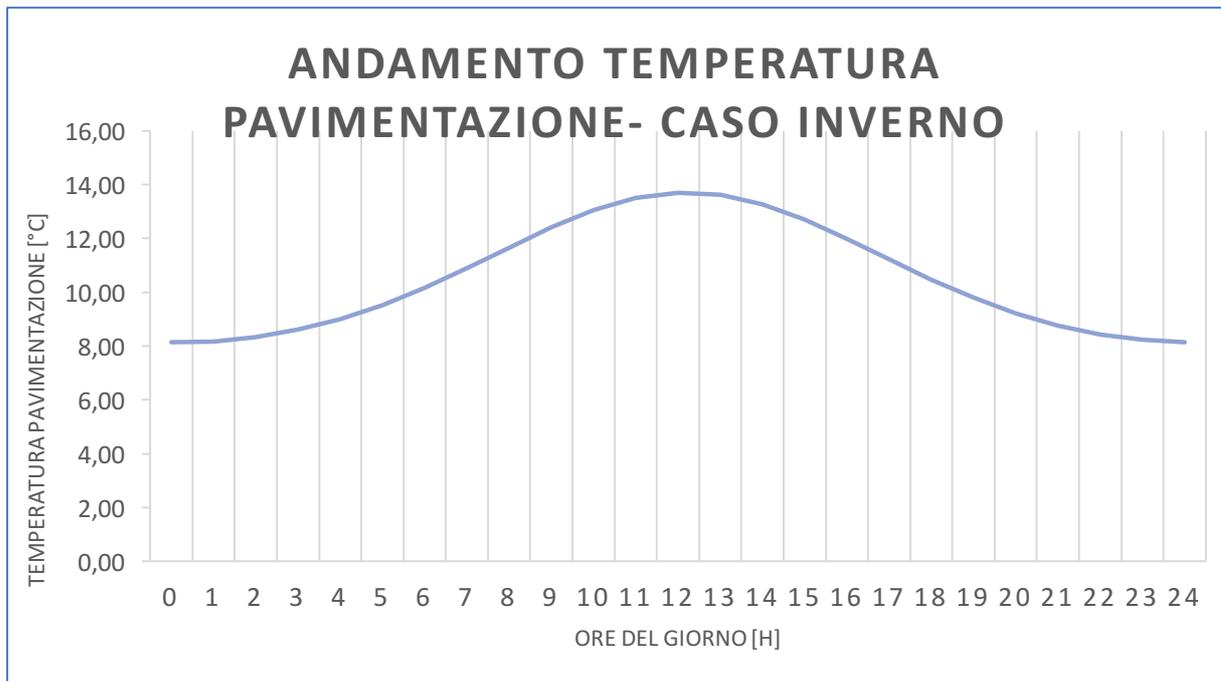


Figura 10: Andamento temperatura pavimentazione, modello Barber- caso inverno

Come si nota in Figura 10 la temperatura giornaliera della pavimentazione ha l'aspetto simile ad una sinusoide in accordo con quanto ci si sarebbe aspettati dalla formula Barber.

Stagione Estate

Nella tabella seguente, si riportano i dati del caso estivo. La tabella riporta le ore del giorno e la temperatura della pavimentazione ottenuta dall'applicazione del modello di Barber.

Tabella 5: Applicazione modello di Barber- estate

Ore del giorno [h]	T _{PAVIMENTAZIONE} [°C]
0	30,54
1	31,27
2	32,28
3	33,60
4	35,20
5	37,03
6	38,94
7	40,75
8	42,22
9	43,13

10	43,32
11	42,76
12	41,54
13	39,88
14	37,99
15	36,10
16	34,38
17	32,91
18	31,74
19	30,87
20	30,29
21	29,98
22	29,91
23	30,10
24	30,56

Utilizzando i dati in Tabella 5 si può ottenere un grafico di variazione della temperatura sulla pavimentazione in funzione delle ore del giorno, si ricorda che lo spessore è stato definito come parametro fisso.

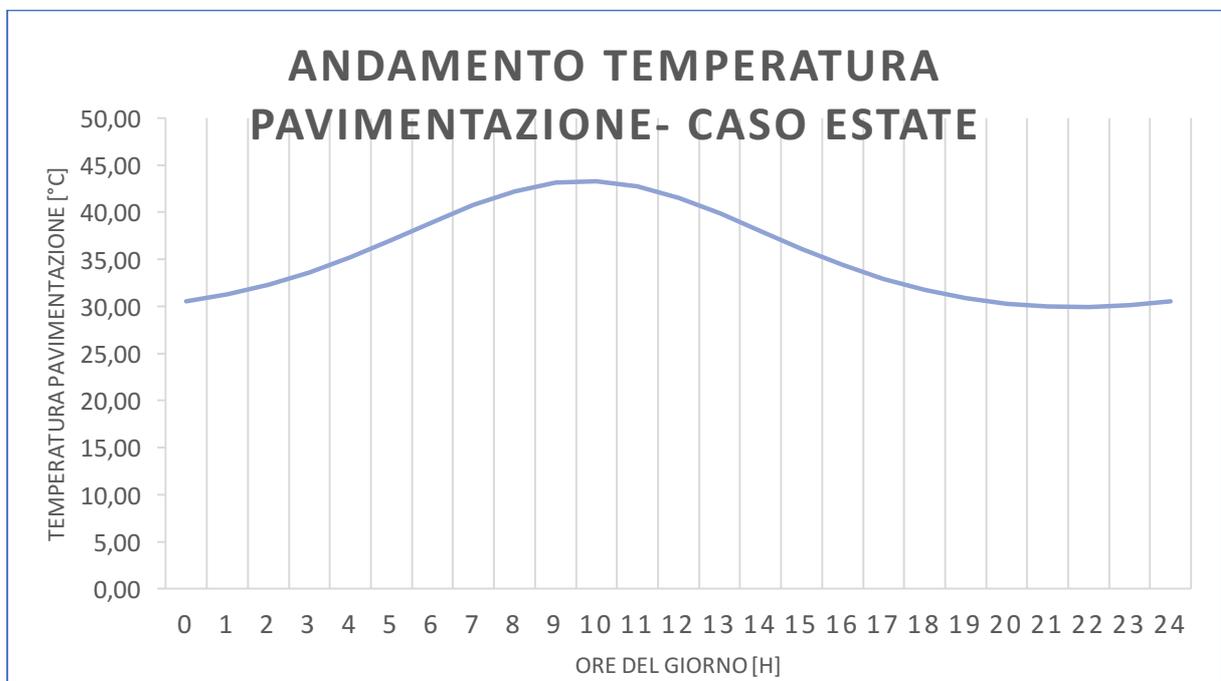


Figura 11: Andamento temperatura pavimentazione, modello Barber- caso estate

Come si nota in Figura 11 la temperatura giornaliera della pavimentazione ha l'aspetto simile ad una sinusoide in accordo con quanto ci si sarebbe aspettati dalla formula Barber.

In letteratura esistono anche altre formule per la determinazione della temperatura della pavimentazione in funzione dello spessore.

Nella **teoria di Peyronne-Caroff** la temperatura della pavimentazione è funzione della temperatura media, massima e minima della superficie, della densità del materiale, del periodo ciclico giornaliero e del calore specifico del calcestruzzo. Si riporta di seguito la formulazione della teoria:

$$T(z,t) = T_{sg} + \left(\frac{T_{s\max} - T_{s\min}}{2} \right) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi c \rho}{t_c}} z} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{t_c} - \sqrt{\frac{\pi c \rho}{t_c}} z \right)$$

in cui:

T_{sg} : temperatura media della superficie

$T_{s\max}$: temperatura massima della superficie

$T_{s\min}$: temperatura minima della superficie

ρ : densità del materiale

t_c : periodo del ciclo giornaliero

c : calore specifico del calcestruzzo

Nella formula ricavata dalla soluzione dell'**equazione di Fourier**, si esprime la temperatura della pavimentazione come funzione della profondità z della lastra e del tempo t . Si pone $z=0$ per la faccia superiore, di seguito la formulazione proposta:

$$T(z,t) = T_0 e^{-\sqrt{\beta} z} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{T} - \beta z \right)$$

in cui:

T : periodo del ciclo termico

β : coefficiente dimensionale [m^{-1}] dipendente dalle caratteristiche termiche e meccaniche del calcestruzzo

$T_0^* \text{sen}(2\pi t/T - \beta z)$: temperatura superficiale sulla faccia superiore della lastra

Esistono poi in letteratura altre formulazioni, tra cui la **teoria di Faraggi, Jofre e Kramer** la quale esprime la temperatura della pavimentazione come funzione del periodo della giornata in cui si sta calcolando lo stato termico. In particolare la formula si distingue in due casi; il primo è valido dall'alba allo zenit, il secondo dallo zenit all'alba. In questa formulazione la temperatura è poi dipendente da altri parametri tra cui: temperatura media giornaliera della superficie stradale, escursione media giornaliera della temperatura della superficie stradale, numero di ore tra l'alba e lo zenit e il numero delle ore tra il tramonto e l'alba successiva.

Analisi temperature registrate sulla pavimentazione, formulazioni teoriche avanzate

Nell'elaborato di tesi redatto da Ing. Laura Moretti con relatore la prof.ssa Ing. Paola di Mascio [4], "Modello di analisi strutturale, funzionale ed economica di pavimentazioni stradali in calcestruzzo", viene riportata l'elaborazione di un nuovo modello termico.

Come riportato nell'elaborato di tesi citato, vi è un aspetto del quale non si tiene in conto nel modello di Barber:

- Non viene rappresentato correttamente l'andamento giornaliero delle temperature utilizzando il termine sinusoidale riportato nella formula di Barber; infatti la sinusoide non tiene in conto della variazione di temperatura tra l'alba e lo zenit e tra lo zenit e l'alba;

Per considerare ciò, si è utilizzato il modello Faraggi, Jofre e Kramer, il quale tiene in conto delle temperature come funzione della variazione tra l'alba e lo zenit. La formulazione sperimentale introdotta è quindi la seguente:

- con validità dall'alba allo zenit:

$$T(z, t) = T_{ag} + R + \left(\frac{A_g}{2} + 3R \right) \cdot F \cdot e^{-cz} \cdot \text{sen} \left(\frac{2t - S_h}{2S_h} \pi - z \sqrt{\frac{\pi \cdot \gamma \cdot c_s}{24 \cdot k}} \right)$$

- con validità tra lo zenit e l'alba successiva:

$$T(z, t) = T_{ag} + R + \left(\frac{A_g}{2} + 3R \right) \cdot F \cdot e^{-cz} \cdot \text{sen} \left(\frac{4(t + S_n) - S_a}{2S_a} \pi - z \sqrt{\frac{\pi \cdot \gamma \cdot c_s}{24 \cdot k}} \right)$$

in cui:

T_{ag} : temperatura media giornaliera della superficie stradale

A_s : escursione media giornaliera della temperatura della superficie stradale

R : contributo medio giornaliero della radiazione solare alla temperatura effettiva dell'aria

F : coefficiente che tiene in conto del coefficiente di trasmissione termica, della conduttività termica e della diffusività del calcestruzzo

S_n e S_h rappresentano le ore che intercorrono tra l'alba e lo zenit e tra il tramonto e l'alba successiva.

S_a : costante funzione di S_n , S_h

d : diffusività del materiale

k = conduttività termica del materiale

γ = coefficiente sperimentale che tiene in conto della piovosità della zona espresso in "per mille" come il complemento a 365 dei giorni di pioggia

Come fatto per il Modello Barber si vuole ora riportare un esempio di calcolo sempre nelle stagioni inverno ed estate nello stesso punto della pavimentazione utilizzato prima, ovvero al di sotto dello spessore della lastra in cls.

I nuovi parametri introdotti a quelli utilizzati nel modello di Barber sono le ore che intercorrono tra l'alba e lo zenit e tra il tramonto e l'alba.

Stagione Inverno

a) Modello Alba-Zenit

Nella tabella seguente, si riportano i dati del caso invernale. Considerando un giorno d'inverno generico del 2018, l'alba si è registrata alle ore 08:00 e il tramonto alle ore 16.41. Le ore che intercorrono tra l'alba e il tramonto sono quindi circa 8,5 h.

La tabella riporta le ore del giorno e la temperatura della pavimentazione ottenuta dall'applicazione del modello di Faraggi, Jofre, Kramer.

Tabella 6: Applicazione modello di Faraggi, Jofre, Kramer – inverno 1)

Ore del giorno [h]	T pavimentazione [°C]
0	9,02
1	9,80
2	10,79
3	11,87
4	12,86
5	13,53
6	13,69
7	13,30
8	12,47
9	11,42
10	10,36
11	9,45
12	8,77
13	8,34
14	8,15
15	8,20
16	8,49
17	9,03
18	9,81
19	10,79
20	11,87
21	12,86
22	13,53
23	13,69
24	13,30

Utilizzando i dati in Tabella 6 si può ottenere un grafico di variazione della temperatura della pavimentazione in funzione delle ore del giorno, si ricorda che lo spessore è stato definito come parametro fisso.

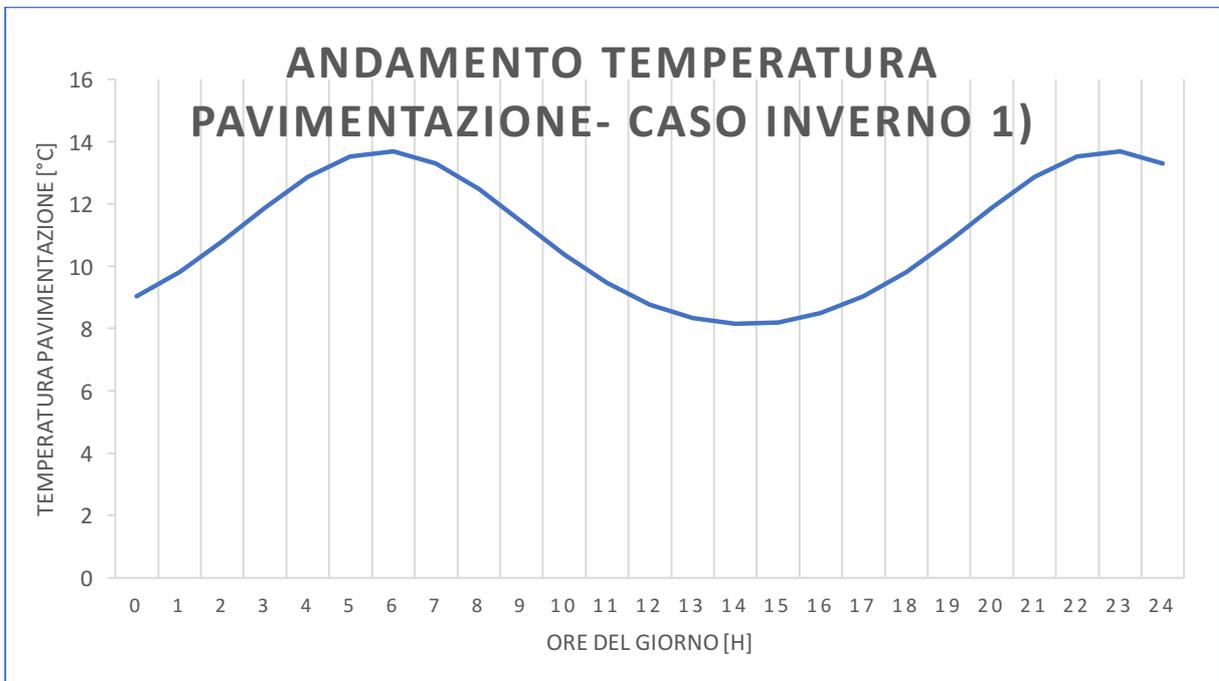


Figura 12: Andamento temperatura pavimentazione, modello Faraggi, Jofre, Kramer- caso inverno (alba-zenit)

Come si nota in Figura 12 la temperatura giornaliera della pavimentazione ha l'aspetto di una sinusoide in accordo con andamento immaginato. Si nota una frequenza differente dall'andamento ottenuto con la formula di Barber.

b) Modello Zenit-Alba

Nella tabella seguente, si riportano i dati del caso invernale. Considerando un giorno d'inverno generico del 2018, l'alba si è registrata alle ore 08:00 e il tramonto alle ore 16.41. Le ore che intercorrono tra il tramonto e l'alba sono quindi circa 15 h.

La tabella riporta le ore del giorno e la temperatura della pavimentazione ottenuta dall'applicazione del modello di Faraggi, Jofre, Kramer.

Tabella 7: Applicazione modello di Faraggi, Jofre, Kramer – inverno 2)

Ore del giorno [h]	T pavimentazione [°C]
0	10,00
1	11,25
2	12,53
3	13,46
4	13,68
5	13,10
6	11,96
7	10,65
8	9,51
9	8,70
10	8,25
11	8,15
12	8,41
13	9,03
14	10,00
15	11,25
16	12,53
17	13,46
18	13,68
19	13,10
20	11,96
21	10,65
22	9,51
23	8,70
24	8,25

Utilizzando i dati in Tabella 7 si può ottenere un grafico di variazione della temperatura della pavimentazione in funzione delle ore del giorno, si ricorda che lo spessore è stato definito come parametro fisso.

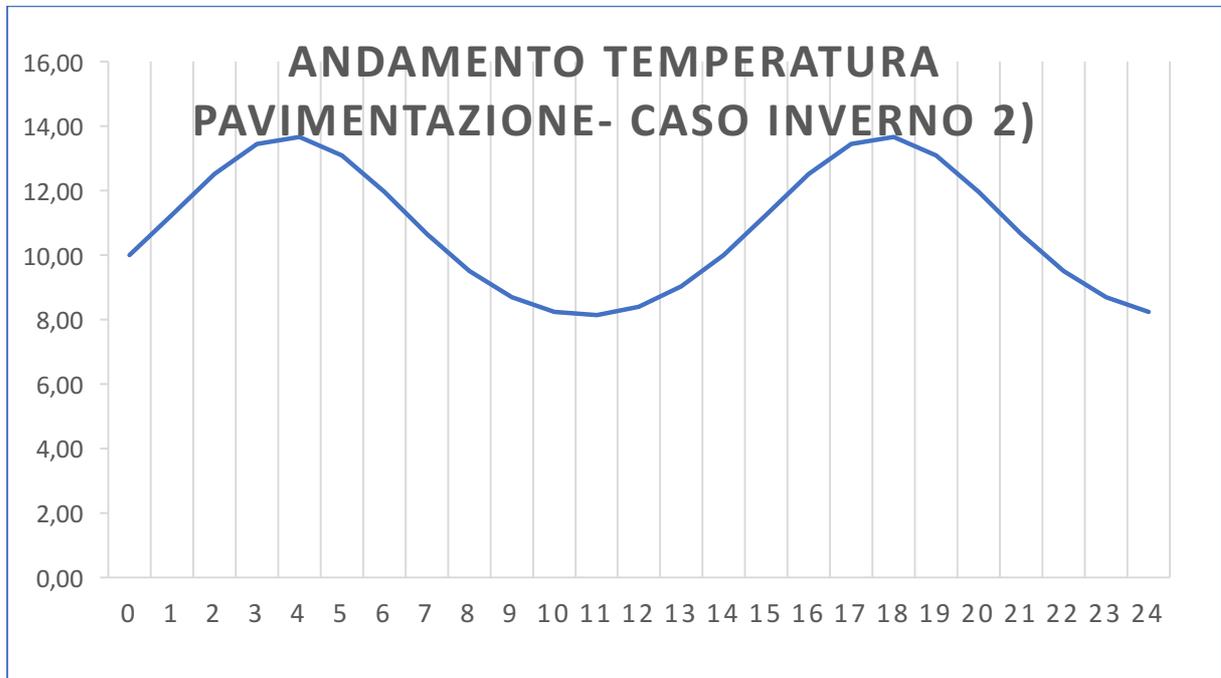


Figura 13: Andamento temperatura pavimentazione, modello Faraggi, Jofre, Kramer- caso inverno (zenit-alba)

Come si nota in Figura 13 la temperatura giornaliera della pavimentazione ha l'aspetto di una sinusoide in accordo con andamento immaginato. Si nota una frequenza differente dall'andamento ottenuto con la formula di Barber.

Stagione Estate

a) Modello Alba-Zenit

Nella tabella seguente, si riportano i dati del caso invernale. Considerando un giorno d'estate generico del 2018, l'alba si è registrata alle ore 05.35 e il tramonto alle ore 21:14. Le ore che intercorrono tra l'alba e il tramonto sono quindi circa 15 h.

La tabella riporta le ore del giorno e la temperatura della pavimentazione ottenuta dall'applicazione del modello di Faraggi, Jofre, Kramer.

Tabella 8: Applicazione modello di Faraggi, Jofre, Kramer – estate 1)

Ore del giorno [h]	T pavimentazione [°C]
0	31,82
1	32,75
2	33,87
3	35,17
4	36,61
5	38,13
6	39,65
7	41,04
8	42,19
9	42,98
10	43,33
11	43,19
12	42,59
13	41,58
14	40,28
15	38,81
16	37,28
17	35,79
18	34,42
19	33,22
20	32,21
21	31,39
22	30,75
23	30,30
24	30,03

Utilizzando i dati in Tabella 8 si può ottenere un grafico di variazione della temperatura della pavimentazione in funzione delle ore del giorno, si ricorda che lo spessore è stato definito come parametro fisso.

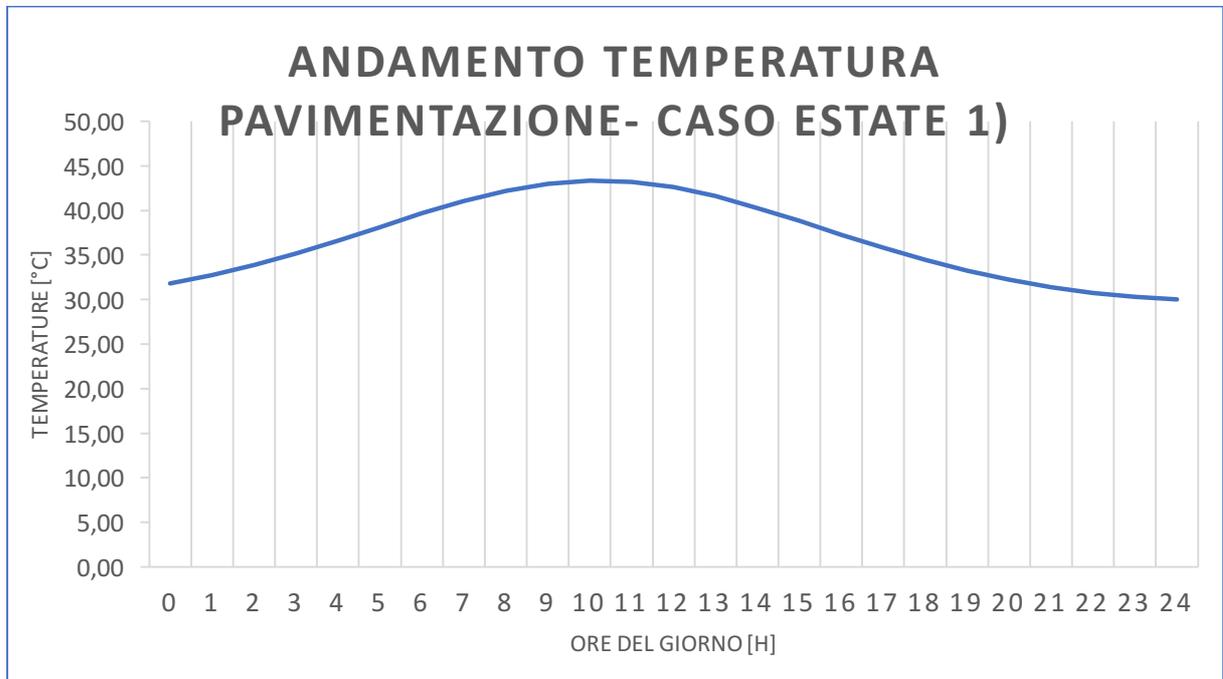


Figura 14: Andamento temperatura pavimentazione, modello Faraggi, Jofre, Kramer- caso inverno (alba-zenit)

Come si nota in Figura 14 la temperatura giornaliera della pavimentazione ha l'aspetto di una sinusoide in accordo con andamento immaginato. Si nota una frequenza differente dall'andamento ottenuto con la formula di Barber.

b) Modello Zenit-Alba

Nella tabella seguente, si riportano i dati del caso invernale. Considerando un giorno d'estate generico del 2018, l'alba si è registrata alle ore 05.35 e il tramonto alle ore 21:14. Le ore che intercorrono tra l'alba e il tramonto sono quindi circa 8 h.

La tabella riporta le ore del giorno e la temperatura della pavimentazione ottenuta dall'applicazione del modello di Faraggi, Jofre, Kramer.

Tabella 9: Applicazione modello di Faraggi, Jofre, Kramer – estate 2)

Ore del giorno [h]	T pavimentazione [°C]
0	34,05
1	37,04
2	40,26
3	42,69
4	43,28
5	41,75
6	38,81
7	35,59
8	32,91
9	31,09
10	30,12
11	29,93
12	30,47
13	31,82
14	34,05
15	37,04
16	40,26
17	42,69
18	43,28
19	41,75
20	38,81
21	35,59
22	32,91
23	31,09
24	30,12

Utilizzando i dati in Tabella 9 si può ottenere un grafico di variazione della temperatura della pavimentazione in funzione delle ore del giorno, si ricorda che lo spessore è stato definito come parametro fisso.

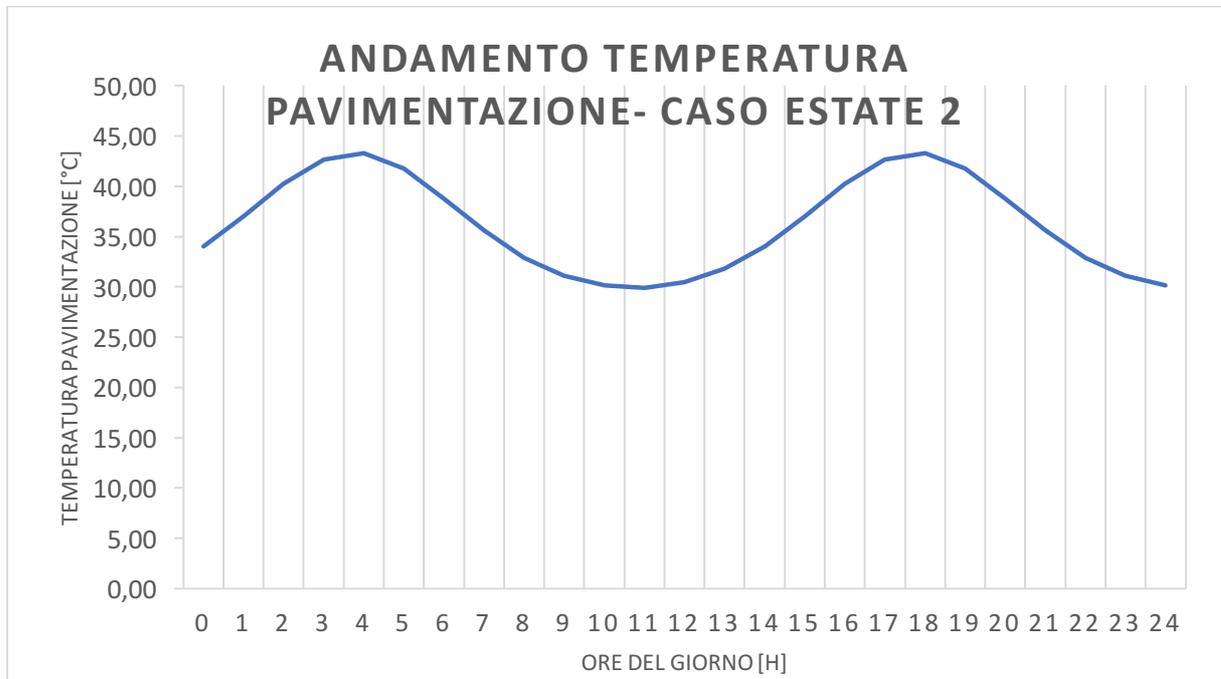


Figura 15: Andamento temperatura pavimentazione, modello Faraggi, Jofre, Kramer- caso estate (zenit-alba)

Come si nota in Figura 15 la temperatura giornaliera della pavimentazione ha l'aspetto di una sinusoide in accordo con andamento immaginato. Si nota una frequenza differente dall'andamento ottenuto con la formula di Barber.

Analisi temperature registrate sulla pavimentazione, dati sperimentali

Oltre alle formulazioni teoriche riportate nel capitolo precedente, in letteratura risulta di grande interesse lo studio riportato nell'articolo pubblicato nel settembre del 2005 dal titolo *"Temperature and curling measurements on concrete pavement"* pubblicato da *Zahidul Q.Siddique, Mustaque Hossain e Dave Meggers* [6] si riesce a capire la variazione della temperatura nella profondità.

Il legame messo in luce dall'articolo è del tipo temperature giornaliere-spessore.

Lo studio prevedeva l'utilizzo di una pavimentazione rigida (JPCP section), costruito nel 2003, di queste dimensioni:

- 12 inch concrete
- 4 inch bound drainable base portland
- 6 inch lime treated subgrade
- 16,4 ft spaziatura barre
- 1,5 inch diametro barre

All'interno dell'articolo vengono citate le misurazioni sperimentali delle temperature. Queste sono state fatte sia in inverno che in estate utilizzando i botton computer chip.

Questo approccio permette quindi di ottenere i risultati delle temperature in modo diretto in quanto misurate sperimentalmente e poi elaborate.

Di seguito si riporta il grafico risultante dallo studio sopradescritto; le temperature sono espresse in funzione dello spessore, Figura 16:

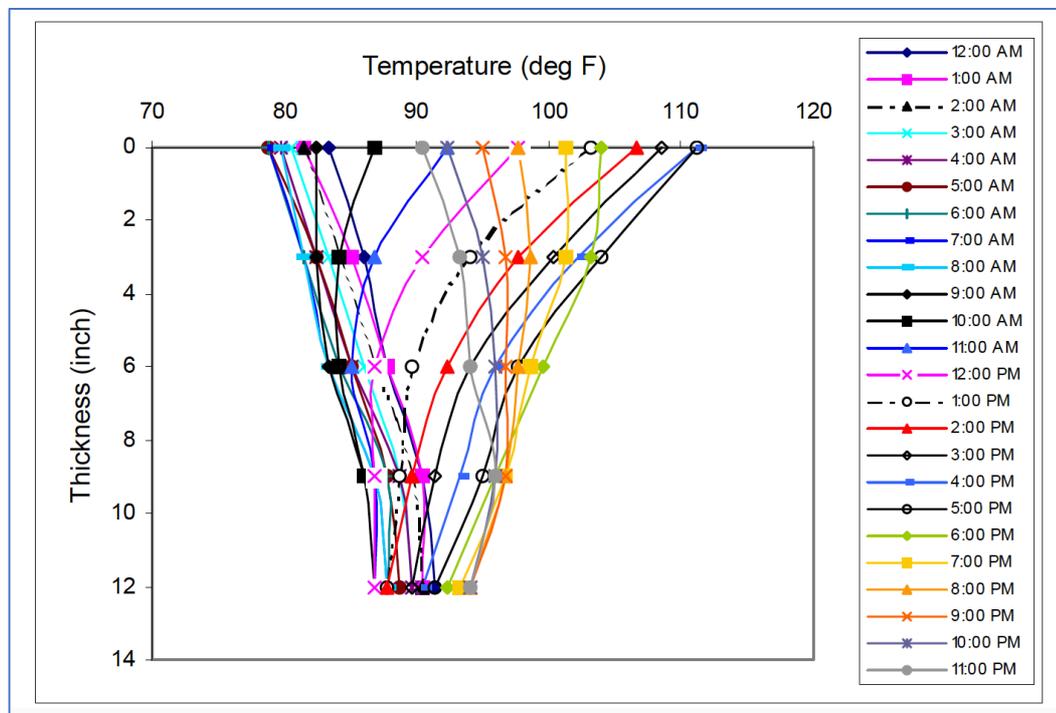


Figura 16: Grafico temperature-spessore della pavimentazione

Analizzando i dati del grafico in Figura 16, sono stati dedotti i seguenti grafici relativi alla sommità della pavimentazione (top) e alla profondità coincidente con la “base” della lastra in cls (bottom).

In particolare si specifica che nell'articolo sopracitato, si conoscono le temperature funzione sia dello spessore sia delle ore del giorno.

Nelle elaborazioni grafiche seguenti si sono presi gli spessori come dati fissi e si è espressa la funzione temperature-ore del giorno; per esprimere la funzione nella sommità della pavimentazione si è preso come spessore di riferimento 0 inch ovvero 0 cm in quanto il sistema di riferimento era orientato dall’alto verso il basso.

In Figura 17 si riporta la variazione di temperatura nelle ore del giorno riferite alla sommità della pavimentazione.

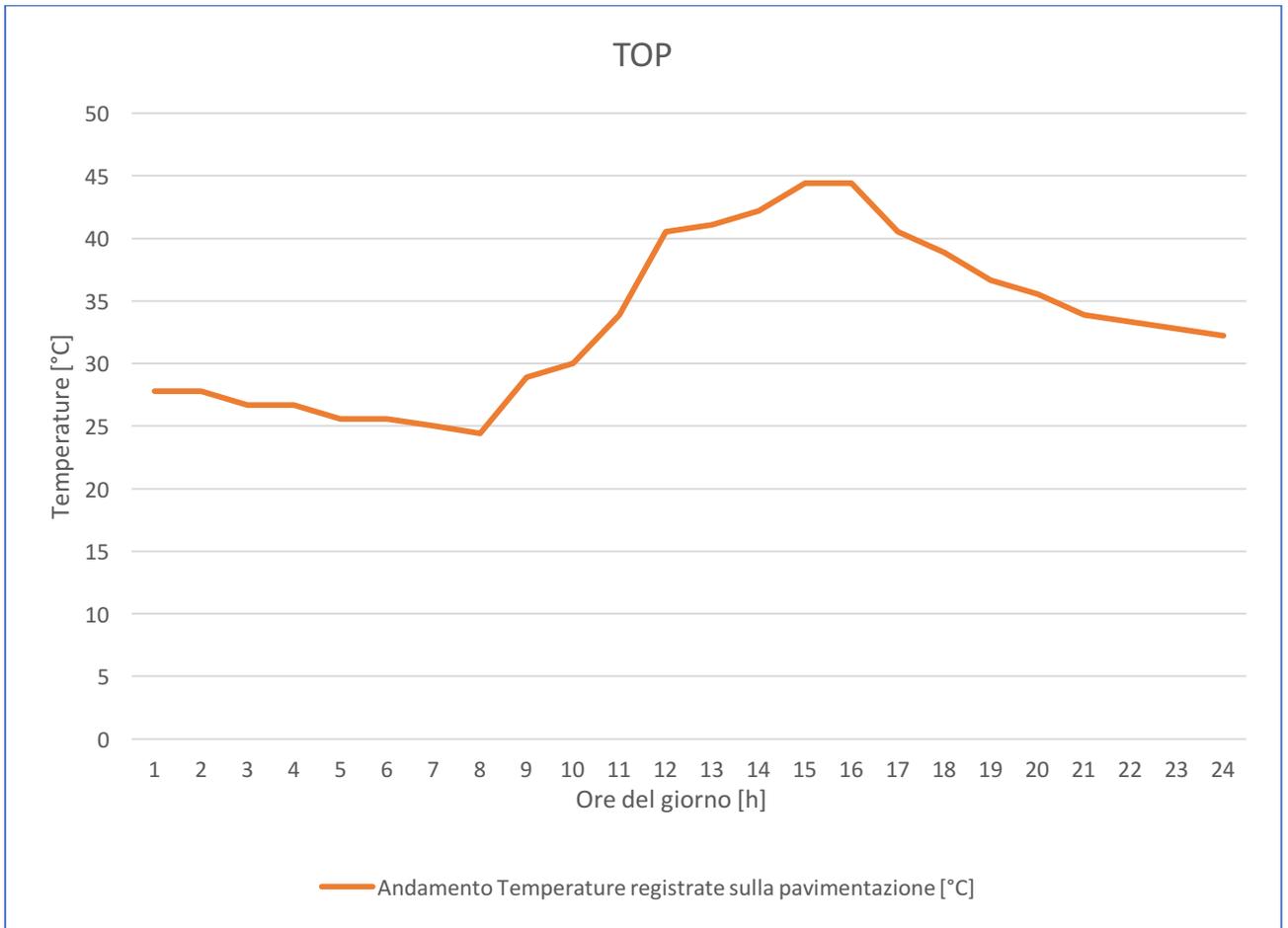


Figura 17: Grafico temperature-ore del giorno, top

Di seguito, Tabella 10, i dati dedotti dal grafico in Figura 17 e utilizzati per costruire il grafico in Figura 18.

Tabella 10: Dati temperature-ore del giorno, top

TOP		
ore del giorno	temperature [F]	Andamento Temperature registrate sulla pavimentazione [°C]
1	82	27,78
2	82	27,78
3	80	26,67
4	80	26,67
5	78	25,56
6	78	25,56

7	77	25
8	76	24,44
9	84	28,89
10	86	30
11	93	33,89
12	105	40,56
13	106	41,11
14	108	42,22
15	112	44,44
16	112	44,44
17	105	40,56
18	102	38,89
19	98	36,67
20	96	35,56
21	93	33,89
22	92	33,33
23	91	32,78
24	90	32,22

In Figura 18 si riporta la variazione di temperatura nelle ore del giorno riferite alla base della lastra in cls, bottom; per esprimere la funzione nella sommità della pavimentazione si è preso come spessore di riferimento 12 inch ovvero 30 cm.

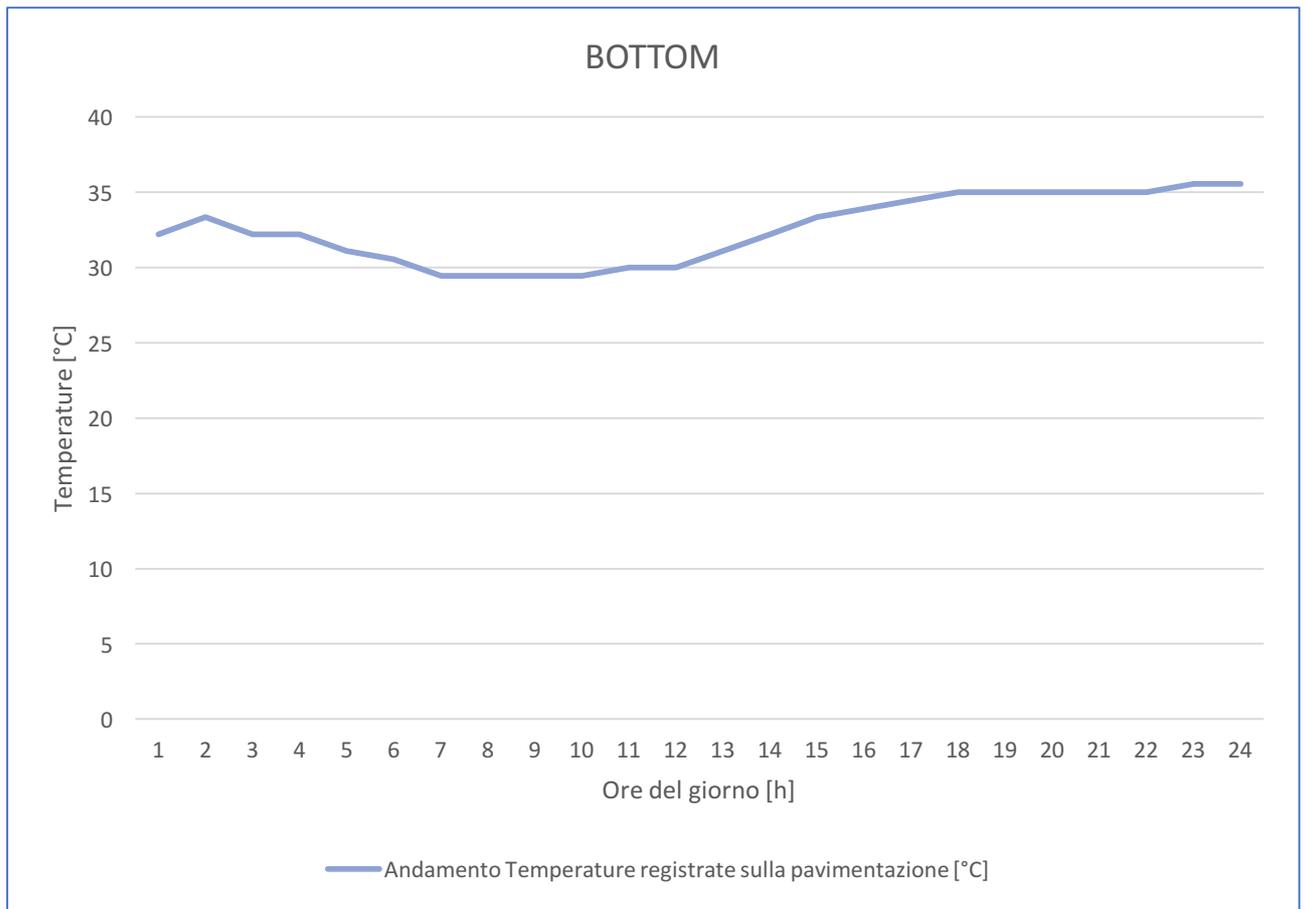


Figura 18: Grafico temperature-ore del giorno, bottom

Di seguito, Tabella 11, i dati dedotti dal grafico in Figura 16.

Tabella 11: Dati temperature-ore del giorno, bottom

BOTTOM		
ore del giorno	temperature [F]	Andamento Temperature registrate sulla pavimentazione [°C]
1	90	32,22
2	92	33,33
3	90	32,22
4	90	32,22
5	88	31,11
6	87	30,56
7	85	29,44
8	85	29,44
9	85	29,44
10	85	29,44
11	86	30

12	86	30
13	88	31,11
14	90	32,22
15	92	33,33
16	93	33,89
17	94	34,44
18	95	35
19	95	35
20	95	35
21	95	35
22	95	35
23	96	35,56
24	96	35,56

Di seguito si riportano invece in un istogramma i due andamenti delle temperature mettendo in luce anche il delta di differenza tra queste ultime, Figura 19.

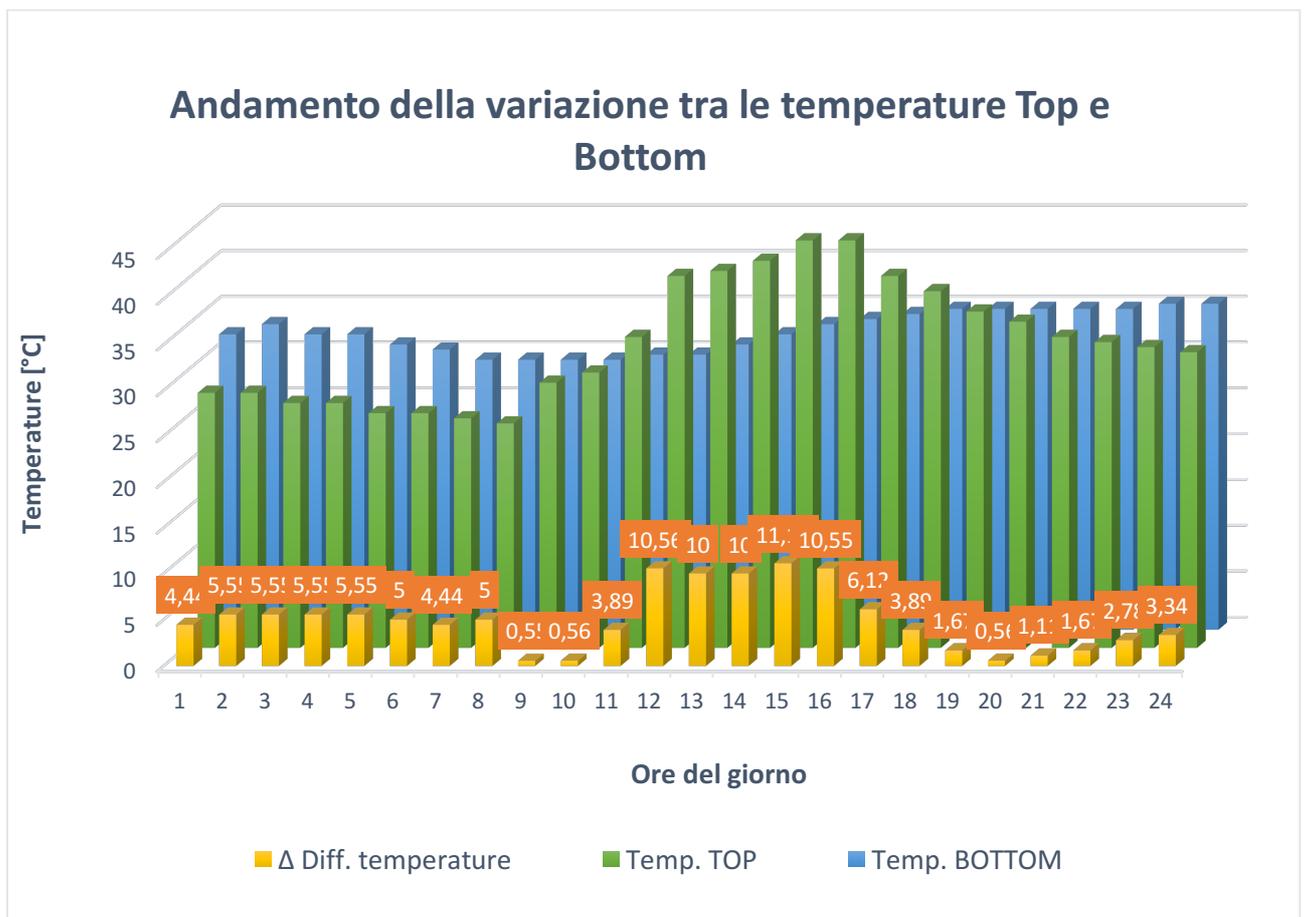


Figura 19: Istogramma degli andamenti temperature top e bottom e differenza

Come si nota in Figura 19, il massimo delta di differenza di temperatura tra top e bottom si ha alle ore 15:00 ed è pari a 11,1°C.

Analisi temperature registrate sulla pavimentazione, modello Ansys- Analisi transient thermal

In aggiunta alle formulazioni teoriche e all'articolo citato si è studiato in questo elaborato di tesi un metodo aggiuntivo per la determinazione delle temperature registrate sulla pavimentazione.

Per determinare le temperature della pavimentazione mediante il modello Ansys, il quale verrà descritto nel dettaglio nel capitolo seguente, si sono utilizzati come dati di input, i dati climatologici, mensili e stagionali, registrati nella stazione metereologica di Milano Malpensa. I dati provengono dalla banca dati delle stazioni metereologiche d'Italia, Meteoblue, relativi al trentennio 1971-2000.

I dati sono riferiti al trentennio 1971-2000 perché purtroppo non erano presenti dati così accurati riferiti agli anni correnti gratuitamente, perciò si è deciso di utilizzare dei valori più datati ma più precisi. I dati vengono riportati nella pagina seguente, *Tabella 12 e Tabella 13*.

I dati provengono dalla banca dati delle stazioni metereologiche d'Italia, Meteoblue, relativi al trentennio 1971-2000. [3]

Si riporta di seguito la Tabella riassuntiva, Tabella 12, delle temperature ambientali negli anni 1971-2000 divise per mesi:

Tabella 12: Temperature divise per mesi, Milano Malpensa

Milano Malpensa	Mesi											
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
T.max media [°C]	7	9,2	13,8	17,1	21,5	25,5	29	28,3	24	18	11,5	7,4
T.min media [°C]	-3,7	-2,7	0,3	3,9	9	12,4	15,4	15,2	11,3	6,3	0,5	-3,1
T.max assoluta [°C]	21	24,4	26,2	28	30,7	34,8	37	35,8	33,9	30,5	21,9	19,8
T.min assoluta [°C]	-18	-16,2	-12,2	-5,7	-5,2	0,6	4,7	4,3	0,5	-7,2	-13,6	-15,2

Si riporta di seguito la Tabella riassuntiva, Tabella 13, delle temperature ambientali divise per stagionalità:

Tabella 13: Temperature divise per stagioni, Milano Malpensa

Milano Malpensa	Stagione			
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
T.max media [°C]	7,9	17,5	27,6	17,8
T.min media [°C]	-3,2	4,4	14,3	6
T.max assoluta [°C]	24,4	30,7	37	33,9
T.min assoluta [°C]	-18	-12,2	0,6	-13,6

Per l'analisi delle temperature sulla pavimentazione si è inizialmente deciso di approfondire i seguenti 3 casi:

- Massima $T_{\max \text{ media}}$ - Massima $T_{\min \text{ media}}$, temperature mensili
- Massima $T_{\max \text{ assoluta}}$ - Massima $T_{\min \text{ assoluta}}$, temperature mensili
- Massima $T_{\max \text{ assoluta}}$ - Massima $T_{\min \text{ assoluta}}$, temperature stagionali

Di seguito vengono riportati i calcoli relativi ai tre casi per la determinazione del delta di temperatura riferiti ai casi sopra riportati.

CASO A

La massima $T_{\max \text{ media}}$ dei dati mensili è pari a 29° registrata nel mese di Luglio, la massima $T_{\min \text{ media}}$ dei dati mensili è pari a $-3,7^\circ$ registrata nel mese di Gennaio.

Il delta di temperature risulta quindi essere pari a $\Delta T_{\text{caso A}} = (29 - (-3,7)) = 32,7^\circ$, valore approssimato a 33° .

CASO B

La massima $T_{\max \text{ ass}}$ dei dati mensili è pari a 37° registrata nel mese di Luglio, la massima $T_{\min \text{ ass}}$ dei dati mensili è pari a -18° registrata nel mese di Gennaio.

Il delta di temperature risulta quindi essere pari a $\Delta T_{\text{caso B}} = (37 - (-18)) = 55^\circ$.

CASO C

La massima $T_{\max \text{ ass}}$ dei dati stagionali è pari a 37° registrata in estate, la massima $T_{\min \text{ ass}}$ dei dati stagionali è pari a -18° registrata nel mese di Gennaio.

Il delta di temperature risulta quindi essere pari a $\Delta T_{\text{caso C}} = (37 - (-18)) = 55^\circ$.

Dai calcoli sopra riportati si nota che viene ottenuto lo stesso dato numerico nei casi B e C. I valori delle temperature che allora dovrebbero essere considerati sono pari a 33° e 55° ; per introdurre un caso intermedio a questi due casi limite si pensa di prendere il caso medio.

In particolare viene quindi introdotto il caso D dato dalla media delle temperature del caso A e B.

CASO D

Il delta di temperature risulta quindi essere pari a $\Delta T_{\text{caso D}} = (32,7 + 55) / 2 = 43,85^\circ$, approssimato per semplicità a 44° .

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei casi oggetti di studio e da quali dati di partenza sono stati ottenuti.

Tabella 14: Casi di temperature analizzati

Caso	ΔT	Descrizione
A	33°	Media tra la massima $T_{\text{max.media}}$ massima $T_{\text{min.media}}$ (dati mensili)
B	55°	Valore uguale ottenuto dai casi B e C
D	44°	Media dei casi A e B

I casi soprariportati A, B e D saranno studiati nel modello Ansys mediante analisi transient thermal.

L'analisi Transient Thermal permette di realizzare il legame tempo-temperatura, la particolarità di questa analisi è quella di riuscire a riprodurre un grafico tempo-temperatura anche applicando temperature differenti all'interno dello stesso modello.

Operativamente per svolgere queste analisi è necessario costruire un modello, tutte le componenti (geometria, materiali, connessioni e mesh) utilizzate saranno descritte con più precisione nel capitolo successivo.

L'unica componente, esplicitamente richiesta da ANSYS, per lo svolgimento di tale analisi transitoria è l'inserimento, per ogni materiale, nella sezione *Engineering data*, di queste due proprietà:

- Thermal conductivity
- Specific Heat, C_0

La *conduttività termica* è il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore (cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie) e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore nel caso della conduzione termica. Tale parametro è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore. Essa dipende solo dalla natura del materiale, non dalla sua forma. [8]

Il *calore specifico* di una sostanza è definito come la quantità di calore necessaria per innalzare, o diminuire, di un Kelvin (o di un grado della scala Celsius) la temperatura di una unità di massa. [8]

Engineering data

Per determinare i valori di questi dati si è fatto riferimento alla normativa UNI EN ISO 13786:2008 "Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo", entrata in vigore il 1 marzo 2018 [9].

Per quanto riguarda l'acciaio, **Structural Steel**, i dati utilizzati sono riportati nella tabella seguente, Tabella 15:

Tabella 15: Dati Structural Steel per analisi Transient Thermal

STRUCTURAL STEEL	
Isotropic thermal conductivity	60,5 W/m K
Specific heat, c_0	434 J/Kg K

Per quanto riguarda il **P501 PCC** si è fatto riferimento ad un calcestruzzo armato, i dati utilizzati sono riportati nella tabella seguente, Tabella 16:

Tabella 16: Dati P501 PCC per analisi Transient Thermal

P501 PCC	
Isotropic thermal conductivity	1,80 W/m K
Specific heat, c_0	1080 J/Kg K

Considerazioni diverse devono essere invece fatte per lo strato equivalente. Come già detto in precedenza lo **strato equivalente** semplifica la sovrapposizione degli strati di econcrete, argilla e terreno ad alta resistenza. Non esiste quindi nella normativa UNI EN ISO 13786:2008 un materiale con queste proprietà; data l'impossibilità di calcolare questi due parametri con delle prove dirette, si sono ricavati i valori di ogni componente dello strato equivalente. Successivamente si sono ipotizzati i valori dei parametri tenendo in conto della quota parte che i materiali costituiscono rispetto al totale e controllando che il risultato finale fosse allineato ai valori dell'econcrete, in quanto è proprio quest'ultimo ad essere adiacente e scambiare calore con il P501 PCC.

Di seguito di riportano i valori di conduttività termica dell'econcrete, argilla e terreno resistente, Tabella 17.

Tabella 17: Dati Thermal conductivity degli strati costituenti lo strato equivalente

Thermal conductivity	
Econcrete	1,6 W/m K
Argilla	0,13 W/m K
Terreno ad alta resistenza	0,13 W/m K

In questo caso si è tenuto in conto che l'argilla e il terreno ad alta resistenza, aventi valore di conduttività termica più basso, costituiscano quasi il 93% dello spessore e quindi utilizzando semplici proporzioni il valore di conduttività termica risulterebbe essere pari a 0,30 W/m K, troppo diverso dal valore della conduttività termica dell'econcrete. Si è deciso allora di ipotizzare un valore di 1,2 W/m K.

Di seguito di riportano i valori del calore specifico dell'econcrete, argilla e terreno resistente, Tabella 18.

Tabella 18: Dati calore specifico degli strati costituenti lo strato equivalente

Specific heat C_o	
Econcrete	1000 J/m K
Argilla	950 J/m K
Terreno ad alta resistenza	1600 J/m K

In questo caso, per determinare il calore specifico, è stato sufficiente fare una semplice proporzione tra calore dei vari materiali e spessore; infatti è stato ottenuto un valore molto prossimo a quello dell'econcrete. Il valore ipotizzato è quindi pari a 1160 J/m K.

Di seguito si riportano in tabella, Tabella 19, i dati utilizzati per lo strato equivalente:

Tabella 19: Dati strato equivalente per analisi Transient thermal

STRATO EQUIVALENTE	
Isotropic thermal conductivity	1,20 W/m K
Specific heat, c_o	1160 J/Kg K

Analysis settings

Una volta inseriti i due parametri nell'engineering data si può procedere impostando l'analysis settings. La componente essenziale per questa tipologia di analisi è impostare gli step di carico, di seguito se ne riporta la descrizione.

Step Controls

I vari Step consentono di controllare la dimensione del passo temporale in un'analisi transitoria. È utile prevedere l'utilizzo di più steps se i nuovi carichi vengono introdotti o rimossi in momenti diversi nella cronologia di caricamento o se si desidera modificare le impostazioni di analisi come la dimensione del passo temporale in alcuni punti della cronologia.

Si richiamano di seguito i casi oggetti di studio, Tabella 20, per precisarne meglio gli step di carico impostati.

Tabella 20: Casi oggetto di studio, analisi transient thermal

Caso	ΔT	Descrizione
A	33°	Media tra la massima $T_{\max.media}$ massima $T_{\min.media}$ (dati mensili)
B	55°	Valore uguale ottenuto dai casi B e C
D	44°	Media dei casi A e B

Per ogni caso oggetto di studio sono previste quattro diverse modalità di step di carico.

1. Step di carico con applicazione lineare della temperatura nel tempo, tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi;
2. Step di carico con applicazione lineare della temperatura nel tempo (40 secondi) seguiti da due step di temperatura costante, tempo di applicazione totale di 60 secondi;
3. Step di carico con picco della temperatura massima dopo il primo step (10 secondi) e successivamente applicazione costante della temperatura, tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi.

4. Step di carico con applicazione costante della temperatura, tempo di applicazione del carico pari a 40 secondi.

La temperatura è dipendente dal tempo, grazie agli step di carico, ed è applicata uniformemente su tutta la pavimentazione; ovvero ogni strato della pavimentazione è sottoposto alla stessa temperatura.

CASO A – Temperatura 33°

Di seguito si riportano i tre casi oggetto di studio.

Caso 1.

Gli step di carico sono caratterizzati da una applicazione lineare della temperatura nel tempo, il tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 20.

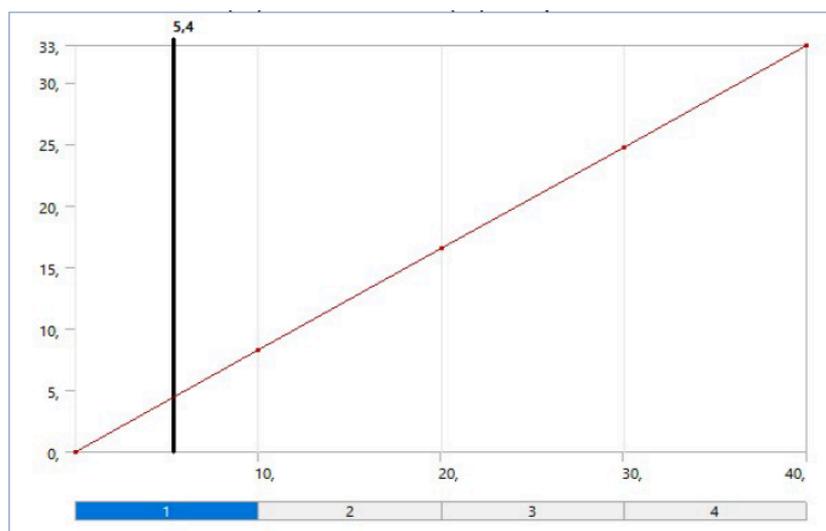


Figura 20: Step di carico Caso A.1

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 21:

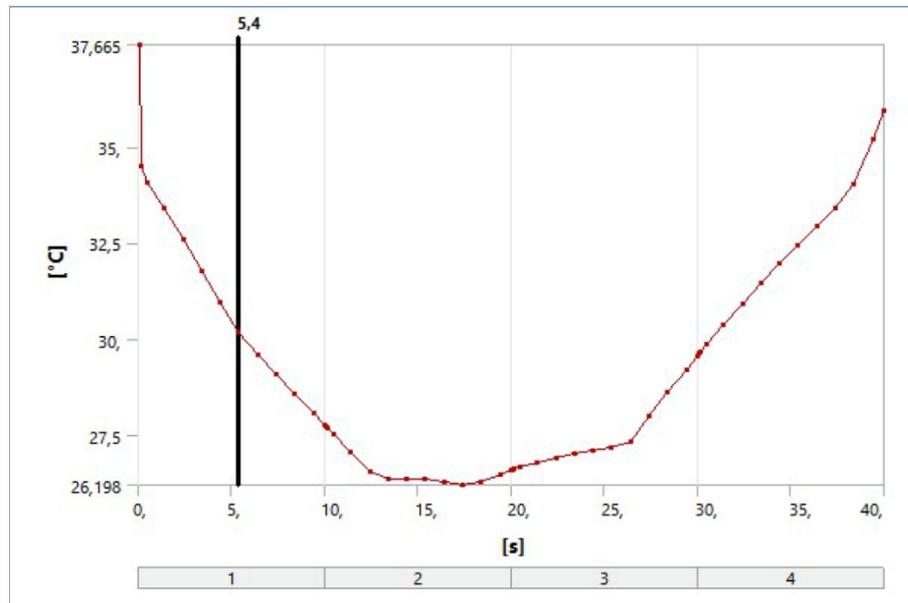


Figura 21: Risultato del caso A.1

Caso 2.

Gli step di carico sono caratterizzati da una applicazione lineare della temperatura nel tempo, seguiti da due step di temperatura costante. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 22.

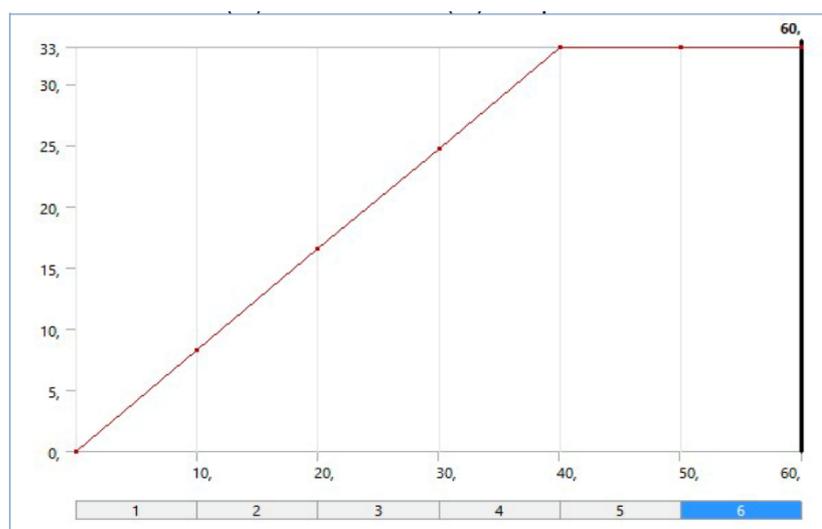


Figura 22: Step di carico Caso A.2

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 23:

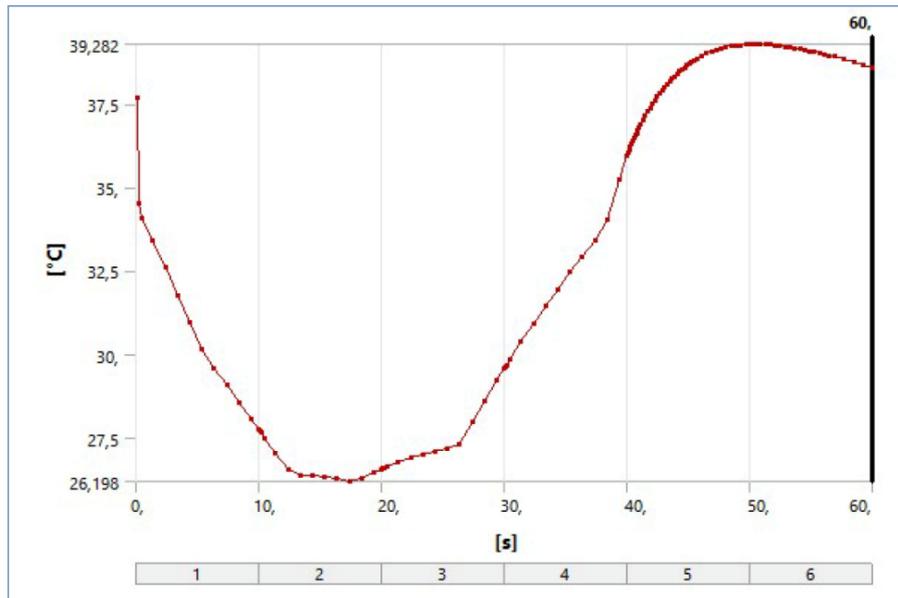


Figura 23: Risultato del caso A.2

Caso 3.

Gli step di carico sono caratterizzati dall'applicazione della totale temperatura successivamente al primo step di carico, seguita da temperatura costante. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 24.

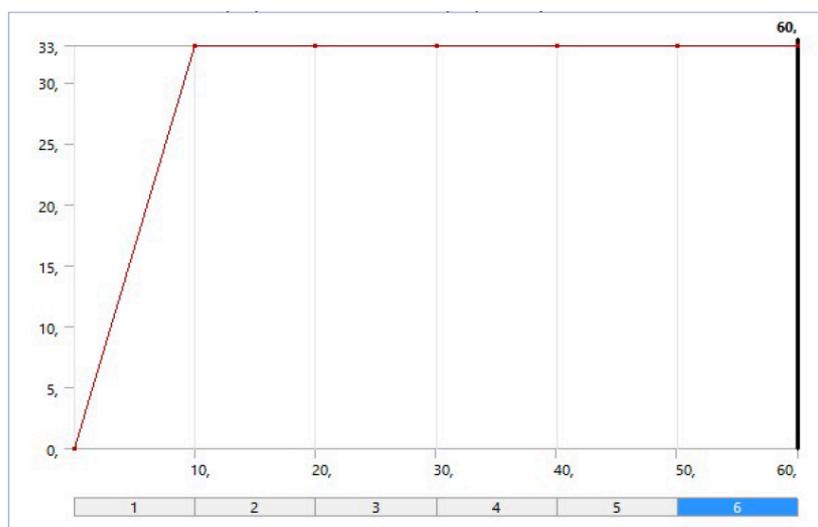


Figura 24: Step di carico Caso A.3

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 25:

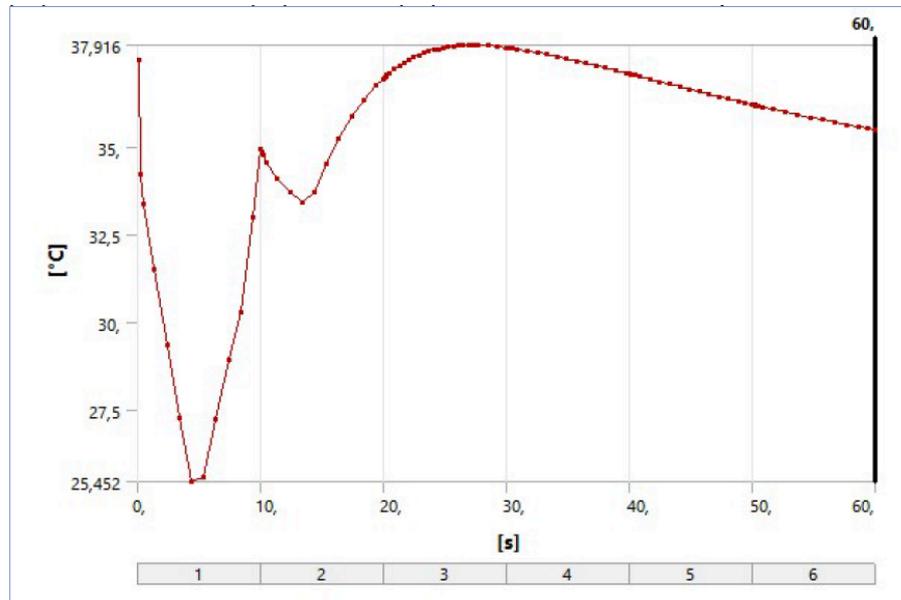


Figura 25: Risultato del caso A.3

Caso 4.

Gli step di carico sono caratterizzati dall'applicazione costante della temperatura già dal primo step di carico. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 26.

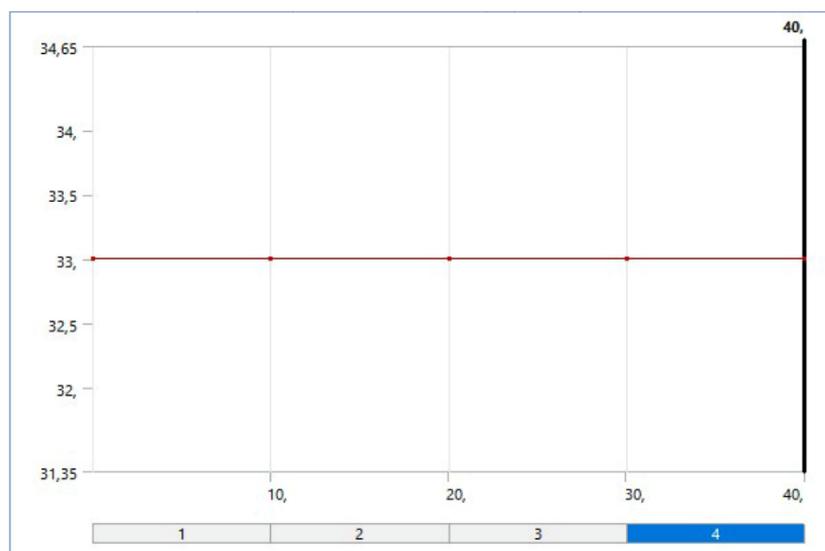


Figura 26: Step di carico Caso A.4

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 27:

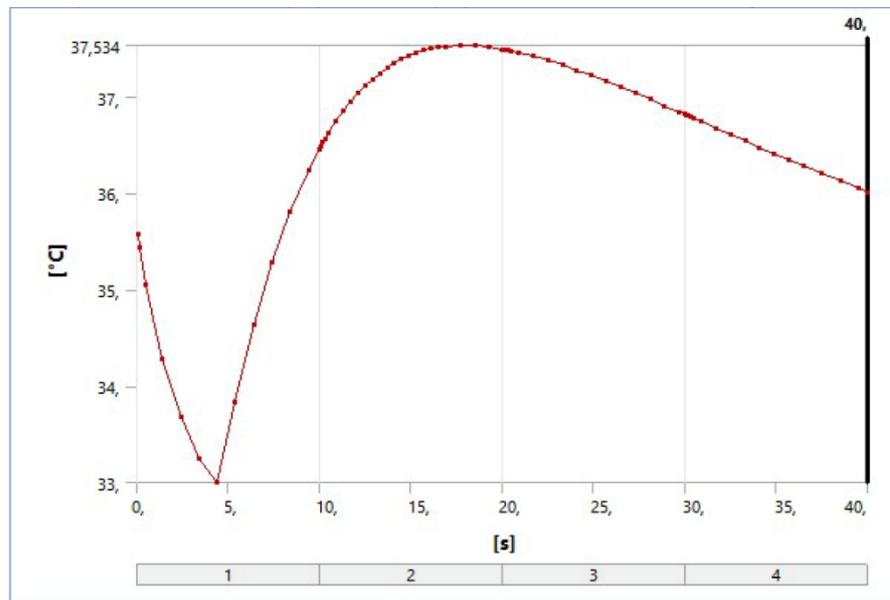


Figura 27: Risultato del caso A.4

CASO B – Temperatura 55°

Caso 1.

Gli step di carico sono caratterizzati da una applicazione lineare della temperatura nel tempo, il tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 28.

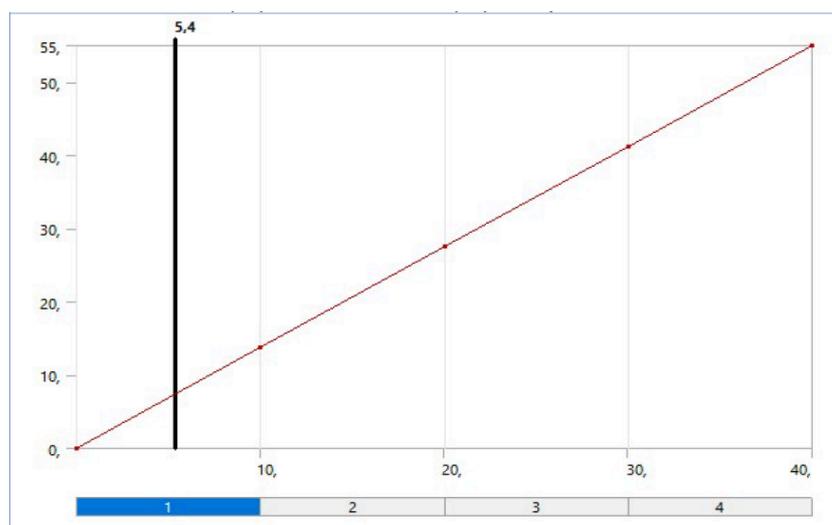


Figura 28: Step di carico Caso B.1

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 29:

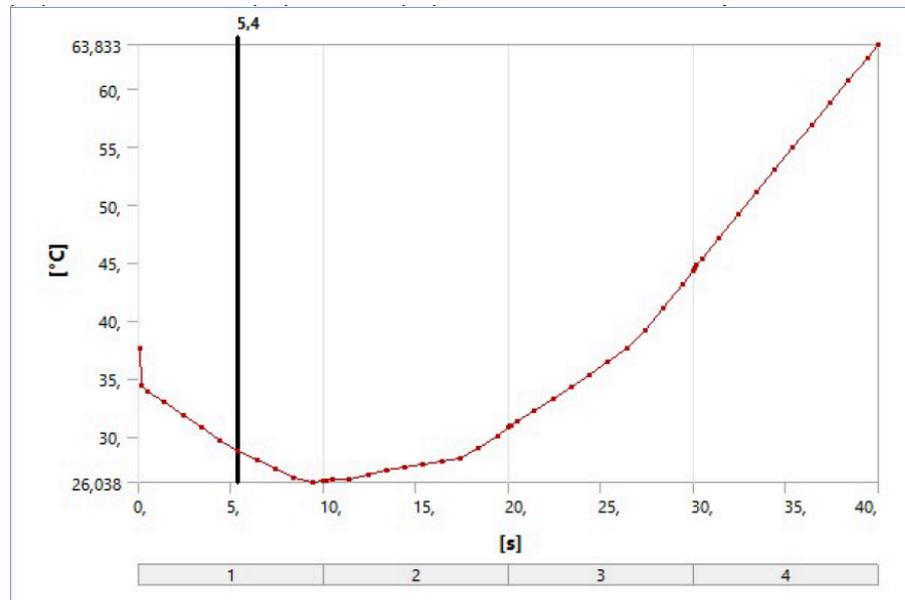


Figura 29: Risultato del caso B.1

Caso 2.

Gli step di carico sono caratterizzati da una applicazione lineare della temperatura nel tempo, seguiti da due step di temperatura costante. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 30.

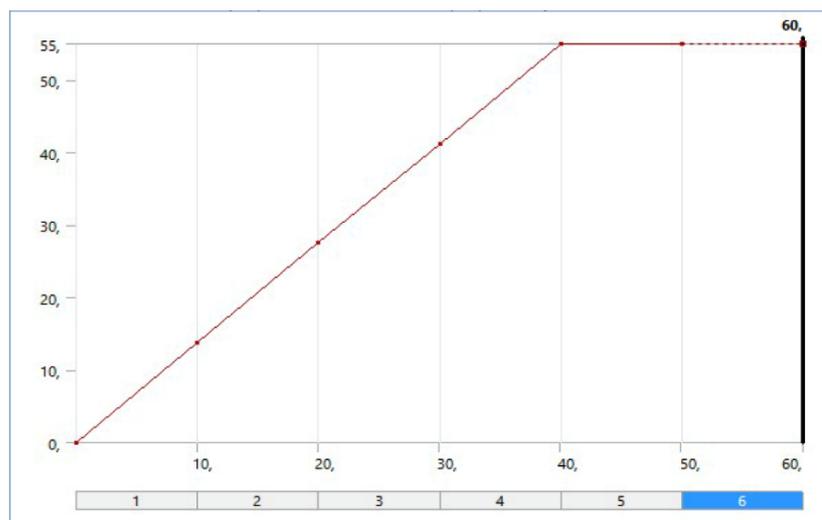


Figura 30: Step di carico Caso B.2

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 31:

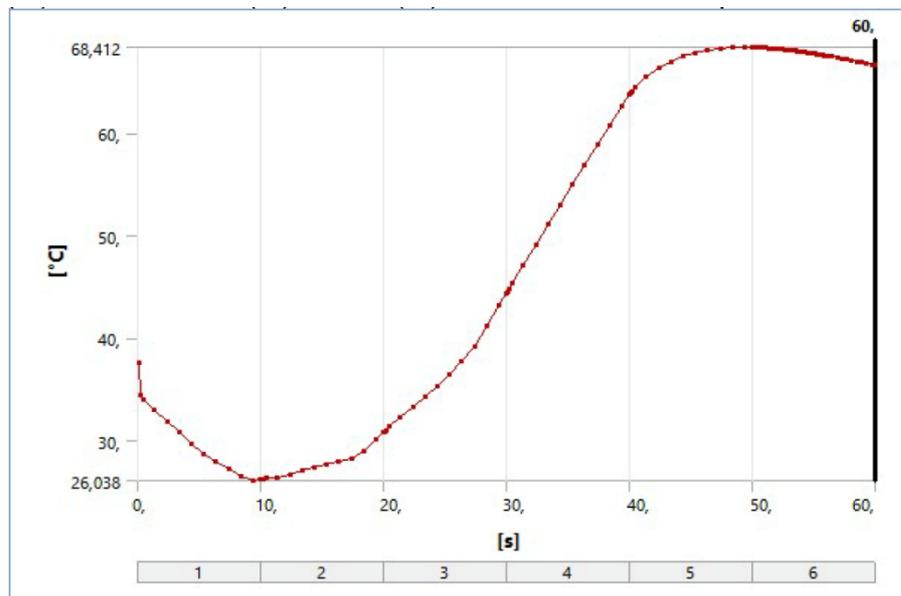


Figura 31: Risultato del caso B.2

Caso 3.

Gli step di carico sono caratterizzati dall'applicazione della totale temperatura successivamente al primo step di carico, seguita da temperatura costante. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 32.

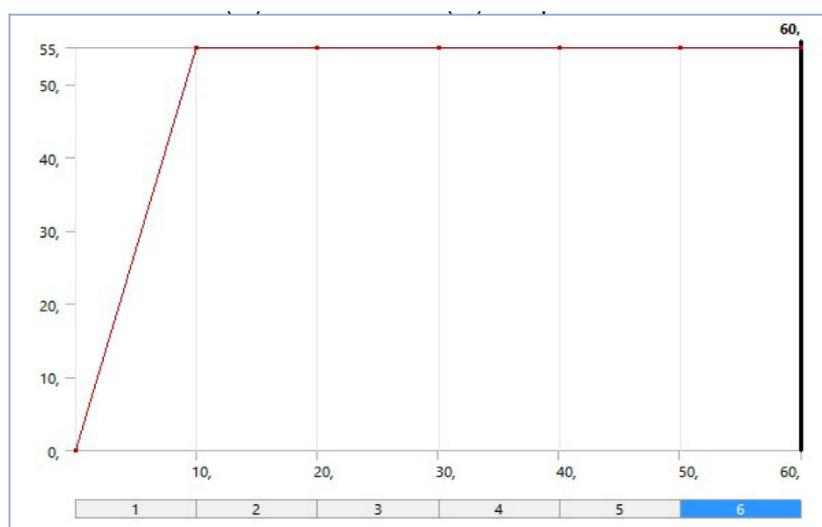


Figura 32: Step di carico Caso B.3

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 33:

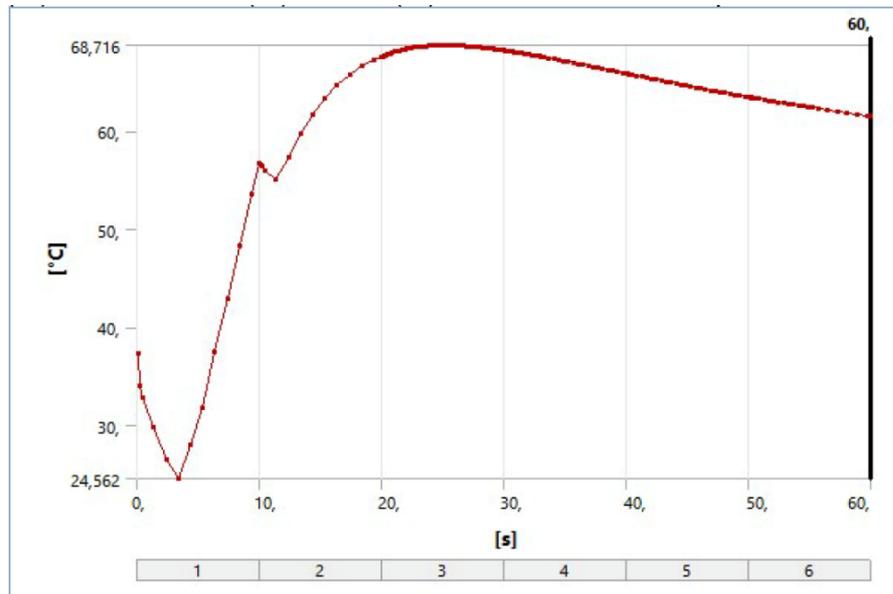


Figura 33: Risultato del caso B.3

Caso 4.

Gli step di carico sono caratterizzati dall'applicazione costante della temperatura già dal primo step di carico. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 34.

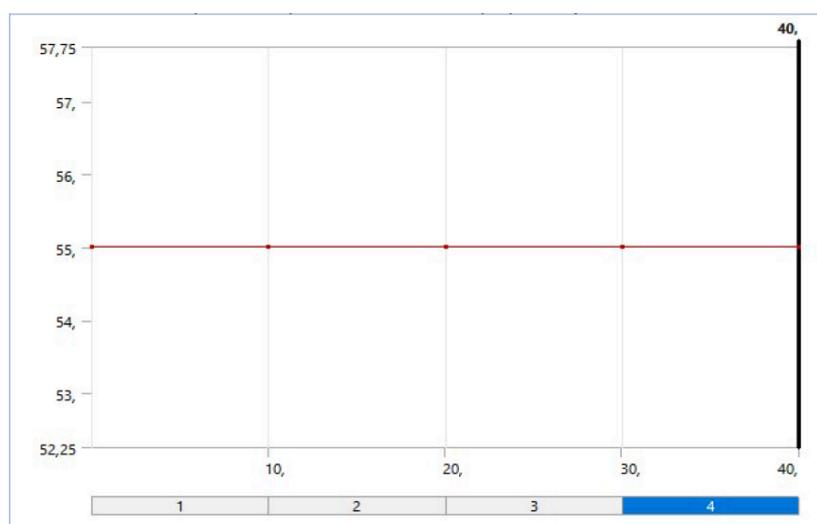


Figura 34: Step di carico Caso B.4

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 35:

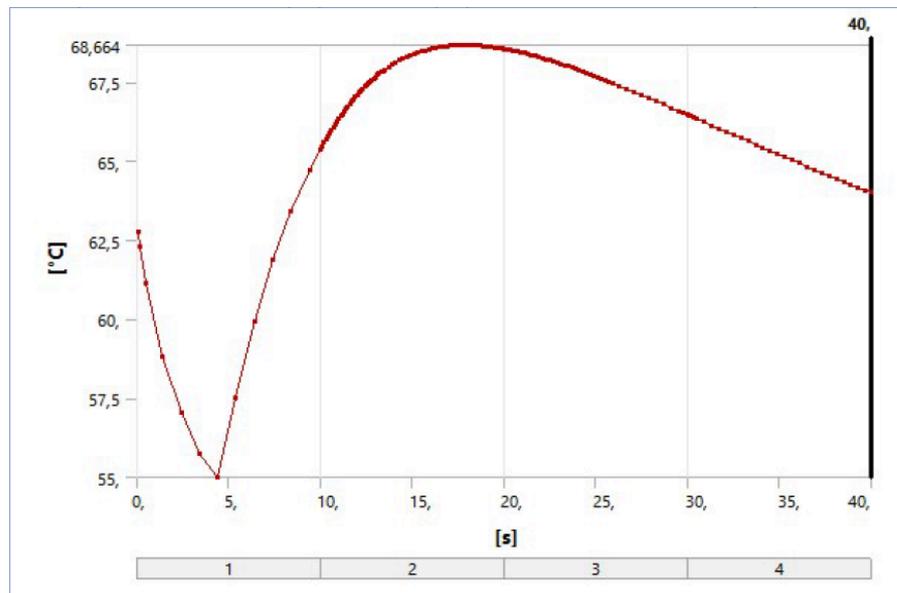


Figura 35: Risultato del caso B.4

CASO D – Temperatura 44°

Di seguito si riportano i tre casi oggetto di studio.

Caso 1.

Gli step di carico sono caratterizzati da una applicazione lineare della temperatura nel tempo, il tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 36.

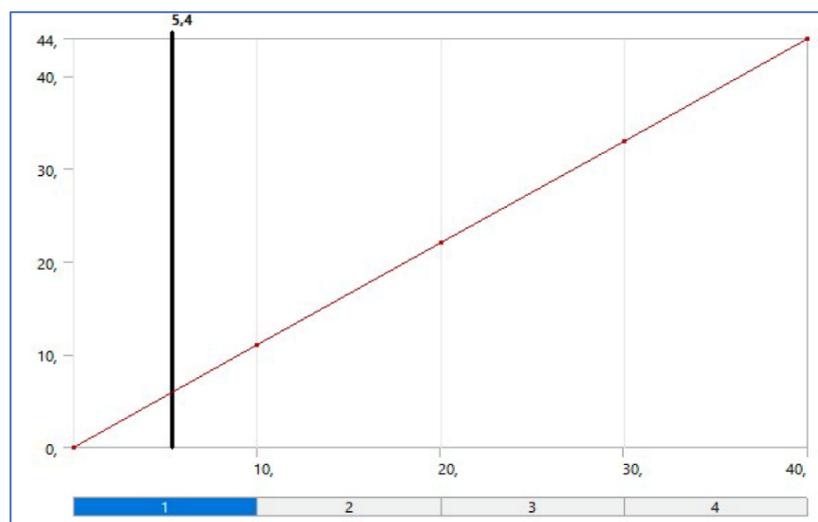


Figura 36: Step di carico Caso D.1

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 37:

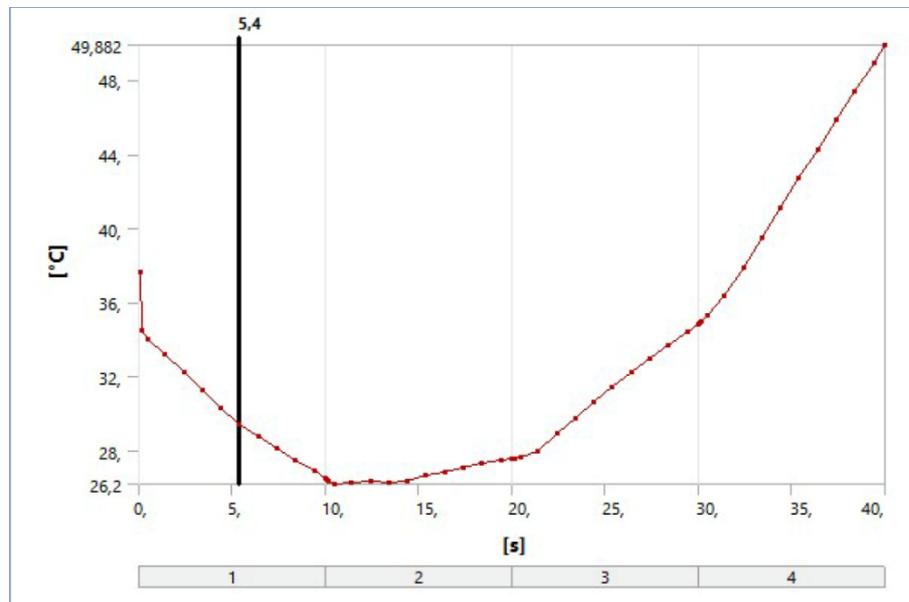


Figura 37: Risultato del caso D.1

Caso 2.

Gli step di carico sono caratterizzati da una applicazione lineare della temperatura nel tempo, seguiti da due step di temperatura costante. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 38.

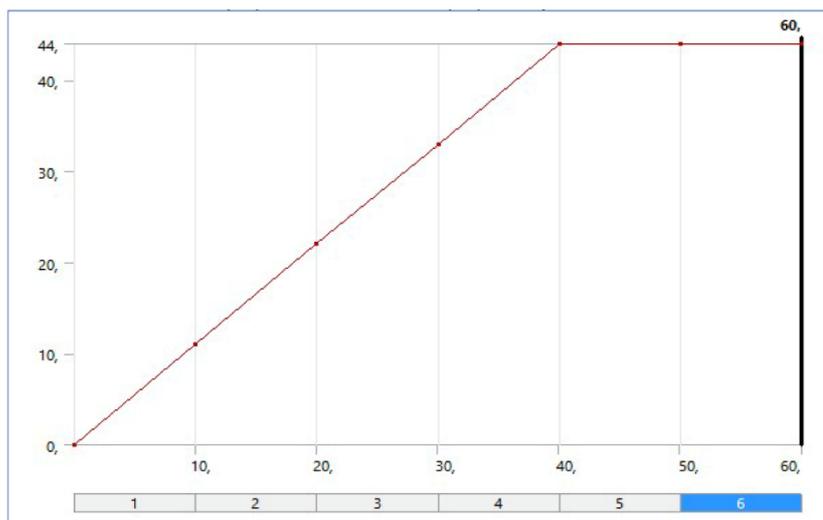


Figura 38: Step di carico Caso D.2

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 39:

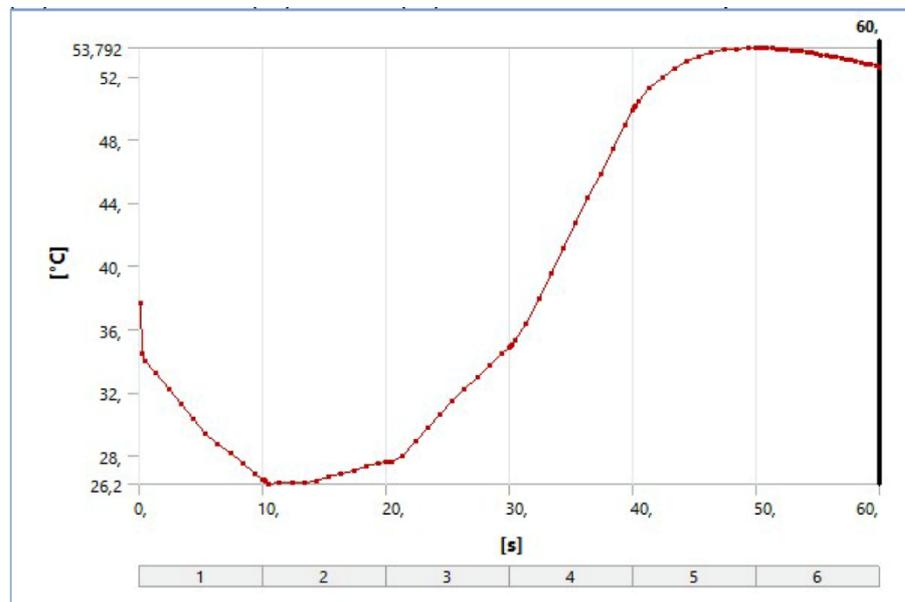


Figura 39: Risultato del caso D.2

Caso 3.

Gli step di carico sono caratterizzati dall'applicazione della totale temperatura successivamente al primo step di carico, seguita da temperatura costante. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 60 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 40.

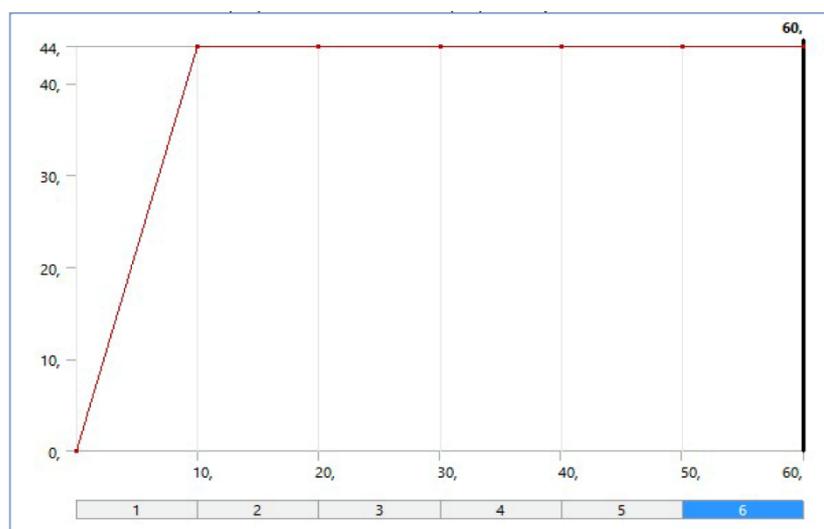


Figura 40: Step di carico Caso D.3

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 41:

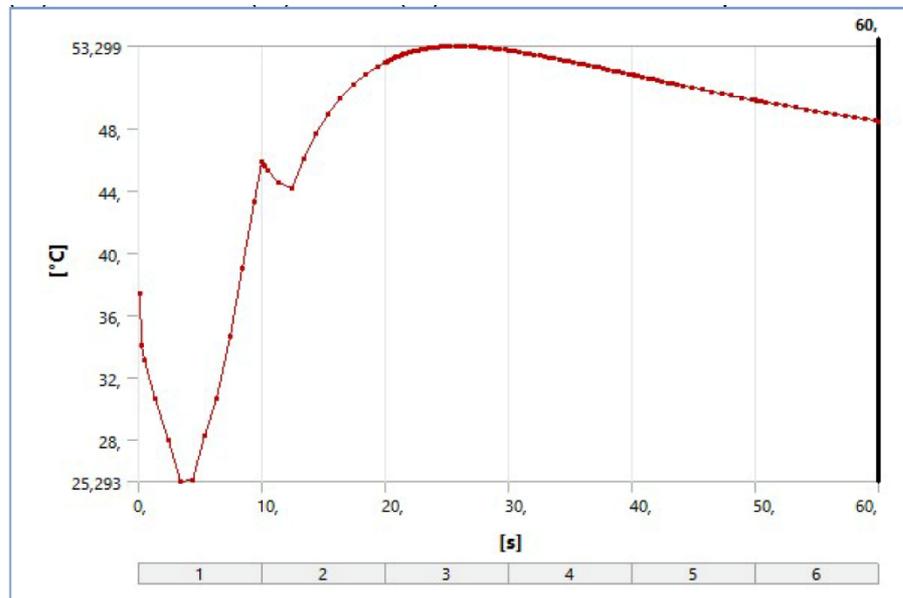


Figura 41: Risultato del caso D.3

Caso 4.

Gli step di carico sono caratterizzati dall'applicazione costante della temperatura già dal primo step di carico. Il tempo di applicazione totale del carico pari a 40 secondi. Viene di seguito riportato il grafico rappresentativo degli step di carico, Figura 42.

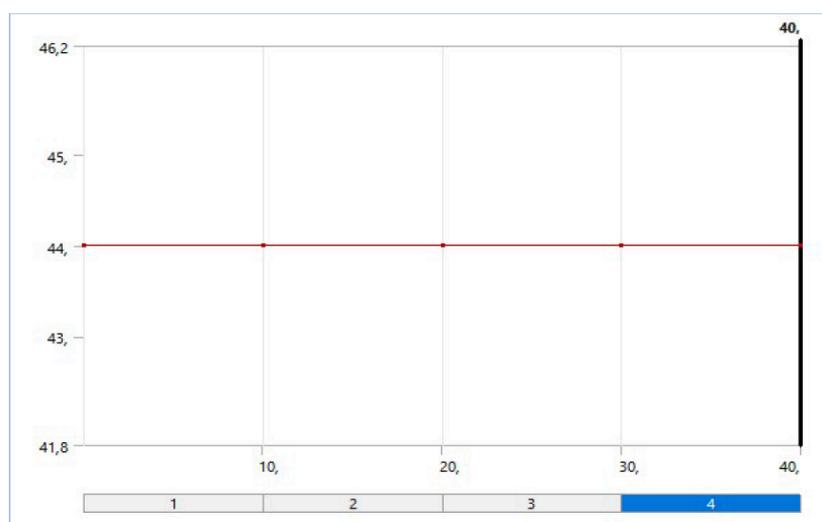


Figura 42: Step di carico Caso D.4

Il risultato ottenuto applicando tale distribuzione di temperatura sulla pavimentazione, si ottiene tale grafico, Figura 43:

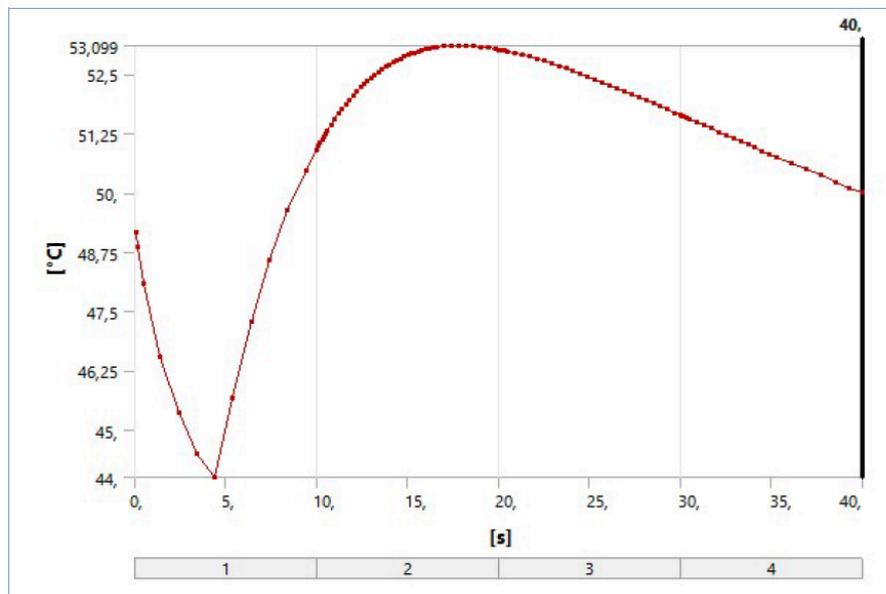


Figura 43: Risultato del caso D.4

Calibrazione del modello, relazione modello-realtà: calcolo degli spostamenti

Una volta ottenuti i risultati dal modello bisogna valutare se questi siano o meno veritieri.

Un modo per determinare se tale veridicità esista è calcolare gli spostamenti “displacement” indotti dalla temperatura sulla pavimentazione in modo analitico, bisogna quindi determinare i possibili allungamenti o accorciamenti della pavimentazione indotti dallo sbalzo termico.

Per il calcolo degli spostamenti si può utilizzare la seguente formula:

$$\Delta L = c * L * \Delta T$$

in cui:

- c = coefficiente di dilatazione termica;
- L = lunghezza della lastra di pavimentazione;
- $\Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}}$, la temperatura iniziale è pari a 22°C, la temperatura finale è funzione dei diversi casi oggetto di studio.

Data l'impossibilità di calcolare il coefficiente di dilatazione termica riferito alla totale pavimentazione, si approssima tale valore al coefficiente di dilatazione della lastra in calcestruzzo. Questo è pari a $12 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

La corrispondenza tra la realtà e modello verrà effettuata solamente sul caso A, temperatura 33°, in quanto il modello è unico per tutti i casi A, B e C e quindi la verifica può essere svolta una sola volta.

CASO A – Temperatura 33°

Si determina quindi la dilatazione, con formule teoriche, indotta dalla temperatura pari a:

$$\Delta L = c * L * \Delta T = (12 * 10^{-6}) * (4572) * (33 - 22) = 0,60 \text{ mm}$$

si nota quindi che il dato è sensibile alle variazioni del coefficiente di dilatazione e della temperatura. Come già detto vi è un'approssimazione relativa al valore del coefficiente di dilatazione, in quanto questo è preso relativo al solo calcestruzzo, non considerando gli altri materiali costitutivi della pavimentazione.

Si deduce quindi che variando di poco il coefficiente di dilatazione termica e la temperatura si otterrebbe un valore ΔL diverso ma sempre dello stesso ordine di grandezza.

Il dato di confronto degli spostamenti causati dalla temperatura proviene dai risultati dell'analisi transient structural; la quale verrà spiegata nel dettaglio nel capitolo successivo.

Per comprendere meglio come si relazionano i dati output ottenuti dall'analisi transient thermal con i dati di input immessi in tale analisi, ai fini della determinazione dello spostamento, si decide di calcolare gli spostamenti con analisi transient structural in entrambi i casi ed aggiungere a questi la semplice imposizione di un andamento di temperatura pari a 33° costante nel tempo. Come già detto i casi che verranno tenuti in considerazione dell'analisi transient thermal sono i casi estremi 1 e 2.

Di seguito si riporta un breve riassunto degli andamenti di temperatura utilizzati per determinare gli spostamenti:

- Dati input caso 1 analisi transient thermal
- Dati output caso 1 analisi transient thermal
- Dati input caso 2 analisi transient thermal
- Dati output caso 2 analisi transient thermal
- Temperatura costante pari a 33°

Andamento termico: dati input caso 1 analisi transient thermal

In questo tipo di analisi, a differenza del calcolo puramente teorico, si è tenuto in conto dell'andamento della temperatura di input immessi nell'analisi transient thermal, Figura 44.

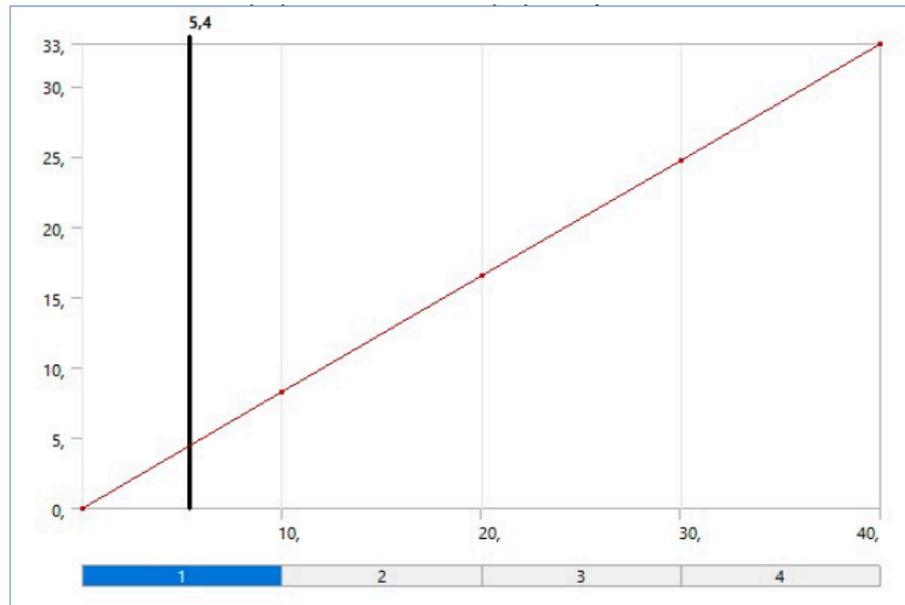


Figura 44: Andamento temperatura, dati input caso 1 thermal

Il sistema di riferimento è stato preso con l'origine delle ascisse nel vertice estremo inferiore della pavimentazione, con direzione lungo la lunghezza della pavimentazione stessa.

Tabella 21: Spostamenti relativi al caso 1- dati input

X [mm]	ΔL [mm]
0	0,000
52	0,005
104	0,010
156	0,016
208	0,021
260	0,026
312	0,032
364	0,037
416	0,042
468	0,048
520	0,053
572	0,058
624	0,064
676	0,069
728	0,074
780	0,080
832	0,085
884	0,090
936	0,096

988	0,101
1040	0,106
1092	0,111
1144	0,117
1196	0,122
1248	0,127
1300	0,133
1352	0,138
1404	0,143
1456	0,149
1508	0,154
1560	0,159
1612	0,165
1664	0,170
1716	0,175
1768	0,181
1820	0,186
1872	0,191
1924	0,197
1976	0,202
2028	0,207
2080	0,212
2132	0,218
2184	0,223
2236	0,228
2288	0,234
2340	0,239
2392	0,244
2444	0,250
2496	0,255
2548	0,260
2600	0,266
2652	0,271
2704	0,276
2756	0,282
2808	0,287
2860	0,292
2912	0,298
2964	0,303
3016	0,308
3068	0,309

3120	0,319
3172	0,324
3224	0,329
3276	0,335
3328	0,340
3380	0,345
3432	0,351
3484	0,356
3536	0,358
3588	0,367
3640	0,372
3692	0,377
3744	0,383
3796	0,388
3848	0,393
3900	0,399
3952	0,404
4004	0,409
4056	0,414
4108	0,420
4160	0,424
4212	0,425
4264	0,431
4316	0,436
4368	0,441
4420	0,446
4472	0,452
4524	0,457
4572	0,462

Come si nota il valore dello spostamento massimo è in prossimità della zona tra la lastra 1 e la lastra 2 ed è pari a 0,46 mm. Si nota lo stesso ordine di grandezza del calcolo teorico e la correttezza del dato è pari al **76%**, aumentabile considerando le osservazioni fatte circa la temperatura e il coefficiente di dilatazione termica.

Andamento termico: dati output caso 1 analisi transient thermal

In questo tipo di analisi, a differenza del calcolo puramente teorico, si è tenuto in conto dell'andamento della temperatura di output immessi nell'analisi transient thermal, Figura 45.

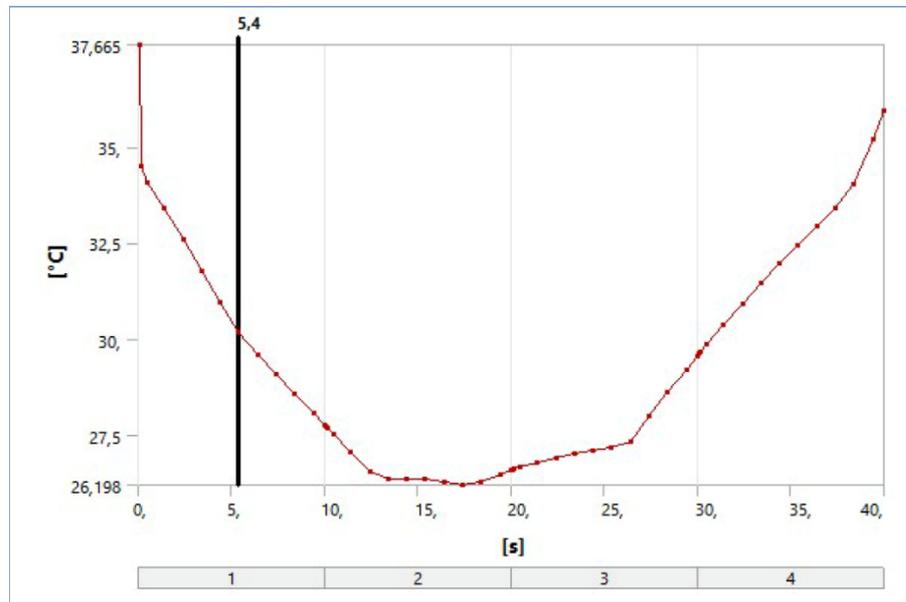


Figura 45: Andamento temperatura, dati output caso 2 thermal

Il sistema di riferimento è stato preso con l'origine delle ascisse nel vertice estremo inferiore della pavimentazione, con direzione lungo la lunghezza della pavimentazione stessa.

Tabella 22: Spostamenti relativi al caso 1- dati output

X [mm]	ΔL [mm]
0	0,000
52	0,008
104	0,016
156	0,025
208	0,031
260	0,037
312	0,042
364	0,048
416	0,055
468	0,061
520	0,067
572	0,073

624	0,079
676	0,085
728	0,091
780	0,097
832	0,103
884	0,109
936	0,115
988	0,121
1040	0,127
1092	0,134
1144	0,140
1196	0,146
1248	0,152
1300	0,158
1352	0,164
1404	0,170
1456	0,176
1508	0,182
1560	0,188
1612	0,194
1664	0,200
1716	0,205
1768	0,210
1820	0,215
1872	0,219
1924	0,224
1976	0,229
2028	0,233
2080	0,238
2132	0,242
2184	0,247
2236	0,251
2288	0,255
2340	0,259
2392	0,264
2444	0,268
2496	0,272
2548	0,277
2600	0,281
2652	0,286
2704	0,288

2756	0,292
2808	0,296
2860	0,300
2912	0,305
2964	0,311
3016	0,315
3068	0,317
3120	0,322
3172	0,326
3224	0,328
3276	0,332
3328	0,334
3380	0,337
3432	0,341
3484	0,345
3536	0,351
3588	0,358
3640	0,364
3692	0,368
3744	0,371
3796	0,375
3848	0,381
3900	0,388
3952	0,395
4004	0,401
4056	0,407
4108	0,414
4160	0,420
4212	0,434
4264	0,446
4316	0,458
4368	0,468
4420	0,472
4420	0,479
4420	0,481
4572	0,497

Come si nota il valore dello spostamento massimo è in prossimità della zona tra la lastra 1 e la lastra 2 ed è pari a 0,46 mm. Si nota lo stesso ordine di grandezza del calcolo teorico e la

correttezza del dato è pari al **83%**, aumentabile considerando le osservazioni fatte circa la temperatura e il coefficiente di dilatazione termica.

Andamento termico: dati input caso 2 analisi transient thermal

In questo tipo di analisi, a differenza del calcolo puramente teorico, si è tenuto in conto dell'andamento della temperatura di input immessi nell'analisi transient thermal, Figura 46.

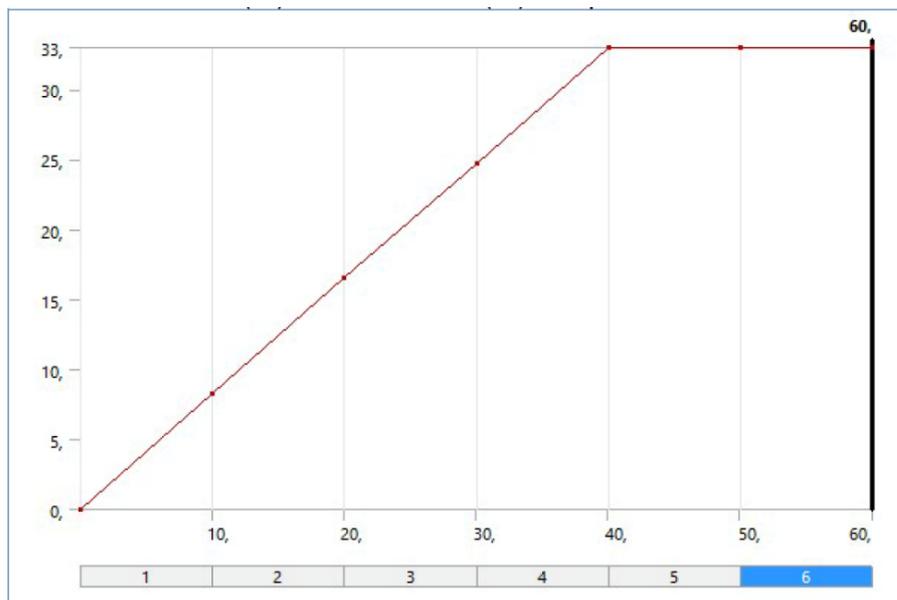


Figura 46: Andamento temperatura, dati input caso 2 thermal

Il sistema di riferimento è stato preso con l'origine delle ascisse nel vertice estremo inferiore della pavimentazione, con direzione lungo la lunghezza della pavimentazione stessa.

Tabella 23: Spostamenti relativi al caso 2- dati input

X [mm]	ΔL [mm]
0	0,000
52	0,012
104	0,021
156	0,030
208	0,039
260	0,055
312	0,067

364	0,087
416	0,099
468	0,111
520	0,124
572	0,136
624	0,156
676	0,186
728	0,221
780	0,225
832	0,229
884	0,231
936	0,233
988	0,235
1040	0,237
1092	0,239
1144	0,242
1196	0,244
1248	0,246
1300	0,248
1352	0,250
1404	0,252
1456	0,254
1508	0,256
1560	0,259
1612	0,262
1664	0,266
1716	0,270
1768	0,274
1820	0,278
1872	0,282
1924	0,286
1976	0,290
2028	0,294
2080	0,297
2132	0,301
2184	0,305
2236	0,309
2288	0,313
2340	0,317
2392	0,321
2444	0,325

2496	0,329
2548	0,332
2600	0,335
2652	0,337
2704	0,339
2756	0,341
2808	0,343
2860	0,345
2912	0,347
2964	0,349
3016	0,352
3068	0,354
3120	0,356
3172	0,358
3224	0,360
3276	0,362
3328	0,364
3380	0,366
3432	0,368
3484	0,371
3536	0,373
3588	0,375
3640	0,377
3692	0,379
3744	0,381
3796	0,383
3848	0,385
3900	0,388
3952	0,390
4004	0,392
4056	0,394
4108	0,398
4160	0,402
4212	0,405
4264	0,409
4316	0,413
4368	0,417
4420	0,419
4472	0,422
4524	0,423
4572	0,424

Come si nota il valore dello spostamento massimo è in prossimità della zona tra la lastra 1 e la lastra 2 ed è pari a 0,46 mm. Si nota lo stesso ordine di grandezza del calcolo teorico e la correttezza del dato è pari al **70%**, aumentabile considerando le osservazioni fatte circa la temperatura e il coefficiente di dilatazione termica.

Andamento termico: dati output caso 2 analisi transient thermal

In questo tipo di analisi, a differenza del calcolo puramente teorico, si è tenuto in conto dell'andamento della temperatura di output immessi nell'analisi transient thermal, Figura 47.

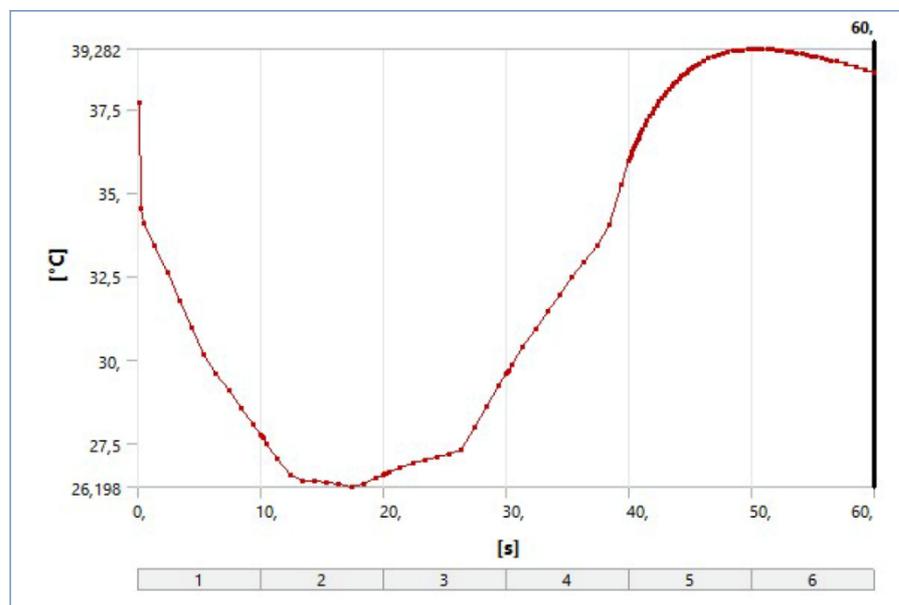


Figura 47: Andamento temperatura, dati output caso 2 thermal

Il sistema di riferimento è stato preso con l'origine delle ascisse nel vertice estremo inferiore della pavimentazione, con direzione lungo la lunghezza della pavimentazione stessa.

Tabella 24: Spostamenti relativi al caso 2- dati output

X [mm]	ΔL [mm]
0	0,000
52	0,010
104	0,011
156	0,013
208	0,014
260	0,015
312	0,015

364	0,016
416	0,016
468	0,017
520	0,017
572	0,017
624	0,018
676	0,019
728	0,020
780	0,020
832	0,020
884	0,021
936	0,021
988	0,022
1040	0,023
1092	0,025
1144	0,026
1196	0,027
1248	0,029
1300	0,029
1352	0,030
1404	0,031
1456	0,031
1508	0,032
1560	0,032
1612	0,033
1664	0,033
1716	0,035
1768	0,035
1820	0,038
1872	0,041
1924	0,044
1976	0,054
2028	0,057
2080	0,061
2132	0,064
2184	0,073
2236	0,083
2288	0,086
2340	0,095
2392	0,096
2444	0,098

2496	0,100
2548	0,103
2600	0,105
2652	0,108
2704	0,111
2756	0,113
2808	0,116
2860	0,118
2912	0,121
2964	0,124
3016	0,126
3068	0,129
3120	0,131
3172	0,134
3224	0,136
3276	0,138
3328	0,139
3380	0,141
3432	0,143
3484	0,144
3536	0,146
3588	0,147
3640	0,149
3692	0,150
3744	0,419
3796	0,419
3848	0,421
3900	0,422
3952	0,423
4004	0,424
4056	0,425
4108	0,426
4160	0,427
4212	0,428
4264	0,429
4316	0,430
4368	0,431
4420	0,432
4472	0,422
4524	0,432
4572	0,442

Come si nota il valore dello spostamento massimo è in prossimità della zona tra la lastra 1 e la lastra 2 ed è pari a 0,46 mm. Si nota lo stesso ordine di grandezza del calcolo teorico e la correttezza del dato è pari al **73%**, aumentabile considerando le osservazioni fatte circa la temperatura e il coefficiente di dilatazione termica.

Andamento termico: dati output temperatura costante pari a 33°

In questo tipo di analisi, a differenza del calcolo puramente teorico, si è tenuto in conto dell'andamento della temperatura di output immessi nell'analisi transient thermal, Figura 48.

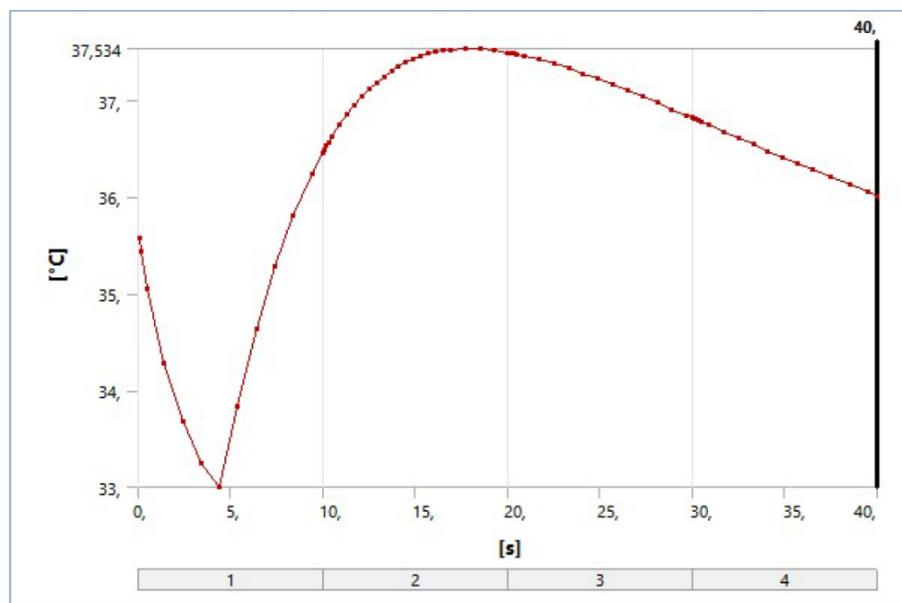


Figura 48: Andamento temperatura, dati output caso temperatura costante

Il sistema di riferimento è stato preso con l'origine delle ascisse nel vertice estremo inferiore della pavimentazione, con direzione lungo la lunghezza della pavimentazione stessa.

Tabella 25: Spostamenti relativi al caso temperatura costante

X [mm]	ΔL [mm]
0	0,000
52	0,012
104	0,012
156	0,175
208	0,218
260	0,285
312	0,303
364	0,306

416	0,308
468	0,311
520	0,313
572	0,316
624	0,318
676	0,321
728	0,323
780	0,326
832	0,328
884	0,331
936	0,333
988	0,336
1040	0,338
1092	0,341
1144	0,343
1196	0,346
1248	0,348
1300	0,351
1352	0,353
1404	0,356
1456	0,358
1508	0,361
1560	0,363
1612	0,366
1664	0,368
1716	0,370
1768	0,372
1820	0,374
1872	0,376
1924	0,378
1976	0,380
2028	0,382
2080	0,384
2132	0,386
2184	0,388
2236	0,390
2288	0,392
2340	0,394
2392	0,396
2444	0,398
2496	0,400

2548	0,402
2600	0,405
2652	0,407
2704	0,409
2756	0,411
2808	0,413
2860	0,415
2912	0,417
2964	0,419
3016	0,421
3068	0,423
3120	0,425
3172	0,427
3224	0,429
3276	0,431
3328	0,433
3380	0,435
3432	0,437
3484	0,439
3536	0,441
3588	0,443
3640	0,446
3692	0,448
3744	0,450
3796	0,452
3848	0,454
3900	0,456
3952	0,458
4004	0,460
4056	0,462
4108	0,464
4160	0,466
4212	0,468
4264	0,470
4316	0,472
4368	0,474
4420	0,476
4472	0,478
4524	0,480
4572	0,482

Come si nota il valore dello spostamento massimo è in prossimità della zona tra la lastra 1 e la lastra 2 ed è pari a 0,46 mm. Si nota lo stesso ordine di grandezza del calcolo teorico e la correttezza del dato è pari al **79%**, aumentabile considerando le osservazioni fatte circa la temperatura e il coefficiente di dilatazione termica.

Risultati calibrazione

Si riporta di seguito un riassunto dei dati ottenuti, questo permetterà di capire quale è la distribuzione termica che permette di ottenere i risultati più prossimi ai teorici.

Tabella 26: Risultati confronto modello-realtà

<i>Caso dell'analisi termica</i>	<i>Correttezza del risultato</i>
Dati input caso 1 analisi transient thermal	76%
Dati output caso 1 analisi transient thermal	83%
Dati input caso 2 analisi transient thermal	70%
Dati output caso 2 analisi transient thermal	73%
Dati output temperatura costante pari a 33°	79%

Dalla Tabella 26, sopra riportata si deduce che il caso a cui corrisponde il risultato più simile al teorico è il secondo, "***Dati output caso 1 analisi transient thermal***".

Per ottenere una migliore precisione si è svolta nuovamente l'analisi introducendo punto a punto i dati termici e non più l'approssimazione che si era fatta nel primo tentativo. Per brevità non si riporta la tabella dei dati ottenuti ma il dato ottenuto con tale analisi è pari ad una percentuale di correttezza del dato del 93,56%.

Con l'ultima analisi svolta il valore del $\Delta L_{(analisi)}$ è pari a 0,565 mm mentre il $\Delta L_{(teorico)}$ a 0,603 mm.

La non perfetta uguaglianza tra i dati teorici e quelli pratici potrebbe essere imputata alle ipotesi fatte circa il coefficiente di dilatazione termica C e il ΔT .

In particolare, è stato utilizzato nel calcolo teorico il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo come rappresentativo dell'intera pavimentazione. Tale coefficiente è il medesimo anche per l'acciaio, pari a $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, mentre per lo strato equivalente è più basso intorno a $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; si potrebbe pensare di tenere in conto anche di questo ultimo strato assumendo un valore leggermente più basso.

Per quanto riguarda il $\Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}}$ si è utilizzata la temperatura finale di 33° anche se il grafico di questa analisi è di tipologia non lineare; utilizzando un valore leggermente più alto di temperatura si arriverebbe ad una precisione maggiore.

Utilizzando gli ultimi due accorgimenti:

- $C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $T_{\text{fin}} = 35^\circ \text{ C}$

Si arriverebbe ad un calcolo teorico $\Delta L_{(\text{teorico})} = 0,594 \text{ mm}$ che confrontato con il valore $\Delta L_{(\text{analisi})} = 0,565 \text{ mm}$, comporta una correttezza del dato del 95%.

Le ultime due precisazioni non pregiudicano le analisi del modello relative a sforzi e deformazioni infatti sono ulteriori ipotesi fatte che modificano il dato teorico e non quello pratico.

In conclusione le analisi che da ora verranno effettuate saranno svolte con i dati output dell'analisi transient thermal in cui:

- T_{finale} = dati output analisi transient thermal con crescita lineare della temperatura;
- $T_{\text{iniziale (ambiente)}}$ = 22° costante, ANSYS non prevede la possibilità di creare una analisi transient anche sulla temperatura iniziale;
- I valori del calore specifico e della conduttività termica per l'acciaio e il cls presi da normativa e per lo strato equivalente approssimati tenendo in conto dei valori del cls. Si è verificata tale approssimazione, questa influisce solo sul secondo decimale della temperatura massima ottenuta con l'analisi.

Determinazione casistiche di studio

Nel Capitolo 4 di questo elaborato di tesi sono stati riportati le formulazioni teoriche e gli articoli presenti in letteratura circa le temperature della pavimentazione rigida aeroportuale. Come ultimo caso è stato poi introdotto l'utilizzo del modello Ansys con analisi transient thermal per poter determinare la temperatura della pavimentazione utilizzando come dati di ingresso le temperature climatologiche, si ricorda che questo modello è stato successivamente validato.

Si riporta di seguito un riassunto dei casi citati, Tabella 27, conseguentemente verranno scelti tra questi i casi di studio da applicare al modello, descritto nel dettaglio nel Capitolo 5.

Tabella 27: Casi di studio per la determinazione dei carichi termici

Caso	Vantaggi e Limiti	Applicazione al modello
Dati temperature climatologiche	Vantaggio: facilità di recupero dei dati Limite: non vi sono legami con la temperatura registrata all'interno della pavimentazione	No
Modello Barber	Vantaggio: legame tra la temperatura della pavimentazione con lo spessore e <u>le ore del giorno</u> Limite: non si tiene in conto della variazione della temperatura tra l'alba e lo zenit e tra il tramonto e l'alba. Alcuni parametri della formula dipendono da valori solo stagionali.	No Si utilizzerà il modello più avanzato della formula di Barber.
Modello Faraggi, Jofre e Kramer (alba-zenit)	Vantaggio: legame tra la temperatura della pavimentazione con: spessore, <u>ore del giorno</u> , variazione alba-tramonto e tramonto-alba. Limite: alcuni parametri della formula dipendono da valori solo stagionali.	Si Caso stagionale Caso mensile
Articolo degli autori: Siddique, Hossain, Meggers.	Vantaggio: legame tra la temperatura della pavimentazione con <u>le ore del giorno</u> e spessore. I risultati derivano da uno studio sperimentale.	Si Caso giornaliero

Modello Ansys- analisi transient thermal (caso con variazione lineare della temperatura climatologica)	Vantaggio: possibilità di usare lo stesso modello per le analisi transient structural Limite: sono stati usati i dati climatologici come dati di input per ottenere le temperature della pavimentazione. Nonostante siano stati studiati 3 casi che tengano in conto delle temperature mensili e stagionali <u>non vi è legame con le ore del giorno e lo spessore.</u>	Si Caso stagionale
--	---	---------------------------

Come riportato in Tabella 27 i casi che saranno oggetto di studio si divideranno in:

- Casi stagionali:
 - o Modello Faraggi, Jofre e Kramer (alba-zenit) tiene in conto della variazione oraria e dello spessore,
 - o Modello Ansys
- Casi mensili:
 - o Modello Ansys
- Caso giornaliero:
 - o Articolo Siddique, Hossain, Meggers; legame della temperatura con variazione oraria e spessore.

5- Modellazione di una pavimentazione rigida aeroportuale

In questo capitolo si descrive nel dettaglio il modello già citato nel Capitolo 4, utilizzato per determinare le temperature all'interno della pavimentazione. Lo stesso modello sarà poi utilizzato nel capitolo 6 per svolgere le analisi strutturali.

Prove alla base del modello

Il modello realizzato è basato sui dati pervenuti dall'elaborato di tesi: *“Analisi tenso-deformativa di una pavimentazione rigida aeroportuale sottoposta a carichi di traffico”* redatta da Expòsito Balastegui Miriam [10].

Il modello della pavimentazione fa riferimento ad una pavimentazione reale su cui sono state svolte diverse prove effettuate direttamente dall' FAA.

Le prove sono state effettuate con uno strumento chiamato *Falling/Heavy Weight Deflectometer*, il quale valuta le proprietà strutturali delle pavimentazioni con la particolarità di essere una prova non distruttiva. La differenza è data dal carico applicato alla pavimentazione, infatti:

- Falling Weight Deflectometer: il carico applicato è circa 40 kN;
- Heavy Weight Deflectometer: il carico applicato è circa 300-600 kN.

Da questo si deduce che in campo aeroportuale la prova deflettometrica utilizzata è la HWD, proprio perché riesce a simulare il passaggio degli aerei pesanti.

Il funzionamento dello strumento consiste nell' attuare una sequenza di carichi impulsivi alla pavimentazione applicati attraverso la caduta di una massa ad una determinata altezza. [10] Questa massa colpisce una piastra posizionata nella sezione della pavimentazione che viene considerata nello studio e questa trasmette il carico alla pavimentazione. Il carico simula il caricamento associato al passaggio di una ruota di un aereo in movimento. Una cella di carico montata sulla parte superiore della piastra di carico misura il carico impartito alla superficie della pavimentazione.

4.1 PAVIMENTAZIONI DI RIFERIMENTO FAA

I modelli creati in questo capitolo sono basati su una pavimentazione di riferimento progettata e sviluppata per la FAA. Il progetto della FAA comprende due sezioni di pavimentazioni, una rigida ed una flessibile. La lunghezza è di 1828,8 cm e la larghezza è di 457,2 cm per ogni sezione di pavimentazione. In questo elaborato di tesi ci si concentrerà sulla pavimentazione rigida.

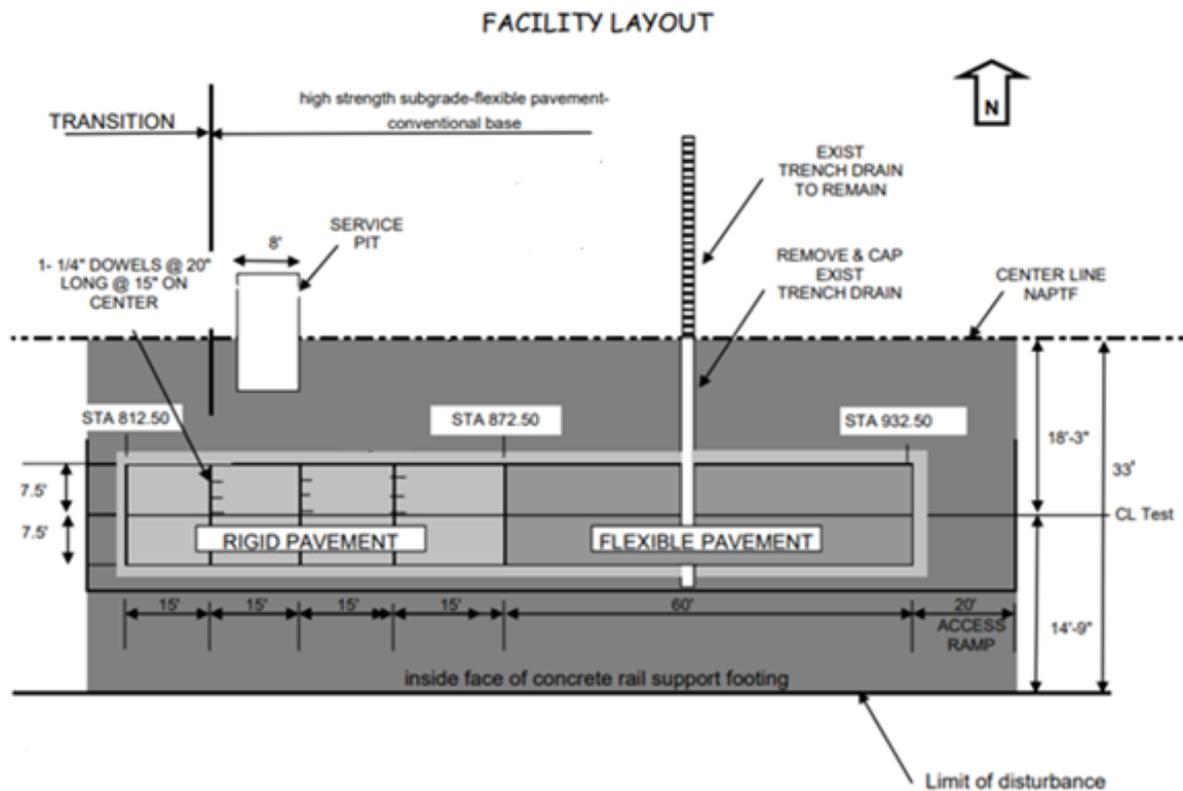


Figura 49: Layout della pavimentazione progettata per la FAA

Analizzando la pavimentazione rigida, questa è composta da 4 lastre, una accanto all'altra. Le quattro lastre sono quadrate con delle dimensioni predefinite 15 piedi * 15 piedi, ovvero 457,2 cm * 457,2 cm.

Nei giunti trasversali sono presenti le barre di compartecipazione, dowel bars, che hanno il ruolo di trasmettere il carico da una lastra all'altra. Queste barre di compartecipazione hanno un diametro di 1,25 pollici ovvero 3,175 centimetri, la lunghezza è di 20 pollici (50,8 cm) e sono distanti 15 pollici (38,1 cm) da centro a centro.

Descrivendo invece i materiali di questa pavimentazioni di riferimento, si può così riassumere la sovrastruttura:

- Strato superficiale: lastra in calcestruzzo di 16 pollici (406,4 mm) di spessore costruita con materiale P501 (PCC)
- Base: stabilizzata di 6 pollici (152,4mm) di spessore e formata da materiale P-306 "Econcrete Base Course".

Tra i materiali è prevista anche una mano di attacco per migliorare e garantire l'adesione tra questi, favorendo così la distribuzione del carico su tutta la pavimentazione e non solo sullo strato più superficiale.

- Sottofondo: costruito con materiale ad alta resistenza (CBR 25-30) il quale è stato in parte scavato per poter posizionare un sottofondo di resistenza media (CBR 5-7) formato da Argille DuPont. Questo sottofondo di resistenza media è costruito da 7 strati di 8 pollici (203,2 mm) ciascuno.
-

In Figura 50, si nota come è costituita la pavimentazione di riferimento.

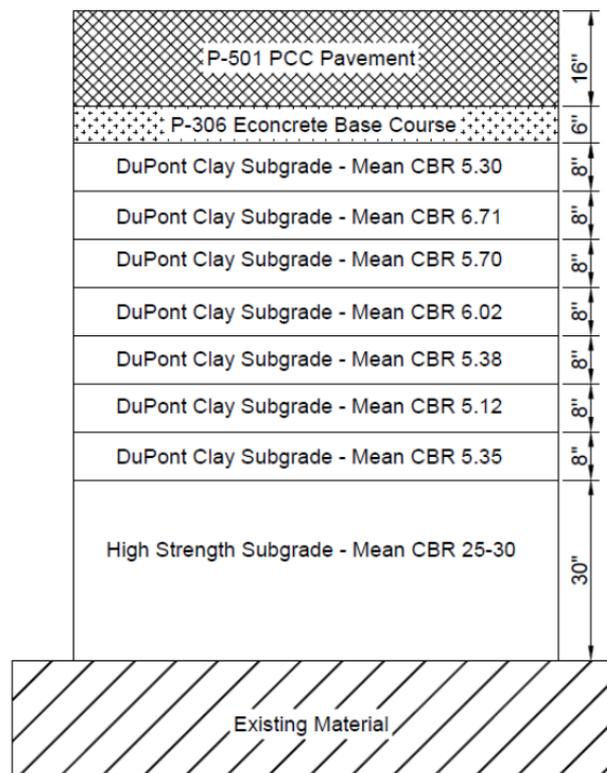


Figura 50: Pavimentazione di riferimento FAA

Questa pavimentazione soddisfa i limiti di dimensioni imposti dalla FAA, i limiti riguardano le dimensioni delle lastre e le dimensioni delle Dowel Bar. Si ricorda infatti che per quanto riguarda le lastre in calcestruzzo la massima dimensione permessa è di 17,5 piedi (5,3m) in quanto lo spessore della lastra è di 16 pollici (406,4 mm). Per quanto riguarda le barre di compartecipazione queste devono avere un diametro di 1,25 pollici (31,75 mm), una lunghezza di 20 pollici (508 mm) e devono essere spaziate tra loro di 15 pollici (381 mm).

Materiali

I materiali che sono stati utilizzati nella pavimentazione di riferimento FAA sono:

- P501 PCC MIX
- P306 Econcrete Base Course
- Argille DuPont
- Terreno ad alta resistenza

Prima di introdurre le caratteristiche dettagliate di ogni materiale si vuole fare una nota circa i risultati ottenuti nell'elaborato di tesi precedente [10].

Nell'elaborato di tesi precedente, è stato dapprima realizzato un Modello 1 il quale pur rappresentando esattamente la pavimentazione rigida appena descritta non permetteva di ridurre le dimensioni delle mesh. Per questa motivazione è stato introdotto un secondo modello, Modello 2, che ha ovviato questo problema considerando lo stato inferiore come uno strato equivalente. Lo strato equivalente va quindi a sostituire:

- P-306 Econcrete Base Course
- Argille Dupont
- Terreno ad alta resistenza

Per le barre di compartecipazione in acciaio, Dowel Bars si fa sempre riferimento all'acciaio.

P501 PCC MIX

Il mix P-501 segue le specifiche imposte dall' AC 150/5370-10E Parte VI [11]. Il mix consiste in un aggregato grossolano #57, un aggregato grossolano medio #8, sabbia per calcestruzzo, cemento Portland tipo 1 e aria. Le proporzioni del mix per iarda cuba si possono trovare nella Tabella 28.

Tabella 28: Proporzioni P-501 PCC mix per iarda cuba, FAA

Materiali	
Aggregato grossolano n. 57, lbs	1475
Aggregato grossolano medio n. 8, lbs	490
Sabbia per calcestruzzo, lbs	1225
Acqua, lbs	230
Cemento Portland tipo 1, lbs	500
Aria %	7
Rapporto acqua/cemento	0,46

Per quanto riguarda le caratteristiche degli aggregati e le gradazioni di questi, vengono riportati nel dettaglio le composizioni.

➤ Aggregato grossolano n.57

- Peso specifico: 2,76
- Peso unitario asciutto: 101 lb/Cu ft
- Percentuali di vuoti: 49%
- Assorbimento: 0,4%
- La percentuale perdita di abrasione: 16,30%
- Composizione:

Tabella 29: Composizione aggregato grossolano n.57

Setaccio	% Passante	ASTM C-33
1 ½ "	100	100
1"	99,1	95-100
¾ "	90,2	
½ "	52,1	25-60
3/8 "	25	
#4"	8,8	0-10
#8"	3,7	0-5

➤ Aggregato grossolano medio n.8

- Peso specifico: 2,76
- Peso unitario asciutto: 101 lb/Cu ft
- Percentuali di vuoti: 49%
- Assorbimento: 0,6%
- La percentuale perdita di abrasione: N/A
- Composizione:

Tabella 30: Composizione aggregato MEDIO n.8

Setaccio	% Passante	ASTM C-33
1 ½ "	100	100
3/8 "	87,3	85-100
#4"	19,5	10-30
#8"	4,0	0-10
#16"	1,8	0-5

➤ Sabbia per calcestruzzo

- Peso specifico: 2,63
- Peso unitario asciutto: 105 lb/Cu ft

- Percentuali di vuoti: 37%
- Assorbimento: 0,4%
- Composizione:

Tabella 31: Composizione sabbia per calcestruzzo

Setaccio	% Passante	ASTM C-33
3/8"	100	100
#4"	96,9	95-100
#8"	88	80-100
#16"	74,9	50-85
#30"	48,6	25-60
#50"	20,6	10-30
#100"	1,7	1-10
#200"	0,4	0-3
MODULO DI FINEZZA	2,69	2,3-3,1

Sono state anche svolte delle prove sui campioni delle miscele del calcestruzzo per valutare la resistenza a flessione e compressione. Questi i dati rilevati:

- Resistenza a flessione media 28 giorni: 4,82 MPa
- Resistenza a compressione: 27,58 MPa

La resistenza a flessione soddisfa i requisiti minimi richiesti, infatti questa doveva essere compresa tra i 4,14 e 5,17 MPa.

STRATO EQUIVALENTE

Lo Strato equivalente, come già detto, sostituisce questi strati:

- P-306 Econcrete Base Course
- Argille Dupont
- Terreno ad alta resistenza

Viene anch'esso considerato come un materiale elastico lineare isotropo omogeneo, per la definizione del materiale serve anche in questo caso definire il modulo di elasticità e il coefficiente di Poisson equivalente.

Partendo dalla definizione che la variazione della lunghezza totale dello strato equivalente è data dalla somma delle variazioni di lunghezza dei 3 strati che si sostituiscono, si può scrivere che:

$$\Delta L = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3.$$

In cui:

- ΔL = variazione di lunghezza totale
- $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ = variazione di lunghezza nello strato di base Econcrete, strato di argilla DuPont e strato di terreno ad alta resistenza rispettivamente

Dato che la variazione di lunghezza può essere scritta in funzione del modulo di elasticità e dello sforzo applicato, allora si può scrivere:

$$\Delta L = \varepsilon l = \frac{l}{E} \sigma$$

In cui:

- ε : deformazione
- E : modulo di elasticità

- σ : sforzo applicato

E di conseguenza, applicando l'equazione per i tre strati della pavimentazione:

$$\frac{L}{E'} \sigma = \frac{l_1}{E_1} \sigma_1 + \frac{l_2}{E_2} \sigma_2 + \frac{l_3}{E_3} \sigma_3$$

Dove:

- E' : modulo di elasticità equivalente dello strato equivalente (MPa)
- E_1 : modulo di elasticità dello strato di base Econcrete (MPa)
- E_2 : modulo di elasticità dello strato di argille DuPont (MPa)
- E_3 : modulo di elasticità dello strato di terreno ad alta resistenza (MPa)
- L : spessore dello strato equivalente dello strato equivalente (mm)
- l_1 : spessore dello strato di base Econcrete (mm)
- l_2 : spessore dello strato di argille DuPont (mm)
- l_3 : spessore dello strato di terreno ad alta resistenza (mm)
- σ : sforzo nello strato equivalente (MPa)
- σ_1 : sforzo nello strato di base Econcrete (MPa)
- σ_2 : sforzo nello strato di argille DuPont (MPa)
- σ_3 : sforzo nello strato di terreno ad alta resistenza (MPa)

Considerando σ costante in tutti gli strati allo scopo di semplificare il problema si ottiene:

$$E' = \frac{L}{\frac{l_1}{E_1} + \frac{l_2}{E_2} + \frac{l_3}{E_3}}$$

Lo spessore dello strato equivalente si è considerato pari a 1000 mm, sostituendo si ottiene:

$$E' = \frac{1000}{\frac{152,4}{16823} + \frac{1422,4}{186} + \frac{762}{262}} = 94,65 \text{ MPa}$$

Il valore ottenuto è un valore numero approssimato a causa delle semplificazioni ma è troppo basso, in accordo con quanto riportato nell'elaborato di tesi precedente [10].

Il valore che si è tenuto in considerazione per il modulo di elasticità dello strato equivalente è pari a 110 MPa.

Per quanto concerne la determinazione del coefficiente di Poisson equivalente (ν'), si è considerato un valore pari a 0,35, poiché gli strati sostituiti avevano un coefficiente di Poisson compreso tra 0,33 e 0,35.

ACCIAIO

L'acciaio viene utilizzato per rappresentare le barre di compartecipazione anche dette Dowel Bars.

Per rappresentare l'acciaio è stato utilizzato *Structural Steel* che era già contenuto del database dei materiali di Ansys. Si riportano di seguito le caratteristiche nella seguente Tabella 32:

Tabella 32: Caratteristiche Structural Steel

$E= 200\ 000\ MPa$	$\nu= 0,30$
--------------------	-------------

4.2 MODELLAZIONE CON ANSYS

Per creare il modello descritto nel paragrafo precedente riguardante quindi una pavimentazione rigida aeroportuale di geometria e materiali noti, si è utilizzato il programma Ansys 19.2 nella versione studenti.

Il software Ansys è un valido strumento per l'analisi agli elementi finiti. Questo permette non solo di analizzare il comportamento strutturale ma anche altri comportamenti dinamici; in questo elaborato di tesi però si utilizzerà l'applicativo legato alle temperature "Transient Structural". L'uso di questo programma è determinante per capire il comportamento della pavimentazione soggetto a sollecitazioni e deformazioni termiche.

Per costruire il modello in Ansys si è utilizzato l'applicativo WorkBench. Ogni aspetto che deve essere caricato nel modello viene costruito in maniera a sé stante. La particolarità è che, dato

che ogni componente del modello è indipendente, si può unire la stessa geometria a materiali differenti e viceversa; tutti questi modelli verranno salvati nello stesso file Ansys.

Dapprima si procede a costruire la geometria, successivamente si determinano le caratteristiche dei materiali, le condizioni di simmetria e le condizioni al contorno. Per ultimo si determinano le mesh e i carichi termici a cui la pavimentazione è soggetta.

Definizione della geometria

All'interno del WorkBench, dopo aver selezionato la modalità Transient Structural e conseguentemente Geometry, si apre un file di disegno in cui è possibile disegnare la geometria del modello.

Un modo differente per costruire il modello potrebbe essere quello di utilizzare l'applicativo di Ansys, Mechanical e scrivere il codice a cui è legato il modello.

In questo elaborato di tesi si procederà ad inserire il modello per via grafica.

Dato che vi erano solo informazioni circa la geometria e la spaziatura tra le barre di compartecipazione e nessuna circa la larghezza dei giunti, allora si è ipotizzata questa pari a 17 mm. Un'altra approssimazione è stata quella di non considerare il materiale sigillante.

Come riportato nell'elaborato *“Analisi tenso-deformativa di una pavimentazione rigida aeroportuale sottoposta a carichi di traffico”* redatta da Expòsito Balastegui Miriam [10], la spaziatura tra il centro della barra n e il centro della barra $n+1$, è pari a 381 m e dato che ogni lastra ha una larghezza di 4572 mm, la distanza limite tra il bordo della lastra e la prima barra di compartecipazione sia pari a 254 mm; per questo motivo sono state inserite in ogni giunto della pavimentazione 11 barre di compartecipazione lunghe 508 mm ciascuna.

La geometria finale del modello della pavimentazione viene riportata nelle seguenti figure.

Lungo l'asse x viene riportata la lunghezza della pavimentazione, visibile in Figura 51.

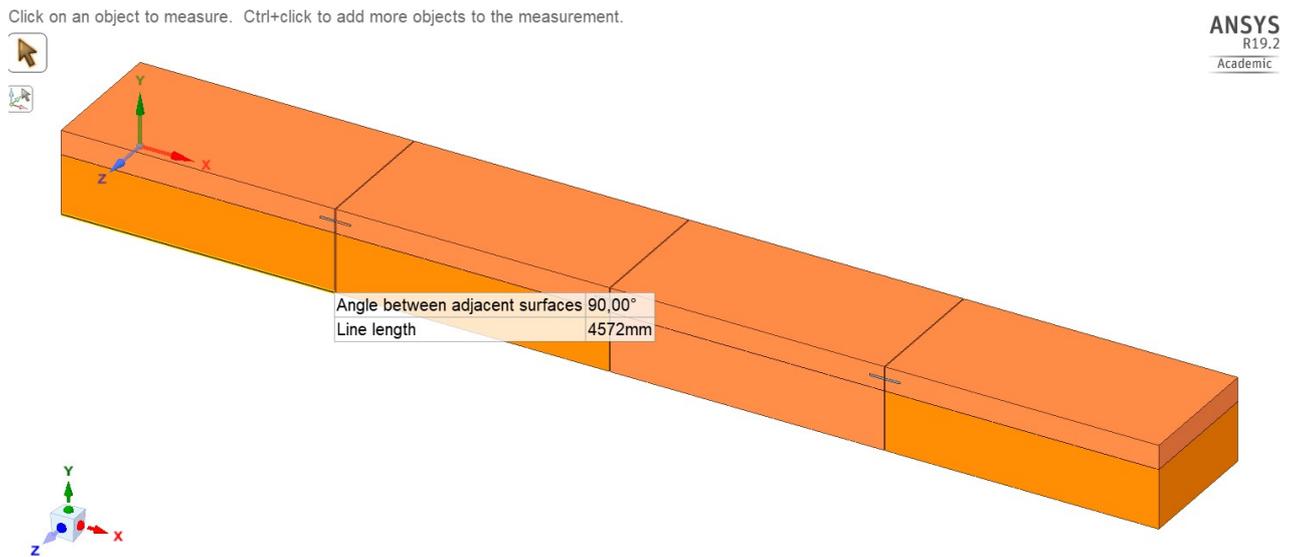


Figura 51: Modello pavimentazione in Ansys Geometry, particolare lunghezza pavimentazione

Lungo l'asse z viene riportato lo spessore della pavimentazione, riportata nella Figura 52 seguente:

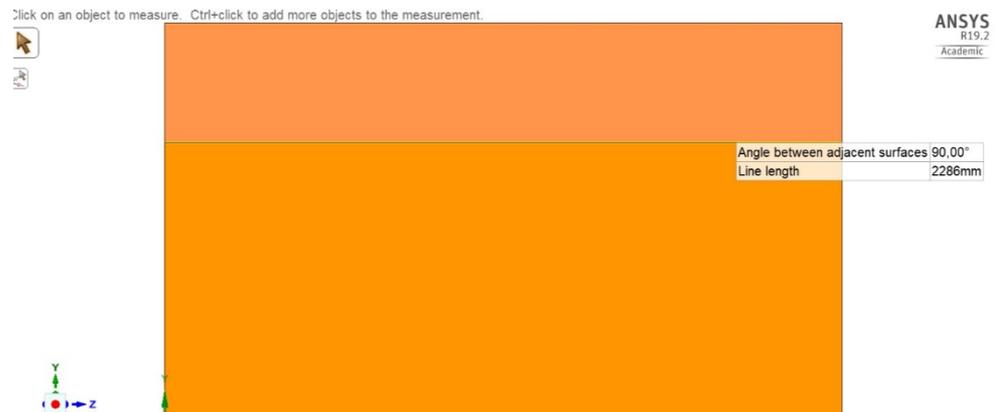


Figura 52: Modello pavimentazione in Ansys Geometry, particolare spessore della pavimentazione

Lungo l'asse y viene riportata l'altezza degli strati della pavimentazione, riportata nella figura 53 seguente:

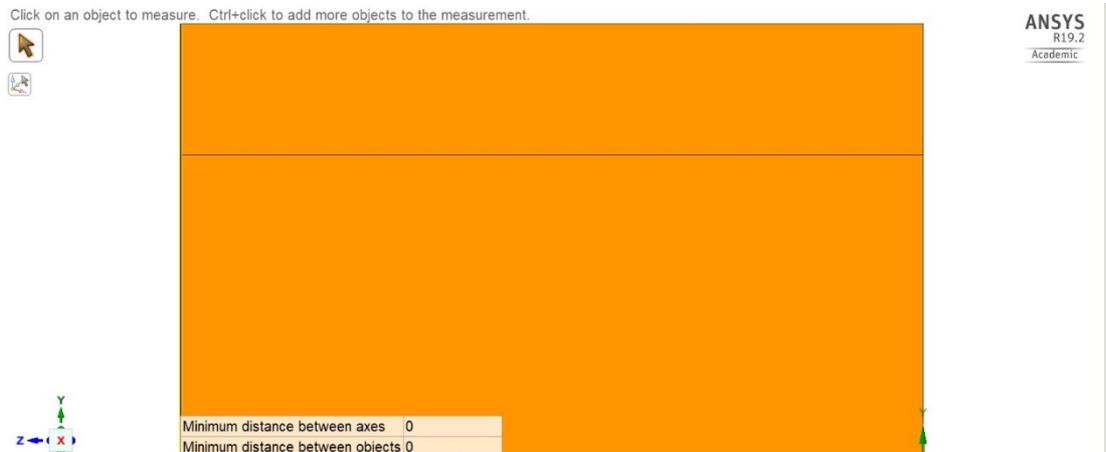


Figura 53: Modello pavimentazione in Ansys Geometry, particolare altezza della pavimentazione

Si riportano di seguito i particolari relativi alla disposizione delle barre di compartecipazione.

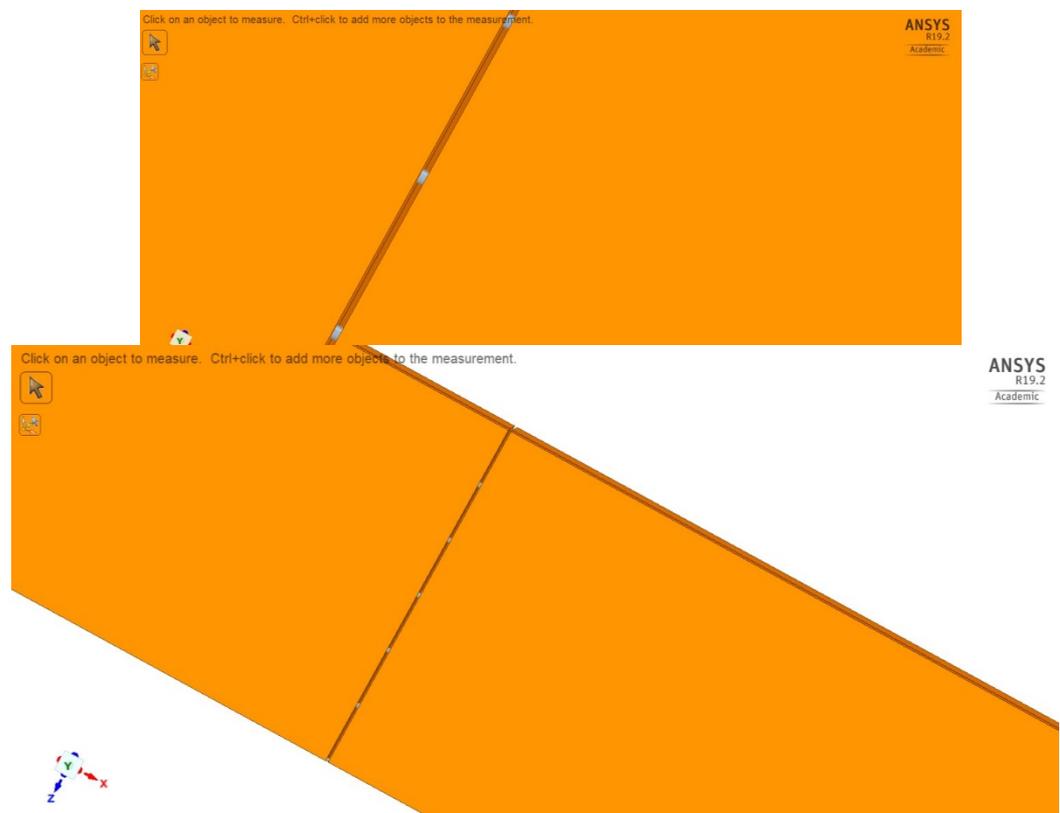


Figura 54: Particolari relativi alle barre di compartecipazione

Definizione dei materiali

Dopo aver costruito la geometria del modello, sempre all'interno dello stesso file di Work Bench si seleziona la voce Engineering Data sempre all'interno della stessa modalità di Transient Structural.

Per i materiali che vengono introdotti all'interno del modello: P-501 PCC mix e strato equivalente, già descritti alla fine del paragrafo 4.1, sono state applicate le seguenti semplificazioni:

- I materiali sono stati considerati come elastici lineari, si considera che i materiali sottoposti ad un determinato sforzo subiscano una deformazione proporzionale allo sforzo secondo un fattore di proporzionalità E detto modulo di Young.
- I materiali sono stati considerati come isotropi, viene quindi considerata l'invarianza delle relazioni costitutive deformazioni-tensioni per qualsiasi rotazione rigida del sistema di riferimento. I materiali mantengono lo stesso comportamento in tutte le direzioni.
- I materiali sono considerati come omogenei cioè le caratteristiche e densità dei materiali rimangono costanti in tutti i punti del corpo.

Per inserire queste semplificazioni all'interno della finestra di lavoro dedicata ai materiali bisogna definire il modulo di Young E ed il coefficiente di Poisson ν . Infatti, mediante questi dati di ingresso, il programma determina il modulo di compressibilità e il modulo di taglio in maniera automatica.

Per il materiale *P-501 PCC mix*, essendo nota solo la resistenza a 28 giorni a flessione e compressione, si è dovuta utilizzare la formula empirica che lega il modulo di elasticità E alla resistenza a compressione a 28 giorni f_{ck} per determinare il modulo di Young. La formula utilizzata è la seguente:

$$E = 22000 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3}$$

in cui:

- E: modulo di elasticità del calcestruzzo [MPa],
- f_{ck} : resistenza alla compressione del calcestruzzo ai 28 giorni [MPa]

Poiché la resistenza media a compressione del calcestruzzo a 28 giorni è pari a 26,39 MPa, sostituendo tale valore si ottiene:

$$E = 22000 \left(\frac{26,39 + 8}{10} \right)^{0,3} = 31869 \text{ MPa}$$

Per quanto riguarda il coefficiente di Poisson, dato che non si avevano delle informazioni in merito, si è considerato un valore pari a 0,18, poiché il range di valori era compreso tra 0,15 e 0,20.

Si riporta di seguito la tabella riepilogativa del materiale P-501 PCC mix, estratta dalla sezione materiali del modello.

P 501 PCC					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
4	Derive from	Young's Modulu...			
5	Young's Modulus	31869	MPa		<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,18			<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	1,6598E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	1,3504E+10	Pa		<input type="checkbox"/>

Figura 55: Dati estratti dal report del modello riferiti al materiale P501 PCC

Per lo *stato equivalente* è stato già descritto; il procedimento che è stato eseguito per ottenere i valori del modulo di Young e del coefficiente di Poisson.

Si riporta di seguito la tabella riepilogativa del materiale strato equivalente, estratta dalla sezione materiali del modello.

STRATO EQUIVALENTE

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	X	CP
2	Material Field Variables	Table			
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulu...			

Figura 56: Dati estratti dal report del modello riferiti allo strato equivalente

Di seguito viene riportata una schermata esemplificativa dello strato equivalente così come viene visualizzata in Ansys Engineering Data.

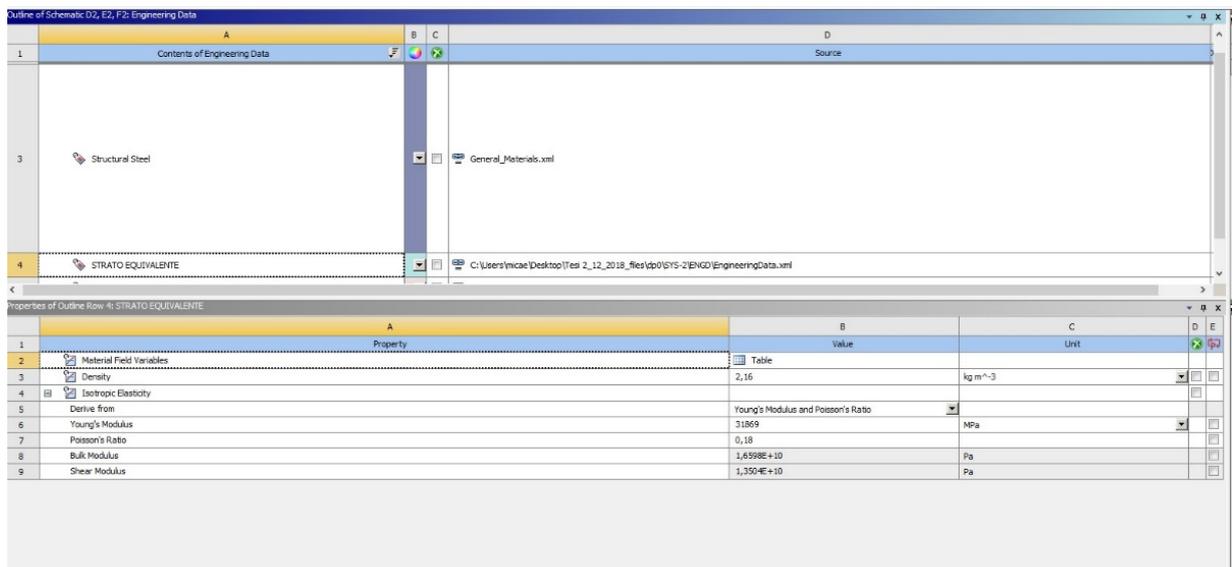


Figura 57: Visuale di Ansys Engineering data, materiale strato equivalente

In conclusione si possono riassumere le caratteristiche fondamentali dei materiali utilizzati nel modello, nella Tabella 33 seguente:

Tabella 33: Materiali usati nel modello

Strato	Modulo di young [E]	Coefficiente di Poisson [ν]
P-501 PCC	31869	0,18
STRATO EQUIVALENTE	110	0,35

Per le barre di compartecipazione è stato invece utilizzato un materiale già presente nel database di Ansys, **structural steel**, come detto nel capitolo precedente. Si riporta di seguito la tabella riepilogativa del materiale estratta dal report del modello.

Structural Steel				
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulu...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
16	Strain-Life Parameters			
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Figura 58: Dati estratti dal report del modello riferiti a structural steel

Definizione dei carichi dati dal peso proprio

Il modello oggetto di studio è sottoposto al carico dato al peso proprio.

Per potere inserire in ANSYS questo carico si è calcolata la densità di ciascun materiale sopra descritto e si è aggiunta tale voce alla finestra di *Engineering Data* di ogni materiale.

Per il **P501 PCC MIX** si è considerata una densità di 2400 kg/m³.

Per lo **strato equivalente** si è andata a considerare una media tra tutte le densità dei materiali che vengono rappresentati dallo strato equivalente, in conclusione si è considerata una densità di 2,18 kg/m³.

Per lo **Structural Steel** i dati riferiti alla densità del materiale erano già determinati dal database del programma; la densità del materiale risulta essere pari a 7850 kg/m³.

Definizione delle connessioni, piani di simmetria, condizioni al contorno e sistema di coordinate globali

Dopo aver determinato la struttura geometrica del modello della pavimentazione si devono definire le connessioni tra i diversi materiali, piani di simmetria, condizioni al contorno e il sistema di coordinate globali.

La tipologia di **connessioni** deve essere definita in modo molto preciso dato che influenza la risposta strutturale della pavimentazione.

Le connessioni create sono relative a:

- Contatto barra di compartecipazione – lastra di calcestruzzo;
- Contatto lastra di calcestruzzo – strato equivalente;
- Strato superiore
- Strato inferiore

Le connessioni sono definite come *Bonded* per far sì che lo scorrimento o la separazione tra le facce o bordi non fossero permessi; più specificatamente si voleva che i materiali fossero incollati tra di loro per la connessione tra le barre di compartecipazione e la lastra in cls e per lo strato inferiore.

Le connessioni tra la lastra in cls P501 e lo strato equivalente è definito come No Separation come anche le connessioni tra le piastre stesse e per lo stato superiore. Questa connessione permette di far sì che i materiali possano separarsi tra di loro per meglio determinare la risposta alle temperature.

Per quanto riguarda il piano di simmetria si è utilizzata la voce Symmetry Region e si sono individuate le 8 facce che costituiscono il piano di simmetria del modello.

Il **sistema di riferimento** di coordinate globali si trova nella superficie dello strato equivalente nella parte centrale.

Definizione della Mesh

Per determinare le mesh si utilizza la voce *Mesh* presente nel menù a sinistra.

Le mesh costituiscono un reticolo composto da vertici, spigoli e facce, il termine in inglese significa proprio “maglia”, “rete”.

Intuitivamente le mesh ripartiscono la superficie in maglie poligonali simili a triangoli, quadrilateri.

In ansys vi è un limite nella creazione di elementi e nodi ma si è cercato di sfruttare al massimo il numero realizzabile.

Si sono creati 31086 nodi e 6342 elementi. La grandezza della mesh è stata presa inizialmente omogenea e pari a $1,57 \cdot 10^{-2}$ m con un'area della mesh pari a $2,1147 \text{ m}^2$.

Di seguito viene riportata la schermata del programma Ansys riferita alle mesh.

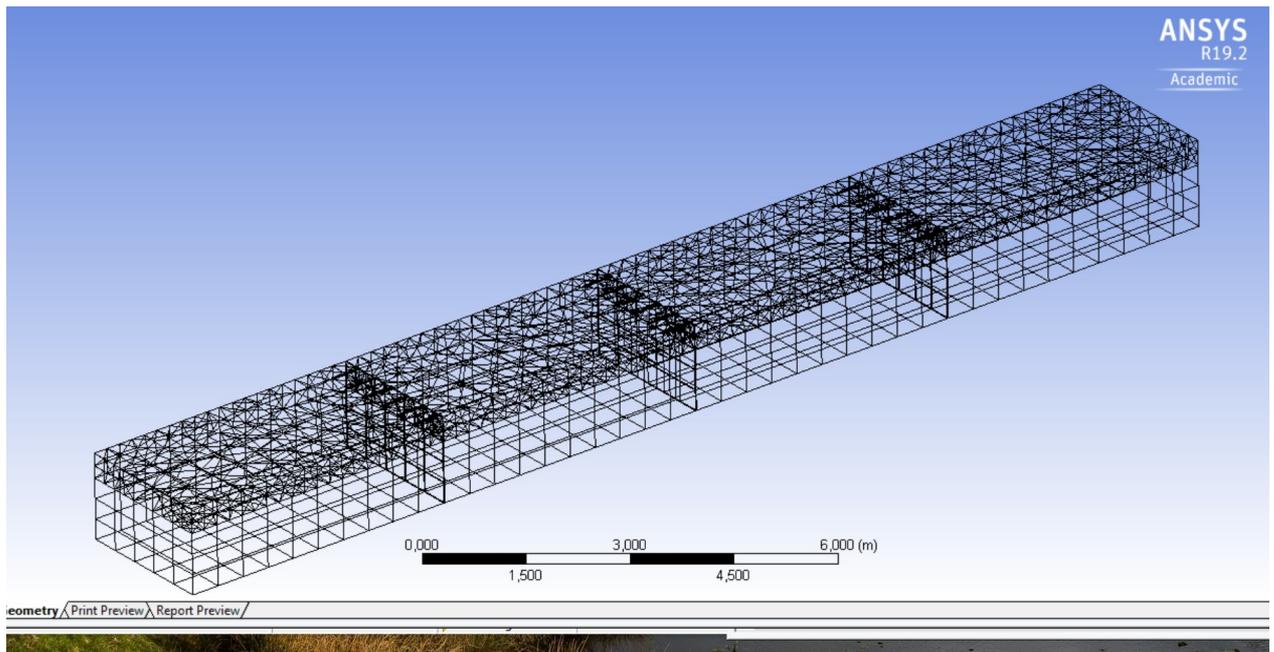


Figura 59: Programma Ansys, realizzazione mesh omogenee

6- Analisi Transient Structural

L'analisi transitoria per definizione coinvolge carichi che sono funzione del tempo, in particolare le analisi transient structural permettono in questo elaborato di tesi di studiare gli effetti dei carichi termici sulla struttura ed in particolare studiarne lo stato tensionale.

Le analisi transient structural, dette anche analisi cronologiche temporali, sono state effettuate utilizzando il risolutore ANSYS Mechanical. Questo tipo di analisi viene utilizzato per determinare la risposta dinamica di una struttura sotto l'azione di qualsiasi carico generale dipendente dal tempo, in questo caso specifico carichi termici dipendenti dal tempo, come precisato nella descrizione dell'applicativo Ansys [12]

Una parte dei risultati delle analisi transient structural, come anticipato in precedenza, è già stato utilizzato nella calibrazione del modello. In particolare è stato utilizzato lo stesso identico modello geometrico dell'analisi transient thermal e una distribuzione di carichi termici dipendente dai casi analizzati e si sono estrapolati i dati relativi agli spostamenti, displacement. Dalla calibrazione del modello si è dedotto che la distribuzione termica che più si avvicina alla realtà con una percentuale di correttezza del 94% è pari a quella ottenuta dai risultati dell'analisi transient thermal con una distribuzione iniziale imposta di temperatura con crescita lineare.

Dopo questa ultima precisazione si procede alla descrizione della componente operativa dell'analisi transient structural la quale è stata necessaria sia per la calibrazione del modello sia per l'ottenimento dei risultati relativi allo stato tensionale.

Operativamente nell'analisi transient structural per prima cosa si devono completare i vari campi relativi all'impostazione dell'analisi, *Analysis Settings*. Di seguito verrà riportata una descrizione di tale impostazione e successivamente verrà descritta la componente relativa alle *Initial Conditions*.

[Analysis settings](#)

Si riporta di seguito la descrizione dei campi dell'analysis settings, la quale si distingue nei seguenti campi:

Large Deflection

Nel caso in cui l'impostazione sia attiva, on, si terranno in conto delle variazioni di rigidità causati da una grande deflessione, una grande rotazione e un grande deformazione e di fatto i risultati ottenuti saranno più accurati ma questo richiede un ciclo iterativo di soluzioni che potrebbe richiedere più tempo.

Step Controls

I vari Step consentono di controllare la dimensione del passo temporale in un'analisi transitoria. È utile prevedere l'utilizzo di più steps se i nuovi carichi vengono introdotti o rimossi in momenti diversi nella cronologia di caricamento o se si desidera modificare le impostazioni di analisi come la dimensione del passo temporale in alcuni punti della cronologia.

Nonlinear controls

I controlli non lineari consentono di modificare i criteri di convergenza e altri controlli di soluzioni specializzate. In genere non è necessario modificare i valori predefiniti per questo controllo. Questa proprietà riguarda solo le analisi non lineari.

Analysis Data Management

Le impostazioni di Gestione dati analisi consentono di salvare i file di soluzione specifici dall'analisi strutturale transitoria per l'utilizzo in altre analisi. Il comportamento predefinito è di conservare solo i file necessari per la post-elaborazione.

Di seguito i dati fissi inseriti nell'analysis settings:

- Numero di steps: variano a seconda delle temperature
- Tempo iniziale del singolo step: 1 e^{002} secondi
- Minimo tempo iniziale del singolo step: 1 e^{003} secondi
- Massimo tempo di step: 0,1 secondi
- Geometria su cui è definita la prova: tutto il volume

Initial conditions

Essendo un'analisi transitoria con dipendenza dei carichi dal tempo, il primo passo nell'applicazione dei carichi transitori è quello di stabilire le condizioni iniziali al tempo $t=0$.

La condizione iniziale predefinita prevede che la struttura sia "a riposo" ovvero che abbia spostamento iniziale, velocità iniziale nulle. Nelle condizioni iniziali può essere modificata la velocità.

Definizione dei casi oggetto di studio

I casi oggetto di studio si distinguono in stagionali, mensili e giornalieri. Questi sono stati descritti in maniera molto dettagliata nel capitolo relativo alla determinazione dei carichi termici.

Se ne riporta di seguito una sintesi:

- Casi stagionali:
 - o Modello Faraggi, Jofre e Kramer (alba-zenit) tiene in conto della variazione oraria e dello spessore,
 - o Modello Ansys: caso 50°
- Casi mensili:
 - o Modello Ansys: caso 30° e caso 40°
- Caso giornaliero:
 - o Articolo Siddique, Hossain, Meggers; legame della temperatura con variazione oraria e spessore. In particolare verranno analizzati due casi, uno dato dall'applicazione di tutte le temperature giornaliere divise nelle due thermal conditions mentre l'altro è relativo solo alle temperature massime e minime alle ore 15:00.

La temperatura iniziale ambientale è sempre stata considerata pari a 22°C. Si precisa nuovamente che le temperature delle casistiche del modello Ansys sono pari a 30, 40 e 50° e non più 33,44,55° perché si vogliono studiare delle casistiche più generali rispetto a quelle della zona di Milano Malpensa

Nel caso del modello Ansys si sfruttano le considerazioni fatte circa l'analisi transient thermal; la distribuzione termica della temperatura utilizzata all'interno dell'analisi transient structural dipende dalle considerazioni fatte precedentemente e più nel dettaglio, la distribuzione dei carichi termici utilizzata è pari a quella ottenuta dai risultati dell'analisi transient thermal con una distribuzione di temperatura iniziale avente crescita lineare.

Ad ogni modo per tutte le analisi strutturali sopra descritte questi saranno i dati output delle varie analisi transient structural saranno relativi a:

- Stato tensionale;
- Deformazioni;

MODELLO ANSYS: casi mensili e stagionale

CASO 1- 30°C: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL

Come detto precedentemente per l'analisi transient structural si è utilizzato lo stesso modello descritto per l'analisi transient thermal.

La distribuzione termica in questa analisi è pari al risultato ottenuto dall'analisi transient thermal a 30°C, il quale è stato introdotto nell'analisi strutturale riportando punto a punto i dati di output dell'analisi transiente. In particolare i valori delle temperature sono stati applicati al modello utilizzando una Thermal Condition uguale su tutto il volume del modello, ciò comprende: lastra in cls, barre di compartecipazione e strato equivalente.

Di seguito si riporta, in Figura 60, la Thermal Condition utilizzata:

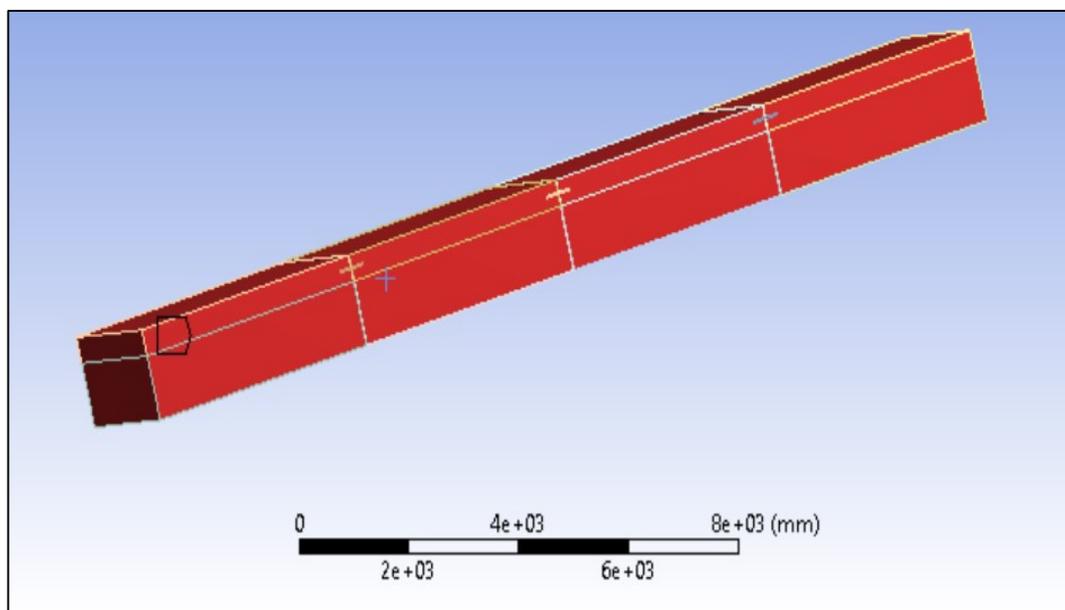


Figura 60: Thermal Condition, caso 1, 30°

Operativamente all'interno dell'analysis setting questi i parametri utilizzati:

- Number of steps: 3
- Step end time: 40 secondi
- Initial Time Step: $1 e^{-002}$ s
- Minimum Time Step: $1 e^{-003}$ s
- Maximum Time Step: 0,1 s

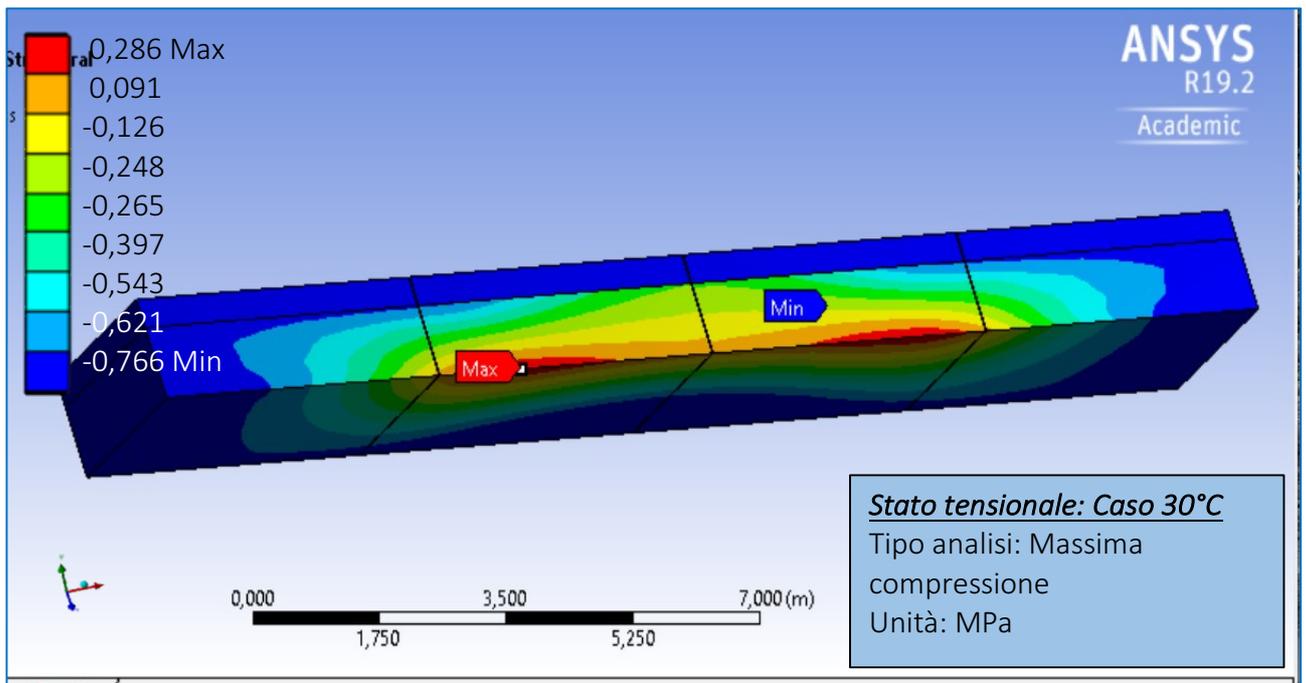
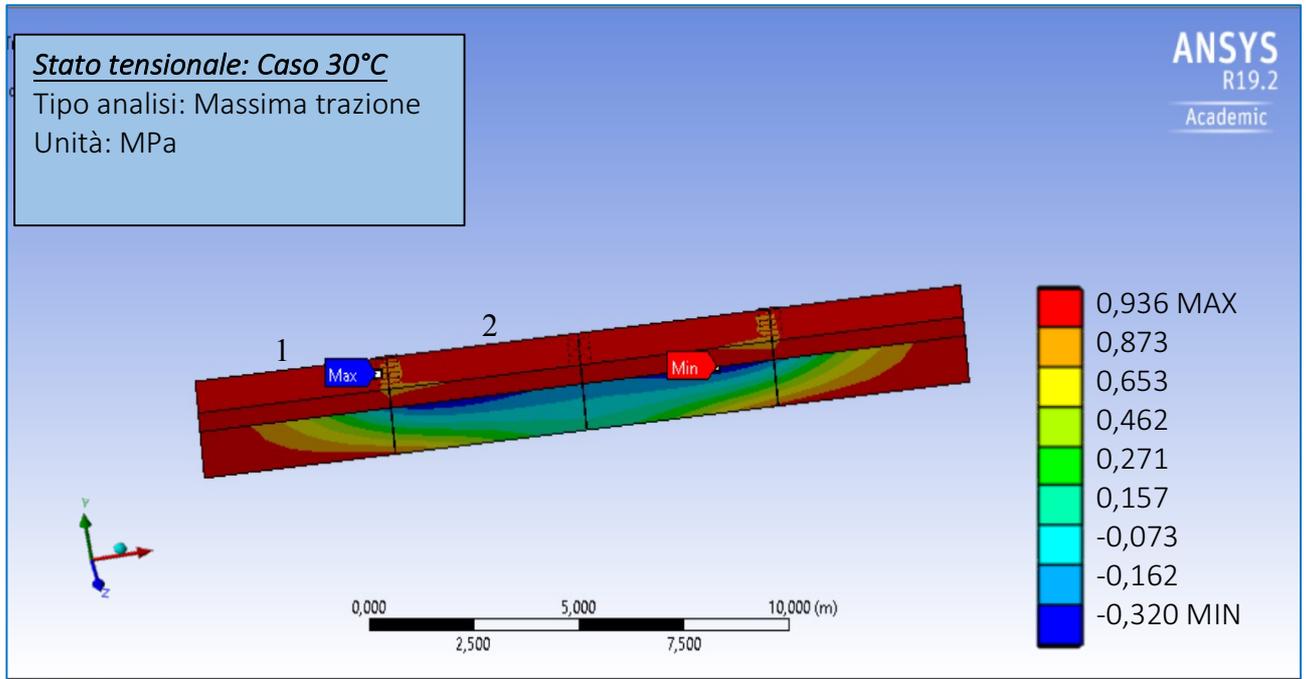
Si è quindi svolto uno studio dello stato tensionale e delle deformazioni della pavimentazione soggetta a carichi termici. Di conseguenza sono stati svolti questi due studi:

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni dell'intera pavimentazione

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni delle barre di compartecipazione

Risultati dello studio tensionale

Lo stato tensionale dell'intera pavimentazione viene riportato nella seguente figura, Figura 61.



Trazione massima: 0,936 MPa	Compressione massima: - 0,766 MPa
-----------------------------	-----------------------------------

Figura 61: Stato tensionale caso 30°C, struttura totale

Analizzando le risposte tensionali riportate in Figura 61 si deduce che tutta la pavimentazione è soggetta ad uno stato tensionale. I valori massimi di compressione sono pari a $-0,766$ MPa mentre la massima trazione è pari a $0,936$ MPa. In particolare il valore di massima trazione corrisponde alla terza barra di compartecipazione compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2; il valore massimo di compressione si trova distribuito in modo equivalente su tutta la lastra in cls. Questa ultima considerazione è a riprova del fatto che il cls lavora a compressione mentre l'acciaio a trazione.

Volendo anche analizzare lo stato tensionale nelle barre di compartecipazione, si sono isolate queste dal modello, Figura 62.

Si specifica che in Figura 62 viene riportata solo la sestina di barre di compartecipazione comprese tra i blocchi di lastra 1 e 2, vedere Figura 61, massima trazione.

La massima trazione è pari a $0,936$ e viene raggiunta nella seconda barra di compartecipazione, vedere "numero 2" in Figura 62. La massima trazione nella barra di compartecipazione risulta essere la medesima dell'intera pavimentazione.

Si presti attenzione circa la legenda delle scale dei valori, nel caso dell'analisi delle sole barre di compartecipazione si è scelto di visionare la scala invertita nei colori così da visualizzare meglio la differenza con i valori dell'intera pavimentazione.

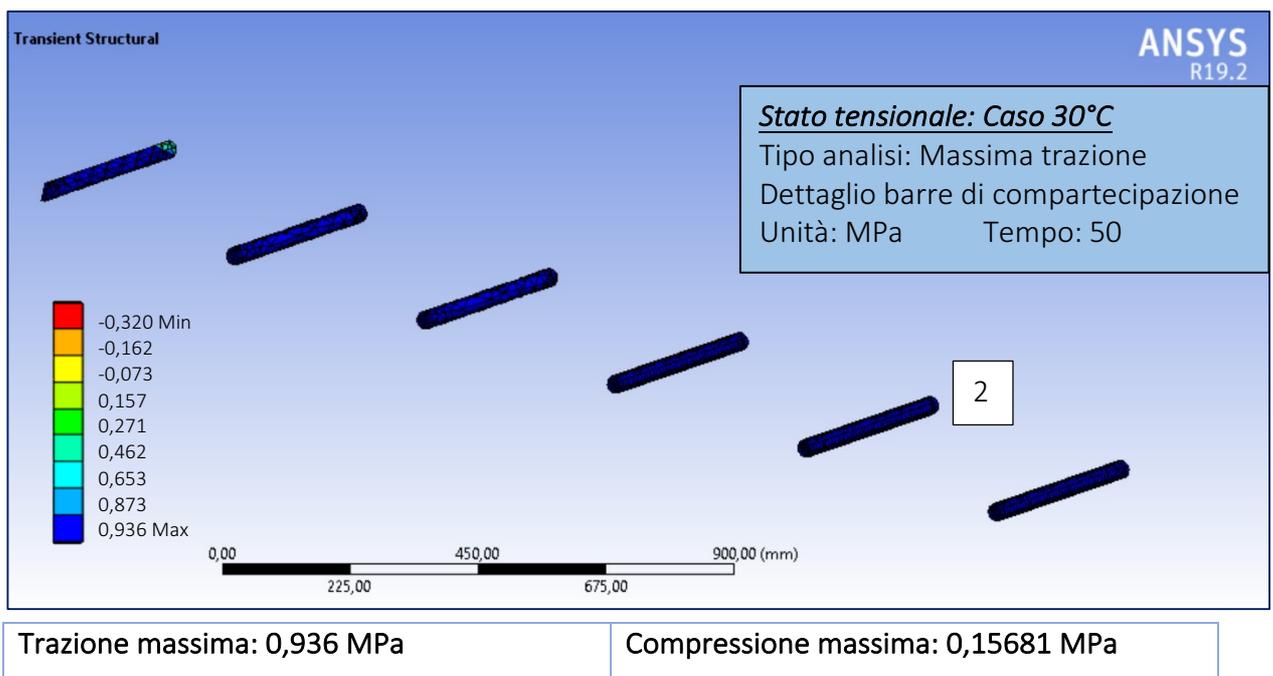


Figura 62: Stato tensionale caso 30°C , barre di compartecipazione

In Figura 63 si riporta il dettaglio dell'ultima barra di compartecipazione della serie delle sei barre in cui si nota, in prossimità del piano di simmetria che divide la barra di compartecipazione una piccola zona in cui il valore è differente rispetto all'uniformità dei valori. La soluzione in questa zona potrebbe essere verificata e migliorata andando a utilizzare delle mesh più piccole e dettagliate, definendo così il valore dello stato tensionale in maniera più precisa ma in questo elaborato di tesi è più rilevante sapere il valore dello stato tensionale della pavimentazione che il dettaglio della barra perciò non si analizzerà la situazione più dettagliatamente.

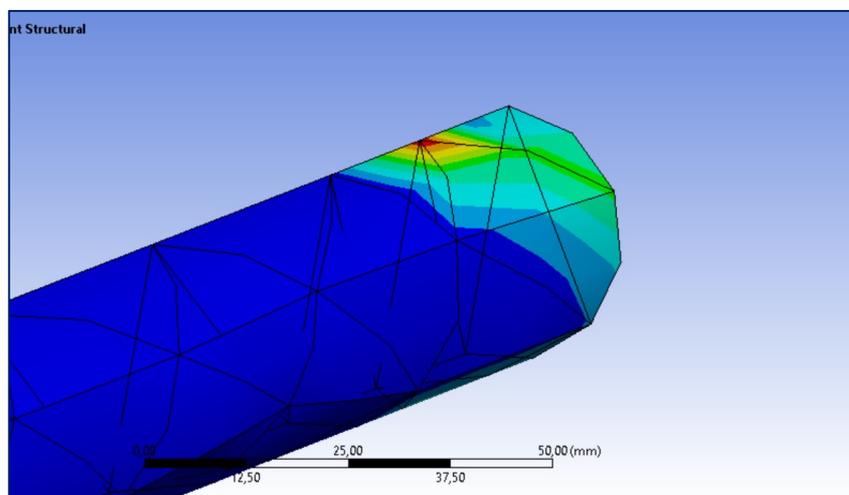


Figura 63: Dettaglio massima compressione della barra di compartecipazione, caso 30°C

Risultati dello studio deformativo

Per ogni caso oggetto di studio è stato svolto uno studio dello stato deformativo. Di seguito si riportano le deflessioni registrate sulla pavimentazione quando soggetta ad un carico termico di temperature di 30°C.

A livello quantitativo le deflessioni sono visibili in Figura 65, questa volta è stata sfruttata la funzione Total Deformation.

Da notare come lo stato deformativo sia concorde con quanto ci si aspettava circa il comportamento della pavimentazione stessa. In estate, infatti, o nelle ore calde della giornata, l'irraggiamento e la temperatura dell'aria tendono a riscaldare e quindi a dilatare la faccia superiore delle lastre; ciò però avviene in concomitanza con una riduzione di umidità del materiale che viceversa tende a contrarre la faccia superiore. I fenomeni di umidità e termogrametrici sono stati trascurati in questo elaborato di tesi in quanto vi è una scarsa entità e distribuzione opposta a questi effetti termici nei climi europei.



Figura 64: Comportamento della pavimentazione causato dal riscaldamento

In Figura 65 si riporta il comportamento deformativo della pavimentazione soggetta a carichi termici pari a 30°C.

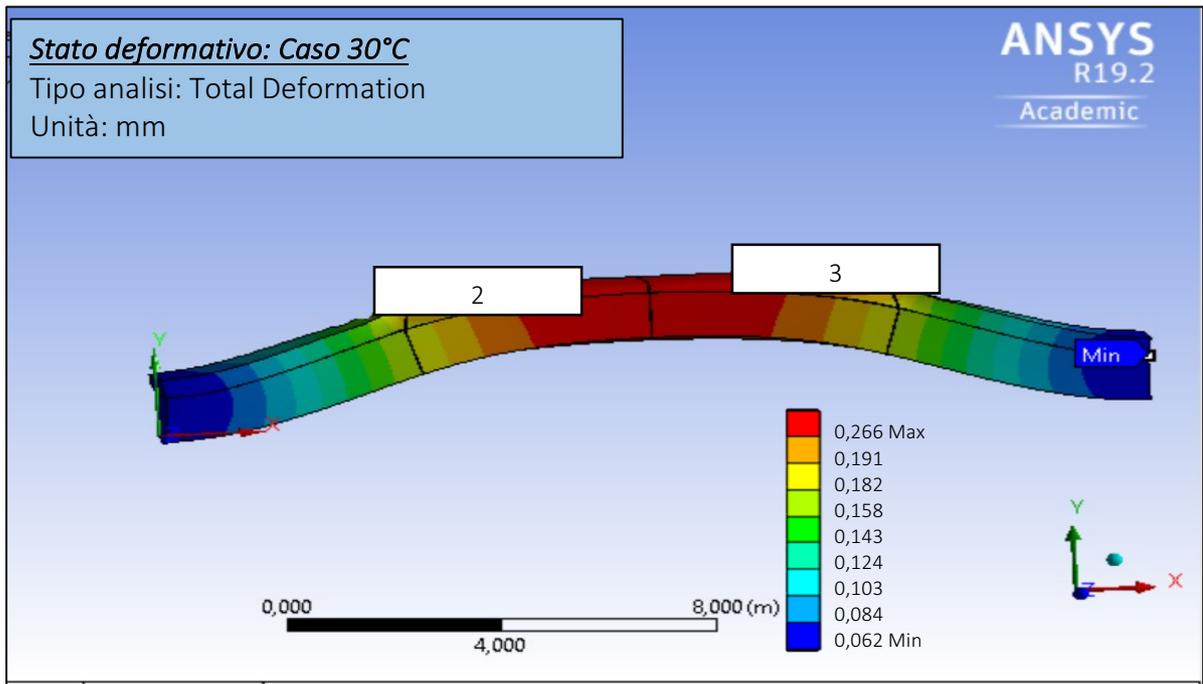


Figura 65: Total Deformation, caso 30°C

Deflessione massima: 0,266 mm	Deflessione minima: 0 mm	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,266 mm
----------------------------------	-----------------------------	---

La deformazione massima è pari a 0,266 mm e viene raggiunta all'interno dei blocchi 2 e 3 della pavimentazione, si veda in Figura 65 i numeri "2" e "3".

CASO 2- 40°C: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL

Come detto precedentemente per l'analisi transient structural si è utilizzato lo stesso modello descritto per l'analisi transient thermal.

La distribuzione termica in questa analisi è pari al risultato ottenuto dall'analisi transient thermal a 40°C, il quale è stato introdotto nell'analisi strutturale riportando punto a punto i dati di output dell'analisi transiente. In particolare i valori delle temperature sono stati applicati al modello utilizzando una Thermal Condition uguale su tutto il volume del modello, ciò comprende: lastra in cls, barre di compartecipazione e strato equivalente.

Di seguito si riporta, in Figura 66, la Thermal Condition utilizzata:

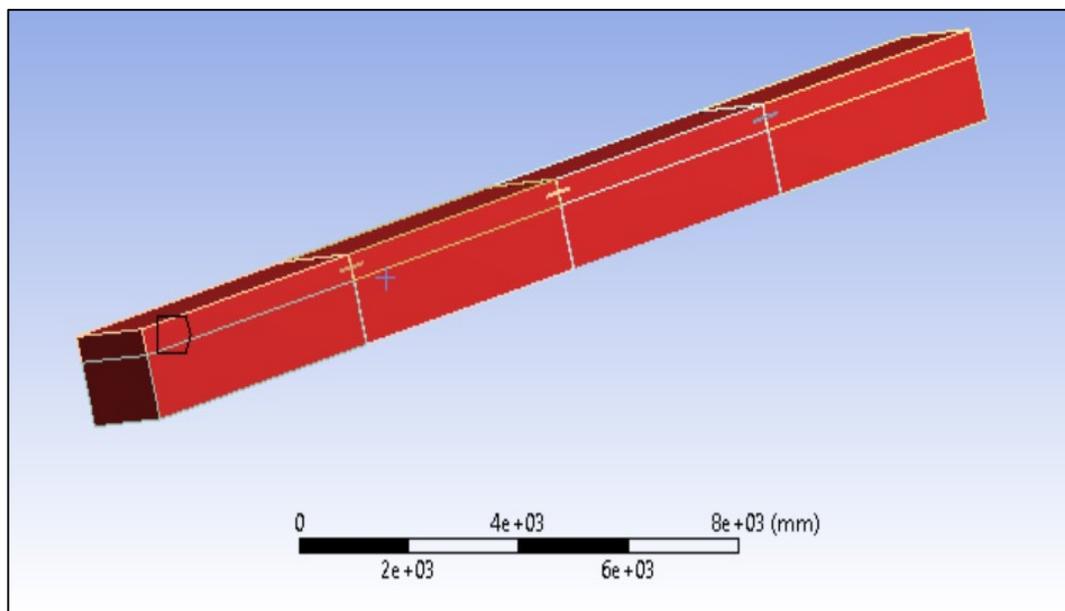


Figura 66: Thermal Condition, caso 40°

Operativamente all'interno dell'analysis setting questi i parametri utilizzati:

- Number of steps: 4
- Step end time: 40 secondi
- Initial Time Step: $1 e^{-002}$ s
- Minimum Time Step: $1 e^{-003}$ s
- Maximum Time Step: 0,1 s

Si è quindi svolto uno studio dello stato tensionale e delle deformazioni della pavimentazione soggetta a carichi termici.

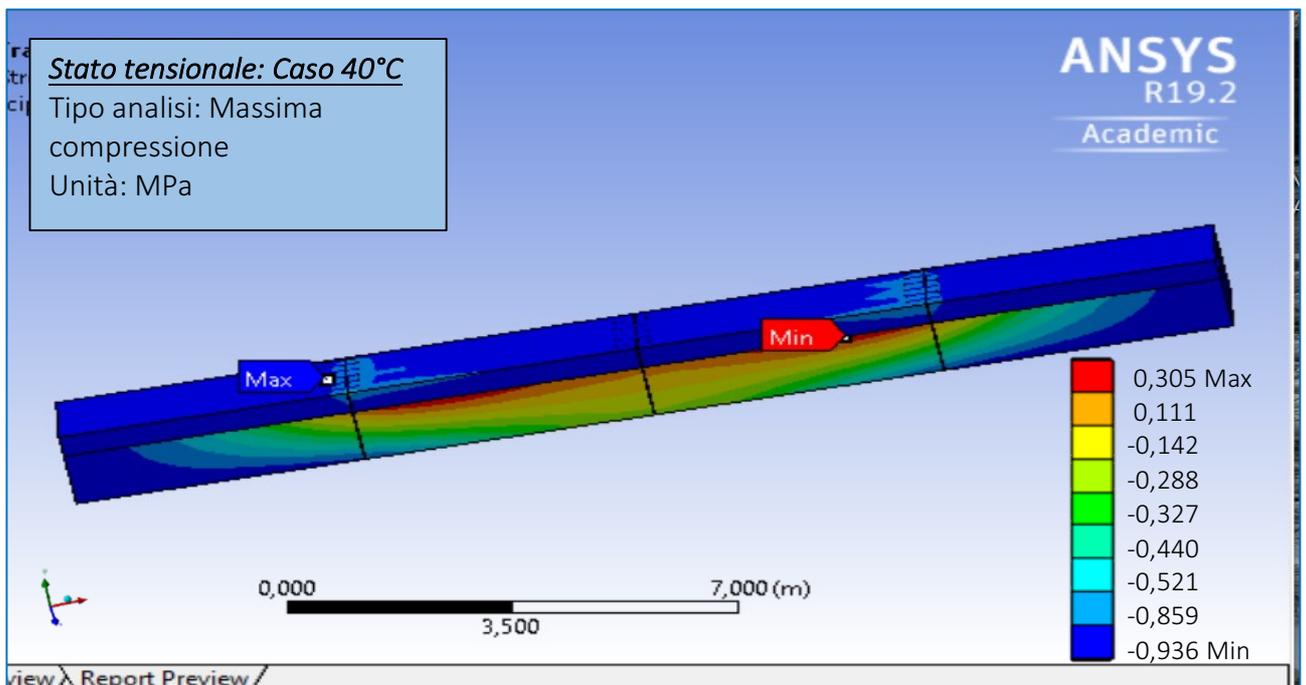
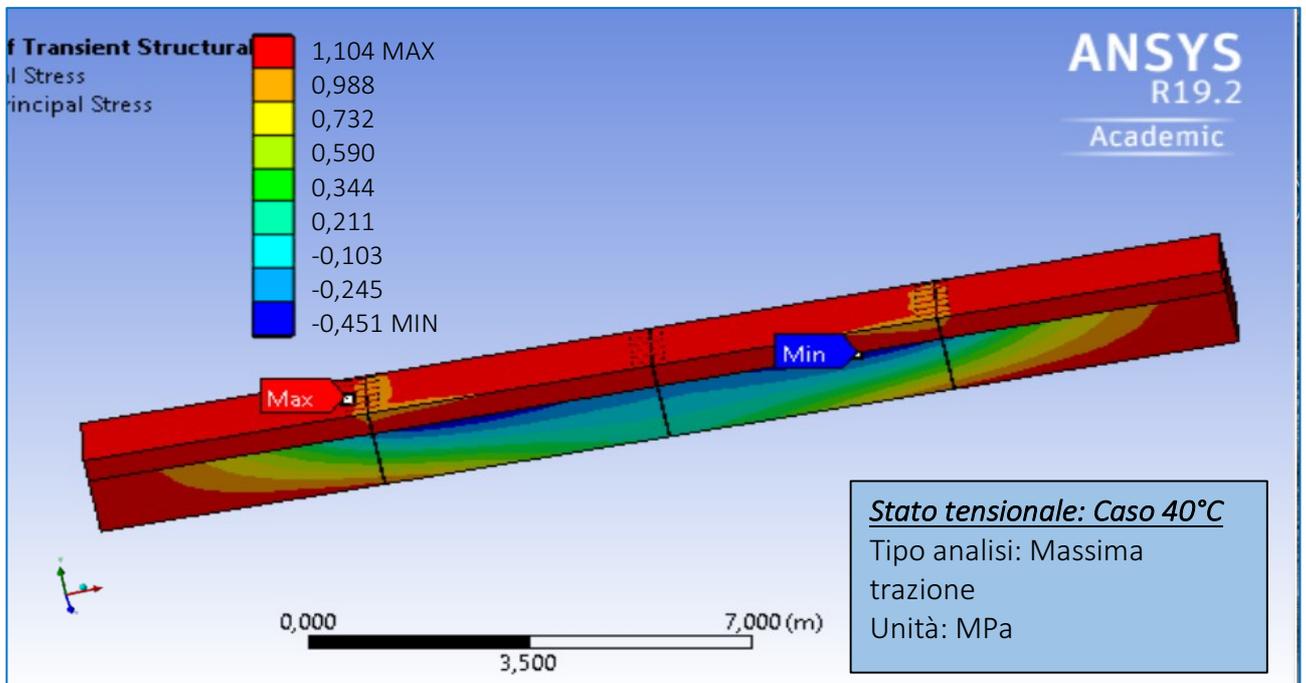
Di conseguenza sono stati svolti questi due studi:

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni dell'intera pavimentazione

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni delle barre di compartecipazione

Risultati dello studio tensionale

Lo stato deformativo dell'intera pavimentazione viene riportato nella seguente figura, Figura 67.



Trazione massima: 1,104 MPa	Compressione massima: -0,936 MPa
-----------------------------	----------------------------------

Figura 67: Stato tensionale caso 40°C, struttura totale

Analizzando le risposte tensionali riportate in Figura 67 si deduce che tutta la pavimentazione è soggetta ad uno stato tensionale. I valori massimi di compressione sono pari a $-0,936$ MPa mentre la massima trazione è pari a $1,104$ MPa. In particolare il valore di massima trazione corrisponde alla terza barra di compartecipazione compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2; il valore massimo di compressione si trova distribuito in modo equivalente su tutta la lastra in cls. Questa ultima considerazione è a riprova del fatto che il cls lavori a compressione mentre l'acciaio a trazione.

Per quanto concerne le barre di compartecipazione si nota la medesima risposta tensionale riportata in Figura 62; in particolare nella seconda barra della sestina compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2 si verifica il valore della massima trazione pari a $1,104$ Mpa. Tale valore, come per il caso a 30°C risulta essere pari al massimo valore di trazione dell'intera pavimentazione.

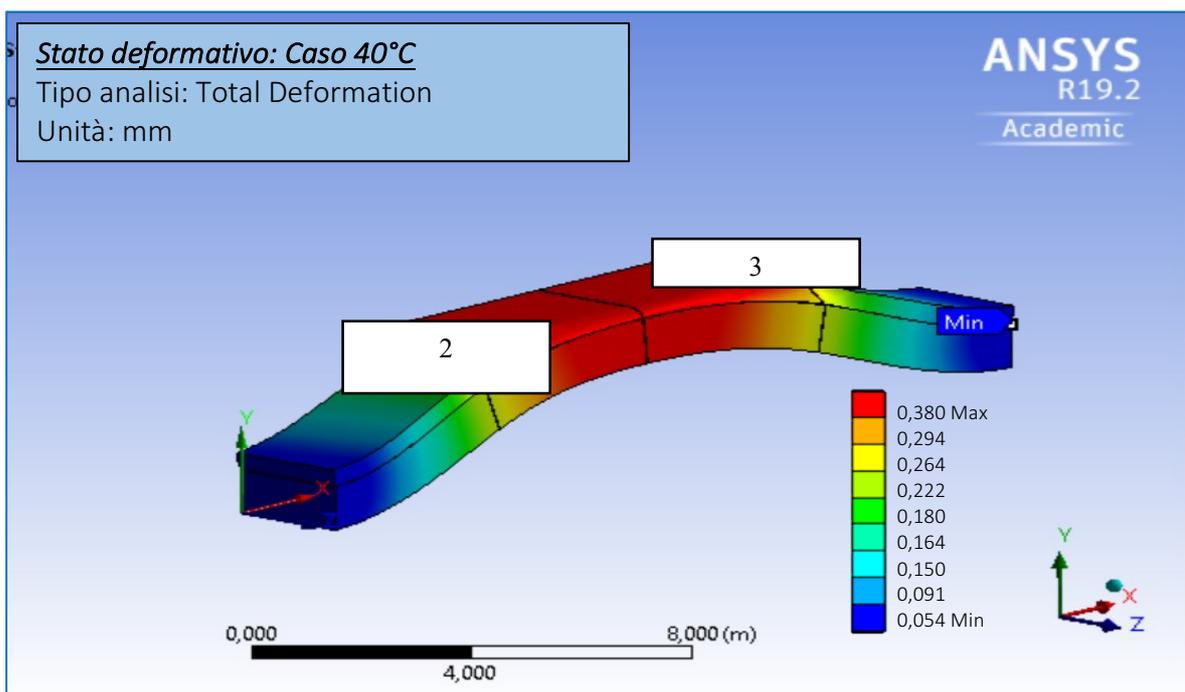
Risultati dello studio deformativo

Per ogni caso oggetto di studio è stato svolto uno studio delle deflessioni. Di seguito si riportano le deflessioni registrate sulla pavimentazione quando soggetta ad un carico termico di temperature di 40°C.

A livello quantitativo le deformazioni sono visibili in Figura 68, questa volta è stata sfruttata la funzione Total Deformation.

Da notare come le deflessioni siano, anche in questo caso, concordi con quanto ci si aspettava circa il comportamento della pavimentazione stessa. I fenomeni di umidità e termo-igrometrici sono stati trascurati anche in questo caso.

A livello quantitativo invece le deflessioni sono visibili in Figura 68, la deformazione massima è raggiunta tra i blocchi 2 e 3 ed è pari a 0,380 mm.



Deflessione massima: 0,380 mm	Deflessione minima: 0,054 mm	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,380 mm
----------------------------------	---------------------------------	---

Figura 68: Total Deformation, caso 40°C

CASO 3- 50°C: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL

Come detto precedentemente per l'analisi transient structural si è utilizzato lo stesso modello descritto per l'analisi transient thermal.

La distribuzione termica in questa analisi è pari al risultato ottenuto dall'analisi transient thermal a 50°C, il quale è stato introdotto nell'analisi strutturale riportando punto a punto i dati di output dell'analisi transiente. In particolare i valori delle temperature sono stati applicati al modello utilizzando una Thermal Condition uguale su tutto il volume del modello, ciò comprende: lastra in cls, barre di compartecipazione e strato equivalente.

Di seguito si riporta, in Figura 69, la Thermal Condition utilizzata:

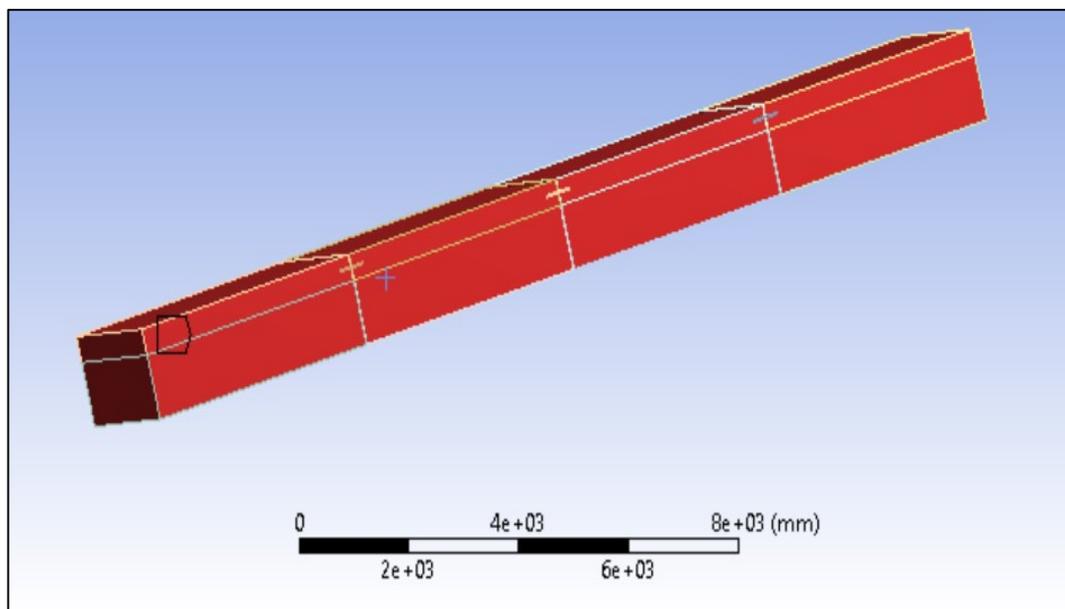


Figura 69: Thermal Condition, caso 50°C

Operativamente all'interno dell'analysis setting questi i parametri utilizzati:

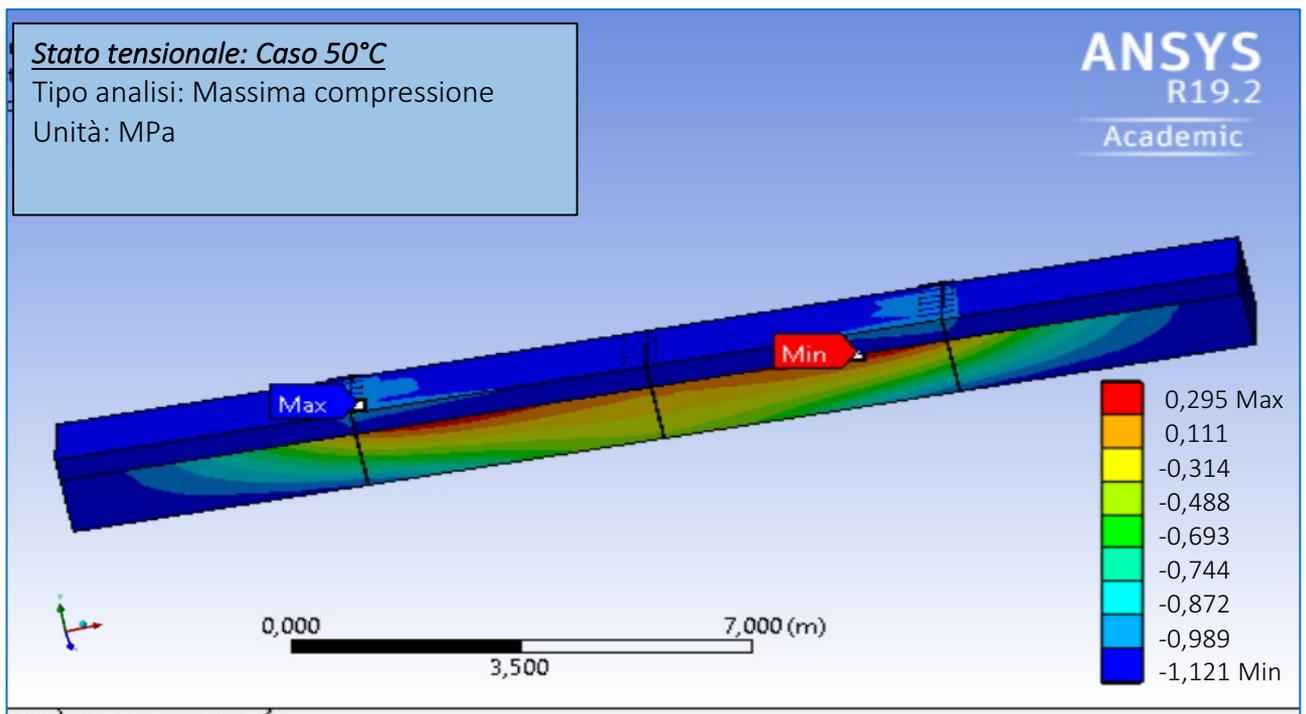
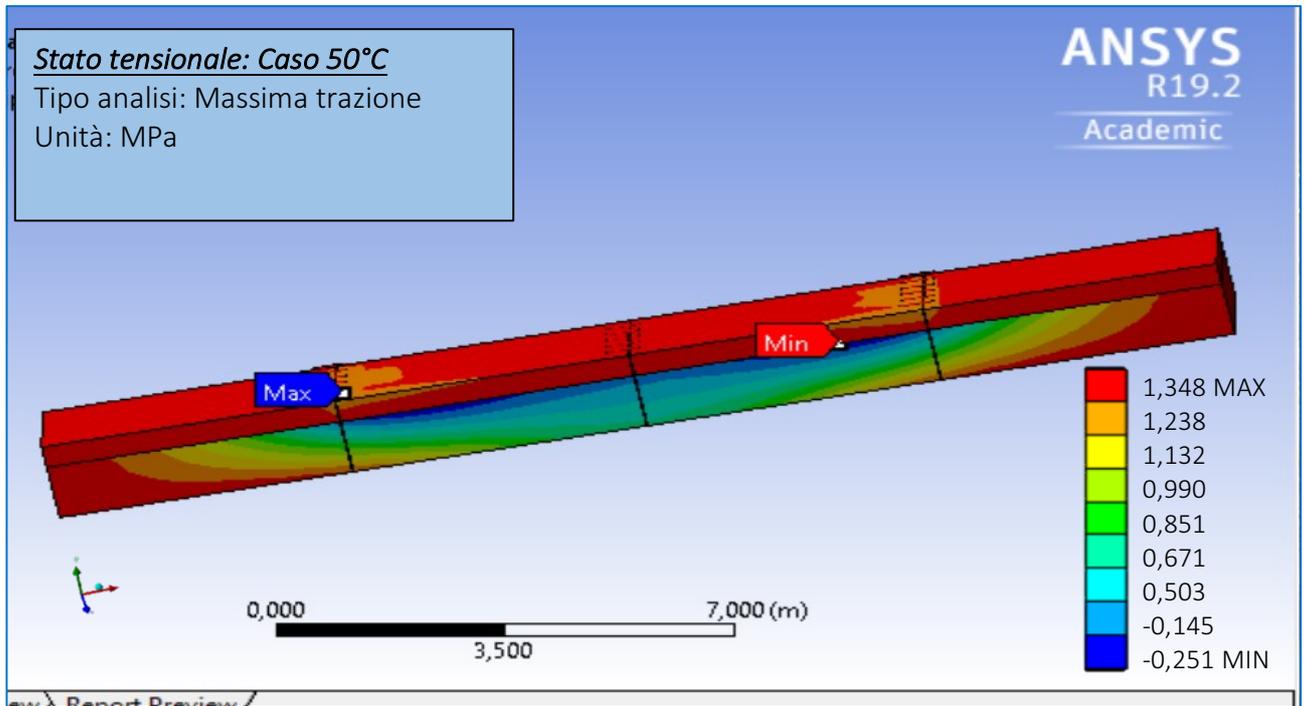
- Number of steps: 5
- Step end time: 40 secondi
- Initial Time Step: $1 e^{-002}$ s
- Minimum Time Step: $1 e^{-003}$ s
- Maximum Time Step: 0,1 s

Si è quindi svolto uno studio dello stato tensionale e delle deformazioni della pavimentazione soggetta a carichi termici. Di conseguenza sono stati svolti questi due studi:

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni dell'intera pavimentazione
- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni delle barre di compartecipazione

Risultati dello studio tensionale

Lo stato deformativo dell'intera pavimentazione viene riportato nella seguente figura, Figura 70.



Trazione massima: 1,348 MPa

Compressione massima: - 1,121 MPa

Figura 70: Stato tensionale caso 50°C, struttura totale

Analizzando le risposte tensionali riportate in Figura 70 si deduce che tutta la pavimentazione è soggetta ad uno stato tensionale. I valori massimi di compressione sono pari a $-1,121$ MPa mentre la massima trazione è pari a $1,348$ MPa. In particolare il valore di massima trazione corrisponde alla terza barra di compartecipazione compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2; il valore massimo di compressione si trova distribuito in modo equivalente su tutta la lastra in cls. Questa ultima considerazione è a riprova del fatto che il cls lavori a compressione mentre l'acciaio a trazione.

Per quanto concerne le barre di compartecipazione si nota la medesima risposta tensionale riportata in Figura 62; in particolare nella seconda barra della sestina compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2 si verifica il valore della massima trazione pari a $1,348$ Mpa. Tale valore, come per il caso a 30°C risulta essere pari al massimo valore di trazione dell'intera pavimentazione.

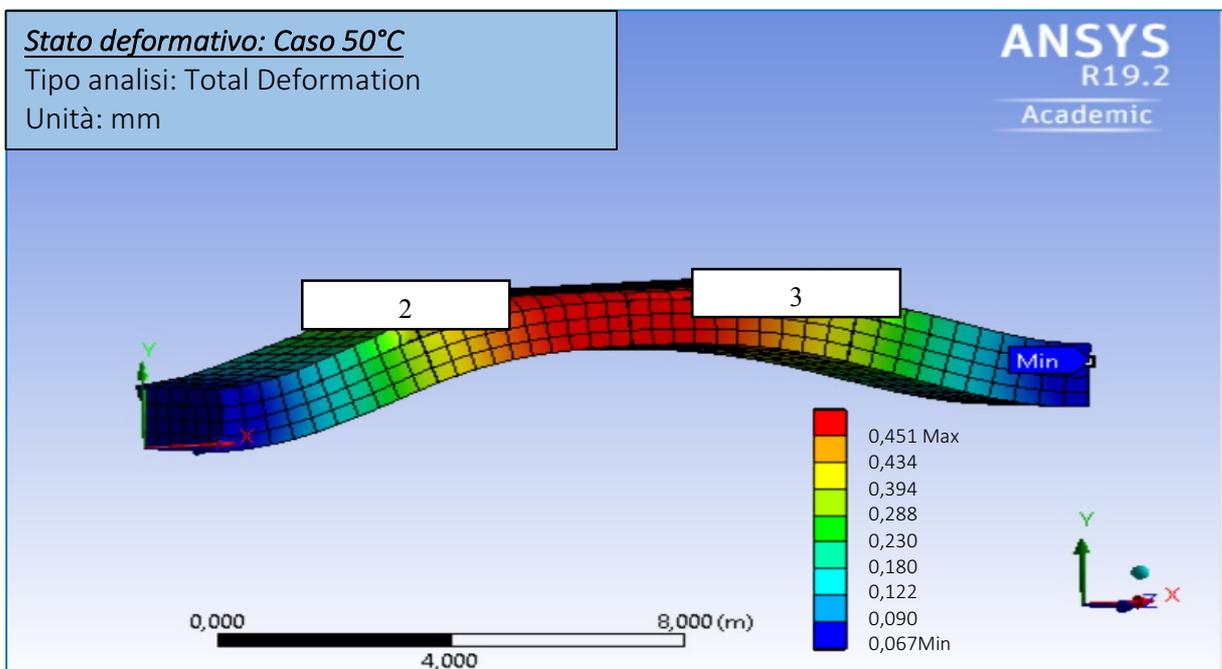
Risultati dello studio deformativo

Per ogni caso oggetto di studio è stato svolto uno studio dello stato deformativo. Di seguito si riportano le deflessioni registrate sulla pavimentazione quando soggetta ad un carico termico di temperature di 50°C.

A livello quantitativo le deflessioni sono visibili in Figura 71, questa volta è stata sfruttata la funzione Total Deformation.

Da notare come lo stato deformativo sia, anche in questo caso, concordi con quanto ci si aspettava circa il comportamento della pavimentazione stessa. I fenomeni di umidità e termigrometrici sono stati trascurati anche in questo caso.

A livello quantitativo invece le deflessioni sono visibili in Figura 71.



Deflessione massima: 0,451mm	Deflessione minima: 0 mm	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,451mm
---------------------------------	-----------------------------	--

Figura 71: Total Deformation, caso 50°C

Dalla Figura 71 si nota che la massima deformazione è in colore rosso ed è pari a 0,451 mm, tale valore viene registrato tra i blocchi di pavimentazione 2 e 3.

CONFRONTO CASI 30,40,50°C DETERMINATI CON MODELLO ANSYS

Come si è notato dai grafici riportati nelle figure precedenti, il comportamento del modello soggetto a carichi termici pari a 30, 40 e 50° C è molto simile; varia solo nei valori.

Si riporta qui di seguito nel grafico riassuntivo la variazione dei valori di trazione e compressione massima raggiunte nel modello a seconda dei diversi carichi termici impressi, Figura 72.

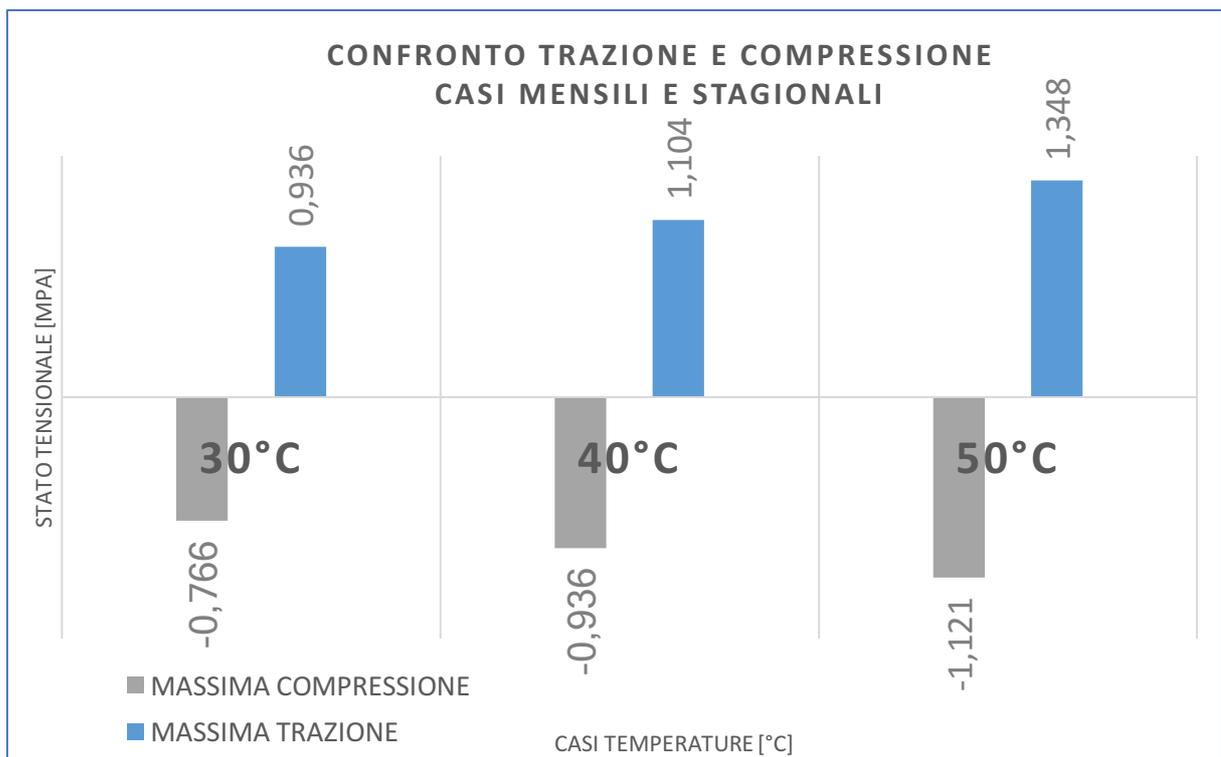


Figura 72: Confronto valori di compressione e trazione casi modello ansys

In particolare si notano in colore azzurro i valori di trazione mentre in grigio i valori di compressione.

Come già precisato i valori di massima compressione si registrano all'interno della lastra in cls mentre i valori di massima trazione all'interno delle barre di compartecipazione, in particolare nella seconda barra compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2. Questo comportamento è a riprova del fatto che i materiali costituenti la pavimentazione hanno due modalità di comportamento differenti allo stato tensionale.

Il calcestruzzo è infatti un materiale che si comporta bene sotto l'azione di uno sforzo a compressione mentre l'acciaio, al quale viene unito il calcestruzzo, è in grado di sopportare sforzi di trazione.

A livello percentuale si vedono tali andamenti incrementativi:

- o Compressione:

Tabella 34: Incremento valori compressione, casi ansys

<i>Da</i>	<i>a</i>	<i>Incremento</i>
30°C	40°C	+10 %
30°C	50°C	+19%
40°C	50°C	+9%

Tra il caso di 30°C e 40°C vi è un aumento del 10%, guardando il valore massimo di compressione. Tra il caso di 30°C e 50°C, l'incremento è pari al 19% mentre tra 40°C e 50°C è pari al 9%.

- o Trazione:

Tabella 35: Incremento valori trazione, casi ansys

<i>Da</i>	<i>a</i>	<i>Incremento</i>
30°C	40°C	+8 %
30°C	50°C	+18%
40°C	50°C	+10%

Tra il caso di 30°C e 40°C vi è un aumento del 8%, guardando il valore massimo di compressione. Tra il caso di 30°C e 50°C, l'incremento è pari al 18% mentre tra 40°C e 50°C è pari al 10%.

Per quanto riguarda le deflessioni si vuole riportare di seguito, come fatto per l'analisi delle compressioni e trazioni, in un grafico riassuntivo delle variazioni di deflessioni raggiunte nel modello a seconda dei diversi carichi termici impressi, Figura 73.

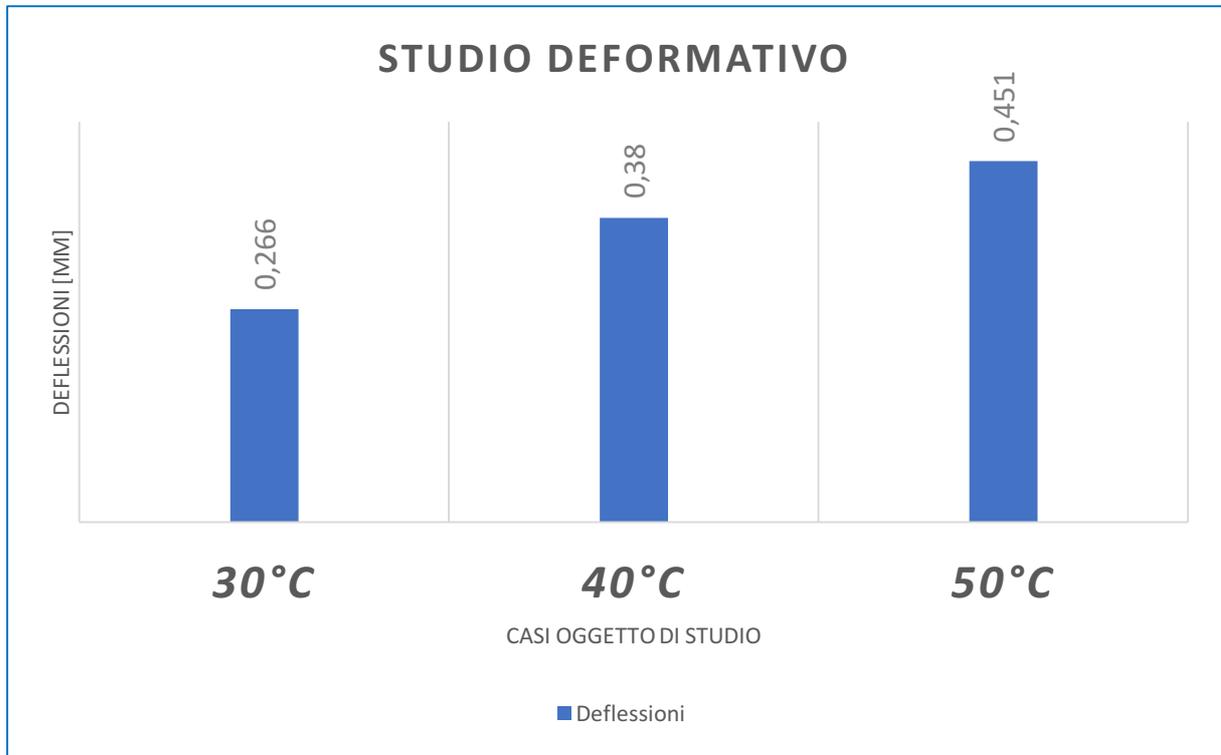


Figura 73: Confronto deflessioni casi modello ansys

In particolare si notano in colore azzurro i valori delle deflessioni, espresse in mm, dei vari casi oggetto di studio.

Come già precisato le deformate dei casi a 30°C, 40°C e 50°C sono molto simili tra di loro ed in particolare si nota come il comportamento della pavimentazione sia in accordo con quanto indicato in letteratura tecnica [4]; infatti la pavimentazione, per effetto della temperatura, tende a dilatarsi nella faccia superiore della lastra. Questo avviene in concomitanza con una contrazione della faccia superiore data da una riduzione di umidità. Si fa presente che alle condizioni tenso-deformative termiche si dovrebbero anche sommare gli effetti igrometrici, dovuti alla differente ripartizione dell'umidità all'interno delle lastre. Tali fenomeni sono stati trascurati in quanto vi è una scarsa entità e gli effetti termici dei climi europei sono minimi. I valori di massima deformazione vengono raggiunti tra i blocchi 2 e 3 della pavimentazione.

A livello percentuale si vedono tali andamenti incrementativi:

Tabella 36: Incremento valori compressione, casi ansys

<i>Da</i>	<i>a</i>	<i>Incremento</i>
30°C	40°C	+18 %
30°C	50°C	+26%
40°C	50°C	+9%

Tra il caso di 30°C e 40°C vi è un aumento del 18%, guardando il valore di massima deformazione. Tra il caso di 30°C e 50°C, l'incremento è pari al 26% mentre tra 40°C e 50°C è pari al 9%.

MODELLO FARAGGI, JOFRE E KRAMER: caso stagionale

Per la determinazione del comportamento della pavimentazione soggetta a temperature stagionali si è utilizzato, oltre al caso 50°C del modello Ansys, l'applicazione della formula teorica-sperimentale di Faraggi, Jofre e Kramer. Come già specificato tale formula permette di ovviare ai limiti della formula di Barber, tenendo in conto di quante ore intercorrano tra l'alba e il tramonto e viceversa. Si è inoltre applicata la formula in maniera dettagliata nel Capitolo 4. I carichi termici determinati sono stati poi applicati al modello della pavimentazione ottenuto mediante utilizzo di Ansys. La distribuzione termica in questa analisi è quindi pari al risultato ottenuto dall'applicazione della formula teorica-sperimentale.

In particolare i valori delle temperature sono stati applicati al modello utilizzando due Thermal Condition. Per inserire una Thermal Condition si deve solamente premere il tasto destro del mouse, premere sulla voce Insert e successivamente si deve selezionare la voce Thermal Condition. In questo caso di studio sono state usate quindi due Thermal Condition, una per la parte superiore del modello che comprende sia le barre di compartecipazione sia la lastra in cls e l'altra thermal condition per lo strato equivalente.

Si riporta di seguito la selezione dei volumi di applicazione delle due Thermal Condition utilizzate:

Prima Thermal Condition

Come si nota nella Figura 74 sotto riportata, la prima Thermal Condition è stata applicata solamente alla lastra in cls e alle barre di compartecipazione. Tale condizione è stata determinata sfruttando la formula a spessore pari alla sommità della pavimentazione $z=0$ cm.

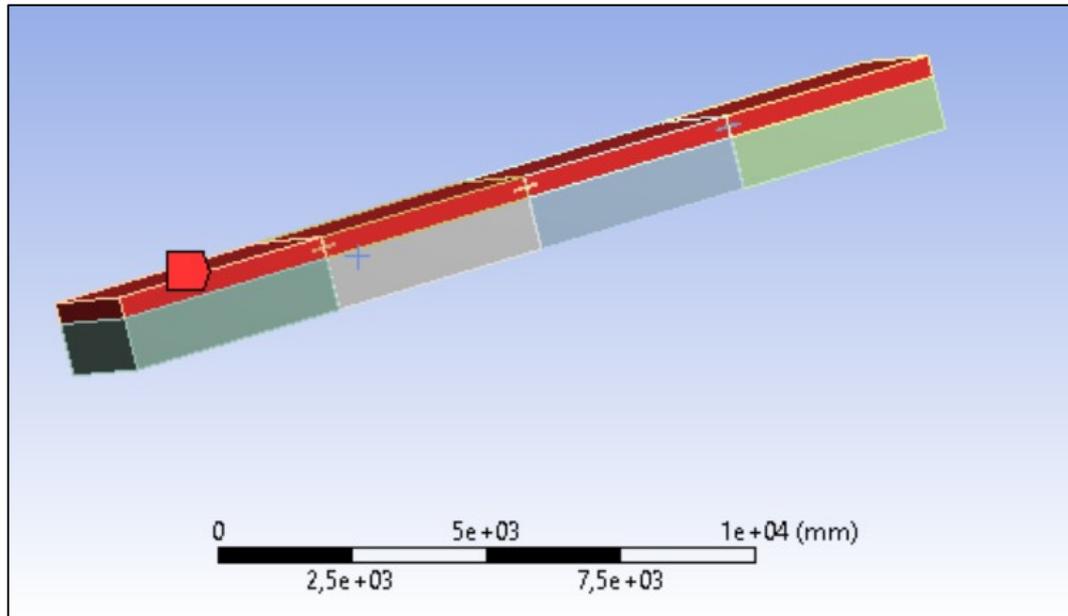


Figura 74: Prima Thermal Condition, caso variazione giornaliera di temperatura

Seconda Thermal Condition

Come si nota nella Figura 75 sotto riportata, la seconda Thermal Condition è stata invece applicata allo spessore di strato equivalente. La condizione termica è stata calcolata inserendo all'interno della formula sperimentale uno spessore pari a 40 cm, ovvero il punto di contatto tra la lastra e lo strato equivalente.

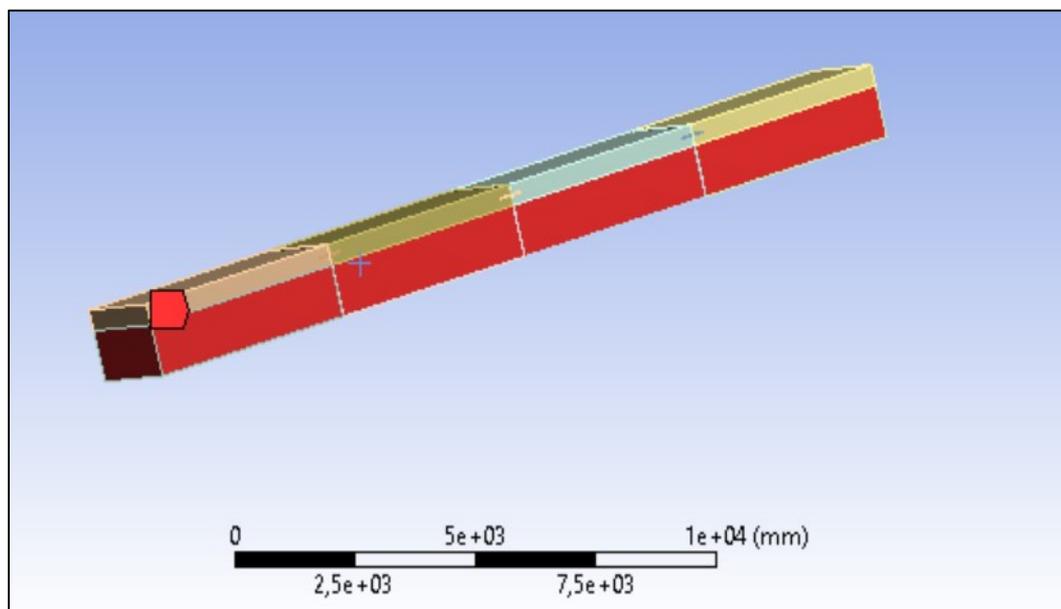


Figura 75: Seconda Thermal Condition, caso variazione giornaliera di temperatura

In questo caso si sono volute studiare due differenti situazioni della pavimentazione nel caso stagionale: di e notte. Per farlo si è sfruttata la formula sperimentale andando a calcolare, a

spessore fisso, le variazioni della temperatura nelle ore del giorno. Sono stati considerati quindi due casi per costituire le thermal conditions; per la thermal condition 1 è stata calcolata la variazione di temperatura in sommità mentre per la thermal condition 2 si è applicata la variazione di temperatura ottenuta allo spessore di 40 cm, ovvero nel punto di contatto tra la lastra in cls e lo strato equivalente.

Per ottenere il comportamento della pavimentazione soggetto alla variazione di temperatura giornaliera si sono applicate alle thermal conditions le temperature riferite al dì e alla notte.

Operativamente si sono calcolate le varie temperature della pavimentazione sfruttando la formulazione teorica-sperimentale di Faraggi, Jofre e Kramer, si sono riportati i calcoli applicativi nel Capitolo 4, successivamente si sono mediate le temperature tra le stagioni inverno ed estate, ottenendo così delle temperature medie tra le due stagioni funzioni dello spessore e delle ore del giorno. Si riporta un grafico esemplificativo della variazione delle temperature giornaliere delle stagioni estate ed inverno, preso come punto di riferimento la faccia inferiore della lastra in cls, Figura 76.

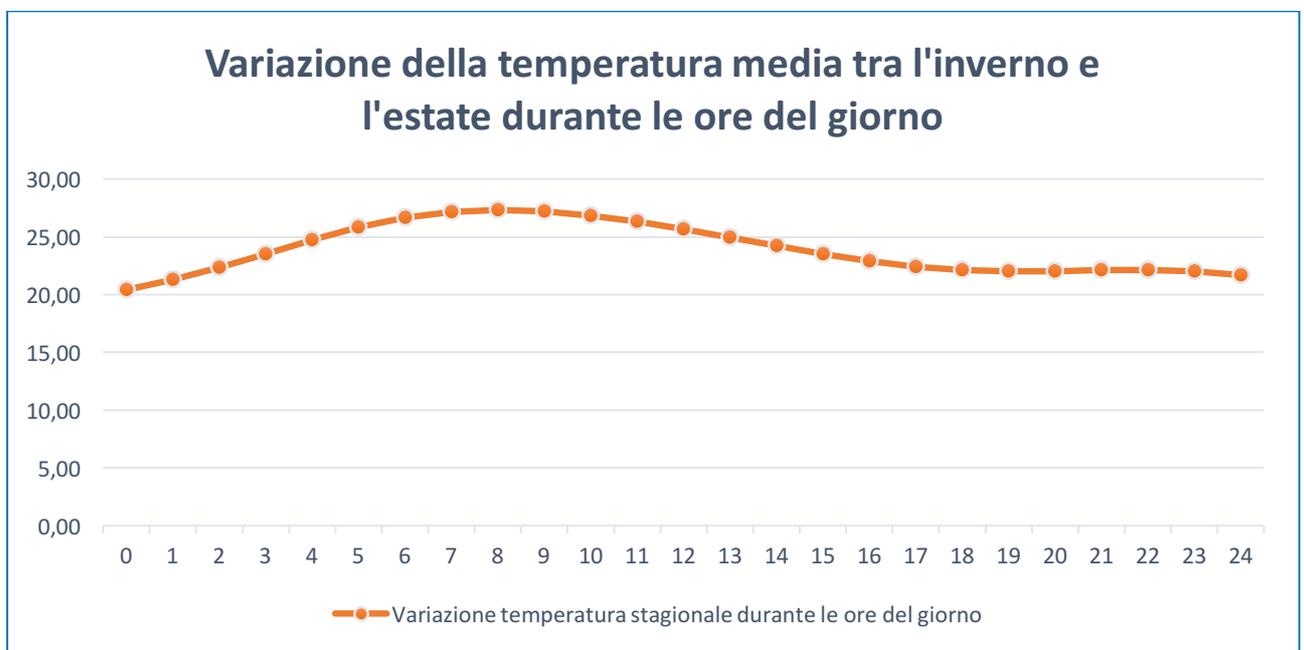


Figura 76: Variazione temperatura media stagionale (inverno ed estate) nelle ore del giorno

Come si nota dalla Figura 76 riportata qui sopra, dalle ore 8:00 la temperatura muta il suo andamento crescente diventando decrescente e la cosa opposta accade alle ore 20:00. Per una maggiore chiarezza dei dati si riporta la Tabella 37 che riporta i valori della temperatura media in funzione delle ore del giorno.

Tabella 37: Temperatura media stagionale(inverno+estate)- ore del giorno

Ore del giorno [H]	Tmedia [°C]
0	20,42
1	21,28
2	22,33
3	23,52
4	24,73
5	25,83
6	26,67
7	27,17
8	27,33
9	27,20
10	26,84
11	26,32
12	25,68
13	24,96
14	24,22
15	23,50
16	22,88
17	22,41
18	22,12
19	22,01
20	22,04
21	22,12
22	22,14
23	22,00

24	21,66
----	-------

Detto questo, per determinare la variazione della deformazione della pavimentazione soggetta a carichi termici giornalieri diurni è stata applicata la variazione di temperatura compresa tra le ore 08:00 e le ore 20:00 mentre per la variazione notturna sono stati imposti i valori di temperatura compresi tra le 21:00 e le 07:00. Come si può notare questa è una condizione che tiene in conto di entrambe le stagioni, inverno ed estate; infatti nel Capitolo 4 si erano riportati i dati circa il dì e la notte di ogni stagione. Per l'inverno il dì era compreso tra le ore 08:00 e le ore 16.41 mentre per l'estate il dì era compreso tra le ore 05.35 e le ore 21:14.

Si è quindi poi svolto uno studio dello stato tensionale e dello stato deformativo della pavimentazione soggetta a carichi termici.

Di conseguenza sono stati svolti questi due studi:

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni dell'intera pavimentazione
- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni delle barre di compartecipazione

Risultati dello studio tensionale

Lo stato deformativo dell'intera pavimentazione viene riportato nella seguente figura, Figura 77 e 78. In questo caso si è scelto di non vedere la variazione dello stato tensionale tra il dì e la notte ma di studiare solo il caso giornaliero.

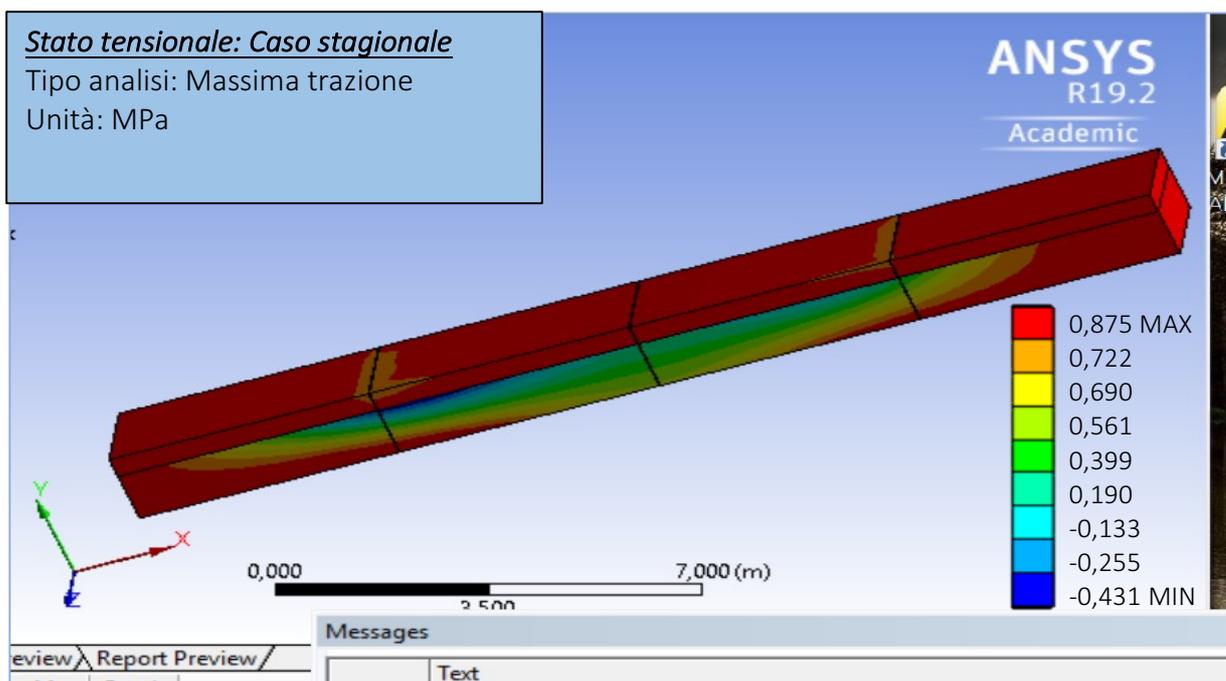


Figura 77: Stato tensionale , compressione – caso stagionale

Di seguito si riporta lo stato tensionale, trazione:

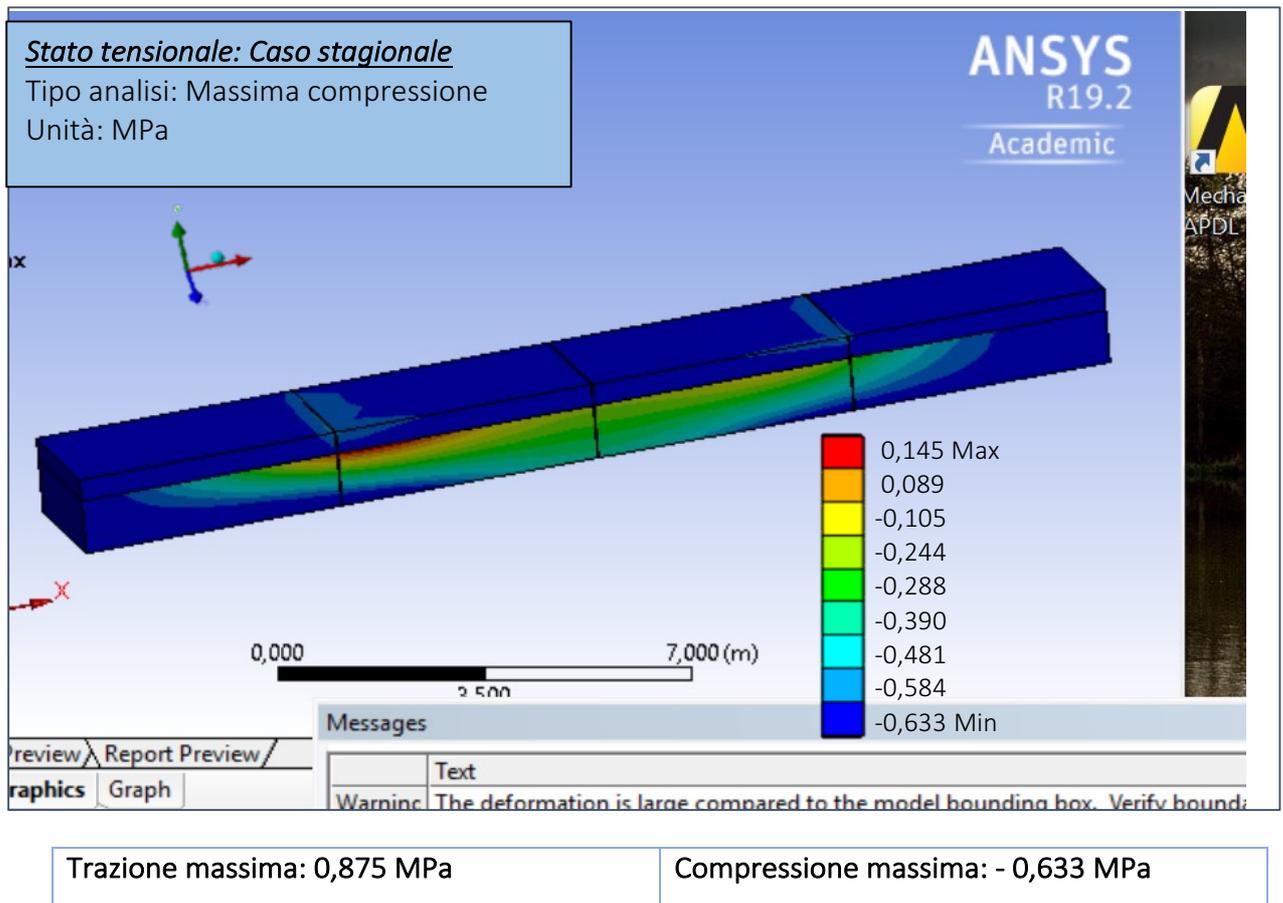


Figura 78: Stato tensionale, trazione- caso stagionale

Come si nota dalle figure riportate si riscontra, come per i tre casi visti in precedenza, che i valori di massima compressione si registrano all'interno della lastra in cls mentre i valori di massima trazione all'interno delle barre di compartecipazione, in particolare nella prima barra compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2.

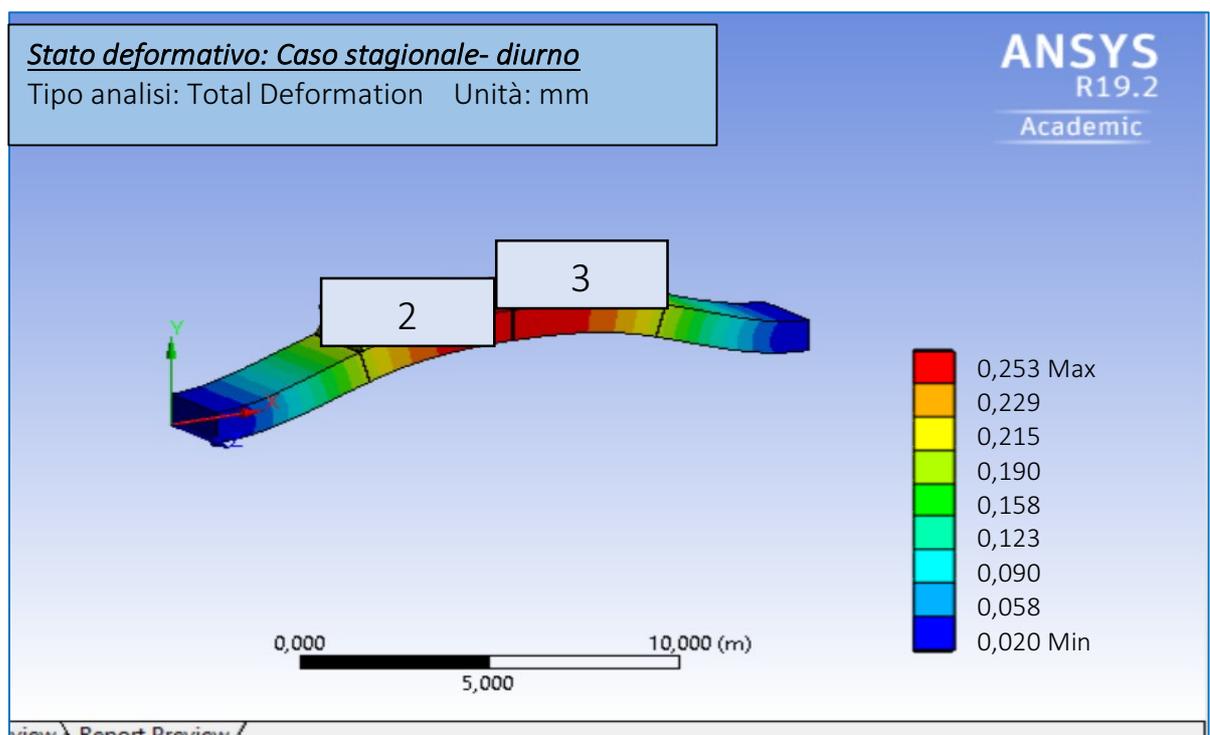
Il valore della massima trazione dell'intera pavimentazione è lo stesso registrato nella barra di compartecipazione segnalata.

Risultati dello studio deformativo

Per ogni caso oggetto di studio è stato svolto uno studio delle deformazioni. Di seguito si riportano le deflessioni registrate sulla pavimentazione quando soggetta ad un carico termico di stagionale.

A livello quantitativo le deflessioni sono visibili in Figura 79 e 81, questa volta è stata sfruttata la funzione Total Deformation. Vi è una particolare differenza di comportamento tra il dì e la notte.

Situazione diurna:



Deflessione massima: 0,253 mm	Deflessione minima: 0,02 mm	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,253 mm
----------------------------------	--------------------------------	---

Figura 79: Stato deformativo, caso stagionale diurno

Da notare come le deflessioni siano, anche in questo caso, concordi con quanto ci si aspettava circa il comportamento della pavimentazione stessa; nelle ore calde della giornata, l'irraggiamento e la temperatura dell'aria tendono a riscaldare e quindi a dilatare la faccia superiore delle lastre; ciò però avviene in concomitanza con una riduzione di umidità del materiale che viceversa tende a contrarre la faccia superiore.



Figura 80: Comportamento pavimentazione diurno,

Situazione notturna:

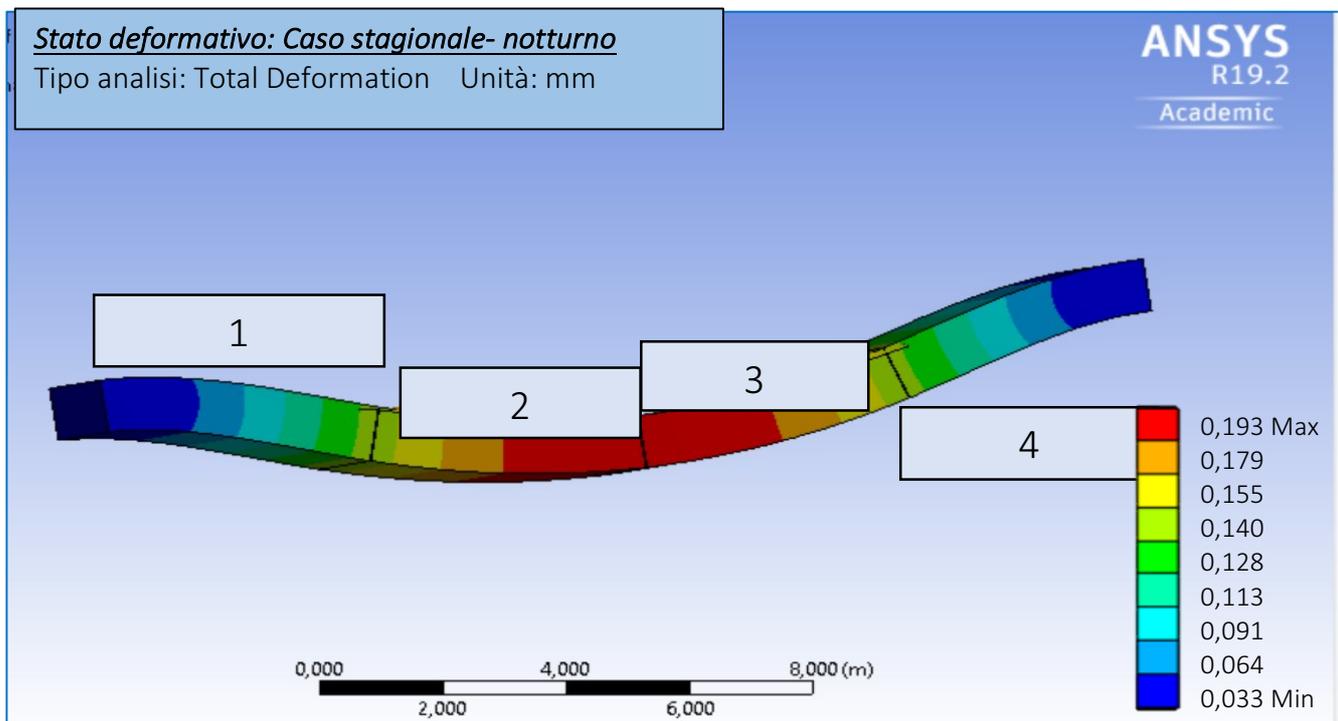


Figura 81: Stato deformativo, caso stagionale notturno

Deflessione massima:	Deflessione minima:	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,193 mm
0,193 mm	0,03 mm	

Da notare come le deflessioni siano, anche in questo caso, concordi con quanto ci si aspettava circa il comportamento della pavimentazione stessa; di notte avviene che le sollecitazioni igrometriche attenuano quelle di origine termica. I fenomeni di umidità e termo-igrometrici sono stati trascurati anche in questo caso.

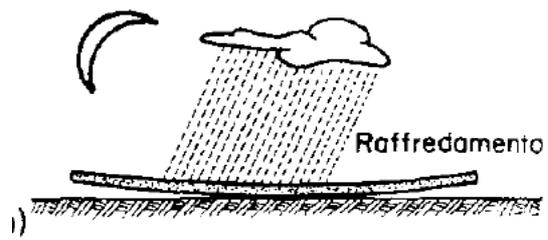


Figura 82: Comportamento pavimentazione notturno

ARTICOLO SIDDIQUE, HOSSAIN E MEGGERS: caso giornaliero

Variazione di temperatura giornaliera: ANALISI TRANSIENT STRUCTURAL

Determinazione temperature utilizzate

I valori delle temperature giornaliere applicate, come anticipato nei capitoli seguenti, non sono dati dalle temperature climatologiche in quanto sono temperature esterne alla pavimentazione, sono state quindi applicate le temperature risultanti dallo studio: "Temperature and curling measurements on concrete pavement" di Siddique, Hossain e Meggers [7].

Di seguito si riporta nuovamente il grafico in cui compare la variazione della temperatura funzione dello spessore della pavimentazione.

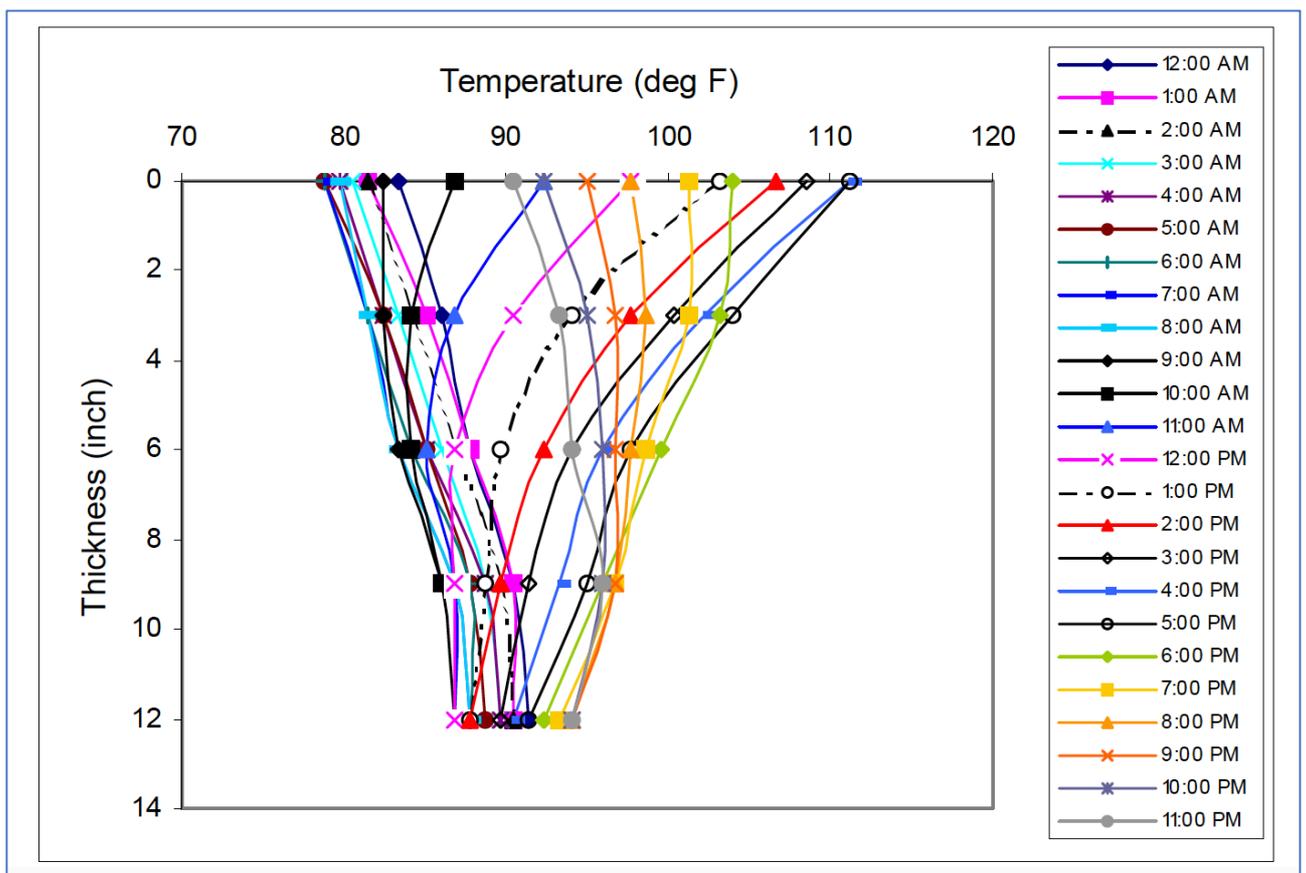


Figura 83: Grafico riportante la variazione temperatura-spessore

Come già anticipato sono stati analizzati i fati riportati nel grafico in Figura 74 e sono state dedotte le due thermal conditions. Una di queste da applicare nella sommità della pavimentazione e l'altra al di sotto della lastra in cls.

Nelle elaborazioni grafiche seguenti si sono presi gli spessori come dati fissi e si è espressa la funzione temperature-ore del giorno.

Di seguito, Tabella 38, i dati dedotti dal grafico in Figura 83:

Tabella 38: Dati temperature-ore del giorno, top

TOP		
ore del giorno	temperature [F]	Andamento Temperature registrate sulla pavimentazione [°C]
1	82	27,78
2	82	27,78
3	80	26,67
4	80	26,67
5	78	25,56
6	78	25,56
7	77	25
8	76	24,44
9	84	28,89
10	86	30
11	93	33,89
12	105	40,56
13	106	41,11
14	108	42,22
15	112	44,44
16	112	44,44
17	105	40,56
18	102	38,89
19	98	36,67
20	96	35,56
21	93	33,89
22	92	33,33
23	91	32,78
24	90	32,22

Di seguito, Tabella 39, i dati dedotti dal grafico in Figura 83.

Tabella 39: Dati temperature-ore del giorno, bottom

BOTTOM		
ore del giorno	temperature [F]	Andamento Temperature registrate sulla pavimentazione [°C]
1	90	32,22
2	92	33,33
3	90	32,22
4	90	32,22
5	88	31,11
6	87	30,56
7	85	29,44
8	85	29,44
9	85	29,44
10	85	29,44
11	86	30
12	86	30
13	88	31,11
14	90	32,22
15	92	33,33
16	93	33,89
17	94	34,44
18	95	35
19	95	35
20	95	35
21	95	35
22	95	35
23	96	35,56
24	96	35,56

Determinazione modello utilizzato

Il modello geometrico anche in questo caso è identico a quelli utilizzati in precedenza sia come geometria, sia come connessioni, sia come definizione dei materiali.

La particolarità di questo caso specifico, a differenza degli altri 3 già utilizzati, è che è stata svolta solamente un'analisi di tipologia transient structural in quanto le temperature utilizzate sono state applicate in modo costante nel tempo.

Operativamente all'interno dell'Analysis settings di questa analisi questi i valori utilizzati:

- Number of steps: 1
- Step end time: 50 secondi
- Initial Time Step: $1 e^{-002} s$
- Minimum Time Step: $1 e^{-003} s$
- Maximum Time Step: 0,1 s

La particolarità di questo caso di studio, come per il caso stagionale, è data dal fatto di legare il modello a due differenti temperature all'interno della stessa analisi.

Per fare questo si è dovuto utilizzare due Thermal Condition all'interno dell'analisi.

Per inserire una Thermal Condition si deve solamente premere il tasto destro del mouse, premere sulla voce Insert e successivamente si deve selezionare la voce Thermal Condition.

In questo caso di studio sono state usate quindi due Thermal Condition, una per la parte superiore del modello che comprende sia le barre di compartecipazione sia la lastra in cls e l'altra thermal condition per lo strato equivalente.

Si riporta di seguito la selezione dei volumi di applicazione delle due Thermal Condition utilizzate:

Prima Thermal Condition

Come si nota nella Figura 84 sotto riportata, la prima Thermal Condition è stata applicata solamente alla lastra in cls e alle barre di compartecipazione.

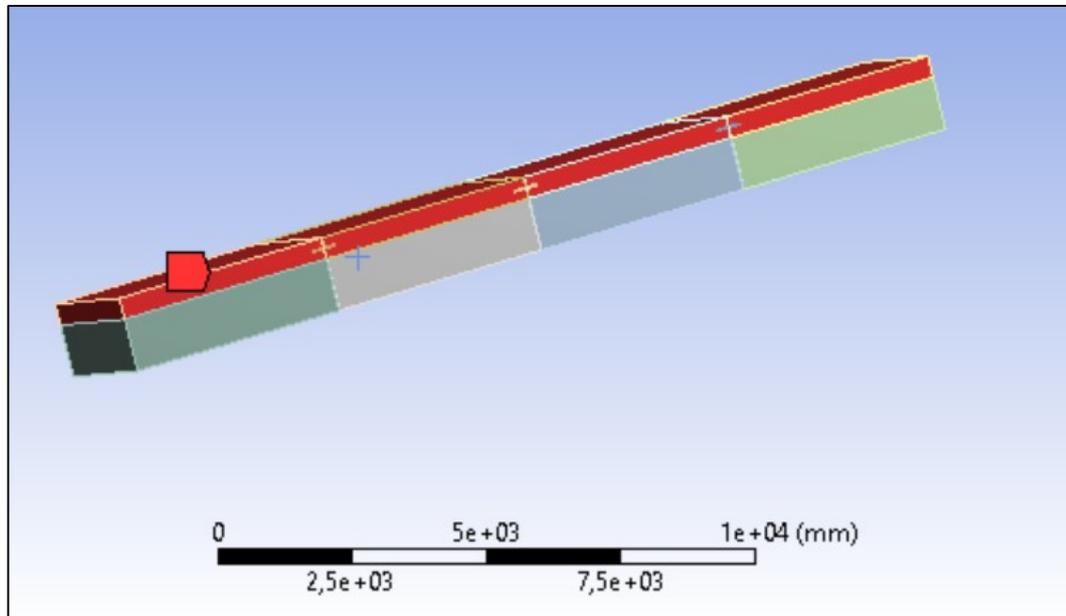


Figura 84: Prima Thermal Condition, caso variazione giornaliera di temperatura

Seconda Thermal Condition

Come si nota nella Figura 85 sotto riportata, la seconda Thermal Condition è stata invece applicata allo spessore di strato equivalente.

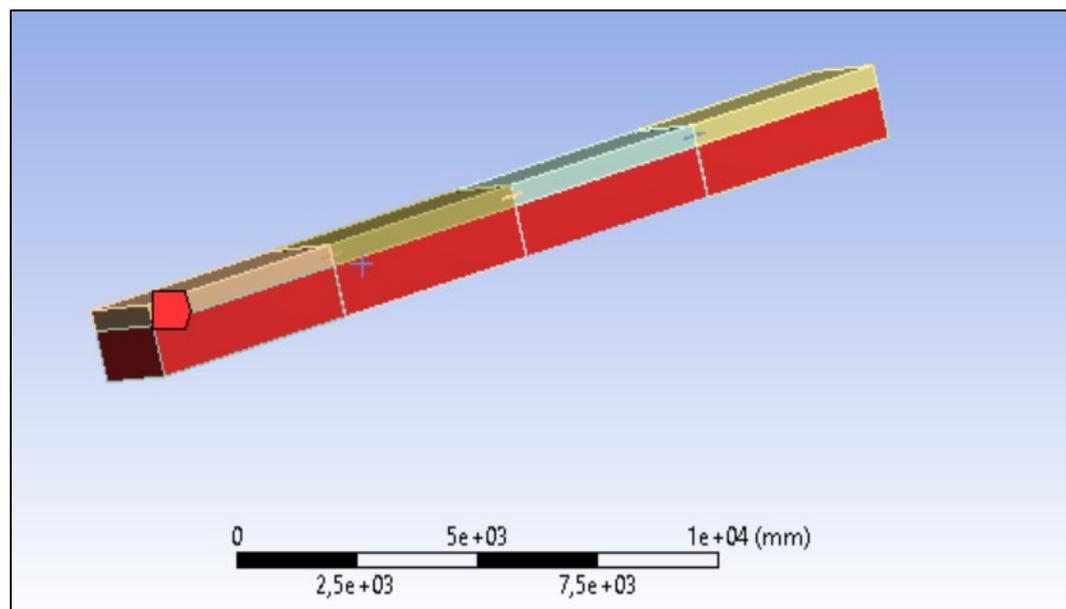


Figura 85: Seconda Thermal Condition, caso variazione giornaliera di temperatura

Determinazione casistiche di studio

Dopo aver introdotto e descritto tutte le componenti di questo caso, ci si vuole soffermare sulle due situazione analizzate.

- Prima situazione: Thermal Condition 1 pari ai dati riportati in Tabella 38, top, Thermal Condition 2 pari ai dati riportati in Tabella 39, bottom;
- Seconda Situazione: Thermal Condition 1 pari alle temperature bottom delle ore 15:00, Thermal Condition 2 pari alle temperature top delle ore 15:00. In questo caso si vuole studiare la situazione di maggior differenza di temperatura.

Prima situazione

In questo caso oggetto di studio si sono sfruttate quindi le due Thermal Condition imponendole in questo modo:

- Thermal Condition 1 pari alle temperature Top riportate in Tabella 38;
- Thermal Condition 2 pari alle temperature Bottom, riportate in Tabella 39.

Si è quindi svolto, come negli altri casi, uno studio dello stato tensionale e delle deformazioni della pavimentazione soggetta a carichi termici.

Nel dettaglio sono stati svolti questi due studi:

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni dell'intera pavimentazione;
- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni delle barre di compartecipazione.

Risultati dello studio tensionale

Lo stato tensionale dell'intera pavimentazione viene riportato nella Figura 86..

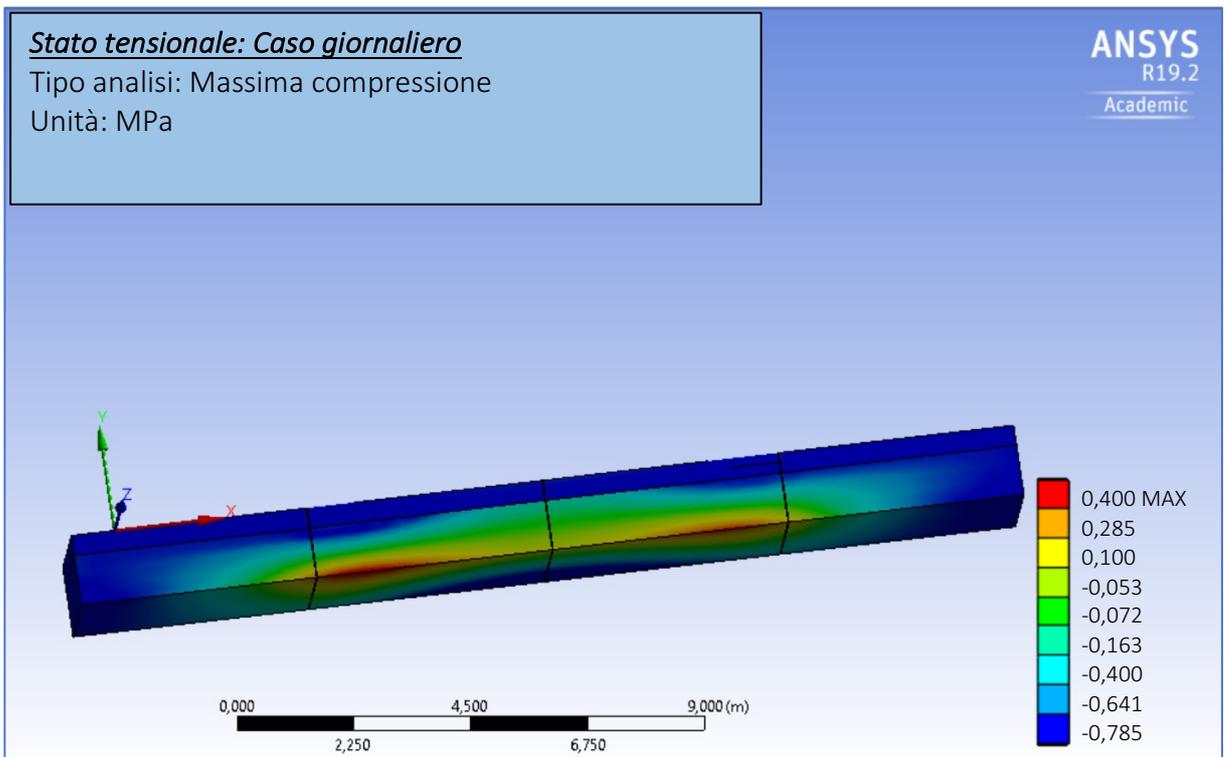
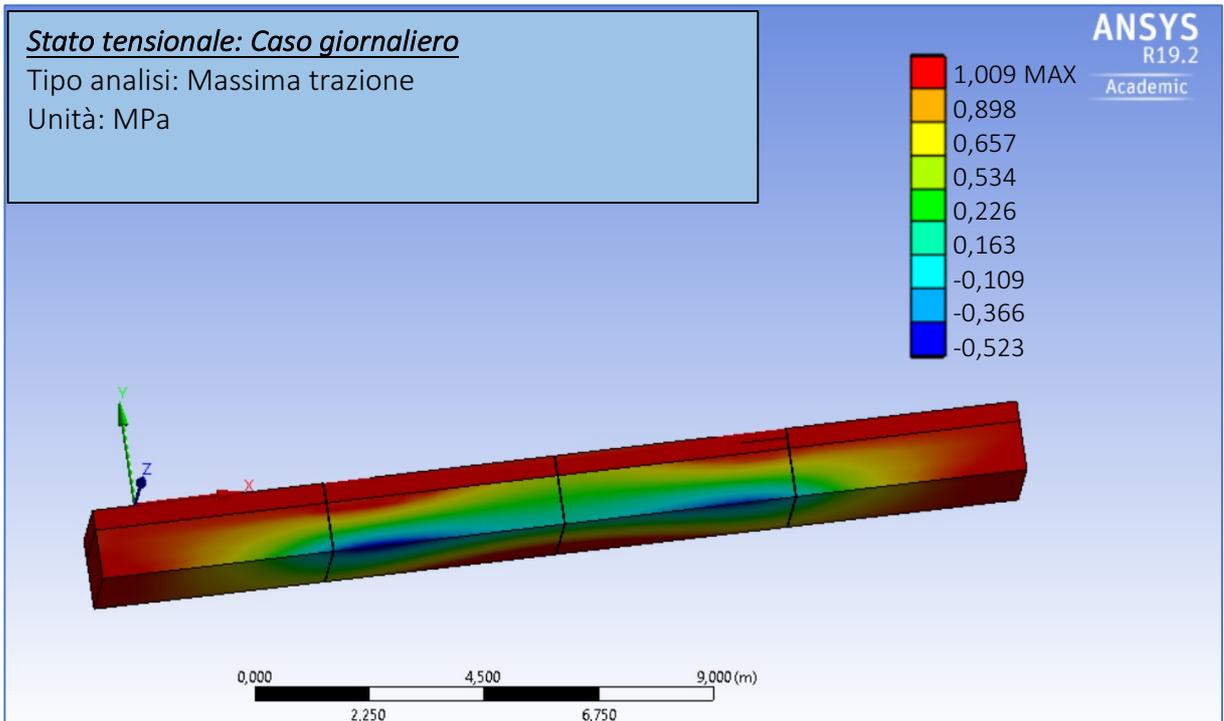


Figura 86: Stato tensionale caso situazione giornaliera, intera struttura

Trazione massima: 1,009 MPa	Compressione massima: -0,785 MPa
-----------------------------	----------------------------------

Lo studio è stato fatto sull'intera giornata (24 ore) senza fare distinzioni tra il dì e la notte. Il valore di massima compressione è pari a $-0,785$ Mpa mentre quello di massima trazione $1,009$ Mpa.

Come visto nei casi precedenti il valore di massima compressione viene raggiunto all'interno delle lastre in calcestruzzo mentre il valore di massima trazione viene raggiunto nelle barre di compartecipazione, in particolare nella seconda barra della sestina.

Risultati dello studio deformativo

Per ogni caso oggetto di studio è stato svolto uno studio delle deformazioni. Di seguito si riportano le deflessioni registrate sulla pavimentazione quando soggetta alla situazione giornaliera.

In questo caso, come fatto per il modello stagionale, le deflessioni verranno studiate nelle due parti costituenti la giornata: dì e notte. Tale studio come in precedenza è riservato solo allo studio deformativo. Per ottenere le deflessioni in ambito giornaliero diurno sono state applicate le temperature tra le ore 8:00 e le ore 20.00 per avere un termine di paragone con il caso visto in precedenza.

Situazione notturna

Le deflessioni sono visibili in Figura 87, questa volta è stata sfruttata la funzione Total Deformation.

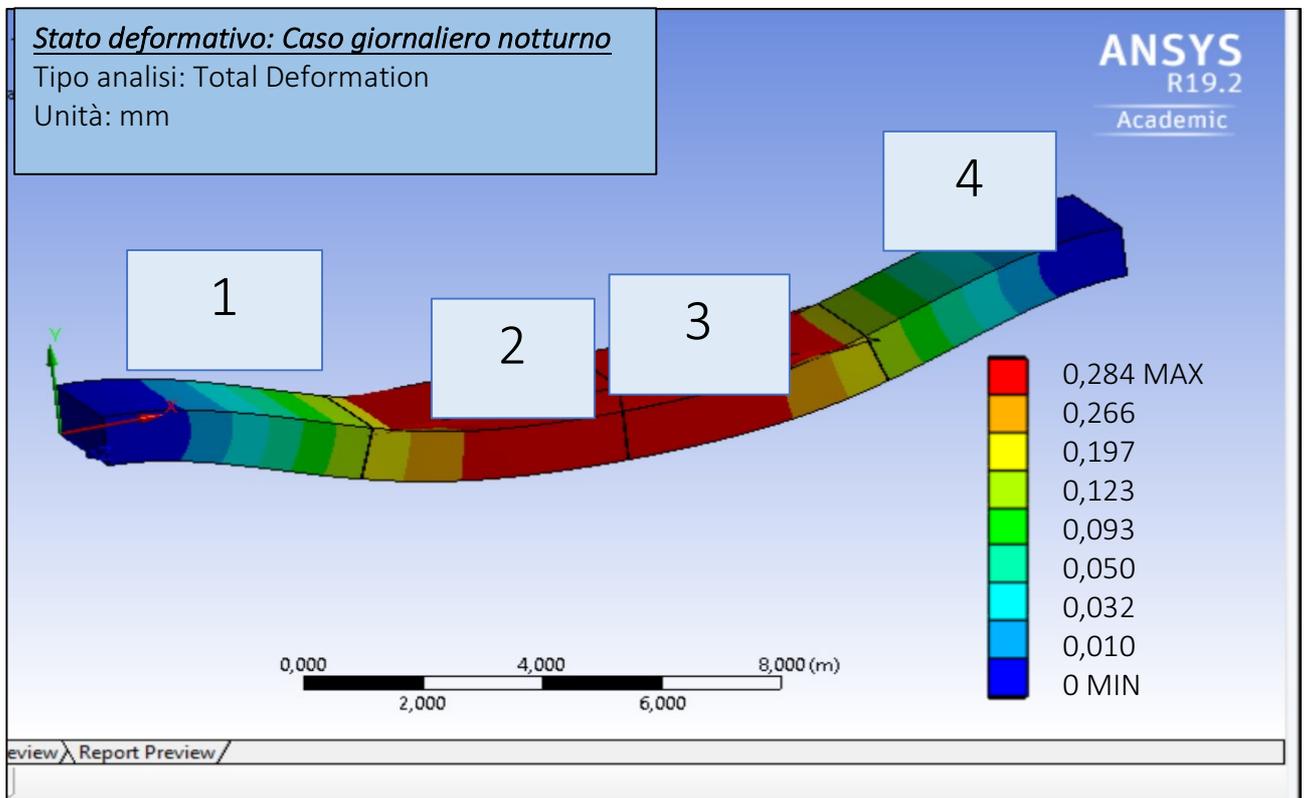


Figura 87: Total deformation caso giornaliero notturno

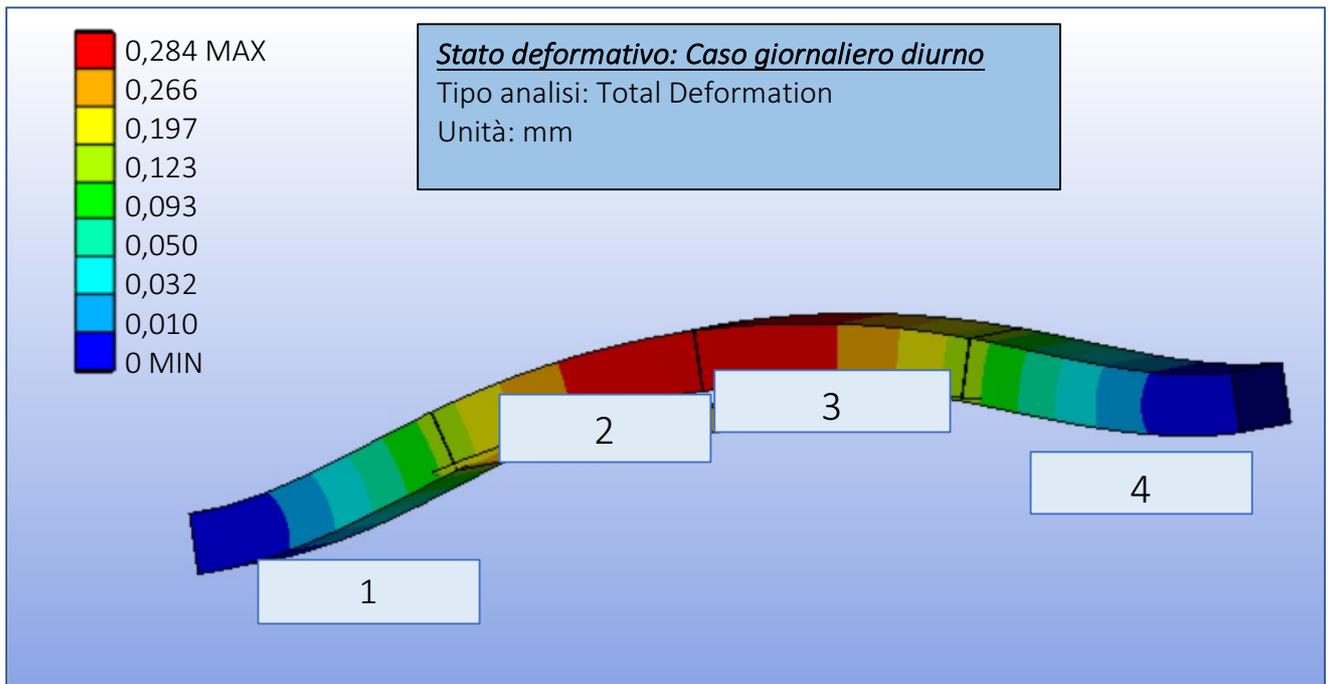
Deflessione massima: 0,284 mm	Deflessione minima: 0 mm	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,284 mm
----------------------------------	-----------------------------	---

La concavità della deformata è rivolta verso l'alto. Il valore di massima deformazione viene raggiunto al centro della pavimentazione nei blocchi 2 e 3.

I blocchi 1 e 4 sono speculari dal centro della pavimentazione. Vi sono due zone nei lembi della pavimentazione in cui si raggiungono le deflessioni minime.

Situazione diurna

Le deflessioni sono visibili in Figura 88, questa volta è stata sfruttata la funzione Total Deformation.



Deflessione massima:	Deflessione minima:	Deflessione al centro della
0,284 mm	0 mm	pavimentazione: 0,284 mm

Figura 88: Total deformation caso giornaliero diurno

Come riportato in Figura 88, la concavità della deformata è rivolta verso il basso. Il valore di massima deformazione viene raggiunto al centro della pavimentazione nei blocchi 2 e 3.

I blocchi 1 e 4 sono speculari dal centro della pavimentazione. Vi sono due zone nei lembi della pavimentazione in cui si raggiungono le deflessioni minime. Facendo un confronto rispetto alla Figura 87 si nota che la deformata ha concavità opposta.

In particolare si nota che il comportamento riportato nelle Figure 87 e 88 è in accordo con quanto preventivato.

Seconda situazione

In questo caso oggetto di studio si sono sfruttate quindi le due Thermal Condition imponendole in questo modo:

- Thermal Condition 1 costante pari alla temperatura Top riferita alle ore 15:00;
- Thermal Condition 2 costante, pari alla temperatura Bottom riferita alle ore 15:00.

Si è quindi svolto, come negli altri casi, uno studio dello stato tensionale e delle deformazioni della pavimentazione soggetta a carichi termici.

Nel dettaglio sono stati svolti questi due studi:

- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni dell'intera pavimentazione;
- Studio dello stato tensionale e delle deformazioni delle barre di compartecipazione.

Risultati dello studio tensionale

Lo stato tensionale dell'intera pavimentazione viene riportato nella Figura 89.

Si riporta in Figura 89/a e /b lo stato tensionale, compressive. In particolare vengono riportate due viste. Il valore di massima compressione viene raggiunto nelle lastre in calcestruzzo ed è pari a -0.890 Mpa. Tale valore è un maggiore rispetto a quello determinato nel caso del caso giornaliero su base di 24 ore.

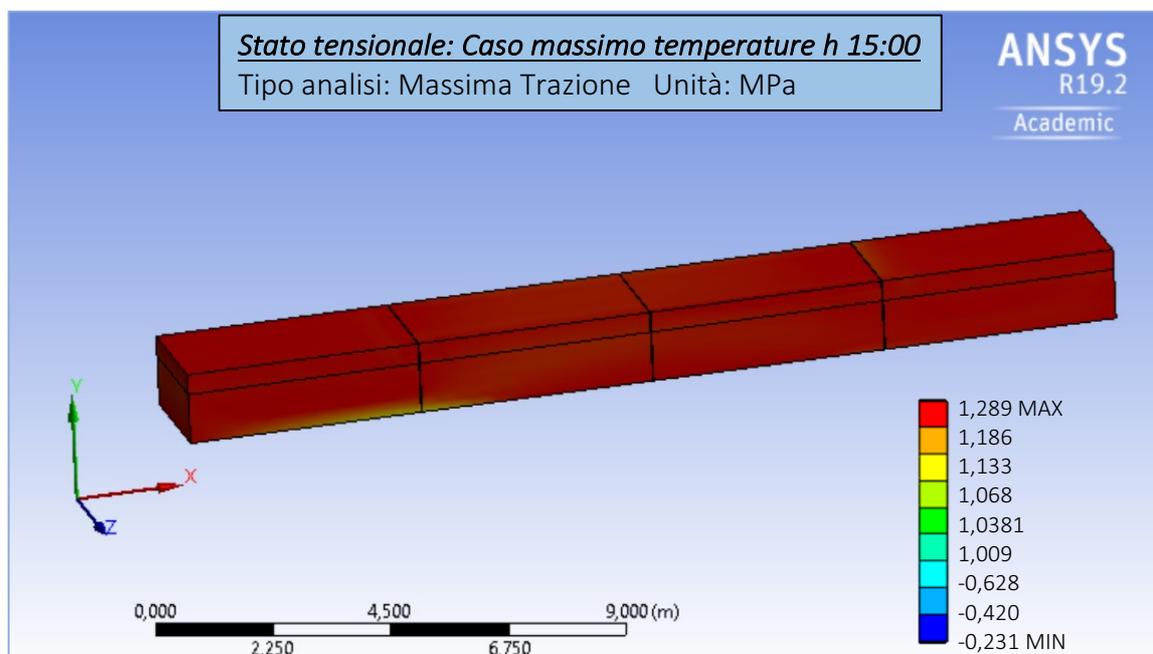


Figura 89/a: Stato tensionale caso massimo delta h.15:00, compressione

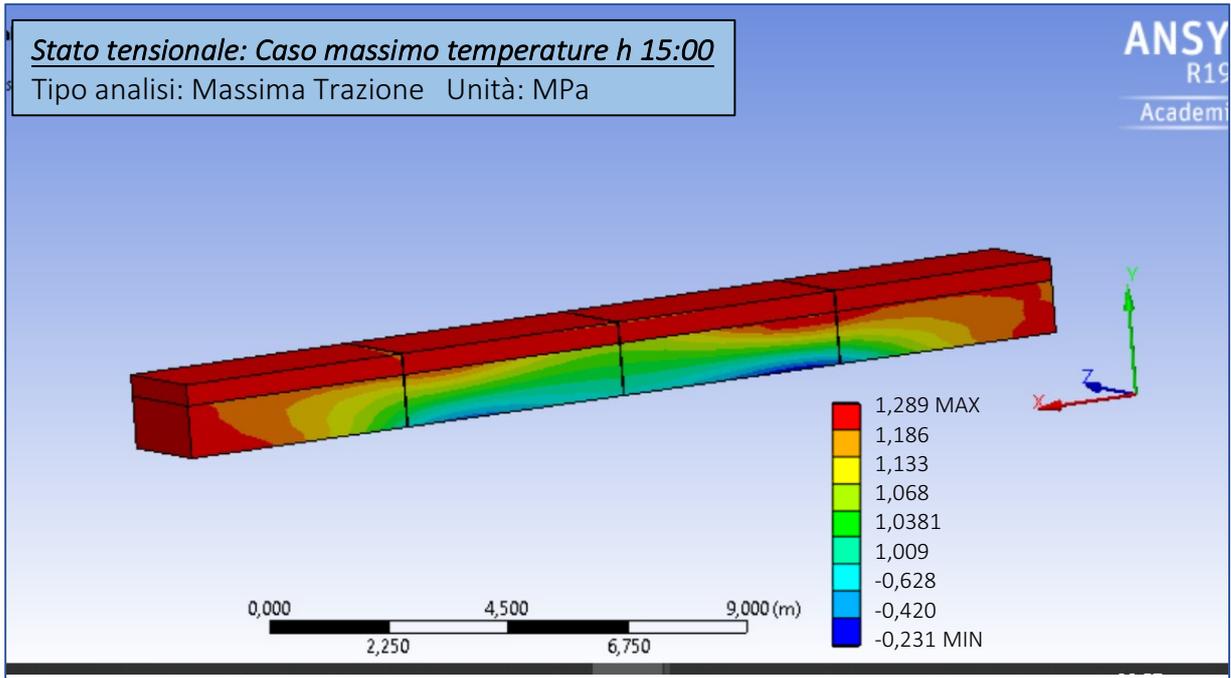


Figura 90/b: Stato tensionale caso massimo delta h.15:00, compressione

Per quanto riguarda la trazione:

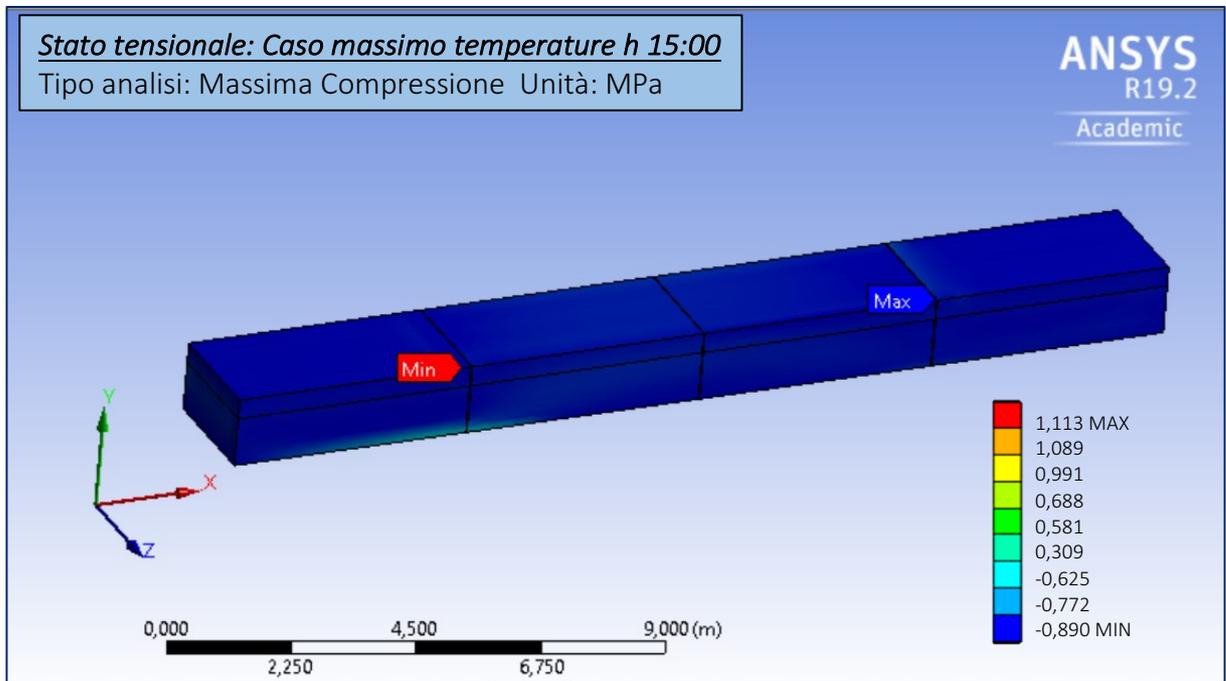


Figura 91/c: Stato tensionale caso massimo delta h.15:00, trazione

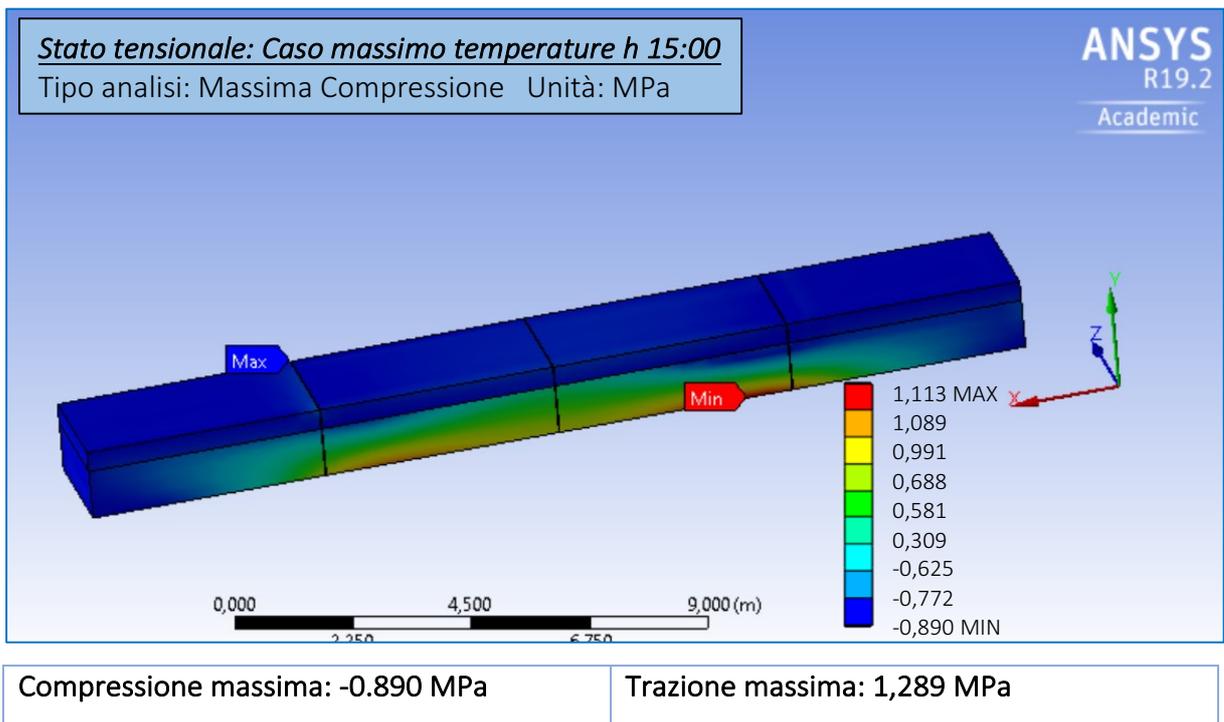


Figura 92/d: Stato tensionale caso massimo delta h.15:00, trazione

Come si nota dalla Figura 89 /c e /d il massimo valore di trazione raggiunto è pari a: 1,289 Mpa. Tale valore è massimo nelle barre di compartecipazione comprese tra il blocco 1 e 2, come visto nei casi precedenti il valore massimo è sempre all'interno della seconda barra della sestina.

Risultati dello studio deformativo

Per ogni caso oggetto di studio è stato svolto uno studio delle deformazioni. Di seguito si riportano le deformazioni registrate sulla pavimentazione quando soggetta alla situazione giornaliera notturna.

Le deflessioni sono visibili in Figura 90, qualitativamente si può notare come lo stato deformativo abbia una concavità rivolta verso il basso. Nei blocchi di pavimentazione 2 e 3 si registra la maggiore deformazione, tale valore è più alto rispetto a quello ottenuto con il caso giornaliero classico.

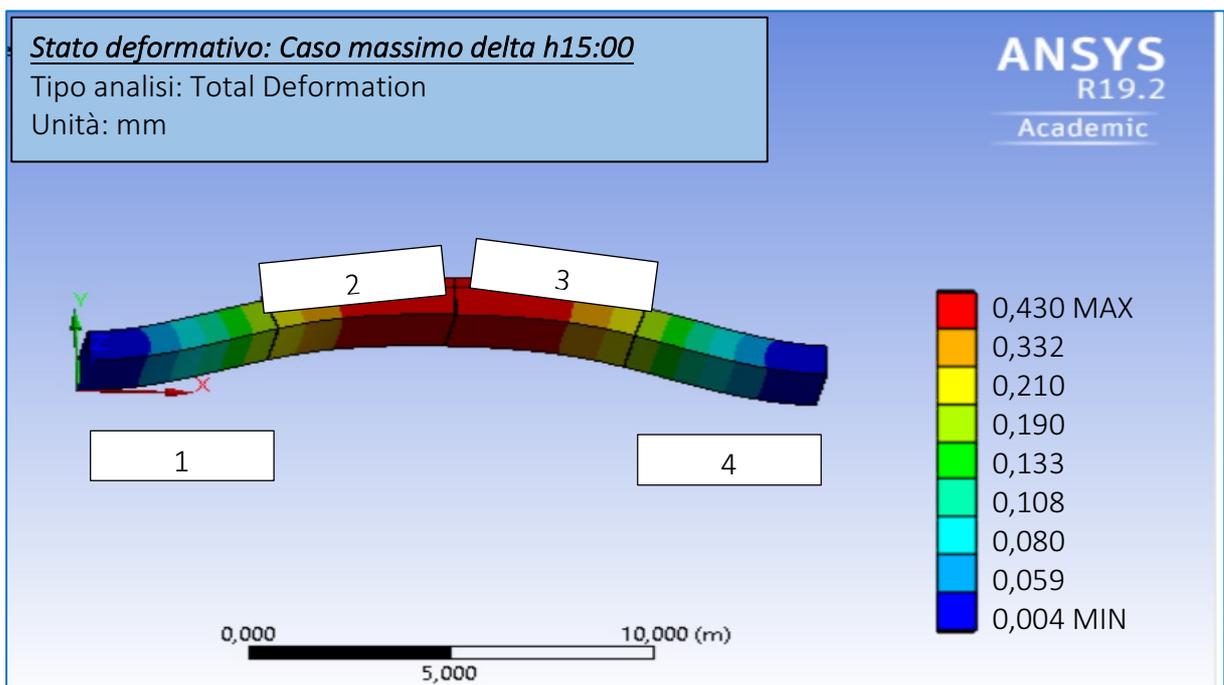


Figura 93: Total deformation caso massimo delta h 15:00

Deflessione massima: 0,430 mm	Deflessione minima: 0,004 mm	Deflessione al centro della pavimentazione: 0,430 mm
----------------------------------	---------------------------------	---

CONFRONTO CASI STAGIONALI E GIORNALIERI

Prima di introdurre il confronto tra il caso stagionale ottenuto mediante la Formula teorica-sperimentale di Faraggi, Jofre e Kramer si vuole concentrarsi sul solo caso stagionale ottenuto con modello Ansys.

In questo elaborato di tesi sono stati affrontati i casi giornalieri, mensili e stagionali delle temperature. I casi stagionali sono stati analizzati seguendo due trattazioni differenti, la prima derivava dall'applicazione della formula di Faraggi, Jofre e Kramer la seconda trattazione deriva dall'utilizzo delle analisi transient thermal direttamente sul modello. Queste due trattazioni non possono però essere confrontate in quanto, nel modello non vi è dipendenza della temperatura della pavimentazione con lo spessore e le ore del giorno ma vi è una dipendenza unica con le temperature climatologiche; nella trattazione che fa riferimento alla formula teorica invece vi è dipendenza con spessore e ore del giorno. Per questo motivo si è deciso di confrontare il caso stagionale derivante dal modello con gli altri due casi sempre utilizzando il modello; il caso stagionale che fa riferimento alla formula di Faraggi viene invece confrontato con i due casi giornalieri, dipendenti anch'essi dalle ore del giorno e dallo spessore.

Si precisa quindi che i casi giornalieri sono due, uno derivante dall'applicazione delle temperature lette in funzione dello spessore sulla totalità delle 24 ore della giornata, il secondo caso fa riferimento solamente alla massima differenza di temperatura registrata nel corso della giornata, in particolar modo alle ore 15:00. In entrambi i casi sono stati utilizzate due thermal conditions, così come il caso stagionale.

Si riporta di seguito il confronto dello stato tensionale, compressione e trazione, registrato nel modello nei tre casi sopracitati.

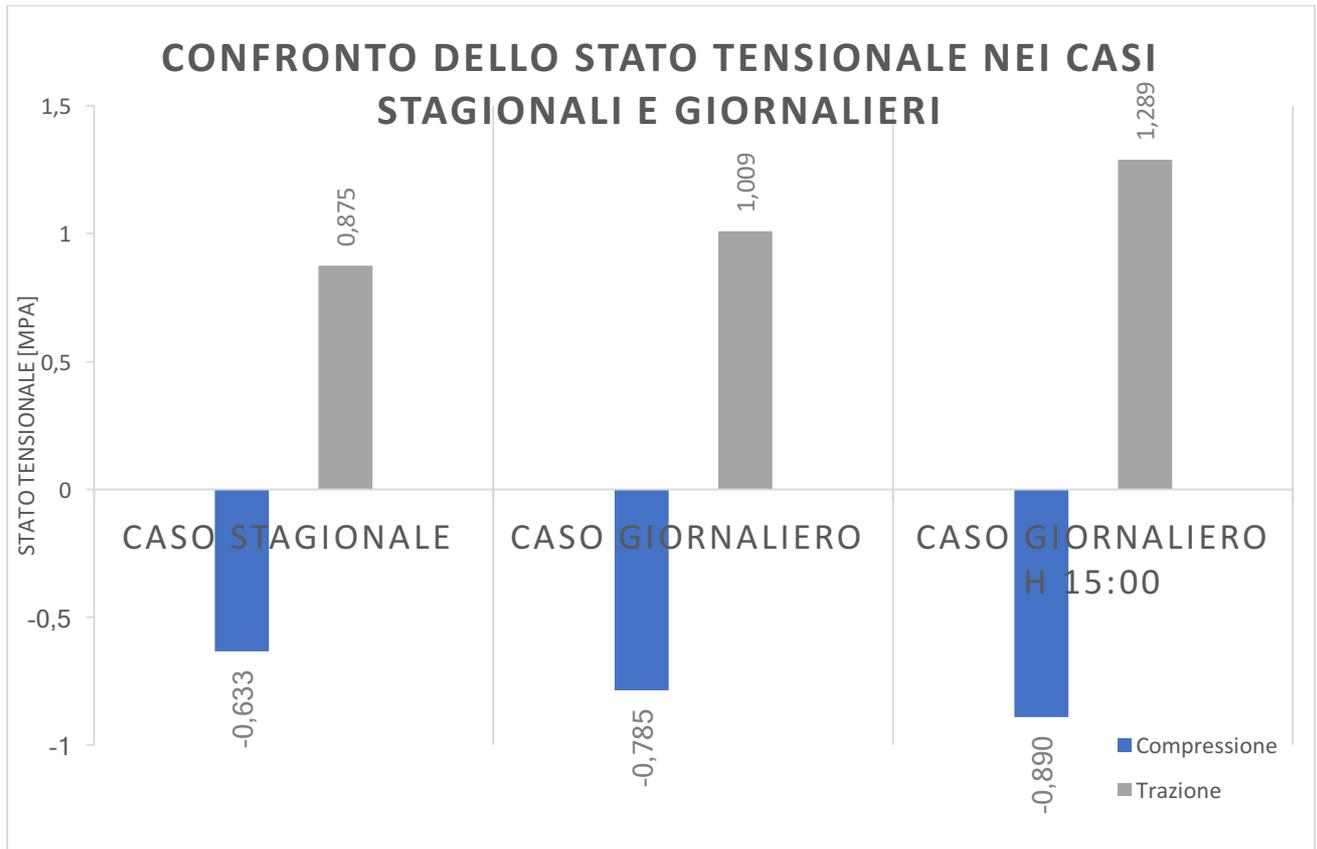


Figura 94: Confronto dello stato tensionale nei casi giornalieri e stagionali

Di seguito se ne riporta l'andamento incrementale in percentuale:

- **Trazione**

Tabella 40: Andamento incrementale in % trazione, casi stagionali e giornalieri

<i>Da</i>	<i>a</i>	<i>Incremento</i>
Caso stagionale	Caso giornaliero	+11 %
Caso stagionale	Caso giornaliero h 15:00	+17%
Caso giornaliero	Caso giornaliero h 15:00	+6%

In particolare si nota un incremento del 6% se si considera la situazione giornaliera di massima differenza di temperatura rispetto alla situazione giornaliera basata sulle 24 ore.

Risulta di particolare interesse notare come il caso giornaliero abbia dei valori tensionali maggiori rispetto al caso stagionale, la percentuale di maggiorazione è dell'11%. Ciò sta a significare che vi è uno stato di trazione più elevato considerando un solo giorno, mediato tra estate e inverno, piuttosto che considerare la media delle temperature dei giorni tra le due stagioni.

In particolar modo non vi è la possibilità di vedere il legame tra la media delle temperature registrate nelle stagioni estreme, inverno ed estate, piuttosto che la temperatura nella giornata più calda o più fredda ma sarebbe interessante saperne la differenza percentuale. Purtroppo i dati non sono legati tra di loro in quanto provengono da due trattazioni differenti.

- *Compressione*

Tabella 41: Andamento incrementale in % compressione, casi stagionali e giornalieri

<i>Da</i>	<i>a</i>	<i>Incremento</i>
Caso stagionale	Caso giornaliero	+7 %
Caso stagionale	Caso giornaliero h 15:00	+19%
Caso giornaliero	Caso giornaliero h 15:00	+12%

In particolare si nota un incremento del 12% se si considera la situazione giornaliera di massima differenza di temperatura rispetto alla situazione giornaliera basata sulle 24 ore.

In particolare questo aumento è doppio rispetto all'aumento percentuale registrato per la trazione .

Risulta di particolare interesse notare come il caso giornaliero abbia dei valori tensionali maggiori rispetto al caso stagionale, la percentuale di maggiorazione è del 7%; leggermente più bassa rispetto a quella registrata nel caso della trazione. Anche in questo caso si può affermare che vi è uno stato di compressione più elevato considerando un solo giorno, mediato tra estate e inverno, piuttosto che considerare la media delle temperature dei giorni tra le due stagioni. Purtroppo non essendo i dati giornalieri legati ai dati stagionali, ovvero non provenendo dalla stessa trattazione, non risulta possibile fare ulteriori analisi di dati.

Per quanto riguarda le **deflessioni** invece si precisa che verranno confrontati il caso stagionale con il caso giornaliero poiché entrambe funzione delle 24 ore del giorno. In particolar modo questi due casi sono stati studiati nelle due parti della giornata: dì e notte. Per avere un termine di paragone comune, dopo aver analizzato come variavano le temperature nel caso stagionale, ovvero 08:00-20:00 dì e 20:00-08:00 notte; è stata applicata la stessa suddivisione oraria anche nel caso giornaliero.

Si riporta di seguito, in Figura, la situazione schematizzata delle deflessioni suddivisa tra notte e giorno.

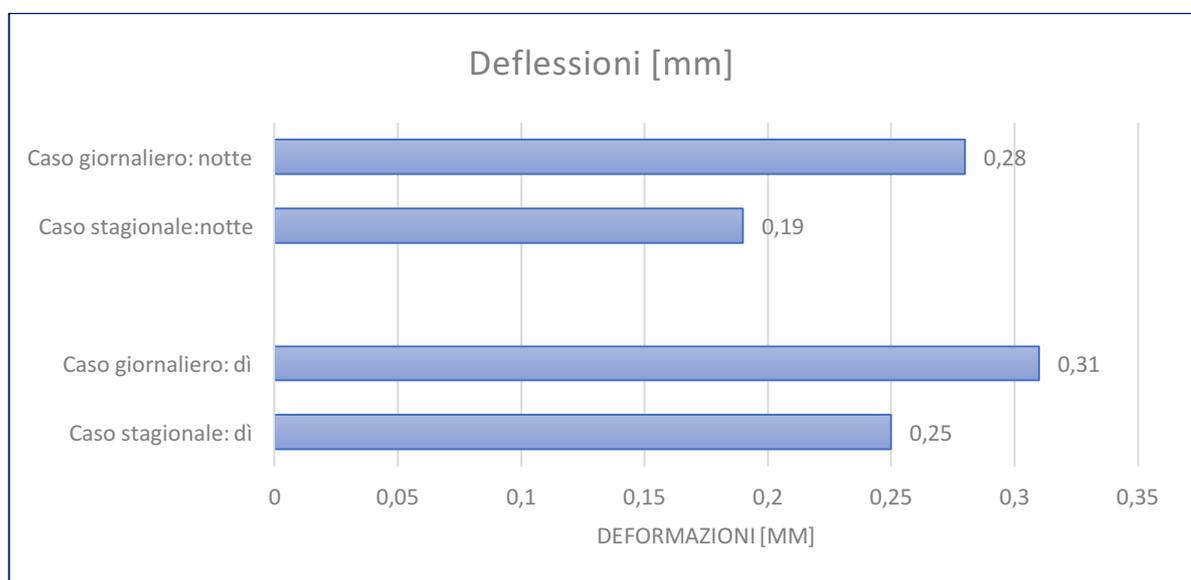


Figura 95: Stato deformativo casi stagionali e giornalieri

Come si nota le deflessioni sia nel caso del dì che della notte risultano più elevate nel caso giornaliero rispetto al caso stagionale; ciò vuole dire che, come nel caso dello studio tensionale,

vi sono deflessioni più elevate considerando un giorno medio tra le stagioni inverno ed estate piuttosto che considerare la totalità delle temperature medie tra le stagioni.

Si riporta di seguito l'andamento incrementale espresso in percentuale:

Tabella 42: Andamento incrementale % deformazioni, casi stagionali e giornalieri

	Caso stagionale: di	Caso stagionale: notte	Caso giornaliero: di	Caso giornaliero: notte
Caso stagionale: di	-			
Caso stagionale: notte	14%	-		
Caso giornaliero: di	11%	24%	-	
Caso giornaliero: notte	6%	19%	5%	-

Come si può notare dalla Tabella soprariportata, i dati sono stati riportati sotto forma di matrice 4x4.

Analizzando dapprima il caso stagionale di con quello notte, si nota che durante il di vi è una deformazione maggiore rispetto alla notte del 14%.

Analizzando il caso giornaliero di con il giornaliero notte, si nota che vi è un incremento del 5%. La deformazione risulta essere maggiore anche in questo caso durante il di.

Da queste prime due considerazioni si deduce che sia durante il singolo giorno che durante il caso stagionale le deflessioni maggiori si registrano durante il di, in particolare si registra una variazione quasi doppia durante il caso stagionale rispetto a quello giornaliero.

Analizzando solamente la situazione di, tra i casi giornalieri e stagionali si nota che la deformazione maggiore è registrata nel caso giornaliero con un incremento rispetto al caso stagionale dell'11%.

Analizzando solamente la situazione notte, tra i casi giornalieri e stagionali si nota che la deformazione maggiore è registrata nel caso giornaliero con un incremento rispetto al caso stagionale del 19%.

I casi combinati risultano di poco interesse pratico.

Altra considerazione che è opportuno fare è valutare come si interfaccia la deformazione relativa al caso giornaliero di massima differenza di temperatura rispetto al caso giornaliero riferito alle 24 ore.

La deformazione massima alle ore 15:00 è pari a 0,43 mm mentre nel caso giornaliero questa varia, durante il dì è pari a 0,31 mentre durante la notte è pari a 0,28 mm. Risulta quindi esserci una deformazione maggiore quando si osserva la massima differenza di temperatura piuttosto che la totalità delle ore della giornata. La deformazione raggiunta nel caso giornaliero alle ore 15:00 è data dall'uso di due thermal conditions, la prima thermal condition è pari a 44°C mentre la seconda thermal condition è posta pari a 33°C, tale valore (0,43 mm) è molto simile al valore raggiunto nel terzo caso del modello Ansys a 50°C, infatti la deformazione era pari a 0,451 mm.

Come accennato nelle descrizioni degli stati tensionali dei vari casi stagionali e giornalieri analizzati, risulta molto interessante sapere che il valore di massima trazione dell'intera pavimentazione è raggiunto all'interno delle barre di compartecipazione comprese tra il blocco di pavimentazione 1 e 2. Valori poco differenti si trovano nelle barre nei blocchi speculari, 3 e 4. Il massimo valore di trazione è nella barra di compartecipazione "1" nel caso stagionale e nel caso giornaliero si trova nella lastra "2". Le barre di compartecipazione rivestono un ruolo molto importante nella costruzione di una pavimentazione rigida aeroportuale poiché l'efficacia di queste e conseguentemente la loro risposta, incidono sul comportamento strutturale dell'intera pavimentazione poiché trasferiscono il carico. Infatti se un giunto è in grado di trasferire il carico allora vuole dire che una porzione di carico può essere trasferita alla lastra adiacente.

D'altro canto l'assenza delle barre di compartecipazione comporterebbe uno stato deformativo molto più elevato in quanto all'interno della pavimentazione si avrebbe solo la risposta strutturale del calcestruzzo. Utilizzando lo stesso modello usato in questo elaborato di tesi si sono andati a "spegnere" i layer assegnati alle barre di compartecipazione e sono stati riapplicati gli stessi carichi termici visti in precedenza.

Se ne riporta ora, per curiosità, l'incremento percentuale rispetto al caso con presenza di barre di compartecipazione, riportato in Tabella 42.

Tabella 43: Andamento incrementale % deflessioni, casi stagionali e giornalieri; assenza barre di compartecipazione

Assenza di barre di compartecipazione	Presenza barre di compartecipazione			
	Caso stagionale: dì	Caso stagionale: notte	Caso giornaliero: dì	Caso giornaliero: notte
Caso stagionale: dì	+16%			
Caso stagionale: notte		+19%		
Caso giornaliero: dì			+22%	
Caso giornaliero: notte				+18%

Come riportato in Tabella 43, si nota come siano essenziali le barre di compartecipazione in quanto influiscono di una percentuale considerevole sulle deflessioni delle pavimentazioni.

Altra considerazione degna di nota è la sovrapposizione degli effetti in una pavimentazione rigida aeroportuale data dai carichi termici, peso proprio della pavimentazione e carichi di traffico. Nell'elaborato di tesi già citato in precedenza "Analisi tenso-deformativa di una pavimentazione rigida aeroportuale sottoposta a carichi di traffico" [7] viene studiato lo stato

tenso-deformativo dovuto all'effetto dei carichi di traffico e del peso proprio della pavimentazione.

Le conclusioni desunte da detto studio sono le seguenti:

“Quando la pavimentazione viene caricata a metà delle lastre, la massima trazione subita dalla pavimentazione corrisponde alla massima trazione subita dalle barre. Invece, la massima compressione subita dalla pavimentazione è in corrispondenza della lastra in calcestruzzo.

Quando la pavimentazione viene caricata tra le lastre la massima trazione e la massima compressione subita dalla pavimentazione corrisponde sempre ai massimi sforzi subiti dalle barre”

Considerando quanto desunto da questo elaborato di tesi si può affermare che le massime trazioni vengano raggiunte all'interno delle barre di compartecipazione più esterne; situazione raggiunta invece solo nel momento in cui la pavimentazione viene caricata a metà delle lastre. Quindi si nota ancora una volta come sia differente la risposta tensionale dell'acciaio rispetto al calcestruzzo, l'acciaio è un materiale che lavora bene a trazione.

Per quanto riguarda le compressioni, come detto, nel momento in cui la pavimentazione è soggetta a carichi termici, la massima risposta tensionale si ottiene dal calcestruzzo; invece per quanto riguarda i carichi termici questa viene ottenuta solo quando si applica il carico di traffico a metà della pavimentazione.

Si conclude dicendo che il posizionamento del carico di traffico influisce sulla posizione dei massimi valori di compressione e trazione in quanto da un punto di vista dei carichi termici vi è una sola risposta comportamentale.

A livello quantitativo i valori delle deflessioni date dai carichi di traffico a metà della pavimentazione sono pari a 0,20 mm, valori confrontabili con quelli dati dai carichi termici.

7- Conclusioni

Questo elaborato di tesi pone la propria attenzione circa le caratteristiche, delle funzioni e infine cita le varie tipologie delle pavimentazioni rigide aeroportuali. In particolar modo sottolinea l'importanza dell'effetto delle temperature mensili, stagionali e giornaliere all'interno della pavimentazione stessa.

È stata compiuta un'analisi di dettaglio delle formulazioni teoriche e sperimentali presenti in letteratura per la determinazione delle temperature all'interno della pavimentazione.

Le formulazioni teoriche analizzate sono state diverse, si è analizzato dapprima la *Formula di Barber*, successivamente si è cercata una soluzione al limite della formula ovvero al fatto che questa non tiene in conto di quante ore intercorrano tra l'alba e lo zenit e tra lo zenit e l'alba che fanno sì che la pavimentazione si scaldi più o meno velocemente. Una formulazione sperimentale in grado di risolvere questo limite è quella proposta da *Faraggi, Jofre e Kramer*. Le due formulazioni sono state applicate in un caso simile in un punto uguale della pavimentazione così da poter essere confrontabili, si è dedotto che le temperature ottenute non variano particolarmente tra le due formulazioni ma data la maggior accuratezza dell'analisi è stata utilizzata per le successive analisi solo la formulazione di *Faraggi, Jofre e Kramer*.

In aggiunta a questa ricerca è stato sviluppato un modello a elementi finiti utilizzando il programma Ansys per calcolare in un altro modo le temperature della pavimentazione.

Il modello ha come base la pavimentazione di riferimento costruita e testata dalla FAA con la variazione introdotta nell'elaborato di tesi "*Analisi tenso-deformativa di una pavimentazione rigida aeroportuale sottoposta a carichi di traffico*", anno accademico 2017/2018 redatta da *Miriam Exposito Balastegui*, relatore Prof.Ing. *Federico Fiori*, nella quale si sono determinati gli sforzi e deformazioni derivanti dal carico di un aereo critico, circa lo spessore equivalente.

In letteratura non vi erano articoli che riportassero questo particolare uso delle analisi transient thermal quindi sono stati analizzati i 3 casi dedotti dalle temperature climatologiche esterne andando a variare la distribuzione delle temperature; si è utilizzata una crescita lineare, costante e due variazioni di picco seguiti da crescita costante e come ultimo caso una distribuzione costante delle temperature. Per conoscere quale fosse il caso che più si avvicinasse alla realtà e quindi per validare il modello è stato fatto un confronto di ogni caso

con gli allungamenti teorici previsti. Il modello più realistico è quello derivante dalla crescita costante delle temperature.

Per lo studio dei casi mensili sono stati analizzati due casi derivanti dal modello Ansys (analisi transient), per lo studio dei casi stagionali invece è stato analizzato un caso derivante dal modello Ansys e 1 caso da formulazione teorica-sperimentale *Faraggi, Jofre, Kramer*. Per il caso giornaliero è stato sfruttato l'articolo pubblicato da *Zahidul Q.Siddique, Mustaque Hossain e Dave Meggers*; da questo sono stati dedotti due casi di interesse, entrambi analizzati.

Dopo aver determinato quali fossero i casi di studio, sempre sfruttando il modello Ansys ma con analisi Transient Structural, si sono analizzati gli sforzi e deformazioni subiti dalla pavimentazione soggetta a carichi termici.

I calcoli effettuati hanno posto una evidente criticità nel caso in cui si consideri la variazione oraria giornaliera della temperatura. Si aggiunge che le sollecitazioni sono maggiori tanto più si prosegue verso l'interno della pavimentazione.

Sono stati effettuati due confronti, uno riferito a tutti i casi derivanti dalle analisi transient thermal basati su modello Ansys e l'altro confronto invece è dato dai casi giornalieri con i casi stagionali. Non è stato possibile fare un confronto tra i due casi stagionali perché le trattazioni da cui derivavano erano molto differenti; nel caso di utilizzo del modello Ansys la temperatura della pavimentazione era funzione della sola temperatura climatologica, nel caso della formula di Faraggi, Jofre e Kramer questa dipendeva dallo spessore della pavimentazione e dalle ore del giorno e non aveva nulla a che fare con la temperatura climatologica esterna.

In tutti i casi ottenuti analizzati si è verificato che i valori di massima compressione si registrano all'interno della lastra in calcestruzzo mentre i valori di massima trazione si raggiungono all'interno delle barre di compartecipazione, in particolare nella seconda o nella prima barra compresa tra i blocchi di pavimentazione 1 e 2.

Dal confronto dei casi 30, 40 e 50°C utilizzando le analisi transient thermal si è notato che l'utilizzo dei dati output della distribuzione lineare delle temperature ha dato un confronto di correttezza del 94% dell'allungamento ottenuto rispetto all'allungamento teorico. In particolare si nota un incremento percentuale molto simile tra trazione e compressione tra i

diversi casi; per quanto riguarda le deflessioni si nota che la pavimentazione tende ad avere una concavità rivolta verso l'alto. La pavimentazione per effetto della temperatura, tende a dilatarsi nella faccia superiore della lastra; ciò avviene in concomitanza con una contrazione della faccia superiore data da una riduzione di umidità. In questi casi si fa presente che non sono stati presi in considerazione gli effetti igrometrici in quanto vi è una scarsa entità ed effetto nei climi europei. Dall'analisi dello stato tensionale è apparso un valore di sforzo di compressione differente nella terza barra rispetto alle altre barre di compartecipazione, ciò potrebbe essere studiato andando a infittire la maglia della mesh.

Dal confronto dei casi stagionali con i casi giornalieri si è notato che vi è uno stato tensionale più elevato nel caso giornaliero rispetto al caso stagionale. Purtroppo i due casi non derivano dalla stessa trattazione e quindi non è possibile compiere altri confronti tra il giorno medio inverno-estate e la media delle temperature dei giorni tra le due stagioni, proprio perché utilizzando la formula teorica si utilizzano dei parametri medi stagionali.

Confrontando il caso giornaliero alle ore 15:00, massima differenza di temperatura, con il caso giornaliero basato sulle 24 ore si nota che si ha un aumento doppio della compressione rispetto alla trazione.

Si sono confrontate le deflessioni del caso giornaliero con il caso stagionale, per entrambi sono stati utilizzati la stessa divisione giornaliera tra dì e notte. Si notano delle deflessioni maggiori nel caso giornaliero che nel caso stagionale. Sia nel caso stagionale che giornaliero si notano delle deflessioni maggiori nel dì rispetto alle deflessioni durante la notte.

In conclusione questo elaborato di tesi permette di capire la variazione del comportamento della pavimentazione alle temperature esterne in termini deformativi e sollecitazionali. Si conclude dicendo che per poter approfondire meglio tale argomento potrebbe essere rivisto il modello andando a variare il passo delle barre di compartecipazione.

Bibliografia

- [1] “Brevi appunti di edilizia romana” a cura di Enrico Ciabatti, dal sito www.colosseum.net
- [2] Approfondimento tratto dal manuale “*Pavimentazioni stradali, approfondimenti sulle pavimentazioni in calcestruzzo: un modello per confrontare i costi di primo impianto e manutenzione*”, pubblicato da Federbeton- 23/07/2016
- [3] Banca dati stazioni metereologiche d’Italia, Meteoblue
All’interno della banca dati si possono avere dati storici risalenti fino al 1985; come citato nella presentazione del portale, *‘I dati derivano dal nostro modello meteorologico globale NEMS a circa 30 km di risoluzione e non può riprodurre in dettaglio effetti atmosferici locali come le isole di calore, correnti d'aria fredda, temporali o tornado ma riproduce con precisione le variazioni di temperatura’*.
https://www.meteoblue.com/it/tempo/previsioni/modelclimate/aeroporto-di-milano-malpensa_italia_3174133
- [4] Elaborato di tesi : “*Modello di analisi strutturale, funzionale ed economica di pavimentazioni stradali in calcestruzzo*”, redatta dall’Ing. Laura Moretti con relatore la prof. Ing. Paola di Mascio - Università La Sapienza, Roma
- [5] Appunti corso “*Tecnica delle pavimentazioni*” 2017-2018 tenuto dal Prof. Ing Emanuele Toraldo - Politecnico di Milano
- [6] Studio teorico- sperimentale relativo all’Italia centrale, riguardante la temperatura media dell’aria, la variazione giornaliera di temperatura, la radiazione giornaliera e la velocità del vento nelle stagioni inverno, estate, primavera ed inverno a cura degli Ing. Di Mascio e Domenichini, datato 1995.
- [7] Articolo: “*Temperature and curling measurements on concrete pavement*” di Siddique, Hossain e Meggers, settembre 2005. Nell’articolo vengono citati i risultati circa il legame temperatura-variazione giornaliera-spessore della pavimentazione ottenuti

dallo studio sperimentale svolto in campo presso l'Università di MIAMI nelle stagioni estate e inverno.

- [8] Biblioteca nazionale centrale di Firenze, definizioni di calore specifico e conduttività termica
- [9] UNI EN ISO 13786:2008 "Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo", entrata in vigore il 1 marzo 2018
- [10] Elaborato di tesi "Analisi tenso-deformativa di una pavimentazione rigida aeroportuale sottoposta a carichi di traffico", anno accademico 2017/2018. Redatta da Miriam Exposito Balastegui, relatore Prof.Ing. Federico Fiori
- [11] Advisory Circular 150/5370-10G, Item P-501 Portland Cement Concrete (PCC) Pavement, Part 6 (Rigid Pavement) – Federal Aviation Administration, July 2014
- [12] Manuale di utilizzo del Software ANSYS, sito web: <https://www.ansys.com>
- [13] Advisory Circular 150/5320-6f, FAA, airport pavement design and evaluation- federal aviation administration, Novembre 2016

Indice delle figure

FIGURA 1: PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE	20
FIGURA 2: PAVIMENTAZIONE RIGIDA	20
FIGURA 3: MECCANISMO DI TRASFERIMENTO DEL CARICO. A SINISTRA PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE, A DESTRA PAVIMENTAZIONE RIGIDA	23
FIGURA 4: MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DEL CARICO TRA LE LASTRE	28
FIGURA 5: JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT	29
FIGURA 6: JOINTED REINFORCED CONCRETE PAVEMENT	30
FIGURA 7: CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT	31
FIGURA 8: PARTICOLARE AEROMOBILE PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO SUI CARRELLI	42
FIGURA 9: RISULTATI DALLA STAZIONE METEOROLOGICA RELATIVA ALL'AEROPORTO DI MILANO MALPENSA RELATIVI ALLE TEMPERATURE GIORNALIERE	48
FIGURA 10: ANDAMENTO TEMPERATURA PAVIMENTAZIONE, MODELLO BARBER- CASO INVERNO	54
FIGURA 11: ANDAMENTO TEMPERATURA PAVIMENTAZIONE, MODELLO BARBER- CASO ESTATE	55
FIGURA 12: ANDAMENTO TEMPERATURA PAVIMENTAZIONE, MODELLO FARAGGI, JOFRE, KRAMER- CASO INVERNO (ALBA-ZENIT)	60
FIGURA 13: ANDAMENTO TEMPERATURA PAVIMENTAZIONE, MODELLO FARAGGI, JOFRE, KRAMER- CASO INVERNO (ZENIT-ALBA)	62
FIGURA 14: ANDAMENTO TEMPERATURA PAVIMENTAZIONE, MODELLO FARAGGI, JOFRE, KRAMER- CASO INVERNO (ALBA-ZENIT)	64
FIGURA 15: ANDAMENTO TEMPERATURA PAVIMENTAZIONE, MODELLO FARAGGI, JOFRE, KRAMER- CASO ESTATE (ZENIT-ALBA)	66
FIGURA 16: GRAFICO TEMPERATURE-SPESSORE DELLA PAVIMENTAZIONE	68
FIGURA 17: GRAFICO TEMPERATURE-ORE DEL GIORNO, TOP	69
FIGURA 18: GRAFICO TEMPERATURE-ORE DEL GIORNO, BOTTOM	71
FIGURA 19: ISTOGRAMMA DEGLI ANDAMENTI TEMPERATURE TOP E BOTTOM E DIFFERENZA	72
FIGURA 20: STEP DI CARICO CASO A.1	82
FIGURA 21: RISULTATO DEL CASO A.1	83
FIGURA 22: STEP DI CARICO CASO A.2	83
FIGURA 23: RISULTATO DEL CASO A.2	84
FIGURA 24: STEP DI CARICO CASO A.3	84
FIGURA 25: RISULTATO DEL CASO A.3	85
FIGURA 26: STEP DI CARICO CASO A.4	85
FIGURA 27: RISULTATO DEL CASO A.4	86
FIGURA 28: STEP DI CARICO CASO B.1	86
FIGURA 29: RISULTATO DEL CASO B.1	87
FIGURA 30: STEP DI CARICO CASO B.2	87
FIGURA 31: RISULTATO DEL CASO B.2	88
FIGURA 32: STEP DI CARICO CASO B.3	88
FIGURA 33: RISULTATO DEL CASO B.3	89
FIGURA 34: STEP DI CARICO CASO B.4	89
FIGURA 35: RISULTATO DEL CASO B.4	90
FIGURA 36: STEP DI CARICO CASO D.1	90
FIGURA 37: RISULTATO DEL CASO D.1	91
FIGURA 38: STEP DI CARICO CASO D.2	91
FIGURA 39: RISULTATO DEL CASO D.2	92
FIGURA 40: STEP DI CARICO CASO D.3	92
FIGURA 41: RISULTATO DEL CASO D.3	93
FIGURA 42: STEP DI CARICO CASO D.4	93
FIGURA 43: RISULTATO DEL CASO D.4	94
FIGURA 44: ANDAMENTO TEMPERATURA, DATI INPUT CASO 1 THERMAL	97
FIGURA 45: ANDAMENTO TEMPERATURA, DATI OUTPUT CASO 2 THERMAL	100
FIGURA 46: ANDAMENTO TEMPERATURA, DATI INPUT CASO 2 THERMAL	103
FIGURA 47: ANDAMENTO TEMPERATURA, DATI OUTPUT CASO 2 THERMAL	106
FIGURA 48: ANDAMENTO TEMPERATURA, DATI OUTPUT CASO TEMPERATURA COSTANTE	109

FIGURA 49: LAYOUT DELLA PAVIMENTAZIONE PROGETTATA PER LA FAA	120
FIGURA 50: PAVIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO FAA	121
FIGURA 51: MODELLO PAVIMENTAZIONE IN ANSYS GEOMETRY, PARTICOLARE LUNGHEZZA PAVIMENTAZIONE	130
FIGURA 52: MODELLO PAVIMENTAZIONE IN ANSYS GEOMETRY, PARTICOLARE SPESSORE DELLA PAVIMENTAZIONE	130
FIGURA 53: MODELLO PAVIMENTAZIONE IN ANSYS GEOMETRY, PARTICOLARE ALTEZZA DELLA PAVIMENTAZIONE	131
FIGURA 54: PARTICOLARI RELATIVI ALLE BARRE DI COMPARTICIPAZIONE	131
FIGURA 55: DATI ESTRATTI DAL REPORT DEL MODELLO RIFERITI AL MATERIALE P501 PCC	133
FIGURA 56: DATI ESTRATTI DAL REPORT DEL MODELLO RIFERITI ALLO STRATO EQUIVALENTE	134
FIGURA 57: VISUALE DI ANSYS ENGINEERING DATA, MATERIALE STRATO EQUIVALENTE	134
FIGURA 58: DATI ESTRATTI DAL REPORT DEL MODELLO RIFERITI A STRUCTURAL STEEL	135
FIGURA 59: PROGRAMMA ANSYS, REALIZZAZIONE MESH OMOGENEE	137
FIGURA 60: THERMAL CONDITION, CASO 1, 30°	144
FIGURA 61: STATO TENSIONALE CASO 30°C, STRUTTURA TOTALE	145
FIGURA 62: STATO TENSIONALE CASO 30°C, BARRE DI COMPARTICIPAZIONE	146
FIGURA 63: DETTAGLIO MASSIMA COMPRESSIONE DELLA BARRA DI COMPARTICIPAZIONE, CASO 30°C	147
FIGURA 64: COMPORTAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE CAUSATO DAL RISCALDAMENTO.....	148
FIGURA 65: TOTAL DEFORMATION, CASO 30°C	149
FIGURA 66: THERMAL CONDITION, CASO 40°	150
FIGURA 67: STATO TENSIONALE CASO 40°C, STRUTTURA TOTALE	151
FIGURA 68: TOTAL DEFORMATION, CASO 40°C	153
FIGURA 69: THERMAL CONDITION, CASO 50°C.....	154
FIGURA 70: STATO TENSIONALE CASO 50°C, STRUTTURA TOTALE	155
FIGURA 71: TOTAL DEFORMATION, CASO 50°C	157
FIGURA 72: CONFRONTO VALORI DI COMPRESSIONE E TRAZIONE CASI MODELLO ANSYS	158
FIGURA 73: CONFRONTO DEFLESSIONI CASI MODELLO ANSYS	160
FIGURA 74: PRIMA THERMAL CONDITION, CASO VARIAZIONE GIORNALIERA DI TEMPERATURA	163
FIGURA 75: SECONDA THERMAL CONDITION, CASO VARIAZIONE GIORNALIERA DI TEMPERATURA	163
FIGURA 76: VARIAZIONE TEMPERATURA MEDIA STAGIONALE (INVERNO ED ESTATE) NELLE ORE DEL GIORNO	164
FIGURA 77: STATO TENSIONALE , COMPRESSIONE – CASO STAGIONALE	166
FIGURA 78: STATO TENSIONALE, TRAZIONE- CASO STAGIONALE	167
FIGURA 79: STATO DEFORMATICO, CASO STAGIONALE DIURNO.....	168
FIGURA 80: COMPORTAMENTO PAVIMENTAZIONE DIURNO,	169
FIGURA 81: STATO DEFORMATICO, CASO STAGIONALE NOTTURNO	169
FIGURA 82: COMPORTAMENTO PAVIMENTAZIONE NOTTURNO	170
FIGURA 83: GRAFICO RIPIANTE LA VARIAZIONE TEMPERATURA-SPESSORE	171
FIGURA 84: PRIMA THERMAL CONDITION, CASO VARIAZIONE GIORNALIERA DI TEMPERATURA	175
FIGURA 85: SECONDA THERMAL CONDITION, CASO VARIAZIONE GIORNALIERA DI TEMPERATURA	175
FIGURA 86: STATO TENSIONALE CASO SITUAZIONE GIORNALIERA, INTERA STRUTTURA	177
FIGURA 87: TOTAL DEFORMATION CASO GIORNALIERO NOTTURNO	179
FIGURA 88: TOTAL DEFORMATION CASO GIORNALIERO DIURNO.....	180
FIGURA 89/A: STATO TENSIONALE CASO MASSIMO DELTA H.15:00, COMPRESSIONE	181
FIGURA 90/B: STATO TENSIONALE CASO MASSIMO DELTA H.15:00, COMPRESSIONE	182
FIGURA 91/C: STATO TENSIONALE CASO MASSIMO DELTA H.15:00, TRAZIONE.....	182
FIGURA 92/D: STATO TENSIONALE CASO MASSIMO DELTA H.15:00, TRAZIONE	183
FIGURA 93: TOTAL DEFORMATION CASO MASSIMO DELTA H 15:00.....	184
FIGURA 94: CONFRONTO DELLO STATO TENSIONALE NEI CASI GIORNALIERI E STAGIONALI	186
FIGURA 95: STATO DEFORMATICO CASI STAGIONALI E GIORNALIERI	188

Indice delle tabelle

TABELLA 1: SPECIFICHE TECNICHE AC 150/5320-6F, FAA- PAVIMENTAZIONE RIGIDA AEROPORTUALE	38
TABELLA 2: TABELLA FATTORI DI CONVERSIONE-METODO FAA	43
TABELLA 3: DATI RIFERITI ALL'ITALIA SETTENTRIONALE, RIPRESI DALLO STUDIO DI "DI MASCIO E DOMENICHINI" ANNO 1995	51
TABELLA 4: APPLICAZIONE MODELLO DI BARBER- INVERNO	52
TABELLA 5: APPLICAZIONE MODELLO DI BARBER- ESTATE	54
TABELLA 6: APPLICAZIONE MODELLO DI FARAGGI, JOFRE, KRAMER – INVERNO 1)	59
TABELLA 7: APPLICAZIONE MODELLO DI FARAGGI, JOFRE, KRAMER – INVERNO 2)	61
TABELLA 8: APPLICAZIONE MODELLO DI FARAGGI, JOFRE, KRAMER – ESTATE 1)	63
TABELLA 9: APPLICAZIONE MODELLO DI FARAGGI, JOFRE, KRAMER – ESTATE 2)	65
TABELLA 10: DATI TEMPERATURE-ORE DEL GIORNO, TOP	69
TABELLA 11: DATI TEMPERATURE-ORE DEL GIORNO, BOTTOM	71
<i>TABELLA 12: TEMPERATURE DIVISE PER MESI, MILANO MALPENSA</i>	<i>75</i>
TABELLA 13: TEMPERATURE DIVISE PER STAGIONI, MILANO MALPENSA	75
TABELLA 14: CASI DI TEMPERATURE ANALIZZATI	77
TABELLA 15: DATI STRUCTURAL STEEL PER ANALISI TRANSIENT THERMAL	78
TABELLA 16: DATI P501 PCC PER ANALISI TRANSIENT THERMAL	79
TABELLA 17: DATI THERMAL CONDUCTIVITY DEGLI STRATI COSTITUENTI LO STRATO EQUIVALENTE	79
TABELLA 18: DATI CALORE SPECIFICO DEGLI STRATI COSTITUENTI LO STRATO EQUIVALENTE	80
TABELLA 19: DATI STRATO EQUIVALENTE PER ANALISI TRANSIENT THERMAL	80
TABELLA 20: CASI OGGETTO DI STUDIO, ANALISI TRANSIENT THERMAL	81
TABELLA 21: SPOSTAMENTI RELATIVI AL CASO 1- DATI INPUT	97
TABELLA 22: SPOSTAMENTI RELATIVI AL CASO 1- DATI OUTPUT	100
TABELLA 23: SPOSTAMENTI RELATIVI AL CASO 2- DATI INPUT	103
TABELLA 24: SPOSTAMENTI RELATIVI AL CASO 2- DATI OUTPUT	106
TABELLA 25: SPOSTAMENTI RELATIVI AL CASO TEMPERATURA COSTANTE	109
TABELLA 26: RISULTATI CONFRONTO MODELLO-REALTÀ	112
TABELLA 27: CASI DI STUDIO PER LA DETERMINAZIONE DEI CARICHI TERMICI	114
TABELLA 28: PROPORZIONI P-501 PCC MIX PER IARDA CUBA, FAA	123
TABELLA 29: COMPOSIZIONE AGGREGATO GROSSOLANO N.57	124
TABELLA 30: COMPOSIZIONE AGGREGATO MEDIO N.8	124
TABELLA 31: COMPOSIZIONE SABBIA PER CALCESTRUZZO	125
TABELLA 32: CARATTERISTICHE STRUCTURAL STEEL	128
TABELLA 33: MATERIALI USATI NEL MODELLO	134
TABELLA 34: INCREMENTO VALORI COMPRESSIONE, CASI ANSYS	159
TABELLA 35: INCREMENTO VALORI TRAZIONE, CASI ANSYS	159
TABELLA 36: INCREMENTO VALORI COMPRESSIONE, CASI ANSYS	161
TABELLA 37: TEMPERATURA MEDIA STAGIONALE(INVERNO+ESTATE)- ORE DEL GIORNO	165
TABELLA 38: DATI TEMPERATURE-ORE DEL GIORNO, TOP	172
TABELLA 39: DATI TEMPERATURE-ORE DEL GIORNO, BOTTOM	173
TABELLA 40: ANDAMENTO INCREMENTALE IN % TRAZIONE, CASI STAGIONALI E GIORNALIERI	186
TABELLA 41: ANDAMENTO INCREMENTALE IN % COMPRESSIONE, CASI STAGIONALI E GIORNALIERI	187
TABELLA 42: ANDAMENTO INCREMENTALE % DEFORMAZIONI, CASI STAGIONALI E GIORNALIERI	189
TABELLA 43: ANDAMENTO INCREMENTALE % DEFLESSIONI, CASI STAGIONALI E GIORNALIERI; ASSENZA BARRE DI COMPARTICIPAZIONE	191