



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

INDAGINE SPERIMENTALE E MODELLAZIONE DEL
COMPORTAMENTO DEFORMATIVO DI STRIP
AEROPORTUALI

Tesi di Laurea Magistrale

Relatore:

prof. Ezio Santagata

Candidato:

Roberto Federico Romero Peñaloza

Correlatori:

prof. Pier Paolo Riviera

ing. Riccardo Rabezzana

Anno Accademico 2021/2022

Dedicada a mi Tía Negra, uno de los pilares de mi vida, con quien me hubiera encantado compartir este momento y sé que estaría orgullosa.

ABSTRACT

La sicurezza rappresenta il principale fattore intorno a cui gravitano le attività connesse con la progettazione, l'esercizio e la manutenzione delle piste di volo. A tal fine, l'ICAO (International Civil Aviation Organization) ha nel corso degli anni predisposto una serie di interventi mirati a incrementare la sicurezza connessa al trasporto aereo, con particolare enfasi a tutto ciò inerente alle piste aeroportuali.

Secondo quanto riportato dall'ICAO, il 50% degli eventi incidentali si verifica in prossimità delle piste di volo, la maggior parte dei quali legati a fuoriuscite di pista (overrun or veer-off) durante la fase di atterraggio.

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sulla valutazione delle caratteristiche tenso-deformative dei materiali costituenti le runway strip, ovvero l'area di sicurezza adiacente alla pista di volo, avente la duplice funzione di assicurare il rallentamento di un aeromobile in fuoriuscita e, contestualmente, assicurare una sufficiente capacità portante in grado di non danneggiare il velivolo. A tal fine, l'ICAO ha previsto che l'affondamento del carrello anteriore dell'aeromobile non debba essere maggiore di 15-17 centimetri, valore che può essere garantito qualora la capacità portante del terreno, ad una profondità di 15 cm sotto la superficie dello strato, corrisponda ad un CBR compreso tra 15 e 20.

Il lavoro di tesi si è articolato in una fase sperimentale di laboratorio, mirata a misurare direttamente le deformazioni sotto carico di un terreno prelevato dall'area di strip di uno dei principali aeroporti del nord Italia, seguita da una fase di modellazione, focalizzata sulla ricerca del modulo elastico del materiale e del suo decadimento nel tempo conseguente al passaggio ripetuto dei carichi mobili.

L'indagine sperimentale è stata condotta attraverso l'utilizzo di un'attrezzatura in grado di simulare il passaggio delle ruote del carrello anteriore dell'aeromobile, denominata wheel tracker, mentre la fase di modellazione si è sviluppata con l'ausilio di un opportuno software utilizzate nelle procedure di design delle pavimentazioni flessibili (KenPave).

I risultati ottenuti tendono a confermare la validità dell'approccio utilizzato per desumere le caratteristiche di rigidità del materiale utilizzato nelle aree di strip e comprenderne la loro evoluzione nel tempo. Proseguendo, i risultati dei moduli

elastici sono anche stati utilizzati per valutare i valori di CBR proposti per le normative vigenti, attraverso correlazioni statistiche, ottenendo valori validi.

Sommario

Capitolo 1 - Introduzione	10
Capitolo 2 - L'Aeroporto.....	13
2.1. Classificazione	13
2.1.1. Classifica prevista dal Regolamento per la Navigazione Aerea.....	13
2.1.2. Classifica tecnica.....	14
2.1.3. Classifica in base alla proprietà	14
2.1.4. Classifica demaniale	14
2.1.5. Classifica funzionale	15
2.1.6. Classifica funzione dell'assistenza antincendio disponibile	17
2.1.7. Classifica doganale e sanitaria.....	17
2.1.8. Classificazione in funzione della capacità portante delle pavimentazioni.....	18
2.2. Infrastruttura Aeroportuale	18
Capitolo 3 - Incidentalità e Sicurezza	21
3.1. Categorie Incidentale	21
3.2. I dati	23
3.3. Aree di Sicurezza dell'Aeroporto.....	28
3.4. Requisiti Normativi della Capacità Portante delle Strips Aeroportuali.....	30
Capitolo 4 - Indagini sperimentali	33
4.1. Campi di prova.....	33
4.2. Caratterizzazione del materiale.....	35
4.2.1. Distribuzione granulometrica.....	35
4.2.2. Limiti di Atterberg	37
4.2.3. Prove per la determinazione della curva di compattazione Proctor	39
4.2.4. Prove per la determinazione dell'Indice CBR Immediato e dell'Indice dopo Immersione in acqua.....	41
Capitolo 5 - Simulazione pratica	44
5.1. Macchina ormaiatrice	44
5.1.1. Impostazione della macchina.....	45
5.2. Preparazione delle lastre e realizzazione della prova.....	46
5.3. Materiale fornito dal punto di indagine G-005	50
5.4. Materiale fornito dal punto di indagine N-050	52
Capitolo 6 - Simulazione teorica.....	57

Capitolo 7 - Conclusioni	67
Bibliografia.....	70

Capitolo 1 - Introduzione

Aviazione e sicurezza aerea sono indissociabili: in assenza di norme rigorose che garantiscono un livello elevato di sicurezza, il trasporto aereo non avrebbe potuto svilupparsi come invece ha fatto. L'attuale situazione normativa internazionale è stata definita dalle organizzazioni direttamente coinvolte le quali hanno prodotto documenti di dettagliate misure pratiche volte ad adattarsi e a cui tutti gli Stati si sono sistematicamente adeguati. Sul piano mondiale è l'Organizzazione dell'Aviazione Civile Internazionale (ICAO) a dettare gli standard minimi di sicurezza, ed è al contempo la responsabile del monitoraggio degli incidenti che occorrono anno in anno, con l'obiettivo di perfezionare le normative già presenti. Questo monitoraggio viene espresso nel cd. "rapporto annuale di sicurezza", dall'inglese Safety Report, dove si riporta in modo dettagliato la notevole frequenza di incidenti aerei che avvengono per escursioni fuori pista, per veer-off oppure l'overrun. Di fronte a tale situazione, gli enti internazionali hanno sviluppato delle linee guida da considerare, tanto raccomandazioni quanto requisiti, quando si tratta dei terreni circostanti la pista. Questi terreni formano parte della chiamata area di sicurezza dell'aeroporto, quindi, devono essere dotati di caratteristiche specifiche. A partire da questo nel presente lavoro di Tesi si decide indagare sul comportamento tenso-deformativo di questi terreni, in specifico sul terreno delle Runway Strip. Esse hanno la doppia funzione di decelerare l'aeromobile quando inizia una escursione fuori pista, e riuscire a evitare un danneggiamento nel velivolo attraverso una capacità portante adeguata. Dalla necessità della Strip di soddisfare la sua funzionalità, l'ICAO ha sviluppato delle linee guida ove si prevede che l'affondamento del carrello anteriore dell'aeromobile non sia maggiore a 15 centimetri, valore specificato dai costruttori per non generare il fallimento del carrello; a tal fine sarà richiesta una capacità portante che oscilla in un valore dell'indice di portanza CBR compreso tra 15 e 20, questo permettere la decelerazione dell'aereo però senza provocare dei danni.

A integrazione di quanto riportato nelle linee guida, l'elaborato comprende due fasi riguardanti la simulazione pratica, in laboratorio mediante l'utilizzo della macchina ormaiatrice, del passaggio delle ruote del carrello anteriore del velivolo.

Secondo quanto descritto in precedenza, il lavoro si è basato sulla simulazione del passaggio delle ruote del carrello anteriore dell'aeromobile. Questa

simulazione è stata suddivisa in due fasi. La prima, chiamata “Simulazione Pratica”, realizzata attraverso l’utilizzo della macchina ormaiatrice. Riguarda, innanzitutto, la misura diretta dell’affondamento, dovuto dal passaggio delle ruote su delle lastre costruite col terreno ricavato da uno degli aeroporti più importanti del nord Italia. La seconda fase, invece, si è svolta sulla base dei risultati ottenuti nella prima fase e cerca di riprodurli facendo variare il valore del modulo elastico. Per questa fase si ricorre all’utilizzo di un programma di calcolo basato sulla teoria del multistrato elastico lineare (KenPave), valutando il comportamento sotto carico.

L’analisi dei risultati delle prove è stata effettuata in maniera integrata, verificando cioè la coerenza interna dell’insieme dei dati sperimentali acquisiti. I valori ottenuti tendono a verificare la applicabilità dell’approccio impiegato per valutare in maniera più semplice ed economica le caratteristiche di rigidità del materiale disposto nelle aree di Strip e comprenderne la loro evoluzione nel tempo.

Capitolo 2 - L'Aeroporto

Sebbene l'aeroporto nella enciclopedia è definito come il terreno provvisto delle attrezzature per l'atterraggio e il decollo degli aeromobili e dotato delle infrastrutture per costituire un centro di traffico aereo, l'ICAO, mediante uno dei suoi annessi, ha dato varie definizioni e classifiche, generali e specifiche, con riferimento agli aeroporti, definendo l'aerodromi come "un'area delimitata su terra o acqua (comprendente edifici, installazioni, impianti e apparati) destinata, in tutto oppure in parte, all'arrivo, alla partenza ed al movimento al suolo di aeromobili" [1]. Nel frattempo, ci si concentra sulla classifica di essi seguendo diversi criteri.

2.1. Classificazione

Gli aeroporti non sono tutti uguali, la loro classifica è ampia e può variare rispetto a diversi fattori e criteri, ed ognuno di essi permette di catalogare l'aerodromo dentro a delle categorie omogenee. Le classifiche in base alle quali vengono suddivisi gli aeroporti sono diverse:

- 1- Classifica prevista dal Regolamento per la Navigazione Aerea;
- 2- Classifica tecnica;
- 3- Classifica in base alla proprietà;
- 4- Classifica demaniale;
- 5- Classifica funzionale;
- 6- Classifica d'accordo all' Assistenza antincendio disponibile;
- 7- Classifica doganale e sanitaria;

2.1.1. Classifica prevista dal Regolamento per la Navigazione Aerea

La classificazione, alla quale fa riferimento l'articolo 6 del Regolamento per la Navigazione Aerea, definisce come:

- Aeroporto: "località sia terrestre che acquea, destinata, anche via temporanea, alla partenza, all'apporto ed allo stazionamento degli aeromobili (agli effetti del Regolamento, sono considerati aeroporti anche gli aeroscali per l'atterramento dei dirigibili e gli idroscali per l'ammaramento degli idrovolanti" [2];

- Campo di volo: località istituita dallo Stato destinata al volo degli aerei, per la quale valgono, in quanto applicabili, le norme previste dagli aeroporti privati;
- Campo di fortuna: località indicata dal Ministero competente, utilizzata dagli aeromobili soltanto in occasione di una forzata discesa (su campi di fortuna a tal fine designati dallo stesso Ministero possono operare gli aeromobili da turismo).

2.1.2. Classifica tecnica

La classifica tecnica considera gli aeroporti secondo il tipo di aeromobili cui sono destinati:

- Aeroporti: aerodromi basati su terra e destinati ad aeroplani o elicotteri;
- Aeroscali: aree destinate alle manovre di atterraggio e decollo dei dirigibili;
- Idroscali: aerodromi ubicati sul mare o altri specchi d'acqua, utilizzabili da idrovolanti o aeromobili anfibi;
- Eliporti: aree situate presso un aerodromo o anche su edifici, destinate all'involo e all'approdo di elicotteri;
- Aviosuperfici ed elisuperfici: aree di terreno non classificate come aeroporti o eliporto, oppure specchi d'acqua non classificati come idroscali, idonei a consentire le operazioni di determinati tipi di aeromobili condotti da piloti in possesso di specifiche abilitazioni.

2.1.3. Classifica in base alla proprietà

La classifica in base alla proprietà degli aeroporti e delle aree aeroportuali comprende:

- Aeroporti statali: di proprietà e gestiti dallo Stato;
- Aeroporti privati: di proprietà privata e gestiti da privati a scopo turistico, di addestramento, oppure per collaudo e prove di aerei. Devono essere autorizzati dal Ministero competente prima della loro istituzione.

2.1.4. Classifica demaniale

La classifica demaniale suddivide gli aeroporti in base al tipo di utenti che li utilizzano:

- Aeroporti militari: presentano una configurazione con piste di volo e impianti di supporto a terra tali per cui l'aeroporto possa espletare le proprie funzioni sia in tempo di pace sia di guerra. Essi si distinguono in

armati (sono sedi permanenti di reparti o scuole di volo e sono dotati di mezzi aerei, di impianti e di personale), attrezzati (sono dotati di tutti i servizi necessari per l'attività di volo, ma non sono sedi permanenti di reparti o di scuole), custoditi (sono aeroporti di possibile utilizzazione nel futuro, già dotati di installazioni e di servizi aeroportuali e perciò necessitano di continua sorveglianza) e zone demaniali aeronautiche (sono particolari zone di terreno adatte per l'eventuale trasformazione di campi di volo).

- Aeroporti civili: sono quelli impiegati per il traffico aereo civile e non solo devono essere dotati di tutti i mezzi per il volo come assistenza, telecomunicazioni, sanità, antincendio ma anche a seconda della loro importanza (oppure la classe dell'aeroporto civile), dei servizi necessari al traffico aereo civile. Si suddividono in:
 - Aeroporti locali: adibiti allo scalo di linee aeree regionali o di voli di tipo turistico, o sportivo, o per lavoro, con apparecchi privati o di noleggio;
 - Aeroporti nazionali: servono le linee aeree del solo traffico nazionale;
 - Aeroporti internazionali: servono le linee aeree che collegano tra loro gli stati di uno stesso continente;
 - Aeroporti intercontinentali: dove atterrano e decollano aeromobili che compiono voli transoceanici o transcontinentali.

2.1.5. Classifica funzionale

La classifica funzionale considera le caratteristiche fisiche degli aeroporti e ha lo scopo di individuare quali classi di aeromobili possono operare con sicurezza all'interno di un'infrastruttura aeroportuale, in funzione delle caratteristiche fisiche di quest'ultima. L'ICAO ha sviluppato un Codice di Riferimento dell'Aeroporto ("*Aerodrome Reference Code*"), riportato nell'Annesso 14, costituito da due elementi relativi alle caratteristiche, prestazioni e alle dimensioni dell'aereo:

- Elemento numerico ("*Code Number*"): individua la lunghezza della pista di riferimento ("*aeroplano reference field length*"), cioè la minima lunghezza necessaria per il decollo dell'aeromobile critico, al peso massimo. Questo elemento numerico è compreso tra "1" e "4".

- Elemento letterale (“Code Letter”): individua l’apertura alare e la larghezza massima del carrello principale dell’aereo critico, scegliendo tra i due dati quello che richiede caratteristiche superiore di pista.

Numero di codice	Lunghezza della pista di riferimento dell’aeromobile	Lettere di codice	Apertura alare	Larghezza massima del carrello principale
1	Inferiore a 800 m	A	Inferiore a 15 m	Inferiore a 4,5 m
2	Da 800 m a 1200 m escluso	B	Da 15 m a 24 m esclusa	Da 4,5 m a 6 m escluso
3	Da 1200 m a 1800 m escluso	C	Da 24 m a 36 m escluso	Da 6 m a 9 m escluso
4	1800 m o più	D	Da 36 m a 52 m escluso	Da 9 m a 14 m escluso
		E	Da 52 a 65 m escluso	Da 9 m a 14 m escluso
		F	Da 65 m a 80 m escluso	Da 14 m a 16 m escluso

Tabella 1 - Criteri della classifica funzionale ICAO basata sulle caratteristiche dell’aeromobile di progetto

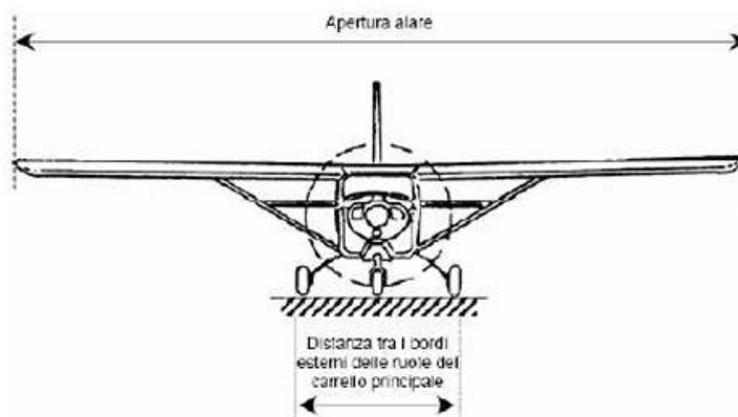


Figura 1- Apertura alare e distanza tra i bordi esterni delle ruote del carrello principale di un velivolo

2.1.6. Classifica funzione dell'assistenza antincendio disponibile

La classifica antincendio suddivide gli aeroporti in dieci categorie in funzione alle dimensioni massime degli aerei, i quali operano all'interno di essi. Per ogni categoria è espresso il livello di protezione che deve essere assicurato, sulla base della quantità e qualità degli agenti estinguenti e sulla base del numero di veicoli antincendio operativamente disponibili. Inoltre, ad ogni categoria sono associati i tipi di aeromobili espressi in termini di larghezza e lunghezza della fusoliera.

Nella seguente tabella si riportano le categorie aeroportuali secondo la classifica antincendio.

Categorie aeroportuali	Lunghezza totale dell'aeromobile	Larghezza massima della fusoliera	Numero di veicoli Pronto Intervento
1	fino 9 m escluso	2 m	1
2	Da 9 m a 12 m escluso	2 m	1
3	Da 12 m a 18 m escluso	3 m	1
4	Da 18 m a 24 m escluso	4 m	1
5	Da 24 m a 28 m escluso	4 m	1
6	Da 28 m a 39 m escluso	5 m	2
7	Da 39 m a 49 m escluso	5 m	2
8	Da 49 m a 61 m escluso	7 m	3
9	Da 61 m a 76 m escluso	7 m	3
10	Da 76 m a 90 m escluso	8 m	3

Tabella 2 - Categorie antincendio aeroporti

2.1.7. Classifica doganale e sanitaria

La classifica doganale e sanitaria, secondo l'art. 36 del Regolamento per la Navigazione Aerea, divide gli aeroporti in:

- Doganali: definiti come "quegli aeroporti in cui si svolge traffico passeggeri e/o merci da/per l'estero, per cui è prescritto l'espletamento dei controlli e delle formalità doganali
- Autorizzati: ad ammettere provenienze da paesi esteri, sempre che questi non risultino oggetto di ordinanze di sanità emanate dal Ministero della Sanità

- Sanitari: l'aeroporto abilitato ad accogliere traffico da qualsiasi provenienza, comprese le zone sottoposte ad ordinanza sanitaria (cioè affette da malattie epidemiche).

2.1.8. Classificazione in funzione della capacità portante delle pavimentazioni

Per questa classifica l'ICAO ha proposto un sistema chiamato ACN/PCN il quale impedisce che aeromobili con peso eccessivo producano danni sulle pavimentazioni.

Questo sistema è composto da due definizioni, che caratterizzano ogni aereo. L'ACN, dall'inglese "*Aircraft Classification Number*", è un numero che rappresenta l'effetto relativo di un aeromobile, valutato in base al suo peso massimo al decollo, su un modello di pavimentazione appoggiato su un terreno di sottofondo qualificato con una capacità portante specifica. E dal PCN "*Pavement Classification Number*" cioè un valore che manifesta la capacità portante di una pavimentazione, rappresentata in termini di carico per ruota da essa sopportato, con una pressione di gonfiaggio standard.

2.2. Infrastruttura Aeroportuale

Negli aeroporti si possono distinguere diverse zone secondo le attività che si svolgono. Si tratta delle attività di manovra di atterraggio e decollo, di parcheggio, rifornimento, manutenzione e imbarco e sbarco passeggeri. Quindi, ogni aeroporto viene suddiviso in:

- Area di atterraggio: "*Landing Area*", quella parte dell'area di movimento destinata all'atterraggio o al decollo di aeromobili [3].;
- Area di manovra: "*Manoeuvring Area*", la parte di un aeroporto adibita al decollo, all'atterraggio ed al movimento al suolo degli aeromobili, con esclusione dei piazzali [3].
- Area di movimento: "*Movement Area*" la parte di un aeroporto adibita al decollo, all'atterraggio ed al movimento al suolo degli aeromobili comprendente l'area di manovra e i piazzali [3].

Queste tre zone comprendono la maggior parte degli elementi che si trovano negli aeroporti, tra questi possiamo distinguere:

- Pista di volo, "*runway*": "area rettangolare definita su un aeroporto predisposta per l'atterraggio e il decollo degli aeromobili" [3]. Quindi con

delle caratteristiche ben precise in termini di lunghezza, larghezza, pendenze longitudinali e trasversali con le quali viene classificata;

- Via di rullaggio e di circolazione, "*Taxiway*": è un "percorso definito destinato al rullaggio degli aeromobili, avente lo scopo di collegare differenti aree dell'aeroporto" [3];
- Raccordo di accesso alle piazzole, "*Aircraft Stand Taxilane*": "parte del piazzale destinata a via di rullaggio ed avente la funzione di fornire accesso unicamente alle piazzole di sosta aeromobili" [3];
- Via di rullaggio sul piazzale, "*Apron Taxiway*": "parte di un sistema di vie di rullaggio situato su un piazzale ed avente la funzione di permettere il rullaggio attraverso il piazzale stesso" [3];
- Raccordo di uscita rapida, "*Rapid exit taxiway*": è la "via di rullaggio collegata, ad angolo acuto, ad una pista e avente lo scopo di permettere ai velivoli in atterraggio di liberare la pista a velocità maggiore di quella consentita sugli altri raccordi di uscita, minimizzando di conseguenza i tempi di occupazione della pista stessa" [3].

Inoltre, le piste possono essere divise secondo il tipo di operazioni che sono predisposte ad accogliere. Abitualmente le piste sono divise in: piste strumentali e piste non strumentali. Per piste strumentali si intende quelle dotate di radioassistenze o altri ausili in grado di condurre l'avvicinamento alla pista e far completare la manovra in maniera sicura anche in condizioni meteorologiche sfavorevoli. Queste si suddividono in due categorie, piste di precisione dotate di un apparato che consente la guida del velivolo sul sentiero di discesa (piano verticale); mentre le seconde non forniscono la guida nel piano verticale.

Capitolo 3 - Incidentalità e Sicurezza

Di sicuro esistono molti fattori da prendere in considerazione quando si pensa all'aviazione indiscutibilmente, però, la sicurezza aeroportuale è nei primi posti di questa lista. Ai fini di valutarla in continuazione, l'ICAO tutti gli anni realizza un rapporto di essa, chiamato "*Safety Report*", evidenziando i principali motivi di incidentalità, esaminando attentamente i dati che esso fornisce. In questo modo riesce a riconsiderare le raccomandazioni adottate precedentemente oppure proporre nuove misure.

3.1. Categorie Incidentale

Per semplificare la valutazione degli incidenti, l'ICAO le ha divise in cinque categorie, le quali sono denominate di alto rischio a causa della loro ripetibilità negli ultimi anni. Esse sono state identificate prendendo in considerazione 4 fattori importanti, i quali sono: i decessi, gli incidenti mortali, gli incidenti, e gli eventi con danni significativi nei velivoli.

Queste categorie sono usate come base nell'analisi della sicurezza in modo da raggiungere una diminuzione nei rischi e allo scopo di elaborare il cosiddetto "Piano di sicurezza globale dell'aviazione". Le categorie menzionate sono:

- Volo controllato su terreno ("Controlled flight into terrain");
- Perdita di controllo in volo ("Loss on control in-flight");
- Collisione a mezz'aria ("Mid-air collision");
- Escursione fuori pista ("Runway excursion");
- Incursione in pista ("Runway incursión").

Il seguente grafico è estratto dal rapporto di sicurezza dell'ICAO:

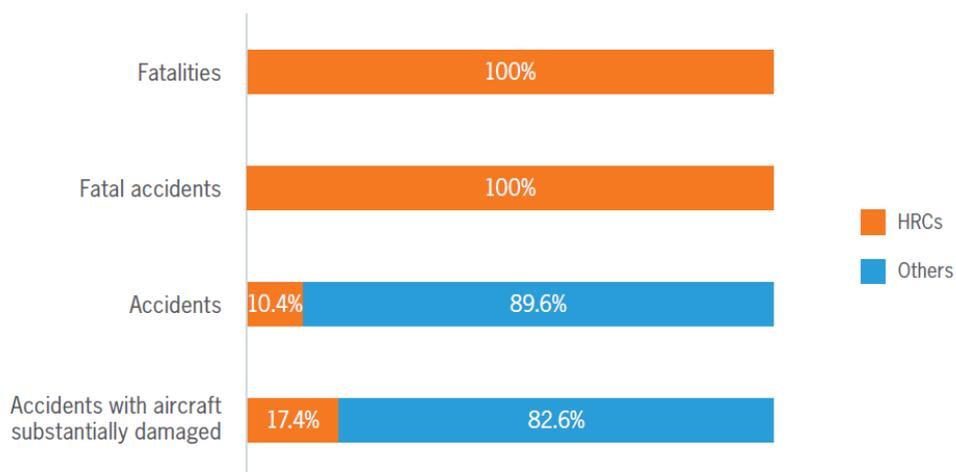


Figura 2 – Distribuzione della incidentalità secondo le categorie di alto rischio

Si possono distinguere due tipi diversi di uscita di pista: una deviazione laterale rispetto all'asse longitudinale pista ("Veer-off") e l'altra un'uscita oltre il termine della stessa ("Overrun"). Un terzo tipo di incidente accade quando il velivolo appoggia il carrello anteriore prima della pista ("Undershoot"). Questi eventi si verificano in fase di decollo o di atterraggio e gli esiti che una escursione fuori

pista può portare (*“Runway Excursion”*) possono essere numerosi e anche con diversi gradi di pericolosità.

È possibile che l'uscita di pista dell'aereo generi danni poco significativi al carrello; ma ci sono casi in cui, per via della velocità con cui viaggia l'aeromobile, i danni siano severi, spostandosi per molti metri per la strip e con la possibilità di danneggiare la fusoliera. Dal momento che questo evento è ancora più rilevante, esiste una fattibilità maggiore di generare incidenti mortali.

Inoltre, se da un lato questi eventi generano dei problemi al velivolo ed infortuni ai passeggeri, dall'altra le operazioni aeronautiche si vedono compromesse. Da una parte dovuto a quello che in quell'istante c'è da constatare la gravità dei fatti e dall'altra che l'aereo e i passeggeri dovranno essere trasferiti a una zona sicura. Un ulteriore fattore da considerare è che se questa uscita di pista ha potuto deteriorare le condizioni del percorso in caso di successivi decolli e atterraggi. Suddetti fattori generano senza dubbio dei ritardi nel traffico normale dell'aeroporto.

Una escursione fuori pista può dipendere da diverse cause, tra le quali possiamo evidenziare: la contaminazione della pista per differenti agenti, problemi tecnici del velivolo, atterraggi ad alte velocità, non raggiungere la velocità necessaria per il decollo, raffiche di vento, tra altre.

3.2. I dati

La pandemia del COVID-19 ha rappresentato indubbiamente una sfida per l'organizzazione. Nel 2021 si è registrato un aumento dei viaggi rispetto all'anno 2020, però ancora una diminuzione del 49% del flusso aereo rispetto alla domanda dell'anno 2019. È anche per questo motivo che c'è stato un numero minore di incidenti; comunque, le cifre sono ancora significative.

I dati emersi dal rapporto annuale dell'ICAO sono raggruppati in cinque regioni per una questione di maggiore comodità statistica [4]. Queste regioni vengono identificate nella seguente figura:



Figura 3 – ICAO Regional Aviation Safety Group [4].

L'ICAO ha un indicatore della prestazione della sicurezza chiamato "Global Accident Rate" il quale indica la media di questa prestazione nelle operazioni aeree. Questo indicatore si basa sui voli di tipo commerciale programmati i quali garantiscono il trasporto di passeggeri, merci e posta, per velivoli di ali fisse con un peso massimo dell'aeromobile al decollo (MTOW "Máximum Take-Off Weight") pari a 5700 kg, valore definito nel "ICAO Annex 13 – Aircraft Accident and Incident Investigation" [4].

Nel seguente schema possiamo vedere la tendenza di questa tasa:

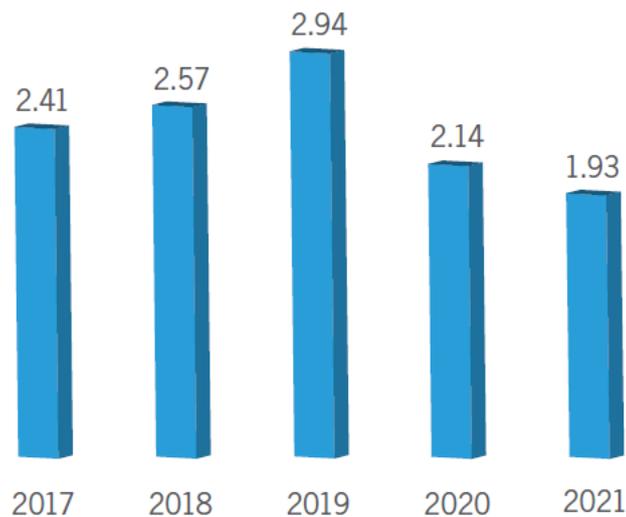


Figura 4 - Global accident rates (accidents per million departures) [4]

Il primo dato da rilevare è come, a livello mondiale, il valore di infortuni aerei sia diminuito dal 9.8% rispetto al 2020, scendendo a 1.93 su un milione di partenze, contro 2.14 nell'anno 2020.

Nell'ultimo periodo valutato su 5 anni, che sono descritti nell'informe 2022, possiamo apprezzare che i numeri di incidenti sono diminuiti notevolmente. Nell'anno 2021 la quantità è stata di 48, uguale all'anno 2020, con un totale di 4 incidenti fatali, cifra che si ripete nell'anno anteriore.

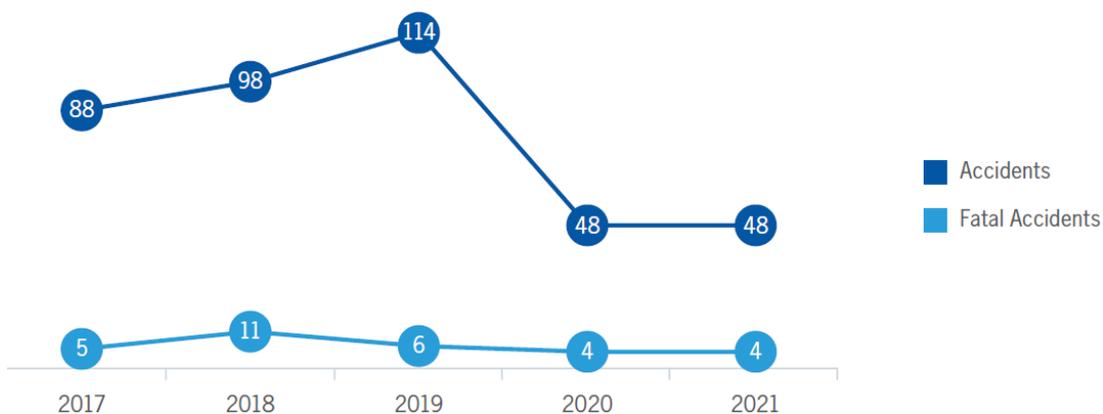


Figura 5 - Accident trend (2017 - 2021) [4]

Un ulteriore dato da tenere in considerazione è che il numero di incidenti si è ridotto ma anche il flusso aereo in questi due ultimi anni è diminuito, per via delle restrizioni adottate dai Governi, per evitare la diffusione del virus COVID-19, anche se lentamente i valori stanno tornando alla normalità.

La quantità di decessi in questi incidenti, sebbene siano solamente stati 4, si alza fino ad un totale di 104 morti in 2021. I valori col passare degli anni si può osservare nel seguente grafico:

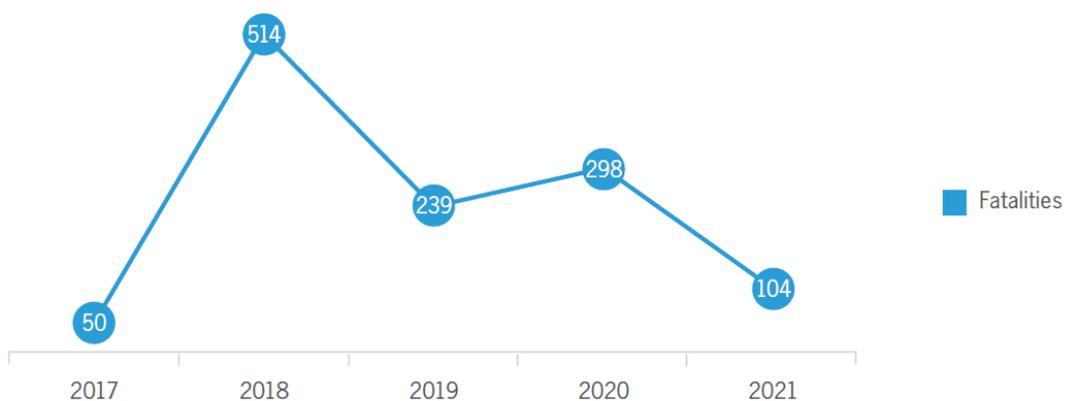


Figura 6 - Fatalities trend (2017-2021) [4]

Dall'altra parte gli incidenti vengono qualificati secondo il motivo che li ha prodotti. Quest'anno sono state 13 le cause che hanno portato al verificarsi di incidenti. Tra le principali possiamo indicare "Turbulence Encounter (TURB)" con la maggior quantità di occorrenze e danni ai passeggeri; "Controlled Flight Into or Toward Terrein (CFIT)" provocando due dei quattro incidenti mortali; "Loss Of Control In-flight (LOC-I)" con gli altri due eventi con decessi; e dopo abbiamo le altre categorie con minor presenza che hanno generato danni significativi ai velivoli che sono: "Abrupt Maneuver (AMAN)"; "Abnormal Runway Contact (ARC)"; "Ground Collision (GCOL)"; "Icing (ICE)"; "Ground Handling (RAMP)"; e "System/Component Failure or Malfunction (non-powerplant) (SCF-NP)". [4]

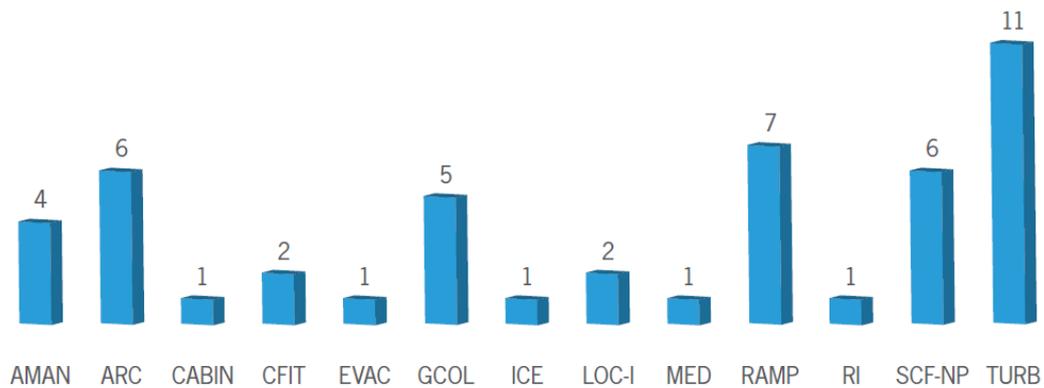


Figura 7 - Total accidents by occurrence category in 2021 [4]

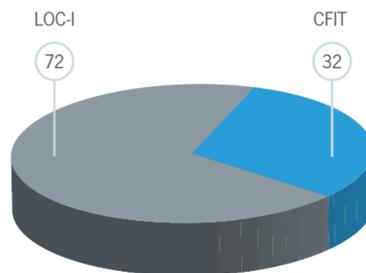


Figura 8 - Total fatalitis by occurrence by category in 2021 [4]

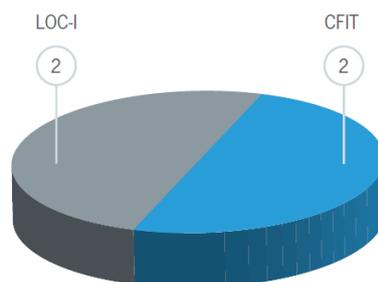


Figura 9 - Total fatal accidents by occurrence category in 2021 [4]

Per valutare la sicurezza, oltre a questa divisione in categorie secondo la causa per cui sono generati, il rapporto dell'ICAO ancora suddivide in base alle regioni dove questi sono stati prodotti. I dati ricavati sono esposti nella seguente tabella:

ICAO region	Estimated departures	Number of accidents	Accident rate (per million departures)	Fatal accidents	Fatalities
APAC	8 503 311	6	0.71	1	62
ESAF	568 887	1	1.76	1	10
EUR/NAT	5 100 289	12	2.35	2	32
MID	806 274	0	-	-	-
NACC	8 594 991	26	3.03	-	-
SAM	1 159 332	1	0.86	-	-
WACAF	187 378	2	10.67	-	-
World	24 920 462	48	1.93	4	104

Tabella 3 - Departures, accidents and fatalities by ICAO region based on State of Occurrence in 2021 [4]

In particolare, per via del basso numero di decolli, alcune regioni hanno subito una grande fluttuazione nell'indice di incidentalità attraverso gli anni. Per questa ragione, questi numeri devono essere considerati in relazione al totale di incidenti, per avere un prospettiva media.

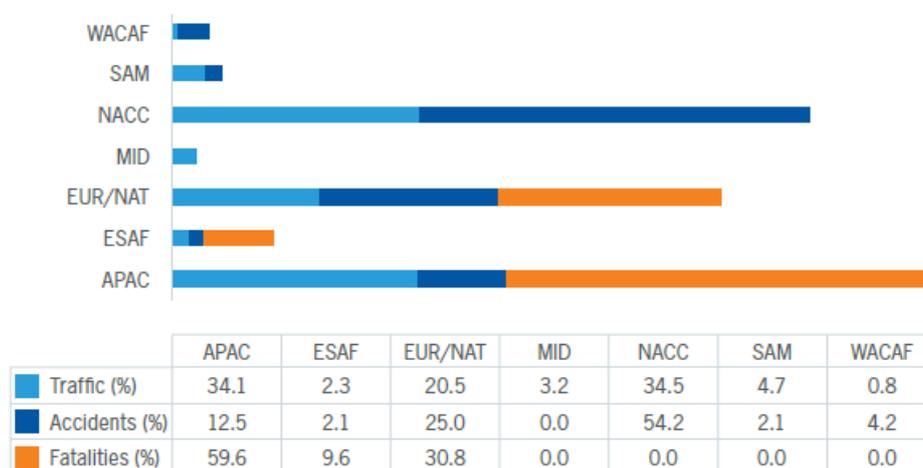


Figura 10 - Share of traffic, accidents and fatalities by ICAO region based on State of Occurrence in 2021 [4]

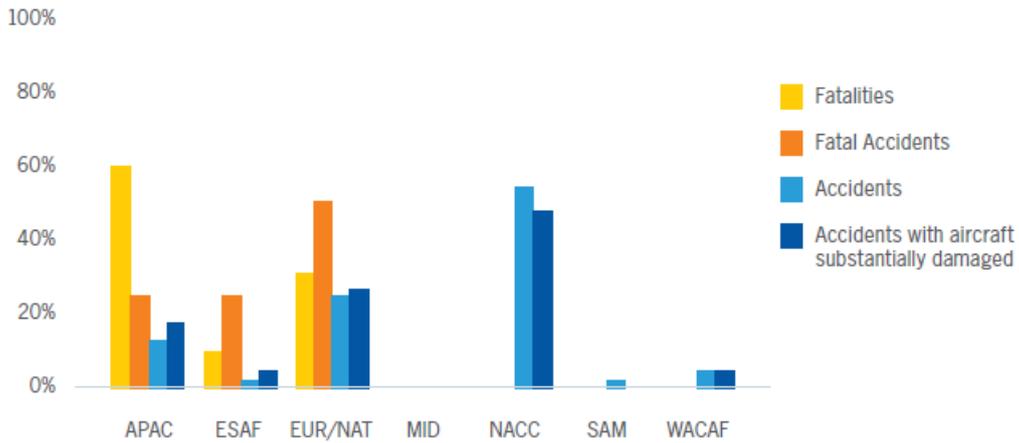


Figura 11 - Accidents overview by ICAO region in 2021 [4]

3.3. Aree di Sicurezza dell'Aeroporto

Negli aeroporti possiamo distinguere diverse zone che hanno l'obiettivo di migliorare le condizioni di sicurezza. Tra queste zone incontriamo:

- Banchine, "shoulder": "area adiacente al bordo di una superficie pavimentata predisposta per costituire una transizione tra la pavimentazione e la superficie adiacente" [3];

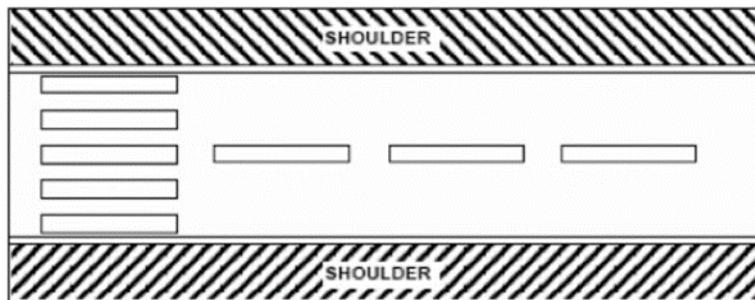


Figura 12 - Banchine

- Zona di arresto, "Stopway": "superficie rettangolare sul suolo, posta alla fine della pista disponibile per il decollo, che serve come area nella quale un velivolo può essere arrestato in sicurezza nel caso di decollo interrotto" [3];



Figura 13 - Stopway

- Area libera da ostacoli, “*Clearway*”: “è un’area rettangolare che può essere realizzata oltre la fine della corsa di decollo disponibile (TORA), libera da ostacoli che possono rappresentare un rischio per le operazioni di volo degli aeromobili” [3];

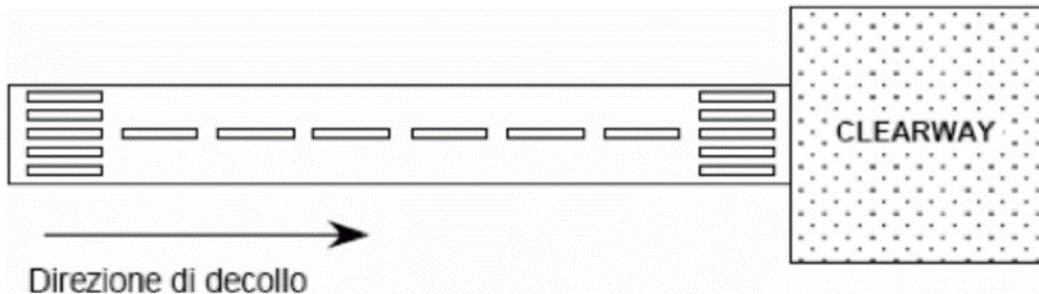


Figura 14 - *Clearway*

- Striscia di sicurezza della pista “*Runway strip*”: “area di dimensioni definite che comprende pista e la zona di arresto, se presente, realizzata allo scopo di ridurre il rischio di danni agli aeromobili in caso di uscita di pista ed a rotazione degli aeromobili che la sorvolano in decollo o in atterraggio” [3];

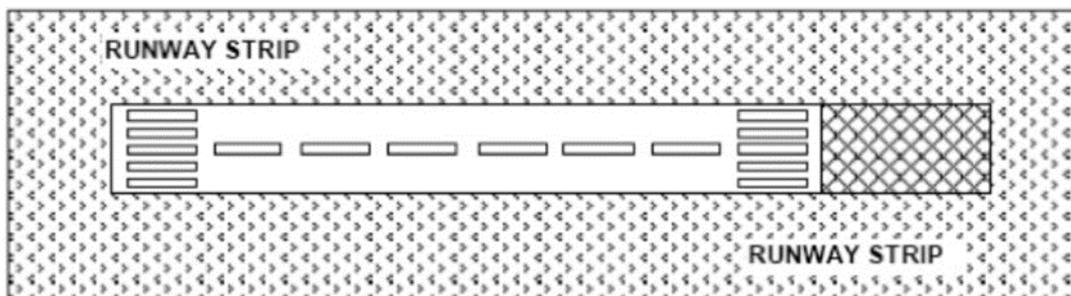


Figura 15 - *Runway Strip*

- Area di sicurezza di fine pista, “*Runway End Safety Area*”: conosciuta come RESA, è un “area simmetrica rispetto al prolungamento dell’asse della pista e adiacente alla fine della striscia di sicurezza, destinata primariamente a ridurre il rischio di danni agli aeromobili che dovessero atterrare troppo corti o uscire oltre la fine pista in decollo o in atterraggio” [3];

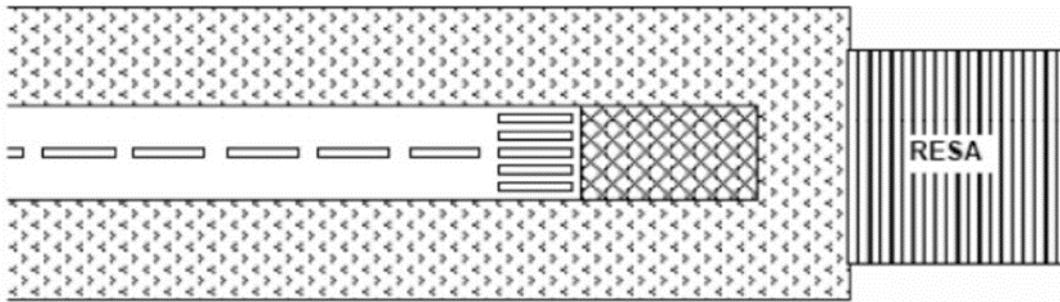


Figura 16 - Runway End Safety Area

- Area livellata e priva di ostacoli, “*Cleared and Graded Area*”: “quella parte della striscia di sicurezza (runway strip) livellata e priva di ostacoli, ad eccezione di oggetti non rilevanti debitamente specificati, destinata a ridurre il rischio di danni agli aeromobili in casi di uscita di pista.” [3]

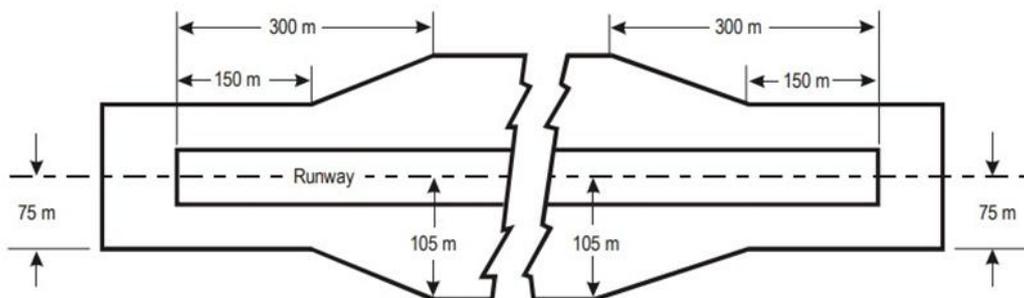


Figura 17 - Cleared and Graded Area

3.4. Requisiti Normativi della Capacità Portante delle Strips Aeroportuali

In base alla normativa dell'ICAO, che fa indistintamente riferimento alle aree di Strip, possiamo desumere che essa deve essere disegnata per ridurre il rischio di danni a un velivolo che esce fuori pista. Per garantire questo, occorre che la strip abbia una resistenza sufficiente per poter ridurre la velocità con la quale si sposta l'aereo, e nel frattempo non provocare la rottura del carrello anteriore di questo. Il terreno deve essere tale da assicurare la resistenza adeguata a sopportare il peso dell'aeromobile spostandosi ad alte velocità; però lo strato superficiale di questo terreno deve essere in grado di fornire l'affondamento per garantire il frenaggio del velivolo in maniera moderata. In base a questi due scopi della strip vengono sviluppate diverse linee guida per l'adeguamento dell'area di Strip: per avere la sufficiente stabilità, si

raccomanda che a 15 cm di profondità lo stratto deve essere con una granulometria tale di raggiungere un CBR (*“California Bearing Ratio”*) compreso tra 15 e 20. Lo spessore di 15 cm è stato studiato e nella normativa viene sottolineato come il carrello di un generico aeromobile possa affondare nel terreno senza subire alcuna rottura solamente nel caso in cui la sua profondità di penetrazione non sia superiore a 15 cm; tale valore della penetrazione massima consentita deriva dalle indicazioni fornite dai costruttori di aeromobili. I 15 cm superficiali possono essere composti di terreno vegetale con un CBR basso (tra 5 e 7) con l’obiettivo di rallentare l’aereo mediante il rotolamento del carrello. Il valore del CBR può essere valutato sia in sito che in laboratorio, sempre sull’umidità media stagionale più alta prevista per il determinato terreno.

Oltre ai requisiti dall’ICAO, l’Ente Nazionale dell’Aviazione Civile (ENAC), attraverso la sua *“Linea Guida per l’Adeguamento delle Strip”* riporta certe prescrizioni e raccomandazioni relative alle caratteristiche di portanza secondo il passaggio dell’aereo critico e il calcolo dei cedimenti, integrate da alcune precisazioni che riguardano le modalità di verifica nonché l’approccio da adottare per la progettazione ed esecuzione di eventuali interventi di sistemazione dei terreni.

Al fine dell’esecuzione delle verifiche di cui sopra, la linea guida si basa su alcune ipotesi come: l’impiego, per il calcolo del massimo affondamento sotto i carichi applicati, dell’aereo critico di progetto dell’aeroporto corrispondente, in caso di uscita di pista. Dall’altra parte si deve utilizzare un valore della portanza che non può essere scarso durante tutto lo sviluppo della Strip. A tal proposito, viene esplicitamente indicata la necessità di verificare non solo che la portanza sia adeguata, ma che al contempo non risulti eccessivamente variabile.

A integrazione di quanto riportato sopra, nel caso in cui i cedimenti calcolati siano eccessivi, il che implicherebbe che le esigenze stabilite non siano convalidati, bisognerà applicare misure col fine di migliorare il terreno della Strip. Per fare questo si può utilizzare un metodo di stabilizzazione di suolo, sia meccanica che chimica, dipendendo dalla distribuzione dimensionale delle particelle del terreno.

Capitolo 4 - Indagini sperimentali

Per la realizzazione del presente lavoro di Tesi è stato utilizzato, per la fase in laboratorio, il terreno fornito da uno degli aeroporti più riconosciuti del nord Italia, il quale sarà nominato come Aeroporto 1 per ragioni di privacy. Sul terreno sono stati fatti lavori, tanto in sito come in laboratorio, con lo scopo della sua caratterizzazione. Una volta qualificato il terreno, sono stati scelti due tipi di questo, uno con proprietà di portanza maggiore e l'altro più scadente.

4.1. Campi di prova

Lo scopo del campo di prova è di generare una valutazione omogenea della zona di studio, per cui sarà necessario stabilire i punti dove si prendono i campioni di materiale. Nel caso dell'Aeroporto 1, la zona di analisi si estende per tutta l'area di Strip. A continuazione troviamo i prospetti realizzati dei campi di prova nell'aeroporto.

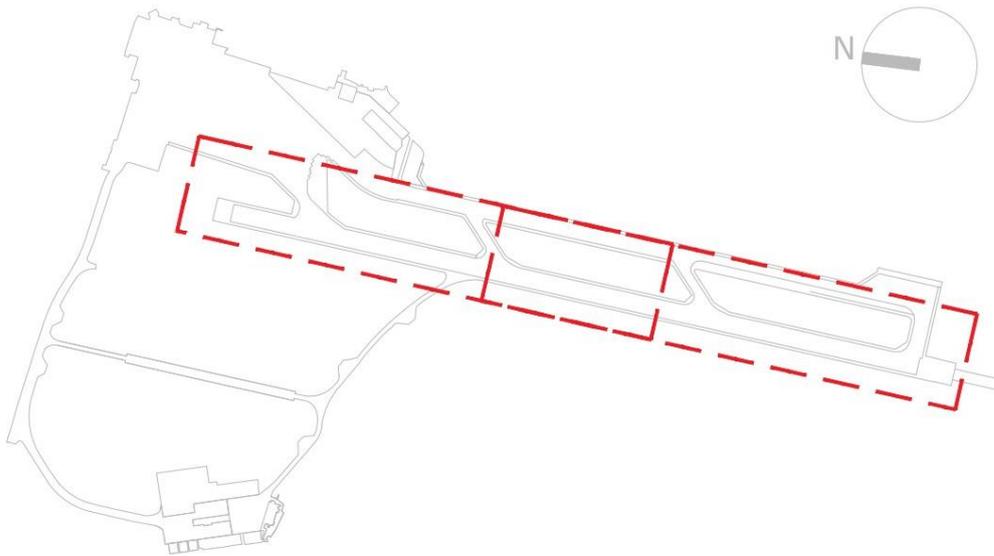


Figura 18 - Perimetro campo prova Aeroporto 1

Evidenziato con la linea rossa viene coinvolta l'area di strip, essa viene suddivisa in tre zone seguendo l'allineamento dell'asse della pista. Queste zone hanno un formato rettangolare che, a livello trasversale, inizia dall'asse della pista fino al limite con la Strip, cioè circa 50 m, quindi non è compresa la banchina. A livello longitudinale comprende tutta la estensione della pista, includendo anche la RESA. Inoltre, è stata incorporata una griglia per una maggiore semplicità al momento di ottenere i provini di terreno. Essa è divisa in rettangoli di dimensione minore, avendo un passo longitudinale di 30 m e un passo

- Esecuzione di prove per la determinazione del CBR in sito (come ASTM D4429-09°) – solamente sulla superficie del piano posto ad una profondità di 15 cm dal piano campagna.

Sulle campionature di terreno prelevate in sito sono state previste le seguenti indagini di laboratorio:

- Prove per la determinazione del contenuto d'acqua [5], della massa volumica dei granuli [6], del tenore organico [7], della distribuzione granulometrica dei granuli [8], del limite liquido e limite plastico [9], della curva di comparazione Proctor [5], e classificazione dei terreni [11] – per tutte le campionature;
- Prove per la determinazione dell'indice di portanza immediata (CBR immediato) e dell'indice CBR (dopo 96 ore di immersione in acqua) di campioni Proctor [12] – solamente per le campionature dei terreni prelevati ad una profondità di 15 cm dal piano campagna.

I terreni utilizzati per l'elaborazione del presente lavoro finale sono stati prelevati a 15 cm dal piano campagna nella zona sud-ovest per il materiale con denominazione N-005 (vedere *Figura 20*) e nella zona sud-est per il materiale del nodo G-005 (vedere *Figura 20*).

4.2. Caratterizzazione del materiale

Per quanto detto, il materiale è stato soggetto a delle prove per la sua caratterizzazione. I risultati ottenuti a seguito delle prove sono stati forniti per il presente elaborato.

4.2.1. Distribuzione granulometrica

Questo tipo di test permette di determinare la distribuzione granulometrica del terreno in modo da poterlo classificare. Nella determinazione della curva granulometrica occorre servirsi di due procedure differenti a seconda del diametro delle particelle: quelle aventi dimensioni maggiori di 75 MICRASm (trattenuto al setaccio N200) vengono trattate attraverso la prova di setacciatura, mentre quelle con dimensioni inferiore tramite la prova di sedimentazione.

Le curve granulometriche dei due materiali sono presentate a continuazione:

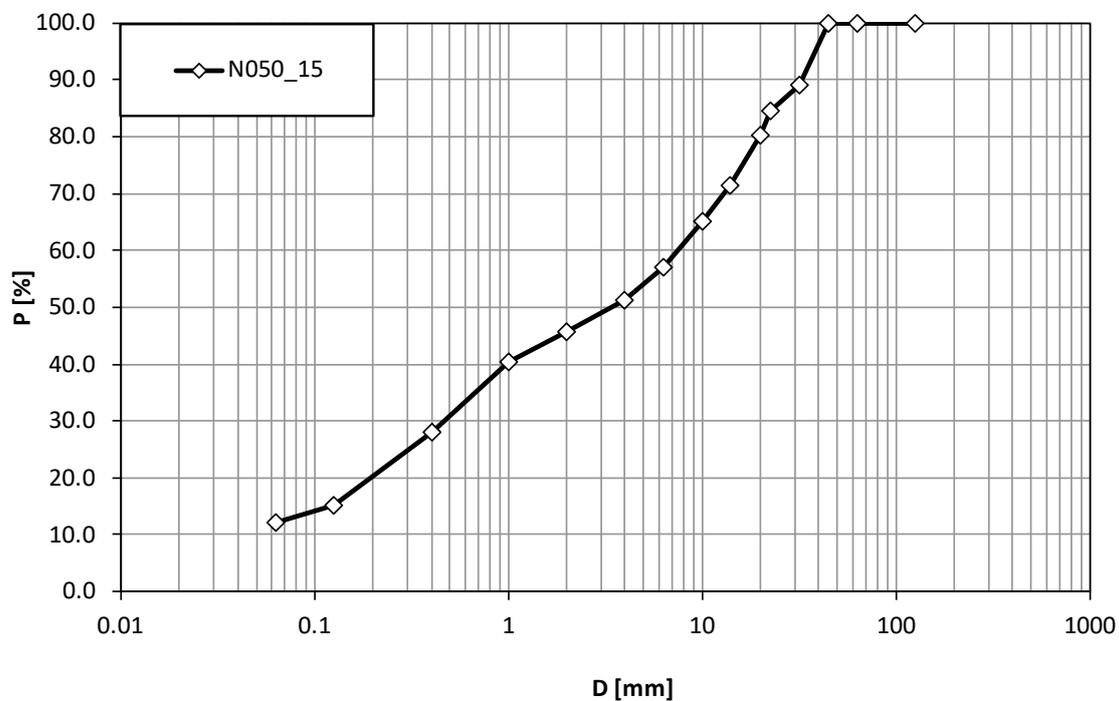


Figura 21 - Curva granulometrica materiale N-050

Per il materiale N-050 abbiamo una curva che presenta una variazione continua di dimensioni dei grani. Quindi questo dimostra che il materiale tende a rappresentare una sabbia limosa.

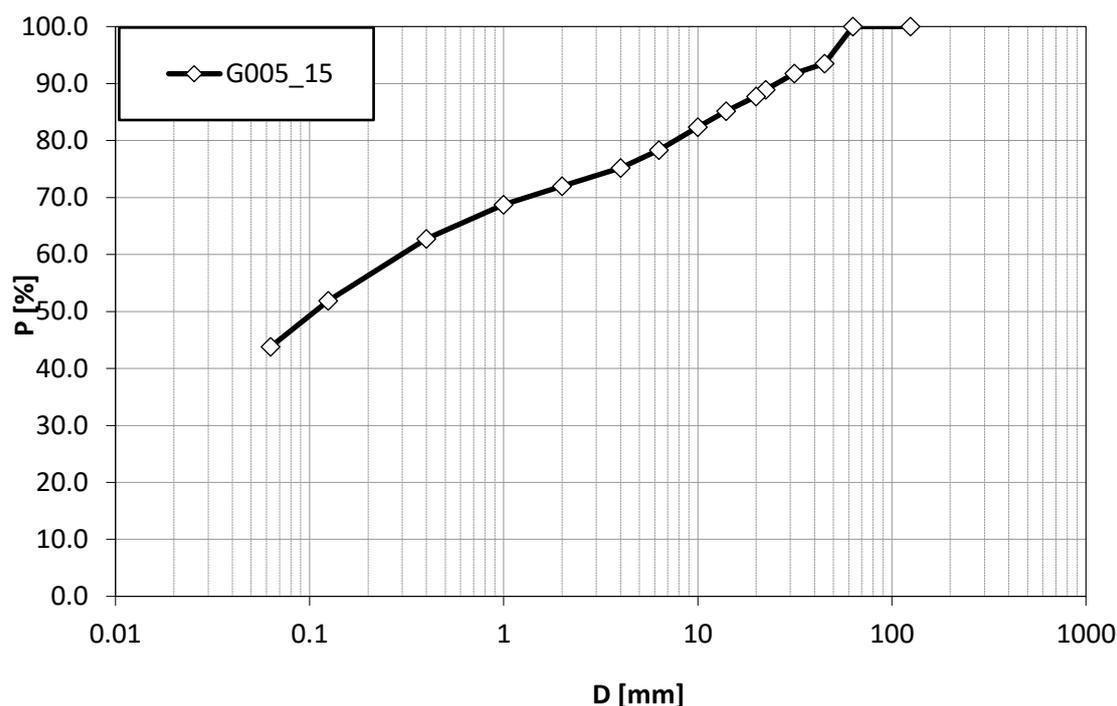


Figura 22 - Curva granulometrica materiale G-005

Dalla curva si evince che il terreno denominato G-005 è costituito prevalentemente da materiale fine (argilla, limo) con una predominanza di argilla. Si può notare che la percentuale di passante relativa a particelle con dimensioni superiori a 0.075 mm è piuttosto bassa. Da questa analisi si deduce che la matrice di questo terreno è di tipo argilloso.

4.2.2. Limiti di Atterberg

Lo scopo dell'esperimento è quello di quantificare il grado di interazione solido-acqua (dipendente dalla granulometria e dalla mineralogia) attraverso l'identificazione di stati fisici di riferimento, cioè i limiti di Atterberg, i quali esprimono transizioni di comportamento del terreno al variare del contenuto d'acqua. Questi limiti, inoltre, saranno utili al fine di classificare il terreno.

Le raccomandazioni e le normative considerate per eseguire i test sono: ASTM D4318-17e1 "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils"; ASTM D2487-17e1 "Standard Practice for Classification of Soil for Engineering Purposes" e ASTM D2216-19 "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

I risultati ottenuti in queste prove sono poi processati per costruire la retta di previsione (Figura 23 e Figura 24) per raccogliere i valori dei limiti. Il valore dei limiti sono riportati nelle Tabelle 4 e Tabelle 5:

<i>Limite Liquido</i>	27
<i>Limite Plastico</i>	25
<i>Indice di Plasticità</i>	2.5

Tabella 4 - Limiti di Atterberg materiale N-050

<i>Limite Liquido</i>	33
<i>Limite Plastico</i>	20
<i>Indice di Plasticità</i>	12.8

Tabella 5 - Limiti di Atterberg materiale G-005

Una volta determinati questi limiti è possibile definire l'indice di plasticità PI. L'attività A, l'indice di liquidità LI e l'indice di consistenza IC, parametri fondamentali per classificare il terreno.

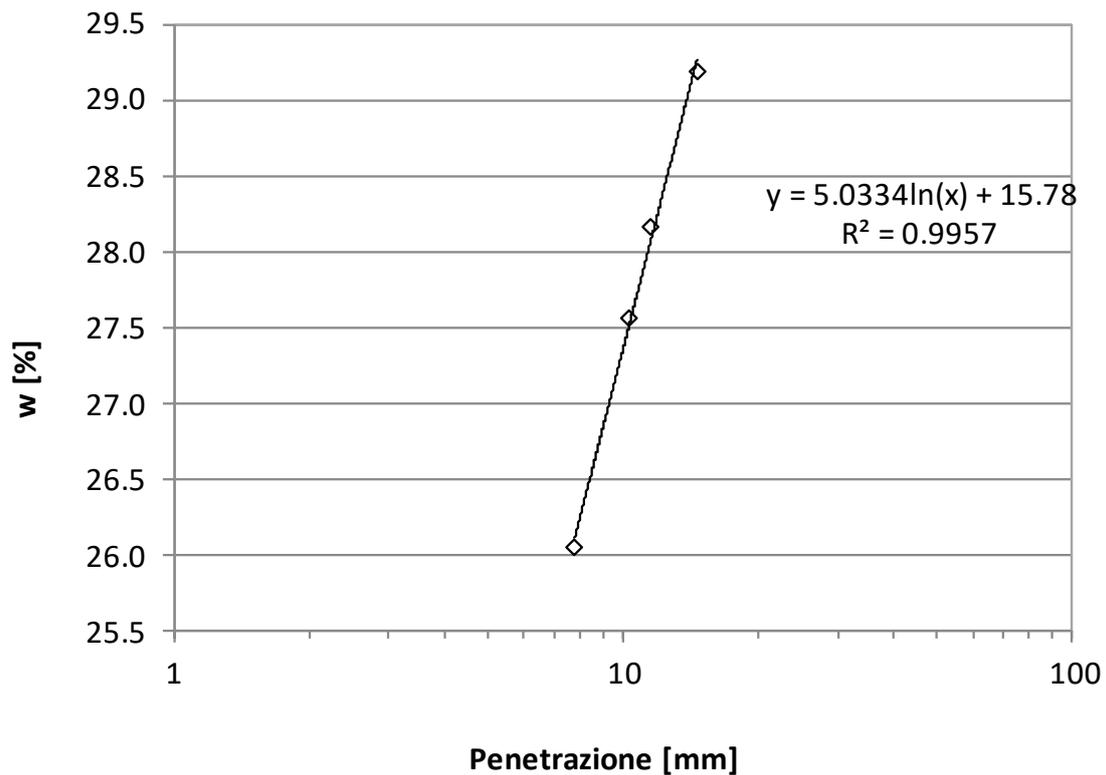


Figura 23 - Curva di andamento del contenuto d'acqua al variare la penetrazione per N-050

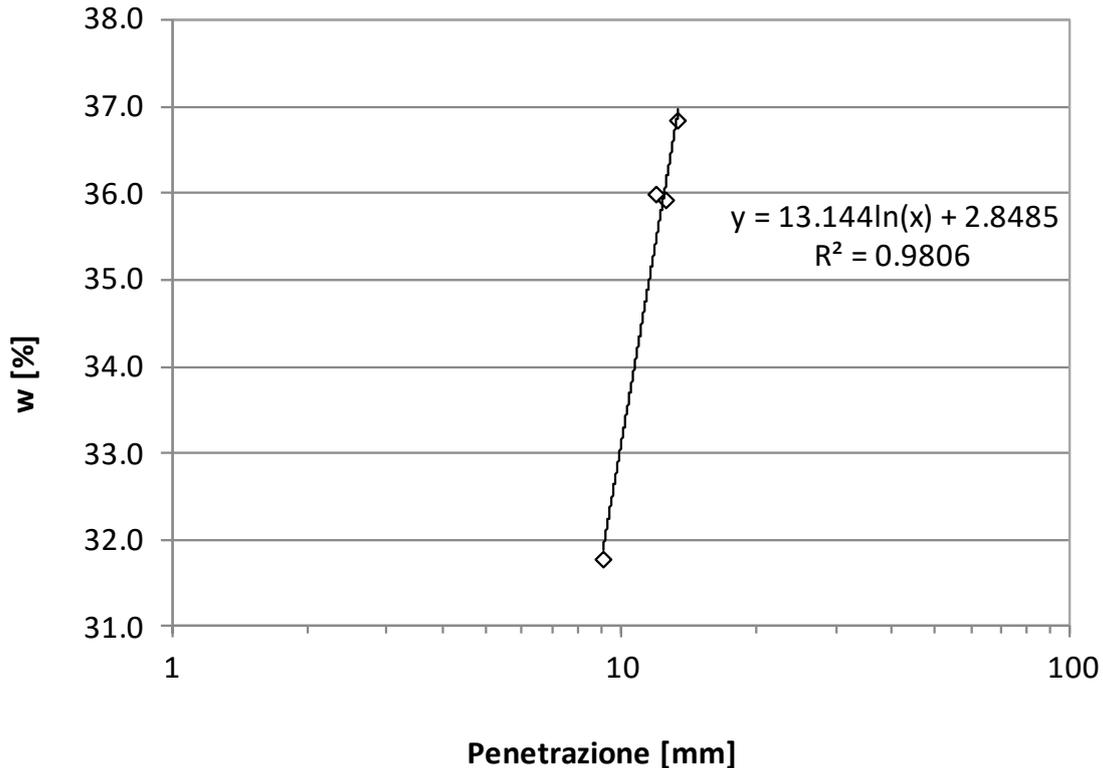


Figura 24 - Curva di andamento del contenuto d'acqua al variare la penetrazione per G-005

Il terreno prelevato nel punto di indagine n-050 ricade quindi, in base al sistema di classificazione descritto nella normativa [C], nel gruppo A_{1-a} e può essere composto di ghiaia oppure sabbia grossa. Mentre il terreno prelevato nel punto di indagine G-005 risulta classificato come un A₆, a questo gruppo appartengono le argille poco compressibili.

4.2.3. Prove per la determinazione della curva di compattazione Proctor

La prova di compattazione in laboratorio ha lo scopo di determinare la quantità d'acqua da aggiungere alla terra in cantiere per ottenere il massimo grado di compattazione. Con questa prova si ottiene anche il valore della massima densità ottenibile.

Inoltre, secondo l'energia di compattazione che viene applicata alla fustella, la normativa di riferimento, distingue due tipi di prove: la prima chiamata *Proctor Standard* e la seconda *Proctor Modificato*.

Sotto (figura 25 e figura 26) vengono presentate le curve ottenute per i materiali e da queste si ricavano dati, densità massima e umidità ottima utilizzati nella fase di simulazione.

Curva Proctor

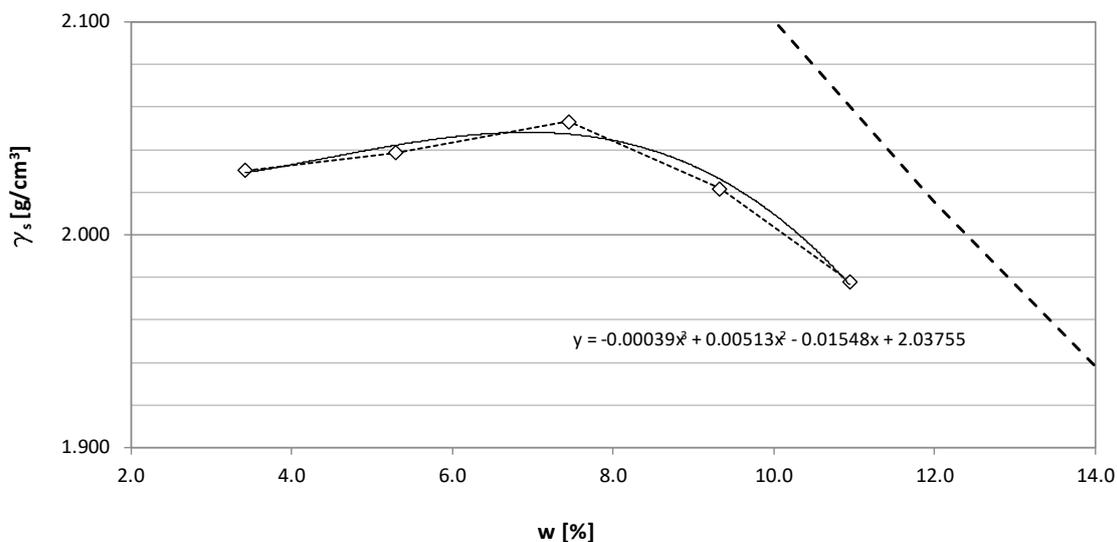


Figura 25 - Curva di compattazione Proctor N-050

Per il terreno ottenuto dal nodo N-050 si osserva una densità secca massima uguale a 2.053 g/cm^3 corrispondente a un contenuto di acqua pari al 7.44%.

Curva Proctor

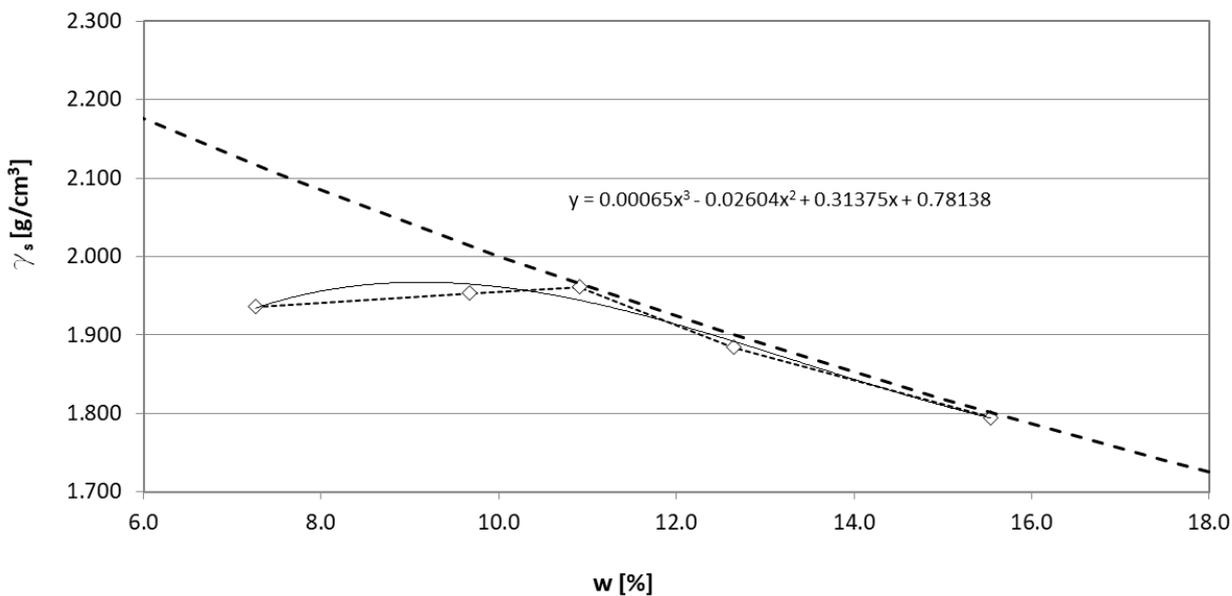


Figura 26 - Curva di compattazione Proctor G-005

Nel caso del terreno prelevato dal punto G-005, la curva è molto più vicina alla curva di saturazione cioè il terreno è molto più suscettibile alle variazioni del contenuto d'acqua, il che ha senso trattandosi di un materiale argilloso. Questo

materiale ha una densità secca massima pari a 1.961 g/cm^3 in corrispondenza con un valore del contenuto d'acqua uguale a 10.91%.

4.2.4. Prove per la determinazione dell'Indice CBR

Immediato e dell'Indice dopo Immersione in acqua.

L'approccio metodologico impiegato per la valutazione delle caratteristiche di portanza del terreno è la prova per la determinazione dell'indice CBR (*California Bearing Ratio*) [3333]. A continuazione della realizzazione del provino mediante la compattazione Proctor, viene determinato l'indice CBR il quale ha lo scopo di stabilire un criterio empirico per determinare le caratteristiche di idoneità per uso stradale.

Da questa prova si ricava la variazione dell'affondamento al variare della pressione applicata, generando poi la curva penetrazione-carico. I valori ricavati sono poi analizzati rispetto al quantitativo d'acqua corrispondente, sviluppando così i seguenti due grafici (*Figura 27 e Figura 28*) dove viene riportato sia il CBR immediato che il CBR saturo:

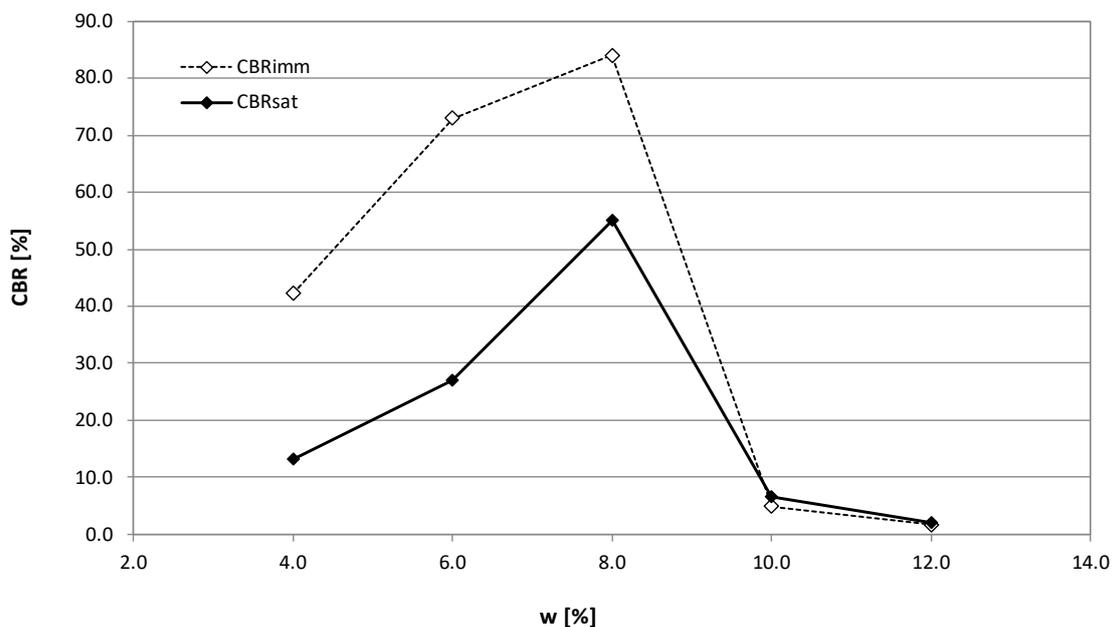


Figura 27 - Curva di andamento dell'indice CBR al variare del contenuto d'acqua per N-050

La curva ha un andamento simile a quello della densità massima, anche se i valori di punta della curva non corrispondono allo stesso contenuto d'acqua. Questo dipende dagli effetti provocati per la sovrapposizione interstiziale della fase fluida. Inoltre, possiamo apprezzare che, dopo il valore di picco, il CBR cala velocemente.

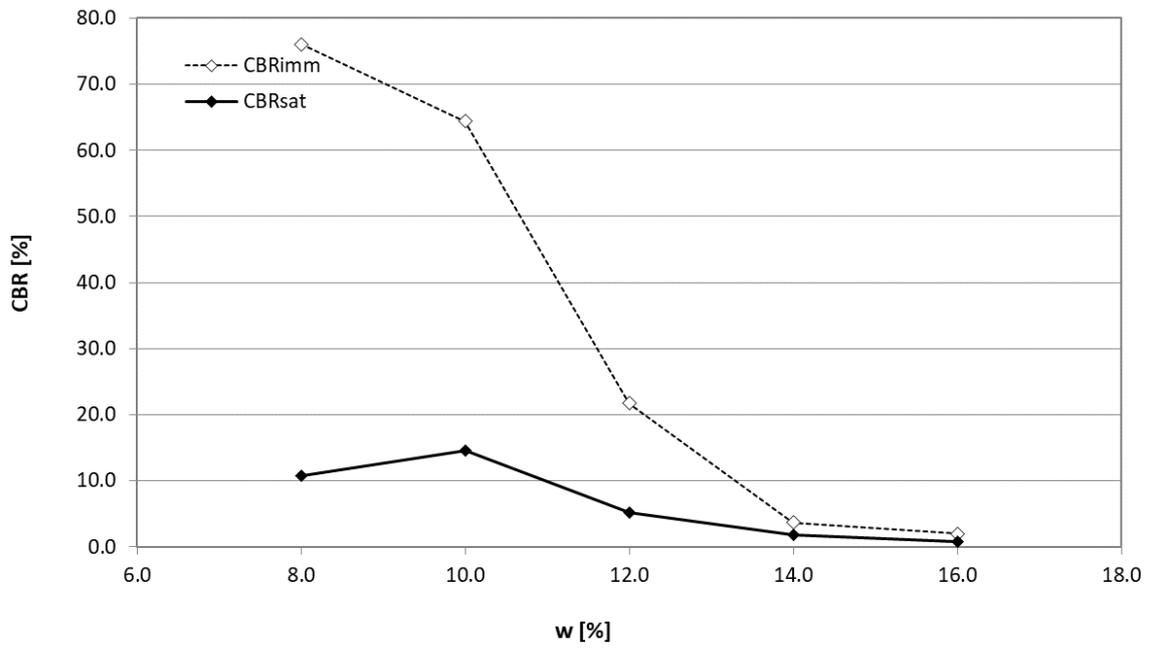


Figura 28 - Curva di andamento dell'indice CBR al variare del contenuto d'acqua per G-005

Nel caso del materiale G-005 la curva rimane più piatta nel caso dell'indice CBR saturo; questo si deve alla distribuzione ampiamente di particelle fine.

Capitolo 5 - Simulazione pratica

In questa fase del presente lavoro di Tesi, si cerca di capire come si comporta il terreno di fronte allo spostamento di un aereo al di sopra. Con l'obbiettivo di riprodurre questo evento in laboratorio, si decide di ricorrere alla simulazione. Il fattore scala inizia ad avere un ruolo significativo in questo studio grazie alla dimensione dei veicoli coinvolti. Portando il problema ad un livello riproducibile nel laboratorio, quello che si pretende è di poter indagare sul comportamento elastico del materiale, in maniera economica e più semplificata, e da qui intervenire sul comportamento non lineare. La simulazione menzionata è stata effettuata all'interno del Laboratorio di Materiali Stradali del Politecnico di Torino attraverso l'utilizzo della macchina ormaiatrice.

5.1. Macchina ormaiatrice

La macchina ormaiatrice è un'apparecchiatura normalmente impiegata nel laboratorio per valutare il comportamento di materiali bituminosi i quali vengono impiegati nell'ambito stradale e che subiscono il fenomeno di ormaimento prodotto dal traffico. Serve dunque per la simulazione del traffico sulla superficie stradale, attraverso l'elaborazione di due lastre di materiale soggette a multipli passaggi di una ruota a cui viene impostato un carico costante regolabile. Il movimento dello pneumatico viene svolto secondo l'asse più lungo della lastra e finita la prova è possibile analizzare il fattibile affondamento della lastra.

Date le caratteristiche della macchina, si è optato per utilizzarla nella fase di simulazione, cioè il passaggio dello pneumatico di un aeromobile sul terreno. Quindi le lastre vengono preparate col terreno confinato con valori di densità e con contenuto d'acqua adeguati.



Figura 29 - Macchina ormaiatrice con lastra di materiale pronta per la prova

5.1.1. Impostazione della macchina

La macchina ha una impostazione dove la sua struttura è composta da un telaio rigido, il quale a sua volta è formato da:

- un montante anteriore che ricomprende al suo interno le componenti pneumatiche, dove si trova inserita la console dei comandi;
- un montante posteriore il quale sorregge il motore e il riduttore cinematico a catena
- una traversa inferiore la quale regge il cuscinetto dell'albero motore e protegge il corpo oscillante;
- due binari i quali danno vita alla traversa superiore e che dirigono il carrello.

La macchina funziona in simultaneo con le due ruote sotto le quali sono collocate le lastre di materiale che appoggiano su un supporto mobile. Tale supporto viene guidato da due sostegni verticali ed attivato da un martinetto metallico, il quale consente di caricare la fustella. La macchina permette di applicare un carico Max di 5500 N il quale è contenuto dalla consolle. Le ruote girano ad una velocità di 1,6 m/s con frequenza di 1 Hz e dalla consolle si può impostare il numero di passaggi che questa deve eseguire.

La tipologia di pneumatici impiegata è T522 4.00-8, liscia, ed essi hanno uno spessore di 109 millimetri e un diametro di 425 millimetri. Inoltre, resistono ad una pressione massima di gonfiaggio max pari a 0,7 Mpa.

Nella realizzazione delle prove, che si sono effettuate nel presente elaborato, il carico applicato è stato uguale a 5000 N e con una pressione di gonfiaggio delle ruote uguale a 0,6 Mpa.

Inizialmente sono state prese in considerazione le misure degli affondamenti secondo i valori prefissati (1, 100, 1000 e 10000). Man mano che andavano avanti le prove per uno dei materiali con caratteristiche più scadenti, il G-005, registrare le misure per questi numeri di passaggi non è stato possibile dato che il terreno falliva prima di raggiungere i valori prefissati; quindi, si è ricorso all'utilizzo di interpolazioni, esponenziale e potenziale.

Per quanto riguarda gli scopi della simulazione, il fattore della scala ha un ruolo importante ed è per questo che dobbiamo considerare alcuni aspetti riferiti alle limitazioni della macchina:

- Le passate sono realizzate a una velocità considerevolmente più bassa in relazione con la velocità con cui si dà l'uscita fuori pista. La velocità della macchina oscilla circa 6 km/h mentre che si stima una velocità di 130 km/h per l'aerei;
- Il valore del carico impostato è di 5000 N che corrisponde a circa 500 kg; invece, il carico che viene applicato da una ruota di un aereo gira nei 2500 kg per un Boeing 747;
- Le dimensioni delle ruote che utilizza la macchina sono molto inferiori rispetto alle dimensioni delle ruote di un aereo;
- Le lastre vengono realizzate col materiale fornito dall'aeroporto, però in questo caso il materiale si trova confinato per lo stampo metallico. Questo consente delle pressioni che derivano da una maggiore resistenza rispetto a quello dell'area di Strip.

Queste considerazioni saranno necessarie per consentire il confronto dei risultati, portando dalla simulazione in scala effettuata in laboratorio ai possibili valori generati per un aeromobile. Sarà necessario, perciò, realizzare un'analisi su come ricondurre i risultati ottenuti alla realtà.

5.2. Preparazione delle lastre e realizzazione della prova

Il materiale da valutare viene infilato all'interno di uno stampo metallico con dimensioni standardizzate che sono: 50 cm di lunghezza, 18 cm di profondità e 10 cm di altezza.

Come primo step, bisogna calcolare la quantità di materiale da introdurre all'interno dello stampo, valore che viene calcolato a partire dalla densità umida del materiale corrispondente e il volume dello stampo, il quale è 9000 cm³. Quindi, dalla moltiplicazione di questi due valori, la densità espressa in g/cm³, si trova il quantitativo necessario, in grammi, di materiale umido sciolto, .

Per eseguire questo step, è stato necessario, quindi, determinare quanto materiale secco e quanta acqua si doveva utilizzare. A tal fine si ricorre alla prova Proctor (capitolo 4 inciso 4.xxx) realizzata per caratterizzare il terreno; si è optato per i valori corrispondenti alla densità massima secca e il contenuto di acqua ottimo per la fabbricazione delle lastre.

A continuazione si procede con il calcolo del quantitativo di materiale secco:

$$M_{secco} = \frac{M_{tot}}{1 + \frac{w}{100}}$$

Dove M_{tot} è la massa del materiale umido e w il contenuto d'acqua ottimale.

Si realizza la stessa quantità di lastre per ogni materiale: 6 lastre per il materiale N-050 e 6 lastre per il materiale G-005, arrivando a un totale di 12 lastre. Rispetto alla procedura per la preparazione delle lastre, si descrivono in modo dettagliato, a continuazione, i passi effettuati:

1. Il valore di materiale con cui si doveva lavorare era circa 20kg, per una questione di semplicità e anche per ottenere una distribuzione più omogenea, si decide di dividere il quantitativo in 3 porzioni uguali.



Figura 30 - Preparazione del materiale da inserire nello stampo

2. Dal momento che il materiale è allo stato sciolto, è stato necessario compattarlo. A tal fine, è stata utilizzata la macchina compattatrice. Questa realizza una compattazione dinamica tramite il passaggio di uno pneumatico al quale viene impostato un carico che rimane costante. Per non influenzare le misurazioni, l'energia di compattazione doveva essere la stessa; quindi, è stato erogato un numero uguale di passate in ogni lastra, partendo dalla quantità necessaria per raggiungere una superficie liscia nella prima lastra compattata. Questo numero è variato tra i due materiali impiegati. Prima della collocazione del materiale nella macchina, si è inserita una pellicola di nylon per non alterare la condizione di umidità.



Figura 31 - Compattazione del materiale

- Posizionata la lastra nella macchina compattatrice, si è iniziato con la compattazione, applicando un bar di pressione sul pistone e un bar come pressione di gonfiaggio del ruotino. Sia la pressione del pistone come del ruotino si sono alzati per le ultime passate fino a 2,75 bar e 6 bar rispettivamente.
3. Finita la compattazione, si procede a registrare il peso della lastra (materiale più stampo) così dopo è possibile ottenere il valore raggiunto di densità.



Figura 32 - Lastra compattata

4. Prima di effettuare la prova con la macchina ormaiatrice, si misura la superficie della lastra. Misura che servirà per confrontare gli affondamenti man mano che si effettuano le passate. Per determinare i punti da misurare si è divisa la lastra, trasversalmente, in 4 pezzi scartando i 5 cm iniziali di ogni lato. Invece longitudinalmente è stata misurata rispetto a 3 linee separate tra di loro di 2,5 cm e centrate rispetto alla divisione trasversale.



Figura 33 - Istrumento utilizzato per prendere le misure

Le misure sono state effettuate con l'utilizzo di un calibro elettronico, dato che i sensori che c'erano per misurare non riuscivano e si eccedeva il valore limite di questi.

5. Realizzati questi passi, si è nella condizione di procedere con la prova per simulare il passaggio dell'aereo. La lastra viene collocata all'interno dell'attrezzatura e si realizzano i diversi cicli di passate descritti precedentemente, applicando il carico definito in precedenza. Dopo ogni ciclo si toglie la lastra e si misurano gli stessi punti della prima misurazione.



Figura 34 - Foto della macchina ormaiatrice funzionando

6. Sul finire della prova viene trattenuta una quantità finita di materiale, nel centro della lastra, per verificare il quantitativo di acqua raggiunto. A tal fine, il campione di materiale viene pesato ed essiccato in forno a 105 gradi; il valore dell'effettivo contenuto d'acqua si calcola con la seguente formula:

$$\%w = \frac{M_{umido} - M_{essicato}}{M_{umido}} * 100$$

Dopo ogni ciclo di passaggi si acquisiscono 15 letture di affondamento, ottenendo un valore di 60 valori per ogni lastra. Valori che saranno riportati nei seguenti incisi.

5.3. Materiale fornito dal punto di indagine G-005

Il terreno ottenuto nel punto di indagine G-005 è stato caratterizzato come un A₆, cioè composito, per la maggior parte, da materiale fino. Da un'altra parte,

realizzata la prova Proctor, si ottiene che la densità massima umida è di 2,175 g/cm³ corrispondente ad un contenuto d'acqua ottimale pari a 10,91%. Questi due valori sono stati utilizzati per il calcolo del materiale che si doveva versare nello stampo (*Tabella 6*), cioè la quantità di materiale necessaria per raggiungere il valore massimo della densità una volta compattato.

Denominazione	Quantità materiale secco	Quantità acqua
	[g]	[g]
G -005	17439.4	2135.6

Tabella 6 - Quantità di materiale necessario

Gettato il materiale e poi compattati i valori raggiunti di densità e del contenuto d'acqua, per le diverse lastre, sono riportati nella *Tabella seguente*.

Denominazione	Densità ottenuta	Contenuto d'acqua ottenuto
	[g/cm ³]	[%]
Lastra 1 G-005	2,144	10,73
Lastra 2 G-005	2,055	10,45
Lastra 3 G-005	2,094	10,81
Lastra 4 G-005	2,108	10,56
Lastra 5 G-005	2,102	10,64
Lastra 6 G-005	2,116	10,72

Tabella 7 - Densità e contenuti di acqua ottenuti

Facendo il paragone dei valori ottenuti, mostrati nella *Tabella sotto riportata*, si è raggiunto un 98,6% della densità massima teorica per la lastra 1; un 94,5% per la lastra 2; un 96,3% per la lastra 3; un 96,9% per la lastra 4; un 96,6% per la lastra 5; e un 97,3% per la lastra 6.

Una volta che erano preparate e pesate le lastre si sottoponevano alla prova, ottenendo i seguenti affondamenti:

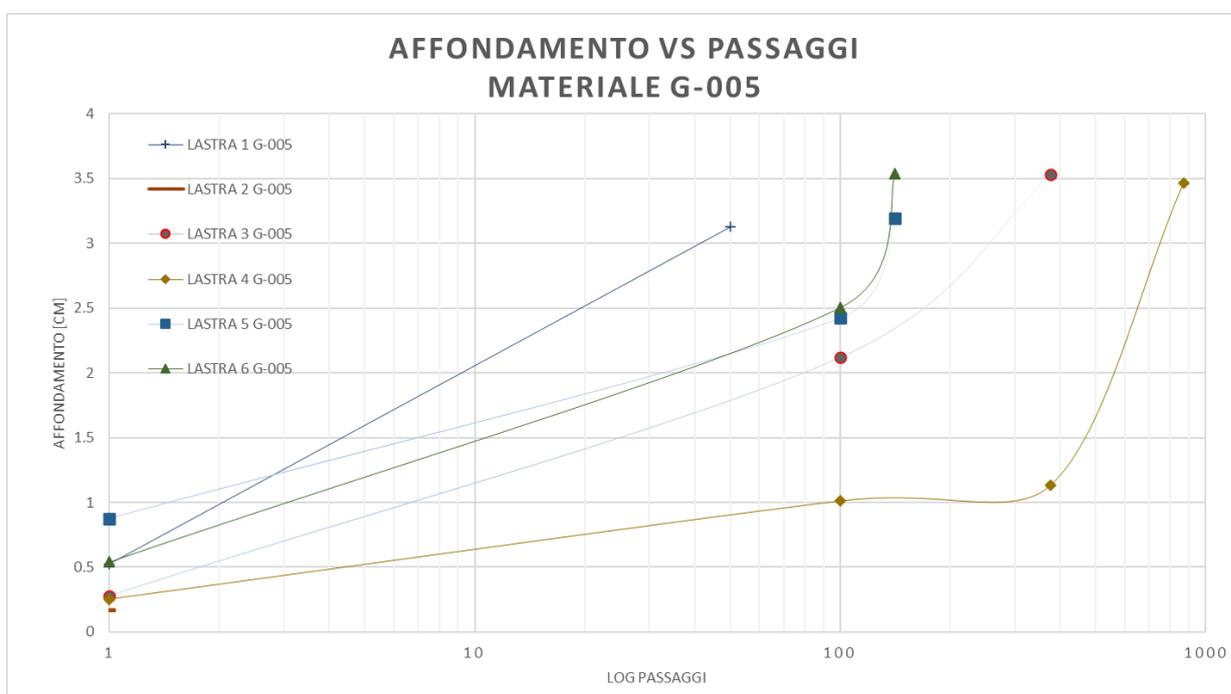
Affondamento massimo [cm]						
Passaggi	1	50	100	141	377	870
Denominazione						
Lastra 1 G-005	0,524	3,126	-	-	-	-
Lastra 2 G-005	0,174	-	-	-	-	-
Lastra 3 G-005	0,280	-	2,121	-	3,530	-
Lastra 4 G-005	0,251	-	1,010	-	1,132	3,465

Lastra 5 G-005	0,875	-	2,425	3,191	-	-
Lastra 6 G-005	0,005	-	2,501	3,538	-	-

Tabella 8 - Risultati ottenuti per affondamenti

Sebbene l'affondamento massimo si raggiunga per diversi numeri di passaggi, il valore di questo tende a 3,5 cm. L'ampio intervallo di passaggi può dipendere da diversi fattori: la sensibilità del materiale al contenuto d'acqua, il movimento del piano della macchina ormaiatrice, ovvero la mancanza di compattazione.

A partire da questi valori, si è sviluppato un grafico nel piano "Affondamenti vs Logaritmo delle passate" che serve per capire il comportamento del materiale.



Nel grafico possiamo notare un andamento delle curve a forma di cono ove all'inizio i valori sono più vicini e man mano che subiscono il passo della ruota cominciano ad avere una fascia maggiore di spostamenti.

5.4. Materiale fornito dal punto di indagine N-050

In questo caso il materiale ha le caratteristiche opposte al G-005: si tratta infatti di un terreno A_{1-a.}, avendo una grande frazione composta di sabbia grossa oppure ghiaia sabbiosa. Dalla prova Proctor si ricavano i dati utili per l'assemblaggio delle lastre di questo terreno. I valori utilizzati sono di 2,053 per

la densità massima umida ed un contenuto d'acqua ottimo pari a 7,44%. Si procede analogamente a calcolare il quantitativo di materiale sciolto.

Denominazione	Quantità materiale secco	Quantità acqua
	[g]	[g]
N-050	18376,86	1477,14

Di seguito (*Tabella XXXXX*) si dettagliano i valori conseguiti per le 6 lastre del materiale N-050:

Denominazione	Densità ottenuta	Contenuto d'acqua ottenuto
	[g/cm ³]	[%]
Lastra 1 N-050	2,084	7,34
Lastra 2 N-050	2,058	7,39
Lastra 3 N-050	2,056	5,51
Lastra 4 N-050	2,044	5,66
Lastra 5 N-050	2,068	7,16
Lastra 6 N-050	2,049	6,99

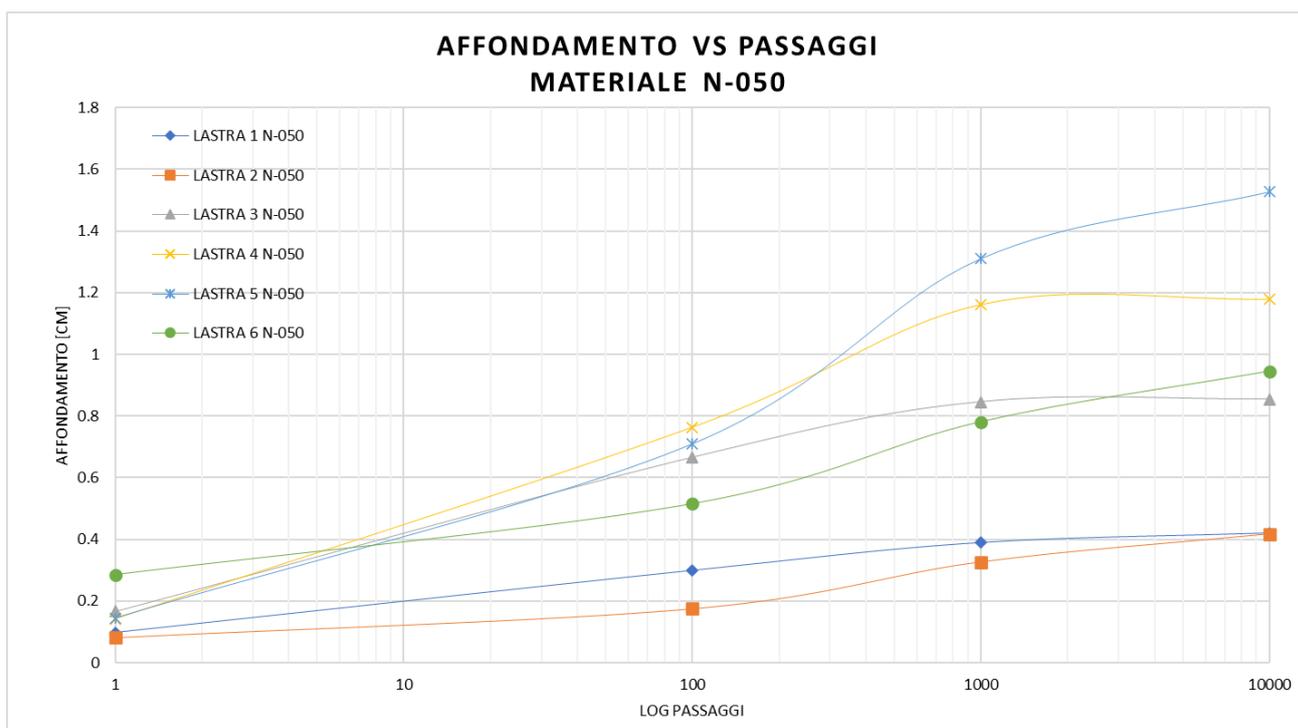
Confrontando i valori qui esposti con i valori eseguiti attraverso la prova Proctor, si è raggiunto un 101,5% rispetto alla densità massima teorica per la lastra 1; un 100,2% per la lastra 2; un 100,1% per la lastra 3; un 99,6% per la lastra 4; un 100,7% per la lastra 5; e un 99,8% per la lastra 6. I valori sopra il 100% fisicamente non sono reali ma si deve considerare che il calcolo della densità della lastra è un calcolo approssimativo.

Costruite le lastre, esse sono inserite nella macchina ormaiatrice per realizzare i cicli di passaggi. Nella *Tabella che si trova sotto* sono riportati i massimi spostamenti per ogni lastra in tutti i punti misurati:

Affondamento massimo [cm]				
Passaggi	1	100	1000	10000
Denominazione				
Lastra 1 N-050	0,098	0,299	0,38	0,420
Lastra 2 N-050	0,081	0,175	0,387	0,418
Lastra 3 N-050	0,167	0,666	0,846	0,855
Lastra 4 N-050	0,142	0,764	1,162	1,180

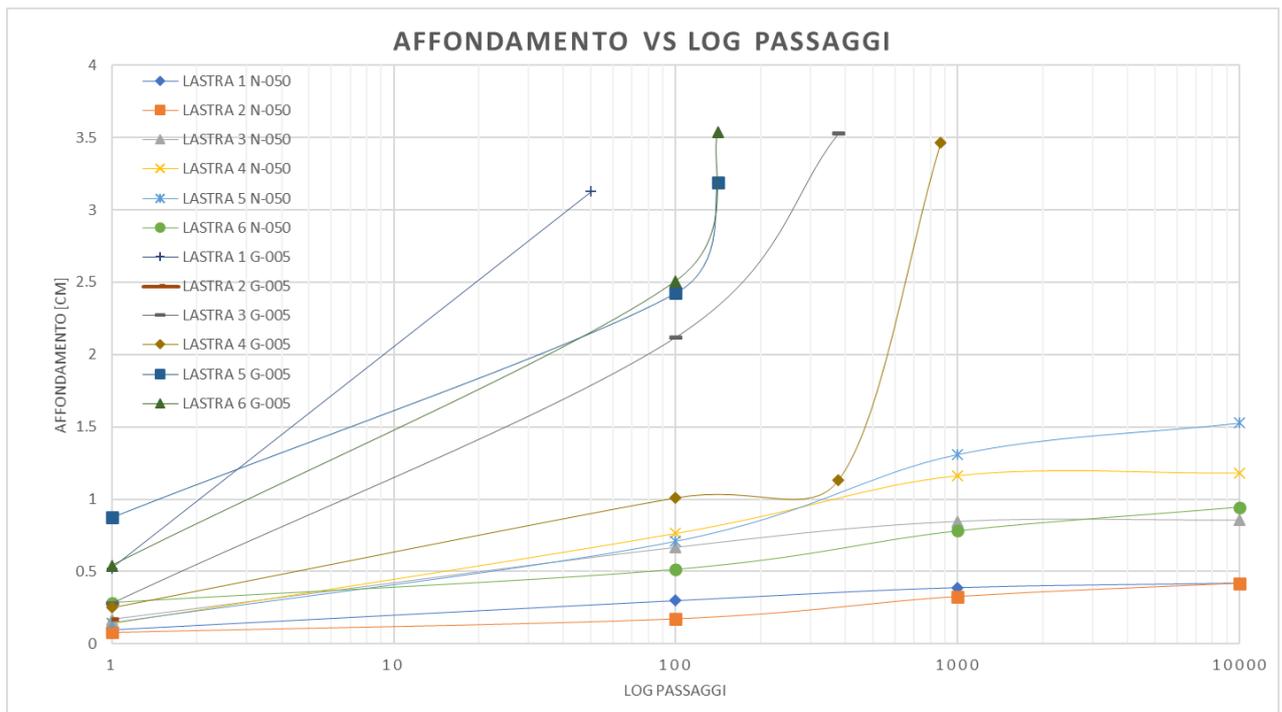
Lastra 5 N-050	0,145	0,710	1,311	1,528
Lastra 6 N-050	0,285	0,515	0,781	0,945

A partire da questi valori, si è sviluppato un grafico nel piano “*Affondamenti vs Logaritmo delle passate*” che serve per capire il comportamento del materiale.



In questo caso, il materiale è riuscito a sottoporre le passate senza affondamenti eccessivi; come si osserva nel grafico, tutte le curve hanno un andamento che è simile tra loro e inoltre simile, ma in minor misura, all’andamento del caso precedente.

Per paragonare i due materiali si procede alla sovrapposizione dei due grafici riportati sopra.



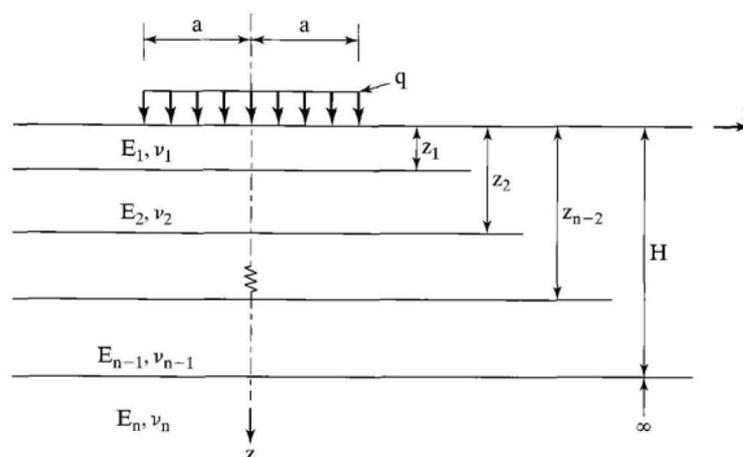
Nella grafica possiamo osservare che ogni materiale genera una specie di cono con vertice nel passaggio 1. Dove il materiale A1 (N-050) ha degli affondamenti minori, cono inferiore, mentre il materiale A6 (G-005) degli affondamenti maggiori, cono superiore. Anche nel materiale A6 si evidenzia che circa alle 100 passaggi l'affondamento cresce rapidamente, questo può darsi alla riduzione del modulo elastico (crollo del materiale)

Capitolo 6 - Simulazione teorica

L'ultima fase del presente lavoro di tesi si basa in un processo di Back – calculation, dove attraverso i valori ottenuti per l'affondamento nella fase precedente, cosiddetta simulazione pratica, si cerca di individuare il valore del modulo di rigidità, e la sua evoluzione nel tempo dovuta al passaggio ripetuto del carico. Il processo descritto si realizza mediante il supporto di un software (KenPave) e prevede l'utilizzo della modellazione del terreno mediante la teoria del multistrato elastico lineare.

6.1. Programma KenLayer

Il software KenLayer è un programma sviluppato per il suo utilizzo nella pavimentazione flessibile e rigida, si basa nella risoluzione di un sistema multistrato elastico sotto un'area di carico circolare. Inoltre, consente la sovrapposizione degli effetti, quindi, permette impostare come dati di entrata sistemi di ruote "single", "dual", "dual – tandem" oppure "dual – tridem".



i. Strati non lineari

È noto che i materiali granulari sono non lineari con un modulo elastico che varia con i livelli di stress. Regolarmente il modulo elastico che si deve usare come dato di entrata è il modulo resiliente del materiale ottenuto per una serie di prove non confinate oppure compressione triassiale.

Il modulo elastico dovrebbe incrementare con l'aumento del primo invariante di tensione. Esistono delle equazioni che il software utilizza, la più nominata è l'equazione costitutiva dove il modulo varia secondo due costanti sperimentali

(K_1 e K_2) e dell'invariante di tensioni. Questo ultimo può essere ottenuto come la somma dei tre tensioni principali.

$$E = K_1 * \theta^{K_2}$$

I valori tipici delle costante vengono riportati nella **Tabella XXXX**

TABLE 3.1 Nonlinear Constants K_1 and K_2 for Granular Materials

Material type	No. of data points	K_1 (psi)		K_2	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Silty sand	8	1620	78	0.62	0.13
Sand-gravel	37	4480	4300	0.53	0.17
Sand-aggregate blend	78	4350	2630	0.59	0.13
Crushed stone	115	7210	7490	0.45	0.23

Note. 1 psi = 6.9 kPa.

Source. After Rada and Witczak (1981).

6.2. Procedura di calcolo

Per il ricavare il valore del modulo si sono seguiti due approcci diversi: il primo risponde al calcolo del modulo con le misure dell'affondamento direttamente eseguite dal laboratorio; mentre che il secondo prende questi valori e valuta il modulo analizzando l'incremento tra i diversi cicli. Il primo approccio è stato realizzato per i due materiali, invece il secondo solo per il materiale N-050. Nel frattempo, l'analisi viene condotto ipotizzando prima che i due strati sono collegati e poi che essi non sono collegati tra di loro.

I dati di input necessari para il corretto funzionamento del programma sono:

- la pressione di gonfiaggio dello pneumatico della macchina ormaiatrice 0,6 Mpa oppure 600kPa;
- la forza assiale della macchina pari a 5000 N

Nella seguente figura (*Figura xxx*) si osserva la impostazione generale del software

General Information of LAYERINP

TITLE strips lastra 6 n-050 10000 bonded

Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0
Number of layers	(NL)	2
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	1
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	1

OK

Data Set

Print

Come tipo di materiale abbiamo scelto un materiale lineare, non abbiamo realizzato un'analisi del danno, il numero di strati sono 2, mettendo in conto il terreno e lo strato infinitamente rigido; abbiamo impostato il calcolo del modulo solo sulla superficie del terreno, che sarebbe dove sono presi le misure; rispetto al legame tra le due strati, abbiamo deciso di fare i due casi, sia legato come non legato, Gli altri valori in questa finestra sono per default.

Nella seguente figura (*Figura xxxxx*) vengono messi i dati rispetto allo spessore del terreno ed i moduli di Poisson, Avendo scelto 0,4 per il terreno e 0,5 per lo strato rigido,

Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Unit cm

Layer No.	TH	PR
1	10	.4
2	XXXXXXXXXX	.5

A continuazione vengono impostati i moduli, dove nel caso dell'acciaio abbiamo messo 210Gpa e il valore del modulo del terreno varia fino a trovare lo spostamento massimo ottenuto nel laboratorio,

Come ultimo step nell'input data abbiamo l'informazione sul carico

Load Information

Double click anywhere on a line to get auxiliary form for NR or NPT.

Unit	cm	kPa	cm	cm		
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	YW	NR or NPT
1	0	5	600		0	0 2

La colonna "LOAD" mettiamo "0" dovuto a che abbiamo un singolo asse, La colonna "CR" vuole dire "Contact Radius", questo valore arriva dal rapporto tra la forza assiale netta che produce la macchina ormaiatrice e la pressione di gonfiaggio il cui proporziona l'area di pressione dove se ricava il radio, La colonna "CP" oppure "Contact Pressure" si assume uguale alla pressione di gonfiaggio dello pneumatico della macchina ormaiatrice, Rispetto alla colonna "NR", il software permette di calcolare gli spostamenti al di sotto del carico oppure a diverse distanze dal centro, in questo caso abbiamo introdotto due valori, uno centrale e un altro solo per ottenere qualche valore di riferimento a 5cm dal centro,

Una volta impostati tutti i valori di input, facciamo andare il programma, A continuazione abbiamo un esempio dell'output data,

```

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\Nueva carpeta\Lastra 3\strips lastra 3 n-050 10000 not bonded.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -strips lastra 3 n-050 not bonded
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 2
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 1
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 10
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,4 0,5
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0,001
CONDITIONS OF INTERFACES (INT) ARE : 0

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 4,240E+03 2 2,100E+08

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 5
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 600
RADIAL COORDINATES OF 2 POINT(S) (RC) ARE : 0 5

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS
(S) (S) (S) (S) (S) (S) (S) (S)
(STR) (STR) (STR) (STR) (STR) (STR) (STR) (STR)
0,00000 0,00100 0,85561 600,184 467,411 467,411 0,000
(S) (S) (S) (S) (S) (S) (S) (S)
5,336E-02 5,336E-02 9,522E-03 9,522E-03 9,522E-03 ,000E+00
5,00000 0,00100 0,44713 299,999 182,505 236,455 4,470
(S) (S) (S) (S) (S) (S) (S) (S)
3,123E-02 -7,565E-03 1,025E-02 ,295E-02

```

6.2.1. Punto di indagine N-050

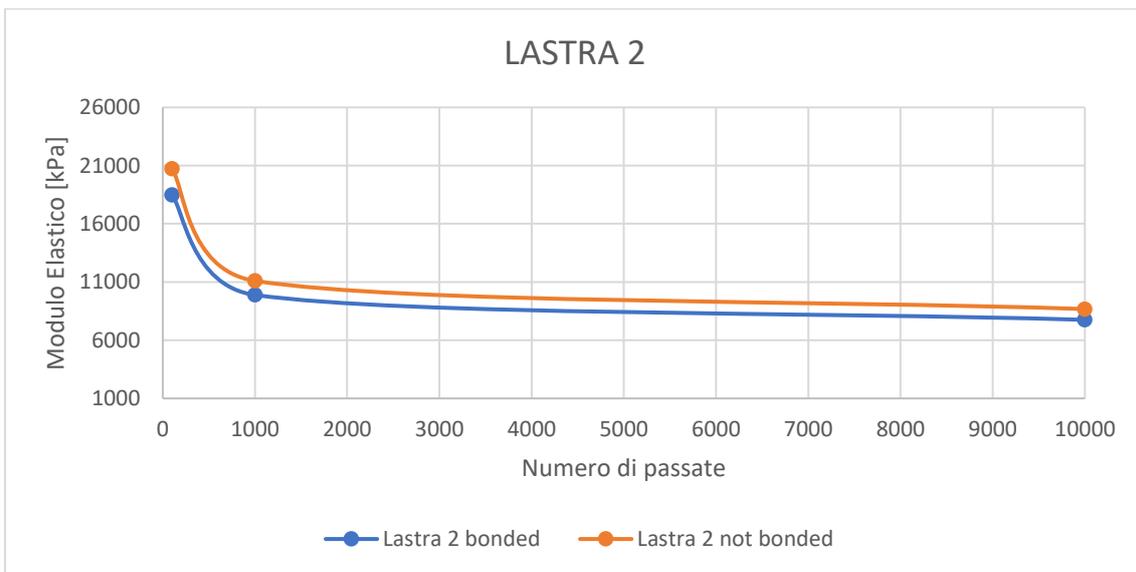
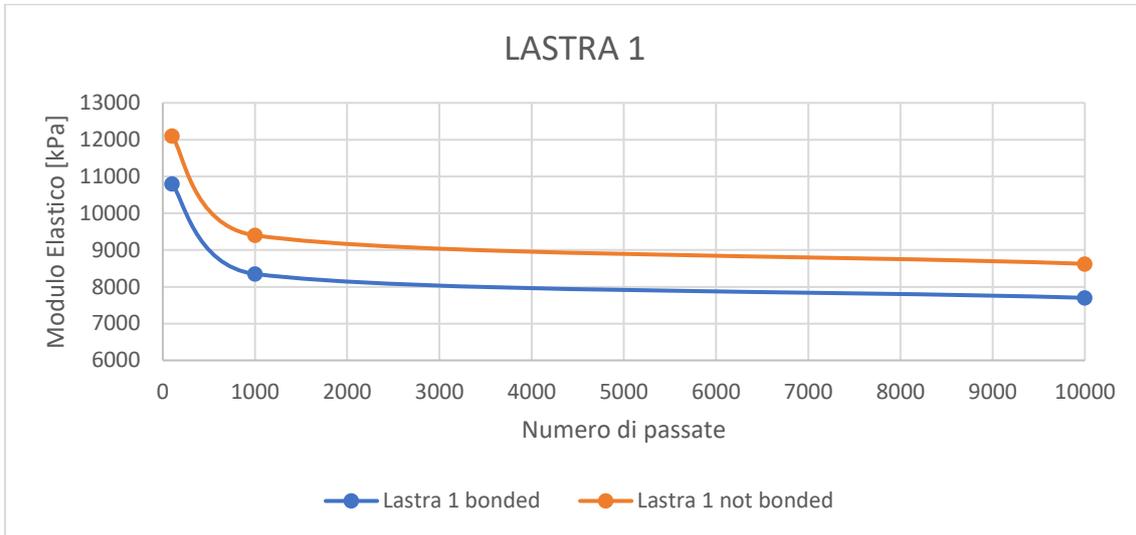
Abbiamo ripetuto questo processo per tutti i valori di spostamenti massimi ottenuti per le diverse quantità di passate, I risultati dei moduli ricavati sono nelle seguenti tabelle:

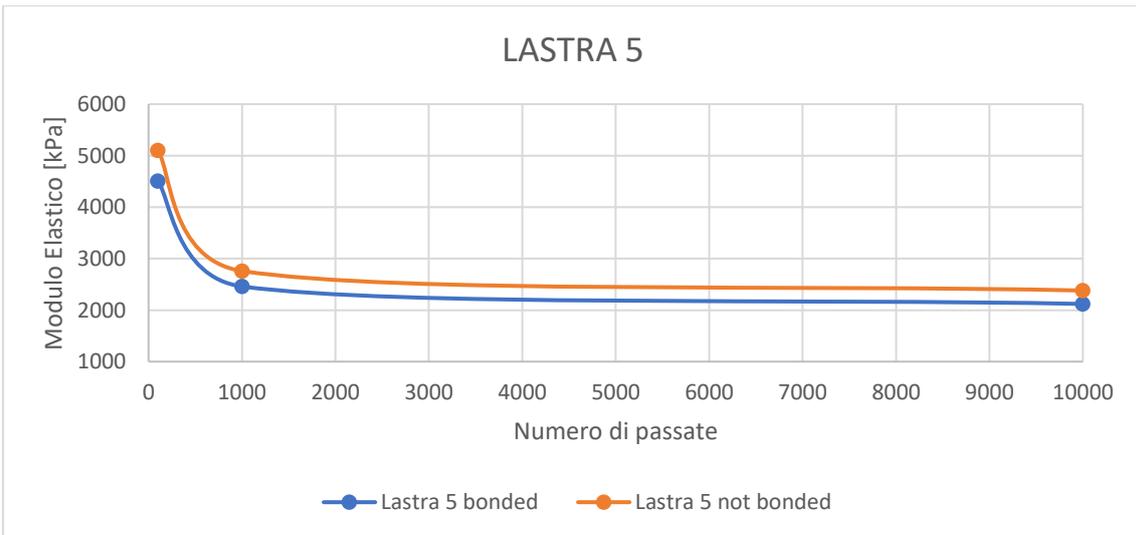
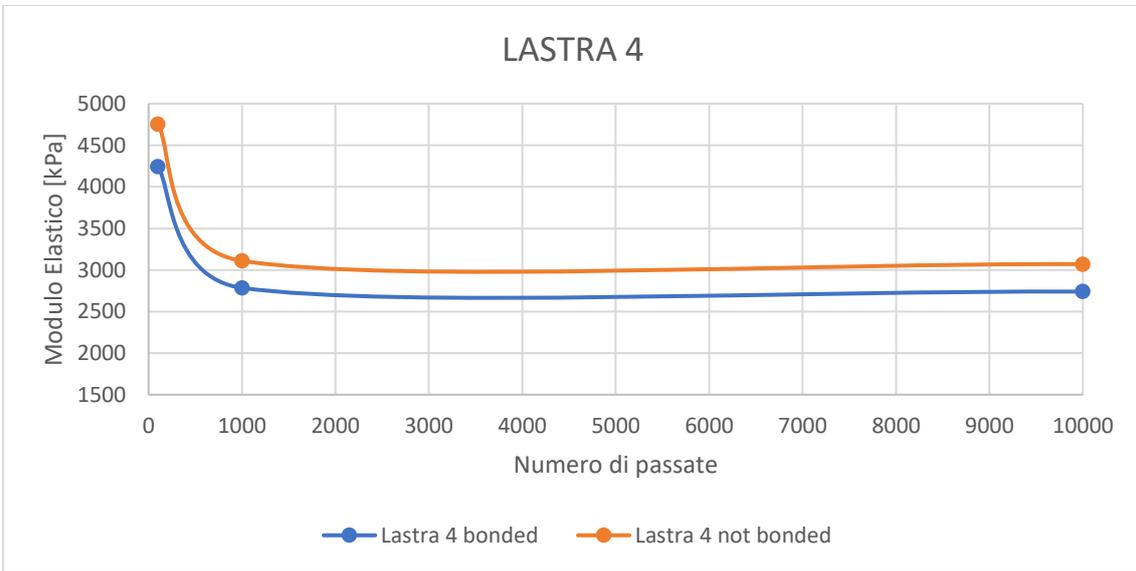
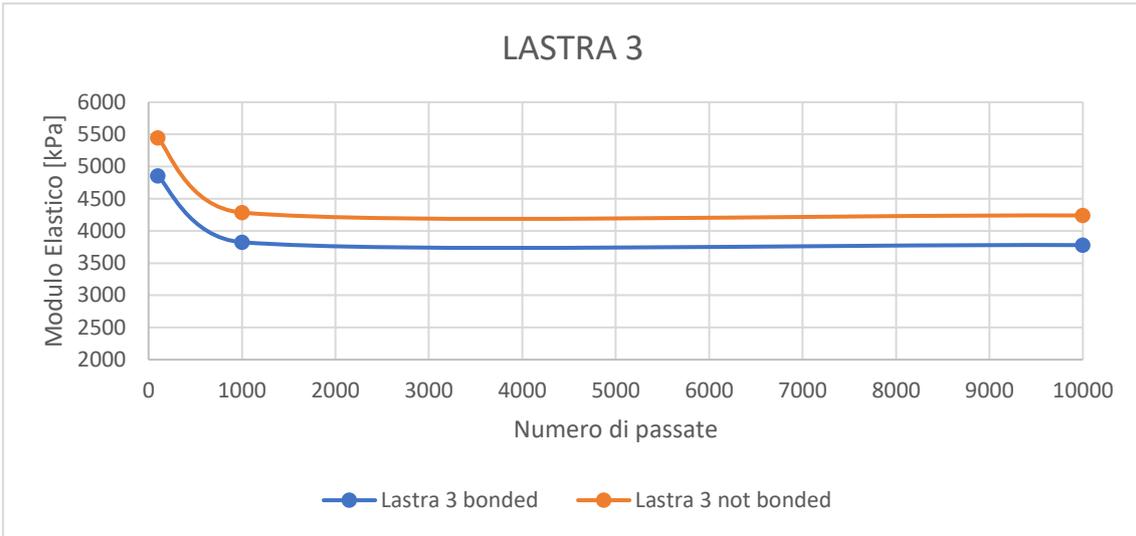
Per spostamento massimo 10000 passate		
N-050	LEGATO	NON LEGATO
	E [kPa]	E [kPa]
LASTRA 1	7700	8625
LASTRA 2	7750	8675
LASTRA 3	3780	4240
LASTRA 4	2740	3070
LASTRA 5	2120	2380
LASTRA 6	3435	3840

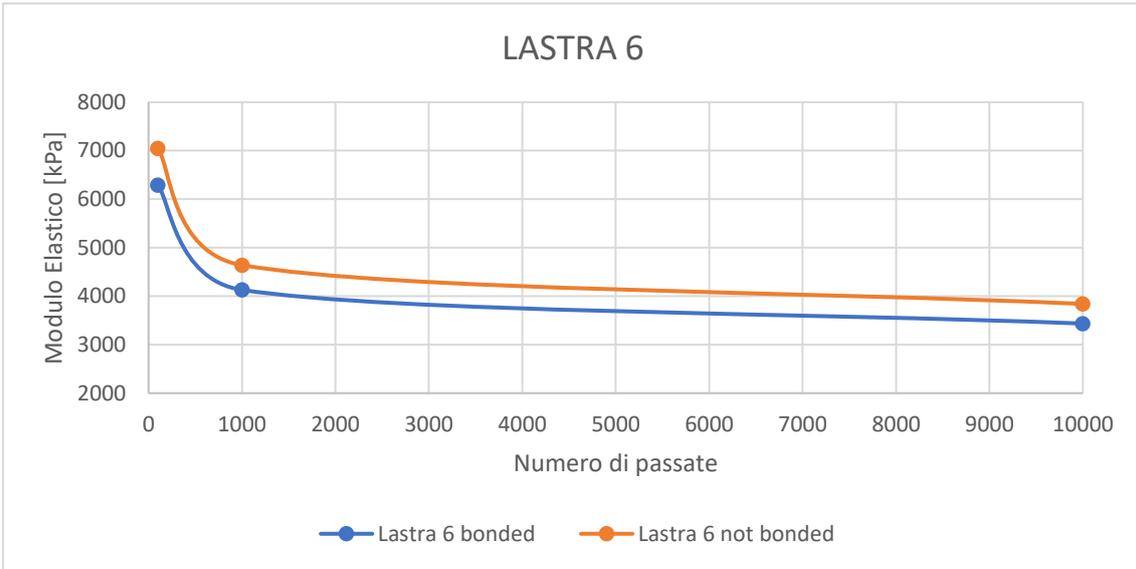
Per spostamento massimo 1000 passate		
N-050	LEGATO	NON LEGATO
	E [kPa]	E [kPa]
LASTRA 1	8350	9400
LASTRA 2	9890	11100
LASTRA 3	3825	4285
LASTRA 4	2785	3110
LASTRA 5	2460	2760
LASTRA 6	4130	4640

Per spostamento massimo 100 passate		
N-050	LEGATO	NON LEGATO
	E [kPa]	E [kPa]
LASTRA 1	10800	12100
LASTRA 2	18490	20720
LASTRA 3	4855	5445
LASTRA 4	4245	4755
LASTRA 5	4505	5100
LASTRA 6	6290	7050

A partire dei moduli ottenuti, si procede a realizzare dei grafici per valutare l'andamento di essi, in modo di capire il comportamento del terreno quando è sotto carico.







Dovuto alla variabilità degli affondamenti ottenuti però il materiale G-005, si ha dovuto sviluppare una interpolazione per omogenizzare rispetto al numero di passate ai quali erano analizzati i moduli, In questo modo tanto il materiale N-050 come il materiale G-005 erano valutati allo stesso numero di passaggi,

Capitolo 7 - Conclusioni

Le indagini sperimentali condotte durante lo svolgimento del presente lavoro di tesi sono state mirate a valutare l'evoluzione del modulo di rigidezza del terreno costituente l'area di strip, dovuto al passaggio di un aeromobile in caso di veer-off e/o overrun, attraverso la misura diretta degli affondamenti prodotti da un carico transiente.

A tal fine, si è definita una procedura di compattazione di laboratorio che consentisse di ottenere le medesime caratteristiche di addensamento del materiale posto in opera. La metodologia utilizzata ha preso le mosse dalle tecniche di compattazione con rulli normalmente adottate per i conglomerati bituminosi. I risultati ottenuti hanno dimostrato l'efficacia di tale tecnica anche per materiali granulari (indipendentemente dalla tipologia di terreno indagato). Successivamente, le lastre così realizzate sono state sottoposte a prove del tipo "wheel tracking test", mirate a valutare l'affondamento prodotto dal passaggio di uno pneumatico con l'intento di simulare, su piccola scala, la ruota di un aeromobile.

Attraverso un processo di back-calculation, si è così potuto individuare il valore del modulo di rigidezza, e la sua evoluzione nel tempo dovuta al passaggio ripetuto del carico, dei materiali indagati. Il processo di back-calculation adottato ha previsto l'utilizzo della modellazione del terreno attraverso la teoria del multistrato elastico lineare.

Si è potuto osservare come sia effettivamente possibile determinare il valore della rigidezza del terreno e la sua evoluzione nel tempo; in particolare, l'incremento del numero dei cicli di sollecitazione ha portato ad un aumento del modulo elastico dovuto ai fenomeni di addensamento connessi al passaggio del carico transiente.

È opportuno, però, sottolineare come vi siano alcune criticità da affinare, quali il confinamento del materiale all'interno della lastra e il carico massimo applicabile che non riescono a simulare in maniera soddisfacente la reale situazione delle aree di strip.

È stato però possibile evidenziare una stretta correlazione tra la tipologia di terreno e il valore del modulo elastico retro-calcolato. Si è potuto, infatti,

osservare come il comportamento di terreni aventi caratteristiche sensibilmente differente (A1a e A6) si rifletta nei risultati ottenuti, evidenziando, in linea con le aspettative, rigidzze decisamente inferiori per i terreni a connotazione più plastica.

La procedura definita in questo lavoro di tesi dovrà essere nel futuro integrata al fine di poter prevedere, in base a dati sperimentali di laboratorio, l'affondamento che l'aereo critico potrà generare nella zona di strip e confrontarlo con quelle che sono le indicazioni riportate dall'ICAO. Ovviamente si renderà necessaria una campagna di indagine, sia di laboratorio che di campo, che preveda un più ampio spettro di materiali e condizioni al contorno (gradi addensamento, contenuti di umidità) in grado di poter correlare i dati sperimentali così ottenuti con quanto realmente misurato nelle arre di strip.

Bibliografia

[1] ICAO Technical Specifications – Annex 14 Aerodromes Design and Operation;

[2] Regolamento per la navigazione aerea – Art. 6;

[3] Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti, edizione 2 del 21 ottobre 2003

[4] ICAO 2022 Annual Safety Report;

[5] UNI EN 13286-2:2010. Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 2: Metodi di prova per la determinazione della massa volumica e del contenuto di acqua di riferimento di laboratorio - Costipamento Proctor;

[6] UNI EN ISO 17892-3:2016. Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 3: Determinazione della massa volumica dei granuli solidi;

[7]

[8]

[9] UNI EN ISO 17892-12:2018. Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 12: Determinazione dei limiti liquidi e plastici;

[10] UNI 11531-1:2014. Costruzione e manutenzione delle opere civili delle infrastrutture - Criteri per l'impiego dei materiali - Parte 1: Terre e miscele di aggregati non legati;

[11] UNI EN 13286-47:2012. Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 47: Metodo di prova per la determinazione dell'indice di portanza CBR, dell'indice di portanza immediata e del rigonfiamento;

[]

[]