



**Politecnico  
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

MODELLAZIONE E VERIFICA DELLA CAPACITA'  
PORTANTE DI STRIP AEROPORTUALI

---

Tesi di Laurea Magistrale

**Relatore:**

Prof. Ezio Santagata

**Correlatori:**

Prof. Pierpaolo Riviera

Ing. Riccardo Rabezzana

**Candidata:**

Roberta Rinaldin

Anno Accademico 2020/2021



## Abstract

L'ICAO nel corso degli ultimi decenni ha predisposto molteplici norme per la sicurezza globale del trasporto aereo, incentrandosi in particolar modo sulla sicurezza delle piste aeroportuali. Tale necessità nasce dal fatto che circa il 50% degli incidenti registrati dall'ICAO ogni anno, si verifica in prossimità della pista, la maggior parte dei quali legati ad escursioni fuori pista (veer-off e overrun) durante la fase di atterraggio. La "Runway Strip" rientra tra le aree di sicurezza adiacenti alla pista previste all'interno di un aeroporto. Essa ha la duplice funzione di fornire una resistenza tale all'aereo che esce fuori pista da assicurarne la frenata e allo stesso tempo avere una capacità portante sufficiente per evitare danni al velivolo. Queste due necessità sono normate da due precisi parametri: l'affondamento del carrello anteriore dell'aeromobile deve essere massimo pari a 15 cm; la capacità portante del terreno, ad una profondità di 15 cm sotto la superficie finita, deve essere equivalente ad un valore di CBR compreso tra 15 e 20. Nel presente lavoro di tesi sono stati valutati differenti approcci per verificare l'effettivo affondamento del carrello anteriore di un aeromobile che esce fuori pista. I terreni oggetto di studio sono stati prelevati dall'area di strip di due dei principali aeroporti del nord Italia, i cui relativi dati caratterizzanti, utili alla valutazione della capacità portante, sono stati desunti da indagini sperimentali in situ e di laboratorio, quali prove DCP, Granulometria, Limiti di Atterberg, prove Proctor e prove per la determinazione dell'indice CBR. Il calcolo dell'affondamento dello pneumatico dell'aeromobile è stato effettuato sia con un approccio pratico simulativo in laboratorio, sia attraverso una metodologia numerica. L'approccio pratico ha previsto l'utilizzo della macchina Ormaiatrice su una lastra di terreno con caratteristiche di densità e contenuto d'acqua opportunamente definite. Quello numerico si è basato

sull'utilizzo di modelli numerici semplificati predittivi che sono stati sviluppati per controllare gli eventi di veer-off e overrun, considerando le caratteristiche dell'aereo critico, i dati ottenuti dalle prove sul terreno e la velocità con cui l'aeromobile esce fuori dalla pista. La valutazione finale si è incentrata su un confronto dei risultati ottenuti dai diversi metodi, col fine di evidenziare quali siano quelli più semplici e consistenti da poter utilizzare per un'accurata verifica della capacità portante dell'area di Strip aeroportuale.

# Indice

Capitolo 1 -	Introduzione.....	9
Capitolo 2 -	L'Aeroporto .....	13
2.1	Classificazione .....	13
2.1.1	Classificazione in funzione del tipo di aeromobili cui sono destinati.....	13
2.1.2	Classificazione prevista dal Regolamento per la Navigazione Aerea.....	14
2.1.3	Classificazione in funzione della proprietà .....	14
2.1.4	Classificazione in funzione della tipologia di utenti.....	15
2.1.5	Classificazione in funzione dell'assistenza antincendio disponibile.....	16
2.1.6	Classificazione in funzione delle caratteristiche fisiche .....	17
2.2	Aree Aeroportuali .....	18
2.2.1	Area di Atterraggio.....	18
2.2.2	Area di Manovra.....	19
2.2.3	Area di Movimento .....	20
Capitolo 3 -	Incidentalità e Sicurezza.....	23
3.1	Tipologie di incidenti.....	23
3.1.1	Undershoot.....	24
3.1.2	Veer-off .....	24
3.1.3	Overrun.....	24
3.2	Numeri .....	25
3.3	Aree di sicurezza.....	28
3.3.1	Banchine.....	29
3.3.2	Runway Strip.....	30

3.3.3	Cleared and Graded Area.....	31
3.3.4	Runway End Safety Area.....	31
3.3.5	Stopway.....	32
3.3.6	Clearway.....	33
3.4	Requisiti Normativi della capacità portante delle Strip aeroportuali.....	34
Capitolo 4 -	Indagini sperimentali.....	37
4.1	Campi prova.....	37
4.2	Prove in situ .....	41
4.2.1	Prove DCP .....	42
4.2.2	Prove per la determinazione della densità in situ .....	49
4.2.3	Prelievo di campionature di terreno per prove di laboratorio .....	51
4.3	Prove di laboratorio .....	51
4.3.1	Classificazione del terreno.....	52
4.3.2	Prove per la determinazione della curva di compattazione Proctor.....	57
4.3.3	Prove per la determinazione dell'indice CBR immediato e dell'indice CBR dopo immersione in acqua .....	63
Capitolo 5 -	Modellazione.....	69
5.1	Modello di Richmond.....	69
5.2	Interazione pneumatico-terreno.....	70
5.2.1	Equazione per terreni coesivi.....	72
5.2.2	Equazione per terreni non coesivi.....	74
5.2.3	<i>Dynamic mobility number</i> $\Omega$ .....	75
5.3	Applicazione del modello al caso di studio.....	78
5.3.1	Aereo critico .....	78

5.3.2	Calcolo Cone Index e indice G.....	80
5.3.3	Velocità di uscita di pista .....	82
5.3.4	Calcolo profondità del solco .....	83
Capitolo 6 - Simulazione.....		85
6.1	Macchina ormaiatrice.....	85
6.1.1	Caratteristiche della macchina.....	86
6.2	Preparazione della lastra e procedura della prova.....	88
6.3	Lastra preparata secondo i valori di CBR appartenenti al range normativo.....	92
6.3.1	Punto di indagine F029.....	93
6.3.2	Punto di indagine E07 .....	96
6.4	Lastra con densità e contenuto d'acqua rilevati in situ .....	97
6.4.1	Punto indagine F029.....	98
6.4.2	Punto indagine E07.....	99
6.5	Valutazione dei risultati .....	100
Capitolo 7 - Conclusioni .....		105
Annesso A .....		107
Annesso B .....		111
Bibliografia .....		113



# Capitolo 1 - Introduzione

---

*Cosa succede quando un aereo esce fuori pista?*

Lo scenario in cui si inquadra la presente ricerca riguarda una delle principali sfide delle organizzazioni che regolano e normano i settori dell'aviazione civile: la sicurezza del trasporto aereo. Ogni anno l'ICAO raccoglie e monitora i dati relativi agli incidenti aerei a livello mondiale, proponendo nuove norme per il miglioramento dei livelli di sicurezza in ambito aeroportuale. Da quanto riportato nell'ICAO Safety Report del 2020 si evince che la maggior parte degli incidenti aerei avvengono per escursioni fuori pista, come il veer-off e l'overrun. Negli ultimi 20 anni, infatti, questi hanno rappresentato circa il 50% degli incidenti totali, l'83% dei quali avvenuto durante la fase di atterraggio. Dal punto di vista del settore dell'infrastruttura aeroportuale risulta quindi fondamentale predisporre aree di sicurezza circostanti le zone in cui gli aeromobili operano. Sono infatti previste le banchine, le aree di Strip, la Cleared and Graded Area (CGA), le zone di Runway End Safety Area (RESA), Clearway e Stopway. L'area di Strip, in particolar modo, possiede la duplice funzione di garantire una resistenza all'aeromobile che esce fuori pista tale da assicurarne la frenata e allo stesso tempo avere una capacità portante sufficiente da non causare danni al velivolo e ai suoi passeggeri. Queste due necessità sono regolate dalla normativa stipulata dall'ICAO basata su due precisi parametri: l'affondamento del carrello anteriore dell'aeromobile deve essere massimo pari a 15 cm; la capacità portante del terreno, ad una profondità di 15 cm dal piano campagna, deve essere equivalente ad un valore di CBR compreso tra il 15% e il 20%. Viene inoltre prevista una valutazione dei cedimenti, calcolati con il carico applicato dall'aereo critico del dato aeroporto, che non devono risultare eccessivamente

elevati. I metodi utilizzati per effettuare le presenti valutazioni richiedono spesso un numero elevato di dati ed una aleatorietà dei risultati. Ciò porta il mondo scientifico ad una continua ricerca di modelli e metodologie che permettano rapidità di calcolo ed affidabilità dei risultati.

A tale scopo, nel presente lavoro di tesi, vengono proposti due differenti approcci per il calcolo dell'affondamento finale del carrello anteriore di un aeromobile che esce fuori pista. Il primo, basato sul modello matematico elaborato da Richmond et al. appositamente per lo studio dei fenomeni di veer-off ed overrun. L'affondamento finale dello pneumatico dell'aeromobile viene valutato considerando l'aereo critico dell'aeroporto in esame, le caratteristiche di portanza del terreno oggetto di studio e la velocità con cui l'aereo esce di pista. Il secondo approccio si è basato su prove pratiche di simulazione, effettuate in laboratorio utilizzando la macchina ormaiatrice, con l'intento di riprodurre in una scala inferiore ciò che avviene nella realtà. In particolare, nelle prove pratiche attraverso la costruzione di lastre di materiale addensato, si è cercato di ricreare due condizioni specifiche del terreno: quella in situ, e quella per cui il terreno possiede le caratteristiche di portanza richieste dalla normativa ICAO.

Sia per l'approccio numerico che per quello pratico sono stati utilizzati i terreni prelevati dall'area di strip di due dei principali aeroporti del nord Italia. Grazie alle indagini effettuate in situ ed in laboratorio è stato possibile caratterizzare il terreno e reperire tutti i dati necessari per l'applicazione dei due approcci. In particolar modo, attraverso le indagini sperimentali di campo, come le prove DCP e del volumometro a sabbia, è stato possibile ricavare le informazioni necessarie per applicare il modello al caso reale e conoscere le condizioni di addensamento del terreno in situ da riprodurre in laboratorio. Le indagini di laboratorio sono risultate fondamentali per la caratterizzazione del terreno, per valutare la sua suscettività all'acqua e il suo comportamento in relazione ai carichi applicati. È stato

necessario quindi, effettuare prove granulometriche, Limiti di Atterberg, prove Proctor e prove per la valutazione dell'indice CBR.

I risultati ottenuti dai diversi approcci sono stati valutati per una verifica diretta delle capacità portanti dei terreni studiati. Successivamente sono stati confrontati con l'intento di ricercare una metodologia consistente e rapida da poter applicare in futuro per la valutazione della capacità portante delle aree di Strip aeroportuale.



# Capitolo 2 - L'Aeroporto

---

L'Aeroporto è per definizione, il terreno in cui vengono installati tutti gli impianti necessari al decollo, all'atterraggio e allo stazionamento degli aerei. Più in generale l'aeroporto rientra nella categoria degli Aerodromi, definiti dall'ICAO<sup>1</sup> come *“un'area di definite dimensioni, su terra o su acqua (comprendente anche fabbricati, impianti e installazioni), destinata in tutto o in parte ad essere impiegata per la partenza, l'arrivo ed il movimento di superficie degli aeromobili”* [1].

## 2.1 Classificazione

In generale gli Aerodromi possono essere suddivisi in diverse categorie omogenee [2], in funzione:

1. del tipo di aeromobili cui sono destinati;
2. del Regolamento per la Navigazione Aerea;
3. della proprietà;
4. della tipologia di utenti;
5. dell'assistenza antincendio disponibile;
6. delle caratteristiche fisiche.

### 2.1.1 Classificazione in funzione del tipo di aeromobili cui sono destinati

Gli aerodromi propriamente detti possono essere di molteplici tipi, in base alle tipologie di aeromobile che vi operano:

---

<sup>1</sup> ICAO - International Civil Aviation Organization: agenzia specializzata delle Nazioni Unite preposta alla regolamentazione tecnica di tutti i settori dell'aviazione civile

- Aeroporti: costruiti su terra, accolgono aeroplani ed elicotteri;
- Idroscali: situati generalmente sul mare o su altri specchi d'acqua, vi operano idrovolanti ed aeromobili anfibi;
- Eliporti: spazi adibiti principalmente all'involo e all'approdo di elicotteri. Possono essere costruiti su differenti aree come, ad esempio, i tetti degli edifici;
- Aeroscali: aree destinate alle manovre di atterraggio e decollo dei dirigibili o altri palloni aerostati;
- Aviosuperfici: terreni non definiti come aeroporti o eliporti, ma comunque idonei a garantire operazioni con aeromobili. Non sono soggette a norme e prescrizioni particolari, ma vi possono operare solo piloti in possesso di specifiche abilitazioni. Possono essere disposte in qualsiasi località, inclusi i ghiacciai.

### **2.1.2 Classificazione prevista dal Regolamento per la Navigazione Aerea**

La classificazione riportata nell'articolo 6 del Regolamento per la Navigazione Aerea estende il concetto di aeroporto anche agli idroscali, proponendo un'altra suddivisione degli aerodromi:

- *Aeroporto: "località, sia terrestre che acquea, destinata, anche in via temporanea, alla partenza, all'approdo e allo stazionamento degli aeromobili. [...] Sono considerati aeroporti anche gli aeroscali per l'atterraggio dei dirigibili e gli idroscali per l'ammarramento degli idrovolanti" [3];*
- Campo di fortuna: località destinata all'approdo e alla partenza di aeromobili che durante la navigazione sono obbligati ad una discesa forzata;
- Campo di volo: località, autorizzata dal Ministero dell'aeronautica, destinata al volo degli alianti.

### **2.1.3 Classificazione in funzione della proprietà**

A seconda del tipo di proprietario si possono evidenziare:

- Aerodromi Statali: la proprietà e la gestione sono dello Stato, ulteriormente suddivisi in civili, militari e misti;
- Aerodromi Privati: costruiti e gestiti da enti privati, il cui utilizzo è limitato ad aeromobili posseduti dal proprietario dell'aeroporto, o, in ogni caso, da esso autorizzati.

### **2.1.4 Classificazione in funzione della tipologia di utenti**

Gli aerodromi vengono classificati in base alle due tipologie di utenza: civile e militare. Quelli civili sono utilizzati principalmente da traffico aereo civile, si sviluppano generalmente nei pressi di zone commerciali, anche in funzione delle caratteristiche e delle necessità degli aeromobili che vi operano. Si possono ulteriormente suddividere in:

- Intercontinentali: posti come scali intercontinentali, in cui affluisce principalmente il traffico a lungo raggio;
- Internazionali: destinati ad ospitare prevalentemente traffico internazionale a medio e breve raggio;
- Nazionali: interessati da un traffico nazionale elevato, con limitata attività su voli internazionali;
- Regionali: ospitano aeromobili di piccole dimensioni, che operano su rotte a bassa frequentazione;
- A traffico locale: aperti al traffico dell'aviazione generale e aerotaxi.

Gli aeroporti militari sorgono per esigenze relative alla difesa del territorio nazionale e sono classificati in:

- Armati: sede di Reparti o di Scuole di volo;
- Attrezzati: ospitano attività di volo saltuarie e sono per questo dotati di tutti i servizi prescritti per le Telecomunicazioni e l'Assistenza al volo, Sanitari, Antincendi, ecc...;

- Custoditi: richiedono una continua sorveglianza, in quanto sono provvisti di particolari installazioni e immobili;
- Zone demaniali aeronautiche: terreni che potenzialmente potrebbero essere trasformati in campi di aviazione.

Gli aeroporti civili possono sempre ospitare voli militari, tranne in alcuni casi. Il contrario, ovvero che l'aeroporto militare accolga voli di tipo commerciale, avviene solo nel caso in cui si presentino precise necessità economiche e previo permesso dei Reparti base militari. In tal caso si parla di aeroporti Misti.

### **2.1.5 Classificazione in funzione dell'assistenza antincendio disponibile**

A seconda del tipo di aeromobile che opera all'interno di un aeroporto sarà necessario un servizio antincendio adeguato. Proprio per questo l'ICAO ha definito dieci differenti categorie antincendio, che esprimono il livello di protezione assicurato in un determinato aeroporto, sulla base della quantità e qualità degli agenti estinguenti e sulla base del numero di veicoli antincendio operativi. Vengono inoltre prese in considerazione le dimensioni principali degli aeromobili quali lunghezza e larghezza della fusoliera, come è mostrato nella seguente tabella.

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

<b>9</b>	da 61 m a 76 m escluso	7 m	3
<b>10</b>	da 76 m a 90 m escluso	8 m	3

Tabella 1 - Categorie antincendio aeroporti

### **2.1.6 Classificazione in funzione delle caratteristiche fisiche**

La classificazione più importante fornita dall'ICAO [1] si basa sulle caratteristiche fisiche dell'aeroporto, a loro volta funzione degli aeromobili che vi operano. Questa viene posta sotto forma di codice: Codice di Riferimento dell'Aeroporto ("*Aerodrome Reference Code*"). L'intento del codice di riferimento è fornire un metodo semplice per mettere in relazione numerose caratteristiche degli aeroporti, così da poter avere a disposizione una serie di strutture aeroportuali, con le medesime caratteristiche, adatte ad ospitare determinati aeromobili. Il codice non è destinato ad essere utilizzato in fase progettuale per determinare la lunghezza della pista o i requisiti della pavimentazione. È un codice alfanumerico costituito da due elementi relativi alle caratteristiche prestazionali e alle dimensioni dell'aereo:

- un numero, compreso tra "1" e "4", determinato in base alla lunghezza della pista di riferimento dell'aeromobile che richiede maggior corsa in fase di decollo ("*aeroplane reference field length*"), stabilisce le caratteristiche relative alla pista e alle superfici libere da ostacoli;
- una lettera, dalla "A" alla "F", determinata in base all'apertura alare oppure in base alla larghezza massima del carrello principale dell'aeromobile più grande che si prevede possa operare nell'aeroporto [4]. È legata alle esigenze di manovra del velivolo durante le fasi di rullaggio e di parcheggio.

Per determinare il codice di riferimento di un determinato aeroporto è sufficiente far riferimento alla seguente tabella fornita dall'ICAO:

Primo elemento del codice		Secondo elemento del codice		
Numero di codice	Lunghezza di campo caratteristica dell'aeromobile	Lettera di codice	Apertura alare	Larghezza massima del carrello principale
<b>1</b>	Inferiore a 800 m	<b>A</b>	Inferiore a 15 m	Inferiore a 4,5 m
<b>2</b>	da 800 m a 1200 m escluso	<b>B</b>	da 15 m a 24 m escluso	da 4,5 m a 6 m escluso
<b>3</b>	da 1200 m a 1800 m escluso	<b>C</b>	da 24 m a 36 m escluso	da 6 m a 9 m escluso
<b>4</b>	1800 m o più	<b>D</b>	da 36 m a 52 m escluso	da 9 m a 14 m escluso
		<b>E</b>	da 52 m a 65 m escluso	da 9 m a 14 m escluso
		<b>F</b>	da 65 m a 80 m escluso	da 14 m a 16 m escluso

Tabella 2 - Codice di riferimento dell'Aeroporto

## 2.2 Aree Aeroportuali

In ogni aeroporto si distinguono diverse aree nelle quali vengono garantite le manovre di atterraggio e decollo, di parcheggio, rifornimento, manutenzione e imbarco e sbarco passeggeri. Queste possono essere suddivise in tre gruppi:

- area di Atterraggio;
- area di Manovra;
- area di Movimento.

### 2.2.1 Area di Atterraggio

L'Area di Atterraggio (*"Landing Area"*) è *"quella parte dell'area di movimento destinata all'atterraggio o al decollo di aeromobili"* [1]. È costituita da tutte le piste principali e quelle secondarie che permettono l'involo e l'atterraggio di elicotteri o velivoli più piccoli.

Le piste possono essere classificate a seconda delle operazioni che permettono di eseguire. In particolari condizioni meteo, infatti, non tutte le piste sono visibili, e non possono pertanto garantire un atterraggio o un decollo in sicurezza. Si evidenziano quindi due tipologie di piste:

- Piste Strumentali: dotate di radioassistenze o altri ausili in grado di condurre l'avvicinamento alla pista (guida sul piano orizzontale) e far completare la manovra in maniera sicura anche in condizioni meteorologiche critiche;
- Piste Non Strumentali o a vista.

Tra le piste strumentali si differenziano le piste di precisione e le piste di non precisione. Le prime, oltre a garantire l'allineamento con la pista, sono dotate di un apparato che consente la guida del velivolo sul sentiero di discesa (piano verticale). In base all'accuratezza degli strumenti di cui sono dotate e alla posizione in cui l'aeromobile è guidato in totale sicurezza, le piste strumentali si dividono in tre categorie, dalla meno precisa (Categoria I) alla più precisa (Categoria III) che consente di atterrare anche in condizioni di visibilità nulla.

### **2.2.2 Area di Manovra**

L'Area di Manovra (*"Manoeuvring Area"*) è definita come *"quella parte di un aeroporto da utilizzare per il decollo, l'atterraggio e il rullaggio di aeromobili, escludendo i piazzali"* [1]. Sono quindi comprese le piste di decollo e atterraggio e tutte le vie di rullaggio che permettono la circolazione degli aeromobili all'interno dell'aeroporto. I piazzali di sosta, dedicati alla salita e discesa dei passeggeri, al rifornimento e alla manutenzione, sono invece esclusi. Nello specifico la via di rullaggio (*"Taxiway"*) è *"un percorso definito su un aeroporto terrestre, istituito per il rullaggio di aeromobili e destinato a fornire un collegamento tra una parte e un'altra di aeroporto"* [1], include:

- il corridoio di rullaggio per la zona di stazionamento dell'aeromobile (*"Aircraft stand taxiway"*): parte di piazzale designata come via di rullaggio e adibita al solo accesso del velivolo alle aree di stazionamento;
- via di rullaggio del piazzale (*"Apron taxiway"*): parte delle vie di rullaggio collocata all'interno di un piazzale e adibita a garantire un percorso all'interno dello stesso;
- via di rullaggio di uscita rapida (*"Rapid exit taxiway"*): una via di rullaggio collegata direttamente alla pista con un angolo acuto, compreso tra i 25° e i 45°. Essa consente agli aeromobili, una volta atterrati, di uscire rapidamente dalla pista, con velocità maggiore rispetto a quella permessa dalle vie di uscita normali. Questo permette di diminuire il tempo di occupazione della pista aumentando il livello di sicurezza e la capacità aeroportuale in termini di numero di operazioni.

### **2.2.3 Area di Movimento**

L'Area di Movimento (*"Movement Area"*) è *"quella parte di aeroporto adibita al decollo, all'atterraggio e al rullaggio degli aeromobili, comprende l'Area di Manovra e i piazzali"* [1]. È costituita quindi da qualsiasi area dell'aeroporto sulla quale i velivoli possano transitare.

A differenza delle due aree precedenti, quindi, in questo caso vengono presi in considerazione anche i piazzali (*"Apron"*): aree delimitate destinate ad accogliere aeromobili per le operazioni di imbarco e sbarco passeggeri, carico e scarico merci, rifornimento, parcheggio, manutenzione e pulizia. La superficie totale dei piazzali deve essere tale da garantire uno smistamento del traffico rapido e sicuro.

All'interno dell'area di movimento sono anche comprese specifiche zone adibite a manovre essenziali quali:

- piazzola per la prova motori, situate in punti in cui, durante la manovra, non vengano arrecati danni a terzi;

- piazzola per la prova bussola, in cui è possibile tarare lo strumento dell'aeromobile in maniera precisa, in quanto è dotata di appositi punti di riferimento ed è immune da effetti di tipo magnetico;
- piazzola per la prova dell'altimetro, permette di tarare lo strumento prima di ricevere l'autorizzazione dalla torre di controllo al rullaggio e decollo.



# Capitolo 3 -

## Incidentalità e Sicurezza

---

Uno degli aspetti fondamentali legati alle operazioni che si svolgono in ambito aeroportuale è sicuramente la sicurezza. Affinché si possano valutare nuove strategie per aumentare il livello di sicurezza durante il movimento degli aeromobili è necessario analizzare quali siano le principali tipologie di incidenti che avvengono e quanto questi siano importanti rispetto alla totalità.

### 3.1 Tipologie di incidenti

L'ICAO ha identificato 5 categorie di eventi ad alto rischio [5], basandosi su un'analisi degli incidenti avvenuti nel corso degli ultimi decenni. Questa è stata effettuata considerando le vittime effettive, il rischio elevato di mortalità per incidente ed il numero effettivo di incidenti e inconvenienti. Vengono distinte le seguenti categorie:

- volo controllato su terreno (CFIT "*controlled flight into terrain*");
- perdita di controllo in volo (LOC-I "*loss of control in-flight*");
- collisione a mezz'aria (MAC "*mid-air collision*");
- escursione fuori pista (RE "*runway excursion*");
- incursione in pista (RI "*runway incursion*").

Analizzando nello specifico gli eventi che interessano l'area di atterraggio, si possono evidenziare tre tipologie fondamentali di incidenti:

1. Undershoot;
2. Veer-off;
3. Overrun.

### **3.1.1 Undershoot**

L'undershoot si verifica durante la fase di atterraggio, quando il velivolo, perdendo quota troppo velocemente, tocca il suolo prima di raggiungere la soglia della pista ed impatta, in alcuni casi, con ostacoli verticali quali alberi o tralicci elettrici. Considerate le velocità elevate con cui l'aeromobile viaggia, le conseguenze di questa tipologia di incidente sono spesso notevoli, in termini di danni strutturali al mezzo e lesioni ai passeggeri.

### **3.1.2 Veer-off**

Il veer-off può avvenire sia in fase di atterraggio che di decollo e si ha in caso di perdita di controllo della direzione dell'aeromobile rispetto all'asse longitudinale della pista. È generalmente causato da fattori differenti quali: anomalia al sistema frenante, problematiche relative a pneumatici e carrelli, presenza di ghiaccio sulla pista, condizioni meteorologiche avverse o forte vento.

### **3.1.3 Overrun**

L'overrun si verifica nel momento in cui l'aeromobile supera la linea di fine pista. Può avvenire sia in fase di atterraggio che di decollo. In particolare, nella fase di atterraggio, l'overrun è causato dalla velocità troppo elevata dell'aeromobile oppure da problematiche relative all'aderenza con la pavimentazione, come per esempio in caso di aquaplaning. In fase di decollo questa tipologia di incidente è causata da problemi meccanici del velivolo o dallo scoppio di uno pneumatico. Viste le velocità non troppo elevate con cui avviene generalmente l'overrun, i danni causati dall'incidente non sono disastrosi e non gravano sulla vita dei passeggeri.

## 3.2 Numeri

L'analisi dettagliata degli incidenti che avvengono ogni anno viene effettuata dall'ICAO, riportando nel "Safety Report" tutti i dati raccolti dai diversi Stati mondiali. Per comodità statistica vengono definiti 5 raggruppamenti di Stati [5] (RASG "Regional Aviation Safety Group") come riportato in figura:



Figura 1 - ICAO Regional Aviation Safety Group [5]

Le statistiche annuali sugli incidenti indicano un aumento sia del numero totale di incidenti, che del tasso di incidentalità globale all'anno 2019<sup>2</sup>. Dai dati riportati dagli Stati tra il 2018 e il 2019 si osserva un aumento del 16% del numero totale di incidenti. Anche il tasso di incidentalità globale pari a 2,9 incidenti per milione di partenze è aumentato del 12% rispetto al 2,6 registrato nel 2018. Quest'ultimo, in particolar modo, fornisce un indicatore generale delle prestazioni di sicurezza per le operazioni di trasporto aereo. Dai grafici di seguito

---

<sup>2</sup> Si fa riferimento ai dati raccolti fino all'anno 2019 escludendo l'anno 2020 a causa del decremento del numero di voli per l'avvento della pandemia mondiale di Covid-19

riportati si può inoltre osservare un positivo decremento del numero di decessi relativi ad incidenti fatali, dai 514 del 2018, ai 239 del 2019.

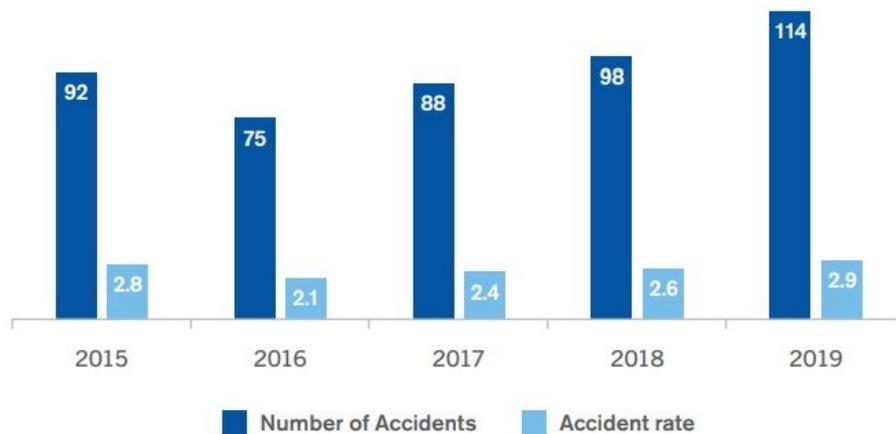


Figura 2 - Report incidenti tra il 2015 e il 2019 su voli commerciali programmati [5]

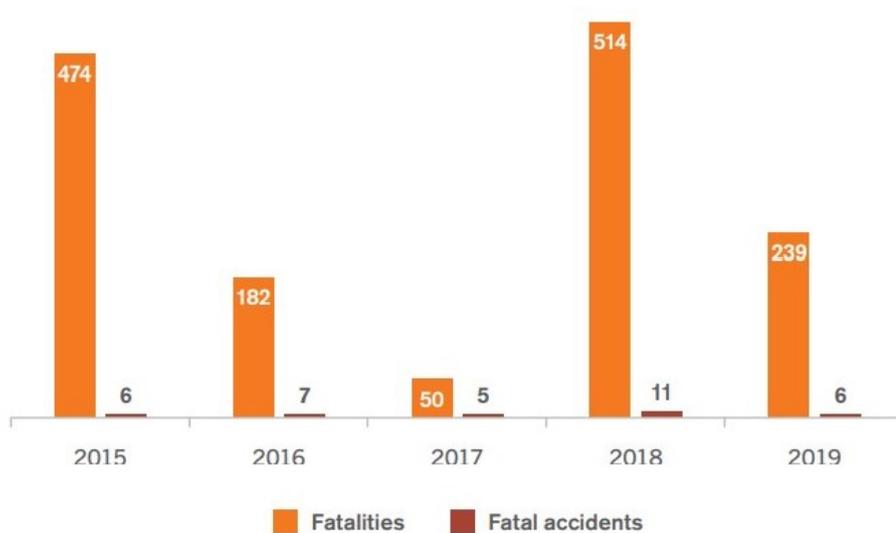


Figura 3 - Report incidenti fatali tra il 2015 e il 2019 su voli commerciali programmati [5]

Gli incidenti utilizzati per le seguenti statistiche sono stati esaminati e convalidati dall'ICAO Safety Indicators Study Group (SISG) e hanno riguardato operazioni commerciali programmate di aeromobili che comportano il trasporto di passeggeri, merci e posta dietro compenso, con un peso massimo dell'aeromobile al decollo (MTOW "Maximum Take-Off Weight") superiore a 5700 kg come definito da "ICAO Annex 13 – Aircraft Accident and Incident Investigation".

Per analizzare ulteriormente lo stato della sicurezza aerea, i dati sugli incidenti per le operazioni di trasporto aereo commerciale di linea sono classificati in base alla regione RASG. Le seguenti immagini riportano quando evidenziato dall'ICAO Safety Report 2020 con tabelle riassuntive dello stato di sicurezza delle diverse regioni all'anno 2019, nel contesto dei risultati globali. Bisogna specificare che a causa del numero ridotto di partenze, alcune regioni sperimentano una grande fluttuazione del tasso di incidentalità annuo e quindi i numeri riportati sono da considerare rispetto ad una prospettiva complessiva.

RASG Region	Estimated Departures	Number of Accidents	Accident Rate (per million departures)	Fatal Accidents	Fatalities
AFI	1,130,861	9	8.0	2	183
APAC	12,663,222	17	1.3	Nil	Nil
EUR	9,826,990	29	3.0	3	55
MID	1,311,340	2	1.5	Nil	Nil
PA	13,856,870	54	4.0	1	1
International waters	n/a	3	n/a	Nil	Nil
<b>WORLD</b>	<b>38,789,283</b>	<b>114</b>	<b>2.9</b>	<b>6</b>	<b>239</b>

Figura 4 - Partenze, incidenti e decessi per regione RASG nel 2019 [5]

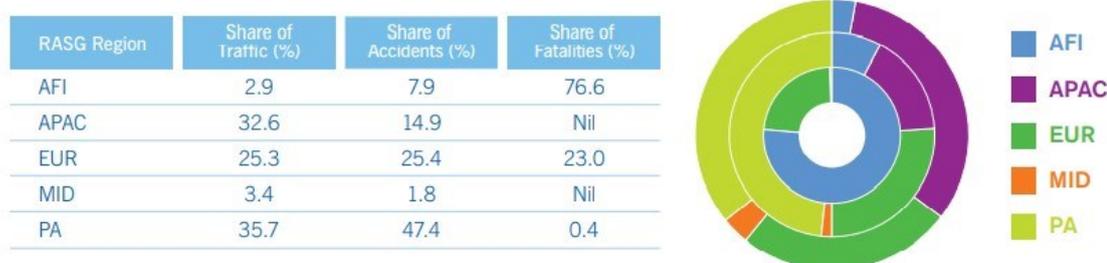


Figura 5 - Percentuali di traffico, incidenti e decessi per regione RASG [5]

Osservando, infine, le statistiche relative alle diverse tipologie di incidenti ad alto rischio categorizzate dall'ICAO (vedi paragrafo 3.1), si può evidenziare che gli incidenti relativi all'escursione fuori pista (RE) hanno rappresentato nel 2019 il 14,9% degli incidenti totali, includendo il 50% di tutti gli incidenti mortali con 44 decessi. C'è stato un solo incidente mortale legato alla perdita di controllo in volo (LOC-I) che ha rappresentato il 16,7% degli incidenti mortali con 26 decessi. Si noti,

come riportato dal grafico seguente, che nel 2019 non si sono verificati incidenti relativi al volo controllato su terreno (CFIT), collisione in volo (MAC) e incursione in pista (RI).

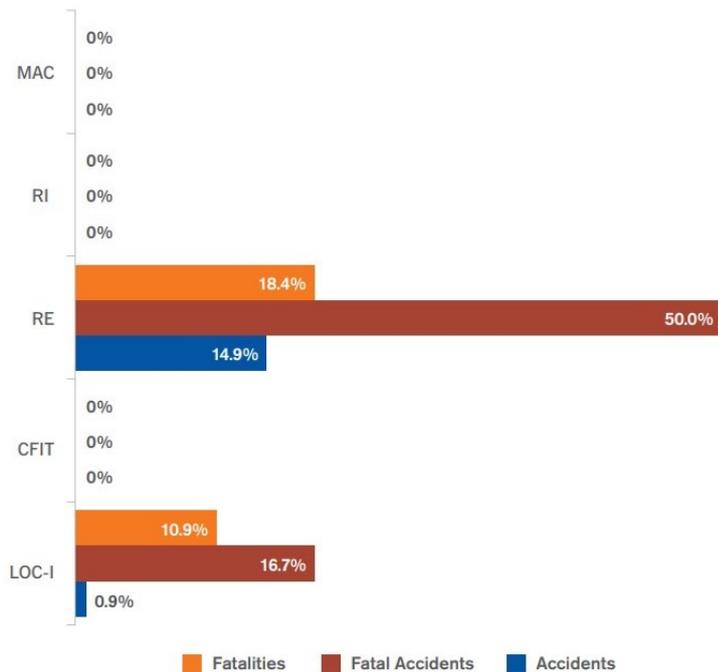


Figura 6 - Riepilogo degli incidenti ad alto rischio nel 2019 [5]

L'escursione fuori pista risulta l'evento più rischioso in termini numerici e quindi la principale tipologia di incidente da monitorare per la sicurezza globale del trasporto aereo. Dal 1996 al 2019, circa il 52% degli incidenti si è verificato in prossimità della pista, di cui il 41% appartiene ad escursioni fuori pista, equamente suddivise tra veer-off e overrun, e la maggior parte di essi si è verificato durante la fase di atterraggio (83%) [6].

### 3.3 Aree di sicurezza

Visto il numero di incidenti, la sicurezza delle piste rimane la sfida più grande per la sicurezza dell'aviazione. Per tale ragione sono previste apposite aree di sicurezza all'interno dell'aeroporto con lo scopo di

limitare danni in caso di guasti agli aeromobili o di errori dei piloti. Le aree sono le seguenti [4]:

- Banchine (“Shoulders”);
- Runway Strip;
- Cleared and Graded Area (CGA);
- Runway End Safety Area (RESA);
- Stopway;
- Clearway.

### 3.3.1 Banchine

Le Banchine sono delle aree che si estendono simmetricamente ai lati della pista, servono a garantire una transizione tra la zona pavimentata e quella non asfaltata. Le banchine proteggono il bordo della pavimentazione, contribuiscono alla prevenzione dell’erosione del suolo dal getto d’aria dei motori e mitigano i possibili danni causati dall’ingestione di corpi estranei da parte dei motori a reazione. Deve essere inoltre in grado di ridurre al minimo qualsiasi pericolo per un aereo che esce fuori pista, garantendo una capacità portante sufficiente a sopportare il peso dell’aeromobile e dei veicoli che vi transitano [7].

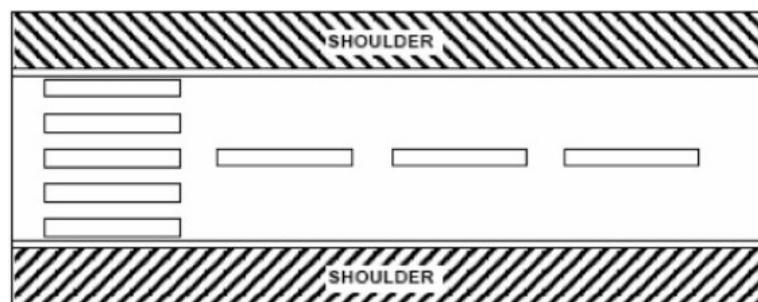


Figura 7 – Banchine

### 3.3.2 Runway Strip

La Runway Strip è anche definita come “striscia di sicurezza della pista”, è una superficie che comprende la pista stessa e le stopway associate. Ha lo scopo di:

- *“ridurre il rischio di danni ad un aeromobile che esce di pista mediante la rispondenza a specifici requisiti relativi alle pendenze longitudinali e trasversali e alla portanza” [4];*
- *“proteggere gli aeromobili in volo sopra essa durante atterraggi, decolli, atterraggi e decolli abortiti, fornendo loro un’area priva di ostacoli, ad eccezione di alcuni aiuti necessari alla navigazione aerea debitamente autorizzati” [4].*

Per quest’ultima ragione tutti gli elementi la cui presenza non è rilevante in superficie vanno interrati ad una profondità sufficiente da non interferire con gli pneumatici degli aeromobili che escono fuori pista. Bisogna considerare, come nel caso delle banchine, l’erosione causata dal getto dei motori: per una larghezza di almeno 30 m oltre la soglia, il terreno deve essere preparato adeguatamente. L’area di strip deve infine avere una capacità portante sufficiente per far transitare i veicoli di Primo Soccorso in caso di necessità.

L’area si estende longitudinalmente per 60 m oltre le zone di arresto e trasversalmente in maniera simmetrica rispetto all’asse della pista per almeno 150 m (per piste con codice 3 o 4) e 75 m (per piste con codice 1 o 2).

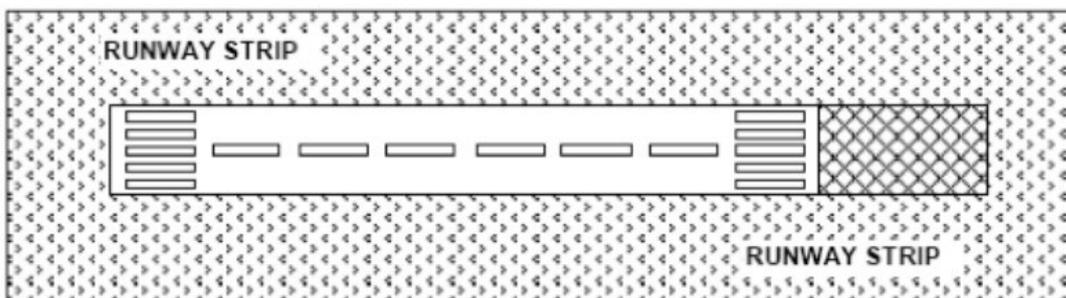


Figura 8 - Runway Strip

### 3.3.3 Cleared and Graded Area

La Cleared and Graded Area è un'area, appartenente alla Runway Strip, che deve essere livellata e priva di ostacoli per una distanza simmetrica rispetto all'asse della pista di almeno 105 m nel caso di piste di precisione aventi codice 3 o 4, di almeno 40 m in caso di piste strumentali di precisione con codice 1 o 2 [4]. Nel caso di piste non di precisione la CGA si estende per una lunghezza minima variabile tra 30 m (codice 1) e 75 m (codice 3). Quest'area deve essere "raccordata con la pista e in grado di sostenere l'aereo critico di progetto che al suo peso massimo certificato deve poterla percorrere senza subire danni significativi" [4]. La portanza può diminuire gradualmente allontanandosi dall'asse centrale della pista, in modo da favorire l'arresto dell'aeromobile.

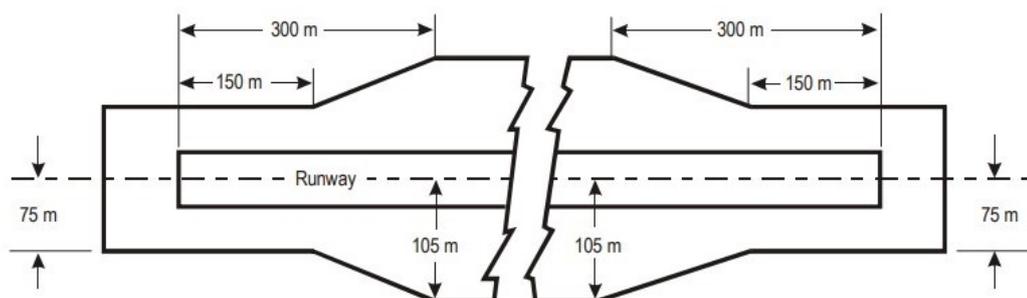


Figura 9 - Cleared and Graded Area

### 3.3.4 Runway End Safety Area

La Runway End Safety Area (RESA) è l'area di sicurezza di fondo pista, definita dall'ICAO come "un'area simmetrica rispetto all'asse centrale della pista e adiacente alla fine dell'area di Strip, destinata principalmente a ridurre il rischio di danni ad un aeromobile che affronta un evento di undershoot o overrun" [1]. La RESA serve quindi a diminuire il rischio di danni agli aeromobili e ai loro passeggeri nel caso in cui si dovesse arrivare troppo corti in fase di atterraggio o uscire fuori pista in fase di decollo. Quest'area deve essere presente in entrambe le estremità della pista, oltre la zona di Strip, con una

larghezza pari almeno al doppio della larghezza della pista. La lunghezza varia a seconda del codice della pista: almeno 240 m per piste con codice 3 o 4, 120 m per piste con codice 1 o 2. La superficie della resa deve inoltre favorire la decelerazione degli aeromobili in caso di uscita di pista, senza ostacolare il movimento dei mezzi di soccorso per non ridurre l'efficacia delle operazioni [4]. Pur non necessitando lo stesso livello di preparazione del terreno, che invece ha l'area di Strip, la RESA è progettata in molti casi con un materiale specifico (*"Engineered Materials Arresting System"*) che si frantumerà sotto l'azione del peso dell'aeromobile, assorbendo energia e frenando in tal modo il velivolo.

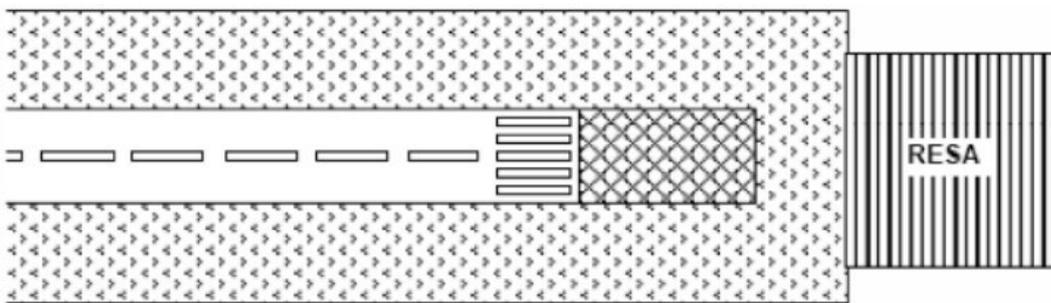


Figura 10 - Runway End Safety Area

### 3.3.5 Stopway

La Stopway è la zona d'arresto definita da un'area rettangolare che si estende oltre la fine della pista disponibile per il decollo, e che *"può essere adeguatamente predisposta e destinata come area nella quale un velivolo può essere arrestato in sicurezza nel caso di decollo abortito"* [4]. Nasce con l'intento di creare un sufficiente margine di sicurezza per il decollo di tutti gli aeromobili, e quindi garantire un arresto della corsa in totale sicurezza. La Stopway può avere caratteristiche di portanza e resistenza all'usura minori rispetto a quelle della pista, ma in ogni caso sufficienti a sostenere il peso dell'aeromobile senza indurre danni strutturali. L'area è pavimentata e si estende oltre la pista con una larghezza pari alla pista stessa.



Figura 11 - Stopway

### 3.3.6 Clearway

La Clearway è “un’area rettangolare, che può essere realizzata oltre la fine della corsa di decollo disponibile, libera da ostacoli che possono presentare un rischio per le operazioni di volo degli aeromobili. Congiuntamente con la pista essa fornisce un’area sopra la quale un velivolo può operare in sicurezza fino al raggiungimento delle altezze minime previste”. L’area si estende oltre la fine della pista e non ha vincoli riguardo la portanza o la tipologia di superficie. Può infatti estendersi anche su superfici idriche o fuori dai confini dell’aeroporto. L’unico vincolo riguarda la presenza di ostacoli: per assicurare l’involò dell’aeromobile in totale sicurezza deve essere libera da ostacoli con altezza superiore a 0,9 m. La zona ha una larghezza pari alla larghezza della Strip e si estende per una lunghezza definita in base alla corsa necessaria per il decollo (TORA<sup>3</sup>).

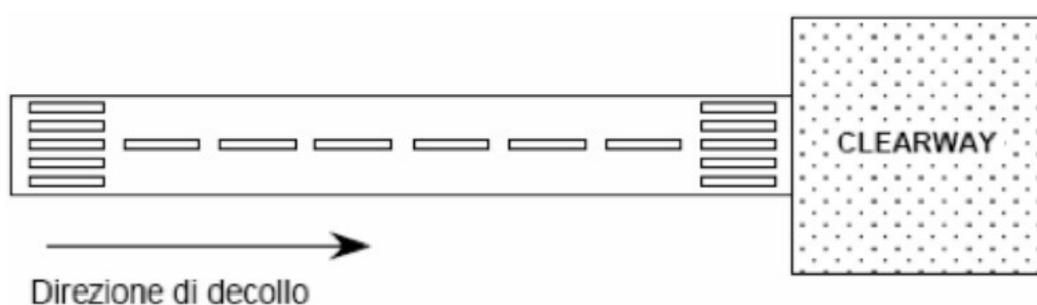


Figura 12 - Clearway

<sup>3</sup> TORA – Take Off Run Available: è la lunghezza della pista dichiarata disponibile ed idonea per la corsa di un aeromobile in fase di decollo sul suolo

### **3.4 Requisiti Normativi della capacità portante delle Strip aeroportuali**

Secondo la Normativa ICAO [7], l'area di strip è prevista per ridurre al minimo il rischio di danni ad un aeromobile che esce fuori pista. Per tale ragione la Strip dovrebbe garantire una resistenza tale da poter frenare l'aeromobile e allo stesso tempo impedire il collasso del carrello anteriore del velivolo. La superficie deve essere quindi preparata in modo tale da fornire resistenza all'avanzamento dell'aeromobile e al di sotto di essa deve avere una capacità portante sufficiente per evitare danni al velivolo. Al fine di soddisfare queste esigenze divergenti, vengono fornite diverse linee guida per la preparazione dell'area di Strip: ad una profondità di 15 cm dal piano campagna, per avere una stabilità sufficiente, il terreno deve essere preparato in modo tale che abbia un CBR compreso tra 15 e 20. Si noti che 15 cm è la profondità alla quale il carrello anteriore di un aeromobile può affondare senza crollare. I 15 cm superficiali, di terreno vegetale di ricoprimento, possono avere una resistenza minore (CBR nell'ordine di 5-7), in modo da facilitare la decelerazione del velivolo a seguito dell'azione frenante del terreno sul rotolamento dei carrelli. Il CBR può essere valutato sia in sito che in laboratorio all'umidità media stagionale più alta prevista per il dato terreno.

Vengono inoltre specificati dall'ENAC<sup>4</sup> [8], alcuni requisiti di portanza in relazione al passaggio dell'aereo critico e al calcolo dei cedimenti. I calcoli dei cedimenti massimi devono essere condotti ipotizzando l'aereo critico per l'aeroporto in esame e dimostrare un livello di buona portanza nell'intera estensione dell'area della Strip. Con l'acquisizione dei valori di CBR potranno essere calcolati i cedimenti teorici a diverse distanze dall'asse della pista, considerando il carico applicato sul

---

<sup>4</sup> ENAC - Ente Nazionale per l'Aviazione Civile: agisce come autorità unica di regolazione tecnica, certificazione, vigilanza e controllo nel settore dell'aviazione civile in Italia nel rispetto dei poteri derivanti dal Codice della Navigazione

carrello anteriore dell'aeromobile. Viene considerato il carrello anteriore poiché con esso si suppongono assenti le eventuali sovrapposizioni dei bulbi di pressione dei carichi e il probabile effetto piastra, presenti invece per carrello posteriore. Bisogna, inoltre, assicurare su tutta l'area di strip la transitabilità dei mezzi di soccorso, effettuando delle prove di campo con i mezzi dei Vigili del Fuoco e valutando i cedimenti effettivi a distanze differenti, in diverse condizioni di umidità del terreno. In questo modo si potranno individuare percorsi specifici per consentire l'attività di primo soccorso in caso di necessità.

Se i cedimenti calcolati risultassero troppo elevati, e quindi i requisiti di portanza non fossero idonei, bisognerà prevedere degli opportuni interventi per la sistemazione dei terreni in oggetto, come la compattazione o anche attraverso l'asportazione o l'apporto di nuovo materiale.



# Capitolo 4 -

## Indagini sperimentali

---

Nel presente lavoro di Tesi sono stati utilizzati, per la fase di sperimentazione, i terreni prelevati da due dei principali aeroporti del nord Italia, di cui non viene riportato il nome per motivi di privacy. Il primo passo per poter utilizzare i suddetti terreni è stato quello di caratterizzarli mediante prove in laboratorio e analizzare i dati ricavati dalle prove effettuate in situ.

Per comodità di espressione i due aeroporti verranno nominati nel presente elaborato come Aeroporto 1 e Aeroporto 2.

### 4.1 Campi prova

Il campo prova viene realizzato per stabilire in punti di indagine all'interno dell'area di Strip aeroportuale, in modo da poter investigare la zona in maniera omogenea per tutta la sua estensione. Nel caso dell'Aeroporto 1, l'area di indagine si estende per tutta la zona di strip. Nel caso dell'Aeroporto 2, l'indagine si concentra invece nell'area di strip adiacente alla zona della RESA. Di seguito vengono riportate le immagini relative ai perimetri, evidenziati con la linea rossa, dei campi prova dei due aeroporti oggetto di studio.

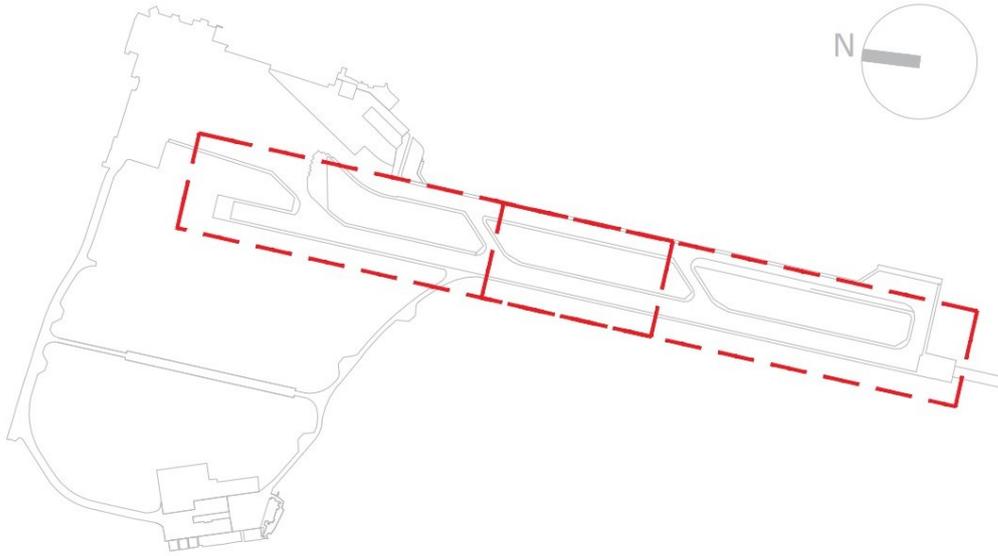


Figura 13 - Perimetro campo prova Aeroporto 1

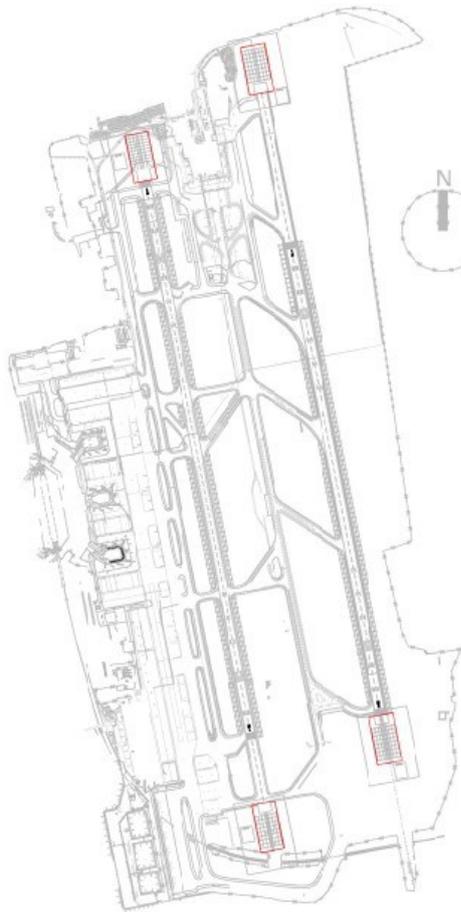


Figura 14 - Perimetri campi prova Aeroporto 2

Nell'Aeroporto 1 l'area di strip viene suddivisa secondo una griglia a maglie rettangolari con passo longitudinale, nella medesima direzione dell'asse della pista, di 30 m e passo trasversale di 15 m, seguendo l'allineamento delle luci di centro pista. La griglia si estende a partire da 50 m dall'asse centrale della pista di volo su entrambi i lati, escludendo in tal modo solo le banchine. Questa viene poi numerata con un codice alfanumerico in cui si identificano con una lettera le direttrici longitudinali, da A ad S a partire dalla più esterna sul lato Est e con un numero le direttrici trasversali, da 1 a 102 partendo dal limite esterno dell'area di RESA. Come mostrato nelle seguenti immagini, i punti di indagine e/o di prelievo sono disposti secondo i nodi della griglia di riferimento con un passo di 60 m lungo la direttrice longitudinale e 30 m lungo quella trasversale, sfalsandoli rispettivamente di 30 m e di 15 m. Ciò permette di avere una distribuzione quanto più omogenea possibile dei 347 punti di indagine e di poterli identificare all'interno dell'area di strip.

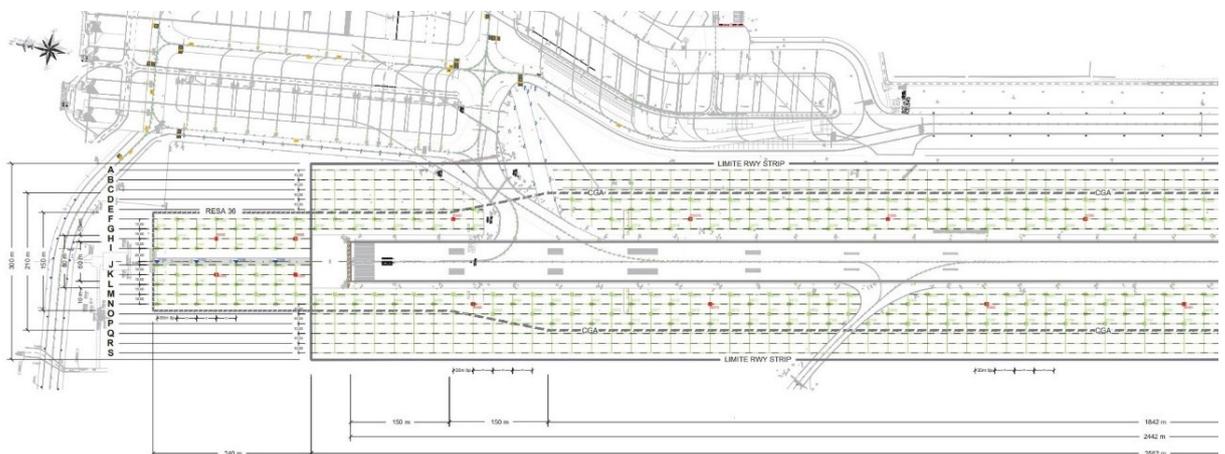


Figura 15 - Griglia indagini lato Nord Aeroporto 1

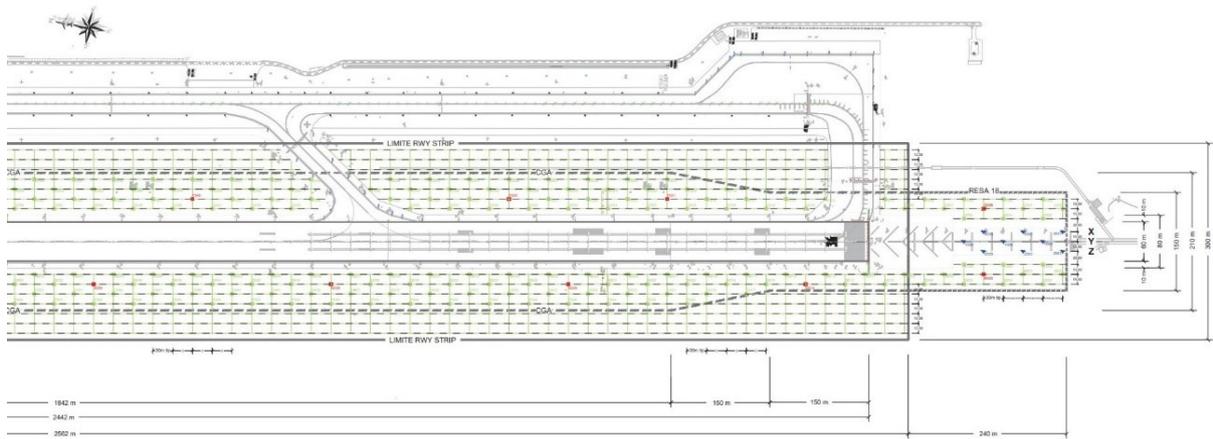


Figura 16 - Griglia indagini lato Sud Aeroporto 1

Per quanto riguarda l'Aeroporto 2 la griglia viene predisposta in modo da coprire l'intera area di RESA con un passo longitudinale, in direzione parallela all'asse della pista, pari a 20 m e trasversale di 25 m. Anche in questo caso le direttrici vengono numerate con un codice alfanumerico in cui si individuano le direttrici longitudinali con una lettera da A ad I e trasversali con un numero da 1 a 9.

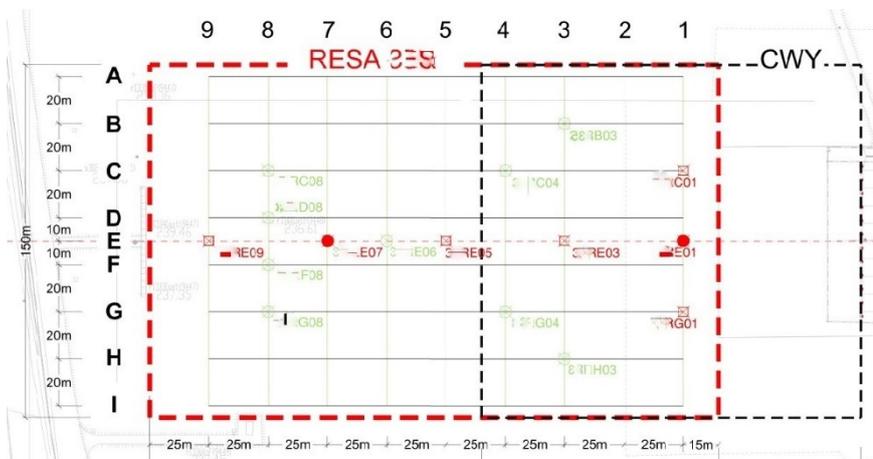


Figura 17 - Griglia zona di RESA Aeroporto 2

In punti specifici della griglia, evidenziati in rosso nelle immagini 15, 16 e 17 è inoltre prevista l'esecuzione di prove sperimentali da effettuare a livello del piano campagna o ad una profondità di 15 cm. Tali prove presentano i seguenti schemi di esecuzione:

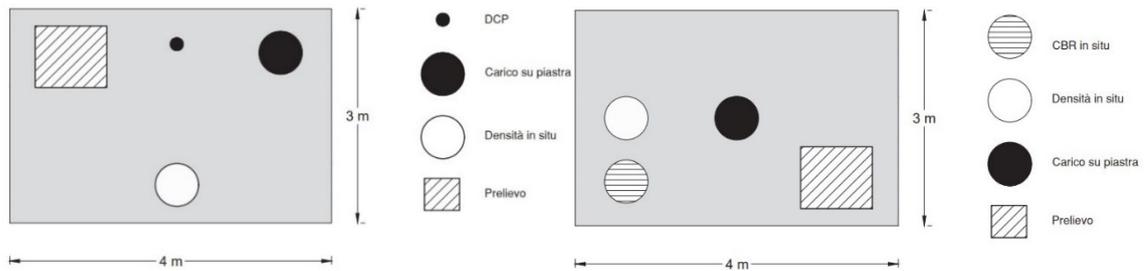


Figura 18 - Prove e prelievi a livello del piano campagna (figura a sinistra) e a profondità di 15cm (figura a destra)

I terreni utilizzati nel presente elaborato sono stati prelevati a 15 cm dal piano campagna nella zona sud-est dell'area di strip dell'Aeroporto 1, in corrispondenza del nodo F029 (vedere figura 19) e in una delle zone di RESA dell'Aeroporto 2 in corrispondenza del nodo E07 (vedere figura 18). Di tali punti di indagine e prelievo si hanno a disposizione i dati relativi alle prove DCP a piano campagna e densità in sito sia a piano campagna che a 15 cm di profondità.

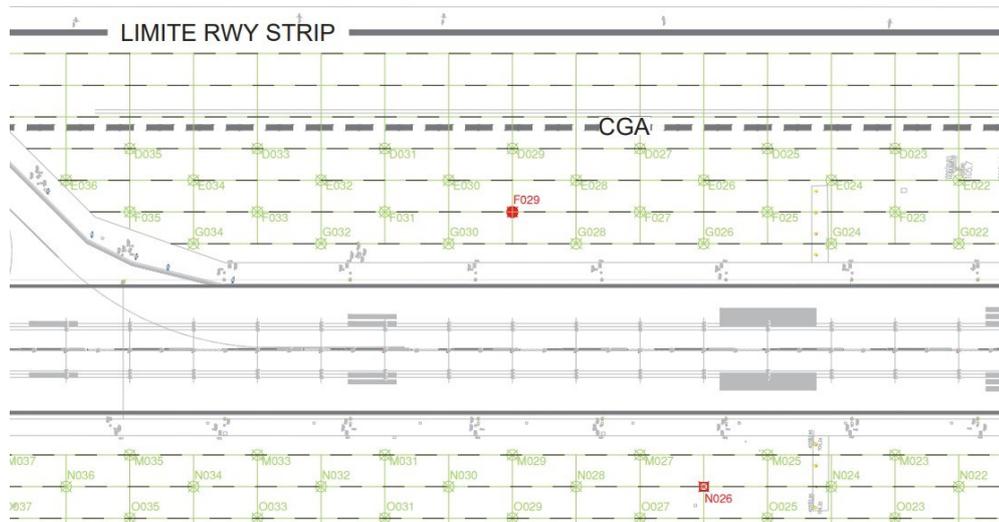


Figura 19 - Punto di indagine e prelievo F029

## 4.2 Prove in situ

Tutte le prove in situ vengono effettuate nelle ore notturne in modo da non interferire con la normale attività dall'aeroporto. Tra le prove effettuate, vengono nello specifico analizzate, ai fini del presente

lavoro: le prove DCP, le prove per la determinazione della densità in situ e il prelievo di campionature di terreno per le prove da effettuare in laboratorio.

#### **4.2.1 Prove DCP**

Le prove DCP (*“Dynamic Cone Penetrometer”*) vengono effettuate con lo scopo di rilevare la stratigrafia del terreno e stimare le sue caratteristiche di portanza. La prova viene effettuata con l’ausilio di uno strumento portatile a funzionamento manuale costituito da un’asta metallica lunga 70 cm che, posta in posizione verticale, scorre all’interno di una guida. All’estremità dell’asta si ha un cono di acciaio con diametro di 20 mm e angolo di apertura di 60°. La prova viene effettuata, secondo specifica normativa [9], a partire dal piano campagna, facendo affondare l’asta sotto l’azione impulsiva ripetuta di un maglio di 8 kg posto ad altezza pari a 575 mm. Per ogni colpo viene quindi registrato l’intervallo di affondamento, fino al raggiungimento delle condizioni di rifiuto, ovvero l’impossibilità di proseguire l’affondamento oppure il raggiungimento di un affondamento pari alla lunghezza dell’asta.

I risultati registrati possono poi essere rielaborati in modo da poter visualizzare graficamente l’avanzamento della penetrazione e valutare in seguito l’indice CBR. Quest’ultimo viene calcolato, secondo la Norma [9], attraverso la seguente equazione sperimentale:

$$CBR = a \cdot DCP^{-b} \quad (1)$$

Dove il CBR è espresso in percentuale, DCP è il gradiente di penetrazione del cono di prova, a e b sono costanti pari rispettivamente a 292 e 1,120 per tutti le tipologie di terreno ad eccezione dei gruppi CL e CH<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> CL e CH sono terreni classificati secondo la Norma USCS (Unified Soil Classification System) come argille a bassa o elevata plasticità

Nel presente lavoro sono stati elaborati i dati DCP provenienti dai punti di indagine situati nell'intorno del punto F029 ed E07. L'area, considerata rappresentativa ai fini dello studio, nel caso dell'Aeroporto 1 si estende per 60 m lungo la direzione longitudinale e 45 m lungo la direzione trasversale della griglia, comprendendo 6 punti di indagine. Nel caso dell'Aeroporto 2 l'area è delimitata per 75 m in direzione longitudinale e 60 m in direzione trasversale, per un totale di 7 punti di indagine. Come prima analisi i risultati grezzi delle prove DCP sono stati riportati su un foglio di calcolo e sono stati estrapolati i diagrammi rappresentati la penetrazione progressiva in funzione del numero di colpi cumulati. Di seguito viene rappresentato in esempio il diagramma riferito al punto F029.

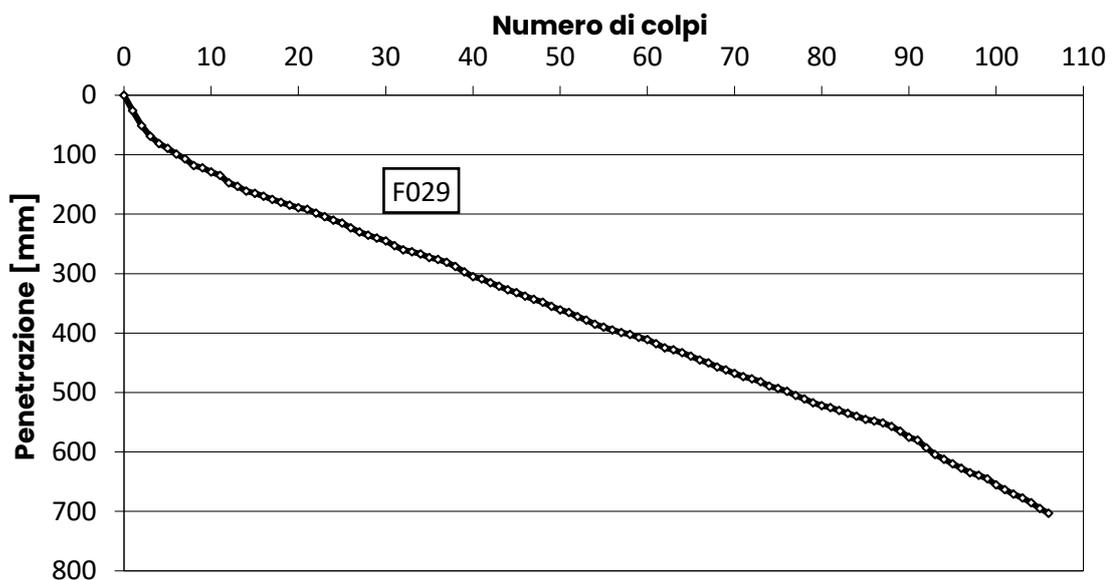


Figura 20 - Grafico relativo al punto di indagine F029 rappresentante l'andamento della penetrazione in funzione dell'incremento del numero di colpi

Ciascun diagramma è stato poi analizzato in modo da individuare tratti a pendenza costante ai quali associare valori dell'indice CBR relativi allo specifico punto di indagine, calcolati mediante l'equazione (1). Dai punti di intersezione dei tratti individuati, si sono poi calcolati gli spessori degli strati del terreno considerati omogenei a cui far corrispondere l'indice CBR. In quasi tutti i casi di indagine si osserva la

presenza di un primo "strato corticale" superficiale, di circa 10-15 cm, con caratteristiche di capacità portante scarse come si può desumere dai valori dell'indice CBR non elevati. Al di sotto dello strato corticale si osserva la presenza di due strati "sub-corticali" con caratteristiche di portanza superiori e che si estendono fino alla profondità ultima di indagine. Di seguito vengono riportati i risultati relativi ai punti di indagine F029 ed E07.

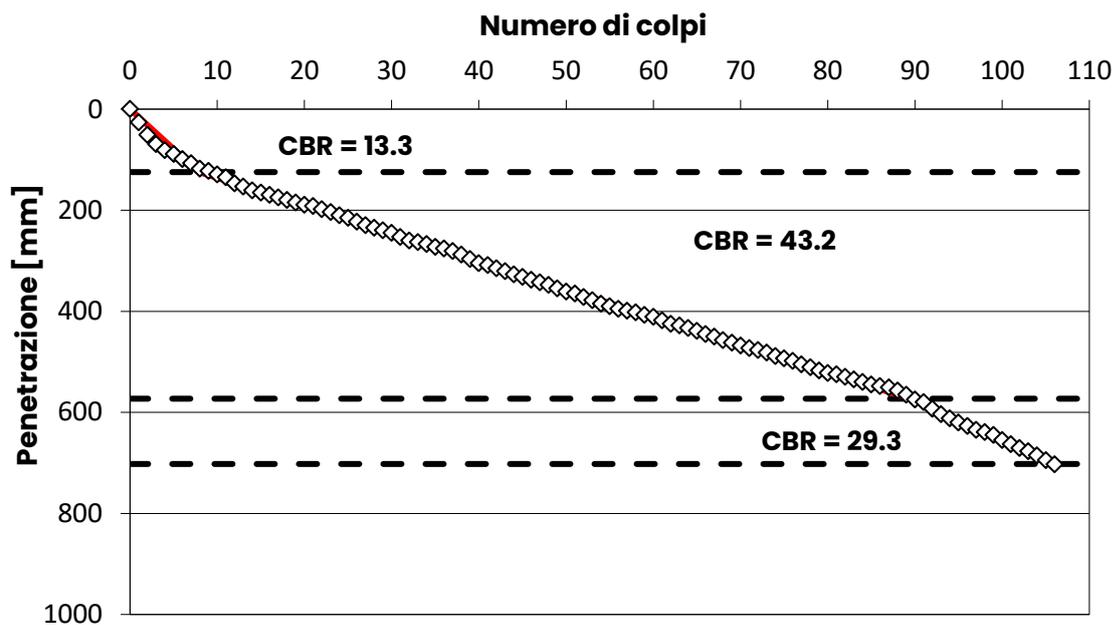


Figura 21 - Valori di CBR in funzione dei risultati della prova DPC nel punto di indagine F029

Nel caso del punto di indagine F029 si osserva la seguente suddivisione in strati:

- Strato corticale di 12 cm con CBR 13,3 %
- Strato sub-corticale 1 di 45 cm con CBR 43,2 %
- Strato sub-corticale 2 di 13 cm con CBR 29,3 %

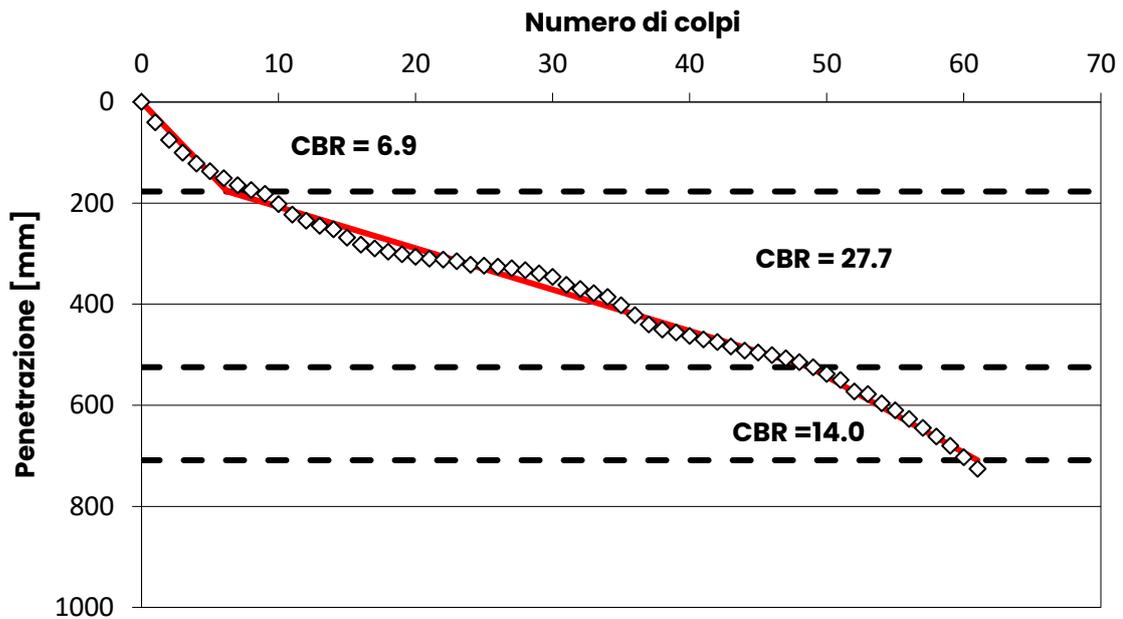


Figura 22 - Valori di CBR in funzione dei risultati della prova DPC nel punto di indagine E07

Nel caso del punto di indagine E07 si osserva la seguente suddivisione in strati:

- Strato corticale di 18 cm con CBR 6,9 %
- Strato sub-corticale 1 di 35 cm con CBR 27,7 %
- Strato sub-corticale 2 di 18 cm con CBR 14 %

Come si può osservare in entrambi i casi l'indagine evidenzia un primo strato corticale dello spessore di circa 15 cm che presenta un indice CBR molto basso rispetto al valore che si osserva nello strato sub-corticale sottostante, che si estende per circa 40 cm secondo l'andamento del tratto lineare con cui sono stati approssimati i dati. L'indice CBR decrementa nuovamente nello strato sub-corticale 2, che presumibilmente si estenderà ad una profondità superiore rispetto a quella di indagine.

Per poter estrapolare indici CBR unici per l'area specifica di analisi si è scelto di procedere con un primo confronto rappresentando in un unico diagramma Numero di colpi – Penetrazione, i risultati delle prove DCP di tutti i punti di indagine presenti all'interno dell'area di analisi.

Per l'Aeroporto 1 sono stati confrontati i risultati di 6 prove, eseguite nei seguenti punti: D029, F029, E028, G028, D027, F027.

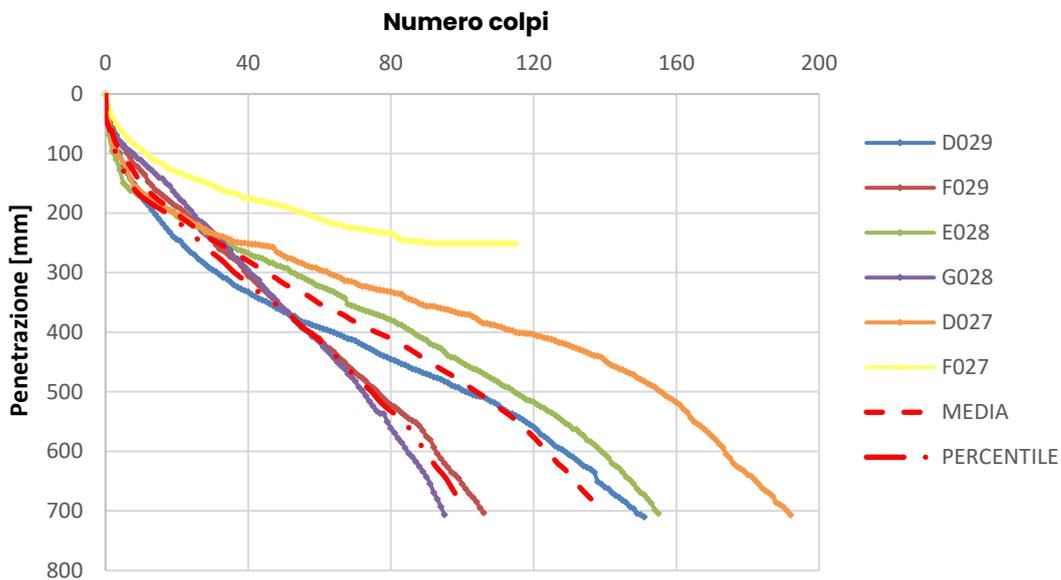


Figura 23 – Confronto dei risultati DCP della zona di intorno del punto F029 Aeroporto 1

Da una prima analisi visiva si è deciso di escludere dal calcolo il risultato della prova DCP relativo al punto di indagine F029 poiché si discosta nettamente dall'andamento dei restanti risultati. Successivamente, i risultati sono stati discretizzati per valutare il numero di colpi in funzione di un intervallo di affondamento fisso di 10 cm. Ciò ha permesso di effettuare una media del numero di colpi per intervallo di penetrazione e una valutazione statistica, cautelativa, relativa all'85esimo percentile.

Dai risultati mediati si è proceduto alla valutazione dell'indice CBR attraverso la suddivisione in strati come effettuato in precedenza per il singolo punto di indagine.

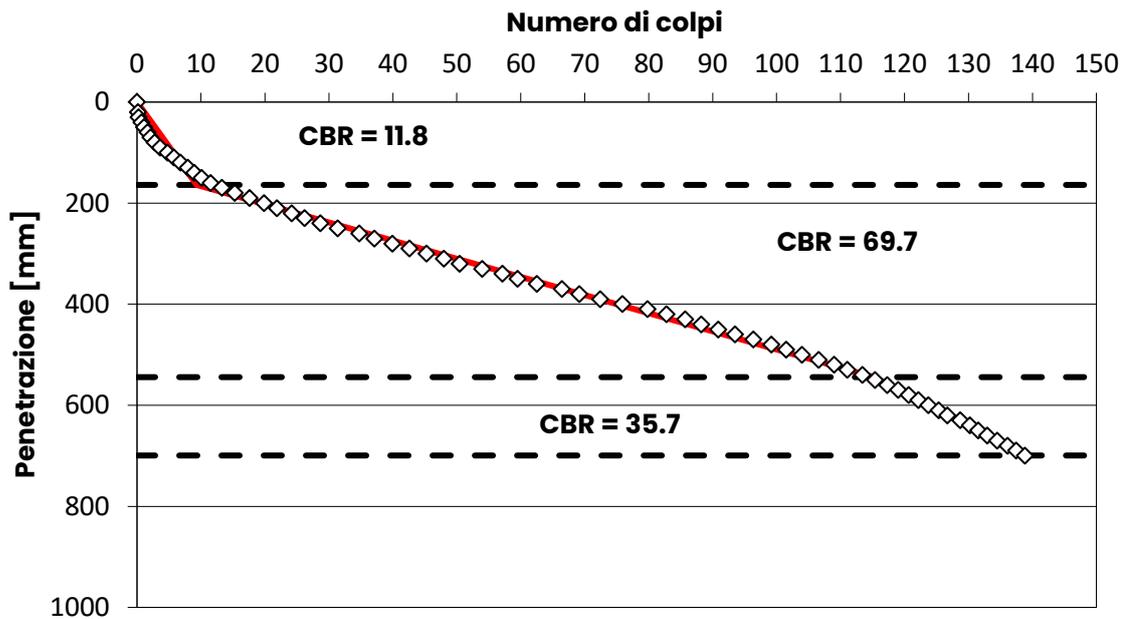


Figura 24 - CBR relativi all'aerea d'intorno del punto F029 Aeroporto 1

Si evidenzia una sostanziale differenza del valore dell'indice CBR dello strato sub-corticale 1 rispetto al singolo punto F029:

- Strato corticale di 16 cm con CBR 11,8 %
- Strato sub-corticale 1 di 35 cm con CBR 69,7 %
- Strato sub-corticale 2 di 18 cm con CBR 35,7 %

Lo stesso procedimento è stato eseguito per l'area relativa all'intorno del punto E07 dell'Aeroporto 2, considerando i punti di indagine: E06, E09, F08, G08, E07, D08, C08.

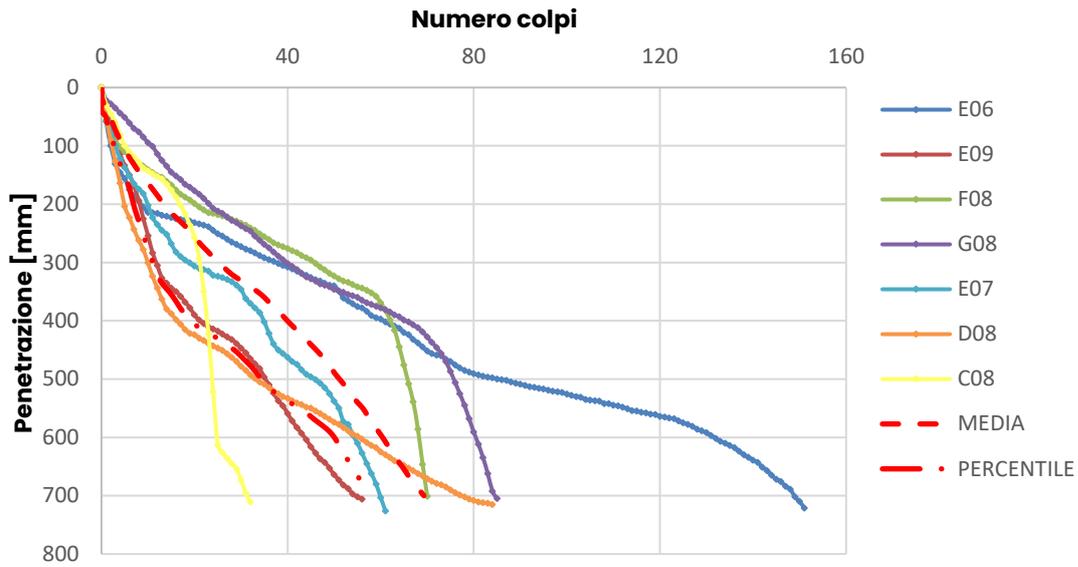


Figura 25 - Confronto dei risultati DCP della zona di intorno del punto E07 Aeroporto 2

A seguito di una prima valutazione si è deciso di escludere dai calcoli successivi i risultati relativi ai punti E06 e C08. In maniera analoga al caso dell'area F029 sono stati calcolati gli indici CBR.

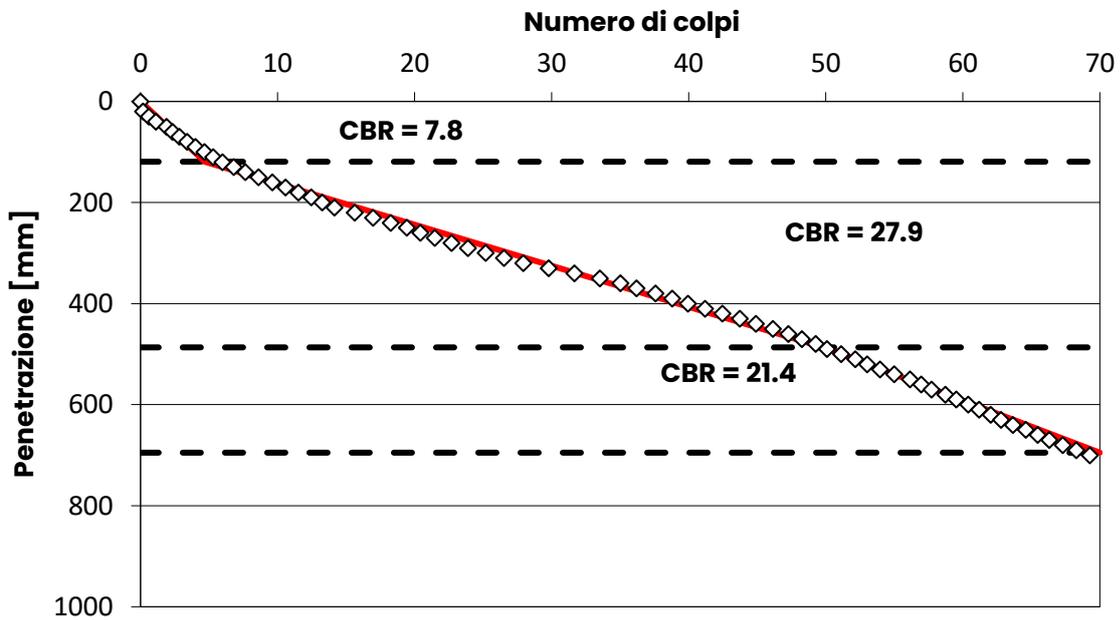


Figura 26 - CBR relativi all'area d'intorno del punto E07 Aeroporto 2

Nel presente caso non si osservano sostanziali differenze rispetto al singolo punto di indagine E07:

- Strato corticale di 12 cm con CBR 7,8 %
- Strato sub-corticale 1 di 37 cm con CBR 27,9 %
- Strato sub-corticale 2 di 21 cm con CBR 21,4 %

Dai risultati ottenuti, si può osservare una prima sostanziale differenza tra i due terreni: dal valore degli indici CBR si deduce che il terreno del punto di indagine F029 presenta una capacità portante superiore rispetto al terreno del E07. Nel primo caso, infatti, si osserva un indice CBR del 69,7 % nel primo strato sub-corticale, più del doppio dell'indice CBR registrato nel medesimo strato del punto E07 pari a 27,9%. Da precisare che gli strati sono confrontabili poiché vengono individuati a profondità molto simili.

Si noti che i valori dell'indice CBR valutati in situ risultano spesso molto differenti, all'incirca il doppio, di quelli calcolati in laboratorio alle medesime condizioni di densità ed umidità, ma la prova DCP è fondamentale per poter valutare le caratteristiche geomeccaniche della zona oggetto di studio.

#### **4.2.2 Prove per la determinazione della densità in situ**

Per la determinazione della densità in situ viene utilizzato, secondo normativa [10], lo strumento denominato volumometro a sabbia. Lo strumento viene utilizzato sul terreno ad una profondità di 15 cm dal piano campagna, a seguito dell'asportazione dello strato di colture vegetale. Viene quindi realizzato un foro con diametro e altezza pari a 150 mm, riempito successivamente di sabbia calibrata (passante al setaccio con maglia 2 mm e trattenuta a quello da 0,4 mm). Con il materiale prelevato possono essere quindi determinati il peso umido ( $P_{t,u}$ ), il peso secco ( $P_{t,s}$ ) e la percentuale di umidità ( $w_t$ ). Conoscendo il peso della sabbia ( $P_s$ ) introdotta nel foro e il suo volume ( $V_s$ ) si può quindi determinare la densità secca del terreno in situ:

$$\gamma_{s,situ} = \frac{P_{t,s}}{V_s} \quad (2)$$

Tale valore viene poi corretto in funzione della percentuale di materiale passante al crivello da 25 mm. Questa procedura viene effettuata per poter comparare la densità secca ottenuta in situ con quella ricavata in laboratorio attraverso le prove di compattazione Proctor, in cui viene esclusa la frazione di terreno trattenuta al crivello con apertura 25 mm. L'espressione della densità in situ corretta risulta quindi essere:

$$\gamma_{s,situ,corr} = \frac{P_{t,s} - P_{25}}{V_s - V_{25}} \quad (3)$$

Con  $P_{25}$  peso del materiale prelevato avente dimensioni maggiori di 25 mm e  $V_{25}$  il volume da esso occupato.

L'indagine eseguita nel punto di prelievo F029 porta ai seguenti risultati:

<b>w</b>	[%]	1,1
<b><math>\gamma_{s, situ}</math></b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,16
<b>Trattenuto 25mm</b>	[%]	21,3
<b><math>\gamma_{s,25 mm}</math></b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,65
<b><math>\gamma_{s, situ, corr}</math></b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,06

Tabella 3 - Contenuto d'acqua e densità in situ del terreno F029 a 15 cm dal piano campagna

Nel punto di indagine E07 dell'Aeroporto 2 si evidenziano i seguenti risultati:

<b>w</b>	[%]	8,5
<b><math>\gamma_{s, situ}</math></b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,87
<b>Trattenuto 25mm</b>	[%]	30,5
<b><math>\gamma_{s,25 mm}</math></b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,67
<b><math>\gamma_{s, situ, corr}</math></b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,65

Tabella 4 - Contenuto d'acqua e densità in situ del terreno E07 a 15 cm dal piano campagna

I due terreni presentano, oltre ad un contenuto d'acqua notevolmente diverso, influenzato anche dal periodo in cui la prova è stata effettuata, una densità differente. Il terreno relativo al punto F029, con capacità portanti, come visto, superiori, presenta anche una densità maggiore, rispetto al terreno del punto E07.

### **4.2.3 Prelievo di campionature di terreno per prove di laboratorio**

Il prelievo di campionature di terreno viene effettuato per poter trasferire il materiale in laboratorio ed ivi effettuare successive prove di classificazione e valutazione dell'indice CBR di laboratorio. Sono pertanto necessarie quantità di materiale nell'ordine dei 300 kg per ogni punto di prelievo. Questo viene eseguito su terreni ad una profondità di 15 cm dal piano campagna, provvedendo ad uno scotico preliminare e disponendo il materiale in appositi sacchi di plastica poi sigillati in modo da preservare l'umidità.

## **4.3 Prove di laboratorio**

Le prove di laboratorio sono state effettuate sui terreni pervenuti a seguito dei prelievi effettuati nei punti di indagine F029 dell'Aeroporto 1 e E07 dell'Aeroporto 2.



*Figura 27 - Materiale prelevato a 15 cm dal p.c. in F029*

### 4.3.1 Classificazione del terreno

La classificazione del terreno è avvenuta facendo riferimento al sistema di classificazione del Highway Research Board (HBR) recepito dalla Norma UNI 11531-1:2014. Per procedere alla determinazione dei parametri richiesti dalla Normativa [10] necessari per la classificazione del terreno, si è proceduto in diversi step:

1. Quartatura: il materiale è stato quartato manualmente in modo da prelevare un campione rappresentativo di circa 15 kg da utilizzare per la granulometria.

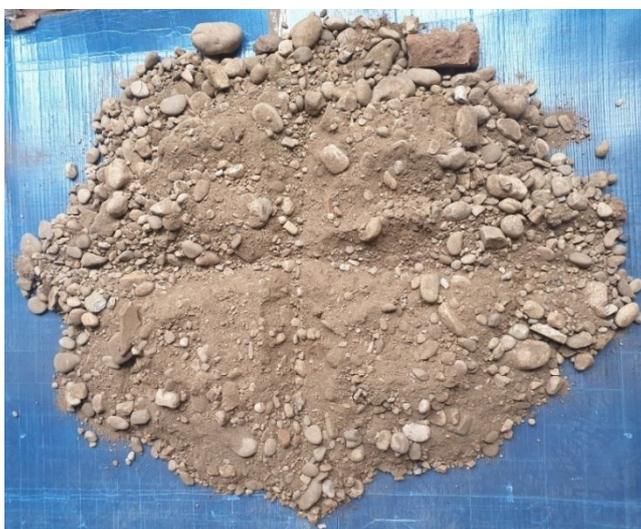


Figura 28 - Quartatura

2. Granulometria: è stata eseguita facendo riferimento alla Norma EN 993-1:2012 che prevede un lavaggio preliminare del materiale per rimuovere la frazione passante al setaccio 0,063 mm e successivo essiccamento in forno a 105° per un tempo sufficiente ad eliminare completamente ogni residuo di umidità presente. Sono stati quindi selezionati i setacci necessari, con aperture di dimensioni, in millimetri, di: 45; 31,5; 20; 14; 10; 6,3; 4; 2; 1; 0,4; 0,125; 0,063<sup>6</sup>. Questi sono stati successivamente disposti in colonna [12] in ordine decrescente rispetto alla grandezza dei

---

<sup>6</sup> Solo per il terreno prelevato nel punto E07 è stato inserito anche il setaccio 22,4 mm per effettuare un'analisi più approfondita

fori. Il materiale lavato ed essiccato è stato disposto all'interno della colonna a partire dal setaccio più in alto. Per effettuare la setacciatura è stato quindi utilizzato un vibrosetacciatore per 10 minuti circa. Si è proceduto, infine, a pesare il quantitativo di materiale trattenuto da ogni setaccio per il calcolo successivo della percentuale passante di differenti diametri, in modo da poter costruire le curve di distribuzione granulometrica riportate di seguito:

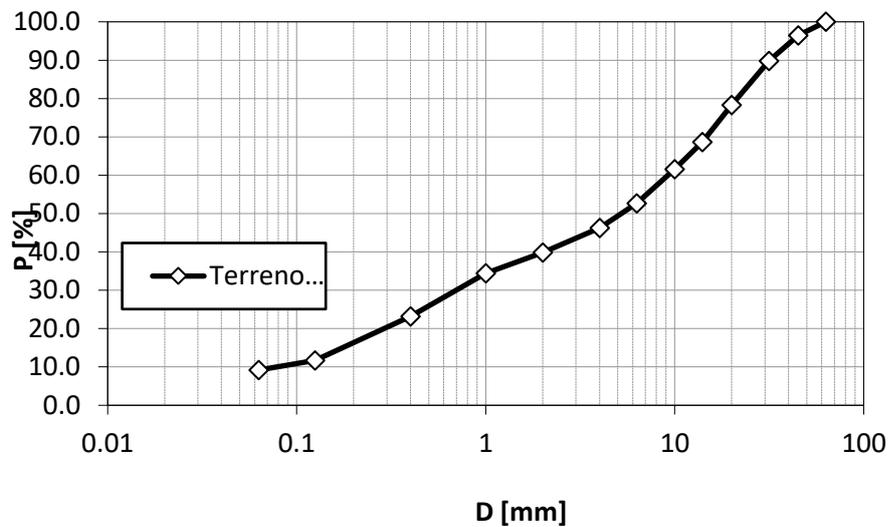


Figura 29 - Curva granulometrica F029

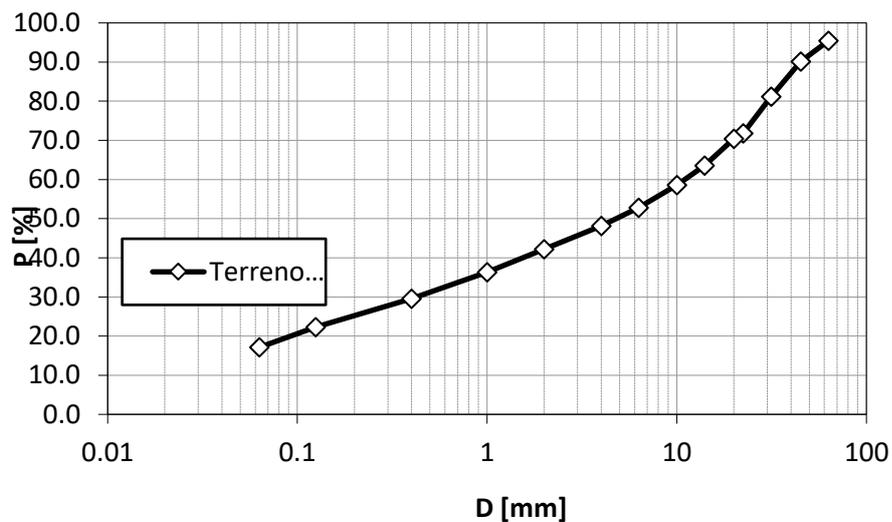


Figura 30 - Curva granulometrica E07

I valori specifici riferiti alla distribuzione granulometrica vengono riportati nell'Annesso A.

3. Limiti di Atterberg: sono stati utilizzati per valutare la suscettività all'acqua dei terreni. Come previsto da Normativa [13] vengono determinati: il limite liquido (LL), rappresentante il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale si ha il passaggio dallo stato liquido allo stato plastico e il limite plastico (LP), rappresentate il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale si ha il passaggio dallo stato plastico allo stato solido. Per l'esecuzione delle prove è stata utilizzata una quota parte di materiale essiccato passante al setaccio con diametro 0,4 mm. Il limite liquido è stato valutato attraverso lo strumento del penetrometro a cono: un cono di acciaio di dimensioni standard (60 g con apertura di 60°) viene fatto penetrare per un tempo di 5 secondi all'interno di un campione di terreno miscelato con acqua posto all'interno di un contenitore di dimensioni normalizzate. Il limite equivale al contenuto d'acqua in corrispondenza del quale si osserva una penetrazione di 20 mm. La prova viene ripetuta su 4 campioni aventi diverse quantità di acqua in corrispondenza delle quali si ha un affondamento compreso tra 5 mm e 15 mm. Affinché il valore di affondamento registrato sia affidabile e consistente la prova viene ripetuta due volte sullo stesso provino: non dovrà variare più di 0,4 mm tra le due ripetizioni.



*Figura 31 - Penetrometro utilizzato per determinare il limite liquido*

Al termine di ogni prova una piccola quantità di materiale, 15 g circa, è stata disposta in appositi contenitori per l'essiccamento, in modo da misurare l'effettivo quantitativo d'acqua. I risultati ottenuti sono stati poi rielaborati calcolando, attraverso la costruzione della retta di previsione, il quantitativo d'acqua rispetto al quale si ha un affondamento di 20 mm. Il limite liquido per il terreno F029 risulta essere pari a 29,1; per il terreno E07 risulta pari a 37 (vedere Annesso A).

Il limite plastico è stato valutato misurando il contenuto d'acqua minimo in corrispondenza del quale il terreno può essere modellato in bastoncini di diametro pari a 3 mm senza fessurarsi. Come prescritto da Normativa [13], un campione di 20 g di materiale è stato mescolato con acqua e impastato dandogli una forma sferoidale. La sfera è stata poi rimaneggiata fino alla comparsa di una fessura, divisa in due parti uguali successivamente ridivise in 3. Con le 6 porzioni di materiale sono stati creati dei bastoncini di diametro di 3 mm. Si osserva che i terreni non presentavano un livello di plasticità tale da poter

essere lavorati facilmente. Il limite plastico si è ottenuto in corrispondenza di un contenuto d'acqua medio del 23% nel caso del terreno F029 e 24,9% nel caso del terreno E07.



*Figura 32 - Prova per la determinazione del limite plastico terreno F029*

I risultati ottenuti in questa fase di sperimentazione sono riportati nell'Annesso A. Come previsto da normativa [10], per effettuare la classificazione del terreno si è tenuto conto di:

- percentuale passante al setaccio 0,063 mm, nel caso in esame pari al 9,2% per il terreno F029 e 17,1% per il terreno E07;
- percentuale passante al setaccio 2 mm e 0,4 mm, rispettivamente pari al 39,9 % e 23,2 % per il terreno F029, 42,2% e 29,6% per il terreno E07;
- limite liquido e indice di plasticità, risultanti rispettivamente pari a 29,1 e 6,1 per il terreno F029, 37 e 12,1 per il terreno E07;
- indice di gruppo, in entrambi i casi pari a 0.

Il terreno prelevato nel punto di indagine F029 ricade quindi, secondo il sistema di classificazione sopra citato, nel gruppo  $A_{2-4}$ , mentre il terreno prelevato nel punto di indagine E07 risulta classificato in  $A_{2-6}$ . A tali gruppi appartengono le ghiaie e le sabbie limose o argillose a basso indice liquido e ridotto indice di plasticità. I due terreni, pur essendo simili, presentano differenze sostanziali in merito alla suscettività all'acqua, come evidenziato dall'indice di plasticità superiore del terreno E07, a causa probabilmente della diversa percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm.

### 4.3.2 Prove per la determinazione della curva di compattazione Proctor

I terreni oggetto di studio sono stati utilizzati per la costruzione delle curve di compattazione Proctor, determinate rispetto al contenuto d'acqua (%w) e alla densità secca ( $\gamma_s$ ) dei materiali. La curva viene costruita eseguendo la prova di compattazione Proctor, facendo riferimento alla norma UNI EN 13286-2 con protocollo AASHTO "Modificato". Tale procedura prevede un'energia di compattazione superiore rispetto alla prova con protocollo "Standard". Come previsto da Normativa [14] è stata utilizzata la quota parte di materiale essiccato, passante al setaccio con diametro 31,5 mm e suddiviso in 5 campioni da 6 kg ognuno. Per ogni campione è stata aggiunto un quantitativo d'acqua crescente per poter condurre l'indagine in maniera esaustiva e costruire la curva a campana. Sono stati previsti i seguenti contenuti d'acqua definiti "nominali": 4%, 6%, 8%, 10%, 12%<sup>7</sup>. La prova è stata eseguita riponendo il materiale in 5 strati omogenei all'interno di una fustella con diametro di 150 mm e altezza di 200 mm. Ogni strato è stato sottoposto successivamente a 56 colpi di maglio dal peso di 4,5 kg, lasciato cadere da un'altezza di 457 mm. Al termine della prova è stato rimosso il materiale in eccesso dal provino, in modo da ottenere una superficie quanto più liscia ed omogenea rispetto all'altezza della fustella ed è stato pesato. Per la determinazione della densità secca si è fatto riferimento alla seguente formula prevista dalla Normativa [14]:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_u}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} \quad (4)$$

In cui  $\gamma_u$  è la densità umida, data dal rapporto tra il peso umido del materiale (ovvero il peso misurato al termine della compattazione) e il volume noto della fustella (2120,58 cm<sup>3</sup>). Il termine  $w$  indica il quantitativo d'acqua effettivo espresso in termini percentuali.

---

<sup>7</sup> Per il materiale prelevato dal punto E07 è stata utilizzata la quota parte passante al setaccio da 22,4 mm e contenuti d'acqua nominali del 6%, 8%, 10%, 12%, 14%

Quest'ultimo viene determinato al termine della prova prelevando un campione di materiale dal cuore della fustella e facendolo essiccare in forno a 105° per un tempo sufficiente ad eliminare ogni residuo di umidità presente.



*Figura 33 - Macchina utilizzata per la prova Proctor*

Al termine delle 5 prove è stato possibile rielaborare i dati in un foglio di calcolo.

Nel caso del terreno prelevato dal punto F029, come mostrato nel grafico sottostante, la curva di compattazione mostra un picco in corrispondenza del contenuto d'acqua pari a 7,81 % (vedi Annesso B per dettagli) con densità secca massima, ad esso relativa, pari a 2,150 g/cm<sup>3</sup>. Si osservi che il contenuto d'acqua nominale ipotizzato in fase di preparazione del provino risulta spesso differente da quello effettivamente calcolato al termine della prova. Questo è causato principalmente dal processo di evaporazione che avviene durante il tempo della prova e dalla suscettività del dato terreno all'acqua.

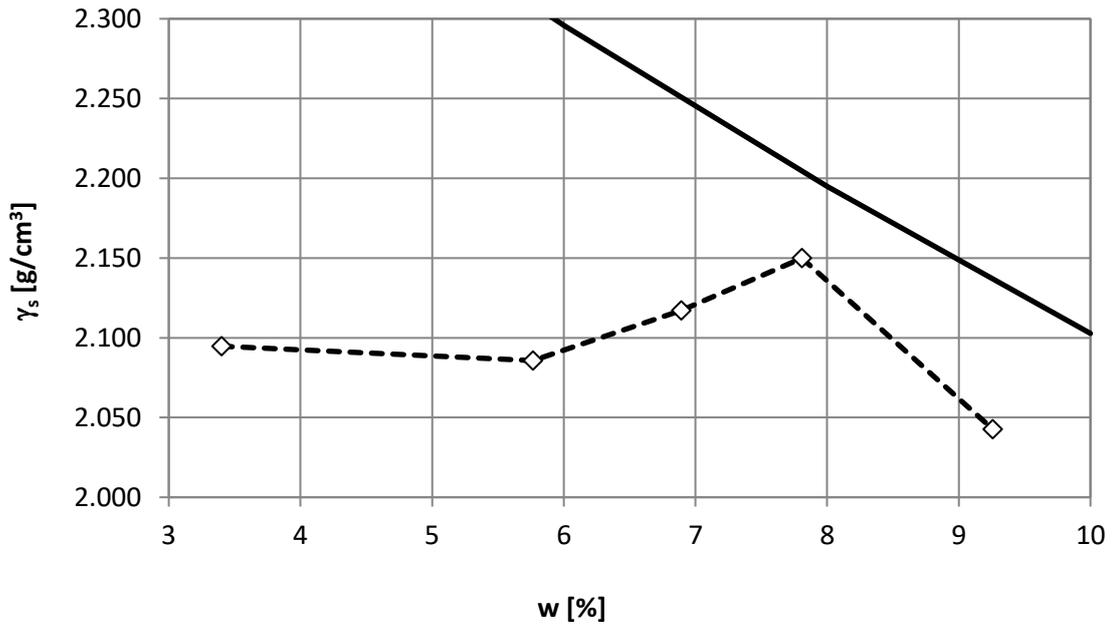


Figura 34 - Curva di compattazione Proctor F029

Per il terreno prelevato dal punto E07 dell'Aeroporto 2 si osserva una densità massima pari a 1,935 g/cm<sup>3</sup> in corrispondenza di un contenuto d'acqua del 10,89 % (vedere Annesso B per specifiche).

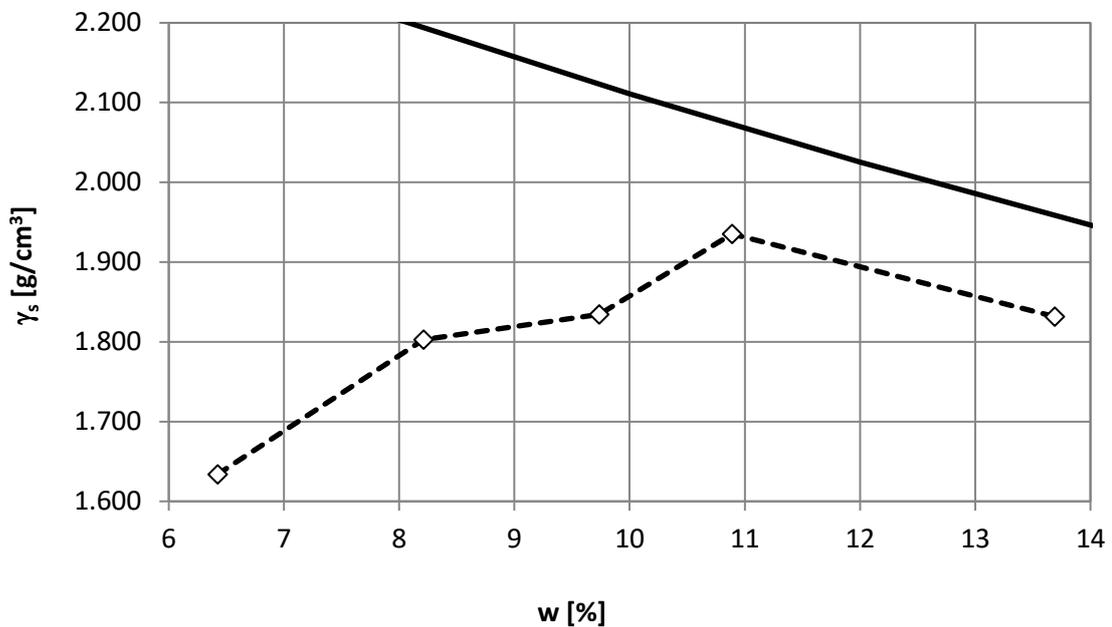


Figura 35 - Curva di compattazione Proctor E07

Nei grafici soprastanti vengono rappresentate anche le curve di saturazione (linea piena) ricavate sulla base della massa volumica

dei granuli ottenuta attraverso le specifiche prove [15]. Per entrambi i terreni sono state eseguite a tale scopo due differenti prove, una per il materiale trattenuto ed una per il materiale passante al setaccio 31,5 mm<sup>8</sup>.

Nel primo caso è stato prelevato un campione di materiale passante al setaccio da 63 mm e trattenuto da quello da 31,5 mm. Il campione è stato lavato per rimuovere le particelle più fini, lasciato asciugare e pesato. Il campione è stato poi immerso in un cestello in acqua ad per circa 30 minuti e infine pesato nuovamente. Una volta estratti i grani dall'acqua, sono stati asciugati delicatamente con un panno e pesati per l'ultima volta. La massa volumica viene calcolata in questo caso con la seguente equazione:

$$\rho_{SSD} = \frac{M_{aria}}{M_{SSD} - M_{acqua}} \cdot \rho_w \quad (5)$$

In cui  $M_{aria}$  è il peso del campione prima dell'immersione,  $M_{acqua}$  è il peso in acqua,  $M_{SSD}$  è il peso della massa a superficie secca, ovvero al termine della prova.  $\rho_w$  è la densità dell'acqua dipendente dalla temperatura registrata al momento della prova. Di seguito si riporta la tabella con i risultati della prova appena descritta.

<b>M<sub>aria</sub></b>	<b>M<sub>acqua</sub></b>	<b>M<sub>SSD</sub></b>	<b>T</b>	<b>ρ<sub>w</sub></b>	<b>ρ<sub>SSD</sub></b>
<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
1469.1	917.6	1473.3	23.3	997.5	2637

Tabella 5 - Risultati prova per la determinazione della massa volumica per materiale trattenuto al 31,5 mm del terreno F029

<b>M<sub>aria</sub></b>	<b>M<sub>acqua</sub></b>	<b>M<sub>SSD</sub></b>	<b>T</b>	<b>ρ<sub>w</sub></b>	<b>ρ<sub>SSD</sub></b>
<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
1272.0	812.3	1276.3	15.8	999.0	2739

Tabella 6 - Risultati prova per la determinazione della massa volumica per materiale trattenuto al 22,4 mm del terreno E07

<sup>8</sup> Nel caso del terreno prelevato dal punto di indagine E07 tali prove sono eseguite in riferimento al setaccio da 22.4 mm e non da 31,5 per coerenza con la prova Proctor

La seconda prova è stata effettuata su un campione di terreno passante al setaccio da 31,5 mm utilizzando il Metodo del Picnometro. Una volta selezionato il materiale e fatto essiccare, è stato posto all'interno del picnometro e pesato. Successivamente il picnometro è stato riempito con acqua distillata fino a 30 mm sotto la sezione del collo e lasciato riposare, in modo che tutto il materiale disperso in acqua si depositasse. Successivamente il picnometro è stato collegato alla pompa per vuoto per rimuovere tutta l'aria all'interno. Il provino viene lasciato in posa per circa 30 minuti in modo che tutta l'aria presente al suo interno possa essere rimossa.



*Figura 36 - Metodo del Picnometro per la determinazione della massa volumica del materiale passante al 31,5 mm*

Una volta rimossa l'aria, il picnometro viene interamente riempito d'acqua distillata e pesato. Il calcolo della massa volumica è stato effettuato con la seguente equazione:

$$\rho_{mw} = \frac{M_{P+M} - M_P}{\left(100 \cdot V_P - \frac{M_{P+M+H_2O} - M_{P+M}}{\rho_w}\right)} \quad (6)$$

Dove  $M_{P+M}$  è il peso del campione comprensivo del picnometro,  $M_P$  è il peso del picnometro,  $M_{P+M+H_2O}$  è il peso del picnometro con il

materiale e riempito d'acqua,  $V_p$  è il volume del picnometro e  $\rho_w$  la densità dell'acqua.

Come si vede dall'immagine soprastante la prova è stata effettuata su due campioni di materiale, quattro nel caso del terreno E07. Di seguito si riportano i risultati relativi alle prove. Questi sono stati poi mediati per ottenere un valore unico finale.

<b>M<sub>P</sub></b>	<b>M<sub>P+M</sub></b>	<b>M<sub>P+M+H2O</sub></b>	<b>V<sub>P</sub></b>	<b>T</b>	<b>ρ<sub>w</sub></b>	<b>ρ<sub>mw</sub></b>
<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
938.6	2001.5	2957.6	0.001358	21.7	997.9	2658
924.5	1723.2	2765.6	0.001344	21.6	997.9	2667
<b>Media</b>						<b>2663</b>

Tabella 7 - Risultati della prova con picnometro per la determinazione della massa volumica del materiale F029

<b>M<sub>P</sub></b>	<b>M<sub>P+M</sub></b>	<b>M<sub>P+M+H2O</sub></b>	<b>V<sub>P</sub></b>	<b>T</b>	<b>ρ<sub>w</sub></b>	<b>ρ<sub>mw</sub></b>
<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
938.5	1690.8	2769.3	0.001358	17.3	998.8	2704
924.4	1793.9	2812.5	0.001344	17.4	998.8	2682
936.1	1794.6	2831.4	0.001358	18	998.7	2684
924	1960	2909.1	0.001344	18.1	998.6	2632
<b>Media</b>						<b>2676</b>

Tabella 8 - Risultati della prova con picnometro per la determinazione della massa volumica del materiale E07

La curva di saturazione è stata costruita considerando un contenuto d'acqua variabile, su un campione di 100 g e massa volumica calcolata. Viene quindi calcolato il volume totale come:

$$V = w + \frac{100}{\rho_{mw}/1000} \quad (7)$$

In cui  $w$  è il contenuto d'acqua che viene fatto variare e  $\rho_{mw}$  è la massa volumica sopra calcolata. La densità viene determinata dal rapporto tra la massa totale (100 g) e il volume calcolato.

### **4.3.3 Prove per la determinazione dell'indice CBR immediato e dell'indice CBR dopo immersione in acqua**

A seguito della preparazione del provino mediante compattazione Proctor, è stato determinato l'indice CBR<sup>9</sup> ("California Bearing Ratio") [15]. Tale valutazione è stata effettuata sia immediatamente dopo la preparazione dei 5 campioni, sia successivamente all'immersione in acqua per 96 ore di 5 campioni analoghi, per favorire le condizioni sature. In quest'ultimo caso è stato valutato anche l'eventuale rigonfiamento del terreno durante l'immersione, con l'ausilio di comparatori di spostamento. La prova è stata eseguita facendo penetrare a velocità costante di 1,27 mm/min, un cilindro con diametro di 5 cm. Durante il test è stata misurata la pressione necessaria per far penetrare il pistone di 2,5 mm e 5 mm. Le pressioni registrate sono state poi rapportate in termini percentuali a quelle necessarie per ottenere penetrazioni analoghe in un terreno di riferimento. Tra i due valori di CBR calcolati è stato scelto, come previsto da Normativa [15], il valore massimo.



*Figura 37 - Prova per la determinazione dell'indice CBR*

---

<sup>9</sup> Per tale prova, nel presente elaborato si fa riferimento al solo terreno F029

I risultati grezzi della prova sono stati rielaborati in un apposito foglio di calcolo. Dalla presente prova, infatti, si ricava nella finestra temporale di analisi, la variazione dell'affondamento al variare della pressione applicata. È possibile quindi, rappresentare i dati ricavati attraverso una curva in un piano Penetrazione (mm) – Carico (kN). Nel grafico sottostante di esempio, in nero vengono rappresentate le successive misurazioni, ed in rosso la curva che meglio ne approssima l'andamento. Quest'ultima viene utilizzata per poter individuare l'ascissa del flesso, che permette di correggere i valori di penetrazione rappresentativi di 2,5 mm e 5 mm e poter effettuare una stima dell'indice CBR più precisa. Come previsto da Normativa infatti [15], se la parte iniziale della curva risulta concava verso l'alto, a causa di probabili irregolarità di superficie, bisogna individuare il punto di flesso della suddetta curva ed individuare la nuova origine degli assi nel punto di intersezione tra la tangente alla curva nel punto di flesso e l'asse di penetrazione. I valori di penetrazione vengono quindi corretti in funzione della posizione della nuova origine.

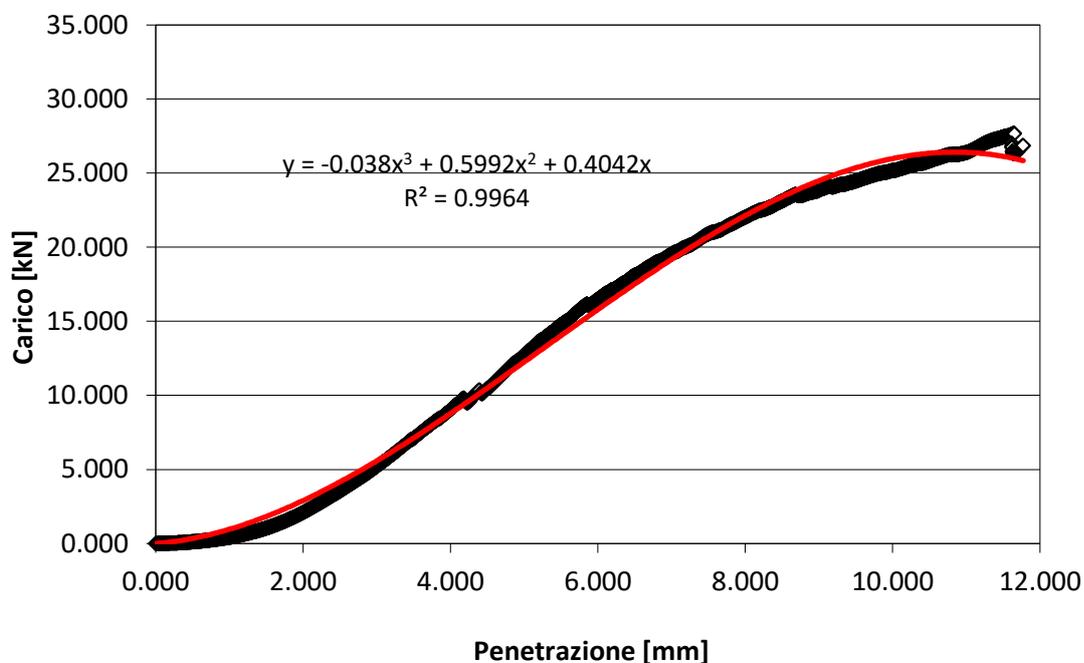


Figura 38 - Curva Penetrazione - Carico per la determinazione dell'indice CBR del provino di F029 preparato con contenuto d'acqua del 6 %

I valori di CBR ricavati sono stati analizzati rispetto al quantitativo d'acqua corrispondente. Nel caso del terreno prelevato nel punto F029 si riscontrano i seguenti risultati:

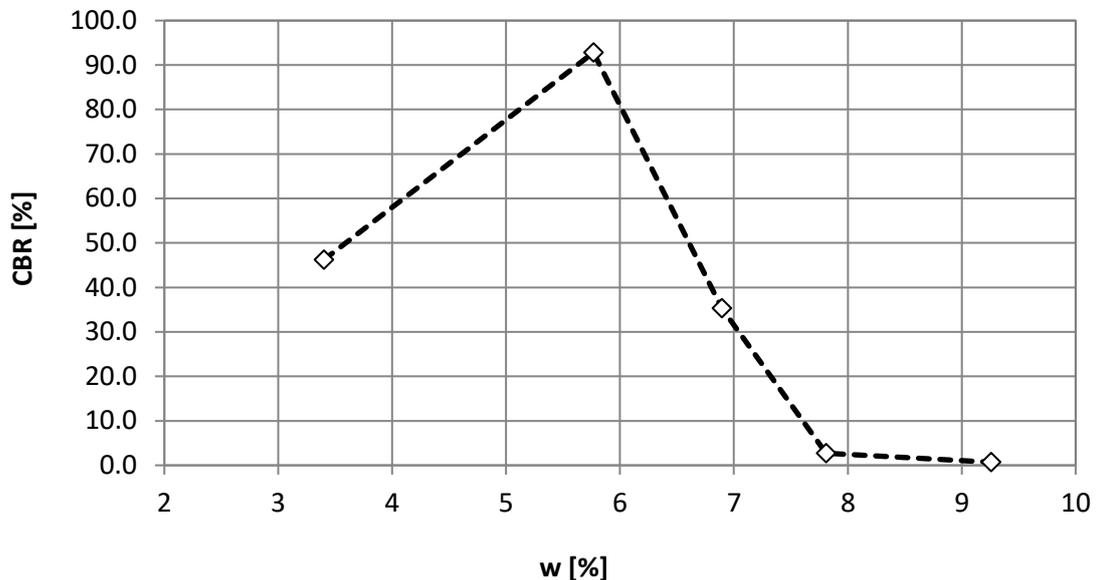


Figura 39 - Curva di andamento dell'indice CBR al variare del contenuto d'acqua per F029

La curva è riconducibile ad un andamento a campana, come quello della densità secca. Si osserva che il picco della curva, con CBR pari a 92,8 %, non si ha in corrispondenza dello stesso quantitativo d'acqua della massima densità secca. Esso è infatti spostato sul valore minore di 5,8 %. Il presente fenomeno di sfasamento è dovuto agli effetti determinati dalle sovrapposizioni interstiziali della fase fluida. Come si può osservare inoltre, la riduzione del CBR oltre il punto massimo è molto repentina: i valori decrescono fino a 2,7 % e 0,7 % per contenuti d'acqua rispettivamente del 7,81 % e 9,26 %.

I provini per la valutazione del CBR in condizioni sature sono stati preparati con le medesime 5 quantità d'acqua dei precedenti. In seguito alla compattazione le fustelle sono state immerse in una vasca piena d'acqua per 96 ore, è stato utilizzato un piatto forato alla base per poter far filtrare l'acqua e posto, come previsto da Normativa [15], un peso di 2 kg sulla sommità. Si è avuto cura di tarare il

comparatore per la misurazione di un eventuale rigonfiamento prima dell'immersione e porlo sui campioni per tutto il tempo della prova.



*Figura 40 - Preparazione e immersione provini*

Al termine delle 96 ore è stato registrato l'eventuale rigonfiamento, che in questo caso, per tutti i 5 provini è risultato nullo. Come per il caso immediato, dopo le 96 ore i provini sono stati sottoposti alla prova per la valutazione del CBR. Anche in questo caso i dati sono stati rielaborati in appositi fogli di calcolo e valutati i valori massimi di CBR per ogni provino. Una volta terminata la prova è stato prelevato un campione di materiale dal cuore della fustella e fatto essiccare in forno a 105° per un tempo sufficiente ad eliminare ogni residuo di umidità presente. Ciò ha permesso di valutare il contenuto d'acqua presente nei provini dopo le ore in immersione e valutare, conoscendo il contenuto d'acqua nominale utilizzato in fase di compattazione, la quantità d'acqua assorbita durante le 96 ore.

Dai risultati ottenuti, riportati nella seguente tabella (Tab. 9) si può osservare che nel caso di campioni compattati con quantitativi d'acqua nominale minori dell'ottimo, la percentuale d'acqua assorbita

è più elevata e decresce all'aumentare del quantitativo d'acqua nominale utilizzato per la preparazione dei provini. Nel caso del contenuto d'acqua nominale di partenza del 4% si ha un assorbimento del 4,11%, mentre per i provini compattati con il 12 % d'acqua, si osserva un assorbimento minore dell'1 %<sup>10</sup>.

ID	$W_{nom}$	$W_{eff}$	$CBR_{imm}$	$CBR_{h96}$
	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>1</b>	4,00	8,11	46,2	46,9
<b>2</b>	6,00	10,84	92,8	25,2
<b>3</b>	8,00	9,93	35,3	22,0
<b>4</b>	10,00	12,35	2,7	26,3
<b>5</b>	12,0	12,74	0,7	3,3

Tabella 9 - Risultati ottenuti a seguito dell'immersione in acqua per 96 ore dei 5 provini con materiale F029

Per quanto riguarda i valori relativi all'indice CBR si osserva un marcato decremento rispetto al valore massimo di CBR che si aveva in corrispondenza di un contenuto nominale d'acqua del 6 %: si ha un valore di CBR immediato pari a 92,8 % e un CBR saturo pari a 25,2 %. Per i provini 1, 3 e 5 il valore di CBR in condizioni sature resta all'incirca uguale al CBR immediato, mentre nel caso del provino 4, con contenuto d'acqua nominale del 10 %, a differenza di quanto ci si aspetti, ciò non avviene. Tale fenomeno è causato presumibilmente dal fatto che, nonostante i contenuti d'acqua e di materiale secco iniziali siano gli stessi, i provini per la misurazione del CBR immediato e per quello ad immersione sono preparati separatamente, non è detto quindi che si riescano a ripetere le medesime condizioni di compattazione e contenuto d'acqua effettivo.

---

<sup>10</sup> Si consideri che il quantitativo d'acqua nominale non corrisponde sempre precisamente al contenuto effettivo che in questo caso non è stato possibile misurare



# Capitolo 5 - Modellazione

---

In letteratura esistono diversi modelli che studiano l'interazione tra ruota e terreno, molti dei quali si possono applicare al caso specifico di un aeromobile che esce fuori pista. Tra questi si possono annoverare nel settore del "*Terramechanics*"<sup>11</sup> il modello di Bekker [17] e il modello di Wong [18]. Il primo, basato principalmente su prove di carico su piastra, differenzia i casi di ruota rigida e deformabile, senza considerare il contributo dinamico che la velocità con cui l'aeromobile esce di pista apporta all'affondamento finale, portando ad una sottostima della distanza finale di arresto. Il secondo si basa sul metodo agli elementi finiti, ma pur avendo un'elevata affidabilità, presenta difficoltà di applicazione a causa del numero elevato di dati richiesti. Nel presente lavoro si è scelto di utilizzare un modello numerico semplificato che considera sia la tipologia di terreno che si sta studiando, sia il carico applicato, senza trascurare gli effetti dinamici causati dalla velocità con cui l'aeromobile opera: il modello di Richmond. Tale modello garantisce inoltre, rapidità di calcolo e affidabilità nei risultati.

## 5.1 Modello di Richmond

Il modello di Richmond [19] è un modello empirico pubblicato per la prima volta nel 1968, rielaborato negli anni successivi prima da Crenshaw [20] nel 1972 e in seguito da Coutermarsh [21] nel 2007. Il modello è stato elaborato principalmente per la valutazione degli

---

<sup>11</sup> Terramechanics è lo studio delle proprietà del suolo riguardo all'interazione dei veicoli a ruote su varie superfici

effetti causati da un aeromobile che esce fuori pista su un terreno con specifiche caratteristiche, mettendo in relazione il solco scavato nel terreno dallo pneumatico dell'aeromobile e la resistenza al rotolamento, con la velocità del velivolo. Ha trovato negli anni molti riscontri applicativi in diversi aeroporti italiani, come riportato negli studi condotti nell'aeroporto di Roma Urbe [22] pubblicati nel 2014 e nell'aeroporto di Bari [23] pubblicati nel 2021.

Il modello è stato elaborato al termine di uno studio condotto su tre diverse fasi [19]:

- Fase I: sviluppo di un modello matematico adatto per determinare i carichi applicati da un aeromobile che opera su terreni con scarse capacità portanti;
- Fase II: misurazione sul campo per ottenere, per diverse tipologie di terreno, informazioni riguardo la resistenza del suolo;
- Fase III: analisi del carico dinamico, sulla base dei risultati ottenuti dalle prime due fasi di sperimentazione.

## **5.2 Interazione pneumatico-terreno**

Richmond, e i successivi, presentano uno specifico modello di interazione tra pneumatico e terreno. Quando si parla di "interazione pneumatico-terreno" si fa riferimento al solco nel suolo su cui rotola una ruota e all'influenza di tali solchi sui carichi applicati alla ruota. I solchi e i carichi dipendono reciprocamente l'uno dall'altro. L'interazione si verifica quindi, tra il carico verticale e il solco, e tra il carico di trascinamento della ruota in frenata e il solco. In generale, la profondità del solco viene definita dalla distanza che intercorre tra la superficie del terreno indisturbato e il fondo del solco stesso, come mostrato in figura:

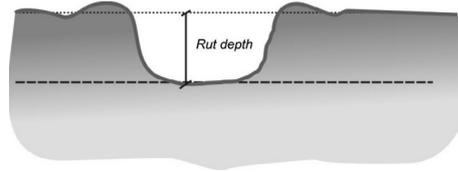


Figura 41 - Profondità del solco [22]

Lo schema presentato da Richmond, rappresentativo dell'interazione pneumatico-terreno, è costituito da 4 molle a cui non è associato alcuno smorzamento e in cui si considerano applicate puntualmente 4 differenti forze. Queste vengono disposte come rappresentato nella seguente immagine:

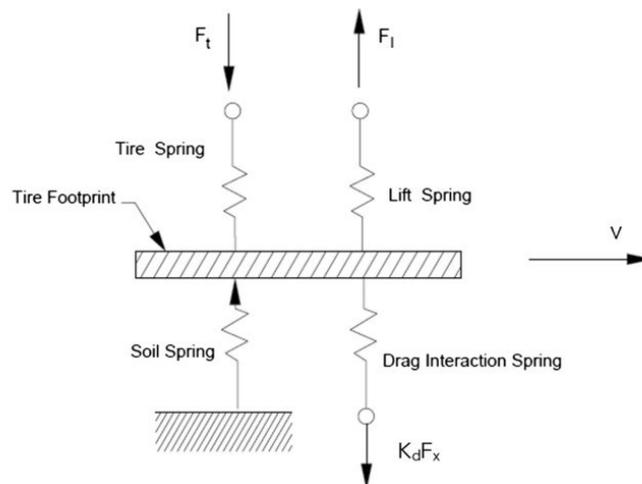


Figura 42 - Schema interazione pneumatico-terreno [20]

Dove,

- $F_t$  è la forza verticale applicata dallo pneumatico e corrisponde al carico effettivo applicato dall'aeromobile;
- $F_s$  ("Soil Spring") è la resistenza del suolo alla deformazione;
- $F_l$  è la molla di sollevamento relativa alla forza di inerzia del suolo, che aumenta proporzionalmente al quadrato della velocità di avanzamento della ruota [22];
- $F_x$  è la forza riferita al carico di trascinamento in fase di frenata.

Le 4 molle possono essere suddivise in due componenti che favoriscono l'affondamento,  $F_t$  e  $F_x$ , e due componenti opposte che lo

limitano,  $F_s$  e  $F_l$ . L'affondamento finale viene calcolato considerando questi 4 contributi, positivi e negativi, per due differenti tipologie di terreni:

- terreni coesivi
- terreni non coesivi

### 5.2.1 Equazione per terreni coesivi

Nel caso di terreni coesivi, la profondità totale del solco risultante viene calcolata come segue [20]:

$$Z_s = \Delta Z_{ssoilspring} + \Delta Z_{sdrag} - \Delta Z_{sliift} \quad (8)$$

$\Delta Z_{ssoilspring}$

È il contributo fondamentale dell'affondamento totale dello pneumatico e dipende prevalentemente dal carico verticale applicato, dalla geometria della ruota e dalla velocità dell'aeromobile.

$$\Delta Z_{ssoilspring} = \left( \frac{0,1208}{\Omega'_c - 0,9468} - 0,0095 \right) d \quad (9)$$

Dove:

- $d$  è il diametro dello pneumatico espresso in pollici;
- $\Omega'_c = \left( \frac{D}{1,6} \right) \Omega_c$  (10)

Termine con cui il "dynamic mobility number"  $\Omega_c$ , che verrà descritto nel paragrafo successivo 5.2.3, viene corretto con il fattore dinamico  $D$ , per tener conto degli aspetti dinamici dell'affondamento. Il fattore dinamico viene introdotto per attenuare l'affondamento del carico statico in base al tempo di caricamento. Dagli esperimenti condotti da Crenshaw [20] si osserva infatti, che all'aumentare della velocità di applicazione del carico, la deformazione del terreno diminuisce. Al contrario, quando lo pneumatico si ferma, indurrà una deformazione maggiore durante i primi secondi dopo l'arresto. Questo fenomeno è stato attribuito alla dipendenza dal tempo della

propagazione dell'attrito tra i granuli e delle deformazioni. Il fattore dinamico viene presentato con due diverse formulazioni a seconda della velocità dello pneumatico espressa in nodi:

$$\circ D = 1 + 1,34e^{-1,27t_p} \text{ per } V \geq 40 \text{ kn} \quad (11a)$$

$$\circ D = 1,58 - V0,0145 + 1,34e^{-1,27t_p} \text{ per } V < 40 \text{ kn} \quad (11b)$$

$t_p = \frac{L_t}{V}$  è il tempo di applicazione dell'impulso espresso in secondi. È inversamente proporzionale alla velocità dello pneumatico  $V$  (espressa in in/s) e direttamente proporzionale alla lunghezza dell'impronta  $L_t$  espressa in pollici e calcolata come segue:

$$L_t = 2(d(\delta_t + Z_s) - (\delta_t + Z_s)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Con  $\delta_t$  deflessione dello pneumatico (vedere paragrafo 5.2.3) e  $Z_s$  profondità del solco espresso in pollici. Quest'ultimo entra all'interno della formula come incognita e viene determinato per iterazione considerando tutte le equazioni in gioco. Si osservi che la lunghezza dell'impronta ha origine nel punto di contatto iniziale tra pneumatico e suolo e termina quando l'asse della ruota oltrepassa tale punto<sup>12</sup>.

#### $\Delta Z_{sdrag}$

Rappresenta la quota parte di affondamento dovuto al contributo del carico di trascinamento, questo dipende per ipotesi dal carico verticale e viene calcolata con la seguente equazione:

$$\Delta Z_{sdrag} = \frac{K_d F_x}{CI^{0,8}} \quad (13)$$

In cui  $K_d$  è una costante di interazione empirica relativa alla resistenza nella fase di frenata, è funzione della deflessione dello pneumatico ed è espressa in in/lb;  $CI$  è il Cone Index (vedere paragrafo 5.2.3);  $F_x$  è la

---

<sup>12</sup> Il carico applicato alla superficie del suolo è distribuito su di essa proporzionalmente alla pressione locale dell'impronta dello pneumatico. Questa viene assunta, per ruote deformabili, costante lungo lo spessore.

forza dovuta al carico di trascinamento espressa in lb e calcolata come segue:

$$F_x = \left( \mu_0 + \frac{Z_s}{L_t} \right) F_t + \frac{1}{2} \rho b Z_s C_D V^2 \quad (14)$$

$F_x$  è appunto funzione della forza verticale applicata dallo pneumatico. Dipende inoltre: dal coefficiente adimensionale  $\mu_0$  relativo alla resistenza al rotolamento; dalle grandezze  $Z_s$ ,  $L_t$  e  $V$  già esposte in precedenza; da  $\rho$  densità del terreno in  $\text{lbs}^2/\text{in}^2$ ; da  $C_D$  coefficiente adimensionale relativo alla resistenza al trascinamento, generalmente pari a 1,79, dipende dal rapporto tra la velocità al suolo e la velocità di planata.

$\Delta Z_{slift}$

È l'affondamento relativo alla forza di inerzia del terreno, compare nell'equazione (8) con segno negativo in quanto genera un contributo opposto, di "sollevamento", rispetto all'affondamento finale. Viene calcolato come segue:

$$\Delta Z_{slift} = \frac{K_l F_l}{C_l^{0,8}} \quad (15)$$

In cui  $K_l$  è una costante espressa in  $\text{in}/\text{lb}$  che permette di trasformare la forza applicata in deflessione.  $F_l$  è la forza di inerzia del terreno espressa come:

$$F_l = \frac{1}{2} \rho b L_t C_L V^2 \quad (16)$$

I parametri da cui dipende sono già stati definiti per l'equazione (14) ad eccezione di  $C_L$ , costante relativa alla reazione del suolo rispetto alla forza verticale applicata [20].

### 5.2.2 Equazione per terreni non coesivi

Nel caso di terreni non coesivi il contributo della forza di inerzia del suolo ( $F_l$ ) e del carico di trascinamento ( $F_x$ ) vengono trascurati, poiché, come dimostrato da Coutermarsh nel 2007 [21], non influenzano

questa tipologia di terreni. Pertanto, l'unico termine per valutare il solco finale risulta essere:

$$Z_s = \left( \frac{0,3439}{\Omega'_s - 0,6239} - 0,0017 \right) d \quad (17)$$

Dipende, similmente a quanto visto nella (9) da:

- $d$  diametro dello pneumatico espresso in pollici
- $\Omega'_s = \left( \frac{D}{1,6} \right) \Omega_s$  analogo alla (10) con  $\Omega_s$  relativo a terreni non coesivi (vedere paragrafo 5.2.3)

### 5.2.3 Dynamic mobility number $\Omega$

Il “dynamic mobility number” o “WES” è stato sviluppato empiricamente dal “U.S. Army’s Waterways Experiment Station”. È la relazione cardine del modello di Richmond, in quanto lega in un unico parametro adimensionale la capacità portante del terreno, le caratteristiche dello pneumatico e la forza da questo applicata. Vengono utilizzate due equazioni differenti per terreni coesivi e non coesivi:

- per terreni coesivi: 
$$\Omega_C = \frac{CI(bd)}{F_t} \frac{(\delta_t)^{1,2}}{(h_t)^{\frac{1}{2}}} (0,534) \quad (18)$$

- per terreni non coesivi: 
$$\Omega_S = \frac{G(bd)^{\frac{3}{2}}}{F_t} \left( \frac{\delta_t}{h_t} \right) \quad (19)$$

In entrambi i casi il WES è inversamente proporzionale alla forza verticale  $F_t$  applicata dalla ruota e dipende dai seguenti parametri geometrici relativi allo pneumatico:

- $b$  spessore dello pneumatico espresso in pollici;
- $d$  diametro dello pneumatico espresso in pollici;
- $\delta_t$  deflessione dello pneumatico espresso in pollici. È la riduzione dell'altezza della sezione dello pneumatico dovuta al carico applicato e al gonfiaggio dello stesso. La deflessione può essere calcolata in maniera grafica come riportato nel documento di Crenshaw [20], per via

analitica facendo riferimento alle formule relative alla specifica tipologia di pneumatico [24], oppure considerando un valore standard pari a circa il 15-30% dell'altezza della sezione;

- $h_t$  è l'altezza della sezione della ruota, calcolata come la metà della differenza tra il diametro dello pneumatico e il diametro del cerchio interno.

Tali grandezze sono riportate nella seguente immagine:

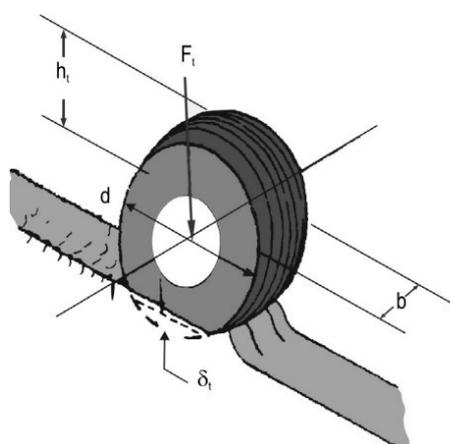


Figura 43 - Proprietà geometriche dello pneumatico [22]

$CI$  è il "Cone Index" parametro che entra in gioco nell'equazione per tenere in considerazione la capacità portante del terreno. Il Cone Index è misurato attraverso una prova di campo con l'ausilio o di un penetrometro standard avente un'area di base pari a  $0,5 \text{ in}^2$  e angolo del cono di  $30^\circ$ , oppure con un penetrometro avente area di base pari a  $0,2 \text{ in}^2$  e angolo del cono di  $30^\circ$ . Esso è calcolato dividendo la forza applicata per l'area della base su cui è applicata. Il Cone Index può essere messo in relazione con il corrispondente valore dell'indice CBR attraverso l'equazione empirica proposta da Shoop [25] nel 2008:

$$CBR = aCI^b \quad (20)$$

I coefficienti  $a$  e  $b$  sono adimensionali e non dipendono dalla prova che viene eseguita, ma dalla tipologia di terreno su cui si sta operando. Variano infatti in base alla classificazione USCS del terreno:

Soil Type	USCS Classification	Coefficients and Exponents		
		a	b	R <sup>2</sup>
All soils		0.2985	0.5358	0.4715
Clay, high plasticity	CH	0.1264	0.6979	0.8516
Clay, low plasticity	CL	0.1266	0.6986	0.8701
Silt, high plasticity	MH	0.0820	0.7174	0.7715
Silt, low plasticity	ML	0.1111	0.7390	0.5193
Coarse-grained	SM + GP	1.1392	0.4896	0.3495
Fine-grained	CH, CL, MH, ML	0.1305	0.6776	0.7724
High plasticity	CH + MH	0.1460	0.6432	0.7741
Low plasticity	CL + ML	0.1281	0.6984	0.7962

Figura 44 - Tabella coefficienti a e b per il calcolo dell'indice CBR dai valori del CI [25]

Graficamente si può osservare la seguente relazione tra CBR e CI in base alla tipologia di terreno [25]:

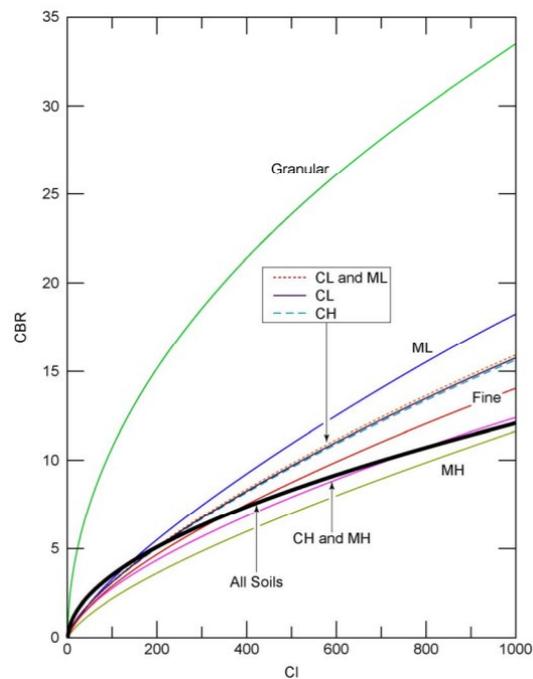


Figura 45 - Correlazione CBR-CI [25]

Nel caso di terreni non coesivi non viene utilizzato direttamente il valore del Cone Index, ma il suo tasso di aumento medio  $G$ , valutato ad una profondità pari allo spessore dello pneumatico. Esso viene espresso in psi/in, in quanto rapporto tra il valore del CI valutato alla profondità definita e la dimensione dello spessore dello pneumatico.

## 5.3 Applicazione del modello al caso di studio

Per poter applicare il modello proposto da Richmond et al. al presente caso di studio, avendo a disposizione le caratteristiche dei terreni studiati preliminarmente, si è individuata innanzitutto l'equazione da utilizzare. Nel caso in esame i terreni prelevati dai due Aeroporti oggetto di studio sono entrambi non coesivi. Viene quindi utilizzata l'equazione (17).

Successivamente si è scelto di procedere come segue:

1. ricerca dei dati relativi all'aereo critico degli aeroporti cui si fa riferimento<sup>13</sup>;
2. valutazione della tipologia del terreno e calcolo del coefficiente necessario (Cone Index e G);
3. ipotesi della velocità di uscita di pista dell'aeromobile;
4. calcolo della profondità del solco.

### 5.3.1 Aereo critico

A seguito di una valutazione del codice ICAO della pista dell'Aeroporto 1, la scelta dell'aereo critico è ricaduta sul Boeing B767-400ER.

Ogni specifica tecnica relativa all'aeromobile è stata ricavata dall'apposito manuale redatto dalla casa produttrice dello stesso: Boeing *"767 Airplane Characteristics for Airport Planning"* (2021).

Per le informazioni relative ai carichi si può far riferimento all'apposita tabella presente nel documento:

---

<sup>13</sup> Pur presentando i due aeroporti codici ICAO differenti, per poter confrontare i risultati viene utilizzato lo stesso aeromobile, che risulta aereo critico dell'Aeroporto 1.

CHARACTERISTICS	UNITS	767-400ER (1)	
		GE ENGINES	PW ENGINES
MAX DESIGN TAXI WEIGHT	POUNDS	451,000	451,000
	KILOGRAMS	204,570	204,570
MAX DESIGN TAKEOFF WEIGHT	POUNDS	450,000	450,000
	KILOGRAMS	204,116	204,116
MAX DESIGN LANDING WEIGHT	POUNDS	350,000	350,000
	KILOGRAMS	158,757	158,757
MAX DESIGN ZERO FUEL WEIGHT	POUNDS	330,000	330,000
	KILOGRAMS	149,685	149,685

Figura 46 - Carichi caratteristici B767-400ER [26]

Il carico utilizzato nel presente caso di studio è il "Max Design Takeoff Weight" ovvero il peso massimo in fase di decollo, pari a 450000 lb. Questo, come da manuale, è distribuito per il 93% sul carrello principale e per il 7% in quello anteriore. Come riportato nei precedenti capitoli del presente elaborato, la normativa ICAO fa riferimento al carrello anteriore dell'aeromobile; pertanto, il carico considerato è di 31500 lb. In base alla disposizione degli pneumatici del carrello anteriore, questo viene poi suddiviso nuovamente.

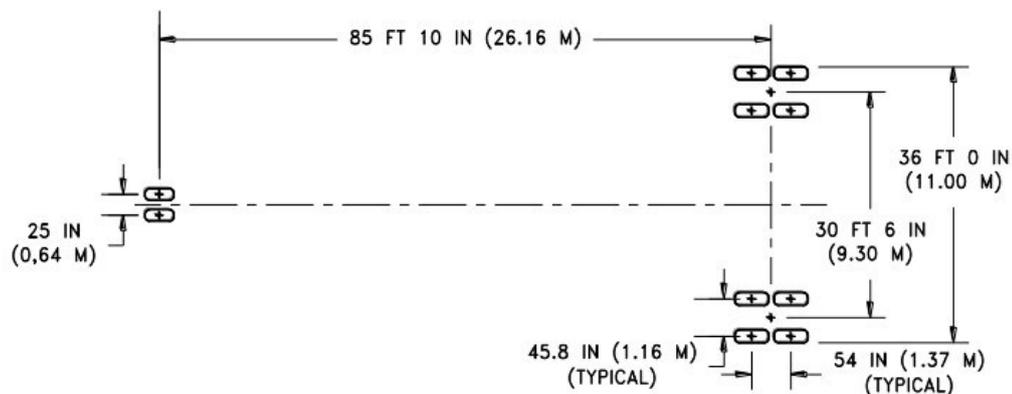


Figura 47 - Impronta del carrello di atterraggio B767-400ER [26]

Come si osserva dall'immagine, il Boeing B767-400ER presenta due pneumatici nel carrello anteriore. Il carico totale per ruota risulta quindi pari a 15750 lb.

In relazione ai dati geometrici dello pneumatico, nella scheda tecnica vengono riportate le dimensioni H37x14 con pressione di 170 psi. Risulta quindi:

<b>b</b>	<b>d</b>	<b>ht</b>	<b>δt</b>
spessore	diametro	altezza sezione	deflessione
[in]	[in]	[in]	[in]
14	37	11	3,3

Tabella 10 - Dati geometrici pneumatico del B767-400ER

### 5.3.2 Calcolo Cone Index e indice G

Il Cone Index è stato calcolato attraverso la formula (20) proposta da Shoop [25]. Questa è stata utilizzata con formulazione inversa, avendo a disposizione i dati relativi all'indice CBR e volendo ricavare il CI:

$$CI = \left( \frac{CBR}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (21)$$

In base alla granulometria effettuata i terreni oggetto di studio sono classificati secondo la USCS come GP il terreno F029 dell'Aeroporto 1 e come SM il terreno E07 dell'Aeroporto 2. Si assumono pertanto, in entrambi i casi i coefficienti a e b pari rispettivamente a 1,1392 e 0,4896.

L'andamento del Cone Index nel terreno viene elaborato facendo riferimento agli indici CBR calcolati nelle zone circostanti i punti F029 e E07, per i diversi strati corticali e sub-corticali (vedere paragrafo 4.2.1). Per ogni strato in cui il terreno è stato suddiviso viene quindi calcolato dal CBR il valore del rispettivo Cone Index.

In relazione all'area di intorno del punto di indagine F029 risulta quanto segue:

<b>Area F029</b>			
CBR	SPESSORE		CONEINDEX
[%]	[cm]	[in]	[psi]
11.8	16	6.45	118.29
69.7	38	14.98	4461.07
35.7	16	6.10	1139.29

Tabella 11 - Valori di Cone Index relativi all'area di intorno del punto F029

L'andamento del CI è stato quindi rappresentato graficamente in un diagramma Cone Index – Profondità. Nel seguente grafico in rosso viene rappresentata la profondità, pari allo spessore della ruota di 14 in, rispetto a cui il Cone Index deve essere calcolato:

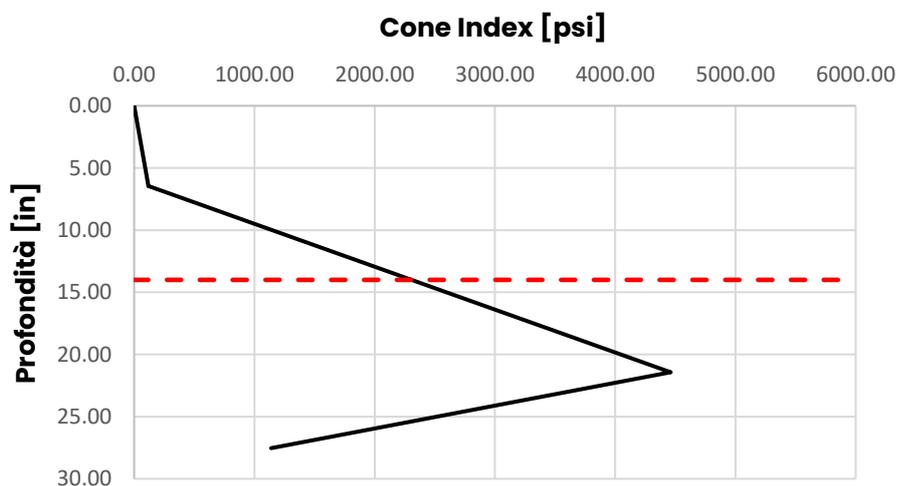


Figura 48 - Andamento Cone Index rispetto alla profondità riferito all'area di intorno del punto F029

Ad una profondità di 14 in risulta quindi un Cone Index pari a 2339,47 psi. Per calcolare l'indice G il Cone Index viene diviso per la profondità a cui viene calcolato, ottenendo G pari a 167,105 psi/in.

Procedendo in maniera analoga, nel caso dell'area d'intorno del punto E07 risulta quanto segue:

<b>Area E07</b>			
CBR	SPESSORE		CONEINDEX
[%]	[cm]	[in]	[psi]
7.8	12	4.69	50.71
27.9	37	14.47	686.80
21.4	21	8.20	397.81

Tabella 12 - Valori di Cone Index relativi all'area di intorno del punto E07

L'andamento del Cone Index lungo la profondità risulta:

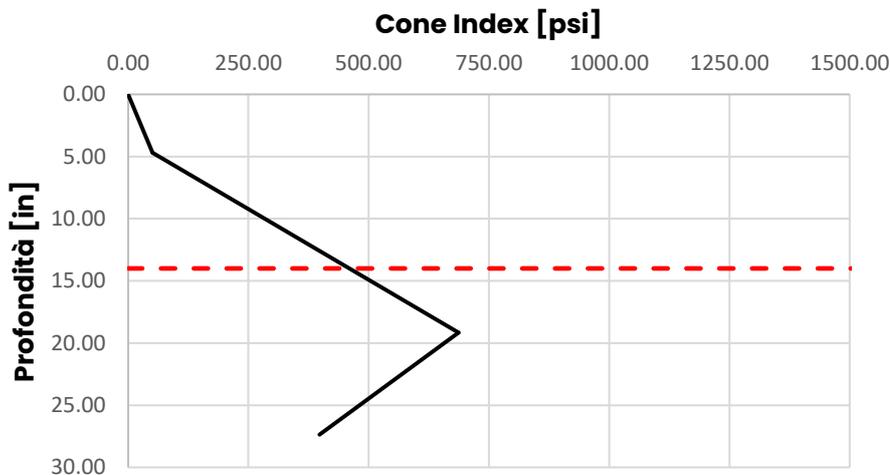


Figura 49 - Andamento Cone Index rispetto alla profondità riferito all'area di intorno del punto E07

Per l'area relativa al punto E07 risulta quindi un Cone Index di 460,77 psi e un indice G pari a 32,91 psi/in.

A causa dei differenti valori dell'indice CBR dei due terreni, si osserva una notevole differenza del valore del Cone Index e quindi dell'indice G.

### 5.3.3 Velocità di uscita di pista

La velocità con cui l'aeromobile esce di pista viene ipotizzata, facendo riferimento agli studi condotti da Benedetto A. nel 2014 [22], pari a 130 km/h, ovvero 1421,7 in/s equivalenti a 70,2 kn. La definizione della velocità di uscita è necessaria per la scelta dell'equazione per il

calcolo del dynamic mobility number D (equazione 11a) e per calcolare il tempo di pulsazione. Attraverso l'apposito foglio di calcolo è stato possibile calcolare il valore della lunghezza dell'impronta procedendo iterativamente come previsto.

### **5.3.4 Calcolo profondità del solco**

Avendo a disposizione tutti i parametri necessari, l'altezza del solco è stata calcolata con l'apposita formulazione.

Nel caso dell'Aeroporto 1, dai dati relativi all'area di intorno del punto F029, risulta un'altezza del solco pari a 0,436 cm. Mentre, nel caso dell'Aeroporto 2, in relazione all'area circostante il punto E07, l'altezza del solco risulta di 3,014 cm.

Nonostante il carico applicato e la velocità di uscita siano gli stessi, si osservano risultati notevolmente differenti. Questo a causa della differente capacità portante che i due terreni possiedono. Il terreno presente nel punto di indagine F029 e nella sua area di intorno, come visto nel capitolo 4, presenta un'elevata capacità portante, che ha portato ad un risultato dell'affondamento di pochi millimetri. Nel caso del terreno relativo al punto di indagine E07, si osservano invece scarse capacità portanti e un conseguente affondamento maggiore.

Se si confrontano tali risultati con quanto richiesto dalla normativa ICAO [1], in merito ai requisiti di portanza dell'area di strip, il terreno dell'Aeroporto 2 risulta, da una prima analisi, più conforme alle richieste. Esso, infatti, sembrerebbe presentare una capacità portante tale da sostenere l'aeromobile e permettere al tempo stesso un affondamento degli pneumatici per garantire la frenata. Il terreno dell'Aeroporto 1 risulta invece con una capacità portante troppo elevata, tale da non permettere un affondamento minimo degli pneumatici dell'aeromobile.



# Capitolo 6 - Simulazione

---

Per poter comprendere e valutare cosa effettivamente accada al terreno, con specifiche caratteristiche, nel momento in cui un aeromobile vi passa al di sopra, si è andati alla ricerca di un approccio pratico che permettesse di simularne l'evento. Non avendo a disposizione i mezzi necessari per poter effettuare una simulazione in scala reale, e volendo ricercare un metodo più rapido ed economico, si è scelto di adottare una soluzione che permettesse di riprodurre l'evento in laboratorio. La simulazione proposta è stata eseguita all'interno del Laboratorio di materiali stradali del Politecnico di Torino utilizzando la macchina ormaiatrice.

## 6.1 Macchina ormaiatrice

La macchina ormaiatrice è un'apparecchiatura utilizzata per studiare in laboratorio la resistenza all'ormaiamento di materiali bituminosi, destinati ad essere utilizzati per gli strati superficiali delle pavimentazioni stradali. Serve quindi a simulare l'effetto del traffico sulle pavimentazioni, applicando su due lastre di materiale opportunamente preparato, ripetuti passaggi di una ruota a cui è applicato un carico costante regolabile. Il rotolamento viene effettuato secondo l'asse maggiore della lastra ed al termine della prova è possibile valutare l'eventuale diminuzione dello spessore.

Date le caratteristiche della macchina, si è scelto di adoperarla per la simulazione del passaggio di uno pneumatico di un aeromobile su un terreno, in questo caso confinato all'interno della specifica lastra con

valori di densità e contenuto d'acqua opportuni e preventivamente calcolati.



Figura 50 - Macchina ormaiatrice con lastra di materiale pronta per la prova

### **6.1.1 Caratteristiche della macchina**

La macchina presenta un telaio rigido costituito:

- da un montante anteriore che racchiude le componenti pneumatiche, al quale è fissata la consolle dei comandi;
- un montante posteriore che sostiene il motore e il riduttore cinematico a catena;
- una traversa inferiore che sostiene il cuscinetto dell'albero motore e protegge il corpo oscillante;
- due binari che formano la traversa superiore e che guidano il carrello.

Al di sotto di ciascuna ruota è posto un supporto mobile su cui viene appoggiata la lastra di materiale. Esso è guidato da due colonne verticali ed azionato da un martinetto metallico che permette il caricamento del provino. Il carico massimo applicabile è di 5500 N regolabile dalla consolle. Le ruote viaggiano ad una velocità di 1,6 m/s

con frequenza di 1 Hz ed è possibile definire il numero di passaggi che essa deve effettuare.

Gli pneumatici utilizzati sono lisci, del tipo T522 4.00-8, presentano uno spessore di 109 mm, un diametro di 415 mm e una pressione di gonfiaggio massima pari a 0,7 Mpa.

Ai fini del presente studio tutte le prove sono state effettuate applicando un carico pari a 5000 N, con una pressione di gonfiaggio degli pneumatici pari a 0,6 Mpa. Per ogni lastra è stato misurato il solco a seguito di un solo passaggio e successivamente dopo 100 passate.

Ai fini della simulazione e di un confronto con il caso reale bisogna tener conto dei seguenti limiti della macchina:

- la velocità con cui vengono effettuate le passate è molto inferiore rispetto alle velocità reali dell'aeromobile. Esso, infatti, si presuppone viaggi ad una velocità circa di 130 km/h (vedere capitolo 5), mentre la macchina opera con una velocità massima di 5,76 km/h;
- il carico applicato dalla macchina è di 5000 N corrispondente a 509,6 kg, mentre il carico applicato da uno pneumatico dell'aereo critico (vedere paragrafo 5.3.1) è pari a 2608,2 kg;
- le dimensioni degli pneumatici dell'aeromobile sono molto maggiori rispetto a quelli utilizzati con la macchina;
- il materiale su cui opera la macchina è confinato all'interno di una lastra metallica, sarà quindi soggetto ad una resistenza superiore rispetto al suolo su cui passa l'aeromobile.

Sarà quindi possibile confrontare i risultati solo tenendo presente che ciò che verrà calcolato sarà in una scala notevolmente inferiore rispetto alla situazione reale. Bisognerà quindi effettuare una valutazione su come riportare i risultati alla dimensione reale, tenendo presente le differenze di velocità, carico e confinamento del materiale.

## 6.2 Preparazione della lastra e procedura della prova

In tutte le prove il materiale oggetto di studio è stato inserito all'interno di una lastra metallica con dimensioni standard 18x50 cm e spessore 10 cm.

Il quantitativo di materiale da inserire all'interno della lastra è stato calcolato a partire dal volume della lastra e dalla densità umida del materiale da utilizzare. Moltiplicando il volume di 9000 cm<sup>3</sup> per il  $\gamma_u$  espresso in g/cm<sup>3</sup> si ottengono i grammi necessari di materiale umido sciolto. A monte, quindi, per definire i quantitativi di materiale secco e di acqua da utilizzare, è stato necessario individuare i rispettivi valori di densità secca e di contenuto d'acqua da replicare nella prova. A tal proposito sono stati seguiti due differenti approcci:

- utilizzare i valori di densità secca e contenuto d'acqua rispetto ai quali si possa prevedere, valutando la curva di compattazione Proctor, un CBR compreso nell'intervallo 15-20 richiesto da Normativa [1];
- replicare i valori di densità secca e contenuto d'acqua calcolati in situ con le apposite indagini sperimentali (vedere paragrafo 4.2.2).

La quantità di materiale secco viene calcolata come segue:

$$M_{sec} = \frac{M_{tot}}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \quad (22)$$

In cui  $M_{tot}$  è la massa del materiale umido calcolata,  $w$  è la percentuale d'acqua definita.

Definite le quantità di materiale e di acqua da utilizzare per la preparazione della lastra si sono svolti i seguenti passaggi:

1. Dovendo lavorare circa 20kg di materiale si è deciso, per avere una distribuzione quanto più omogenea del quantitativo

d'acqua, di suddividere il materiale in 3 parti uguali e mescolarli con l'apposito quantitativo d'acqua ridiviso.



*Figura 51 - Preparazione del materiale da inserire nella lastra*

2. Essendo allo stato sciolto, il materiale è stato inserito all'interno della lastra e compattato con l'apposita macchina compattatrice. La macchina sfrutta una compattazione dinamica attraverso l'applicazione di un carico costante su una ruota che passa al di sopra della lastra. Per ogni lastra sono state effettuate le passate necessarie per ottenere un materiale sufficientemente addensato e con una superficie liscia



*Figura 52 - Compattazione del materiale*

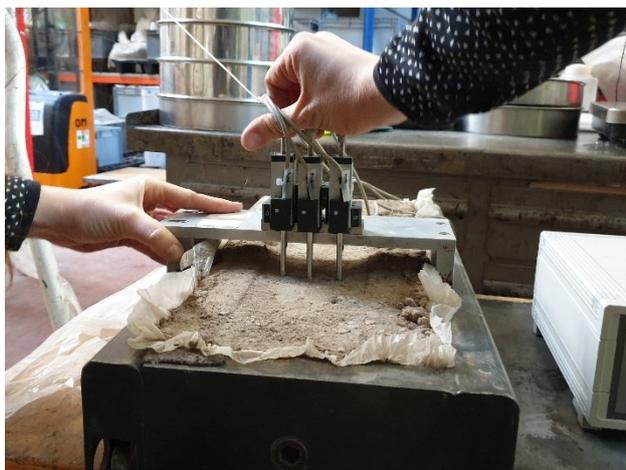
Come si può vedere dall'immagine soprastante, il materiale è disposto all'interno di una pellicola di nylon in modo da conservare le condizioni di umidità. Per lo stesso scopo durante tutta la fase di compattazione, è stato posto un telo di nylon tra la superficie della lastra e la ruota della macchina compattatrice.

3. Terminata la compattazione, si è misurato il valore dell'indice CBR con l'apposita prova (vedere paragrafo 4.3.3), cercando, per quanto possibile, di effettuarla in un punto della lastra che non influenzasse i risultati della simulazione finale



*Figura 53 -Prova per la valutazione del CBR della lastra*

4. Prima di procedere con l'esecuzione della prova con la macchina ormaiata è stata effettuata una prima misurazione sulla superficie rispetto a 4 diverse linee, trasversali rispetto alla lunghezza maggiore della lastra, rispetto a cui porre i punti di riferimento per valutare l'affondamento finale. Ogni linea di misurazione presenta a sua volta 3 diversi punti di misurazione equidistanti tra loro di 2,5 cm e centrati rispetto alla linea trasversale



*Figura 54 - Foto di esempio per procedura di misurazione*

Durante tutte le misurazioni si è avuto cura di procedere velocemente in modo che i comparatori utilizzati per il rilievo, non penetrassero all'interno del materiale alterando i risultati.

5. La lastra viene posta all'interno della macchina ormaiatrice effettuando inizialmente una sola passata, con il carico definito. Una volta misurato l'affondamento negli stessi punti della prima misurazione, la lastra è stata sottoposta ad un ciclo di 100 passate con il medesimo carico e misurata nuovamente.



*Figura 55 - Foto esempio della lastra al termine della prova con 100 passate<sup>14</sup>*

---

<sup>14</sup> Nella foto la lastra è realizzata con materiale prelevato dal punto E07 dell'Aeroporto 2 e preparata con valori di densità e contenuto d'acqua per ottenere un CBR 15-20 %

6. Al termine della prova è stato prelevato un campione di materiale dal cuore della lastra pesato e fatto essiccare in forno a 105° in modo da verificarne l'effettivo quantitativo d'acqua

Per ogni prova sono stati ottenuti 24 differenti valori di affondamento: 12 relativi alla prova con 1 passata e 12 alla prova con 100 passate. Dopo una prima valutazione si è scelto di considerare solo l'affondamento massimo per una e per 100 passate.

### **6.3 Lastra preparata secondo i valori di CBR appartenenti al range normativo**

Il primo approccio che si è seguito per definire i valori di densità secca e contenuto d'acqua per la preparazione della lastra è stato quello di calcolarli in modo che si ottenesse un CBR appartenente all'intervallo previsto da Normativa [1]. Si è quindi ipotizzato un valore di CBR pari al 17,5 % rispetto al quale si sono calcolati  $\gamma_s$  e  $w$ . Tali valori sono stati estratti dalla curva di compattazione Proctor eseguita con il protocollo "Standard", ovvero applicando ai provini una minore energia di compattazione [14]. Questa scelta è stata effettuata a seguito di una valutazione dei valori di CBR calcolati sui provini compattati con prove Proctor Modificate: i provini presentano, per contenuti d'acqua prossimi tra loro, differenze molto elevate tra gli indici di CBR, che non permettono di effettuare un'interpolazione affidabile e consistente dei risultati. Nel ramo discendente della campana Proctor (Modificata), inoltre, i valori di indice CBR più bassi si ottengono in corrispondenza di contenuti d'acqua elevati, tali da non consentire un'ottima compattazione dei provini.

La curva di compattazione è stata costruita in maniera analoga a quanto fatto per la prova Proctor Modificata. Basandosi sull'andamento della curva di saturazione, ci si aspetta che il picco

della curva a campana relativa alla prova Proctor Standard, sia in corrispondenza di un contenuto d'acqua più elevato rispetto al picco riferito alla prova con protocollo Modificato, a causa della minore energia di compattazione utilizzata. Si è pertanto scelto di eseguire tre diversi provini, con contenuti d'acqua crescenti a partire dal valore rispetto a cui si ha il picco nella campana della Proctor Modificata. per ogni provino compattato si è quindi eseguita la prova per il calcolo dell'indice CBR.

I valori di densità e contenuto d'acqua sono stati ottenuti linearizzando il tratto discendente della curva a campana, costituito nel presente caso da due soli punti. I valori di densità secca e percentuale d'acqua di tali punti sono stati quindi rappresentati in funzione dei rispettivi indici CBR su due diagrammi: CBR-  $\gamma_s$  e CBR-w. Con un'interpolazione sono stati quindi estratti i valori di densità secca e contenuto d'acqua relativi ad un CBR del 17,5 %. Un'ulteriore verifica è stata effettuata controllando che, per il dato valore di densità secca, si ottenesse, dalla curva a campana Proctor (Standard), il medesimo valore di contenuto d'acqua calcolato con l'interpolazione. Tale verifica può essere effettuata perché si è supposto di linearizzare il tratto della curva.

Conoscendo  $\gamma_s$  e w è possibile ricavare il valore di  $\gamma_u$  con l'equazione (4) e di conseguenza, come visto, la quantità di materiale necessario per preparare la lastra.

Attraverso la prova per la valutazione dell'indice CBR della lastra è stato possibile verificare che il calcolo eseguito ha portato a valori CBR, anche se leggermente minori, all'interno del range richiesto.

### **6.3.1 Punto di indagine F029**

Il terreno prelevato nel punto di indagine F029 dell'Aeroporto 1 presentava, come riportato nel paragrafo 4.3.2 il picco della curva di compattazione in corrispondenza di un contenuto d'acqua pari al 8 %. Osservando la curva si è scelto quindi di preparare inizialmente due

provini: il primo con contenuto d'acqua nominale pari al 8 %, il secondo con contenuto d'acqua nominale pari al 10%. Valutando i valori di densità ottenuti si è ritenuto opportuno ricercare il valore di picco della curva in un valore di contenuto d'acqua intermedio, pari al 8,5 %. Ne risulta quanto rappresentato dal grafico sottostante.

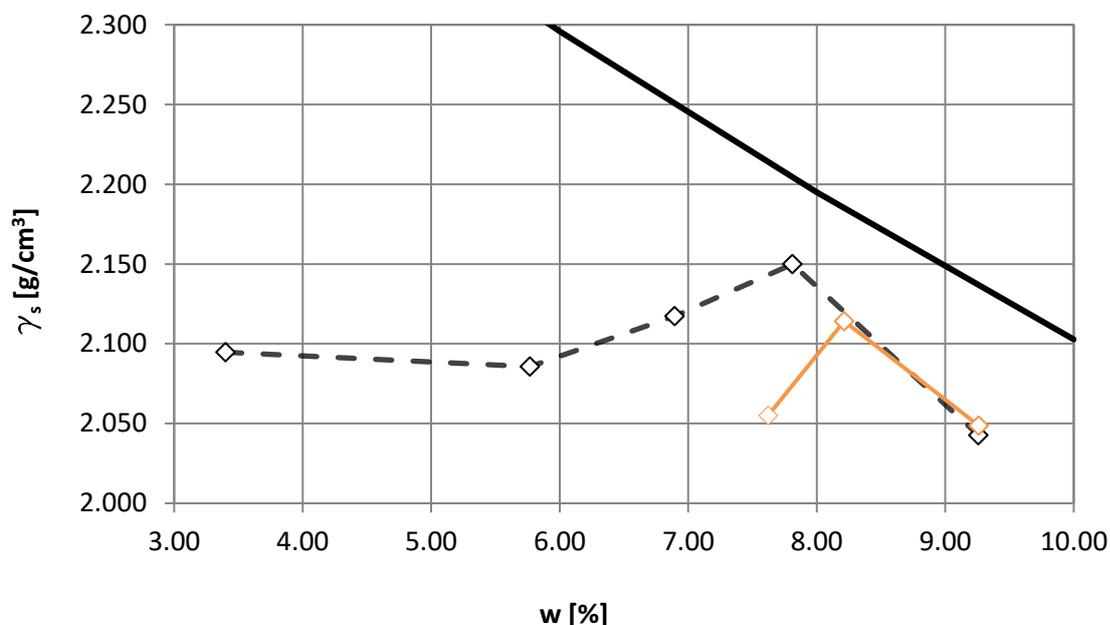


Figura 56 - Rappresentazione delle curve di compattazione a seguito di una procedura Modificata (linea tratteggiata) e procedura Standard (linea arancione) relative al terreno F029

In arancione viene rappresentata la curva di compattazione relativa alla procedura Standard. Come previsto, il picco della curva si trova in corrispondenza di un valore di contenuto d'acqua più elevato rispetto a quello relativo alla procedura modificata. A seguito del calcolo del CBR per ogni provino, risulta:

<b>W<sub>nom</sub></b>	<b>W<sub>eff</sub></b>	<b>γ<sub>s</sub></b>	<b>CBR</b>
[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
8	7,62	2,055	27,7
8,5	8,21	2,114	62,8
10	9,26	2,049	2,8

Tabella 13 - Densità secca e indici CBR per i differenti contenuti d'acqua, su provini realizzati con prove Proctor Standard su terreno F029

I valori di  $\gamma_s$  e  $w$  relativi ai provini con CBR pari a 62,8 % e 2,8 % sono stati linearizzati e in seguito estratti i valori relativi al CBR di 17,5 %.

La lastra in questo caso è stata quindi preparata con i seguenti valori di densità e contenuto d'acqua:

<b>CBR<sub>ipo</sub></b>	<b>w</b>	<b><math>\gamma_s</math></b>	<b><math>\gamma_u</math></b>	<b>CBR<sub>eff</sub></b>
[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
17,5	9,0	2,065	2,251	16

Tabella 14 - Densità e contenuto d'acqua calcolati per ottenere un CBR nel range normativo

*rif. terreno F029*

Il CBR effettivo, anche se minore di quello ipotizzato, risulta all'interno dell'intervallo richiesto da Normativa.

Gli affondamenti massimi misurati sulla presente lastra a seguito di 1 e di 100 passate risultano<sup>15</sup>:

- 1 passata: 0,2191 cm
- 100 passate: 1,4245 cm



Figura 57 – Lastra al termine delle 100 passate, preparata con materiale F029 con CBR ipotizzato nel range normativo

<sup>15</sup> Per i risultati completi fare riferimento all'Annesso C

### 6.3.2 Punto di indagine E07

In relazione al terreno prelevato nel punto di indagine E07 dell'Aeroporto 2, si osservava un punto di picco della campata Proctor Modificata in corrispondenza di un contenuto d'acqua del 11%. In questo caso si è scelto di preparare i 3 provini con il 12%, 14% e 16% d'acqua, da compattare con procedura Standard. Come nel caso del terreno F029, si osserva un picco in corrispondenza di un contenuto d'acqua maggiore, pari in questo caso al 13,9 %.

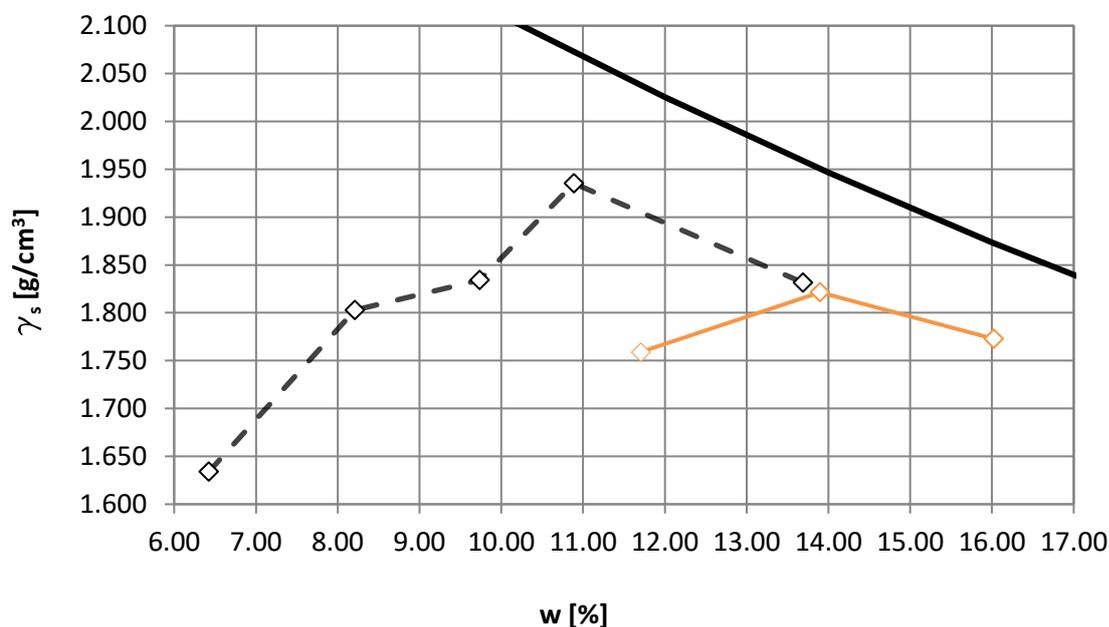


Figura 58 - Rappresentazione delle curve di compattazione a seguito di una procedura Modificata (linea tratteggiata) e procedura Standard (linea arancione) relative al terreno E07

Come esposto nei paragrafi precedenti, si è calcolato il valore del CBR per ogni provino:

<b>W<sub>nom</sub></b>	<b>W<sub>eff</sub></b>	<b><math>\gamma_s</math></b>	<b>CBR</b>
[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
12	11,71	1,759	24,3
14	13,90	1,821	25,2
16	16,02	1,773	4,6

Tabella 15 - Densità secca e indici CBR per i differenti contenuti d'acqua, su provini realizzati con prove Proctor Standard su terreno E07

Analogamente, dalla linearizzazione di  $\gamma_s$  e  $w$  relativi ai provini aventi indice CBR di 25,2 % e 4,6 % si ottiene quanto segue:

<b>CBR<sub>ipo</sub></b>	<b>w</b>	<b><math>\gamma_s</math></b>	<b><math>\gamma_u</math></b>	<b>CBR<sub>eff</sub></b>
[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
17,5	14,7	1,804	2,069	15,3

Tabella 16 - Densità e contenuto d'acqua calcolati per ottenere un CBR nel range normativo

*rif. terreno E07*

Gli affondamenti massimi misurati sulla presente lastra a seguito di 1 e di 100 passate risultano:

- 1 passata: 0,2646 cm
- 100 passate: 2,7000 cm

## **6.4 Lastra con densità e contenuto d'acqua rilevati in situ**

Il secondo approccio utilizzato per la preparazione delle lastre è stato quello di utilizzare la densità ed il contenuto d'acqua rilevati in situ per cercare, con le dovute ipotesi e limitazioni, di avvicinarsi quanto più possibile alle condizioni reali.

Per la realizzazione di questa tipologia di lastra è stata utilizzata la densità secca rilevata in situ corretta, ovvero relativa al materiale passante al crivello da 25 mm. Nel caso specifico si è dovuto riproporzionare il valore della densità corretta in relazione al fatto che per la lastra con il materiale F029 viene utilizzata la quota parte passante al setaccio da 31,5 mm, mentre, per la lastra con il materiale E07, viene utilizzata la quota parte passante al setaccio da 22,4 mm. Per poter ricalcolare i valori di densità corretti, rispetto al materiale utilizzato, si sono osservati i risultati della granulometria e delle prove per il calcolo della densità del materiale (vedere paragrafo 4.3).

Una volta ottenuto il valore corretto di densità secca, conoscendo la percentuale d'acqua in situ, si è proceduto seguendo quando esposto nel paragrafo 6.2

### 6.4.1 Punto indagine F029

Sulla base dei valori di densità secca e contenuto d'acqua registrati nel punto di indagine F029 dell'Aeroporto 1 (vedere paragrafo 4.3.2), è stato possibile calcolare i seguenti valori di densità secca (corretta per il passante al setaccio da 31,5 mm) e densità umida:

<b>w</b>	<b><math>\gamma_s</math></b>	<b><math>\gamma_u</math></b>	<b>CBR<sub>eff</sub></b>
[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
1,1	2,116	2,140	19,1

Tabella 17 - Densità e contenuto d'acqua relativi alle condizioni in situ per il punto F029

Nella presente tabella viene riportato anche il valore di CBR della lastra calcolato a seguito dell'apposita prova.

In questo caso, riproducendo le condizioni in situ, è stato possibile effettuare un confronto tra il valore di CBR calcolato in laboratorio, pari al 19,1 % e il valore di CBR calcolato tramite le prove DCP pari al 43,2 %<sup>16</sup>. Come ci si aspettava, il valore del CBR calcolato in laboratorio risulta essere circa la metà di quello estrapolato dalle prove DCP. Questo presumibilmente a causa dell'esclusione, nella prova di laboratorio, della quota parte di materiale trattenuto dal setaccio da 31,5 mm.

In questo caso, al termine della prova con la macchina ormaiatrice si osservano i seguenti affondamenti:

- 1 passata: 0,2519 cm
- 100 passate: 0,391 cm

---

<sup>16</sup> Il valore di CBR considerato è relativo allo strato sub-corticale 1 in quanto il terreno utilizzato per la prova è prelevato ad una profondità di 15 cm dal piano campagna, la medesima dello strato corticale



Figura 59 - Lastra preparata con materiale F029 nelle condizioni di densità e contenuto d'acqua registrate in situ

A differenza delle altre lastre, in questo caso, a causa del quantitativo d'acqua molto scarso, si è osservata una notevole difficoltà in fase di compattazione.

#### 6.4.2 Punto indagine E07

Analogamente a quanto effettuato per il materiale prelevato dal punto di indagine F029 anche in questo caso i valori di densità secca calcolati in situ sono stati corretti in relazione al materiale usato per la presente prova. Tutte le prove effettuate sul materiale E07 sono state effettuate sulla quota parte passante al setaccio da 22,4 mm, la densità in situ è stata quindi corretta secondo tale assunzione. Risulta pertanto:

<b>w</b>	<b><math>\gamma_s</math></b>	<b><math>\gamma_u</math></b>	<b>CBR<sub>eff</sub></b>
[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
8,5	1,663	1,804	12,4

Tabella 18 - Densità e contenuto d'acqua relativi alle condizioni in situ per il punto E07

Anche in questo caso dal confronto tra l'indice CBR calcolato in laboratorio, pari a 12,4% e quello ricavato dalle prove DCP, pari a 27,7%, risultano uno circa la metà dell'altro.

A seguito della prova con la macchina ormaiatrice si registrano i seguenti valori di affondamento:

- 1 passata: 0,2040 cm
- 100 passate: 0,8281 cm

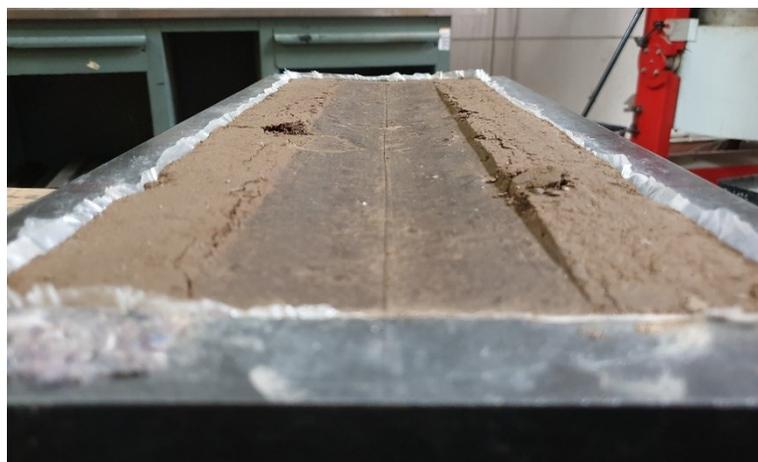


Figura 60 - Lastra preparata con materiale E07 nelle condizioni di densità e contenuto d'acqua registrate in situ

## 6.5 Valutazione dei risultati

Al fine di una valutazione complessiva dei risultati ottenuti, si è ritenuto opportuno riportarli nella seguente tabella.

	Tipologia lastra	$\gamma_s$	w	Sr	CBR	Z <sub>1p</sub>	Z <sub>100p</sub>
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]	[cm]	[cm]
<b>F029</b>	CBR ipotizzato	2,065	9,0	81,67	16,0	0,2191	1,4245
	Condizioni in situ	2,116	1,1	11,17	19,1	0,2519	0,3910
<b>E07</b>	CBR ipotizzato	1,804	14,7	81,56	15,3	0,2646	2,7000
	Condizioni in situ	1,663	8,5	37,5	12,4	0,2040	0,8281

Tabella 19 - Tabella riassuntiva dei risultati delle prove sulle 4 lastre

Nella prima colonna vengono riportati i punti di indagine dai quali è stato prelevato il terreno utilizzato per la realizzazione delle lastre. Nella seconda colonna è riportata la tipologia di lastra cui si fa riferimento: con "CBR ipotizzato" si fa riferimento alle lastre realizzate ipotizzando

un CBR all'interno del range normativo (paragrafo 6.3); con "Condizioni in situ" si fa riferimento alle lastre realizzate con densità e contenuto d'acqua registrati nel sito di indagine (paragrafo 6.4). Nelle colonne vengono riportati successivamente: la densità secca e il quantitativo d'acqua rispetto a cui si è calcolata la quantità di materiale da inserire nella lastra; il grado di saturazione  $S_r$ ; il valore del CBR calcolato con la prova apposita in laboratorio. Nelle ultime due colonne vengono riportati gli affondamenti massimi registrati a seguito di 1 e 100 passate, misurati in cm.

Da una prima semplice analisi si può osservare che in tutti i casi il valore di affondamento registrato a seguito di una passata è inferiore rispetto a quello registrato a seguito di 100 passate. Tale differenza risulta elevata nella maggior parte dei casi, ad eccezione della lastra realizzata con le condizioni in situ, per il terreno relativo al punto F029. Si registra in questo caso una differenza minima, di solo 0,1391 cm, presumibilmente a causa di un CBR più elevato, ma soprattutto di una densità secca maggiore rispetto ai restanti e un contenuto d'acqua molto minore, pari solo al 1,1%.

A seguito di una passata si osserva che i risultati ricadono tutti all'interno di un intervallo molto piccolo: tra 0,204 cm e 0,2646 cm. Per poter definire però con certezza un limite dell'intervallo delle misurazioni servirebbe un numero più elevato di dati. In entrambi i casi, sia per il terreno F029 che per il terreno E07, a differenza di quanto ci si possa aspettare, al crescere dell'indice CBR, quindi al crescere della capacità portante, si osservano affondamenti minori. Nel caso del terreno E07 è possibile osservare che l'affondamento maggiore si ha nel caso di contenuti d'acqua e grado di saturazione maggiori. Ne consegue quindi un risultato coerente se osservato dal punto di vista del quantitativo d'acqua presente all'interno del terreno. Ciò non avviene nel caso del terreno F029, in cui, nonostante il valore dell'indice CBR aumenti e il grado di saturazione aumenti, non si osserva un aumento di affondamento. In questo caso specifico quindi,

a causa di un ordine di misurazione troppo piccolo e di un campione di dati non elevato, non è possibile definire alcuna relazione spiegabile tra i risultati ottenuti.

L'affondamento in seguito alle 100 passate è stato valutato per poter osservare le variazioni a seguito di un aumento del carico, in questo caso sotto forma di cicli di carico. Tale scelta nasce dalla necessità di voler osservare una più apprezzabile e marcata differenza di misurazione, che risulta minima e dell'ordine di millimetro nel caso di una sola passata. Osservando la totalità dei risultati ottenuti, si può notare una possibile correlazione con il contenuto d'acqua: a contenuti d'acqua crescenti, presenti all'interno della lastra, si osserva un affondamento maggiore. Questa osservazione induce a valutare il grado di saturazione del terreno per un'analisi più consistente. Tale osservazione rimane valida per le lastre che presentano grado di saturazione basso, del 11,17% e del 37,5%. Per gradi di saturazione maggiori, invece, risultando molto prossimi tra loro, 81,67 e 81,56, non è possibile definire con certezza l'aumento progressivo, ma solo apprezzare, in entrambi i casi, una sostanziale differenza del livello di affondamento rispetto ai precedenti. Ciò induce comunque a pensare che vi sia una stretta correlazione con il grado di saturazione, ma che a livelli di saturazione maggiori, influisca anche la plasticità del materiale. Per il materiale più plastico (E07) si osservano, infatti, affondamenti molto maggiori.

Volendo confrontare i risultati ottenuti dalla prova con la macchina ormaiatrice nelle condizioni in situ con il modello di Richmond applicato nel capitolo 5 si riassume quanto segue:

	<b>CBR<sub>lab</sub></b>	<b>Z<sub>1p</sub></b>	<b>Z<sub>100p</sub></b>	<b>CBR<sub>DCP</sub></b>	<b>Modello</b>
	[%]	[cm]	[cm]	[%]	[cm]
<b>F029</b>	19,1	0,2519	0,3910	43,2	1,361
<b>E07</b>	11,5	0,2233	0,8281	27,7	3,924

Tabella 20 - Confronto risultati macchina ormaiatrice e modello di Richmond

Per un confronto più preciso, relativo ai punti F029 e E07 in esame, vengono riportati i risultati del modello relativi alle prove DCP eseguite nei soli punti di indagine.

Un primo esame viene effettuato ponendosi nello scenario più realistico in cui l'aereo uscendo fuori pista passa sul terreno una volta sola. Si è cercato quindi di confrontare i valori dell'affondamento ad una passata con i risultati del modello. Come ci si aspettava, si osserva una notevole differenza nell'ordine di grandezza degli affondamenti, giustificabile dalle differenze di carico, di velocità e di confinamento del terreno. A causa dell'ordine di grandezza non elevato e poco consistente rispetto al caso reale e non potendo ricalibrare il modello alle condizioni in cui la prova di laboratorio viene effettuata, i due risultati non possono essere direttamente correlabili. Anche cercando di scalare le misurazioni ottenute rispetto al valore del carico applicato dall'aeromobile, è necessario un maggior numero di misurazioni per poter studiare un'eventuale correlazione in termini di velocità.

È possibile invece ricercare un coefficiente di correlazione tra i risultati dell'affondamento a seguito di 100 passate con quelli del modello. Si nota infatti, una più marcata differenza tra gli affondamenti dei due terreni, osservabile anche nel modello. Si osserva in questo caso che il rapporto tra i risultati del modello e quelli della prova di laboratorio è circa 4,35 nel caso di F029 e 4,6 nel caso di E07. Tale differenza nasce oltre che dal differente indice di CBR anche dalla differente plasticità dei terreni.



## Capitolo 7 - Conclusioni

---

Le indagini sperimentali effettuate in situ ed in laboratorio hanno evidenziato sostanziali differenze tra i due terreni. Dalla caratterizzazione in laboratorio risulta, infatti, una differente distribuzione granulometrica e una differente suscettività all'acqua, che ha portato a classificarli come terreni A2-4, il terreno dell'Aeroporto 1, e A2-6, il terreno dell'Aeroporto 2. Questo ha influito anche sulla capacità portanti dei due terreni, come evidenziato dalle prove DCP effettuate in situ e le prove per la determinazione dell'indice CBR effettuate in laboratorio. Il terreno prelevato dall'Aeroporto 1 presenta per entrambe le prove indici di portanza superiori rispetto a quelli calcolati per il terreno dell'Aeroporto 2. La differente capacità portante ha influenzato notevolmente i risultati dei due approcci utilizzati.

Applicando il modello di Richmond et al. ai terreni oggetto di studio, si è osservato un affondamento trascurabile, di 0,436 cm, per l'Aeroporto 1, mentre più elevato, pari a 3,014 cm, per l'Aeroporto 2. Questo a causa del fatto che a parità di dati inseriti nel modello, il fattore discriminante è solamente il CBR, che nei due casi risulta, come già detto, molto differente. Confrontando tali risultati con la normativa ICAO, sembrerebbe pertanto che il terreno dell'area di Strip dell'Aeroporto 1 non sia idoneo, in quanto l'eccessiva capacità portante potrebbe non garantire una resistenza tale all'aeromobile per assicurarne la frenata. Il modello applicato sembrerebbe presentare delle limitazioni in merito alla tipologia di terreno che si sta studiando, in particolar modo, in relazione al grado di addensamento e di saturazione.

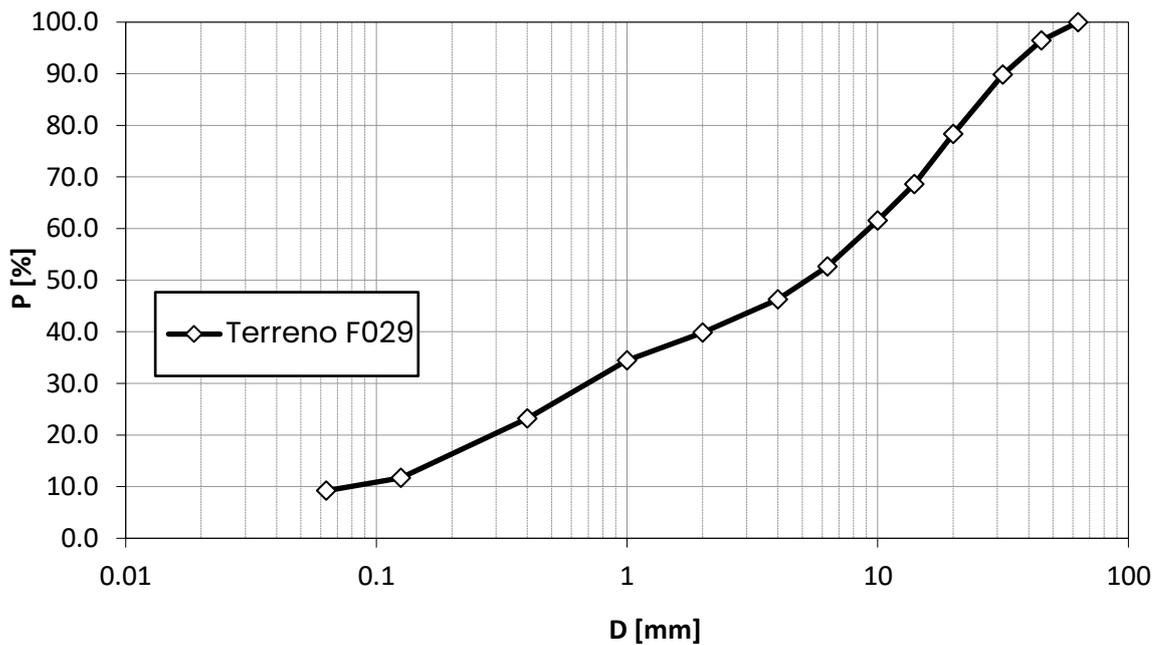
L'approccio pratico simulativo effettuato utilizzando la macchina ormaiatrice ha presentato diversi limiti riguardo al confinamento del materiale all'interno della lastra e al carico massimo applicabile. È stato però possibile evidenziare una stretta correlazione tra la tipologia di terreno e l'affondamento finale. In particolar modo, si è osservata l'influenza importante del contenuto d'acqua e del grado di saturazione sul risultato finale della prova.

Per riportare i risultati ottenuti dalle prove in laboratorio alla dimensione reale, non è stato possibile osservare una correlazione diretta. È necessario stabilire una relazione empirica che tenga conto, oltre che delle differenze di carico e di confinamento del materiale, anche delle differenti velocità di applicazione della sollecitazione. Per essere validata e consistente necessita però, di un numero molto maggiore di risultati, in modo da elaborare coefficienti sperimentali che permettano di calibrare e correggere le differenze sostanziali che sono state evidenziate.

# Annesso A

## Terreno F029 – Distribuzione Granulometrica

Setaccio	Trattenuto	Trattenuto <sub>prog</sub>	Trattenuto <sub>prog</sub>	Passante <sub>prog</sub>
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
63	0	0.0	0.0	100.0
45	511.4	511.4	3.5	96.5
31.5	957.7	1469.1	10.2	89.8
20	1667.7	3136.8	21.7	78.3
14	1396.7	4533.5	31.4	68.6
10	1017.5	5551.0	38.4	61.6
6.3	1295.2	6846.2	47.4	52.6
4	920.3	7766.5	53.7	46.3
2	924.9	8691.4	60.1	39.9
1	780.9	9472.3	65.6	34.4
0.4	1623.3	11095.6	76.8	23.2
0.125	1663.9	12759.5	88.3	11.7
0.063	361.1	13120.6	90.8	9.2
Filler	1329.8	14450.4	100.0	-
Somma	14450.4			



## Terreno F029 – Limiti di Atterberg

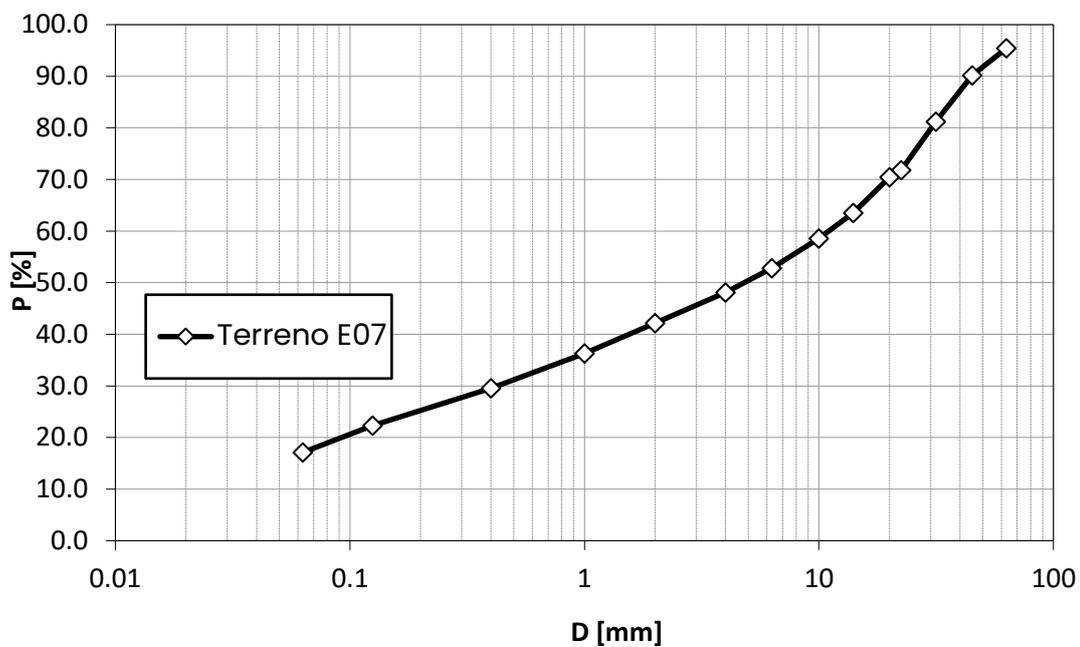
<b>Limite liquido</b>					
<b>ID</b>	<b>Penetrazione</b>	<b>Tara</b>	<b>Umido lordo</b>	<b>Secco lordo</b>	<b>W</b>
<b>[-]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[%]</b>
1	5.15	39.656	44.776	43.763	24.7
2	12.60	40.046	52.025	49.186	31.1
3	9.45	43.269	52.541	50.463	28.9
4	6.85	42.069	49.859	48.289	25.2

<b>Limite plastico</b>				
<b>ID</b>	<b>Tara</b>	<b>Umido lordo</b>	<b>Secco lordo</b>	<b>W</b>
<b>[-]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[%]</b>
1	42.064	49.159	47.818	23.3
2	40.587	47.724	46.4	22.8

<b>Passante 63µm</b>	<b>Limite liquido</b>	<b>Limite plastico</b>	<b>Indice di plasticità</b>	<b>Indice di gruppo</b>	<b>Classificazione</b>
9.2	29.1	23.0	6.1	0.0	A2-4

## Terreno E07 – Distribuzione Granulometrica

Setaccio	Trattenuto	Trattenuto <sub>prog</sub>	Trattenuto <sub>prog</sub>	Passante <sub>prog</sub>
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
63	626.1	626.1	4.6	95.4
45	719.9	1346.0	9.8	90.2
31.5	1227.9	2573.9	18.8	81.2
22.4	1289.1	3863.0	28.2	71.8
20	183.2	4046.2	29.6	70.4
14	947	4993.2	36.5	63.5
10	676.2	5669.4	41.4	58.6
6.3	787.9	6457.3	47.2	52.8
4	645.1	7102.4	51.9	48.1
2	814.4	7916.8	57.8	42.2
1	806.7	8723.5	63.7	36.3
0.4	921.6	9645.1	70.4	29.6
0.125	993.9	10639.0	77.7	22.3
0.063	707.9	11346.9	82.9	17.1
Filler	2344.5	13691.4	100.0	-
Somma	13691.4			



## Terreno E07 – Limiti di Atterberg

Limite liquido					
ID	Penetrazione	Tara	Umido lordo	Secco lordo	W
[-]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]
1	6.15	33.993	39.806	38.402	31.8
2	7.80	40.795	48.791	46.731	34.7
3	9.20	40.046	47.526	45.54	36.1
4	13.70	39.35	44.348	42.916	40.2

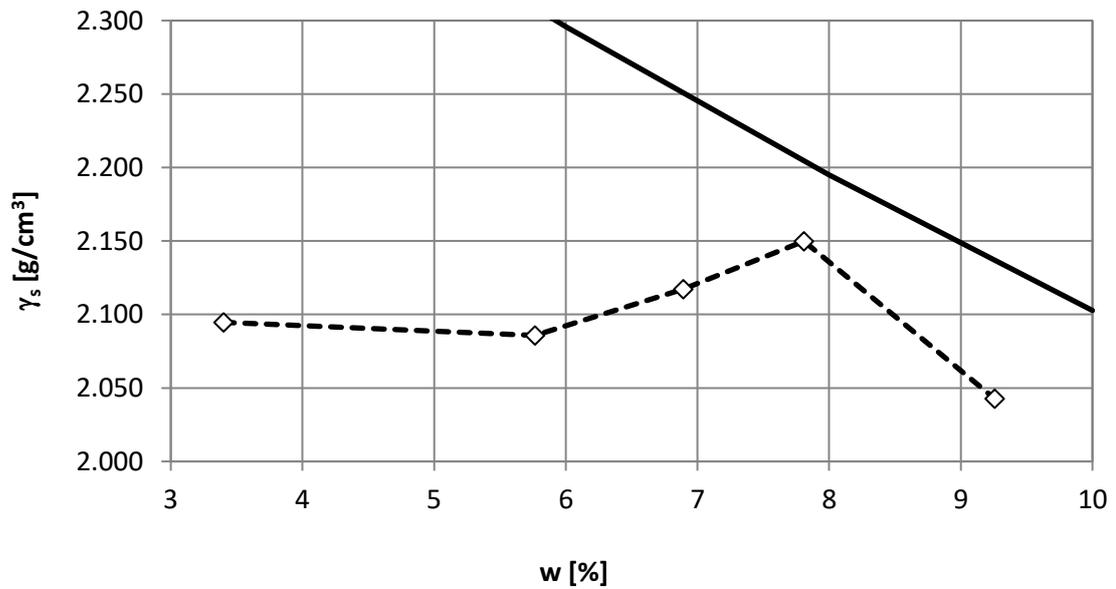
Limite plastico				
ID	Tara	Umido lordo	Secco lordo	W
[-]	[g]	[g]	[g]	[%]
1	44.846	53.742	51.995	24.4
2	40.591	48.848	47.173	25.4

Passante 63µm	Limite liquido	Limite plastico	Indice di plasticità	Indice di gruppo	Classificazione
17.1	37.0	24.9	12.1	0.0	A2-6

# Annesso B

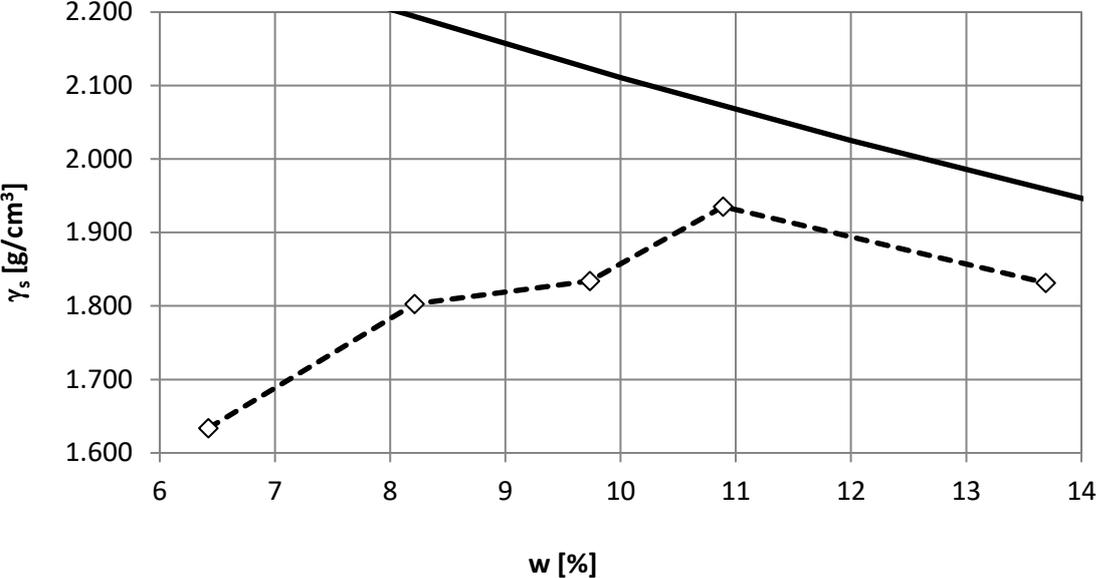
## F029 – Proctor

ID	$P_F$	$P_{F+M}$	$P_M$	$V$	$w$	$\gamma_u$	$\gamma_s$	CBR
	[g]	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	
4	9971.7	14564.7	4593.0	2120.58	3.40	2.166	2.095	46.2
6	9971.3	14649.3	4678.0	2120.58	5.77	2.206	2.086	92.8
8	9971.0	14770.2	4799.2	2120.58	6.89	2.263	2.117	35.3
10	9971.2	14886.2	4915.0	2120.58	7.81	2.318	2.150	2.7
12	9970.9	14703.7	4732.8	2120.58	9.26	2.232	2.043	0.7



**E07 – Proctor**

ID	$P_F$	$P_{F+M}$	$P_M$	$V$	$w$	$\gamma_u$	$\gamma_s$	<b>CBR</b>
	[g]	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
6	9963.1	13650.5	3687.4	2120.58	6.42	1.739	1.634	46.2
8	9963.1	14099.8	4136.7	2120.58	8.21	1.951	1.803	92.8
10	9963.1	14231.5	4268.4	2120.58	9.74	2.013	1.834	35.3
12	9963.1	14513.7	4550.6	2120.58	10.89	2.146	1.935	2.7
14	9963.1	14378.4	4415.3	2120.58	13.69	2.082	1.831	0.7



# Bibliografia

---

- [1] ICAO *Technical Specifications – Annex 14 Aerodromes Design and Operations*;
- [2] Pesando Nicola *Prove 2006 Sperimentali e Modelli Analitici per lo Studio delle Prestazioni delle Runway Strip Aeroportuali*;
- [3] Regolamento per la navigazione aerea – Art. 6;
- [4] ENAC *Regolamento per la Costruzione e l'Esercizio degli Aeroporti – Cap. 1-5*;
- [5] ICAO *2020 Annual Safety Report*;
- [6] P. Di Mascio, M. Cosciotti, R. Fusco, L. Moretti *2020 Runway Veer-Off Risk Analysis: An International Airport Case Study*;
- [7] ICAO *Aerodrome Design Manual – Pt.1*;
- [8] ENAC *Circolare: Linee guida per l'adeguamento delle strip aeroportuali*;
- [9] ASTM *D6951/D6951M-18 Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow pavement Applications*;
- [10] CNR. B.U. Anno VI – N.22/1972. *Peso specifico apparente di una terra in sito*;
- [11] CNR. B.U. Anno VI – N.22/1972. *Peso specifico apparente di una terra in sito*;

- [12] 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;*
- [13] UNI EN ISO 17892-12:2018. *Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 12: Determinazione dei limiti liquidi e plastici;*
- [14] 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;*
- [15] UNI EN ISO 17892-3:2016. *Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 3: Determinazione della massa volumica dei granuli solidi;*
- [16] 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;*
- [17] Bekker, M. G. 1960 *Off-the-Road Locomotion;*
- [18] Wong J. Y. 2010 *Terramechanics and off-road vehicle engineering;*
- [19] Richemond L. D., Brueske N. W., De Bord K. J., et al. 1968 *Aircraft Dynamic Loads from Substandard Landing Sites;*
- [20] Crenshaw B. M. 1972 *Aircraft landing gear dynamic loads induced by soil landing fields. Volume I: Prediction model and wheel loads;*

- [21] Coutermarsh B. 2007 *Velocity effect of vehicle rolling resistance in sand;*
- [22] Benedetto A., D'Amico F., Tosti F. 2014 *Improving safety of runway overrun through the correct numerical evaluation of rutting in cleared and graded areas;*
- [23] Ranieri V., Berloco N., D'Auria D., Disalvo V., Fedele V., Intini P., Colonna P., 2021 *Determination of Bearing Capacity of Cleared and Graded Areas at Airport;*
- [24] Michelin Aircraft tire Engineering Data;
- [25] Shoop S. A., Diemand D., Wieder W. L., Mason G., Seman P. M. 2008 *Predicting California bearing ratio from trafficability cone index;*
- [26] BOEING 767 2021 *Airplane Characteristics for Airport Planning.*