



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

**SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE,  
AMBIENTALE E TERRITORIALE**

# Analisi dell'impatto tecnico ed economico dell'installazione di sistemi di arresto EMAS (Engineed Materials Arresting Systems)

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA CIVILE

Autrice: **Ludovica Postacchini**

Matricola: 251946

Relatore: Prof. Ing. Maurizio Crispino

Correlatore: Ing. Stefano Paracchini

Anno Accademico: 2024-25



## Abstract

Negli ultimi decenni, il trasporto aereo è cresciuto costantemente, consentendo a passeggeri e merci di percorrere lunghe distanze in tempi ridotti. L'aumento del traffico ha promosso lo sviluppo infrastrutturale e tecnologico degli aeroporti, parallelamente alla progettazione di velivoli più performanti ed efficienti.

In questo contesto, la sicurezza operativa è diventata prioritaria, soprattutto nelle fasi critiche di decollo e atterraggio, caratterizzate da un elevato rischio di overrun e undershoot, il cui impatto può essere mitigato tramite le Runway End Safety Areas (RESA), sebbene vincoli fisici o territoriali ne limitino spesso le dimensioni normative.

Questo lavoro si concentra sulla valutazione tecnica ed economica dell'installazione di un sistema di arresto EMAS (Engineered Materials Arresting System) come soluzione per mitigare i rischi derivanti da un overrun. Si dimostra come la progettazione possa rispondere ai requisiti normativi relativi alla progettazione, all'installazione e alla manutenzione, approfondendo le caratteristiche dei materiali, le capacità prestazionali e gli effetti sulla sicurezza di velivolo e occupanti. Viene inoltre proposta una classificazione degli EMAS secondo il contesto di installazione e un elenco di prove normalizzate per la verifica progettuale.

Particolare attenzione è rivolta alla sicurezza operativa offerta dal sistema d'arresto, indagando sui valori di decelerazione ammissibili per garantire la minimizzazione delle conseguenze potenziali di un overrun.

In ambito economico, si analizzano le metodologie di valutazione di un EMAS e delle alternative progettuali per conformare una RESA agli standard normativi, includendo stime dei costi di realizzazione e gestione. Infine, viene proposto un modello decisionale a supporto dei gestori aeroportuali nella definizione della soluzione progettuale più funzionale ed efficiente sulla base di vari criteri di valutazione, a seguito di una valutazione del rischio con l'inserimento di una nuova soglia nella matrice di rischio.

I risultati evidenziano come l'EMAS rappresenti una soluzione sicura, efficace ed economicamente vantaggiosa sotto molteplici punti di vista.

**Parole chiave:** aeroporti; sicurezza operativa; overrun; undershoot; Runway End Safety Area (RESA); EMAS; Engineered Materials Arresting System; decelerazione; progettazione aeronautica; manutenzione aeroportuale; analisi economica; valutazione del rischio; sicurezza dei passeggeri; sicurezza del velivolo; normative aeroportuale; efficienza operativa; modello decisionale; calcestruzzo cellulare.

## Abstract in lingua inglese

In the last decades, air transport has grown steadily, allowing passengers and cargo to cover long distances in reduced times. The increase in traffic has driven the infrastructural and technological development of airports, alongside the design of more efficient and higher-performing aircraft.

In this context, operational safety has become a priority, particularly during the critical phases of takeoff and landing, which are characterized by a high risk of overrun and undershoot, whose impact can be mitigated through Runway End Safety Areas (RESA), although physical or territorial constraints often limit their regulatory dimensions.

This work focuses on the technical and economic evaluation of the installation of an EMAS (Engineered Materials Arresting System) as a solution to mitigate the risks arising from an overrun. It is shown how the design can meet the regulatory requirements concerning design, installation, and maintenance, exploring material characteristics, performance capabilities, and the effects on the safety of both the aircraft and its occupants. A classification of EMAS based on the installation context is also proposed, along with a list of standardized tests for design verification.

Particular attention is given to the operational safety provided by the arresting system, analyzing the allowable deceleration values to ensure the minimization of potential overrun consequences.

From an economic perspective, methodologies for evaluating EMAS and alternative solutions to conform a RESA to regulatory standards are analyzed, including estimates of construction and maintenance costs. Finally, a decision-making model is proposed to support airport operators in defining the most functional and efficient design solution based on various evaluation criteria, following a risk assessment with the inclusion of a new threshold in the risk matrix.

The results highlight that EMAS represents a safe, effective, and economically advantageous solution from multiple perspectives.

**Key-words:** airports; operational safety; overrun; undershoot; Runway End Safety Area (RESA); EMAS; Engineered Materials Arresting System; deceleration; aeronautical design; airport maintenance; economic analysis; risk assessment; passenger safety; aircraft safety; airport regulations; operational efficiency; decision-making model; cellular concrete.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Abstract in lingua inglese</b>	<b>iii</b>
<b>Indice</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Inquadramento del problema di studio . . . . .	1
1.2 Finalità dello studio . . . . .	2
1.3 Motivazioni dello studio . . . . .	4
1.4 Metodologia e strumenti . . . . .	4
<b>2 I casi di overrun e undershoot</b>	<b>5</b>
2.1 La fuoriuscita di pista: overrun . . . . .	5
2.1.1 Statistiche generali e di overrun . . . . .	6
2.1.2 Fattori causali di un overrun . . . . .	9
2.1.3 Conseguenze di un overrun . . . . .	11
2.1.4 Volo Southwest Airlines 1248 . . . . .	12
2.2 L'atterraggio anticipato: undershoot . . . . .	13
2.3 Area di sicurezza a fine pista (RESA) . . . . .	15
2.3.1 Requisiti della RESA stabiliti da ICAO . . . . .	16
2.3.2 Requisiti della RESA stabiliti da EASA . . . . .	18
2.3.3 Requisiti della RESA stabiliti da FAA . . . . .	19
2.3.4 Requisiti della RESA stabiliti da ENAC . . . . .	20
2.4 Soluzioni ingegneristiche per la sicurezza a fine pista . . . . .	21
2.5 Aeroporti italiani di interesse . . . . .	23
2.5.1 Caso 1: RESA limitata da vincoli infrastrutturali e urbanistici . . . . .	24
2.5.2 Caso 2: RESA limitata da vincoli infrastrutturali e operativi . . . . .	24
2.5.3 Caso 3: RESA limitata da vincoli naturali . . . . .	25

<b>3</b>	<b>Il sistema di arresto EMAS</b>	<b>27</b>
3.1	Evoluzione storica degli EMAS . . . . .	27
3.2	Meccanismo di arresto . . . . .	30
3.3	Tipologie di EMAS nel mercato . . . . .	32
3.3.1	EMAS in blocchi di calcestruzzo alleggerito . . . . .	33
3.3.2	EMAS in schiuma di vetro . . . . .	36
3.4	Analisi degli overrun contenuti . . . . .	38
3.5	Problematica dell'undershoot . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Quadro normativo di riferimento</b>	<b>43</b>
4.1	International Civil Aviation Organization (ICAO) . . . . .	43
4.2	Federal Aviation Administration (FAA) . . . . .	48
4.3	European Union Aviation Safety Agency (EASA) . . . . .	54
4.4	Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Progettazione di un EMAS</b>	<b>59</b>
5.1	Progettazione geometrica . . . . .	59
5.1.1	Obiettivo e condizioni di progetto . . . . .	60
5.1.2	Modalità di progettazione e verifica . . . . .	60
5.1.3	Parametri progettuali di input . . . . .	63
5.1.4	Parametri di output . . . . .	66
5.1.5	Interfaccia pneumatici – letto d'arresto . . . . .	67
5.1.6	Modelli di calcolo e software di simulazione . . . . .	71
5.2	Progettazione planimetrica . . . . .	75
5.2.1	Base pavimentata . . . . .	76
5.2.2	Distanza di <i>setback</i> e <i>standoff</i> . . . . .	78
5.2.3	Rampe e gradini di accesso all'EMAS . . . . .	82
5.2.4	Circolazione interna adiacente all'EMAS . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Prove sui materiali e sul sistema EMAS</b>	<b>85</b>
6.1	Prove di caratterizzazione dei materiali . . . . .	85
6.1.1	Tipologie di materiali utilizzati . . . . .	86
6.1.2	Requisiti normativi dei materiali . . . . .	88
6.1.3	Prove EN e ISO . . . . .	90
6.2	Prove sul sistema d'arresto EMAS . . . . .	103
6.2.1	Prova del carico equivalente su ruota singola . . . . .	103
6.2.2	Prova su scala reale . . . . .	105

6.2.3	Test del deflusso delle acque . . . . .	105
6.2.4	Simulazioni di emergenza antincendio . . . . .	106
<b>7</b>	<b>Classificazione degli EMAS</b>	<b>109</b>
7.1	Obiettivo della classificazione . . . . .	109
7.2	Criterio di classificazione . . . . .	109
7.3	Classificazioni ICAO e FAA degli aeromobili . . . . .	110
7.4	Proposta di classificazione . . . . .	111
<b>8</b>	<b>Livello di sicurezza di un EMAS</b>	<b>115</b>
8.1	Il concetto di "sicurezza equivalente" . . . . .	115
8.1.1	Modelli di valutazione del livello di sicurezza . . . . .	117
8.2	Sicurezza del velivolo . . . . .	123
8.2.1	Collasso del carrello di atterraggio . . . . .	124
8.2.2	Ulteriori danni del velivolo . . . . .	126
8.3	Sicurezza degli occupanti . . . . .	130
8.3.1	Certificazione del sedile e dei sistemi di ritenuta . . . . .	132
8.3.2	Soglie di decelerazione . . . . .	133
8.4	La <i>crashworthiness</i> di un aeromobile . . . . .	136
8.4.1	Progettazione e verifica della <i>crashworthiness</i> . . . . .	137
8.4.2	Requisiti normativi della <i>crashworthiness</i> . . . . .	140
8.4.3	Correlazione con i <i>crash test</i> automobilistici . . . . .	141
8.5	Considerazioni finali . . . . .	143
<b>9</b>	<b>Manutenzione di un EMAS</b>	<b>145</b>
9.1	Requisiti normativi . . . . .	146
9.2	Operazioni di manutenzione . . . . .	147
<b>10</b>	<b>Analisi economica</b>	<b>151</b>
10.1	Considerazioni iniziali . . . . .	152
10.2	Stima del costo di vita utile di un EMAS . . . . .	154
10.2.1	FAA Order 5200.9 . . . . .	154
10.2.2	Problematiche della FAA Order 5200.9 . . . . .	158
10.2.3	Stima del costo di vita utile di un EMAS nel contesto italiano . . . . .	159
10.3	Stima del costo dello spostamento della soglia di pista . . . . .	162
10.3.1	Stima dei costi operativi . . . . .	163
10.3.2	Classificazione e scelta degli aeroporti analizzati . . . . .	164
10.3.3	Metodologia utilizzata . . . . .	168

10.3.4	Analisi di un aeroporto regionale . . . . .	170
10.3.5	Analisi di un aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	173
10.3.6	Analisi di un aeroporto di rilevanza internazionale . . . . .	176
10.4	Stima del costo dell'espansione fisica della RESA . . . . .	179
10.4.1	Costi di espansione dei confini aeroportuali . . . . .	180
10.4.2	Stima dei costi per la preparazione della RESA . . . . .	182
10.5	Stima del costo delle conseguenze . . . . .	184
10.5.1	Conseguenze sull'aeromobile . . . . .	185
10.5.2	Conseguenze sugli occupanti . . . . .	187
10.6	Confronto delle alternative progettuali . . . . .	188
<b>11</b>	<b>Proposta di un modello decisionale</b>	<b>193</b>
11.1	Valutazione del rischio . . . . .	193
11.1.1	Valutazione della probabilità di accadimento . . . . .	195
11.1.2	Valutazione della severità delle conseguenze . . . . .	196
11.1.3	Matrice di rischio . . . . .	197
11.1.4	Proposta di una soglia nella matrice di rischio . . . . .	198
11.2	Modello decisionale proposto . . . . .	200
<b>12</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>207</b>
	<b>Bibliografia e Sitografia</b>	<b>211</b>
	<b>A Allegato A</b>	<b>219</b>
	<b>B Allegato B</b>	<b>231</b>
	<b>C Allegato C</b>	<b>237</b>
	<b>D Allegato D</b>	<b>247</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>259</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>265</b>

# 1 | Introduzione

Negli ultimi decenni, il trasporto aereo ha conosciuto una crescita costante, permettendo a passeggeri e merci di percorrere lunghe distanze con semplicità e tempi ridotti.

Di fronte all'incremento del traffico aereo, gli aeroporti sono stati interessati da una progressiva espansione e un importante sviluppo dal punto di vista infrastrutturale e tecnologico, accogliendo anno dopo anno un numero sempre maggiore di passeggeri e merci. Parallelamente, il settore dell'ingegneria aeronautica ha proposto nuovi modelli di velivoli, progettati per garantire migliori prestazioni, un minor impatto ambientale ed un livello di comfort più elevato per i passeggeri.

In questo contesto, la sicurezza operativa nel mondo aeroportuale è diventata sempre più una priorità assoluta, assumendo un ruolo centrale tanto nella fase progettuale quanto in quella di esercizio.

In particolare, viene prestata grande attenzione alle due fasi di volo più critiche che si svolgono all'interno dell'infrastruttura aeroportuale: il decollo e l'atterraggio. Difatti, queste fasi rappresentano momenti ad alto rischio operativo, con numerosi fattori che simultaneamente concorrono ad influenzare il movimento del velivolo. Tra i principali elementi che possono condizionare tali manovre, si trovano le condizioni superficiali della pista (come contaminazioni di acqua, neve, ghiaccio o detriti), le condizioni atmosferiche e di visibilità, l'efficienza degli aiuti alla navigazione, oltre a variabili umane poco prevedibili.

## 1.1. Inquadramento del problema di studio

Durante il decollo e l'atterraggio, talvolta può verificarsi la fuoriuscita del velivolo dai limiti di pista (*overrun*) o il contatto anticipato con il suolo prima della soglia della pista (*undershoot*).

Nella definizione delle conseguenze di tali eventi, gioca un ruolo fondamentale la RESA (*Runway End Safety Area*), un'area di sicurezza posta a fine pista che funge da spazio aggiuntivo per ridurre il rischio di danni al velivolo e agli occupanti in caso di overrun e undershoot.

La RESA è sottoposta a normative specifiche riguardanti la sua posizione, le sue dimen-

sioni, gli oggetti presenti, le caratteristiche di capacità portante e le pendenze.

In molti casi, la presenza di vincoli fisici, ambientali e territoriali impedisce agli aeroporti di garantire una RESA che rispetti le dimensioni richieste dalle normative. Di fronte a tale problema, il contributo determinante di questa area nella mitigazione dei rischi nel caso di escursione dalla pista sottolinea la necessità di interventi progettuali che consentano di garantire un livello di sicurezza equivalente ad una RESA conforme alle normative.

Le soluzioni progettuali sono varie e la scelta della più adeguata richiede un'attenta analisi di tutti i fattori che influenzano l'overrun e l'undershoot e del contesto di inserimento. Ogni soluzione progettuale deve essere valutata non solo sotto un profilo tecnico – operativo, ma anche in termini di sostenibilità ambientale ed economica, cercando di conciliare nel miglior modo possibile l'esigenza di garantire livelli di sicurezza accettabili con le risorse effettivamente disponibili dal gestore aeroportuale.

Tra le possibili alternative si trova l'espansione della RESA sfruttando gli spazi disponibili dell'aeroporto o acquisendo nuovi terreni, la riduzione delle distanze dichiarate (*Declared Distances*) con eventuali limitazioni operative, il riallineamento di pista oppure l'adozione di sistemi di arresto.

Il principale sistema di arresto è l'EMAS (*Engineered Materials Arresting System*), un letto di arresto realizzato con materiali a bassa resistenza, progettato per deformarsi progressivamente sotto il carico del carrello anteriore di un aereo, imponendo così su di esso una decelerazione controllata, e arrestarlo in sicurezza al suo interno, scongiurando danni strutturali e sugli occupanti.

A differenza delle altre alternative progettuali che mirano ad estendere fisicamente la RESA, l'EMAS è un sistema di sicurezza passiva progettato specificamente per arrestare il velivolo in modo controllato assorbendone l'energia cinetica, garantendo un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA conforme alle normative vigenti.

## 1.2. Finalità dello studio

L'obiettivo del presente elaborato è fornire una valutazione tecnica ed economica del sistema di arresto EMAS, analizzandone le caratteristiche funzionali e prestazionali in termini operativi ed economici.

Dal punto di vista tecnico, si esaminano le modalità di progettazione e manutenzione del sistema, con particolare attenzione ai meccanismi di arresto indotti dal letto e alle decelerazioni imposte sul velivolo, e si confrontano le due principali tipologie di EMAS attualmente presenti nel mercato.

Dal momento che il meccanismo di arresto è strettamente correlato alla natura dei materiali costituenti il letto, viene condotta un'analisi dettagliata delle loro caratteristiche chimiche e fisiche, proponendo un set di prove normalizzate secondo standard UNI EN e ISO da effettuare su di essi per verificarne la conformità ai requisiti normativi. Vengono poi proposte delle prove da effettuare sull'intero sistema per valutarne l'efficacia e la sicurezza.

Nell'elaborato viene dato ampio spazio alla valutazione del rischio, approfondendo in particolare le conseguenze che scaturiscono dalle decelerazioni imposte dal sistema, in termini di danni strutturali del velivolo ed effetti sugli occupanti.

Inoltre, si propone una classificazione progettuale del sistema, scegliendo come criterio il peso massimo ammesso al decollo (MTOW) per la famiglia di velivoli operanti più di frequente nella pista interessata dall'intervento. Tale classificazione si propone come uno strumento di supporto per l'azienda produttrice e il gestore aeroportuale.

Dal punto di vista economico, si propone una stima del costo di vita utile di un sistema EMAS, considerando in un arco di 20 anni i costi relativi alla preparazione del sito, all'installazione, alla manutenzione e alla sostituzione del letto stesso.

Il costo di vita utile del sistema (*Life Cycle Cost, LCC*) viene così utilizzato per eseguire un confronto con i costi relativi alle altre soluzioni progettuali.

Difatti, l'analisi considera scenari con e senza EMAS, oltre a scenari con altre alternative progettuali per conformare la RESA alle normative, al fine di valutare la convenienza complessiva dell'investimento.

In riferimento alle limitazioni operative da imporre, ad esempio nel caso di accorciamento della pista, viene condotto uno studio dei costi operativi da sostenere in funzione della perdita di passeggeri, conseguente alla diminuzione del peso massimo ammesso per il decollo dell'aereo critico.

Infine, viene introdotta una nuova soglia di intervento nella matrice di rischio e viene sviluppato un modello decisionale per stabilire la necessità di intervento tramite un'analisi del rischio (*Risk Assessment*), al fine di identificare la tipologia di intervento più adeguata in funzione di criteri quali la sicurezza operativa, l'impatto economico e la convenienza ambientale e operativa.

Tale modello può rappresentare uno strumento di supporto nella fase decisionale di un gestore aeroportuale, utile a definire l'intervento più adeguato in base al sito e alle risorse disponibili.

Dunque, l'analisi dell'impatto tecnico ed economico del sistema è finalizzata a dimostrare

come l'EMAS rappresenti una soluzione vantaggiosa e sicura, progettata specificamente per arrestare in sicurezza un velivolo al suo interno e garantendo dei benefici economicamente quantificabili in caso di overrun e undershoot superiori all'investimento iniziale richiesto per la sua installazione.

### 1.3. Motivazioni dello studio

Il sistema di arresto EMAS è nato e si è sviluppato principalmente negli aeroporti degli Stati Uniti d'America, dove è stato promosso dalla *Federal Aviation Administration* (FAA) americana.

Attualmente in Europa, nonostante la loro efficacia sia riconosciuta a livello internazionale ed il sistema trattato nelle normative EASA, solamente gli aeroporti di Madrid – Barajas e di Zurigo – Kloten dispongono di letti d'arresto EMAS.

Pertanto, questa tesi intende dimostrare come il sistema di arresto EMAS possa essere una soluzione conveniente, sicura ed efficace anche in territorio italiano, sia in termini di mitigazione del rischio che in termini di ottimizzazione dei costi rispetto ad altre strategie possibili.

### 1.4. Metodologia e strumenti

Lo studio sviluppato nel presente elaborato è stato condotto a partire da un'attenta analisi delle normative vigenti in campo aeroportuale dei principali enti regolatori a livello internazionale e nazionale: ICAO, EASA, FAA ed ENAC.

L'analisi di tali documenti si è focalizzata sulle caratteristiche richieste alla RESA e sulle possibili alternative progettuali da mettere in atto, con particolare riferimento ai letti d'arresto EMAS.

Per valutare la situazione italiana, è stata condotta un'indagine su alcune casistiche particolari in territorio nazionale, con l'obiettivo di individuare casi critici in cui l'estensione della RESA risulta limitata da vincoli territoriali o infrastrutturali.

Le informazioni sulla progettazione e sull'installazione del sistema di arresto EMAS sono state ricavate dalle schede tecniche dell'attuale azienda produttrice delle due principali tipologie di letti presenti nel mercato, di origine svedese.

I dati raccolti dalle normative e da numerose pubblicazioni e articoli sono stati organizzati ed elaborati tramite fogli di calcolo Excel, al fine di effettuare confronti, classificazioni e valutazioni tecniche ed economiche.

## 2 | I casi di overrun e undershoot

Nel mondo aeronautico gran parte dei più gravi incidenti aerei si verifica durante le due fasi critiche di decollo e atterraggio.

Secondo il Rapporto Annuale sulla Sicurezza del 2024 (*IATA's Safety Report 2024*) condotto dalla *International Air Transport Association* [75], organizzazione internazionale di compagnie aeree con sede a Montréal (Quebec, Canada), la tipologia di incidente più comune negli ultimi dieci anni è stata l'escursione di pista, divenuta uno dei principali fattori di preoccupazione e discussione nel mondo della sicurezza aeroportuale.

Nei casi di incidente più gravi, le escursioni di pista hanno provocato seri danni all'infrastruttura aeroportuale e al velivolo stesso, ma soprattutto numerosi feriti e, nei casi più sfortunati, un numero considerevole di morti.

Studiare i fattori causali e le possibili conseguenze di tali eventi è di fondamentale importanza per definire le strategie di mitigazione da mettere in atto, come strumento univoco di prevenzione e protezione.

Come principale misura di mitigazione dei rischi, le normative internazionali (ICAO, FAA, EASA) prevedono a fine pista un'area ulteriore di sicurezza per accogliere un aereo in overrun denominata RESA (*Runway End Safety Area*), specificandone caratteristiche e dimensioni necessarie in base alla tipologia di pista.

Tuttavia, per alcuni aeroporti non è possibile soddisfare le dimensioni richieste dalla normativa e dunque, in ordine da garantire un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA conforme alle normative vigenti, sono tenuti ad adottare delle strategie alternative di intervento quali interventi infrastrutturali, limitazioni operative e sistemi di arresto.

### 2.1. La fuoriuscita di pista: overrun

Per definizione, un'escursione di pista (*runway excursion*) è un evento in cui un aeromobile fuoriesce dai limiti della pista, lateralmente (*veer-off*) o longitudinalmente (*overrun*).

In particolare, l'overrun si verifica quando il velivolo oltrepassa il limite ultimo della pista durante la fase di atterraggio o a seguito di un decollo interrotto, a causa dell'impossibilità di arrestarsi entro le distanze disponibili.

### 2.1.1. Statistiche generali e di overrun

Negli ultimi decenni, numerosi studi e rapporti aeronautici redatti dagli enti normativi internazionali e nazionali e dalle case produttrici di aeromobili hanno registrato un costante aumento del traffico aereo, di pari passo con uno sviluppo delle infrastrutture aeroportuali e della tecnologia aeronautica.

La domanda nel settore del trasporto aereo è in continua crescita a livello globale, riprendendosi in particolare dalla pandemia da COVID-19, nonostante alcune fluttuazioni temporanee legate a fattori come crisi economiche ed eventi geopolitici.

Nel gennaio 2025 l'International Air Transport Association (IATA) ha rilevato un incremento del 10% della domanda passeggeri rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente e prevede il raggiungimento di un traffico passeggeri di 5,2 miliardi nel 2025. Questo aumento è stato accompagnato da un record storico del coefficiente di riempimento dei voli (*load factor*), che ha raggiunto l'82,1% su scala globale.[34]

Tutto ciò si spiega con una maggiore soddisfazione e fiducia da parte dei passeggeri, che di frequente riconoscono nel trasporto aereo il mezzo più veloce, sicuro ed economicamente conveniente tanto nelle brevi quanto nelle lunghe distanze.

Parallelamente, lo sviluppo di nuove tecnologie a bordo e nelle infrastrutture di terra ha contribuito ad incrementare il livello di sicurezza operativa generale del volo, così che, nonostante la crescita sostenuta del traffico aereo, il numero di incidenti è decresciuto gradualmente.

Ciò è stato dimostrato dal Rapporto Statistico sugli Incidenti dei jet commerciali condotto nell'aprile 2025 dalla compagnia Boeing [94], una delle principali aziende aerospaziali del mondo, che riporta l'andamento dal 1975 al 2024 del tasso incidentale per milione di movimenti, in riferimento alla crescita totale delle partenze nelle varie decadi:

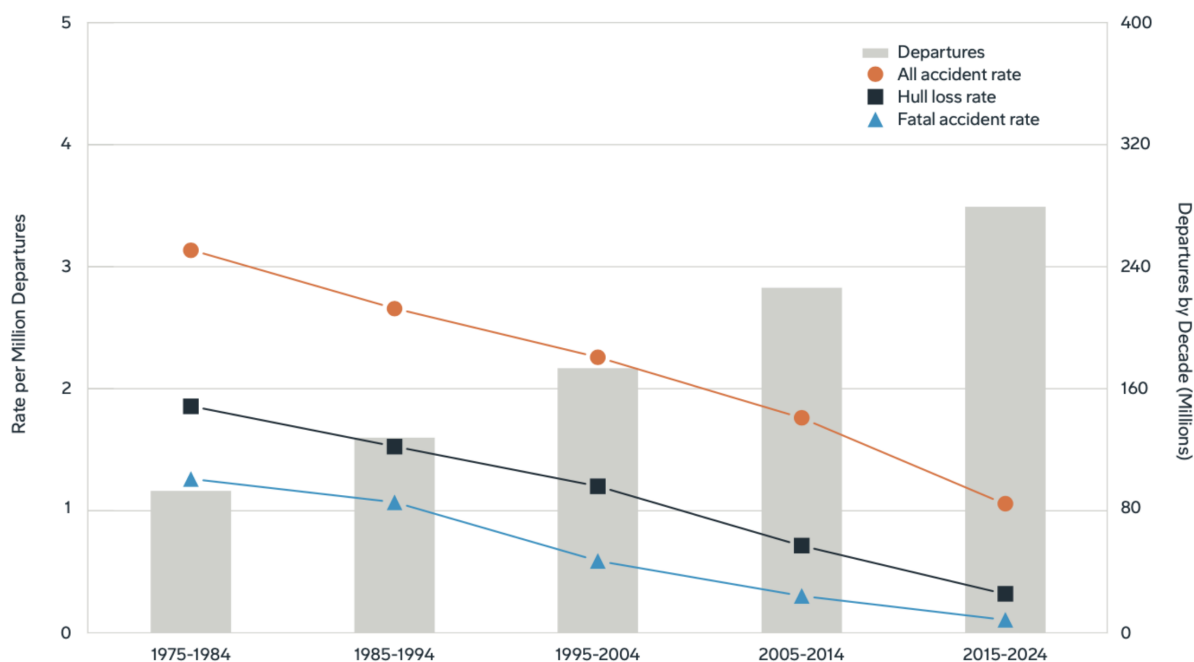


Figura 2.1: Tassi incidentali per milione di partenze e partenze totali, Panoramica decennale (Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, The Boeing Company, Aprile 2025)

Oltre al tasso di incidenti, il grafico mostra anche l'andamento del tasso di perdita totale dell'aeromobile (*hull loss rate*) e del tasso di fatalità degli incidenti (*fatal accident rate*), che registrano anch'essi un decremento graduale negli anni.

Gli incidenti aerei comprendono diverse tipologie di eventi, tra le quali l'escursione di pista rappresenta una delle più rilevanti in termini di frequenza e rischio per le possibili conseguenze.

Secondo la valutazione del rischio per la sicurezza condotta dalla IATA riguardo le escursioni di pista nel 2025 (*Runway Excursion, Safety Risk Assessment*) [74], nell'ultimo decennio (2015-2024) il 21% del totale degli incidenti avvenuti è rappresentato dalle escursioni di pista, per un totale di 104 incidenti di questo tipo di cui 8 fatali, portando a 88 morti totali. Ciò si traduce in un tasso incidentale di circa 0,36 incidenti per milione di voli (livello pre- pandemia).

In particolare, nel 2024 le escursioni di pista sono state una delle tipologie di incidente più comuni, con un numero di accadimenti cinque volte maggiore rispetto a quello del 2023 e comunque superiore a quello medio degli ultimi cinque anni.

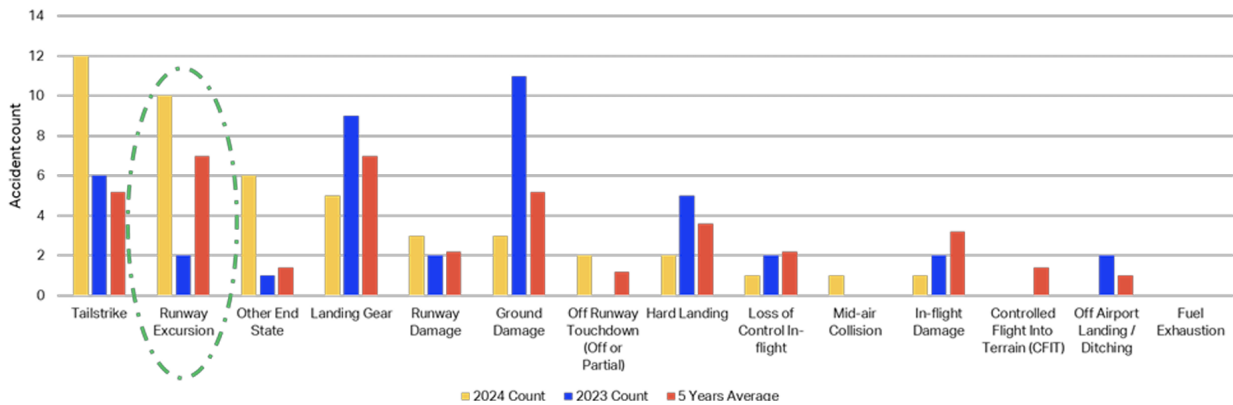


Figura 2.2: Escursioni di pista nel 2023, 2024 e negli ultimi cinque anni (Runway Excursion, Safety Risk Assessment, IATA, Maggio 2025 [76])

Negli ultimi 20 anni, la maggior parte degli incidenti aerei è avvenuta durante la fase di atterraggio.

Secondo l'Analisi Statistica sugli Incidenti dell'Aviazione Commerciale tra il 1958 e il 2023 condotta dalla compagnia Airbus [39], altra importante azienda aerospaziale nel mondo, le escursioni di pista sono la principale causa di perdita totale dell'aeromobile e la terza causa di fatalità nel mondo dell'aviazione. La fase operativa più critica è l'atterraggio, che da sola raggiunge circa l'80% delle escursioni di pista registrate nell'ultimo decennio. In generale, le escursioni sono per il 54% laterali (veer-off), per il 47% longitudinali (overrun) e solo per il 3% a seguito di un decollo interrotto.

Esse coinvolgono per il 77% voli passeggeri e soprattutto i Paesi delle tre macroregioni geografiche ASPAC (Asia – Pacifico), AFI (Africa) e LATAM/CAR (America Latina e Caraibi).

Il Report 3 dell'*Airport Cooperative Research Program* (ACRP) [40], un programma di ricerca statunitense promosso dal TRB (*Transportation Research Board*) e sponsorizzato dalla FAA (*Federal Aviation Administration*), riporta un'analisi degli overrun e undershoot analizzando dati di incidenti avvenuti in vari Paesi nel mondo fino al 2007 e dimostrando la netta prevalenza di escursioni di pista longitudinali in atterraggio:

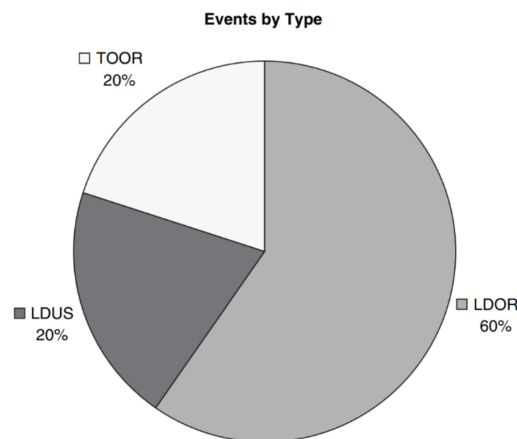


Figura 2.3: Distribuzione degli eventi (LDOR Overrun in atterraggio, TOOR Overrun in decollo, LDUS Undershoot in atterraggio) (Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas, ACRP Report 3, 2008)

### 2.1.2. Fattori causali di un overrun

Le cause alla base di un overrun sono molteplici e spesso interagiscono tra di loro.

Esse possono essere ricondotte a tre principali macrocategorie: errore umano, condizioni ambientali sfavorevoli e guasti dell'aeromobile, spesso riconducibili ad una scarsa manutenzione.

L'errore umano è la causa più frequente negli incidenti di overrun ed include:

- Velocità di atterraggio eccessivamente elevata
- Atterraggio lungo
- Interruzione del decollo ad una velocità superiore a quella decisionale V1
- Ritardo utilizzo scorretto del sistema frenante
- Altezza scorretta durante la fase di approccio
- Mancato rispetto delle procedure

Le condizioni ambientali sfavorevoli possono essere di vario tipo ed includono:

- Pista contaminata (bagnata, innevata o ghiacciata)
- Condizioni meteo avverse
- Condizioni di illuminazione scarse
- Condizioni di scarsa visibilità o Presenza di vento in coda

I guasti dell'aeromobile si riferiscono a:

- Guasti al sistema frenante
- Problemi ai carrelli
- Malfunzionamento degli spoiler o degli inversori di spinta
- Malfunzionamento dei sensori e altre apparecchiature di bordo

Uno studio condotto nel 2014 dall'ente normativo europeo EASA (*European Aviation Safety Agency*) sulla definizione di modelli e metodi per la valutazione del rischio all'interno delle aree di sicurezza di fine pista (RESA) ha evidenziato i principali fattori causali di un overrun, distinto nelle due fasi di atterraggio e decollo [61]:

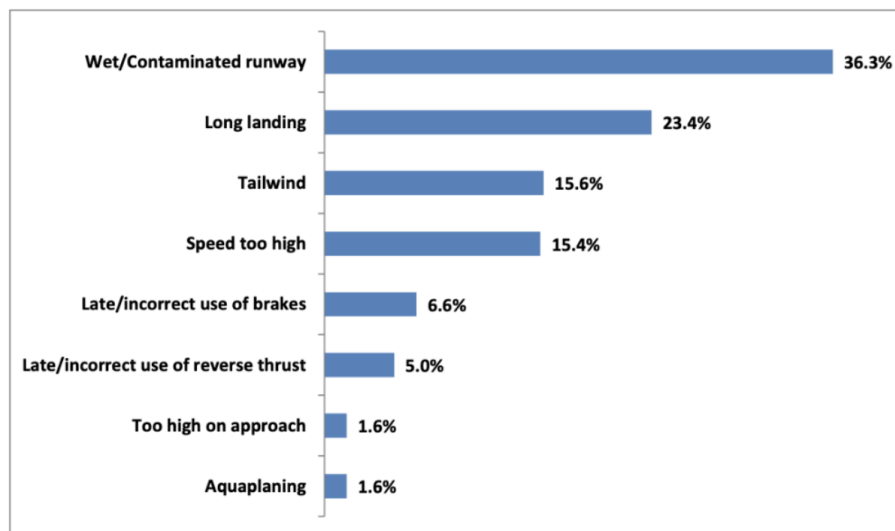


Figura 2.4: Fattori causali di un overrun in atterraggio (Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas, EASA, 2014)

Per un overrun in fase di atterraggio, si nota che le condizioni ambientali (condizioni di pista e vento in coda) e l'errore umano (atterraggio lungo e velocità eccessiva) sono i principali fattori determinanti di tale evento.

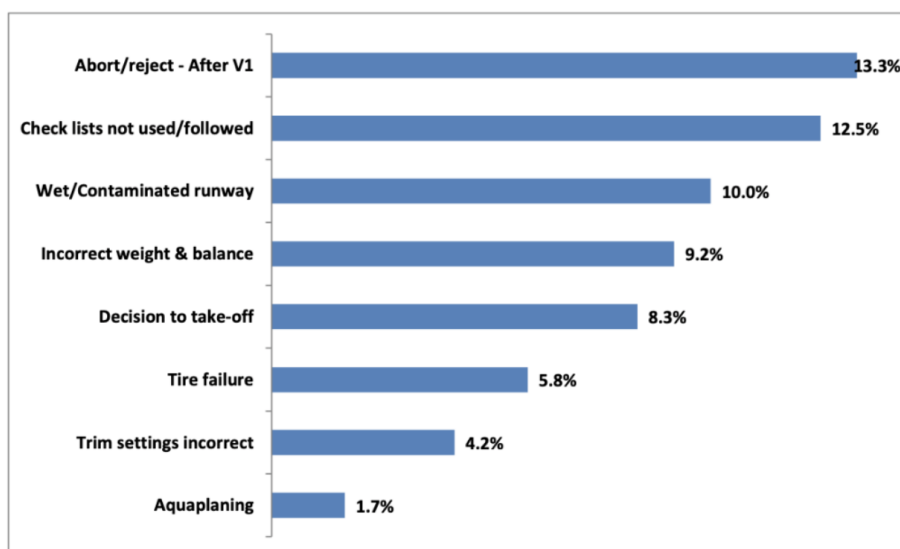


Figura 2.5: Fattori causali di un overrun in decollo (Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas, EASA, 2014)

Nel caso di un overrun a seguito di un decollo interrotto, il principale fattore scatenante dell'evento è riconducibile all'errore umano, in particolare per la scelta di interrompere il decollo ad una velocità superiore a quella decisionale V1 e per il mancato rispetto dei procedimenti di atterraggio previsti.

L'azienda produttrice Airbus ha identificato nella gestione dell'energia dell'aeromobile una delle principali cause alla base di un evento di overrun. Pertanto, da oltre quindici anni i suoi modelli sono equipaggiati con un sistema avanzato di supporto decisionale per il pilota detto ROPS (*Runway Overrun Prevention System*), progettato per aumentare la sicurezza in atterraggio. Esso fornisce in tempo reale previsioni sulla capacità di arresto del velivolo rispetto alla pista disponibile, emettendo avvisi e indicazioni operative qualora venga rilevato un potenziale rischio di uscita di pista.

Con questa nuova tecnologia di bordo, l'Airbus ha registrato una diminuzione della fatalità degli incidenti di overrun e delle perdite totali dell'aeromobile.

### 2.1.3. Conseguenze di un overrun

Il Report annuale dell'azienda Airbus [39] afferma che la continua crescita del movimento aereo a livello mondiale comporta un aumento dell'esposizione al rischio e dunque delle sfide in campo di sicurezza operativa nel mondo dell'aviazione per i prossimi 20 anni.

La severità delle conseguenze derivanti da un overrun è determinata sia dalle caratteristiche dell'area di sicurezza oltre il fine pista (RESA) dell'aeroporto sia dalla velocità alla

quale il velivolo fuoriesce dalla pista stessa.

Le dimensioni della RESA rivestono un ruolo cruciale: infatti, qualora l'aeromobile riuscisse ad arrestarsi al suo interno, le conseguenze si limitano generalmente a danni contenuti al velivolo e lesioni lievi per gli occupanti. Al contrario, nel caso in cui la RESA non risulti conforme alle normative vigenti e non ci siano delle misure di mitigazione del rischio, le conseguenze possono diventare esponenzialmente più dannose, traducendosi in gravi danni alla struttura dell'aeromobile con possibile perdita totale del mezzo e lesioni anche mortali sugli occupanti.

Per tale motivo, è essenziale garantire che la RESA rispetti i requisiti normativi. Quando vincoli spaziali o altre limitazioni impediscono il rispetto di tali requisiti, è necessario individuare la strategia di mitigazione del rischio che meglio assicuri un livello di sicurezza equivalente.

In generale, le conseguenze di un overrun sono frutto della gravità dei danni che ne seguono, tanto sulla struttura dell'aeromobile quanto sugli occupanti.

La sicurezza degli occupanti rappresenta un obiettivo primario, ancor più rilevante dell'integrità strutturale del velivolo. A tal proposito un concetto di fondamentale importanza che verrà approfondito in seguito è quello di *crashworthiness*: la capacità del velivolo di proteggere i suoi occupanti durante un impatto. Progettare la *crashworthiness* di un aeromobile vuol dire realizzare un mezzo in grado di resistere anche alle sollecitazioni generate dall'overrun, assicurando un livello minimo di lesioni sulle persone a bordo.

Le conseguenze di un incidente hanno inoltre dei risvolti economici: maggiori sono le conseguenze di un incidente, maggiori saranno i costi associati. Pertanto, per ogni strategia di mitigazione del rischio è necessario eseguire un'analisi dell'impatto economico, confrontando i costi di investimento con i benefici monetizzabili derivanti dalla riduzione del rischio.

#### 2.1.4. Volo Southwest Airlines 1248

L'8 dicembre 2005, durante la fase di atterraggio in una tempesta di neve, un Boeing 737-700 della Southwest Airlines proveniente da Baltimora (Maryland, USA) uscì di pista all'aeroporto di Chicago-Midway (Illinois, USA), schiantandosi nel traffico automobilistico e uccidendo una bambina di sei anni che si trovava in un veicolo.

La pista risultava innevata e bagnata e la visibilità era ridotta a circa un chilometro e mezzo; dopo aver toccato il suolo, l'aereo slittò sulla pista e il carrello di atterraggio anteriore collassò, portando il 737 a sfondare un muro circondante l'aeroporto e a finire nell'incrocio tra la Central Avenue e la 55<sup>a</sup> strada.

Oltre alla morte della bambina, si registrarono in totale dodici feriti. [30][85]

Le indagini condotte dalla NTSB (*National Transportation Safety Board*), agenzia indipendente statunitense che si occupa dell'investigazione degli incidenti nel settore dei trasporti, hanno rivelato che la causa principale non è identificabile solamente nelle condizioni ambientali avverse, ma anche nell'errore umano del pilota che ha azionato gli inversori di spinta con un ritardo di 18 secondi rispetto all'atterraggio, momento ormai troppo tardivo per evitare l'overrun.

L'incidente del volo Southwest Airlines 1248 è stato un evento significativo di overrun che evidenzia l'importanza cruciale di una RESA e dimostra come un overrun possa essere altamente rischioso non solo per gli occupanti dell'aeromobile e per il personale di terra, ma anche per l'ambiente esterno all'aeroporto.



Figura 2.6: Incidente del volo Southwest Airlines 1248 (8 dicembre 2005), Wikipedia

## 2.2. L'atterraggio anticipato: undershoot

Per *undershoot* si intende un evento in cui un aeromobile in fase di atterraggio non riesce a raggiungere la soglia della pista e tocca il suolo prima dell'inizio della pavimentazione.

Come nel caso di un overrun, le cause principali sono riconducibili alle tre macrocategorie di errore umano, condizioni ambientali avverse e guasti dell'aeromobile.

Lo stesso studio visto precedentemente condotto nel 2014 dall'ente normativo europeo

EASA (*European Aviation Safety Agency*) [61] ha identificato i principali fattori causali di un undershoot in fase di atterraggio:

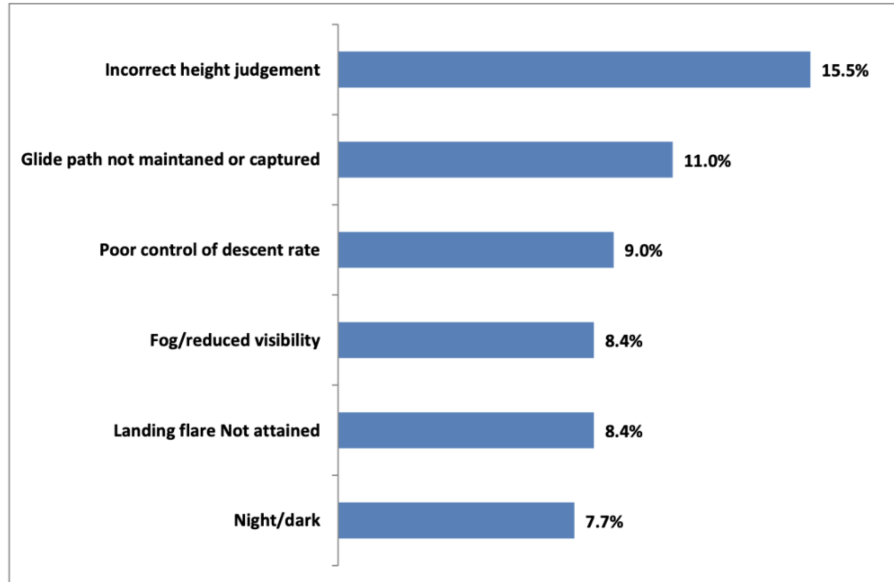


Figura 2.7: Fattori causali di un undershoot in atterraggio (Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas, EASA, 2014 [61])

Come si evince dallo studio, l'errore umano risulta il fattore più rilevante, legato in maniera principale ad una valutazione scorretta dell'altezza da parte del pilota che dunque esegue un atterraggio anticipato, toccando il suolo prima dell'inizio della pavimentazione.

Le conseguenze derivanti da un undershoot possono essere estremamente gravi: l'impatto anticipato del carrello con il suolo o con un'altra superficie non adibita all'atterraggio può comportare seri danni strutturali all'aeromobile, compromettendo l'integrità del carrello e la perdita di controllo del mezzo da parte del pilota.

Dunque, le conseguenze finali possono tradursi in lesioni gravi o fatali sugli occupanti e danni gravi alla fusoliera e ad altri sistemi del velivolo e dell'infrastruttura aeroportuale.

Tuttavia, pur essendo un evento potenzialmente distruttivo e pericoloso, l'undershoot è statisticamente meno frequente rispetto ad una escursione di pista, sia essa laterale o longitudinale.

La sua bassa probabilità di accadimento è dovuta a diversi fattori, tra cui i numerosi strumenti di aiuto alla navigazione e all'atterraggio, l'addestramento dei piloti nell'eseguire manovre di riattaccata (*go-around*) in caso di profilo di discesa incerto e le procedure di avvicinamento strumentali.

Come verrà approfondito successivamente, il letto di arresto EMAS (Engineered Materials Arresting System) è un sistema progettato appositamente per arrestare un velivolo al suo interno nel caso di un overrun.

La presenza di un EMAS potrebbe pertanto risultare problematica per un aeromobile in undershoot, poiché la superficie è realizzata con materiali a bassa resistenza e non è progettata per un impatto da atterraggio, bensì per accogliere un velivolo in overrun e arrestarlo al suo interno cedendo sotto il peso del carrello. A spiegazione di ciò, la presenza di un EMAS potrebbe arrivare ad amplificare il rischio di incidente in un undershoot.

Pertanto, al fine di minimizzare i rischi anche nel caso di atterraggio anticipato, la soluzione più adeguata è collocare l'EMAS il più lontano possibile dal fine pista, in modo tale da scongiurare l'atterraggio di un aeromobile in undershoot su di esso ed evitare così conseguenze potenzialmente molto dannose.

Il presente elaborato analizzerà l'impatto tecnico ed economico del sistema EMAS, dimostrandone l'efficacia nel mitigare i rischi nel caso di overrun. La sicurezza del sistema non risulta significativamente compromessa dal rischio di undershoot, in quanto tale evento si presenta con una frequenza statisticamente molto inferiore rispetto all'overrun. Inoltre, ove tecnicamente e operativamente possibile, l'EMAS viene installato a una distanza dal fine pista tale da contribuire alla mitigazione anche dei rischi connessi a un eventuale undershoot.

### 2.3. Area di sicurezza a fine pista (RESA)

L'area di sicurezza a fine pista, in inglese *Runway End Safety Area* e spesso denominata semplicemente RESA, è un'area simmetrica rispetto al prolungamento dell'asse longitudinale della pista, libera da ostacoli e con specifiche caratteristiche fisiche, volta a minimizzare il rischio di danni all'aeromobile e ai suoi occupanti nel caso di un atterraggio troppo corto (undershoot) o di un'escursione di pista longitudinale (overrun) a seguito di un atterraggio o di un decollo interrotto.

La RESA è la prima misura di mitigazione del rischio in caso di overrun e undershoot che viene prevista in un aeroporto.

In overrun, la presenza di un'area aggiuntiva a fine pista consente all'aeromobile di arrestarsi in sicurezza limitando i danni alla struttura, ai passeggeri e all'equipaggio.

Allo stesso modo, in undershoot, la RESA consente all'aeromobile di toccare il suolo prima dell'inizio della pavimentazione in uno spazio libero da ostacoli e dunque sicuro per un atterraggio anticipato.

Nei paragrafi seguenti verranno analizzati in dettaglio i requisiti stabiliti dai principali

enti regolatori del settore aeronautico, a partire dall'organizzazione internazionale ICAO, passando per l'agenzia europea EASA e per quella statunitense FAA, fino a giungere all'ente nazionale italiano ENAC.

Come si vedrà di seguito, le normative presentano differenze sottili ma significative, che meritano di essere evidenziate.

### 2.3.1. Requisiti della RESA stabiliti da ICAO

L'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) è un'agenzia autonoma delle Nazioni Unite, principale ente di normazione e regolamentazione al mondo con sede a Montréal (Canada). Esso stabilisce gli standard e le raccomandazioni riguardanti l'aviazione civile e la navigazione aerea.

La normativa di riferimento per la RESA è il *Doc 9157 – Aerodrome Design Manual* [79], della quale vengono riportati alcuni estratti significativi, tradotti in italiano, del paragrafo 5.4 del documento, riguardo l'area di sicurezza alla fine della pista:

*“ 5.4.1 I Rapporti ICAO sugli Accidenti/Incidenti Aeronautici (ADREP) hanno indicato che gli aeromobili che in undershoot o overrun durante gli atterraggi o i decolli subiscono danni significativi. Per ridurre al minimo tali danni, si ritiene necessario predisporre un'area aggiuntiva oltre le estremità della pista. Queste aree, note come Aree di Sicurezza di Fine Pista (RESA), devono essere in grado di supportare adeguatamente qualsiasi aeromobile in overrun o undershoot e devono essere libere da tutte le apparecchiature e installazioni non frangibili.*

*5.4.2 È obbligatorio predisporre un'area di sicurezza di fine pista a ciascuna estremità di una strip quando: a) il codice è 3 o 4; e b) il codice è 1 o 2 e la pista è di tipo strumentale.*

*5.4.3 Un'area di sicurezza di fine pista dovrebbe essere prevista a ciascuna estremità di una strip in cui il codice è 1 o 2 e la pista è di tipo non strumentale.*

*5.4.4 Un'area di sicurezza di fine pista deve estendersi dall'estremità di una strip per una distanza di almeno 90 m in cui: a) il codice è 3 o 4; e b) il codice è 1 o 2 e la pista è di tipo strumentale. Se è installato un sistema di arresto, la lunghezza sopra indicata può essere ridotta, in base alle specifiche di progettazione del sistema, previa accettazione da parte dello Stato.*

*5.4.5 Un'area di sicurezza di fine pista dovrebbe, per quanto possibile, estendersi dalla fine della striscia di pista per una distanza di almeno: a) 240 m se il codice è 3 o 4, o una lunghezza ridotta quando è installato un sistema di arresto; b) 120 m se il codice è 1 o 2 e la pista è strumentale, o una lunghezza ridotta quando è installato un sistema di arresto; e 15 c) 30 m se il codice è 1 o 2 e la pista è non strumentale.*

*(...)*

5.4.8 *La larghezza di un'area di sicurezza di fine pista deve essere almeno il doppio della pista associata.*

5.4.9 *La larghezza di un'area di sicurezza di fine pista dovrebbe, ove possibile, essere uguale a quella della porzione livellata della strip di pista associata.*

5.4.10 *Qualsiasi oggetto, diverso da un'attrezzatura o un'installazione necessaria per la navigazione aerea o per la sicurezza degli aeromobili, situato in un'area di sicurezza di fine pista che possa mettere in pericolo gli aeromobili dovrebbe essere considerato un ostacolo e, per quanto possibile, rimosso. Qualsiasi attrezzatura o installazione necessaria per la navigazione aerea o per la sicurezza degli aeromobili che debba essere situata nell'area di sicurezza di fine pista deve essere frangibile, montata il più in basso possibile e posizionata in modo tale da ridurre al minimo il pericolo per gli aeromobili.*

5.4.11 *Un'area di sicurezza di fine pista dovrebbe fornire un'area libera e livellata per gli aeroplani che la pista è destinata a servire nel caso in cui un aeroplano superi o superi la pista. La superficie del terreno nell'area di sicurezza di fine pista non deve essere preparata con la stessa qualità della striscia di pista.*

(...)

5.4.13 *Le pendenze longitudinali di un'area di sicurezza di fine pista non dovrebbero superare una pendenza verso il basso del 5graduali possibile, evitando cambiamenti bruschi o improvvisi cambiamenti di pendenza.*

(...)

5.4.15 *Le pendenze trasversali di un'area di sicurezza di fine pista non dovrebbero superare il 5salita o in discesa. Le transizioni tra pendenze diverse dovrebbero essere il più gradualmente possibile.*

5.4.16 *Un'area di sicurezza a fine pista dovrebbe essere preparata o costruita in modo da ridurre il rischio di danni a un velivolo che sorpassa o supera la pista, migliorare la decelerazione dell'aereo e facilitare il movimento dei veicoli di soccorso e antincendio."[79]*

Ai fini del presente elaborato, le dimensioni della RESA assumono un ruolo centrale; l'ICAO dimostra che, in riferimento ad una pista di codice 3 o 4, una lunghezza di 90 metri è in grado di arrestare in sicurezza un aeromobile approssimativamente nel 61% degli overrun, mentre una lunghezza di 240 metri è in grado di arrestare un aeromobile nell'83% dei casi. Inoltre, le lunghezze specificate possono essere ridotte se è presente un sistema di arresto.

Pertanto, dato l'elevato rischio operativo di un incidente di overrun, si evidenzia come le dimensioni della RESA abbiano un ruolo cruciale nella posizione finale di arresto di un aeromobile in fuoriuscita dalla pista.

### 2.3.2. Requisiti della RESA stabiliti da EASA

L'Agenzia dell'Unione Europea per la sicurezza aerea (EASA) è il principale ente regolatore dell'Unione Europea e si occupa di garantire la sicurezza e la tutela dell'ambiente nel settore dell'aviazione civile.

Il riferimento normativo dell'EASA per la progettazione e la certificazione degli aeroporti all'interno dell'UE è il *Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design*, spesso abbreviato con CS-ADR-DSN. Esso è suddiviso in prescrizioni obbligatorie chiamate CS (*Certification Specifications*) e linee guida GM (*Guidance Material*).[62]

La sezione C del documento tratta dei requisiti normativi relativi alla RESA.

L'EASA adotta requisiti tecnici ampiamente coerenti con i principi sanciti dalle normative internazionali ICAO. Tuttavia, una differenza significativa risiede nell'approccio: mentre l'ICAO utilizza i termini verbali "deve" e "dovrebbe" ("*shall*" e "*should*") per distinguere tra requisiti obbligatori (*Standards*) e raccomandazioni (*Recommended Practiced*), l'EASA, nelle *Certification Specifications* (CS), tende a utilizzare il condizionale "*should*" anche in presenza di requisiti che vengono espressi come vincolanti dalla normativa internazionale.

Questa scelta si giustifica considerando la natura delle CS. Esse, infatti, rappresentano degli standard tecnici non vincolanti adottati per incontrare i requisiti essenziali fissati dal testo normativo base, chiamato *Basic Regulation*.

Per l'Agenzia europea, dunque, non è formalmente obbligatorio rispondere alla lettera ai requisiti di sicurezza sanciti dalle *Certification Specifications* (CS), qualora si dimostri di aver comunque ottemperato a quanto richiesto tramite delle misure che abbiano dei livelli di sicurezza equivalenti.

Ciò vuol dire che le CS sanciscono il livello di sicurezza richiesto, ma l'EASA ammette varie modalità per garantirlo. In tali termini, ciò che viene definito dalle CS non rappresenta l'unico percorso possibile per soddisfare i requisiti di sicurezza.

Infatti, qualora un gestore aeroportuale non sia in grado di soddisfare i requisiti previsti dalle CS, può proporre un Livello di Sicurezza Equivalente (ELOS) che dimostri come gli intenti delle CS vengano comunque rispettati. [14]

Ne consegue che i requisiti contenuti nelle CS, pur espressi con il termine "*should*", assumono valore sostanzialmente vincolante nella pratica operativa: essi costituiscono lo standard di riferimento, dal quale ci si può discostare soltanto presentando e giustificando un'alternativa ritenuta equivalente dall'Autorità competente.

In tal caso, qualora non fosse possibile garantire una RESA conforme agli standard dimen-

sionali previsti, è ammesso il ricorso a soluzioni alternative, come ad esempio l'installazione di sistemi di arresto, purché venga dimostrato il conseguimento di un livello di sicurezza equivalente.

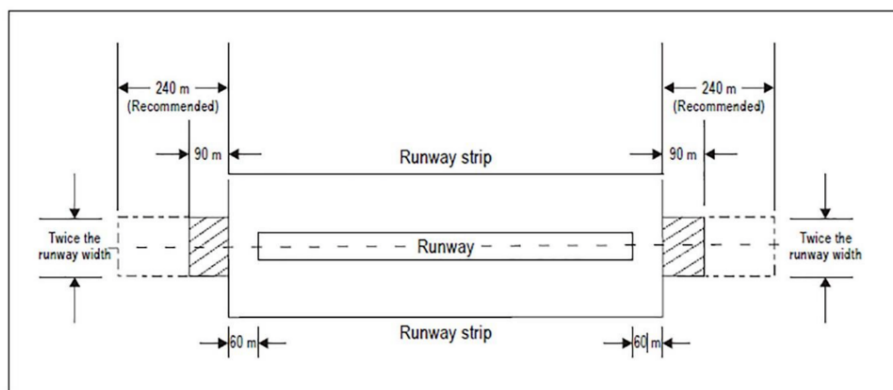


Figura 2.8: Area di sicurezza a fine pista (RESA) per una pista di codice 3 o 4 (EASA, CS-ADR-DSN, Figura GM-C-1)

### 2.3.3. Requisiti della RESA stabiliti da FAA

A differenza di quanto viene previsto dall'ente internazionale ICAO e di quanto viene adottato nell'Unione Europea dall'EASA, la Federal Aviation Administration (FAA), la più grande agenzia del Dipartimento dei Trasporti statunitense e uno dei più importanti enti regolatori al mondo, introduce il concetto di Area di Sicurezza di Pista (RSA), un'area che circonda interamente la pista e non è posta solamente ai suoi estremi, come la RESA.

Di fatto, la normativa americana identifica come RSA (*Runway Safety Area*) ciò che, a livello internazionale, è suddiviso nei concetti di striscia di sicurezza di pista (*runway strip*) e area di sicurezza a fine pista (RESA).

Nonostante ciò, l'obiettivo della RSA è il medesimo della RESA, con l'unica differenza che la RSA prevede un miglioramento della sicurezza operativa anche nel caso di veer-off, ovvero di escursione laterale dalla pista.

Il riferimento normativo dell'FAA che tratta dei requisiti per la RSA è l'*Advisory Circular AC 150/5300-13B* [66], documento fondamentale che fornisce i criteri tecnici e le linee guida per la progettazione geometrica e funzionale degli aeroporti negli Stati Uniti d'America.

Il documento specifica che i requisiti della RSA presentati mirano a contenere il 90 % delle escursioni totali di pista.

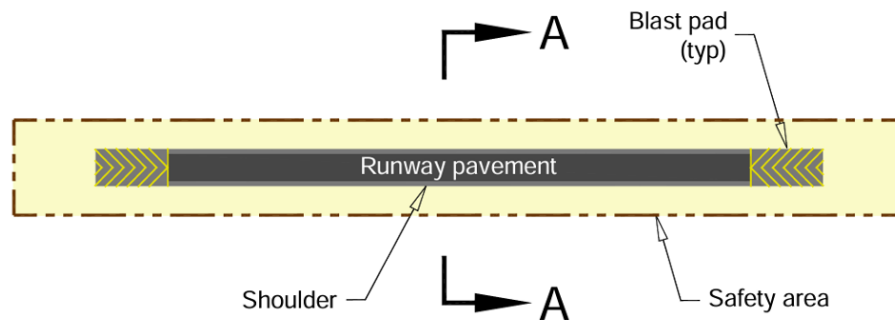


Figura 2.9: Area di sicurezza di pista (RSA) secondo FAA (FAA, AC 150/5300-13B, Figura 3-19)

L'FAA stabilisce che la RSA debba estendersi per almeno 1000 piedi (circa 305 metri) oltre ogni estremità della pista e avere una larghezza totale di 500 piedi (circa 150 metri), ovvero di 250 piedi per ogni lato dell'asse pista.

Le dimensioni espresse dalla Circolare variano in funzione della tipologia di aeroporto e della designazione della pista. Alcuni aeroporti minori possono avere RSA ridotte.

Anche per la normativa americana, la RSA deve essere livellata e libera da oggetti non frangibili, priva di solchi, dossi, depressioni o altre variazioni superficiali del terreno potenzialmente pericolose.

La pendenza massima longitudinale prevista è più stringente rispetto alle normative ICAO e EASA, con un massimo previsto del 3%.

La RSA non deve necessariamente essere pavimentata, ma deve comunque soddisfare i requisiti visti precedentemente: resistere sotto il peso dell'aeromobile in ingresso, consentire il passaggio sicuro dei mezzi di soccorso ed essere priva di ostacoli pericolosi.

### 2.3.4. Requisiti della RESA stabiliti da ENAC

L'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) è l'autorità unica di regolamentazione, certificazione, verifica e controllo nel settore dell'aviazione civile in Italia.

I requisiti tecnici della RESA si trovano all'interno del *Regolamento per la Costruzione e l'Esercizio degli Aeroporti*, documento ufficiale principale contenente i principi tecnici e funzionali per progettare e gestire un aeroporto in Italia. [53]

L'ENAC adotta e recepisce i requisiti fondamentali stabiliti dall'EASA; tuttavia, rispetto alle linee guida generali dell'ente europeo, l'ENAC fornisce una definizione più dettagliata e specifica delle dimensioni richieste per la RESA, distinguendo tra:

- **piste di nuova realizzazione:** la larghezza della RESA deve essere pari a quella della CGA, ovvero alla parte di striscia di sicurezza più vicina alla pista, livellata e priva di ostacoli. Inoltre, la RESA deve avere una lunghezza di almeno 240 metri per piste di codice 3 o 4 e di 120 metri per piste di codice 1 o 2.
- **piste già realizzate su aeroporti esistenti:** la lunghezza della RESA deve essere di almeno 90 metri.

Solo nel caso di modifiche interne dell'infrastruttura aeroportuale o di cambiamenti legati al traffico aereo, l'ENAC valuterà la possibilità di estendere la lunghezza minima della RESA a 240 metri per piste di codice 3 o 4 e a 120 metri per piste strumentali di codice 1 o 2. In tal caso l'ENAC dovrà valutare determinati fattori di rischio per revisionare la lunghezza della RESA.

## 2.4. Soluzioni ingegneristiche per la sicurezza a fine pista

La crescita del traffico aereo e del numero di passeggeri ha affidato alla sicurezza operativa un ruolo sempre più centrale nella progettazione e nell'esercizio di un'infrastruttura aeroportuale.

In risposta a ciò, le autorità di normazione e regolazione in campo aeronautico prevedono delle misure cautelari sempre più restrittive, con l'obiettivo di ridurre al minimo i rischi derivanti da incidenti potenzialmente pericolosi quali le escursioni laterali e longitudinali, ossia veer-off e overrun.

Tra le aree aeroportuali che rispondono a tali esigenze si annoverano la *runway strip*, ovvero la striscia di sicurezza che contorna la pista, e l'area di sicurezza di fine pista (RESA), che si estende oltre il limite ultimo della pista.

In particolare, l'area di sicurezza di fine pista (RESA) rappresenta la primaria misura infrastrutturale di mitigazione del rischio per minimizzare i rischi sull'aeromobile e sui suoi occupanti nel caso di un overrun o di un undershoot.

In alcuni casi, tuttavia, non è possibile garantire delle aree di sicurezza conformi alle dimensioni raccomandate dalla normativa vigente. In Italia, ad esempio, si consiglia una RESA di 240 x 150 metri per piste di codice 3 e 4, ma vincoli infrastrutturali, fisici o ambientali impediscono spesso il raggiungimento di tali dimensioni.

Dunque, alla luce dell'estrema e cruciale importanza della sicurezza operativa in eventi di overrun e undershoot, risulta urgente la necessità per i gestori aeroportuali di condurre

una valutazione del rischio (in inglese *Risk Assessment*) ed eventualmente, nel caso in cui il livello di rischio non risulti accettabile, definire delle strategie alternative di intervento per garantire un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA conforme agli standard normativi.

Il mancato rispetto delle dimensioni raccomandate dalle autorità normative può essere spesso attribuito, nel contesto italiano, all'origine storica degli aeroporti nazionali. Difatti, secondo quanto specificato dall'ENAC nel *Regolamento per la Costruzione e l'Esercizio degli Aeroporti* [53], una parte significativa degli aeroporti italiani attualmente in esercizio fu costruita in epoca bellica e perciò ha una derivazione storica di tipo militare, quando i requisiti normativi in materia di sicurezza erano ancora limitati e maggiormente permissivi rispetto agli standard attuali. In generale, gran parte degli aeroporti italiani è stata realizzata decenni fa, in un'epoca in cui gli aeromobili richiedevano spazi di sicurezza più contenuti e lunghezze di pista inferiori per le operazioni di decollo e atterraggio.

Oltre alla natura storica degli aeroporti, la geomorfologia del territorio italiano e dunque la presenza di numerosi ostacoli naturali (come fiumi e monti), la fitta urbanizzazione e quindi la scarsa disponibilità di ampi spazi liberi, e l'elevata densità di infrastrutture di trasporto (come strade e ferrovie) rendono difficoltosa per molti aeroporti la possibilità di adeguarsi alle dimensioni della RESA raccomandate dall'ENAC.

Qualora il livello di rischio attuale non risultasse accettabile e ci fosse perciò la necessità di definire strategie di mitigazione del rischio, la prima misura di intervento che generalmente viene presa in considerazione consiste nell'adeguamento della RESA, estendendola oltre i suoi confini sfruttando aree già a disposizione dell'infrastruttura aeroportuale.

Nel caso in cui l'aeroporto non disponga di aree sufficienti per adeguare la RESA oppure motivi economici, tecnici o ambientali impediscano di seguire tale strategia, vengono valutate soluzioni alternative che possano comunque garantire un livello di rischio accettabile ed equivalente a quello ottenibile con una RESA conforme.

Le soluzioni ingegneristiche adottabili per la mitigazione del rischio possono essere di natura infrastrutturale, organizzativa e operativa, e spesso si procede ad una combinazione di soluzioni diverse.

Le principali soluzioni ingegneristiche che vengono valutate sono le seguenti:

- l'installazione di sistemi di arresto di tipo passivo, come i letti d'arresto EMAS (Engineered Materials Arresting System), progettati per arrestare in maniera sicura e controllata un aeromobile in overrun;

- l'acquisizione di terreni in modo tale da estendere fisicamente la RESA, qualora la morfologia del sito lo consenta;
- l'estensione fisica della RESA spostando la soglia di pista e dunque riducendo le distanze dichiarate (TORA, TODA, ASDA, LDA), con l'eventuale adozione di limitazioni operative;
- il riallineamento della pista, ottimizzando lo spazio disponibile.

In una valutazione completa e ottimale, ogni alternativa progettuale deve essere verificata non solo sotto un profilo tecnico e operativo, ma anche da un punto di vista economico, eseguendo un'analisi e un confronto dei costi da sostenere per realizzarla e dei benefici monetizzabili che si possono ottenere, con riferimento alle risorse disponibili del gestore aeroportuale.

Questo approccio permette di identificare la soluzione progettuale più efficace ed efficiente in termini operativi ed economici.

Il presente elaborato si concentrerà sull'installazione e la manutenzione dei letti d'arresto EMAS, analizzando il loro impatto tecnico ed economico, con l'obiettivo di dimostrare come possano essere una soluzione efficace, efficiente e conveniente anche per le infrastrutture aeroportuali italiane.

## 2.5. Aeroporti italiani di interesse

Prima di iniziare la trattazione dei letti d'arresto EMAS, è opportuno fornire una panoramica del contesto aeroportuale italiano. Come spiegato nel paragrafo precedente, la natura storica degli aeroporti, la complessa geomorfologia del territorio e la fitta urbanizzazione sono i tre fattori principali che spesso impediscono agli aeroporti italiani di adattare le loro aree di sicurezza di fine pista alle dimensioni raccomandate dall'ente normativo ENAC.

Di seguito vengono analizzate alcune casistiche di particolare rilievo, selezionate in base al contesto geografico e urbanistico in cui sono inseriti e alla limitata estensione delle loro RESA.

Tali casistiche vengono presentate al fine di dimostrare le varie tipologie di vincolo che possono impedire di conformare la RESA agli standard dimensionali.

Le informazioni sono state reperite dal portale online dell'AIP (*Aeronautical Information Publication*), la pubblicazione ufficiale prevista dall'ICAO che raccoglie tutte le principali informazioni di carattere aeronautico, permanenti o di lungo periodo, rilevanti per la navigazione aerea. [11]

### 2.5.1. Caso 1: RESA limitata da vincoli infrastrutturali e urbanistici

La prima casistica presentata si riferisce ad un aeroporto di rilevanza intercontinentale, interessato da un traffico di oltre dieci milioni di passeggeri all'anno.

L'aeroporto dispone di una pista di circa 2.500 metri, caratterizzata ad entrambe le testate da due RESA di dimensioni pari a 90 metri per lato, fortemente limitate da vincoli di tipo infrastrutturale e urbanistico.

I vincoli sono rappresentati da una linea ferroviaria alla testata ovest e da una Strada Statale, una strada urbana e alcuni stabilimenti balneari alla testata est.

L'infrastruttura ferroviaria rappresenta uno dei vincoli più problematici e complessi dal punto di vista ingegneristico e funzionale, dal momento in cui un suo eventuale spostamento per poter espandere la RESA risulterebbe in interventi infrastrutturali di grande entità e costi elevatissimi.

Parallelamente, all'altra testata, al vincolo infrastrutturale si aggiungono vincoli urbanistici. Una possibile estensione della RESA richiederebbe lo spostamento degli stabilimenti balneari e la ricollocazione o l'interramento delle strade esistenti, con impatti importanti sia sotto il profilo sociale sia economico. L'intervento, infatti, potrebbe generare l'opposizione da parte dei cittadini locali.

Tale casistica presenta dunque dei vincoli di difficile risoluzione, rendendo complessa qualsiasi possibilità di adeguamento dimensionale di entrambe le RESA. Per tale motivo, è necessario definire delle alternative progettuali per garantire un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA standard.

### 2.5.2. Caso 2: RESA limitata da vincoli infrastrutturali e operativi

Il secondo caso in esame riguarda un aeroporto di interesse nazionale, con oltre tre milioni di passeggeri nell'ultimo anno.

L'infrastruttura dispone di una sola pista lunga circa 1.500 metri alle cui testate sono presenti delle aree di sicurezza di lunghezza pari a 90 metri e larghezza di 150 metri, entrambe limitate da vincoli infrastrutturali e operativi.

Una particolarità tipica dello scalo aeroportuale è rappresentata dalle criticità operative legate al frequente vento in coda e alla scarsa visibilità che si genera dalla nebbia nella

pianura. Per tale motivo, i voli di linea possono atterrare solamente da una testata, rendendo così la pista monodirezionale, condizione fortemente vincolante.

Il vincolo infrastrutturale maggiormente limitante è costituito dalla presenza di un'autostrada molto trafficata, la quale impedisce di estendere la RESA secondo quanto raccomandato dalla normativa ENAC.

La monodirezionalità della pista incrementa le problematiche: infatti, la testata utilizzata per gli atterraggi è la stessa vincolata dall'autostrada. Dunque, il rischio principale che consegue alla limitata estensione della RESA è relativo ad un possibile incidente di undershoot, che si è dimostrato statisticamente raro ma non per questo trascurabile in una valutazione del rischio.

### 2.5.3. Caso 3: RESA limitata da vincoli naturali

Il terzo caso in esame è rappresentato da un altro aeroporto di interesse nazionale la cui pista, lunga circa 2.800 metri, presenta una RESA di 90 metri per lato al confine con il mare. La presenza di tale vincolo naturale è fortemente impattante e ciò rende l'aeroporto rilevante per il presente studio.

Infatti, il bacino d'acqua rappresenta un vincolo fisico insormontabile ed una fonte di rischio estremamente rilevante nel caso di un overrun o di un undershoot.

In questa situazione, l'installazione di un letto d'arresto EMAS si configura come una delle strategie di mitigazione del rischio più convenienti ed efficaci, assicurando che l'aereo venga arrestato in sicurezza al suo interno, evitando quindi il pericolo che esso prosegua la corsa fino a finire in acqua. Un'alternativa potrebbe essere l'estensione della RESA realizzando delle banchine artificiali da porre in acqua.

Tuttavia, questa soluzione comporterebbe costi elevatissimi e criticità nella sua realizzazione.

Questo aeroporto riveste particolare interesse in quanto la conformazione dimensionale della RESA in questione potrebbe condurre ad un'analisi delle varie alternative progettuali, valutandone i relativi vantaggi e svantaggi sotto il profilo operativo, ambientale ed economico.



# 3 | Il sistema di arresto EMAS

Un *Engineered Materials Arresting System* (EMAS) è un sistema di arresto costituito da un letto realizzato con materiali ingegnerizzati a bassa resistenza meccanica, progettato e collocato oltre l'estremità di una pista di volo. La sua funzione è quella di accogliere e decelerare gradualmente un aeromobile in fuoriuscita dalla pista (overrun), fino ad arrestarlo in sicurezza al suo interno. [13][33] Tale sistema rappresenta una delle soluzioni ingegneristiche principali che vengono considerate, come visto precedentemente, in quegli aeroporti in cui non è possibile rendere una RESA conforme ai requisiti normativi e, dunque, è necessario trovare un'alternativa progettuale che garantisca un livello di sicurezza equivalente.

L'EMAS è definito come un sistema di arresto passivo, poiché il suo funzionamento non richiede alcuna azione esterna di attivazione: è infatti sufficiente il passaggio dell'aeromobile per innescare il meccanismo di decelerazione.

La capacità di arresto del sistema si basa sulla natura dei suoi materiali a bassa densità e ad alto assorbimento energetico, progettati appositamente per deformarsi e collassare in maniera controllata sotto il peso dei carrelli dell'aeromobile. Difatti, al passaggio del velivolo, esso subisce deformazioni prevedibili attraverso le quali impone una forza decelerante sul carrello principale, consentendo una graduale dissipazione dell'energia cinetica posseduta dal velivolo fino al suo completo arresto in sicurezza all'interno del letto.

Il progetto di un letto d'arresto EMAS mira ad un livello di sicurezza tale da evitare lesioni sugli occupanti e danni importanti alla fusoliera e ai carrelli.

Nel mercato dell'aviazione esistono varie tipologie di EMAS realizzati con materiali diversi; di seguito, si analizzeranno i due principali sistemi di arresto presenti attualmente nel mercato, con particolare attenzione sui materiali impiegati.

## 3.1. Evoluzione storica degli EMAS

Prima che sorgesse la necessità di un sistema di arresto specificamente concepito per gli aeromobili civili, erano già state sviluppate e consolidate varie tecnologie di arresto per i

velivoli militari.

Il primo sistema di arresto militare risale al 1911, quando Hugh Robinson ideò un sistema di cavi d'arresto, scorrevoli su pulegge e collegati ad un motore d'arresto. Il funzionamento prevedeva l'aggancio dei cavi a un apposito gancio installato nella coda dell'aeromobile in fase di atterraggio: in questo modo l'energia cinetica del velivolo veniva trasferita ai cavi e successivamente dissipata dal motore, consentendo un arresto relativamente dolce. Tale sistema di arresto venne affinato nel tempo ed attualmente è presente nelle navi portaerei e nelle basi militari. [5] [18]

Tuttavia, nonostante la loro efficacia nel mondo militare, tali sistemi si sono rivelati incompatibili con gli aeromobili commerciali per una serie di motivazioni. Innanzitutto, la decelerazione generata dai cavi risulta eccessivamente brusca e non compatibile con i limiti di comfort e sicurezza richiesti per i passeggeri. Inoltre, la massa nettamente superiore degli aeromobili commerciali renderebbe il sistema difficilmente dimensionabile, mentre la loro configurazione strutturale non prevede la presenza di un gancio di coda, indispensabile per l'aggancio al cavo. A ciò si aggiunge l'elevato rischio di rottura del cavo stesso: un evento che, nel contesto dell'aviazione civile, caratterizzato da elevati carichi operativi e da un elevato numero di passeggeri a bordo, potrebbe tradursi in incidenti con conseguenze potenzialmente catastrofiche.

Nel mondo dell'aviazione commerciale, i primi studi e le prime ricerche per definire una soluzione sicura ed affidabile per un evento di overrun risalgono alla fine degli anni '60, quando furono sperimentati dei letti d'arresto realizzati in schiuma di formaldeide dalla Royal Aircraft Establishment, istituto di ricerca britannico. L'impiego di tali sistemi, tuttavia, si rivelò eccessivamente costoso e ciò impedì una loro applicazione.

Alcuni anni più tardi, due gravi incidenti evidenziarono in maniera inequivocabile l'urgenza di individuare un sistema di arresto da collocare all'estremità finale di una pista. Il 23 Gennaio 1982, all'aeroporto internazionale di Boston Logan (BOS), un McDonnell Douglas DC-10-30 non riuscì a fermarsi entro i limiti della pista e terminò la corsa nelle acque del Boston Harbor. Un episodio analogo si verificò due anni più tardi, il 28 Febbraio 1984, quando all'aeroporto internazionale John Fitzgerald Kennedy (JFK) di New York un altro McDonnell Douglas DC-10-30 in atterraggio oltrepassò il fine pista, finendo nel Thurston Basin, un'insenatura della Jamaica Bay. In entrambi gli incidenti si registrarono perdite di vite umane e seri danni al velivolo.



Figura 3.1: L'overrun del DC-10 nella pista 4R all'aeroporto JFK, 28 Febbraio 1984

A seguito di tali eventi, la *National Transportation Safety Board* (NTSB) invitò l'FAA a condurre un programma di ricerca volto a sviluppare una soluzione ingegneristica da adottare in quegli aeroporti in cui l'adeguamento fisico della RESA non era economicamente e/o tecnicamente fattibile.

Pertanto, dal 1986 al 1993, l'FAA finanziò un programma intenso di ricerche, test e verifiche, finalizzato all'identificazione di materiali adatti all'impiego in un sistema d'arresto. L'obiettivo era sviluppare un sistema che fosse in grado di arrestare in sicurezza gli aeromobili in corsa, evitando danni seri al velivolo stesso e ai suoi occupanti.

In una prima fase, le ricerche mirarono sul piano teorico allo sviluppo di un modello matematico per valutare gli effetti cinematici ed inerziali che sorgono durante l'arresto di un velivolo; in un secondo momento, le ricerche si spostarono su un piano pratico, conducendo esperimenti sul campo presso il Technical Center della FAA su varie tipologie di materiali cosiddetti soffici (in inglese *soft-ground*), ovvero materiali che si deformano e cedono in maniera prevedibile e controllata sotto il peso del carrello di un aeromobile, garantendo l'arresto in sicurezza del velivolo all'interno del sistema. In questa fase, i test vennero condotti su letti d'arresto realizzati in schiuma fenolica, un prodotto isolante tipicamente utilizzato nei sistemi di copertura.

Negli anni successivi, dal 1994 al 2003, la FAA unì le forze con la Port Authority di New York e del New Jersey e con la ditta americana Engineered Arresting Systems Corporation (ESCO), collaborando per perfezionare ed ottimizzare i materiali impiegati ed i modelli

matematici per lo studio dell'interfaccia tra le ruote del carrello e la superficie del sistema di arresto.

La tecnologia più vantaggiosa ed efficace risultò l'impiego di blocchi in calcestruzzo alveolare rivestiti da uno strato protettivo verso gli agenti atmosferici e il jet-blast.

A valle di questi sviluppi, la FAA emise le prime specifiche generali per il progetto, l'installazione e la manutenzione di un EMAS.

Il primo letto d'arresto fu realizzato nel 1996 per l'estremità della pista 4R presso l'aeroporto internazionale John Fitzgerald Kennedy (JFK) di New York, la stessa che fu teatro dell'incidente del 1984.

Dopo l'installazione, il primo evento di overrun accadde l'8 Maggio 1999, quando un Saab 340B operato dalla compagnia aerea American Eagle fuoriuscì dalla pista 4R arrendendosi in sicurezza all'interno del nuovo letto, salvando la vita a tutte le 30 persone a bordo.

Di fronte a tale successo, fu avviato un ampio programma di installazioni negli Stati Uniti, che interessò aeroporti di primaria importanza come quelli di New York, Boston, Chicago e Miami.

Dunque, alla luce di quanto esposto, la tecnologia dei letti d'arresto EMAS fu sviluppata e messa a punto direttamente dall'ente regolatore statunitense FAA.

Per tale motivo, al giorno d'oggi, soltanto negli Stati Uniti d'America sono installati 118 sistemi d'arresto EMAS in 70 aeroporti.

Al di fuori del territorio statunitense, la diffusione della tecnologia EMAS procede più lentamente. In Europa, infatti, questi sistemi si trovano solamente negli aeroporti internazionali di Madrid Barajas (MAD) e di Zurigo Kloten (ZRH). Nell'America del Sud i primi due letti d'arresto sono stati installati presso l'aeroporto di San Paolo Congonhas (CGH) in Brasile tra il 2021 e il 2022.

## 3.2. Meccanismo di arresto

Il fine primario di un sistema di arresto EMAS è l'arresto in sicurezza di un aeromobile in overrun al suo interno, evitandone la fuoriuscita dall'area di sicurezza a fine pista (RESA) e minimizzando di conseguenza la gravità delle possibili conseguenze.

La sicurezza, in particolare, viene intesa come sicurezza degli occupanti del velivolo, siano essi passeggeri o membri dell'equipaggio, e come sicurezza delle varie componenti del mezzo, quali fusoliera e carrelli.

La fase di progettazione riveste un ruolo cruciale in quanto, grazie all'ausilio di software di simulazione sviluppati ad hoc, è possibile analizzare nel dettaglio il meccanismo di arresto del letto EMAS. Tale analisi tiene conto di numerosi parametri progettuali, quali

le caratteristiche fisiche dell'aereo di progetto, la sua velocità di ingresso all'interno del letto e altri parametri che influenzano il processo di decelerazione.

La natura dei materiali impiegati è di fondamentale importanza. Di fronte a ciò, gli enti normativi stabiliscono requisiti che risultano sempre più precisi ed esigenti di anno in anno, mirando costantemente ad aumentare il livello di sicurezza e allo stesso tempo a minimizzare gli impatti, come quello economico ed ambientale.

Il meccanismo di questa tecnologia si basa sull'affondamento del carrello principale, reso possibile dalla natura dei materiali impiegati, caratterizzati da un'elevata capacità di assorbimento energetico e da bassa densità, progettati appositamente per deformarsi in maniera controllata sotto il carico del carrello dell'aeromobile. La deformazione del letto genera sul carrello una forza decelerante che consente una graduale dissipazione dell'energia cinetica del velivolo fino al suo completo arresto.

Condizione imprescindibile è che tale forza decelerante rimanga entro limiti tollerabili sia per le strutture dell'aeromobile sia per gli occupanti.



Figura 3.2: Affondamento del carrello principale nel letto d'arresto EMAS [24]

A livello operativo, il meccanismo di arresto controllato rende l'EMAS la scelta progettuale potenzialmente più sicura, in quanto permette di prevedere in anticipo, anche prima di un ipotetico incidente, la traiettoria dell'aeromobile in overrun e la sua posizione finale nel letto. Al contrario, in una RESA tradizionale, dove l'aeromobile termina la corsa in uno spazio libero, la traiettoria non può essere determinata a priori e il rischio di perdita di controllo del velivolo è più elevato.

I parametri progettuali di fondamentale importanza che rientrano sempre nella definizione del meccanismo di arresto di un letto d'arresto sono due:

1. **aereo critico**: viene definito come l'aereo di dimensioni maggiori e presente regolarmente in pista, che richiede uno spazio maggiore per essere arrestato completamente all'interno del letto;
2. **velocità di uscita (*exit speed*)**: è la velocità istantanea del velivolo nel momento in cui oltrepassa il limite ultimo della pista ed è impostata, come spiegato successivamente, pari a 70 kts.

Per procedere all'installazione di un letto EMAS, è necessario soddisfare una serie di requisiti finalizzati alla validazione del meccanismo di arresto. La verifica di tali requisiti è supportata da software di simulazione in grado di prevedere le forze agenti sul carrello principale, le decelerazioni a cui sono sottoposti gli occupanti e le distanze di arresto.

### 3.3. Tipologie di EMAS nel mercato

A partire dagli anni '90 l'azienda pioniera nella produzione di letti d'arresto EMAS fu la ESCO (*Engineered Arresting Systems Corporation*), sorta inizialmente per lo sviluppo di sistemi di arresto militari.

Come riportato in precedenza, la ESCO collaborò con l'americana FAA e la Port Authority di New York e New Jersey per sperimentare dei materiali soft-ground da impiegare in sistemi di arresto negli aeroporti commerciali. La ESCO sviluppò così il primo prototipo di sistema di arresto EMAS, basato su blocchi prefabbricati di calcestruzzo cellulare leggero e deformabile con una finitura di materiale resistente al jet-blast. Nel 1996 il primo EMAS venne installato nell'aeroporto John Fitzgerald Kennedy (JFK) di New York. Negli anni 2000 la ESCO si affermò come unico fornitore certificato dalla FAA nella produzione di letti d'arresto EMAS.

Successivamente, nel 2007 la ESCO venne acquisita dal gruppo francese Zodiac Aerospace [31], che rimase attivo fino al febbraio del 2018, finché non venne acquisito a sua volta da una compagnia multinazionale francese molto attiva nel settore aerospaziale.

In quegli anni vennero condotti numerosi esperimenti, test e studi per ottimizzare i meccanismi di arresto e ricercare materiali che fossero sempre più adeguati a tale sistema.

Attualmente, il leader mondiale nella produzione di sistemi d'arresto EMAS è una società svedese, titolare dei diritti di produzione e manutenzione di questi sistemi.

Questa è attiva a livello internazionale nel settore della sicurezza aeroportuale, ponendo al primo posto e come obiettivo principale la protezione degli aeromobili e dei loro occupanti

e l'impegno a lungo termine. [24]

Mentre negli Stati Uniti si consolidava l'utilizzo di letti realizzati con blocchi di calcestruzzo, l'azienda svedese sperimentò un nuovo materiale da impiegare nella nuova generazione di sistemi EMAS: la schiuma di vetro.

L'idea originaria risale al 2007, quando l'inventore Jon Narmo propose l'impiego della schiuma di vetro come elemento innovativo per l'arresto in sicurezza di grandi aeromobili. Dopo anni di studi e verifiche tecniche, la soluzione ottenne l'approvazione della FAA.

Nel 2014 ci fu il primo ordine e la prima installazione di questo nuovo sistema all'aeroporto internazionale di Chicago Midway (MDW), segnando l'ingresso nel mercato di una seconda tipologia di letto d'arresto. [13]

Al giorno d'oggi le due tipologie di letto d'arresto EMAS presenti nel mercato, prodotte dalla compagnia svedese e approvate dalla FAA sono:

- il primo sistema EMAS sviluppato e certificato dalla FAA, costituito da blocchi prefabbricati di calcestruzzo cellulare alleggerito;
- il sistema introdotto successivamente, realizzato in schiuma di vetro.

Oltre a questi due sistemi certificati dalla FAA, esiste un terzo produttore riconosciuto dall'ente regolatore cinese CAAC (*Civil Aviation Administration of China*), che ha sviluppato un sistema d'arresto analogo, ma che non ha ottenuto l'approvazione dalla FAA.

### 3.3.1. EMAS in blocchi di calcestruzzo alleggerito

L'EMAS in blocchi di calcestruzzo alleggerito è stata la prima tipologia di letto d'arresto EMAS ad essere stata approvata dalla FAA, ottenendo la prima installazione nel 1996 all'aeroporto John Fitzgerald Kennedy (JFK) di New York.

Nello specifico, il letto è costituito da blocchi prefabbricati di calcestruzzo cellulare a bassa resistenza che, sotto il peso di un aeromobile, si deformano in maniera controllata decelerando così il velivolo fino ad arrestarlo in sicurezza al suo interno.

A seguito del completo arresto dell'aeromobile, i blocchi sono stati progettati per garantire:

- una sicura evacuazione da parte dei passeggeri e dei membri della crew;
- una facile rimozione del mezzo dal letto d'arresto;
- una veloce sostituzione o riparazione del sistema.

Come specificato dalla scheda dell'azienda produttrice, questa tipologia di letto viene progettata specificamente per arrestare velivoli di peso superiore alle 12.500 libbre (circa 5,67 tonnellate).

I blocchi vengono prodotti singolarmente con dimensioni planimetriche pari a 4 x 4 ft (circa 120 x 120 cm) e con altezze variabili in funzione del progetto specifico del letto.

Ogni blocco è rivestito da un film protettivo multistrato: le superfici superiore e inferiore hanno un rivestimento plastico, le superfici laterali uno strato di nylon, mentre sulla parete superiore viene applicato un sottile strato di schiuma al di sotto della pellicola plastica. Questo rivestimento garantisce resistenza agli agenti atmosferici, ai raggi UV e ai detriti generati dal jet-blast, in conformità con i requisiti normativi.

Inoltre, ogni blocco è fissato alla pavimentazione tramite un legante bituminoso a caldo (Hot Asphalt Cement, HAC).

Sono disponibili tre differenti livelli di resistenza meccanica (denominati "50", "60" e "80"), selezionati a seguito di simulazioni computerizzate su software sulla base del mix di traffico aereo, della topografia e dello spazio disponibile nel singolo caso di studio. In seguito, ogni blocco viene testato individualmente per verificare il rispetto degli standard di resistenza e qualità.

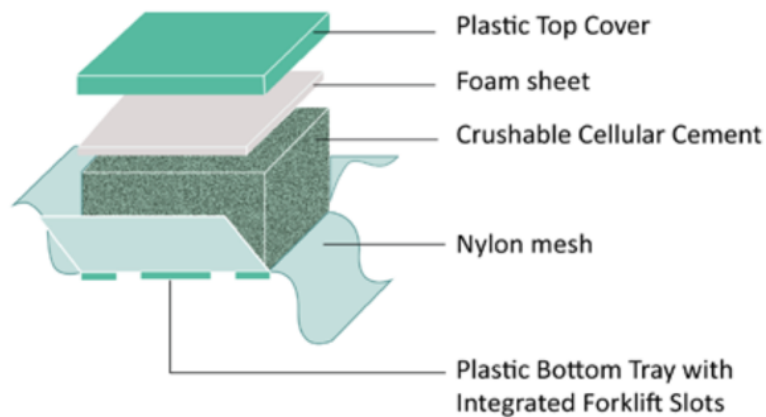


Figura 3.3: Composizione di un blocco in calcestruzzo alleggerito [24]

Tipicamente, un letto d'arresto è composto da 2.000 - 4.000 blocchi di questo tipo che, una volta fissati alla pavimentazione, vengono collegati tra di loro utilizzando un materiale sigillante, al fine di garantire la continuità del rivestimento e la protezione dagli agenti atmosferici.

La pavimentazione su cui poggia il letto d'arresto deve essere preparata con la stessa resistenza delle banchine (in inglese *shoulders*) di pista, livellata secondo la pendenza longitudinale prevista e dotata di sistemi di drenaggio.

In fase di installazione, la movimentazione dei blocchi è facilitata dalla presenza di fessure nella parete inferiore che consente l'inserimento delle braccia del carrello elevatore.

L'azienda svedese prevede, come da requisito normativo, una rampa di accesso al letto, seguita da un piano orizzontale (*plateau*). Lungo il perimetro, il letto presenta dei gradini laterali per l'accesso dei mezzi di emergenza e di soccorso antincendio e per l'allontanamento degli occupanti del velivolo.

Infine, nella parte anteriore del letto sono previsti dei deflettori di detriti (*Debris Deflectors*) per proteggere il sistema dai detriti del jet-blast, generati da aeromobili in avvicinamento o in decollo dalla direzione opposta.

Ciò dimostra come tale sistema sia stato progettato per consentire l'accesso da tutte le direzioni nelle situazioni di emergenza.

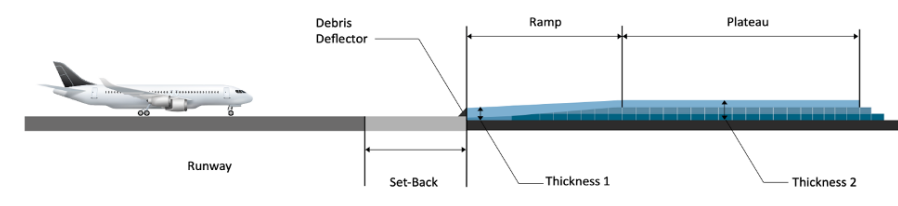


Figura 3.4: Vista laterale della prima tipologia di letto d'arresto [24]

Per la sola installazione del letto, il tempo stimato è di 3 – 4 settimane utilizzando le ore notturne, mentre la durata si riduce a circa una settimana se la pista viene temporaneamente chiusa e dunque i lavori possono svolgersi durante l'intera giornata. La riparazione del sistema a seguito dell'ingresso di un aeromobile deve essere portata a termine entro 45 giorni. Un importante vantaggio è che la sezione danneggiata può essere sostituita singolarmente, senza dover intervenire sull'intero letto, garantendo così tempi di manutenzione ridotti e minimi disagi operativi. [24]

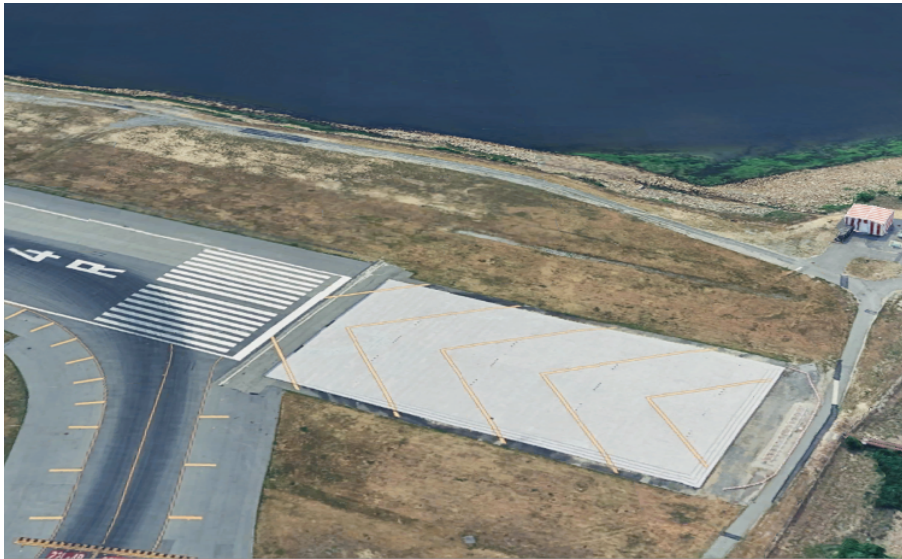


Figura 3.5: EMAS in calcestruzzo alleggerito, Pista 4R dell'Aeroporto Internazionale John Fitzgerald Kennedy, New York [17]

### 3.3.2. EMAS in schiuma di vetro

La tipologia più innovativa di letto d'arresto è rappresentata da quella realizzata in schiuma di vetro. Si tratta di un'alternativa particolarmente vantaggiosa da un punto di vista ambientale, dal momento che il costituente principale, la schiuma di vetro (nota anche come schiuma di silice), è realizzato interamente con vetro riciclato.

Tale sistema, a differenza del primo, viene prodotto in sito utilizzando materiali locali ed il progetto viene adattato ogni volta alle esigenze e alle caratteristiche del sito specifico di installazione.

Anche in tal caso, come specificato nella scheda del produttore, il letto viene progettato specificamente per arrestare velivoli di peso superiore alle 12.500 libbre (circa 5,67 tonnellate).

Il meccanismo d'arresto è analogo a quello della prima tipologia di letti: la schiuma di silice si deforma e si sposta sotto il peso del carrello dell'aeromobile, imprimendo su di esso una decelerazione controllata fino all'arresto completo e in sicurezza del velivolo all'interno del letto.

La capacità di arresto del sistema, anche intesa come forza di arresto (*drag load*) trasmessa al carrello, è proporzionale alla quantità di energia dissipata durante la fase di arresto, ovvero alla quantità di materiale sollevato. Questo aspetto è cruciale nella fase di progettazione della profondità del letto, in quanto la deformazione del materiale è irreversibile.

Sopra la pavimentazione, preparata come è stato descritto per il primo sistema, viene adagiato uno strato di schiuma di vetro, materiale leggero e poroso che si ottiene dalla fusione del vetro e dalla formazione di una struttura a celle chiuse, dall'aspetto granulare. È durevole, resistente al fuoco e agli agenti chimici e non comporta rischi alla salute.

La schiuma viene poi ricoperta da uno strato di materiale cementizio a bassa resistenza (*Controlled Low Strength Material*, CLSM) con dei giunti di espansione all'interno per ridurre la probabilità che nel tempo insorgano delle fessure.

Infine, viene applicato un film di copertura sigillante a più strati che rende la superficie idrofobica, limita la penetrazione dell'umidità ed ottimizza la resistenza al gelo – disgelo del letto.

L'azienda svedese prevede in aggiunta dei tubi di scarico per l'ispezione e la rimozione dell'umidità.

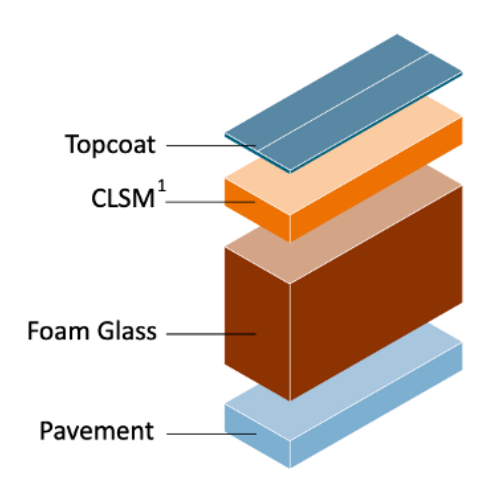


Figura 3.6: Composizione di un EMAS in schiuma di vetro [24]

L'accesso di un aeromobile in overrun è consentito da una o due rampe, seguite da un piano orizzontale (plateau). Ai lati del letto vengono previste ulteriori rampe per l'accesso dei mezzi di soccorso e antincendio e per l'evacuazione degli occupanti.

L'altezza del letto d'arresto è variabile, dal momento che la capacità di arresto è strettamente dipendente dalla quantità di materiale presente. Per tale motivo, lo spessore del letto aumenta con la sua lunghezza, in modo da garantire una dissipazione adeguata dell'energia. [24]

I tempi di progettazione, installazione e manutenzione sono analoghi a quelli visti per la prima tipologia di letti.

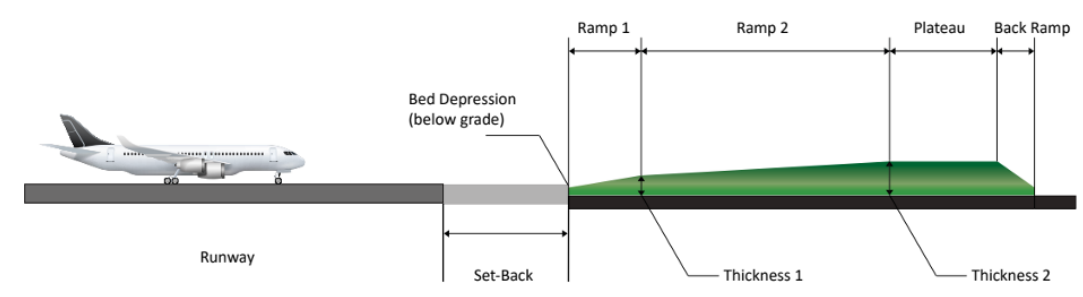


Figura 3.7: Vista laterale di un EMAS in schiuma di vetro [24]

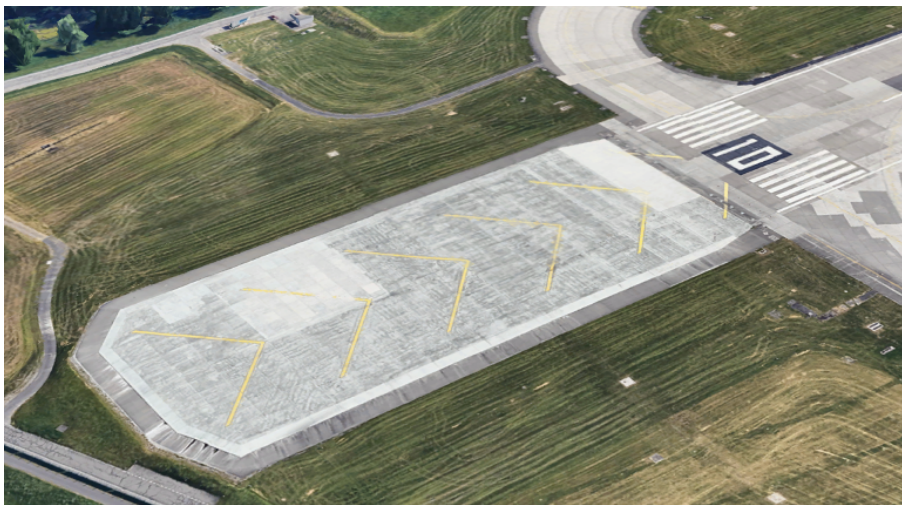


Figura 3.8: EMAS in schiuma di vetro, Aeroporto Internazionale di Zurigo - Kloten [17]

### 3.4. Analisi degli overrun contenuti

I requisiti progettuali e i parametri adottati nello sviluppo di un EMAS sono il risultato di un lungo percorso di ricerche, prove sperimentali e simulazioni numeriche, che hanno progressivamente contribuito ad accrescere il livello di sicurezza e l'affidabilità (in inglese *reliability*) del sistema di arresto.

A titolo di esempio, le normative impongono come parametro progettuale una velocità di uscita dell'aeromobile critico pari a 70 nodi, dopo aver verificato nell'arco di 12 anni che nel 90% dei casi l'overrun avviene ad una velocità di 70 nodi o meno.

In aggiunta, l'impiego di software di simulazione nella progettazione di un EMAS consente di stimare con buona accuratezza sia la traiettoria sia la posizione finale dell'aeromobile in caso di overrun. Ciò rappresenta un vantaggio rispetto alle soluzioni tradizionali, come la RESA, in cui l'arresto del velivolo avviene in uno spazio privo di ostacoli ma non consente di prevederne a priori il comportamento, con una conseguente maggiore probabilità di perdita di controllo.

Un ulteriore parametro progettuale di rilievo è l'aereo critico. Esso viene definito non solamente come l'aereo di dimensioni maggiori che dunque necessita di un maggiore spazio per l'arresto, ma anche come un aereo che utilizza regolarmente la pista in questione. Difatti, dimensionare un EMAS sulla base di un aeromobile di grandi dimensioni con scarsa frequenza di movimenti non garantisce automaticamente lo stesso grado di protezione e sicurezza per i velivoli più piccoli e più presenti nel traffico aeroportuale.

Definito l'aereo critico di progetto, le normative richiedono che il letto venga poi verificato con tutte le altre tipologie di aerei del mix di traffico dell'aeroporto di interesse.

L'azienda produttrice svedese ha riportato che l'EMAS in calcestruzzo alleggerito è stato installato in oltre 120 piste in tutto il mondo e ha arrestato in sicurezza almeno 17 aeromobili in overrun. [24]

Di seguito si descrivono alcuni casi di aeromobili in overrun arrestati in sicurezza dal letto d'arresto EMAS:

- Aeroporto Internazionale di Key West (EYW), Florida (2011): nell'arco di soli quattro giorni la stessa pista fu teatro di non uno, ma ben due incidenti da overrun. Il 31 ottobre un Gulfstream 150 con tre passeggeri a bordo oltrepassò il limite della pista 27, non dotata di EMAS, finendo la sua corsa tra gli alberi, riportando seri danni al velivolo e lesioni sugli occupanti. Quattro giorni dopo, il 3 novembre, un Cessna Citation 550 fuoriuscì dall'altro lato della pista dove era presente un EMAS, percorrendolo così per 148 piedi. Il velivolo subì danni di poca importanza e gli occupanti riuscirono ad evacuare velocemente l'aeromobile. Il verificarsi di due incidenti della stessa tipologia, ma in condizioni operative differenti, evidenziò come la presenza dell'EMAS avesse un ruolo significativo nell'ambito della sicurezza operativa dell'aeroporto.[22]
- Aeroporto LaGuardia (LGA), New York (2016): il 27 ottobre un Boeing 737-700 della Eastern Airlines non fu in grado di arrestarsi all'interno della pista, a seguito di un atterraggio ritardato. Fortunatamente il sistema d'arresto EMAS accolse il velivolo e lo arrestò in sicurezza al suo interno, comportando solamente danni minori all'aeromobile e nessun ferito. [27]

### 3.5. Problematica dell'undershoot

Il letto d'arresto EMAS è un sistema ingegneristico progettato per mitigare i rischi associati ad eventi di overrun, qualora condizioni economiche, ambientali o territoriali non

consentano di estendere la RESA secondo gli standard normativi.

Tuttavia, dalla definizione funzionale stessa del sistema deriva una criticità legata ad eventi di undershoot, ossia ad atterraggi anticipati di un aeromobile rispetto alla soglia di pista. In tali circostanze, il trasferimento dei carichi avviene in modo differente rispetto ad un normale atterraggio su superficie rigida, e le conseguenze dipendono da vari fattori, quali il punto di impatto, la velocità residua e l'angolo di discesa.

La presenza di un EMAS può incrementare il livello complessivo di rischio in caso di undershoot, poiché il sistema è progettato per collassare sotto il peso di un aeromobile, non offrendo di conseguenza la stessa resistenza di una pista convenzionale.

Gli pneumatici, piuttosto che rotolare su una superficie rigida, affonderebbero immediatamente nel materiale del letto, causando un'alterazione della distribuzione dei carichi e una potenziale perdita del controllo del velivolo.

Un aeromobile in atterraggio su un letto d'arresto EMAS potrebbe subire danni strutturali significativi, in particolare al carrello, per tre principali motivi:

1. il velivolo atterrerrebbe ad una velocità superiore a quella di progetto del letto d'arresto;
2. l'affondamento delle ruote potrebbe avvenire in maniera asimmetrica, aumentando di conseguenza il rischio di cedimento strutturale;
3. la decelerazione imposta durante l'affondamento sarebbe brusca ed immediata, a differenza del rallentamento graduale come nel caso di un normale atterraggio.

Inoltre, qualora il pilota decidesse di eseguire una manovra di *go-around*, il contatto con l'EMAS potrebbe rendere estremamente difficile tale operazione.

Di fronte a tale problematica, le normative internazionali e nazionali prevedono che il letto d'arresto venga posizionato il più lontano possibile dall'inizio della pista e separato da quest'ultima da una superficie pavimentata, denominata *setback*. Questa scelta progettuale è stata introdotta in ordine da mitigare la probabilità di un contatto diretto con il letto in caso di undershoot.

Nonostante ciò, innumerevoli ricerche ed indagini statistiche hanno dimostrato che gli eventi di undershoot sono notevolmente più rari e meno frequenti rispetto agli eventi di overrun (come è stato analizzato nel Capitolo 2). Di conseguenza, la problematica non compromette l'efficacia complessiva del sistema EMAS, il quale garantisce un notevole incremento del livello di sicurezza aeroportuale.

In conclusione, anche in riferimento ai dati statistici rilevati, la sicurezza globale di una pista viene incrementata grazie all'installazione di un sistema d'arresto EMAS.



# 4 | Quadro normativo di riferimento

Nel presente capitolo si analizzeranno i requisiti normativi e regolamentari che disciplinano la progettazione, l'installazione e la manutenzione dei sistemi di arresto EMAS, con riferimento ai principali enti regolatori nel mondo dell'aviazione civile.

L'analisi prenderà avvio dalle disposizioni dell'ICAO (*International Civil Aviation Organization*), che costituiscono il quadro di riferimento internazionale, per poi approfondire le linee guida e le specifiche tecniche emanate dalla FAA (*Federal Aviation Administration*) negli Stati Uniti, primo ente ad aver sviluppato e certificato la tecnologia EMAS. Successivamente, verranno esaminate le disposizioni dell'EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) e, in conclusione, le prescrizioni e le raccomandazioni dell'ente nazionale italiano, ENAC (*Ente Nazionale per l'Aviazione Civile*).

Si specifica che l'analisi normativa sarà circoscritta alle sezioni concernenti la progettazione, l'installazione e la manutenzione dei sistemi EMAS, in quanto strettamente rilevanti ai fini del presente lavoro di ricerca.

## 4.1. International Civil Aviation Organization (ICAO)

Il principale documento ufficiale di riferimento è la nona edizione (2022) dell'***Annex 14, Volume I, Aerodromes***. [80] A seguito della trattazione dei requisiti normativi relativi all'area di sicurezza a fine pista (RESA), viene specificato quanto segue, tradotto in italiano:

*“ 9.2 Qualora non sia possibile garantire una RESA standard, occorre fare delle considerazioni per diminuire alcune delle distanze dichiarate della pista al fine di predisporre una RESA standard e un sistema di arresto. 9.3 I programmi di ricerca, nonché la valutazione degli effettivi overrun degli aeromobili nei sistemi di arresto, hanno dimostrato che le prestazioni di alcuni sistemi di arresto possono essere prevedibili ed efficaci nell'arrestare gli aeromobili in overrun. 9.4 Le prestazioni dimostrate di un sistema di arresto possono*

*essere ottenute mediante un metodo di progettazione convalidato, in grado di prevederne le prestazioni. La progettazione e le prestazioni devono essere basate sul tipo di aeromobile che si prevede utilizzerà la pista associata, che impone la maggiore richiesta al sistema di arresto. 9.5 La progettazione di un sistema di arresto deve considerare molteplici parametri dell'aeromobile, inclusi, a titolo esemplificativo ma non esaustivo, i carichi ammissibili sui carrelli, la configurazione dei carrelli, la pressione di contatto degli pneumatici, il baricentro dell'aeromobile e la velocità dell'aeromobile. È necessario anche tenere conto degli undershoot. Inoltre, la progettazione deve consentire in sicurezza le operazioni dei veicoli di soccorso e antincendio a pieno carico, incluso il loro ingresso e uscita." [80]*

Per avere dei requisiti normativi più specifici riguardanti i sistemi d'arresto, il documento rimanda all'Appendice 5 della quarta edizione (2020) dell'**Aerodrome Design Manual, Part 1 – Runways, Doc 9157** [79], in cui viene specificato:

*“Questi requisiti forniscono indicazioni che possono essere considerate come una bozza iniziale per le norme nazionali, oppure possono essere utilizzate direttamente come disposizioni applicabili e sono complementari ai requisiti nazionali riguardanti l'industria, l'ambiente o i piani di emergenza.”*

Questa frase sottolinea come l'ente internazionale non entri nei dettagli costruttivi dei sistemi d'arresto, lasciando così un grado di libertà agli enti nazionali per adattare le norme internazionali al proprio contesto.

L'Appendice 5 definisce un sistema di arresto come *“un sistema progettato per decelerare un aeromobile in overrun.”*. In particolare, l'EMAS *“consiste in materiali ad alto assorbimento di energia e di una resistenza specifica, in grado di deformarsi in modo affidabile e prevedibile sotto il peso dell'aeromobile. (...) I materiali ingegnerizzati si deformeranno sotto il carrello d'atterraggio dell'aeromobile quando questo entra nell'EMAS. La deformazione è un processo irreversibile o parzialmente irreversibile e le prestazioni di arresto del sistema sono proporzionali alla quantità di energia dissipata.”*

Prima della sua installazione, i produttori devono ottenere un'approvazione dell'EMAS da parte dello Stato interessato, per dimostrare il rispetto delle normative locali.

Il sistema EMAS viene definito passivo in quanto *“non richiede alcuna operazione esterna per dare inizio all'arresto del velivolo, né particolari manovre o procedure da parte dell'equipaggio.”*

Il meccanismo d'arresto, infatti, si attiva automaticamente al momento dell'ingresso di un aeromobile.

## Posizione e dimensioni

Il Doc 9157 afferma che l'EMAS *“si trova oltre il fine della pista (o della stopway, se presente) ad una distanza di setback sufficiente per evitare danni legati ai detriti del jet blast.”* [79] Il documento non presenta le dimensioni specifiche del *setback*, ma afferma che la lunghezza minima può differire in base al produttore e alle condizioni operative. Tuttavia, il setback deve avere una lunghezza tale da fornire uno spazio adeguato all'arresto, proteggere il letto dal jet blast, separare la soglia di pista dal letto per ridurre il rischio in caso di undershoot nell'EMAS e diminuire la probabilità che un aeromobile in overrun entri nel letto seguendo una traiettoria non centrata.

L'ICAO suggerisce un setback minimo di 60 metri dalla soglia o dal fine pista. Tale valore può tuttavia essere ridotto qualora uno specifico studio aeronautico dimostri che una distanza inferiore rappresenti la soluzione ottimale per garantire protezione sia in caso di overrun sia di undershoot.

Inoltre, l'asse dell'EMAS deve coincidere con l'asse della pista associata e la sua lunghezza è definita in base alle condizioni operative, ma almeno pari a quella della pista.

## Requisiti progettuali

L'ICAO introduce due parametri principali nella fase progettuale del letto: l'aereo critico e la velocità di uscita di quest'ultimo dalla pista.

L'aereo critico (*critical aircraft*), di cui interessa il suo massimo peso al decollo (MTOW), è definito come *“l'aereo che utilizza regolarmente la pista e che richiede una maggiore capacità di arresto da parte dell'EMAS.”* Tuttavia, l'ICAO specifica che tale definizione è valida *“di solito, ma non sempre.”* Infatti, questo non necessariamente coincide con l'aereo di dimensioni maggiori tra il mix di traffico dell'aeroporto interessato, dal momento che *“le prestazioni di un EMAS sono correlate non solamente al peso del velivolo, ma anche alla configurazione del carrello principale, alla pressione delle gomme e al baricentro.”* Pertanto, ci possono essere casi in cui aeromobili con un MTOW minore dell'aereo di dimensioni maggiori necessitino di un letto d'arresto più lungo.

Per tale motivo, in ordine da ottimizzare la progettazione del sistema, l'ICAO richiede che vengano eseguite delle verifiche prestazionali e simulazioni sul letto non solo riferendosi all'aereo critico scelto, ma anche a tutti gli altri aerei della flotta aerea operante sulla pista associata.

D'altra parte, la velocità di uscita (exit speed) è definita come *“la velocità del carrello anteriore dell'aeromobile nel momento in cui questo oltrepassa il fine pista o l'estremità*

*finale della stopway, se presente.*” La velocità di uscita di progetto imposta dall’ICAO è pari a 70 nodi e le simulazioni vengono condotte tenendo in considerazione questo valore di velocità combinato con il MTOW dell’aereo critico e con l’80% del suo massimo peso all’atterraggio (MLW).

L’ICAO specifica, inoltre, che *“la verifica di un EMAS si basa sul passaggio di un aeromobile reale o di un carico equivalente su ruota singola attraverso un letto di prova. Il progetto considera vari parametri dell’aeromobile, tra cui a titolo esemplificativo ma non esaustivo i carichi ammissibili dei carrelli d’atterraggio, la configurazione dei carrelli, la pressione di contatto degli pneumatici, il peso, il baricentro e la velocità.”*

Di conseguenza, l’EMAS è verificato se non risultano danni strutturali all’aeromobile e lesioni sugli occupanti.

Le prescrizioni di progetto dell’ICAO escludono l’utilizzo degli inversori di spinta, considerando un coefficiente di attrito frenante pari a 0,25 nella pista e nel setback e nullo all’interno dell’EMAS, a meno che il produttore non fornisca un coefficiente di valore differente.

All’EMAS, inoltre, viene richiesto di essere frangibile e montato il più basso possibile. Un requisito progettuale è rappresentato da rampe e gradini di accesso al letto per consentire l’evacuazione dei passeggeri e dei membri della crew.

Tra i requisiti progettuali sanciti dall’ICAO, l’EMAS deve essere progettato per prevenire l’accumulo di acqua e per consentire la rimozione del velivolo al suo interno dopo l’incidente, nonché la rimozione di ghiaccio e neve. Esso, inoltre, non deve rappresentare un pericolo per la fauna selvatica e non deve avere superfici riflettenti che possano causare abbagliamento. Infine, l’EMAS non deve creare alcun tipo di interferenza con gli aiuti alla navigazione e deve essere compatibile con i sistemi luminosi di avvicinamento.

## Proprietà dei materiali

I materiali costituenti devono essere dotati di uno strato di protezione contro i detriti generati dal jet blast e garantire una resistenza meccanica tale da consentire un camminamento regolare degli addetti alla manutenzione.

I materiali non devono *“generare o peggiorare i rischi di incendio per gli aeromobili in arrivo, devono essere anti-scintilla, non infiammabili, incombustibili e non devono emettere fumi tossici o maleodoranti durante un incendio dopo l’installazione.”* Inoltre, i materiali devono proteggere l’EMAS dalle condizioni climatiche e dai fattori ambientali quali ac-

qua, ghiaccio, neve, calore, grandine, sale, radiazioni UV, cicli di gelo e disgelo, carburanti, fluidi idraulici e oli lubrificanti, pitture e erbicidi.

## Aree adiacenti

Le strade adiacenti all'EMAS devono essere utilizzate per le operazioni di manutenzione e per i servizi di emergenza. Per tale motivo, *“devono avere una larghezza tale da consentire il passaggio dei mezzi dei Vigili del Fuoco, devono essere livellate per evitare l'accumulo di acqua e devono avere una portanza tale da sostenere il peso dei mezzi dei Vigili del Fuoco.”* L'ingresso nell'EMAS dei mezzi di soccorso deve essere consentito da gradini e rampe ai bordi del letto.

## Manutenzione

L'ICAO richiede che venga redatto un piano di manutenzione prima dell'installazione dell'EMAS, in maniera da mantenere il letto in adeguate condizioni di servizio.

Talvolta, il piano di manutenzione deve ricevere approvazione dallo Stato.

Gli addetti alla manutenzione devono ricevere l'addestramento adeguato e possono essere dipendenti dell'aeroporto, del produttore del letto o di terze parti.

La manutenzione prevede *“test periodici per valutare il livello di servizio del sistema e per programmare le riparazioni o le sostituzioni prima che il letto raggiunga la fine della sua vita di servizio.”*

Le operazioni di manutenzione devono svolgersi in un periodo ragionevolmente breve, in maniera tale soddisfare le esigenze operative e di sicurezza dell'aeroporto.

## Problematica dell'undershoot

È fondamentale sottolineare che secondo l'ICAO l'EMAS *“è progettato in modo da non aumentare il potenziale di danni in caso di undershoot e quindi non causa maggiori problemi di controllo o danni agli aeromobili in caso di contatto anticipato in confronto con una RESA.”*

A giustificazione di ciò, vari studi condotti negli Stati Uniti e nell'Unione Europea a livello mondiale hanno dimostrato che gli undershoot avvengono normalmente nelle strette vicinanze della pista. Difatti, circa il 50% degli undershoot avviene nei primi 60 metri antecedenti la soglia della pista e gli overrun sono quattro volte più frequenti degli undershoot.

Nonostante la scarsa frequenza degli eventi di undershoot, *“la presenza di un sistema di*

*arresto non incrementa i danni potenziali in caso di undershoot più del rischio associato ad un undershoot in una RESA.”*

## 4.2. Federal Aviation Administration (FAA)

Il principale riferimento normativo pubblicato dalla FAA in materia di progettazione aeroportuale è l'**Advisory Circular 150/5300-13B**, versione aggiornata al 2024 dell'edizione originale del 2012. [66]

Il documento sancisce i requisiti progettuali e di esercizio delle varie componenti di un'infrastruttura aeroportuale.

Nell'ambito dell'area di sicurezza di pista (RSA), l'FAA afferma che l'installazione di un EMAS è un'alternativa accettabile qualora non fosse possibile garantire le dimensioni standard della RSA, a condizione che *“l'EMAS standard garantisca un livello di sicurezza equivalente a quello di una completa RSA conforme agli standard dimensionali.”*

Per i requisiti specifici di pianificazione, progettazione, installazione e manutenzione di un EMAS in una RSA, il documento rimanda all'**Advisory Circular 150/5220-22B** del 2012 [65], mentre per la valutazione finanziaria del letto la FAA riconduce alla **FAA Order 5200.9** [97].

La FAA specifica che l'Advisory Circular non contiene norme obbligatorie, bensì linee guide e raccomandazioni. Tuttavia, essa diventa obbligatoria per quegli aeroporti *“che installano un EMAS e vengono finanziati all'interno di un programma di assistenza federale e per gli aeroporti certificati secondo il Titolo 14 del Codice dei Regolamenti Federali (CFR), Parte 139, Certificazione degli Aeroporti.”* [65]

Inoltre, la FAA mette a disposizione dei grafici utili alla progettazione, non obbligatori ma utilizzabili come base per poi definire il progetto finale. Difatti, il progetto effettivo deve considerare le esigenze del singolo sito di installazione e deve essere realizzato dal produttore del letto.

Per l'ente americano, l'installazione di un EMAS è riferito in particolar modo agli aeroporti costruiti prima dell'avvento degli standard progettuali della RSA, che dunque presentano ostacoli naturali, aree urbane e/o vincoli ambientali che impediscono di conformare l'area agli standard attuali.

L'FAA introduce il concetto fondamentale dell'equivalenza del livello di sicurezza:

*“Un EMAS standard garantisce un livello di sicurezza equivalente a quello di una RSA completa che rispetta gli standard dimensionali (...). Oltre a ciò, garantisce un livello di sicurezza accettabile in eventi di undershoot (...), oltre agli eventi di overrun.”*

Oltre a ciò, la FAA definisce la durata del ciclo di vita del letto, fissandola a 20 anni.

### Posizione e dimensioni

L'EMAS è posizionato oltre il fine pista ed è centrato rispetto all'asse centrale prolungato della pista.

Viene prevista una distanza di *setback* tra il fine pista e l'inizio del letto, in modo tale da evitare danni dovuti al jet blast e per diminuire la probabilità che un aeromobile in undershoot atterri sul sistema. Tale distanza varia in funzione dell'area disponibile e dei materiali costituenti il letto. Se l'area disponibile risulta maggiore di quella minima richiesta, l'EMAS deve essere posizionato il più lontano possibile dal fine pista per diminuire i possibili danni al sistema dovuti ad overrun corti o ad undershoot, oltre ad essere una scelta economicamente più conveniente.

La larghezza minima di un EMAS deve essere pari a quella della pista associata, mentre la lunghezza viene definita dal produttore.

Come aiuto nella definizione della lunghezza del letto, la FAA presenta delle tavole che propongono un valore di lunghezza in funzione della velocità di uscita dell'aereo critico, come la seguente per un Boeing 737-400:

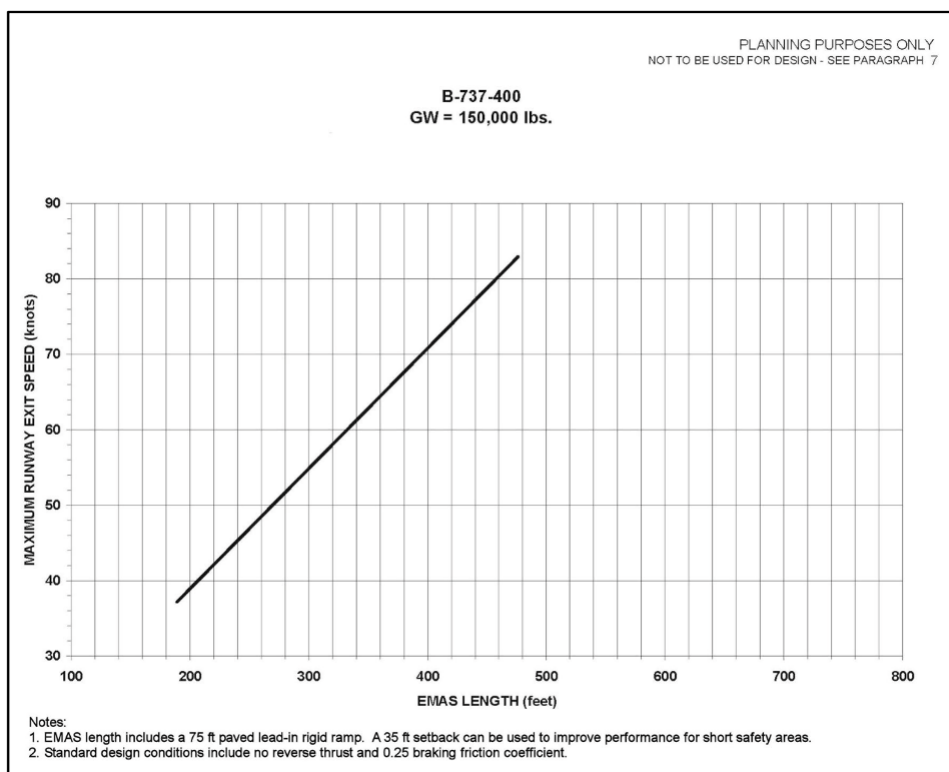


Figura 4.1: Planning chart fornita dalla FAA per la definizione della lunghezza di un EMAS, Boeing 737-400 (FAA AC 150/5220-22B)[65]

Come specificato nelle note, il grafico è stato definito supponendo che la lunghezza dell'EMAS includa una rampa rigida di ingresso pavimentata della lunghezza di 75 piedi, che non ci sia l'utilizzo degli inversori di spinta e che il coefficiente di attrito frenante sia pari a 0,25.

## Requisiti progettuali

Il progetto di un EMAS *“deve essere supportato da un metodo di progetto valido che riesca a prevedere le prestazioni del sistema.”* Inoltre, esso deve essere validato tramite test in campo o in laboratorio e le modalità di verifica sono le medesime suggerite dall'ICAO, suggerendo di considerare tra i parametri anche i rimbalzi del materiale durante il passaggio dell'aeromobile, che potrebbero diminuire l'efficacia del letto.

Anche per la FAA, la lunghezza di una RSA oltre il fine pista può essere ridotta rispetto a quanto prescritto dalla normativa qualora venga installato un letto d'arresto EMAS, considerato come misura equivalente di sicurezza.

La definizione di aereo critico è la medesima dell'ICAO, specificando che in alcuni casi

è preferibile progettare un EMAS considerando un gruppo di aerei critici di progetto, piuttosto che considerarne solamente uno.

Per quanto riguarda la velocità di uscita la FAA introduce delle novità secondo quanto esposto dall'ente internazionale visto precedentemente. Infatti, la FAA propone due valori diversi di velocità di uscita di progetto: nella massima misura possibile si considera *“una velocità di 70 nodi, senza imporre carichi che eccedano i limiti di progetto del velivolo, causanti danni strutturali o imponendo decelerazioni eccessive sugli occupanti”*; altrimenti, se lo spazio di RSA disponibile non è sufficiente per poter installare un EMAS standard, la FAA propone *“una velocità minima di progetto di 40 nodi per un EMAS non standard.”* Inoltre, l'ente americano suggerisce di supporre che le ruote del carrello principale siano a pieno contatto con la pavimentazione e che l'aeromobile viaggi parallelamente all'asse centrale della pista.

In aggiunta, la FAA specifica che i requisiti progettuali forniti sono applicabili ad aerei critici con MTOW non inferiore ai 25.000 pounds (circa 11.340 chilogrammi).

Per quanto riguarda il sito di installazione, *“l'EMAS deve essere costruito sopra una superficie pavimentata che si estende dalla soglia della pista, con una capacità portante tale da supportare il passaggio occasionale dell'aereo critico di progetto che utilizza la pista e il pieno carico dei mezzi di soccorso aereo e antincendio (AARF), senza che ci siano deformazioni superficiali o danni strutturali sull'aeromobile o sui veicoli.”* La FAA suggerisce di realizzare tale superficie con una portanza pari a quella delle banchine della pista (*shoulders*).

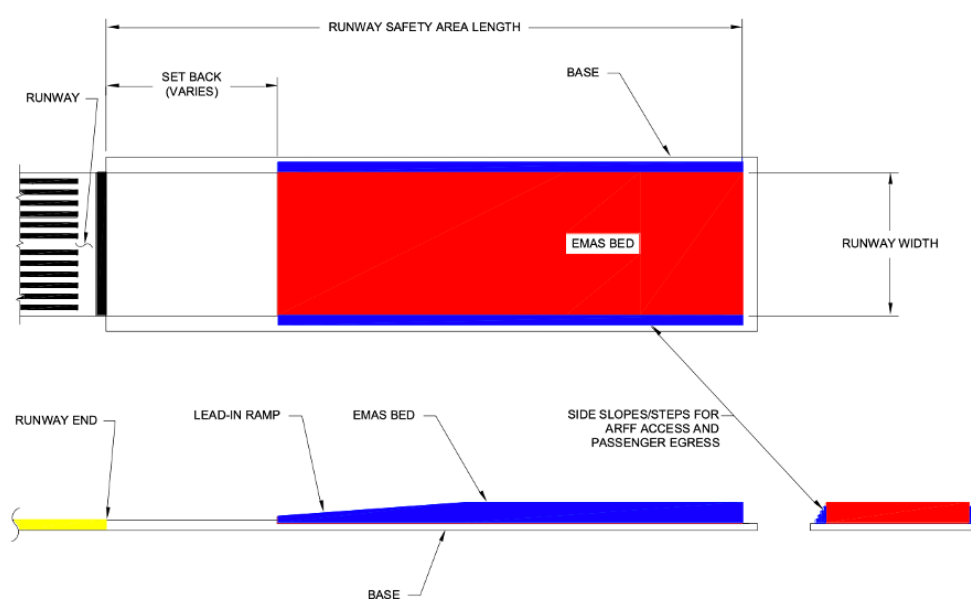


Figura 4.2: Sezione tipica di un EMAS (FAA AC 150/5220-22B) [65]

Le richieste di progetto del letto sono le medesime esposte dall'ICAO, quali la facile rimozione del velivolo dopo l'impatto, la rimozione di ghiaccio e neve per prevenire l'accumulo di acqua, nessuna interferenza con gli aiuti alla navigazione e con i sistemi luminosi.

Infine, la segnaletica orizzontale di un EMAS è costituita da frecce di colore giallo, per evidenziare come l'area non sia utilizzabile per il decollo, l'atterraggio e il rullaggio.

## Proprietà dei materiali

I materiali costituenti il letto devono mantenere le loro caratteristiche uniformi nel tempo e in ogni condizione climatica, entro un range di temperature appropriato per il sito di installazione. Inoltre, deve essere sempre possibile prevedere la risposta del letto al momento dell'ingresso di un aeromobile.

Le caratteristiche fisiche e chimiche richieste ai materiali sono le medesime che si trovano nel documento dell'ICAO, aggiungendo solamente che essi devono essere resistenti anche alle tempeste di neve e sabbia.

I materiali devono essere tali da creare una superficie capace di supportare un traffico pedonale degli addetti alla manutenzione, evitando danni superficiali. La FAA aggiunge, a differenza dell'ICAO, che l'EMAS non è progettato per supportare il traffico veicolare dei mezzi di manutenzione.

Seconda la FAA, un produttore di EMAS deve redigere un programma di campionamento e verifica di tutti i materiali che costituiscono il sistema d'arresto, controllando che il loro profilo sforzo-deformazione resti invariato nel tempo, in modo tale da poter sempre prevedere il comportamento del letto durante il suo ciclo di vita utile. Tale piano di manutenzione deve ricevere approvazione dalla FAA.

## Aree adiacenti

L'ingresso e l'uscita dei mezzi di soccorso e antincendio devono essere sempre consentiti; pertanto, si devono disporre delle rampe di accesso nella parte frontale e ai lati dell'EMAS. L'accesso dal lato posteriore è suggerito, ma non richiesto e *“le pendenze massime delle rampe devono essere definite in funzione dei materiali costituenti il letto d'arresto e delle caratteristiche prestazionali dei mezzi dei Vigili del Fuoco.”*

Ai lati sono ammessi anche dei gradini in sostituzione alle rampe e devono consentire anche l'evacuazione degli occupanti.

## Manutenzione

L'EMAS deve poter essere riparato entro 45 giorni dall'evento di overrun, escludendo quei giorni in cui le operazioni di riparazione non possono svolgersi (meteo avverso, vincoli operativi, ecc.).

Il produttore deve sempre preparare un programma di ispezione e manutenzione, per il quale è richiesta l'approvazione della FAA, contenente le informazioni generali, le informazioni sulle ispezioni e sulle procedure di riparazione e manutenzione del letto e altre informazioni di varia natura.

## Problematica dell'undershoot

La protezione in caso di undershoot prevede due opzioni:

1. garantire almeno 600 piedi (circa 183 metri), o la lunghezza della RSA standard se minore, tra la soglia della pista e l'estremità finale dell'EMAS, se la pista dispone di una guida verticale strumentale o visiva per la fase di approccio;
2. garantire l'intera lunghezza della RSA standard se non è disponibile una guida verticale nella fase di approccio.

L'immagine seguente dimostra come, per piste con categorie di approccio C e D, la lunghezza della RSA possa essere ridotta al valore minimo richiesto grazie all'installazione di un EMAS standard, supponendo che la pista disponga di una guida verticale all'approccio (caso 1):

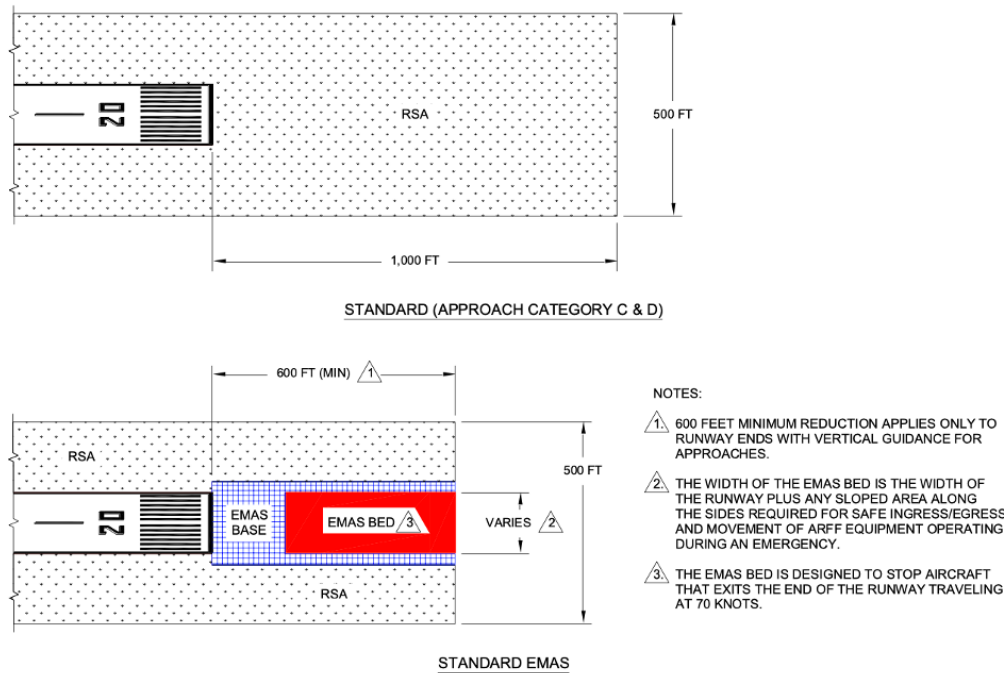


Figura 4.3: Requisiti di progetto per l'installazione di un EMAS standard in piste con codice di approccio C e D (FAA AC 150/5220-22B) [65]

Inoltre, la FAA suggerisce di condurre dei test tramite simulatori di volo per definire le resistenze meccaniche minime e le densità minime dei materiali, in modo da scongiurare la perdita di controllo di un velivolo in undershoot su un EMAS. Pertanto, vengono considerati accettabili tutti quei materiali le cui caratteristiche superano i limiti definiti a seguito di tali test di simulazione.

### 4.3. European Union Aviation Safety Agency (EASA)

La fonte normativa di riferimento per l'ente europeo di regolamentazione è rappresentata dal *Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN)*, documento che raccoglie sia i requisiti tecnici (CS), riconosciuti come mezzi accettabili di conformità ai regolamenti in materia di aviazione civile, sia il materiale di guida (GM), costituito da indicazioni, chiarimenti e spiegazioni per una corretta interpretazione e lettura delle specifiche tecniche. [62]

La *Certification Specification (CS)* che disciplina la progettazione, l'installazione e la manutenzione dei letti d'arresto EMAS è la *CS ADR-DSN.C.236*. Essa riporta prescrizioni analoghe a quelle contenute nei documenti della FAA riguardo la collocazione e

le dimensioni, i requisiti progettuali del letto, dei suoi materiali e delle aree adiacenti. A differenza dell'ente americano, tuttavia, l'EASA non stabilisce una velocità di uscita minima di progetto pari a 40 nodi qualora non ci fosse spazio sufficiente per realizzare un EMAS standard. Piuttosto, l'ente europeo richiede che *“l'EMAS venga progettato per offrire la massima capacità di arresto possibile nei confronti dell'aereo critico di progetto.”*

Il materiale di guida (GM) riguardo la progettazione di un sistema d'arresto EMAS è il **GM1 ADR-DSN.C.236**. In tale documento vengono specificati i requisiti chimici e fisici dei materiali (analoghi a quelli riportati nei documenti FAA), le caratteristiche meccaniche richieste al letto, le prescrizioni relative alla distanza di *setback* e la definizione di aeromobile critico e di velocità di uscita.

Rispetto alla documentazione americana, emergono alcune differenze rilevanti:

#### 1. Durata del ciclo di vita

L'EASA non specifica una durata del ciclo di vita del letto, mentre la FAA fissa tale valore a 20 anni.

#### 2. Condizioni di progetto

Secondo l'EASA nel Materiale di Guida, *“l'EMAS deve essere progettato per essere attraversato preferibilmente con una traiettoria rettilinea e con un uso illimitato dei freni e/o degli inversori di spinta.”* Tale impostazione si discosta da quella dell'I-CAO e della FAA: esse, infatti, prevedono che l'EMAS venga progettato secondo la condizione più critica, in cui l'aeromobile entra nel letto senza utilizzare gli inversori di spinta (*“no reverse thrust”*), dal momento che non esiste la certezza che il pilota abbia la possibilità di attivarli. L'EASA, al contrario, presuppone che il pilota debba e possa attivare gli inversori di spinta anche durante l'ingresso nell'EMAS e, di conseguenza, le capacità di decelerazione del velivolo vengono integrate nella progettazione del letto.

#### 3. Rischio in undershoot

L'EASA suggerisce che ci sia una conoscenza di base dei sistemi d'arresto da parte della crew a bordo del velivolo, in modo da scongiurare manovre indesiderate che potrebbero impedire l'ingresso dell'aeromobile nel letto.

Inoltre, l'ente europeo suggerisce di garantire una distanza di setback di almeno 60 metri dalla soglia o dal fine pista, a differenza della FAA che non impone un valore minimo.

## 4.4. Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC)

Nel contesto nazionale italiano, il testo di riferimento per la progettazione di un EMAS è rappresentato dalle *Linee guida per la progettazione, l'installazione ed il collaudo dei letti di arresto (EMAS)*. [55]

In apertura, l'ENAC riporta i due principali risultati di uno studio di casistica di incidenti di overrun, condotto in un arco di 12 anni:

1. la distanza massima entro la quale gli aeromobili si sono arrestati risulta pari a 300 metri, corrispondente alla somma di 240 metri di RESA e 60 metri di *setback*;
2. la velocità di uscita di un aeromobile in overrun è pari a 70 nodi.

La realizzazione di un EMAS è indirizzata a quegli aeroporti in cui “*un adeguamento di tipo standard della RESA non sia tecnicamente fattibile e/o economicamente vantaggioso*”, a seconda dei risultati di uno specifico *Risk Assessment*.

Il documento ENAC fornisce inoltre linee guida relative alla valutazione economica del ciclo di vita di un EMAS e al confronto costi-benefici con le soluzioni alternative disponibili. Tali aspetti verranno approfonditi in seguito, nell'analisi dell'impatto economico del sistema. In questa sede, invece, l'attenzione sarà rivolta ai requisiti progettuali definiti dall'ente italiano.

Analogamente alla FAA, l'ENAC fissa il valore della vita utile richiesta al letto a 20 anni e prevede, come velocità di uscita alternativa ai 70 nodi, un valore di 40 nodi per un EMAS non standard, qualora lo spazio disponibile non fosse sufficiente per realizzarne uno secondo gli standard progettuali.

A differenza delle altre normative, l'ENAC descrive nel dettaglio i tre elementi compositivi di un sistema d'arresto:

### 1. Piano di appoggio

Si utilizzano materiali permeabili o impermeabili, in funzione delle caratteristiche del letto, in grado di garantire l'allontanamento delle acque meteoriche ed una corretta posa del sistema. Si richiede una portanza orientativamente simile a quella delle spalle di pista e capace di supportare il transito accidentale di un aeromobile. Inoltre, si devono prevedere sistemi di raccolta delle acque.

### 2. Letto di arresto

Si distinguono due principali tipologie di materiali: i calcestruzzi cellulari a bassissima densità e gli inerti leggeri. I calcestruzzi cellulari a bassissima densità sono

realizzati in blocchi assemblati e solidarizzati tra loro, legati al piano di posa con bitume a caldo. Essi sono costituiti da una miscela di cemento, acqua, sabbia e additivo aerante, simile a quella dei conglomerati cellulari edilizi. La resistenza meccanica è un parametro fondamentale, per cui i blocchi di calcestruzzo *“devono collassare quando sono attraversati dai pneumatici degli aeromobili ma anche sopportare il transito pedonale e dei mezzi di soccorso.”* Gli inerti granulari provengono dalla produzione di aggregati alleggeriti e hanno dimensioni comprese tra i 5 e i 10 centimetri. Sono economici e semplici da mantenere e riparare. Inoltre, a differenza dei calcestruzzi, non tendono a polverizzarsi con rischio conseguente di essere risucchiati dalle turbine di un aereo.

### 3. Opere di finitura

Esse non hanno alcun effetto sulle capacità di arresto del letto, ma devono comunque possedere determinate caratteristiche quali la resistenza all'acqua, ai raggi ultravioletti, ai sali e ai liquidi per il de-icing, alle alte e basse temperature; inoltre, devono essere antiscivolo e non devono polverizzarsi.

L'ENAC non stabilisce un valore minimo obbligatorio per la distanza di setback; tuttavia, associa la realizzazione di un letto d'arresto ad una lunghezza della strip compresa tra il fine pista e l'inizio del sistema pari a 60 metri.

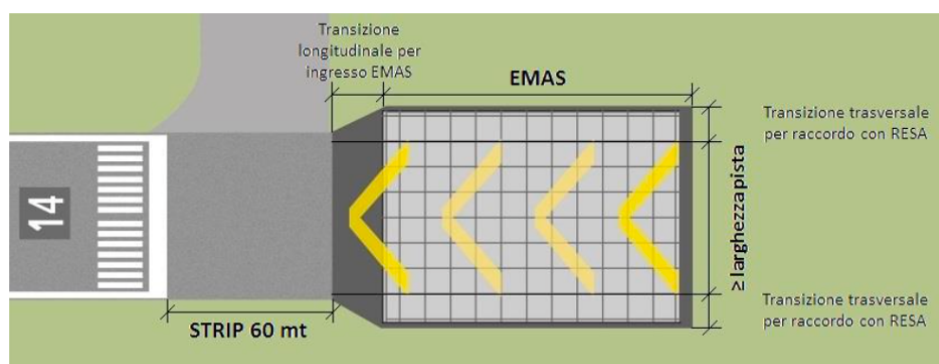


Figura 4.4: Vista dall'alto di un EMAS e della distanza di setback (ENAC, Linee guida per la progettazione, l'installazione ed il collaudo dei letti di arresto (EMAS))

Anche l'ENAC impone che il progetto di un EMAS venga realizzato congiuntamente a prove di laboratorio e test in scala reale, i cui risultati devono essere confrontati tra di loro. Inoltre, suggerisce una simulazione dinamica degli effetti derivanti da un ingresso di un aeromobile nel letto con una traiettoria non rettilinea.

La normativa italiana si discosta dalle altre in quanto presenta due diversi scenari di progetto: il “*Typical case*”, con coefficiente di frenata pari a 0,35 e inversori di spinta attivi, e il “*Design case*”, con coefficiente di frenata pari a 0,25 e inversori di spinta disattivati. Per accrescere il livello di sicurezza in fase di progettazione, il letto può essere dimensionato supponendo un coefficiente di frenata nullo o inversori di spinta disattivati.

Per la valutazione dell’impatto ambientale del letto, l’ENAC richiede che il produttore fornisca la descrizione di tutti i prodotti impiegati per valutarne la compatibilità ambientale.

In termini di manutenzione, infine, l’Appaltatore è tenuto a redigere un programma di manutenzione della validità di almeno 20 anni, suddiviso in manutenzione ordinaria giornaliera/settimanale/mensile, ordinaria annuale e manutenzione e verifica performance quinquennale.

# 5 | Progettazione di un EMAS

La fase di progettazione di un sistema d'arresto EMAS rappresenta un momento cruciale nel processo di pianificazione e realizzazione di infrastrutture aeroportuali.

Il dimensionamento di un letto d'arresto, infatti, richiede estrema accuratezza e un approccio metodico e preciso, dal momento che il meccanismo di dissipazione dell'energia cinetica del velivolo è funzione di numerosi fattori di varia natura. L'efficienza del sistema risulta pertanto direttamente legata al livello di sicurezza operativa offerto dal letto d'arresto nei confronti sia degli aeromobili sia dei suoi occupanti: la preservazione dell'integrità strutturale e la tutela della salute degli occupanti rappresentano i principali obiettivi progettuali.

Per garantire ordine e chiarezza, l'analisi sarà condotta in due sezioni distinte: nella prima parte, lo studio si soffermerà sulla progettazione geometrica di un EMAS, con particolare riferimento ai modelli di calcolo e ai software di simulazione proposti e messi a punto per la definizione delle dimensioni del letto; in seguito, la seconda parte sarà dedicata alla progettazione planimetrica del sistema, con riferimento alla sua ubicazione rispetto alla pista, al dimensionamento delle rampe d'accesso e delle aree adiacenti, in ordine da soddisfare i requisiti normativi illustrati nel Capitolo 4.

## 5.1. Progettazione geometrica

La progettazione geometrica di un EMAS è di competenza esclusiva del produttore, che la svolge in base a specifici parametri progettuali di input legati al sito di installazione.

Il produttore dispone di un proprio software di simulazione basato su modelli di calcolo avanzati, che rappresenta uno strumento fondamentale per la verifica del corretto funzionamento del letto e del raggiungimento degli obiettivi prestazionali tipici di un EMAS. Il software, opportunamente validato mediante dati sperimentali e casi reali, supporta la fase di progettazione consentendo di analizzare scenari operativi differenti e di affinare le dimensioni finali del sistema. [24]

Progettare un letto d'arresto è una sfida complessa che mira a garantire la massima si-

curezza ed affidabilità. La difficoltà risiede, in particolar modo, nella molteplicità dei parametri in ingresso che influenzano il meccanismo d'arresto e negli altrettanti parametri di output da verificare per ottenere l'approvazione del letto e procedere alla sua installazione.

I parametri progettuali di input vengono forniti dal gestore aeroportuale e dal progettista incaricato, mentre la progettazione vera e propria di un EMAS è compito del produttore.

### 5.1.1. Obiettivo e condizioni di progetto

Come discusso nei capitoli precedenti, l'EMAS è un sistema di arresto passivo collocato oltre l'estremità finale di una pista, progettato per mitigare i rischi conseguenti ad un evento di overrun. Il letto d'arresto ha il compito di accogliere l'aeromobile dopo la sua fuoriuscita dalla pista e di applicare su di esso una forza decelerante graduale, fino al suo completo arresto in sicurezza.

La capacità di arresto di un EMAS è legata a numerosi fattori, tra cui la natura dei suoi materiali e le sue dimensioni geometriche.

Le condizioni fondamentali di progetto, da controllare e verificare sempre in fase di dimensionamento, sono principalmente due, entrambe legate al concetto di sicurezza:

1. garantire l'integrità strutturale del velivolo;
2. evitare lesioni a passeggeri e membri dell'equipaggio.

Ciò vuol dire che il dimensionamento di un EMAS richiede sempre la verifica delle forze agenti sul carrello dell'aeromobile e delle decelerazioni imposte sugli occupanti, assicurando che queste rientrino nei limiti di tollerabilità, che verranno approfonditi nel dettaglio nel Capitolo 8.

Oltre a ciò, occorre garantire il rispetto degli altri requisiti normativi, verificando che l'installazione sia conforme alle prescrizioni vigenti in materia di impatto ambientale e di sicurezza aeroportuale.

### 5.1.2. Modalità di progettazione e verifica

La progettazione geometrica di un EMAS consiste nella definizione delle sue dimensioni principali quali larghezza, lunghezza e spessore, nella scelta della tipologia di letto e nella determinazione delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali impiegati.

L'ente regolatore americano FAA fornisce dei grafici da utilizzare in fase di pianificazione, come ausilio per un dimensionamento preliminare del letto [65]. Tali grafici, denominati

in inglese *Planning Charts*, sono frutto di simulazioni sviluppate negli anni sui sistemi d'arresto e suggeriscono la lunghezza di un EMAS in funzione della velocità di uscita dell'aeromobile, la cui definizione è stata enunciata nel Capitolo 4 relativo al quadro normativo di riferimento.

Tuttavia, nell'*Advisory Circular 150/5220-22B* la FAA specifica chiaramente che: “*Le Planning Charts non sono sufficienti per la progettazione finale. La progettazione finale deve essere realizzata dal produttore e personalizzata per ogni installazione.*” [65]

Tali tavole si riducono quindi ad essere solamente uno strumento di supporto preliminare, dal momento che l'affidabilità e l'efficienza del sistema si basano sulla possibilità di prevedere il meccanismo d'arresto prima che si verifichi l'evento di overrun. Per tale motivo, le normative richiedono lo svolgimento di esperimenti in laboratorio e/o test in scala reale che possano supportare il metodo di progettazione, fornendo anche un confronto dei risultati ottenuti.

Le simulazioni e le sperimentazioni hanno l'obiettivo principale di studiare l'interfaccia tra le ruote del carrello e la superficie del letto, analizzando il comportamento dei materiali e le forze agenti durante il processo di decelerazione. Esistono vari scenari di progetto ed è preferibile dimensionare l'EMAS riferendosi allo scenario più critico, ovvero quello di un overrun incontrollato senza l'azionamento di freni e inversori di spinta.

Negli anni, l'avanzamento delle tecnologie ha consentito di affinare software di simulazione basati su modelli matematici, che, prendendo in ingresso specifici parametri di progetto, restituiscono grandezze utili sia per verificare il comportamento del letto, sia per valutarne l'impatto economico.

Una buona progettazione di un EMAS mostra i suoi risultati non solamente in termini di sicurezza operativa, ma anche sul piano economico: difatti, un letto sovradimensionato comporterebbe costi eccessivi e non necessari per il gestore aeroportuale, mentre un dimensionamento accurato, calibrato anche in funzione degli spazi disponibili, rappresenta una misura efficace di contenimento dei costi.

Al fine di rendere la trattazione più chiara e sistematica, si fa riferimento ad un diagramma presente nel *Report 29 “Developing Improved Civil Aircraft Arresting Systems”* del 2009 dell'Airport Cooperative Research Program (ACRP), un programma di ricerca statunitense dedicato all'analisi e allo studio di tematiche relative al mondo dell'aviazione. [41]

Il Report 29 si occupa di valutare diverse tipologie di materiali utilizzabili in un let-

to d'arresto, evidenziandone i vantaggi e fornendo un confronto tra le varie soluzioni possibili.

Il diagramma può essere interpretato secondo due diverse prospettive:

1. **Strumento di progettazione:** a partire dalle variabili di input (ad esempio tipologia di aeromobile, massa, velocità di uscita, spazio disponibile), i software dedicati restituiscono le dimensioni geometriche ottimali del letto e la tipologia e i materiali più idonei.
2. **Strumento di validazione:** considerando un EMAS già definito e fissando determinate condizioni iniziali (quali l'ingresso di un aeromobile a una specifica velocità e sotto condizioni operative assegnate), i software di simulazione forniscono in output grandezze fondamentali come le decelerazioni trasmesse al carrello e agli occupanti, insieme a una stima economica del sistema. Tali output sono essenziali per la validazione finale del letto, prima della sua installazione in sito.

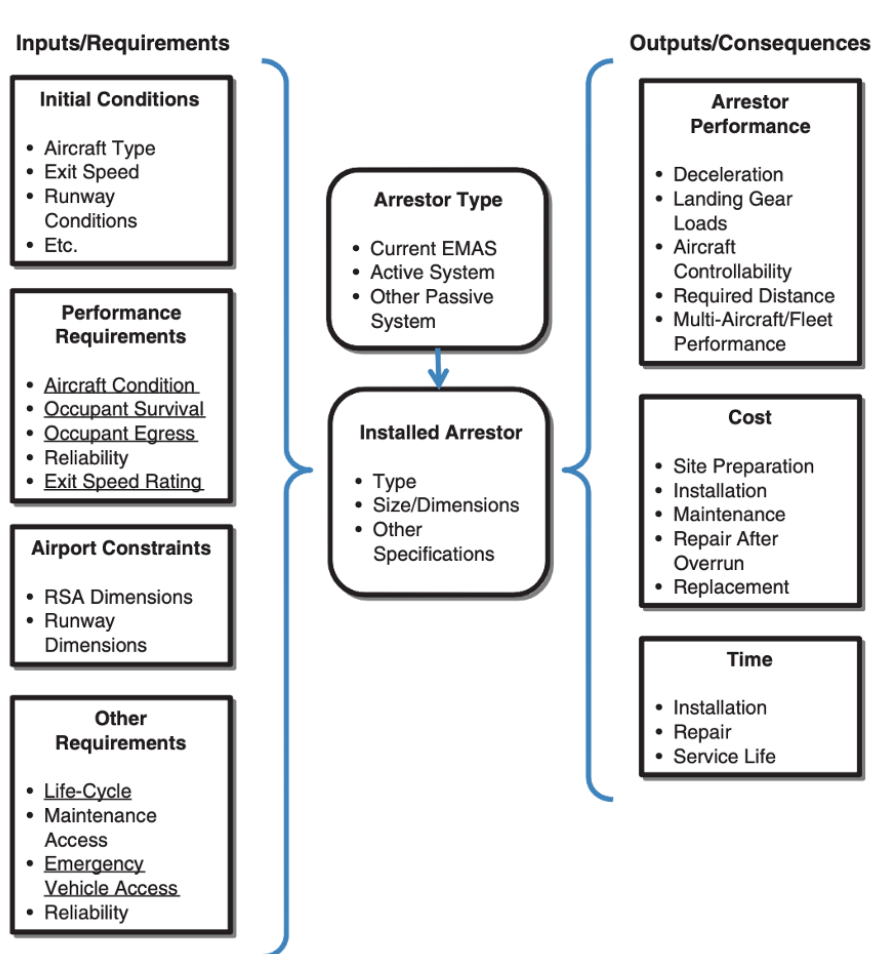


Figura 5.1: Parametri di progetto stabiliti dalla FAA ACRP Report 29, Figura 4-1 [41]

Come emerge chiaramente dal diagramma, il dimensionamento geometrico di un EMAS riguarda la definizione della sua tipologia, delle sue dimensioni principali e di altre caratteristiche specifiche, in particolar modo quelle relative ai materiali. I dati di input si identificano con le richieste normative analizzate precedentemente, mentre i dati di output rappresentano le conseguenze di tali input.

I parametri sono correlati tra di loro; ad esempio, la tipologia del sistema d'arresto e le sue caratteristiche prestazionali influiscono direttamente sul costo finale del sistema. Inoltre, la scelta della tipologia del letto è legata alle richieste prestazionali e ai vincoli del sito di installazione e definisce le procedure di manutenzione e riparazione necessarie durante la vita utile dell'EMAS.

Poiché il dimensionamento è fortemente sensibile a ciascun parametro di input, la fase successiva consiste nell'analisi dettagliata dei singoli parametri.

### 5.1.3. Parametri progettuali di input

Di seguito si procede alla discussione dei singoli parametri, seguendo le categorie presenti nel diagramma del Report.

#### Condizioni iniziali

- **Tipologia di aereo:** è l'aereo in ingresso nell'EMAS che viene utilizzato nelle simulazioni. Le normative internazionali e nazionali definiscono l'aereo critico di progetto come l'aeromobile che utilizza regolarmente la pista e che richiede una maggiore capacità di arresto da parte del sistema EMAS. Tuttavia, è preferibile selezionare più aerei critici per garantire maggiore flessibilità del sistema.
- **Velocità di uscita:** è la velocità con cui l'aeromobile fuoriesce dal limite ultimo della pista. Essa dipende dalle condizioni operative, dalle condizioni della pista e dalle capacità di frenata del velivolo.
- **Condizioni della pista:** la superficie può essere asciutta, bagnata o contaminata, con diversi effetti sull'aderenza tra la pavimentazione e il velivolo. Rappresentano dunque un parametro di fondamentale importanza, influenzando il meccanismo di ingresso del velivolo nel letto.

#### Richieste prestazionali

- **Condizioni dell'aeromobile:** l'EMAS viene dimensionato per evitare danni strutturali del velivolo, con particolare riferimento al sovraccarico e al collasso del carrello.

Tuttavia, il Report 29 dell'ACRP evidenzia come la progettazione possa essere resa più flessibile se si accettasse la possibilità di collasso e/o di sovraccarico del carrello anteriore dell'aeromobile. Questo risulta ammissibile in quanto alcuni test condotti sui sistemi EMAS hanno dimostrato che il collasso del carrello anteriore non incrementerebbe il rischio di lesioni per gli occupanti, pur comportando costi maggiori per la riparazione del componente. Tale argomento verrà discusso in maniera più ampia nel Capitolo 8.

- **Sopravvivenza degli occupanti:** condizione primaria per la validazione di un letto d'arresto è che le decelerazioni imposte sugli occupanti rientrino nei limiti di tollerabilità di un essere umano, evitando di conseguenza lesioni sui passeggeri e sui membri dell'equipaggio.
- **Evacuazione degli occupanti:** si richiede che l'EMAS venga progettato per consentire una sicura e rapida evacuazione degli occupanti dal letto a seguito di un incidente di overrun. La superficie del sistema deve permettere un camminamento regolare, in modo che le procedure di evacuazione possano seguire modalità analoghe a quelle previste per incidenti su pista o taxiway.
- **Affidabilità:** è rappresentata dalla percentuale di aeromobili arrestati in una determinata configurazione del sistema. È una prestazione che viene richiesta ad un EMAS in fase di progettazione. In linea generale, i sistemi d'arresto attivi come quelli utilizzati in ambito militare possiedono un livello di affidabilità maggiore, con almeno il 97,5 % di aerei arrestati. Tale valore è difficilmente raggiungibile da un sistema d'arresto passivo come l'EMAS ed uno dei principali motivi è la mancanza di un collegamento strutturale diretto tra l'aeromobile ed il sistema d'arresto. Nei sistemi militari, infatti, l'accoppiamento meccanico tra il gancio di coda dell'aeromobile e i cavi d'arresto aeroportuali assicura un'azione controllata ed efficace, mentre nel caso dell'EMAS l'interazione si basa esclusivamente sul contatto tra i carrelli del velivolo e il materiale frangibile del letto d'arresto.
- **Velocità di uscita di progetto:** è la velocità di uscita dell'aeromobile secondo la quale l'EMAS viene progettato. Dopo uno studio casistico condotto negli anni '90 i cui risultati sono stati riportati nel documento della FAA *DOT/FAA/CT 93-80* [64], è stato rilevato che il 90% degli aeromobili in overrun fuoriesce dalla pista ad una velocità pari o inferiore a 70 nodi. Pertanto, le normative vigenti fissano il valore di progetto a 70 nodi. Qualora lo spazio disponibile per realizzare un EMAS standard non sia sufficiente, i documenti della FAA e dell'ENAC propongono un valore minimo di progetto di 40 nodi per un EMAS non standard.

Nel 2007, tuttavia, il Transportation Research Board (TRB) e l'Airport Cooperative Research Program (ACRP) hanno raccolto dati storici riguardanti eventi di overrun e undershoot, dimostrando risultati diversi rispetto a quelli raccolti negli anni '90. Infatti, una velocità di 70 nodi riuscirebbe a contenere non più il 90 %, ma l'80,5 % degli overrun, evidenziando pertanto un cambiamento della curva cumulativa di probabilità di overrun contenuti, in funzione della velocità di uscita:

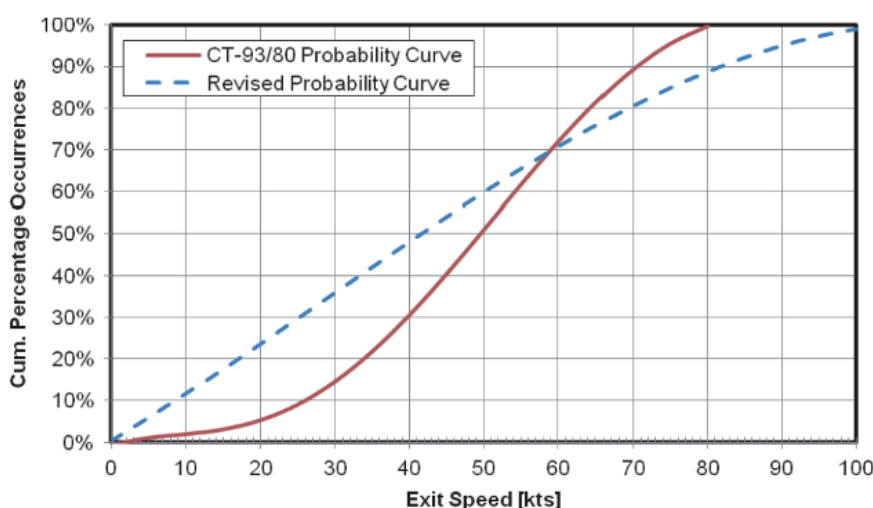


Figura 5.2: Curve di probabilità degli overrun contenuti in funzione della velocità di uscita ACRP Report 29, Figura 5-1 [41]

Il Report 29 dell'ACRP, a tal proposito, conduce un'analisi di sensibilità dimostrando come una modifica della velocità di uscita di progetto abbia un impatto significativo sul costo finale del sistema. Infatti, innalzare tale parametro ad un valore di 80 nodi per poter contenere di nuovo il 90 % degli overrun comporterebbe un aumento del 30 % circa sul costo finale dell'EMAS.

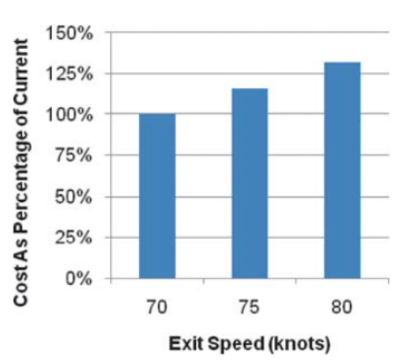


Figura 5.3: Variazione sul costo finale del sistema EMAS in funzione della velocità di uscita di progetto ACRP Report 29, Figura 5-6 [41]

Il costo finale del sistema si rivela fortemente dipendente, dunque, dalla velocità di progetto scelta. Questo viene spiegato dall'ACRP dal momento che il costo è strettamente legato alla lunghezza del letto, funzione a sua volta dell'energia cinetica assorbita ( $E = \frac{1}{2}mv^2$ ) e quindi del quadrato della velocità di uscita.

## Vincoli aeroportuali

- **Dimensioni della RSA:** le dimensioni geometriche di un EMAS devono essere compatibili con lo spazio libero disponibile a fine pista, ovvero con l'area di sicurezza di fine pista (RESA, o in ambito americano RSA).
- **Dimensioni della pista:** la progettazione del letto d'arresto deve fare riferimento alle distanze dichiarate e alla larghezza della pista. Difatti, le normative richiedono che la larghezza del letto sia maggiore o uguale della larghezza della pista associata.

## Altre richieste

- **Ciclo di vita:** l'EMAS deve essere progettato affinché le sue caratteristiche e le sue prestazioni d'arresto rimangano invariate durante la sua vita utile, di norma fissata a 20 anni.
- **Accesso per la manutenzione:** il letto deve supportare il carico degli addetti alla manutenzione, ma non necessariamente quello veicolare. Inoltre, il progetto deve garantire un facile accesso per le operazioni manutentive.
- **Accesso dei veicoli di soccorso:** le rampe e i gradini ai lati del letto devono consentire l'accesso dei mezzi di emergenza e antincendio. Pertanto, rampe e gradini devono essere progettati facendo riferimento alle prestazioni dei mezzi di soccorso.
- **Affidabilità:** è la capacità del sistema d'arresto di garantire le precedenti richieste.

### 5.1.4. Parametri di output

Dalle variabili di input, ovvero dalle condizioni iniziali di progettazione, e dalle caratteristiche geometriche del letto, si ottengono delle variabili di output che restituiscono un quadro complessivo delle prestazioni fornite dal letto in progettazione e del suo impatto economico.

## Prestazioni del sistema d'arresto

Per la verifica della sicurezza fornita dal letto d'arresto, è opportuno valutare due parametri di output fondamentali: i carichi imposti al carrello d'atterraggio e le decelerazioni sugli occupanti dell'aeromobile.

Le normative relative ai sistemi di arresto non riportano valori specifici dei carichi e delle decelerazioni massime supportate dal velivolo e dagli occupanti. Pertanto, per una trattazione approfondita si rimanda al Capitolo 8.

Altro parametro di output fondamentale è la distanza richiesta dall'aeromobile per arrestarsi completamente all'interno del letto. Questa è il risultato del meccanismo di dissipazione dell'energia cinetica, funzione della tipologia di materiali impiegati, dello spessore del letto e delle caratteristiche fisiche e cinematiche dell'aeromobile, come la sua massa e la sua velocità di ingresso nel letto.

Infine, la capacità di controllo del velivolo nel letto è funzione delle forze che si instaurano durante il meccanismo di arresto ed è un fattore da verificare ai fini della sicurezza operativa.

## Costo del sistema d'arresto

Oltre agli effetti dinamici che sorgono durante l'arresto, è opportuno analizzare e valutare l'impatto economico del sistema.

Il costo dell'intero ciclo di vita di un EMAS è rappresentato dalla somma dei costi per la preparazione del sito di installazione, l'installazione del letto stesso, la manutenzione e le riparazioni a seguito di un overrun ed infine la sostituzione del letto al termine della sua vita utile.

Per una trattazione approfondita dell'impatto economico di un EMAS si rimanda al Capitolo 10.

## Tempi previsti

Dalla tipologia di letto d'arresto scelta dipendono le durate della fase d'installazione e delle eventuali riparazioni delle componenti del sistema.

### 5.1.5. Interfaccia pneumatici – letto d'arresto

I software utilizzati dai produttori di sistemi d'arresto EMAS partono dallo studio dell'interfaccia tra i pneumatici dell'aeromobile e il letto stesso.

Analizzare l'interfaccia consiste nel determinare le forze in gioco e il comportamento

del materiale sotto il peso del velivolo. Di seguito si forniscono alcuni cenni utili alla comprensione dell'argomento.

Il principio base del meccanismo di arresto di un EMAS è il seguente: il materiale cede sotto il peso dell'aeromobile, assorbendo la sua energia cinetica fino all'arresto.

Per massimizzare le prestazioni di arresto del letto, è preferibile che l'aeromobile entri nel sistema seguendo una traiettoria rettilinea e parallela all'asse del letto. In tali condizioni, l'intera lunghezza del sistema risulta disponibile per la decelerazione e si assicura che tutti i carrelli del velivolo interagiscano con il materiale frangibile, beneficiando così della piena azione frenante.

Qualora invece la traiettoria di ingresso non sia rettilinea, le prestazioni fornite dal sistema subiscono una diminuzione rilevante, dipendente dall'angolo di ingresso del velivolo.

L'aeromobile subisce una decelerazione grazie ad una forza orizzontale, definita in inglese *drag load*, imposta dal materiale e l'energia assorbita è proporzionale alla quantità di materiale compressa dal carrello.

Tuttavia, il meccanismo d'arresto è in realtà molto più complesso ed entrano in gioco altre forze.

Prima di tutto, risulta utile presentare un quadro panoramico degli effetti dinamici osservabili macroscopicamente sul velivolo in ingresso in un EMAS, facendo riferimento alla figura 5.4 del Report 29 dell'ACRP [41].

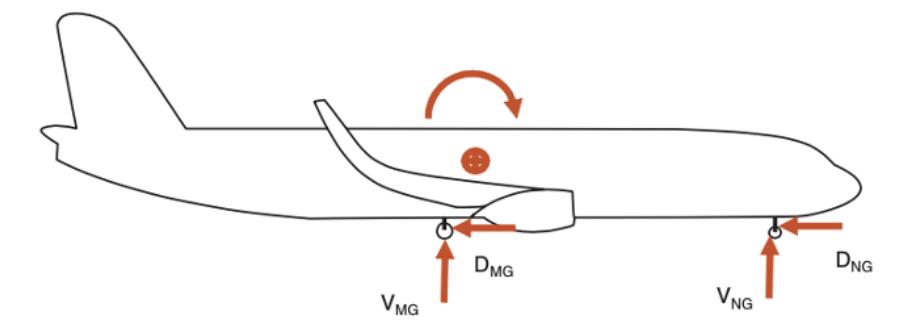


Figura 5.4: Forze agenti sull'aeromobile durante l'arresto nell'EMAS ACRP Report 29, Figura 7-4

Entrambi i carrelli, principale e anteriore, sono sottoposti a delle forze orizzontali e verticali. Le forze orizzontali (*drag loads*) contribuiscono insieme alla decelerazione del velivolo e sono strettamente dipendenti da proprietà tipiche dei materiali (resistenza a compressione e a taglio, deformazione massima a compressione, assorbimento volumetrico di energia), oltre che dalla profondità del letto, dalla velocità e da caratteristiche proprie dell'aeromo-

bile, come la configurazione dei carrelli e la pressione degli pneumatici.

Le forze verticali imposte ai carrelli, invece, non dipendono solamente dal peso scaricato da ambo i carrelli, ma anche dal movimento di lancio in avanti (beccheggio) di cui risente il velivolo durante la decelerazione.

Di conseguenza, il carrello anteriore tende ad affondare maggiormente rispetto a quello principale e, poiché l'energia dissipata è funzione della quantità di materiale spostato, su di esso si sviluppa una forza decelerante di entità superiore.

Inoltre, i due carrelli sono soggetti a condizioni di carico differenti anche in relazione alla loro funzione progettuale. Il carrello principale, infatti, è equipaggiato con sistemi di frenatura, mentre quello anteriore ne è privo; ciò comporta che, durante l'interazione con l'EMAS, il carrello anteriore venga sollecitato con modalità inusuali rispetto alle normali condizioni operative.

Analizzando da vicino l'interfaccia tra il singolo pneumatico e il materiale, si osserva quanto è mostrato nella seguente figura:

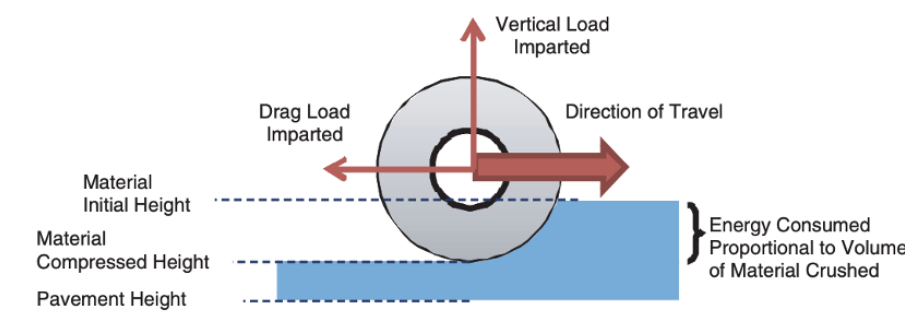


Figura 5.5: Interfaccia pneumatico - EMAS ACRP Report 29, Figura 7-1 [41]

Durante il rotolamento, il materiale viene compresso dallo pneumatico ed il volume ceduto è proporzionale all'energia cinetica del velivolo dissipata. Ciò dimostra la stretta dipendenza tra la forza decelerante e le proprietà dei materiali, nonché il legame con la profondità del letto.

Di fronte a tale meccanismo, risulta chiara la motivazione per cui, come visto nel Capitolo 3, il letto d'arresto in schiuma di silice presenti una profondità crescente lungo lo sviluppo longitudinale del letto. In questo modo, il letto è progettato per imprimere una forza decelerante progressivamente maggiore man mano che l'aeromobile avanza lungo il letto. Tale forza raggiunge il suo picco in corrispondenza dell'estremità finale del letto, in maniera tale da scongiurare la fuoriuscita del velivolo dall'EMAS, condizione che potrebbe causare danni ingentissimi alla struttura e ai suoi occupanti.

Per illustrare l'influenza delle proprietà dei materiali sul meccanismo d'arresto, si fa riferimento alla curva sforzo – deformazione tipica per una schiuma deformabile, come quella utilizzata nella seconda tipologia di letti:

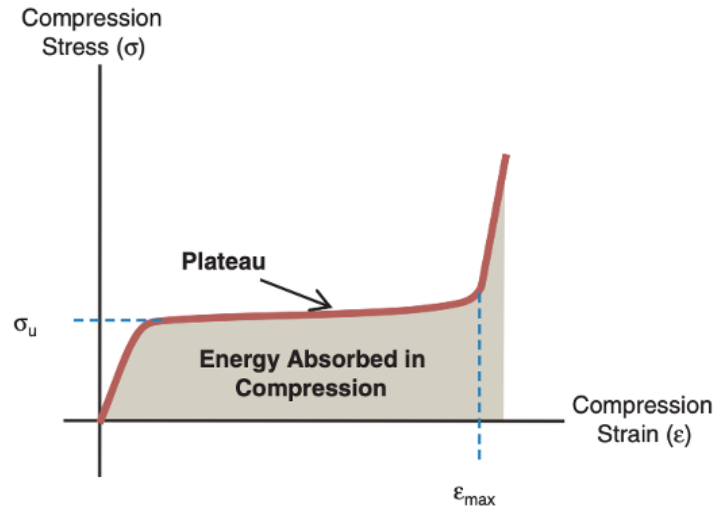


Figura 5.6: Curva sforzo-deformazione di una schiuma deformabile ACRP Report 29, Figura 7-2 [41]

L'energia assorbita durante la compressione è rappresentata nel grafico dall'area sottesa alla curva. Ciò dimostra che a valori più elevati di resistenza a compressione corrisponde una maggiore quantità di energia cinetica dissipata e, dunque, una superiore capacità di arresto del velivolo.

Infine, anche le caratteristiche del carrello d'atterraggio e degli pneumatici svolgono un loro ruolo nel meccanismo d'arresto.

Dalla configurazione del carrello, infatti, discende una specifica distribuzione dei carichi e dunque una differente distribuzione delle forze deceleranti trasmesse dal letto.

Mentre la forza verticale del letto viene ripartita equamente tra le ruote del carrello, la *drag load* viene applicata in maniera diversa. La configurazione duale risulta la migliore in quanto entrambe le ruote partecipano nella decelerazione, mentre le configurazioni tandem e tridem si sono rivelate meno efficienti.

In conclusione, a pressioni di gonfiaggio più elevate corrisponde un maggiore affondamento dello pneumatico nel materiale e, di conseguenza, un incremento della dissipazione dell'energia cinetica del velivolo.

### 5.1.6. Modelli di calcolo e software di simulazione

Lo sviluppo delle nuove tecnologie e i continui studi per ottimizzare la progettazione di un sistema d'arresto EMAS hanno permesso di realizzare modelli matematici di calcolo, che hanno fornito una base per i software di simulazione utilizzati nel dimensionamento e nella validazione di tali letti.

Il primo modello di calcolo risale ai primi anni '90, quando negli Stati Uniti d'America sorse la necessità di sviluppare un sistema in grado di arrestare un velivolo in overrun, nei casi in cui non fosse possibile garantire i 1.000 piedi di RSA previsti dalle normative FAA.

Il modello di calcolo doveva essere capace di predire in maniera accurata i carichi sui carrelli d'atterraggio, la decelerazione sugli occupanti e la variazione di velocità dell'aeromobile durante l'overrun.

A tal proposito, l'ente americano avviò un programma di ricerca per realizzare un modello matematico che rappresentasse l'interfaccia tra pneumatici e sistema d'arresto, calcolando così la distanza d'arresto nel letto necessaria ad uno specifico aeromobile. Il modello venne applicato a letti d'arresto realizzati in ghiaia e polistirene, utilizzando aerei di peso compreso tra 52 e 286 tonnellate circa, con velocità di ingresso nel letto pari a 70 nodi.

In seguito, tale modello fu testato con delle prove in campo. La validazione del modello fu effettuata nel 1991 tramite una serie di test su scala reale utilizzando un Boeing 727 strumentato e letti di prova in schiuma fenolica, variando le velocità e la profondità del sistema, presso l'FAA Technical Center.

Risultò che i parametri misurati nei test differivano solamente del 10 % dai valori previsti con il modello di calcolo. Il confronto riguardava l'andamento temporale della decelerazione, delle forze agenti e della velocità.

In seguito alla validazione, la FAA progettò su scala reale un letto d'arresto in schiuma fenolica e condusse due prove con un Boeing 727 per dimostrare l'efficacia del modello. Il letto venne installato presso l'aeroporto internazionale di Atlantic City, nel New Jersey, e le due prove vennero condotte a velocità di ingresso pari a 50 e 60 nodi. I test non mirarono solamente a dimostrare l'efficacia del modello, ma anche a verificare che il letto consentisse l'accesso dei mezzi di soccorso e antincendio e una rapida evacuazione dei passeggeri. [64]

Lo studio della FAA con il Boeing 727 costituì la base per lo sviluppo e la validazione di un software di simulazione chiamato ARRESTOR. Esso è in grado di calcolare le distanze di arresto, i carichi sul carrello e le decelerazioni sugli occupanti per varie geometrie di un

letto in schiuma deformabile, permettendo all'utente di definire le resistenze a compressione del materiale.

Il limite del software, oltre a riferirsi unicamente ad un letto d'arresto realizzato in schiuma, è la libreria di aeromobili con cui è possibile effettuare le simulazioni: DC-9, DC-10, B-707, B-727-100, B-727-200 e B-747.

ARRESTOR è stato utilizzato per la prima volta dalla ESCO per dimensionare il primo sistema d'arresto EMAS della storia.

Per superare i limiti di quest'ultimo software, il Report 29 dell'ACRP propone un nuovo programma chiamato *Arrestor Prediction Code (APC)* [41], in grado di simulare il meccanismo d'arresto per varie tipologie di aeromobile e geometrie diverse del letto, con la possibilità di modificare le resistenze specifiche dei materiali.

Il modello di calcolo alla base dell'APC prende in input quattro tipologie di dati:

1. metamodel data, relativi all'interazione tra il carrello d'atterraggio e il letto;
2. tire load-deflection data, ovvero l'interazione tra il carrello d'atterraggio e le superfici solide;
3. libreria di aeromobili, con dati relativi a dimensioni, massa e altre proprietà;
4. specifiche di progetto del sistema d'arresto.

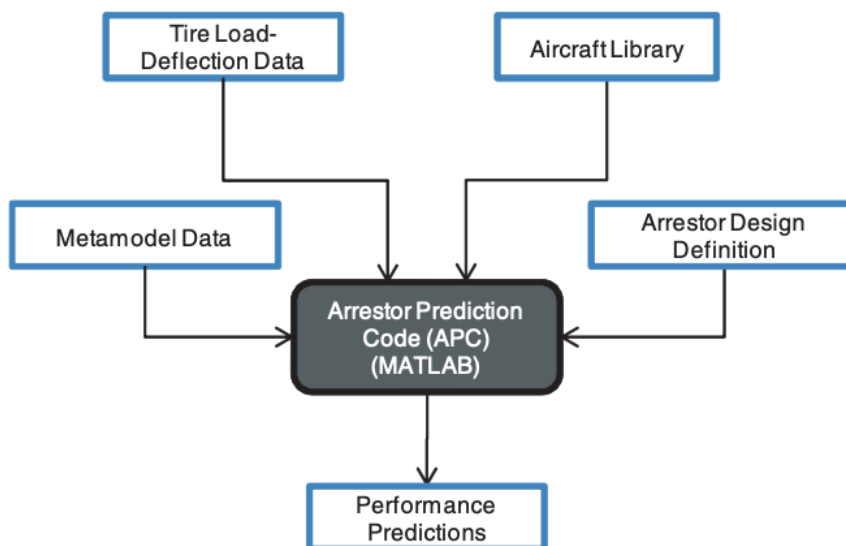


Figura 5.7: Schema input e output dell'APC ACRP Report 29, Figura G-1

L'APC rappresenta un codice di calcolo più generale e flessibile rispetto all'ARRESTOR, oltre che più accurato. La differenza sostanziale tra i due modelli risiede nel calcolo dei

carichi sul carrello d'atterraggio. L'ARRESTOR, infatti, esegue i calcoli in tempo reale durante la simulazione, basandosi sulla geometria dell'interfaccia e sulla resistenza a compressione della schiuma. Questo metodo non risulta adeguato a materiali caratterizzati da un comportamento non lineare, come aggregati, aggregati in schiuma, ecc.

L'APC, invece, si affida a modelli numerici avanzati che durante la simulazione costruiscono un grande database di valori di carico, riferendosi a varie condizioni operative.

In letteratura sono disponibili numerosi contributi che propongono nuovi modelli matematici di calcolo, che costituiscono una base per sviluppare poi dei software di simulazione sempre più avanzati.

Nel presente elaborato si è scelto di presentare un codice numerico sviluppato nel 2021 dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano, a cura di M. Ketabdari, E. Toraldo e M. Crispino, per simulare la capacità di frenata e di arresto dei materiali di un EMAS in un evento di overrun. [81]

L'obiettivo del codice è la creazione di una mappa di rischio, sovrapposta al layout del letto d'arresto, che associ ad ogni distanza la probabilità relativa alla posizione finale di arresto di un aeromobile all'interno dell'EMAS. Per tale motivo, l'output è basato su una Analisi Probabilistica di Rischio (PRA).

Anche in tal caso, la base del codice è rappresentata da un modello numerico che rappresenta l'interfaccia tra i pneumatici del velivolo e la superficie del letto, in grado di computare le forze orizzontali e verticali che entrano in gioco, seguendo la seconda legge di Newton.

La computazione di tali forze e dell'area di impronta del carrello viene realizzata in maniera incrementale: a ogni passo viene applicato un tasso decrementale della velocità e una distanza incrementale, fino al completo arresto del velivolo.

Tale modello è stato poi utilizzato per implementare con MATLAB un'applicazione chiamata *ABIAS* (*Aircraft Behavior in Arresting System*), applicabile ad ogni tipologia di aeroporto che presenti qualsiasi tipo di vincolo.

L'utente inserisce le caratteristiche del velivolo di prova (come MTOW e apertura alare), dei materiali impiegati, della pista e del letto d'arresto e il programma restituisce la funzione di densità di probabilità della posizione finale di arresto, con e senza EMAS, e la mappa di rischio sovrapposta al layout dell'EMAS.

A titolo di esempio, di seguito si riportano le mappe di rischio ottenute da una simulazione con un Boeing 747-800, una volta specificate le caratteristiche del velivolo, della RESA, della pista e dell'EMAS:

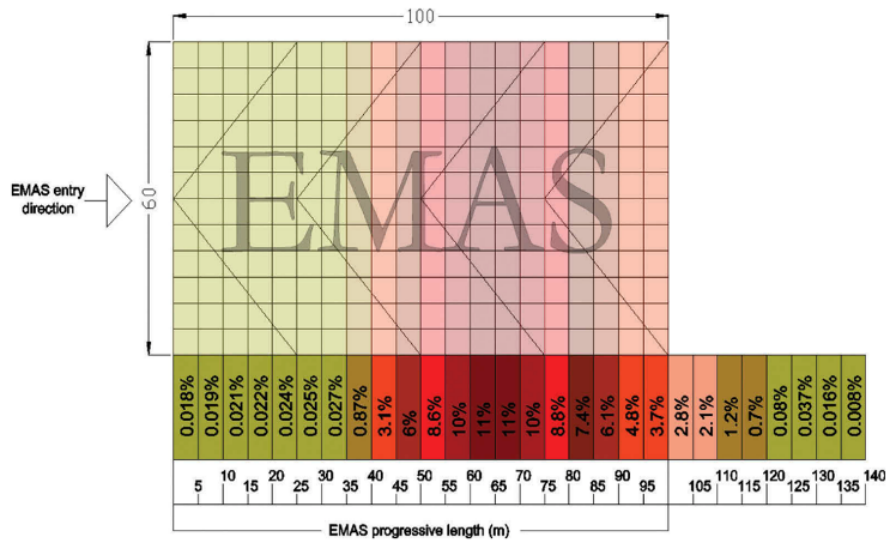


Figura 5.8: Esempio di mappa di rischio probabilistico in presenza di un EMAS(M. Kehtabdari, E. Toraldo, M. Crispino) [83]

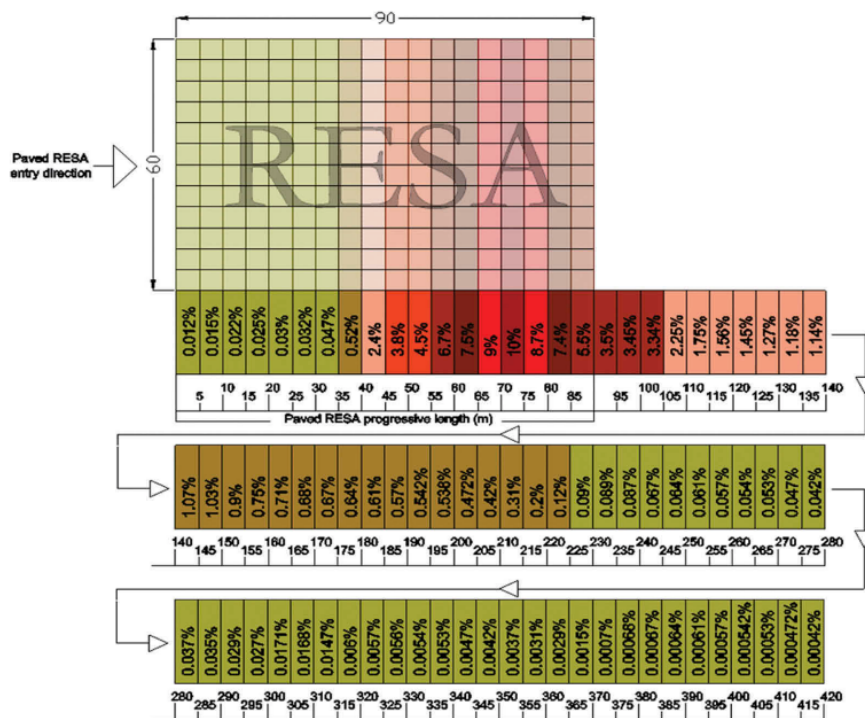


Figura 5.9: Esempio di mappa di rischio probabilistico in assenza di un EMAS(M. Kehtabdari, E. Toraldo, M. Crispino)[83]

Tali modelli permettono inoltre di condurre delle analisi di sensitività sulla capacità di arresto di un EMAS, variando caratteristiche di input specifiche.

Ad esempio, gli stessi autori hanno condotto delle analisi di questo genere variando le

dimensioni dell'aereo di prova e lo spessore del letto.

Gli studi hanno dimostrato che il MLW del velivolo ha un effetto diretto sul meccanismo d'arresto: ad un aumento del MLW, infatti, corrisponde un incremento della *drag load*, che determina una maggiore decelerazione sul carrello, e della forza verticale che sostiene il peso scaricato sul letto. Ne consegue un aumento della distanza d'arresto, poiché la forza verticale generata ostacola maggiormente l'affondamento del carrello nel letto.

Variando lo spessore del letto, invece, si riscontra che per spessori maggiori la distanza di arresto diminuisce. Ciò avviene poiché l'aumento dello spessore comporta un incremento della *drag load*, che si traduce in una decelerazione più elevata.

## 5.2. Progettazione planimetrica

La progettazione planimetrica consiste nel dimensionamento delle diverse componenti presenti nelle aree adiacenti all'EMAS, le quali rivestono un ruolo significativo nel processo complessivo di arresto di un aeromobile in overrun.

Nella figura seguente sono riportate, in forma schematica, le principali componenti planimetriche di un sistema di arresto EMAS:

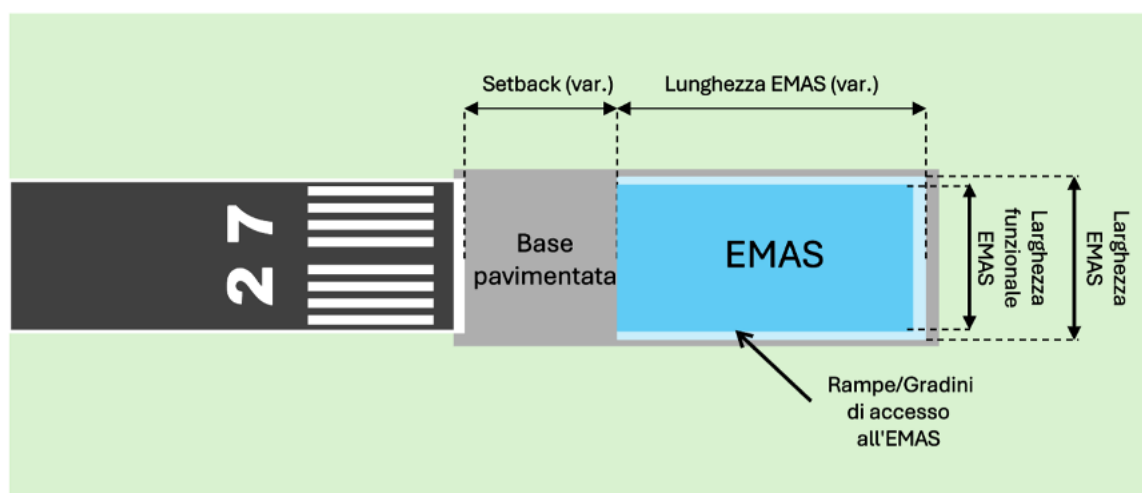


Figura 5.10: Planimetria generale di un sistema d'arresto EMAS

È opportuno precisare che la progettazione planimetrica non segue la progettazione geometrica, bensì la integra, dal momento che queste risultano complementari. Ad esempio, il letto viene geometricamente dimensionato facendo riferimento anche agli spazi disponibili, come la distanza di setback, che costituisce un parametro di natura planimetrica.

La suddivisione del capitolo in progettazione geometrica e planimetrica è stata adottata esclusivamente allo scopo di conferire maggiore chiarezza e organizzazione ai contenuti.

### 5.2.1. Base pavimentata

Il letto d'arresto EMAS deve essere installato al di sopra di una superficie pavimentata. Secondo la FAA, la pavimentazione deve estendersi dalla soglia della pista e coprire l'intera area sottostante il letto d'arresto. Tuttavia, nessuna delle normative analizzate fornisce delle indicazioni sulla larghezza della base pavimentata, pertanto è opportuno riflettere su questo aspetto.

È chiaro che la larghezza della base pavimentata debba essere almeno pari a quella della pista associata e delle relative banchine (*shoulders*). Tuttavia, un'estensione della pavimentazione può rappresentare una misura di mitigazione del rischio nei casi di overrun con traiettoria deviata. Sotto tali condizioni, infatti, la pavimentazione fornirebbe un'ulteriore superficie di rotolamento adeguata a un aeromobile, che ridurrebbe il pericolo di instabilità e perdita di controllo del velivolo.

In assenza di pavimentazione estesa, invece, l'aeromobile deviato continuerebbe la sua corsa su una superficie tipicamente erbosa, che opporrebbe sul velivolo un valore di resistenza sensibilmente differente rispetto a quello fornito dalla pavimentazione. Il brusco cambio di resistenza potrebbe aumentare il rischio di instabilità e ribaltamento e, dunque, potrebbe accrescere la probabilità di danni sia sulla struttura sia sui suoi occupanti.

D'altra parte, tuttavia, realizzare una base pavimentata di larghezza superiore comporterebbe inevitabilmente un aumento dei costi di costruzione e di manutenzione. Di fronte a questo svantaggio, si consiglia di eseguire un'analisi statistica delle posizioni finali d'arresto registrate nei casi reali.

A tal proposito, si fa riferimento ad uno studio condotto dalla FAA sugli incidenti avvenuti tra il 1978 e il 1987, suddivisi in tre categorie: undershoot, overrun e veer-off. [68] Per ciascun incidente si è registrata la posizione finale di arresto (X, Y) del velivolo coinvolto: l'asse X coincide con l'asse centrale della pista, mentre l'asse Y è perpendicolare ad esso. Per gli overrun, l'origine del sistema di riferimento è stata posta in corrispondenza della fine della pista, lungo l'asse longitudinale.

Nell'arco di tempo considerato sono stati registrati 33 incidenti di overrun in fase di decollo o atterraggio, 17 dei quali hanno fornito delle coordinate complete della posizione finale in cui l'aeromobile si è arrestato, come illustrato nella seguente figura:

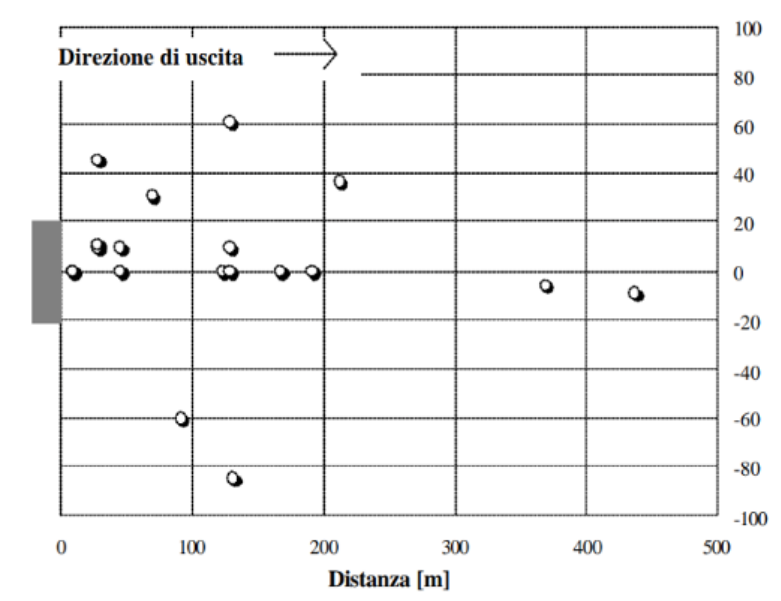


Figura 5.11: Posizioni finali di arresto dei velivoli in overrun tra il 1978 e il 1987 (Analisi del comportamento dinamico di letti di arresto per aeromobili, M. Bassani, 1999)

Il 64 % degli aeromobili (11 casi su 17) si è arrestato entro i lati prolungati della pista. Pertanto, sei aeromobili hanno seguito traiettorie deviate che li hanno portati ad arrestarsi oltre i limiti prolungati della pista, tre dei quali hanno terminato la loro corsa entro 50 metri dall'asse prolungato della pista.

In questo scenario, per poter garantire l'arresto di tutti i velivoli all'interno di una base pavimentata, sarebbe stato necessario un ulteriore allargamento di questa di circa 65 metri per lato. Un allargamento di queste dimensioni comporterebbe però un costo rilevante per la realizzazione e per le manutenzioni da effettuare negli anni.

Pertanto, per contenere tali costi e allo stesso tempo ridurre il numero di aeromobili in arresto oltre la pavimentazione, si potrebbe valutare un allargamento più contenuto: circa 20 metri (che consentirebbe di contenere altri due incidenti) o 30 metri (tre incidenti contenuti) per lato.

Un altro tema da approfondire riguarda quanto debba estendersi l'allargamento della base pavimentata: se limitarlo all'inizio dell'EMAS o estenderlo fino all'estremità finale del letto.

Nel primo caso, un velivolo con traiettoria deviata potrebbe entrare per metà nell'EMAS e per metà su una superficie erbosa, dopo aver percorso un tratto pavimentato. Nonostante la resistenza opposta dall'erba sia superiore a quella imposta dalla pavimentazione, favorendo quindi la decelerazione del velivolo, la superficie erbosa introdurrebbe rischi di

imbardata e perdita di controllo. Pertanto, è preferibile estendere l'allargamento della pavimentazione fino all'estremità finale dell'EMAS.

In generale, l'ingresso di un velivolo per metà nell'EMAS e per metà su una superficie diversa è una condizione da evitare il più possibile: infatti, la forza decelerante (*drag load*) imposta sul carrello in corrispondenza dell'EMAS sarebbe notevolmente superiore rispetto a quella imposta all'altro carrello. La generazione di forze deceleranti asimmetriche potrebbe di conseguenza causare un movimento inatteso e pericoloso dell'aereo.

Un'altra alternativa che però risulterebbe più costosa sarebbe l'allargamento laterale dell'EMAS.

Alla luce di tali considerazioni, pertanto, ci si interroga se sia economicamente e operativamente più conveniente limitare la larghezza della base pavimentata alla somma delle larghezze di pista e *shoulders*, oppure se sia opportuno prevedere un allargamento ulteriore al fine di contenere un numero maggiore di overrun e quindi aumentare il livello di sicurezza operativa.

In ogni caso, è consigliabile eseguire per ogni aeroporto uno studio casistico degli overrun verificatisi in precedenza, dal momento che ciascun aeroporto presenta delle proprie disponibilità economiche e specifici vincoli spaziali.

Per quanto riguarda invece la capacità della pavimentazione, le normative richiedono una portanza simile a quella delle *shoulders* di pista.

Difatti, le *shoulders* vengono progettate per mitigare i rischi conseguenti ad una fuoriuscita laterale (*veer-off*) di pista di un aeromobile e dunque anche ad esse viene richiesta una portanza tale da renderle capaci di sostenere e supportare il passaggio di un aeromobile, senza causare danni strutturali, e dei mezzi di soccorso e antincendio, fornendo una transizione graduale dalla pavimentazione della pista alla porzione non pavimentata della strip.

In accordo con il Doc 9157 dell'ICAO [79] e con la CS ADR-DSN.B.140 dell'EASA [62], per le banchine della pista è accettabile una portanza pari a quella del terreno naturale, a patto che non siano necessari specifici trattamenti (come drenaggio, stabilizzazione, ecc.) sulla base della natura del terreno e delle caratteristiche del velivolo critico.

### 5.2.2. Distanza di *setback* e *standoff*

La distanza di *setback* è definita come la distanza che intercorre tra il fine della pista o della stopway, se presente, e l'inizio del letto d'arresto.

La lunghezza del *setback* varia in funzione della configurazione aeronautica della pista e dall'EMAS progettato.

Tale distanza ha degli obiettivi specifici, rivolti alla mitigazione dei rischi derivanti ambo da eventi di overrun e di undershoot. Infatti, nel caso di un overrun, il *setback* garantisce uno spazio aggiuntivo pavimentato oltre il fine pista prima che l'aeromobile entri nell'EMAS, mentre per un undershoot esso garantisce un maggior distanziamento tra la soglia e il letto d'arresto così da diminuire la probabilità di un atterraggio del velivolo su di esso. Inoltre, il *setback* ha lo scopo di proteggere il letto d'arresto dai detriti del jet blast prodotti da un velivolo in fase di decollo.

Pertanto, tale distanza viene dimensionata in funzione delle condizioni operative della pista, come le tipologie di approccio, le condizioni climatiche, il mix di traffico e la storia incidentale dell'aeroporto.

Le normative internazionali e nazionali impongono un valore minimo di distanza di setback pari a 60 metri a partire dalla soglia o dal fine pista.

Considerate le molteplici esigenze operative, sia in presenza di aeromobili in fase di atterraggio sia di decollo, è opportuno fare delle precisazioni riguardo la variazione della lunghezza del *setback* in funzione della direzionalità della pista.

La figura seguente illustra una pista utilizzata in entrambe le direzioni per il decollo e l'atterraggio, evidenziando i punti di inizio e fine delle distanze dichiarate:

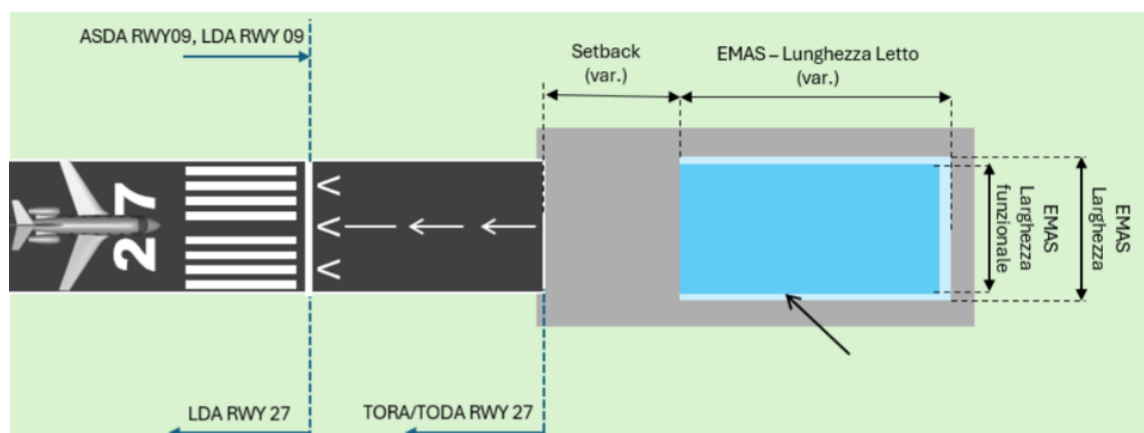


Figura 5.12: Caso 1: decolli e atterraggi RWY09

In tal caso, la distanza compresa tra l'inizio della TORA e della TODA della Runway 27 e l'inizio della LDA della stessa pista non può essere considerata distanza di *setback*. Sebbene tale spazio rappresenti un margine aggiuntivo per separare la soglia della pista dal letto d'arresto e quindi per ridurre la probabilità di undershoot sul sistema, esso è uno spazio utilizzato per il decollo, all'interno del quale gli aeromobili si preparano a decollare, generando quindi il fenomeno del jet blast.

A tal proposito entra in gioco un'altra distanza per la protezione del letto dai detriti del jet blast: la distanza di *standoff*.

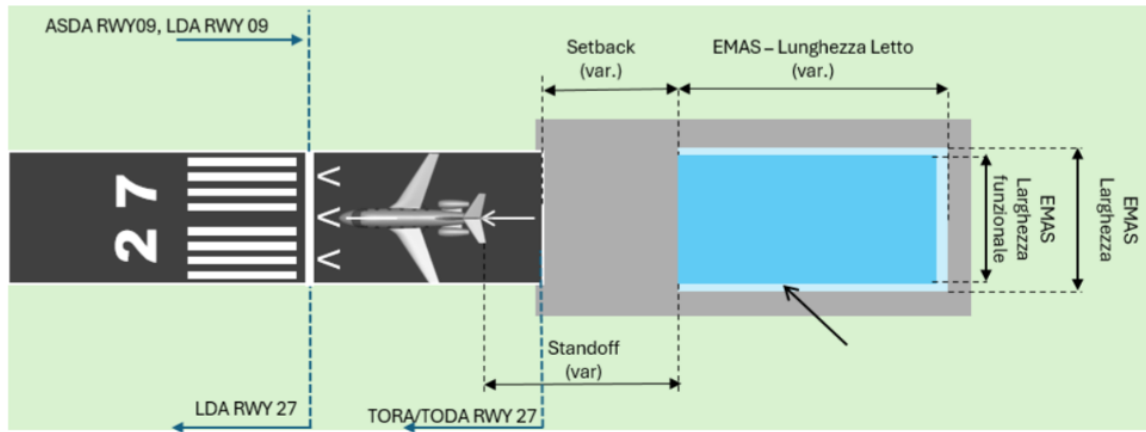


Figura 5.13: Caso 1: decolli da RWY27

La distanza di *standoff* è definita in generale come la distanza minima che intercorre tra una sorgente di pericolo e l'oggetto da proteggere. In tal caso, essa viene definita come la distanza tra la coda del velivolo e l'inizio del letto d'arresto e deve essere garantita per proteggere il sistema dai detriti del jet blast, motivo per cui è strettamente correlata al concetto di distanza di *setback*.

È una distanza variabile in funzione della tipologia di aeromobile considerato, della spinta dei motori in fase di decollo e dalla tipologia di EMAS presente.

I manuali dei produttori Boeing e Airbus forniscono per ogni aeromobile dei grafici che dimostrano le distanze percorse dai detriti del jet blast, in funzione della spinta dei motori in fase di decollo. Di seguito si riporta a titolo di esempio il grafico per un A320-200:

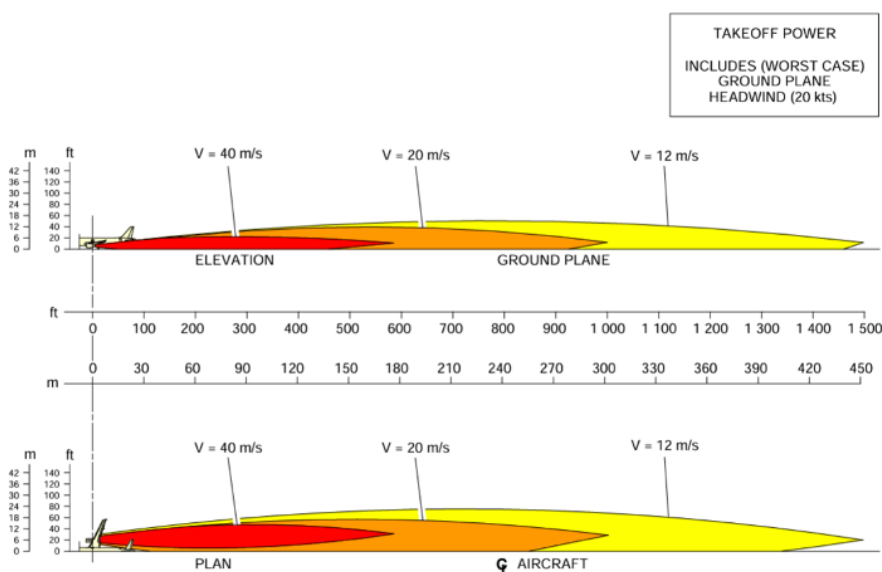


Figura 5.14: Distanze percorse dal jet blast per un A320-200 [37]

Il getto di scarico dei motori (jet blast) ha una zona d'influenza estesa e pericolosa, che può sollevare FOD (*Foreign Object Debris*), danneggiare veicoli, operatori e strutture leggere. [67]

La protezione dell'EMAS dal jet blast è dunque fondamentale, in quanto tali detriti, se lanciati a velocità elevate, possono comportare danni strutturali anche seri al letto.

I motori degli aeromobili producono delle forze orizzontali e verticali capaci di spostare oggetti di grandi dimensioni: un jet è capace, alla massima spinta dei motori, di sollevare un oggetto di 0,6 metri per 10 metri oltre il velivolo, senza che questo tocchi il suolo.

Per tale motivo nel dimensionamento delle distanze di *setback* e *standoff* è consigliabile fare riferimento ai diagrammi forniti dai produttori per l'aeromobile critico di progetto.

Tuttavia, sorge una problematica riguardante l'interpretazione della distanza di *standoff*; l'EASA, infatti, la considera a partire dal retro dell'aeromobile e non dal retro dei motori, come nei diagrammi. Questa scelta si rivela in realtà conservativa e unificata, più facile da applicare operativamente. Infatti, la posizione dei motori può variare: nella maggior parte dei casi essi si trovano sotto le ali (come per il Boeing 747), mentre in altri casi essi possono trovarsi in coda.

Di fronte a tali riflessioni, la scelta di calcolare la distanza di *standoff* dal retro dell'aeromobile piuttosto che dal retro dei motori permette di unificarne il dimensionamento per flotte di aerei diversi. Inoltre, tale considerazione introduce un margine aggiuntivo di sicurezza rispetto al reale getto dei motori.

### 5.2.3. Rampe e gradini di accesso all'EMAS

Secondo le normative, un EMAS deve essere progettato per consentire facilmente l'ingresso e l'uscita dei mezzi di soccorso e antincendio. Per tale motivo, la progettazione del letto d'arresto deve sempre prevedere delle rampe o dei gradini di accesso, da dimensionare in funzione delle caratteristiche prestazionali dei mezzi più pesanti dei Vigili del Fuoco.

Rampe e gradini consentono altresì l'evacuazione dei passeggeri e dei membri dell'equipaggio dal luogo dell'incidente.

Alla luce di ciò, la realizzazione di rampe o gradini di accesso all'EMAS è da considerarsi un requisito progettuale.

Le normative, tuttavia, non forniscono indicazioni sul loro dimensionamento. Pertanto, di seguito si procede all'analisi di alcuni documenti ufficiali in materia antincendio che si rivelano utili ai fini del progetto di rampe e gradini di accesso all'EMAS.

Nel Decreto Ministeriale del 10 marzo 1998 [50] gli aeroporti sono classificati come attività a rischio elevato per la presenza di sostanze altamente infiammabili e di combustibili che determinano un rischio elevato di incendi e esplosione, per la manipolazione di sostanze chimiche, per l'intenso affollamento degli ambienti e per l'esposizione a rumori di elevata intensità.

Sebbene non esistano prescrizioni specifiche per il dimensionamento delle rampe, si elencano di seguito i requisiti essenziali:

1. accessibilità: le rampe devono consentire l'arrivo rapido e sicuro dei mezzi di soccorso in qualsiasi condizione atmosferica;
2. resistenza: la portanza deve garantire il passaggio dei veicoli di soccorso a pieno carico, senza deformazioni superficiali;
3. segnaletica: gli accessi devono essere ben segnalati e visibili;
4. manutenzione: le rampe devono essere mantenute in condizioni ottimali, libere da ostacoli e adeguatamente illuminate.

In generale, la presenza dell'EMAS non deve ostacolare la gestione delle emergenze.

Le rampe e i gradini di accesso devono essere dimensionati in riferimento alle prestazioni dei mezzi antincendio più pesanti e ingombranti, ovvero gli autocarri.

All'interno del *Manuale di Formazione Aeroportuale dei Vigili del Fuoco* sono presentati i requisiti progettuali legati agli automezzi antincendio operanti in un aeroporto. [49] Il tempo massimo di intervento richiesto in pista è di 2-3 minuti, calcolato dal momento della

chiamata all'arrivo del primo veicolo antincendio sul luogo dell'incidente. Di fronte a tale richiesta, il Manuale richiede che gli automezzi riescano a raggiungere una velocità di 80 km/h in meno di 25 secondi, garanzia per rispettare i tempi previsti. Ciò significa che le rampe devono essere progettate con una pendenza non eccessiva, che potrebbe altrimenti ridurre bruscamente la velocità d'intervento e danneggiare gli automezzi.

In un documento relativo alle indicazioni tecniche sulla prevenzione incendi nell'ambito della realizzazione e della gestione delle emergenze nei mercati, per consentire l'intervento dei mezzi di soccorso dei Vigili del Fuoco si consiglia di realizzare delle vie di accesso con pendenze inferiori al 10 %. Oltre questo valore, infatti, l'automezzo dei VVF può avere difficoltà a mantenere stabilità e aderenza, mentre in discesa le capacità di frenata sono meno efficaci di un veicolo ordinario, aumentando anche il rischio di sbandamento. [51]

Inoltre, la pendenza deve essere contenuta per permettere l'esodo delle persone con disabilità e la mobilitazione di barelle e attrezzature mediche per il trasporto di feriti.

Oltre a pendenze adeguate, è necessario garantire una superficie che fornisca aderenza anche in condizioni meteo avverse e che non risulti scivolosa, soprattutto in riferimento all'esodo degli occupanti del velivolo.

Come ultimo aspetto, si discutono i pro e i contro delle vie d'accesso all'EMAS realizzate con rampe o con gradini.

Le rampe di accesso facilitano l'accesso dei mezzi di soccorso ed un esodo più veloce, soprattutto per le persone affette da disabilità, risultando quindi una soluzione più inclusiva. Tuttavia, esse risentono maggiormente delle condizioni atmosferiche, con il rischio di diventare scivolose, e hanno una capacità di contenimento dell'aeromobile minore rispetto ai gradini, nel caso in cui il velivolo fuoriuscisse dal letto d'arresto.

I gradini, invece, rendono più difficoltoso l'accesso dei mezzi di soccorso e rallentano l'esodo degli occupanti del velivolo. Nonostante ciò, sono in grado di contenere maggiormente un velivolo e favoriscono un miglior drenaggio nel caso di condizioni atmosferiche avverse.

#### 5.2.4. Circolazione interna adiacente all'EMAS

L'installazione di un EMAS potrebbe comportare la ridefinizione della circolazione interna dell'aeroporto.

Per garantire il rispetto delle normative antincendio, è necessario verificare che la nuova viabilità permetta agli automezzi di raggiungere gli 80 km/h in meno di 25 secondi e di raggiungere così il luogo dell'incidente in 2-3 minuti.

Inoltre, secondo il Decreto Legislativo n.81 del 2008 riguardo la sicurezza nei luoghi di la-

vorò [32], le vie di circolazione devono essere ben segnalate, organizzate e opportunamente illuminate per evitare incidenti tra aeromobili, mezzi di soccorso e pedoni.

## 6 | Prove sui materiali e sul sistema EMAS

Le normative internazionali e nazionali stabiliscono i requisiti che i materiali devono soddisfare per poter essere impiegati in un sistema d'arresto EMAS.

Tuttavia, dalla lettura di tali normative emerge che, pur indicando le prestazioni richieste, non vengono fornite indicazioni precise riguardo le metodologie di prova applicabili sui materiali per valutare il rispetto dei requisiti.

Lo scopo del presente Capitolo è dunque duplice:

- nella prima parte si propongono delle prove normalizzate (EN e ISO) che possono essere condotte per la valutazione del comportamento dei materiali, sia in fase progettuale sia nelle attività di manutenzione e di verifica del letto;
- nella seconda parte vengono presentate delle possibili prove da condurre invece sull'intero sistema d'arresto EMAS, finalizzate a validarne il comportamento complessivo e ad accertarne il rispetto dei requisiti normativi di tipo prestazionale, funzionale e tecnico.

L'obiettivo complessivo, dunque, consiste nel fornire ulteriori informazioni e metodologie di verifica applicabili ai materiali e al sistema, considerando che attualmente la progettazione di un EMAS è di competenza esclusiva del produttore e non esistono procedure ufficiali per verificare l'efficacia dei materiali e le prestazioni del letto.

### 6.1. Prove di caratterizzazione dei materiali

I documenti ufficiali di riferimento nella seguente trattazione sono rappresentati dalle normative emanate dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) e dell'Agenzia Europea per la Sicurezza dell'Aviazione (EASA). In particolare, verranno considerate le tipologie di materiali ammissibili nel sistema e i rispettivi requisiti di natura chimica, fisica e meccanica, al fine di individuare le metodologie di prova più adeguate.

### 6.1.1. Tipologie di materiali utilizzati

Come anticipato nel quadro normativo del Capitolo 4, l'ente regolatore italiano fornisce una descrizione delle varie componenti strutturali di un EMAS, suddividendole in piano di appoggio, letto di arresto e opere di finitura. [55]

L'ENAC individua due tipologie principali di materiali capaci di soddisfare i requisiti normativi: i calcestruzzi cellulari a bassissima densità e gli inerti granulari leggeri.

La prima tipologia di materiale si definisce come materiale da costruzione leggero prefabbricato. Esso si discosta dal classico calcestruzzo impiegato nelle opere edili: il calcestruzzo cellulare, infatti, presenta un valore di resistenza meccanica a compressione decisamente minore rispetto al calcestruzzo normale, e ciò lo rende un materiale adatto all'impiego negli EMAS. Ad esso, infatti, viene richiesto di collassare progressivamente sotto il carico del carrello di un aeromobile e di sopportare invece il transito del personale per le opere di manutenzione e dei mezzi di soccorso.

Esso è composto da cemento, acqua, sabbia e additivo aerante, senza l'aggiunta di aggregati grossi. Ha una struttura porosa che consente la deformabilità e la frangibilità del materiale sotto uno specifico carico, con masse volumiche comprese tra 500 e 600 kg/m<sup>3</sup>. Esso è anche un ottimo isolante termico grazie alla bassa conducibilità termica. [7][8]

Nei letti d'arresto il calcestruzzo cellulare viene impiegato a blocchi prefabbricati, assemblati ed uniti tra di loro e con il piano d'appoggio grazie all'utilizzo di bitume a caldo.

Al passaggio dell'aeromobile, i motori non rischiano di essere danneggiati in quanto gli elementi che si distaccano dal letto non tendono ad essere sollevati. Tuttavia, il calcestruzzo tende a polverizzarsi e potrebbe essere risucchiato dalle turbine.



Figura 6.1: Blocchi di calcestruzzo cellulare a bassissima densità [8]

La seconda tipologia di materiali richiama le pavimentazioni in ambito stradale, sebbene con alcune differenze.

Gli inerti leggeri provengono dalla produzione di aggregati alleggeriti di varia natura (come l'argilla espansa) e hanno un diametro compreso tra i 5 e i 10 centimetri, con struttura tendenzialmente mono granulare.

I vantaggi degli inerti leggeri consistono nella loro economicità e nella facilità delle operazioni di manutenzione e riparazione. Essi vengono stesi secondo le tecniche utilizzate in campo stradale, ma l'ENAC si raccomanda di non costiparli per mantenere le loro caratteristiche di deformabilità, necessarie per il loro impiego in un EMAS.

Si nota che l'ENAC fa riferimento in maniera generica alla classe di inerti granulari leggeri [1], senza prescrivere materiali specifici. Ad oggi la seconda tipologia di letti d'arresto è realizzata in schiuma di vetro, materiale vetroso espanso, leggero e frangibile. La schiuma di vetro può essere considerata appartenente alla grande famiglia degli inerti leggeri granulari.

Infine, il materiale costituente il letto d'arresto necessita di un rivestimento superficiale che funga da film di protezione verso gli agenti atmosferici ed altri fattori che possono compromettere la funzionalità dell'EMAS.

Si scelgono rivestimenti plastici, le cui caratteristiche possono variare in funzione della tipologia di materiale impiegato nel letto.

L'ENAC specifica che lo strato superficiale non deve influenzare le prestazioni del sistema d'arresto, né interferire con il suo scopo.

Il rivestimento contribuisce inoltre a conferire maggiore durabilità al letto e consente di



Figura 6.2: Preparazione di EMAS in schiuma di vetro

uniformare la superficie, in particolare nei letti realizzati in blocchi distinti di calcestruzzo cellulare.

### 6.1.2. Requisiti normativi dei materiali

Di seguito, i requisiti normativi di natura chimica, fisica e meccanica richiesti ai materiali impiegabili nei letti d'arresto EMAS sono ricavati dalla normativa italiana dell'ENAC (*"Linee guida per la progettazione, l'installazione ed il collaudo dei letti di arresto (EMAS)"* [55] e da quella europea dell'EASA (*Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN)*) [62].

I materiali devono:

- essere resistenti all'acqua, in modo che la sua presenza non influenzi le prestazioni del sistema;
- non attrarre, o essere fisicamente vulnerabili ai parassiti, uccelli, fauna selvatica o altre creature, nella massima misura possibile;
- non promuovere la crescita di piante con la corretta applicazione di erbicidi;
- essere anti-scintilla;
- essere non infiammabili;
- non promuovere la combustione;

- mantenere costanti nel tempo le caratteristiche di resistenza e densità in ogni condizione climatica, entro un intervallo di temperature appropriato in base alla posizione geografica;
- non generare né accrescere un rischio di incendio per un aereo in ingresso;
- non emettere fumi tossici o maleodoranti in caso di incendio dopo l'installazione;
- permettere la rimozione di ghiaccio e neve ed evitare l'accumulo di acqua;
- avere una resistenza meccanica tale da evitare danneggiamenti a seguito del passaggio degli addetti alla manutenzione;
- non causare alcun impatto sull'ambiente o sulla salute umana durante l'installazione, il funzionamento e lo smaltimento;
- essere resistenti al deterioramento dovuto a:
  - sale;
  - liquidi de-icing approvati per gli aeromobili e la pista, fluidi e solidi anti-icing;
  - carburante, fluidi idraulici e oli lubrificanti;
  - raggi UV;
  - acqua;
  - grandine;
  - congelamento/scongelo;
  - sabbia e neve trasportate dal vento;
  - vernici;
  - erbicidi.

Per i rivestimenti plastici, infine, si fa ricorso ai requisiti imposti dalla normativa italiana.

Lo strato di rivestimento deve:

- essere resistente all'acqua;
- essere resistenti alle alte e basse temperature: non si dovrebbero registrare modifiche dell'aspetto e della resistenza a flessione superiore del 20 % in un intervallo di temperatura compreso tra -30 °C e 70 °C;

- essere resistente ai sali e ai liquidi per il de-icing: massa, dimensioni e resistenza a flessione possono modificarsi al massimo del 2 %, 2 % e 20 % rispettivamente e non si devono notare modifiche del comportamento;
- essere resistente ai raggi UV: la resistenza a flessione può modificarsi al massimo del 20 %;
- essere resistente al fuoco;
- essere antiscivolo;
- non essere generatore di FOD (Foreign Object Debris).

### 6.1.3. Prove EN e ISO

Le metodologie di prova proposte di seguito sono state associate ai requisiti normativi illustrati nel paragrafo precedente.

La proposta mira a collegare ciascun requisito ad una o, quando appropriato, a più prove normalizzate di tipo EN, oppure a prove equivalenti riconosciute a livello internazionale secondo le norme ISO. [95]

Per non vincolare tale studio all'impiego futuro di materiali diversi da quelli che vengono attualmente utilizzati nella produzione degli EMAS, si propone di distinguere i materiali in due categorie principali:

1. **Componenti principali per l'assorbimento di energia:** al giorno d'oggi si riferiscono ai calcestruzzi cellulari a bassissima densità e agli inerti granulari;
2. **Materiali supplementari:** sono materiali che proteggono il sistema dagli agenti esterni, come i rivestimenti superficiali in plastica adottati attualmente.

Le prove normalizzate associate a ciascuna categoria sono schematizzate nell'Allegato A. Nei prossimi paragrafi si approfondiranno le singole prove e le modalità di esecuzione.

#### 6.1.3.1. Componenti principali per l'assorbimento di energia

Nell'Allegato A i requisiti normativi sono stati suddivisi in due classi principali: i requisiti di durabilità ed i requisiti di resistenza al fuoco.

Si specifica che vengono proposte metodologie di prova non solamente applicabili al calcestruzzo cellulare (AAC) e agli inerti leggeri indicati dalla normativa italiana dell'ENAC, ma estese in generale al calcestruzzo indurito e agli aggregati di qualsiasi tipologia. Tale

approccio permette di rendere la tabella utilizzabile anche in futuro, qualora vengano impiegati nell'EMAS materiali differenti rispetto a quelli attualmente adottati.

Di seguito le metodologie di prova proposte vengono sinteticamente descritte dopo aver identificato gli ambiti di prova, con l'aggiunta di alcune precisazioni laddove necessario.

## Caratteristiche fisiche e geometriche

- ***EN 12390 – 7, Massa volumica del calcestruzzo indurito***

La prova indica come misurare la massa volumica (o densità) di un provino di calcestruzzo indurito. È applicabile al calcestruzzo leggero, di massa normale e di massa elevata. Dalla misura della massa e del volume del provino, si calcola la massa volumica, fattore determinante per la durabilità del calcestruzzo impiegato nel letto d'arresto. La massa è calcolabile in tre condizioni differenti del provino: come ricevuto, saturo d'acqua ed essiccato in stufa.

- ***EN 678, Massa volumica a secco per il calcestruzzo aerato autoclavato (AAC)***

La massa volumica a secco viene calcolata dal rapporto tra la massa e il volume di provini estratti da elementi prefabbricati, essiccati a  $105 \pm 5$  °C fino a massa costante. È una prova utilizzabile per determinare e verificare il requisito di massa volumica per i blocchi di calcestruzzo cellulare del letto d'arresto.

- ***EN 933 – 8, Caratteristiche geometriche degli aggregati, Valutazione dei fini – Prove dell'equivalente in sabbia***

È una prova per determinare l'equivalente in sabbia nella frazione 0/2 mm negli aggregati fini e negli aggregati misti, definita come altezza percentuale del sedimento depositatosi dopo un intervallo di tempo da un provino cilindrico in aggregato di dimensioni 0/2 mm con un contenuto massimo di fini del 10% e una piccola quantità di soluzione di lavaggio e flocculante. Tale prova risulta utile per valutare gli aggregati fini da inserire nella miscela del calcestruzzo impiegato nei blocchi dell'EMAS.

- ***EN 13055, Aggregati leggeri***

Tale norma specifica le proprietà degli aggregati leggeri, che si ottengono dalla lavorazione di materiali naturali o riciclati e hanno una massa volumica inferiore ai  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Tra le proprietà si trovano la massa volumica, la granulometria, il contenuto di fini, l'assorbimento di acqua e le varie resistenze a fattori esterni, come gelo-disgelo. Tale norma viene considerata utile per determinare le caratteristiche di interesse degli inerti leggeri, categoria proposta dalla normativa ENAC.

## Resistenza alla penetrazione di acqua

- **EN 12390 – 8, *Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione per calcestruzzo indurito***

Viene applicata sotto pressione una quantità di acqua sulla superficie di un provino di calcestruzzo indurito; successivamente, il provino viene spaccato a metà e si calcola la profondità di penetrazione dell'acqua.

- **EN 1353, *Contenuto di umidità nel calcestruzzo aerato autoclavato (AAC)***

Vengono estratti dei provini prismatici da componenti prefabbricati di AAC. La massa viene calcolata allo stato umido e dopo l'essiccazione a massa costante del provino a  $105 \pm 5$  °C. Infine, il contenuto di umidità viene calcolato dal rapporto tra la perdita di massa a seguito dell'essiccazione e la massa finale secca o il volume del provino. Tale prova può essere utilizzata per valutare il comportamento del calcestruzzo cellulare di fronte all'umidità, la quale ha un ruolo importante nel possibile ritiro igrometrico del materiale e nel suo comportamento al gelo-disgelo.

- **EN 772 – 11, *Assorbimento d'acqua negli elementi per muratura in calcestruzzo, calcestruzzo aerato autoclavato (AAC), materiale lapideo agglomerato e naturale***

Sebbene questa prova venga applicata agli elementi per muratura, si ritiene applicabile anche sui blocchi di calcestruzzo cellulare impiegati nei letti d'arresto. La prova consiste nella determinazione del coefficiente di assorbimento di acqua dovuto a capillarità nel materiale. Dopo l'essiccazione, una faccia dell'elemento viene immersa in acqua per un specifico periodo di tempo ed in seguito viene calcolata la variazione di massa. L'assorbimento di acqua viene espresso in funzione del cambiamento di massa, del tempo di immersione e dell'area della faccia immersa.

- **EN 772 – 15, *Permeabilità al vapore acqueo negli elementi per muratura in calcestruzzo aerato autoclavato***

La permeabilità al vapore acqueo indica la capacità del calcestruzzo di lasciar diffondere all'interno della sua microstruttura porosa le particelle di vapore acqueo ed è un parametro importante per valutare la durabilità del materiale. Un provino a forma di disco, ottenuto da un elemento prefabbricato in AAC, viene disposto sulla bocca di un recipiente rotondo in cui si mantiene costante la pressione del vapore acqueo, diversa dalla pressione della cella che contiene il recipiente. Dalla variazione di massa del recipiente rotondo si determina il tasso di migrazione dell'umidità in regime permanente, espresso come coefficiente di permeabilità.

- **EN 1097 – 5, *Contenuto d'acqua per essiccazione in forno ventilato negli***

### *aggregati*

Una porzione di prova di aggregato viene pesata e posta in forno ventilato, lasciandola essiccare a  $105 \pm 5$  °C. Il contenuto d'acqua viene inteso come acqua libera totale presente nel campione e viene espressa in percentuale dal rapporto tra la differenza tra massa umida e massa essiccata e la massa essiccata finale. La prova è utile poiché permette di calcolare la tendenza dell'acqua ad entrare nel campione dalla sua superficie e dai pori presenti tra i granuli.

- ***EN 1097 – 6, Massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua negli aggregati***

La prova è applicabile ad aggregati di peso normale e ad aggregati leggeri. Per aggregati leggeri, vengono indicate due diverse prove per determinare la massa volumica, rapporto tra massa e volume del campione, in funzione della dimensione degli aggregati. Tali prove utilizzano un picnometro e un imbuto Büchner rispettivamente. La massa viene misurata in condizione di saturazione a superficie asciutta e dopo l'essiccazione in stufa, mentre il volume viene determinato dallo spostamento di acqua a seguito dell'essiccazione del provino.

## Resistenza al gelo-disgelo e alla temperatura

- ***EN 206, Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità***

È una norma generale che specifica i requisiti per i costituenti del calcestruzzo, le proprietà, i metodi di verifica e conformità e le indicazioni per la produzione e la consegna. In particolare, risulta di estrema utilità per la nostra applicazione la suddivisione in classi di esposizione del calcestruzzo in relazione alle condizioni ambientali. La norma potrebbe essere uno strumento per identificare la tipologia di calcestruzzo più adeguata in funzione dell'ambiente più gravoso di inserimento. Ad esempio, se il letto d'arresto dovesse essere installato in prossimità di una pista sul mare, si opterebbe per la classe di esposizione XS1, adatta a strutture in prossimità o sulla costa, esposte ad aria contenente salsedine ma senza contatto diretto con l'acqua di mare. Oppure se l'ambiente fosse sottoposto a continui sbalzi di temperatura, si potrebbe optare per un calcestruzzo di tipo XF4, per superfici orizzontali soggette ad alta saturazione e a contatto con sali antigelo. Altrimenti, se l'area fosse soggetta a spruzzi o applicazioni di sali per le operazioni di manutenzione o di altro tipo, si sceglierebbe la macro classe XD con vari sottolivelli in base al contesto di esposizione (XD3 per esposizione severa).

- **EN 12390 – 9, Resistenza al gelo-disgelo con Sali disgelati per calcestruzzo indurito – Metodo della scagliatura**

Tale prova guida alla misurazione della resistenza al gelo-disgelo sia in presenza di acqua sia in presenza di una soluzione di cloruro di sodio. La prova consiste nel verificare la resistenza del calcestruzzo alla scagliatura da gelo-disgelo. Una piastra di calcestruzzo viene esposta ad uno strato di 3 mm di acqua deionizzata o di una soluzione di cloruro di sodio e, dopo 56 cicli di gelo-disgelo, si misura la massa disgregatasi dalla superficie.

- **EN 15304, Resistenza al gelo-disgelo per calcestruzzo aerato autoclavato**

La prova viene condotta su provini cubici che vengono saturati in acqua e poi equilibrati in sacchetti sigillati. Essi vengono sottoposti ad almeno 15 cicli di gelo a  $-15\pm 2$  °C e a successivo disgelo in ambiente umido e a  $20\pm 2$  °C. La resistenza al gelo-disgelo viene calcolata a partire dalla perdita di massa dopo i cicli di gelo-disgelo.

- **EN 1367 – 1, Resistenza al gelo-disgelo degli aggregati**

Si applica ad aggregati di diametro compreso tra 4 e 63 mm. Le frazioni di prova di granulometria omogenea vengono sottoposte a 10 cicli di gelo-disgelo, immergendoli in acqua a  $-17,5$  °C e poi scongelandoli in bagno d'acqua a circa 20 °C. Terminati i cicli, si osservano eventuali cambiamenti e si misura la perdita di massa, da cui si ricava la resistenza al gelo-disgelo degli aggregati.

- **EN 1367 – 6, Resistenza al gelo-disgelo degli aggregati in presenza di sale (NaCl)**

La prova valuta la resistenza degli aggregati quando esposti a cicli di gelo-disgelo in presenza di una soluzione di NaCl all'1% in acqua deionizzata o distillata. Essa risulta utile nel caso in cui il letto d'arresto sia esposto ad acqua marina e a cicli di gelo-disgelo. Per un totale di 10 cicli, il provino viene immerso in una soluzione di NaCl all'1% per favorirne l'assorbimento completo e successivamente viene esposto al gelo. Infine, la resistenza al gelo-disgelo viene determinata in percentuale in massa a seguito della setacciatura del provino.

- **EN 1367 – 7, Resistenza al gelo-disgelo degli aggregati leggeri**

Si adotta la stessa procedura della EN 1367 – 1.

## Resistenza alla penetrazione di agenti esterni

- **EN 206, Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità**

Stesse motivazioni e considerazioni esposte in precedenza. La classe di esposizione del calcestruzzo potrebbe essere un fattore fondamentale per la scelta della tipologia di calcestruzzo più adeguata al contesto ambientale di inserimento e dunque all'esposizione a determinati agenti esterni.

- ***EN 11747, Profondità di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo indurito***

Gli ioni cloruro sono contenuti nei sali per il de-icing a base di cloruri e possono inoltre trovarsi nella salsedine degli ambienti marini. La prova viene realizzata su carote di calcestruzzo, poste a contatto con una soluzione di cloruro di sodio. Dopo un periodo prefissato, il provino viene sottoposto ad una frattura longitudinale e la profondità di penetrazione degli ioni cloruro viene misurata tramite un indicatore colorimetrico.

- ***EN 12390 – 11, Resistenza ai cloruri del calcestruzzo indurito***

Si utilizzano provini cilindrici o cubici maturati ad almeno 28 giorni, suddivisi in sottoprovini per misurare il contenuto iniziale di cloruri e il profilo di penetrazione dopo l'esposizione. Uno dei provini viene saturato, verniciato su tutti i lati tranne uno e esposto per 90 giorni ad una soluzione di cloruro (tipicamente NaCl al 3%). Successivamente, gli strati successivi della superficie esposta vengono rimossi e analizzati per determinare il profilo di penetrazione dei cloruri. I risultati della prova sono il contenuto superficiale di cloruri e il coefficiente di diffusione non stazionario.

- ***EN 12390 – 12, Resistenza alla carbonatazione del calcestruzzo indurito***

La carbonatazione è un fenomeno chimico tipico del calcestruzzo, pertanto è importante introdurre una prova per verificarne la resistenza. I provini di calcestruzzo (prismi, cubi o cilindri) vengono stagionati 28 giorni, condizionati in laboratorio per 14 giorni e poi esposti per periodi fino a 70 giorni in una camera con CO<sub>2</sub> al 3 %, temperatura 20 °C e umidità relativa 57 %. A intervalli prestabiliti (7, 28 e 70 giorni), i provini vengono tagliati e su metà di ciascun pezzo si misurano più profondità di carbonatazione; la profondità media ottenuta consente di calcolare la velocità di carbonatazione in  $\text{mm}/\sqrt{\text{giorni}}$ .

## Resistenza al fuoco

- ***EN ISO 11925 – 2, Prove di reazione al fuoco – Accendibilità dei prodotti sottoposti all'attacco diretto della fiamma – Prova con l'impiego di una singola fiamma***

La prova viene proposta per valutare il carattere anti-scintilla del materiale da

impiegare nel letto d'arresto. Il campione, in posizione verticale, viene esposto ad attacco diretto di fiamme di bassa entità sotto irradiazione impresso a zero, per un intervallo di tempo pari a 15 o 30 secondi. Si verifica l'avvenimento della combustione, ovvero l'accensione del materiale.

- ***EN ISO 1716, Prove di reazione al fuoco – Determinazione del potere calorifico superiore***

Il potere calorifico indica la quantità di calore rilasciata da un materiale durante la combustione ed è un parametro di riferimento per la valutazione della reazione al fuoco. Nella prova, il campione viene acceso in condizioni standard all'interno di una bomba calorimetrica a volume costante. La quantità di calore rilasciato dal materiale viene definita dalla variazione di temperatura all'interno della bomba.

- ***EN 13823, Prove di reazione al fuoco – Prodotti da costruzione esclusi i pavimenti esposti ad un attacco termico prodotto da un singolo oggetto in combustione***

La prova viene proposta per valutare il comportamento del materiale nel caso in cui un oggetto incendiato entri in contatto con esso, ad esempio a seguito dell'incendio del velivolo all'interno dell'EMAS. Il campione viene esposto per 20 minuti alle fiamme di un bruciatore. Trascorsi i 20 minuti, si osservano la produzione di calore e di fumo, la diffusione delle fiamme e la produzione di particelle e goccioline infuocate, da cui si ricava la reazione al fuoco del materiale.

- ***EN ISO 1182, Prove di reazione al fuoco – Prova di non combustibilità***

La combustibilità indica l'attitudine di un materiale a bruciare. Cinque provini cilindrici di dimensioni specifiche vengono posti all'interno di un forno stabilizzato ad una temperatura determinata per almeno 30 minuti. Durante la prova, alcune termocoppie rilevano la temperatura nel forno. La combustibilità viene determinata dalla perdita di massa di ciascun provino, dalla durata della fiamma persistente (fiamma visibile per almeno 5 secondi sul provino) e dall'aumento di temperatura nel forno.

- ***EN 13501 – 1, Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco***

Le prove di reazione al fuoco utilizzate per classificare i materiali sono: la prova di non combustibilità, la prova del potere calorifico, la prova su un singolo elemento incendiato e la prova di accendibilità. Queste permettono di valutare l'inflammabilità, la generazione di fumo, la velocità di combustione, la produzione di calore e l'incandescenza dei materiali. Le classi di reazione al fuoco per elementi da costru-

zione sono A1, A2, B, C, D, E e F. Per i sistemi d'arresto EMAS, si propone la classe di reazione al fuoco A1, considerata la più alta classe di incombustibilità. Essa si riferisce a materiali non combustibili che non contribuiscono alla propagazione del fuoco, non rilasciano quantità significative di calore né fumi tossici e non generano gocce infiammabili. Il raggiungimento della classe A1 richiede il superamento delle prove di non combustibilità e del potere calorifico. Per quanto riguarda il requisito di non emettere fumi tossici o maleodoranti in caso di incendio, i materiali A1 garantiscono l'assenza di emissioni. Per i materiali quasi non combustibili di classe A2, invece, si distinguono tre sottocategorie s1-s3 in base alla produzione di fumi. Per i letti d'arresto EMAS, si propone la sottocategoria s1, che indica una produzione di fumo molto bassa, quasi trasparente e poco densa, che dunque non compromette la visibilità generale né quella delle vie di esodo.

### 6.1.3.2. Materiali supplementari

Per i rivestimenti superficiali, si segue la stessa metodologia vista per i materiali assorbenti energia.

Le prove proposte fanno riferimento non solamente a materie plastiche, ma anche a materiali tipici per il rivestimento e la protezione di strutture in calcestruzzo, vernici, pitture e materiali isolanti.

### Caratteristiche meccaniche

- ***EN ISO 604, Proprietà a compressione di materie plastiche***

La prova viene utilizzata per determinare, in specifiche condizioni, la resistenza a compressione, il modulo elastico e altri aspetti relativi al legame sforzo-deformazione per le materie plastiche. Il campione viene sottoposto ad un carico di compressione a velocità costante lungo il suo asse principale fino alla frattura o ad un certo valore di carico o di variazione di lunghezza. La prova è utilizzabile per valutare il comportamento del rivestimento sotto il carico del carrello, degli addetti alla manutenzione e dei veicoli di soccorso e antincendio.

- ***EN ISO 527 – 1, Caratteristiche a trazione di materie plastiche***

La norma specifica requisiti generali per condurre prove di valutazione del comportamento a trazione delle materie plastiche, incluse quelle impiegate nei rivestimenti come nel caso dei letti d'arresto. La prova mira a determinare la resistenza a trazione, il modulo di trazione e altri aspetti della curva sforzo-deformazione. La metodologia seguita è identica a quella della EN ISO 604, con l'unica differenza che

il provino viene sottoposto ad un carico di trazione che tende ad allungarlo fino a frattura.

- ***ISO 178, Proprietà di flessione di materie plastiche***

La prova mira a determinare la resistenza a flessione, il modulo di flessione e altri aspetti della curva sforzo-deformazione. Il provino di sezione rettangolare, appoggiato su due supporti, viene sottoposto ad un carico puntuale crescente in mezzzeria che tende a fletterlo. La prova termina alla prima frattura o al raggiungimento del carico massimo.

## Resistenza alla penetrazione di acqua

- ***EN ISO 62, Assorbimento d'acqua di materie plastiche***

La prova misura le caratteristiche di assorbimento di umidità, in tutto lo spessore, di materie plastiche solide piane o curve. Il campione viene immerso in acqua distillata a 23 °C o bollente, oppure viene esposto ad una umidità del 50 % a temperature definite per specifici intervalli di tempo. La quantità di acqua assorbita viene espressa in percentuale dalla variazione di massa a seguito dell'immersione in relazione alla massa iniziale.

- ***EN 1931, Proprietà di trasmissione del vapore acqueo per membrane flessibili per impermeabilizzazione di tipo bituminoso, plastico e in gomma***

Sebbene tale prova sia prevista per membrane impiegate nell'impermeabilizzazione di tetti, si ritiene comunque applicabile o di riferimento anche per i materiali impiegati nei letti d'arresto EMAS. La norma specifica le metodologie per determinare le proprietà di trasmissione di vapore acqueo, la densità di flusso dell'umidità e il fattore di resistenza all'umidità. Tali grandezze vengono misurate sigillando il provino sulla parte aperta di una tazza contenente una sostanza disidratante. Tale apparecchiatura viene pesata periodicamente per calcolare la densità di flusso del vapore acqueo e il fattore di resistenza all'umidità.

## Resistenza alle temperature

- ***EN ISO 75 – 2, Temperatura di inflessione sotto carico per materie plastiche ed ebanite***

La norma presenta tre tipologie di prova con valori differenti di sforzo di flessione. In ciascuna prova, il campione viene sottoposto a flessione in tre punti sotto un carico costante. La temperatura viene aumentata con velocità costante. La temperatura di inflessione sotto carico è la temperatura alla quale si verifica la deflessione standard

a seguito dell'aumento della deformazione flessionale.

- ***EN ISO 1062 – 3, Permeabilità all'acqua liquida di pitture e vernici di rivestimento per murature esterne e calcestruzzo***

Vengono utilizzati dei blocchi di materiale minerale altamente poroso, rivestiti del materiale di studio. Una delle facce del blocco viene immersa per 24 ore in acqua a  $23\pm 2$  °C e successivamente asciugata per altre 24 ore a  $50\pm 2$  °C. La permeabilità all'acqua liquida viene dunque misurata dal rapporto tra la variazione di massa e il prodotto tra l'area della sezione immersa e la radice quadrata del tempo di immersione.

- ***ISO 1147, Test di stabilità ai cicli di gelo-disgelo per materie plastiche***

Il campione viene posto in frigorifero a -10 °C per 16 ore e successivamente in un ambiente a circa 20 °C per 8 ore. Dopo tale ciclo, viene osservata l'apparizione di coaguli. I cicli vengono ripetuti fino all'apparizione di coaguli, per un massimo di 5 cicli di gelo-disgelo. Il numero di cicli supportati senza coagulazione rappresenta la stabilità del materiale ai cicli di gelo-disgelo. Maggiore è la stabilità, maggiore è la resistenza del materiale.

- ***ISO 20394, Resistenza al gelo-disgelo di materiali termoisolanti***

Il campione viene sottoposto a 300 cicli di congelamento in aria a -20 °C e scongelamento in acqua a +20 °C. La resistenza al gelo-disgelo viene definita dalla variazione di massa dopo i 300 cicli, in relazione alla massa a fine assestamento.

## Resistenza agli agenti esterni

- ***EN ISO 2812 – 1, Resistenza ai liquidi con immersione in liquidi diversi dall'acqua per pitture e vernici***

La prova determina la resistenza di uno strato o di un sistema multistrato di prodotto verniciante all'azione di liquidi diversi dall'acqua o di prodotti in pasta. Un pannello rivestito di pittura viene immerso nel liquido di prova per uno specifico periodo di tempo. In seguito, dopo la pulizia della faccia immersa, si osservano eventuali bolle e altre alterazioni superficiali, dalle quali si determina il comportamento del materiale.

- ***EN ISO 2812 – 2, Resistenza all'acqua tramite metodo di immersione per pitture e vernici***

La norma fornisce indicazioni sulla determinazione della resistenza all'acqua dei materiali rivestiti da uno o più strati di pittura o vernice, tramite una prova di immersione totale o parziale. Il campione consiste in un pannello rivestito della pittura o vernice in esame; esso viene immerso totalmente o per tre quarti della

sua lunghezza in una vasca ripiena d'acqua ad una specifica temperatura e per uno specifico periodo di tempo. Il campione viene poi rimosso dalla vasca e pulito e si osserva se sono insorte bolle o altre forme di deterioramento del materiale. Si può valutare anche la variazione di aderenza superficiale.

- ***EN ISO 2812 – 4, Resistenza ai liquidi tramite metodo di applicazione per gocce per pitture e vernici***

Il pannello rivestito della pittura o vernice in esame può essere posto orizzontalmente o obliquamente. Il liquido viene applicato a gocce tramite una pipetta per una specifica durata e, alla fine della prova, il provino viene asciugato e si osserva la nascita di bolle o altri difetti superficiali.

- ***EN 13583, Resistenza alla grandine di membrane flessibili per impermeabilizzazione in bitume, plastica e gomma***

Anche questa norma è applicabile a rivestimenti per l'impermeabilizzazione di tetti. Tuttavia, si ritiene applicabile o di riferimento per i materiali impiegati nei letti d'arresto. La prova simula l'impatto della grandine sulla superficie del provino tramite una sfera plastica di peso e dimensioni definite. La velocità d'impatto della sfera può assumere valori diversi e la sfera può essere lanciata in direzione verticale o orizzontale. La resistenza alla grandine è espressa come la velocità di danneggiamento della sfera in m/s che ha causato la perforazione in massimo uno su cinque tentativi su supporto rigido e/o morbido del provino.

## Resistenza ai raggi ultravioletti

- ***EN 4892 – 3, Esposizione a lampade fluorescenti UV per materie plastiche***

I provini vengono esposti a vari livelli di radiazioni ultraviolette, calore e umidità in condizioni ambientali controllate. Per simulare l'irradianza dei raggi solari vengono utilizzate delle lampade UV fluorescenti. In base alla tipologia di lampade utilizzate, esistono vari metodi di prova con condizioni specifiche. In generale, al termine di ogni prova, l'esposizione ai raggi UV viene valutata tramite dei radiometri UV, calibrati per misurazioni a banda stretta o larga. L'intervallo di esposizione viene espresso come energia radiante incidente per unità di area del piano di esposizione. Dopo l'esposizione ai raggi UV, si osserva l'insorgenza di eventuali difetti superficiali e così si valuta il comportamento del materiale esposto ai raggi solari.

- ***EN 16474 – 3, Esposizione a lampade fluorescenti UV per pitture e vernici***

La norma specifica i metodi di valutazione dell'esposizione ai raggi ultravioletti per materiali di rivestimento. L'apparecchiatura di prova simula specifiche condizioni di esposizione ai raggi UV, calore e umidità per riprodurre gli effetti degli agenti atmosferici. I rivestimenti vengono esposti a differenti tipologie di lampade UV fluorescenti in specifiche condizioni ambientali. La metodologia e i metodi di osservazione sono i medesimi della EN 4892 – 3 per materie plastiche.

- ***ASTM – D4799 – 08, Test di invecchiamento accelerato per materiali bituminosi***

La norma descrive le condizioni e le procedure di prova per valutare l'esposizione ai raggi ultravioletti e alla condensazione di materiali bituminosi e materiali impermeabilizzanti. I provini consistono in pannelli di alluminio ricoperti da un sottile strato bituminoso. Essi vengono esposti a cicli di temperatura, luce e umidità. Il comportamento dei provini viene valutato osservando cambiamenti superficiali e confrontando i provini durante il tempo di esposizione con la condizione iniziale.

## Resistenza al fuoco

- ***UNI 5659 – 2, Generazione di fumo di materie plastiche, Densità ottica per mezzo di una prova a camera singola***

La prova consiste nella valutazione della generazione di fumo da parte di superfici esposte di provini in plastica. La produzione di fumo varia a seconda del livello di irraggiamento a cui è esposto il campione; per tale prova si utilizzano livelli di irraggiamento di 25 kW/m<sup>2</sup> e 50 kW/m<sup>2</sup>. Le provette vengono esposte in posizione orizzontale ai livelli di radiazione termica specificati, all'interno di una cabina chiusa, con o senza l'impiego di una fiamma pilota. Il fumo prodotto viene contenuto dalla cabina. Per ogni campione, si produce un grafico della trasmissione della luce in funzione del tempo e si determina la trasmissione minima, da convertire in densità ottica specifica del materiale, parametro che indica il livello di "oscuramento" prodotto dal fumo generato. La densità ottica è dunque un parametro utilizzato per quantificare la produzione di fumo: più è alta la densità ottica, più il fumo è denso e opaco.

- ***ISO 10093, Prove al fuoco – Sorgenti di accensione normalizzate per materie plastiche***

La norma specifica alcune sorgenti di accensione utilizzabili nelle prove al fuoco dei materiali plastici, variabili in base all'intensità e all'area di contatto. Tali sorgenti possono essere utilizzate per simulare gli eccessi di calore a cui i materiali potrebbero

essere esposti all'inizio di un incendio. Le fonti di accensione vengono classificate in primarie e secondarie e le varie sottoclassi fanno riferimento a sorgenti di varia natura.

- **EN ISO 1182, Prove di reazione al fuoco – Prova di non combustibilità**  
Stesse procedure e considerazioni spiegate in precedenza.
- **EN 13501 – 1, Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco**  
Vengono eseguite le medesime considerazioni precedenti. Dal momento che le materie plastiche sono generalmente combustibili, non raggiungono le classi A1 e A2 e rientrano più spesso nelle classi B-F, a seconda della loro composizione, della presenza di ritardanti di fiamma, della densità e dello spessore. Per l'impiego nei letti d'arresto EMAS, si suggerisce di impiegare materie plastiche di rivestimento di classe al fuoco B, ovvero materie combustibili ma con comportamento molto limitato. Inoltre, si suggeriscono le classi s1 per la produzione di fumo e d0 per la creazione di gocce e/o particelle infiammate.

## Caratteristiche superficiali

- **EN 13036 – 4, Resistenza allo slittamento/derapaggio di una pavimentazione stradale e aeroportuale. Metodo del pendolo**  
La norma descrive come misurare l'aderenza superficiale di una pavimentazione stradale o aeroportuale tramite un pendolo. All'estremità del braccio del pendolo è presente uno slittino in gomma. Il braccio viene posto inizialmente in posizione orizzontale ad un'altezza nota e in seguito viene rilasciato. Lo slittino così striscia sulla superficie di prova per una distanza definita e l'energia persa durante lo scorrimento (l'attrito) riduce il movimento del braccio. La differenza di altezza del braccio viene tradotta in un indice numerico di aderenza chiamato PTV (Pendulum Test Value).
- **EN ISO 8295, Coefficiente di attrito di film e foglie in plastica**  
La prova viene utilizzata primariamente nel controllo qualità dei rivestimenti plastici. Essa determina il coefficiente di attrito incipiente e di scivolamento di tali film, quando scivolano su sé stessi o su altre sostanze. Le superfici di prova vengono poste in contatto fra di loro e sotto una specifica pressione costante. Viene valutata la forza di slittamento necessaria a far scivolare le due superfici una sull'altra. Dalla prova si misurano il coefficiente di attrito statico e il coefficiente di attrito dinamico.
- **EN ISO 7784, Resistenza all'abrasione di pitture e vernici con metodo con ruote di gomma abrasiva e campione per il test in rotazione**

Nella prova due ruote in gomma abrasiva sono libere di muoversi e ruotare e abrado-no lo strato di vernice di prova di un campione in rotazione, applicando uno specifico carico. Dopo il numero di cicli concordato, viene determinata la perdita di massa del rivestimento causata dall'usura abrasiva delle ruote.

- ***EN ISO 4628, Valutazione della degradazione di rivestimenti in pitture e vernici - Designazione della quantità e della dimensione dei difetti e della intensità nelle alterazioni uniformi dell'aspetto***

La norma definisce un sistema per la designazione della quantità e della dimensione dei difetti e l'intensità delle alterazioni uniformi superficiali. Tale sistema è utile per valutare gli effetti dell'invecchiamento, delle condizioni atmosferiche e dell'ingiallimento. È stata adottata una convenzione uniforme su una scala numerica che va da 0 a 5, dove 0 indica l'assenza di difetti o la presenza di difetti non visibili ad occhio nudo, mentre 5 indica difetti gravi o difetti più grandi di 5 mm. La stessa scala viene adottata per valutare l'intensità del cambiamento superficiale. Si rimanda alle parti successive della EN ISO 4628 per una serie di prove di valutazione dei difetti superficiali e dell'intensità delle alterazioni, come nei casi di sfogliamento, formazione di bolle, fessurazioni, degrado e scolorimento.

## 6.2. Prove sul sistema d'arresto EMAS

Le prove sui materiali impiegati nel letto d'arresto EMAS sono state proposte come ausilio alla progettazione e al controllo materiali del sistema.

Di seguito vengono proposte delle prove che possono essere condotte non sui singoli materiali, bensì sull'intero letto d'arresto per verificarne l'efficacia e gli effetti indotti sulla struttura dell'aeromobile in ingresso e sui suoi occupanti.

Le prove proposte sono state riprese in parte dalle normative vigenti, come la prova di carico su ruota singola, mentre altre sono state proposte per verificare il rispetto dei requisiti tecnici e funzionali, come ad esempio la pendenza degli scivoli ed il rispetto dei tempi di risposta da parte dei Vigili del Fuoco per la gestione di un'emergenza.

### 6.2.1. Prova del carico equivalente su ruota singola

I testi delle normative vigenti stabiliscono che la progettazione di un EMAS deve essere ottimizzata e supportata da prove in laboratorio e su scala reale.

Una delle prove realizzabili in laboratorio è la prova del carico equivalente su ruota singola su una sezione rappresentativa del letto d'arresto.

Dal momento che le norme relative ai letti d'arresto non forniscono indicazioni precise sull'esecuzione di tale prova, si propone un metodo di procedimento. È una prova che viene spesso utilizzata per valutare le prestazioni di una pavimentazione stradale e aeroportuale, volendo determinare gli effetti dell'impatto con un carico reale come se questo fosse applicato da una ruota singola.

La prova costituisce un test cruciale per valutare le prestazioni a compressione dell'EMAS e le modalità di collasso locale, verificando che non ci siano cedimenti prematuri o non prevedibili.

La normativa ENAC rimanda ad un documento ufficiale dell'Amministrazione dell'Aviazione Civile della Cina (CAAC) per ottenere specifiche più dettagliate. Il documento di riferimento è lo standard *MH/T 5111-2015*, che descrive in breve la modalità di esecuzione e l'obiettivo della prova.

Tale prova viene condotta a carichi progressivi, ovvero il carico viene applicato gradualmente sul singolo punto di contatto tra la ruota e la pavimentazione, per valutare sia la capacità portante puntuale sia le caratteristiche di dissipazione energetica del sistema EMAS.

L'obiettivo principale è verificare la risposta strutturale locale del letto d'arresto sotto il carico trasmesso dallo pneumatico dell'aeromobile.

Tale prova viene prevista sia prima sia dopo l'installazione del sistema EMAS, come strumento di progettazione e di collaudo. [43]

Il campione di riferimento è una sezione rappresentativa del letto EMAS, che riesca in piccola scala a riprodurre con fedeltà la struttura geometrica, fisica e materiale.

Per rappresentare il carico del carrello dell'aeromobile in ingresso nel letto, si considera una ruota singola sulla quale viene applicato un carico equivalente a quello applicato realmente dall'intero carrello dell'aeromobile di progetto.

Per definire il carico equivalente, detto *DSWL (Derived Single Wheel Load)*, in genere si assume che il carico di una gamba di forza gravi su una ruota singola fittizia. Il carico equivalente di norma risulta maggiore di quello che affrisce realmente a ciascuna ruota della gamba di forza.

Il *DSWL* dipende da vari fattori, tra cui le caratteristiche dell'aeromobile, la distribuzione del carico sulle ruote, il tipo di pavimentazione in esame e le condizioni operative. Ai fini dell'ottimizzazione del progetto, si raccomanda di assumere il *MTOW* dell'aeromobile di progetto. [84]

Per il calcolo specifico del *DSWL* si rimanda a documentazioni ufficiali quali l'*ICAO Annex 14, Part 1* e la *FAA Advisory Circular AC 150/5320-6G* sulle pavimentazioni aeroportuali.

Dopo aver definito il DSWL e la struttura della sezione di prova, la singola ruota viene lanciata alla velocità di progetto, solitamente 70 nodi come discusso precedentemente.

I risultati da ottenere e verificare comprendono le forze agenti sul carrello, le decelerazioni imposte agli occupanti, la profondità di affondamento e la decelerazione applicata dal materiale sulla ruota, al fine di determinare la distanza d'arresto necessaria.

### 6.2.2. Prova su scala reale

La prova su scala reale costituisce la migliore rappresentazione degli effetti indotti da un letto d'arresto EMAS su un aeromobile specifico, entrante nel sistema ad una determinata velocità e in condizioni operative e ambientali definite.

Tuttavia, tale prova comporterebbe costi ingenti, in quanto richiederebbe un letto d'arresto a grandezza naturale installato, un aeromobile di prova e un adeguato campo di sperimentazione per eseguire la simulazione.

L'aeromobile di progetto, caricato al suo MTOW, viene lanciato sul letto ad una velocità di ingresso stabilita, tipicamente pari a 70 nodi come previsto dalle normative vigenti.

Le condizioni di prova hanno un ruolo cruciale, dal momento che possono influenzare anche in maniera significativa il meccanismo d'arresto.

Ad esempio, per ottimizzare il dimensionamento del letto, si potrebbero considerare due scenari distinti: nel primo si ipotizza che i freni siano già stati attivati dal pilota e quindi il dimensionamento del letto tiene conto anche della capacità di frenata dell'aeromobile; nel secondo caso, invece, si assume che il pilota non sia stato in grado di azionare il sistema frenante, come potrebbe accadere in un decollo abortito a seguito di un guasto ai freni.

I risultati della prova su scala reale sono analoghi a quelli visti nella prova su singola ruota: le decelerazioni imposte agli occupanti, le forze applicate al carrello, la distanza d'arresto e, in generale, il comportamento del materiale nel meccanismo di arresto.

### 6.2.3. Test del deflusso delle acque

Il deflusso delle acque è un aspetto fondamentale da tenere in considerazione in fase progettuale. Eventuali ristagni d'acqua, infatti, potrebbero alterare fortemente il meccanismo d'arresto fornito dall'EMAS e generare problemi anche nella gestione delle emergenze dopo l'ingresso dell'aeromobile nel letto.

Oltre a ciò, l'acqua accumulata potrebbe alterare alcune caratteristiche dei materiali, nonostante questi vengano scelti per resistere all'assorbimento di acqua.

Le normative vigenti prevedono in fase di progettazione un sistema di drenaggio per

evitare che l'acqua piovana si accumuli sulla superficie del letto, in pista o nell'area di sicurezza di fine pista.

A tal proposito, la normativa FAA relativa ai letti d'arresto EMAS rimanda alla sua circolare *AC 150/5320-5* riguardo la progettazione di sistemi di drenaggio superficiali.

Nella validazione di un sistema d'arresto, pertanto, si propone di condurre un test su scala reale o su una porzione rappresentativa del letto, per valutare il suo comportamento di fronte a condizioni estreme di pioggia.

Nella prova, si simula l'effetto della pioggia distribuendola uniformemente sulla superficie dell'EMAS. In seguito, si osserva il deflusso ad occhio nudo e/o con l'ausilio di telecamere e si misurano i livelli dei ristagni eventuali tramite l'uso di strumenti specifici come sensori del livello d'acqua.

I risultati che devono essere ottenuti e valutati sono l'altezza dei ristagni superficiali eventuali, il tempo di drenaggio necessario in funzione della quantità e dell'intensità di pioggia simulata e l'uniformità del deflusso, evitando che ci siano zone con maggiore accumulo di acqua.

#### 6.2.4. Simulazioni di emergenza antincendio

Le ultime prove che vengono proposte in questo elaborato mirano alla valutazione della gestione di emergenze antincendio.

Progettare un sistema d'arresto EMAS, infatti, vuol dire anche progettare la sicurezza antincendio, facilitando l'ingresso, l'uscita e lo spostamento del personale e dei mezzi VVF.

Le prove riportate di seguito valutano la facilità di ingresso dei mezzi antincendio analizzando la pendenza delle rampe di accesso e il rispetto dei tempi di risposta per la gestione dell'emergenza.

Nel primo caso, dunque, si propone un test per verificare che la pendenza delle rampe di accesso non ostacoli l'ingresso degli autocarri antincendio, più pesanti e ingombranti.

Come visto nel Capitolo 5, le vie di accesso all'EMAS dovrebbero essere progettate con una pendenza massima del 10 %, dal momento che è stato dimostrato che pendenze superiori causerebbero problemi di stabilità e aderenza ai mezzi antincendio.

Come margine di sicurezza si raccomanda di progettare le rampe con una pendenza pari a circa 7 - 8 % e di condurre sempre la seguente prova di simulazione per verificarne il dimensionamento.

Il test viene condotto su una rampa prototipo in scala reale. Il veicolo antincendio viene

“lanciato” ad una data velocità e si verifica che la rampa consente al veicolo di percorrerla senza slittamenti e senza toccare il bordo con la faccia inferiore del mezzo.

Per una migliore valutazione, si consiglia di effettuare la prova in condizioni estreme, come quelle di carico massimo dell'automezzo, con superficie bagnata ed eseguendo particolari manovre di emergenza.

Il secondo test, invece, valuta il rispetto dei tempi di risposta del personale antincendio. Come riportato nel *Manuale di Formazione Aeroportuale dei Vigili del Fuoco*, il tempo massimo di risposta antincendio è pari a 2-3 minuti, calcolato dal momento della chiamata all'arrivo del primo mezzo sul luogo dell'incidente. [49]

La prova proposta dovrebbe essere effettuata in sito, in riferimento alle condizioni infrastrutturali specifiche dell'aeroporto in cui viene installato il letto d'arresto.

Sebbene il test comporti costi significativi, esso permettere di ottenere una simulazione estremamente realistica della gestione di un'emergenza antincendio.

Ipotizzando la presenza di un aeromobile in fiamme all'interno dell'EMAS, i mezzi antincendio partono dalla stazione aeroportuale e si dirigono verso l'area dell'incidente. Nel test viene misurato con un cronometro il tempo impiegato dal primo mezzo per raggiungere il letto d'arresto dal momento della chiamata, al fine di verificare il rispetto del limite del tempo di risposta previsto.

È una prova che risulta utile in particolare nei casi in cui sia necessaria una modifica delle vie di circolazione interna all'aeroporto, a seguito dell'installazione di un EMAS, per verificare che la nuova disposizione non crei problemi ai VVF per giungere nel luogo dell'incidente.

Essa può essere condotta anche senza la presenza fisica del letto d'arresto, dal momento che tende a valutare solamente il rispetto dei tempi da parte dei Vigili del Fuoco.



# 7 | Classificazione degli EMAS

Il presente Capitolo si propone di delineare una possibile classificazione dei sistemi d'arresto EMAS, al fine di agevolare la scelta della tipologia di letto maggiormente adeguata alle esigenze specifiche di un gestore aeroportuale.

## 7.1. Obiettivo della classificazione

La decisione di presentare una classificazione deriva dal fatto che al giorno d'oggi la progettazione di un sistema EMAS è responsabilità esclusiva dell'azienda produttrice, sulla base di informazioni fornite dal progettista e dal gestore aeroportuale riguardo il sito di installazione.

La classificazione può risultare uno strumento vantaggioso per:

1. il gestore aeroportuale, che può selezionare la tipologia di EMAS più adeguata al contesto di installazione;
2. l'azienda produttrice, che può realizzare tipologie specifiche di letti d'arresto EMAS, con caratteristiche standard e altre variabili in funzione delle esigenze della pista specifica.

Infatti, la presenza di più tipologie di sistemi d'arresto EMAS, progettate appositamente per determinati contesti aeroportuali, consente di conoscere a priori alcune caratteristiche progettuali, come i materiali da impiegare e le loro proprietà, e di lasciarne altre variabili in funzione del sito di installazione.

Questo approccio permette di velocizzare e ottimizzare la progettazione di un letto d'arresto.

## 7.2. Criterio di classificazione

Il criterio di classificazione degli EMAS scelto è il peso massimo al decollo (MTOW) di un aeromobile critico.

Come visto nel quadro normativo del Capitolo 4, l'aeromobile critico è definito come il

velivolo che utilizza regolarmente la pista e che necessita di maggiori capacità di arresto da parte del sistema. Grazie alla classificazione, dopo aver definito l'aeromobile critico di progetto, il gestore aeroportuale disporrebbe di uno o più letti d'arresto adatti al suo contesto.

Per la classificazione sono stati considerati tutti i velivoli attualmente in servizio, tenendo conto dei loro MTOW e delle loro caratteristiche fisiche.

L'obiettivo è stato creare gruppi di aeromobili con proprietà simili, in modo che ciascun gruppo potesse essere arrestato dalla stessa tipologia di letto d'arresto EMAS, con la medesima struttura e le medesime proprietà dei materiali costituenti. I parametri variabili di progetto sono rappresentati ad esempio dalle dimensioni geometriche del letto stesso e della distanza di setback, dipendenti dagli spazi disponibili in aeroporto.

La fase cruciale nella scelta della classe di EMAS è l'individuazione dell'aeromobile critico di riferimento. Una progettazione per classi realizzata in questo modo, infatti, consente di evitare numerose simulazioni del comportamento del letto con aeromobili diversi, velocizzando notevolmente la fase di dimensionamento. Tuttavia, tale approccio può risultare pericoloso se la scelta dell'aeromobile critico non è adeguata.

Le norme, infatti, sottolineano che la progettazione di un EMAS per un aereo di grandi dimensioni non assicura il corretto funzionamento e l'efficacia del letto nel caso di aerei di dimensioni minori.

Per tale motivo, prima di selezionare la classe di EMAS, si consiglia di eseguire uno studio aeronautico, analizzando il numero di movimenti per ogni tipologia di aereo operante, in maniera tale da identificare gli aerei che operano più frequentemente in pista e con maggiori richieste di capacità di arresto.

Alla luce di tali considerazioni, è più corretto fare riferimento non ad un singolo aeromobile critico, bensì ad un gruppo di aeromobili critici di riferimento, in grado di rappresentare in forma più realistica il traffico aeroportuale.

### 7.3. Classificazioni ICAO e FAA degli aeromobili

L'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile e l'Amministrazione Federale dell'Aviazione americana hanno realizzato delle classificazioni degli aeromobili in funzione del loro peso o della loro massa massima al decollo.

Tale classificazione è stata sviluppata per definire le minime separazioni tra aeromobili in volo e nelle fasi di decollo e atterraggio, in ordine da proteggere gli aeromobili più piccoli dalle turbolenze di scia generate da quelli di dimensioni maggiori.

Il *Doc 8643 – Aircraft Type Designators* dell'ICAO [77] fornisce codici standardizzati per

identificare in modo univoco tutte le tipologie di velivoli utilizzati nel mondo dell'aviazione civile, in modo da garantire una facilità nella comunicazione tra i controllori del traffico aereo (ATC), i piloti, le compagnie aeree le autorità aeronautiche e aeroportuali.

All'interno del documento, l'ICAO presenta una suddivisione degli aeromobili in funzione della loro massa massima al decollo nelle seguenti categorie:

- L (Light), per MTOM di 7.000 kg o meno;
- M (Medium), per MTOM compresa tra 7.000 e 136.000 kg;
- H (Heavy), per MTOW di 136.000 kg o più;
- S (Super), categoria speciale che attualmente comprende solamente l'Airbus A380-800 con un MTOM di 560.000 kg.

L'ente americano FAA presenta la sua classificazione degli aeromobili nella *Order 7360.1D Aircraft Type Designators*. [69] La classificazione viene realizzata in base al peso massimo al decollo del velivolo, identificando le seguenti categorie:

- S (Small), per MTOW di 41.000 pounds (circa 18.600 kg) o meno;
- L (Large), per MTOW compreso tra 41.000 e 300.000 pounds (circa 136.000 kg);
- H (Heavy), per velivoli con MTOW di 300.000 pounds o più;
- J (Super), categoria speciale che attualmente comprende l'Airbus A380-800 e l'Antonov An-225, non più in servizio dal 2022.

Si nota un'unica differenza tra le due classificazioni: il limite di MTOW tra la categoria Light (o Small per FAA) e Medium (o Large per FAA).

Dal momento la normativa FAA specifica che i requisiti di progettazione, installazione e manutenzione degli EMAS sono applicabili ad aerei con MTOW non inferiore ai 25.000 pounds (circa 11.340 chilogrammi), la categoria Light proposta da ICAO viene ritenuta trascurabile.

## 7.4. Proposta di classificazione

Sono state individuate quattro classi di letti d'arresto, distinte in funzione del peso massimo al decollo del gruppo di aeromobili critici di riferimento. A ciascuna classe è stata inoltre associata una tipologia di aeroporto, definita sulla base del traffico annuale di passeggeri, in quanto la categoria di aeroporto risulta generalmente correlata alla prevalenza di determinate classi di aeromobili (ad esempio, negli scali internazionali è più frequente l'operatività di velivoli di grande massa).

CLASSE DI EMAS	MTOW del gruppo di aerei critici di riferimento	Tipologia di aeroporto [n° passeggeri/anno]
1	$\geq 300.000$ kg	Grande hub internazionale [ > 20 milioni ]
2	136.000 - 300.000 kg	Mediamente trafficato [ 5 – 20 milioni ]
3	50.000 - 136.000 kg	Poco trafficato [ 1 – 5 milioni ]
4	$\leq 50.000$ kg	Locale [ < 1 milione ]

Tabella 7.1: Classificazione degli EMAS proposta

Si specifica che la presente classificazione rappresenta uno strumento di riferimento generale che deve essere sempre accompagnato da un attento studio aeronautico del traffico specifico.

Di seguito si nominano alcuni aeromobili rappresentativi del gruppo di aerei associato alla classe di letto d'arresto:

1. Airbus A380-800, Boeing 747-800, Boeing 777-300;
2. Airbus A350-900, Boeing 787-800, Airbus A330neo;
3. Airbus A321-100, Airbus A319, Boeing 737-800;
4. ATR 72, Bombardier Dash-8, Embraer E175.

L'Allegato B riporta un elenco degli aeromobili che operano più frequentemente negli aeroporti di tutto il mondo, indicando per ciascun velivolo il peso massimo al decollo (MTOW), la categoria ICAO e FAA di appartenenza e la classe EMAS assegnata in funzione del MTOW.

Le condizioni ambientali influiscono in maniera significativa sulla progettazione di un letto d'arresto e, sebbene la scelta della classe di EMAS sia basata sul gruppo di aeromobili critici di riferimento, tali aspetti devono necessariamente essere integrati nel progetto.

Nel caso di installazioni in prossimità del mare, ad esempio, la salsedine presente nell'aria, l'umidità elevata, il vento e la sabbia possono influire molto sulla durabilità dei materiali. In tal caso, dunque, si suggerisce di adottare trattamenti o selezionare materiali in grado

di minimizzare l'assorbimento d'acqua e l'azione del cloruro, garantendo così prestazioni e sicurezza durevoli nonostante le condizioni ambientali sfavorevoli.

In conclusione, la classificazione proposta definisce quattro classi di letti d'arresto EMAS e si propone di fungere da strumento per la scelta del letto d'arresto in base al MTOW del gruppo di aeromobili critici di riferimento, definito a seguito di un attento studio aeronautico.

Per ciascuna classe, il produttore potrà fissare i parametri progettuali principali, quali struttura, proprietà e spessore dei materiali e capacità di arresto, mentre alcune grandezze rimangono variabili da adattare alle esigenze operative specifiche di ciascun aeroporto.



# 8 | Livello di sicurezza di un EMAS

Un sistema d'arresto EMAS rappresenta una vera e propria sfida ingegneristica di elevata complessità, ponendosi di fronte come obiettivo principale la mitigazione del rischio e la massimizzazione della sicurezza operativa in caso di eventi di overrun.

La progettazione di un EMAS e delle aree aeroportuali limitrofe ha il compito di garantire che le conseguenze di una fuoriuscita di un aeromobile oltre il limite della pista siano minime, preservando l'integrità strutturale del velivolo e l'incolumità dei passeggeri e dei membri dell'equipaggio.

Ne consegue che la sicurezza operativa non deve essere considerata un valore aggiunto di tale sistema, bensì un criterio guida da integrare sin dalle prime fasi di pianificazione del progetto.

Nel presente Capitolo si indagherà a fondo sul significato che si cela dietro la parola "sicurezza", declinandola nelle sue componenti complementari: la sicurezza del velivolo e la sicurezza degli occupanti.

## 8.1. Il concetto di "sicurezza equivalente"

La correlazione tra un sistema d'arresto EMAS e l'area di sicurezza a fine pista (RESA) costituisce un tema di particolare rilevanza. Una delle questioni centrali riguarda in che modo un EMAS standard possa garantire un livello di sicurezza equivalente a quello fornito da una RESA realizzata secondo le dimensioni prescritte dagli standard normativi.

All'interno del *Doc 9157 - Aerodrome Design Manual* [79], l'ente internazionale ICAO evidenzia una difficoltà nell'esprimere un'equivalenza tra le prestazioni di una RESA e quelle di un sistema EMAS, come riportato di seguito:

*“Non è possibile stabilire un'equivalenza tra le prestazioni di una RESA e un EMAS, poiché uno si basa sulla distanza d'arresto, mentre l'altro sulla velocità.”*

Nonostante tale osservazione, sia la FAA sia l'EASA hanno adottato nei rispettivi testi normativi il concetto di "equivalenza", affermando che la condizione per installare un EMAS è che questo garantisca un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA (o RSA) standard.

Di seguito, si riporta quanto scritto dall'ente americano nell'*Advisory Circular 150/5300-13B*, nella sezione riguardante l'applicazione del sistema d'arresto:

*"Un EMAS standard fornisce un livello di sicurezza equivalente a quello fornito da una RSA completa che rispetti gli standard dimensionali del Capitolo 3, "Runway Design", dell'ultima versione dell'AC 150/5300-13, "Airport Design". Esso fornisce inoltre un livello di sicurezza accettabile in un evento di undershoot (garantendo una RSA minima di 600 piedi)." [66]*

Analogamente, l'EASA, all'interno del materiale di guida *GM1 ADR-DSN.C.210* del Capitolo C riguardante la RESA, afferma che i gestori aeroportuali dovrebbero cercare di ottimizzare la RESA tramite una combinazione di varie soluzioni, tra cui:

*"l'installazione di un sistema d'arresto, in accordo con la CS ADR-DSN.C.236 (EMAS), o di un'altra tipologia di sistema d'arresto adeguatamente posizionata e progettata, come supplemento o alternativa ad una RESA, laddove venga dimostrato un livello di sicurezza equivalente." [62]*

Entrambi gli enti, dunque, si discostano da quanto osservato dall'ente internazionale, riconoscendo la possibilità di eseguire un confronto tra i livelli di sicurezza forniti dal sistema d'arresto e da una RESA (o RSA) standard.

Inoltre, la FAA specifica che la presenza del letto d'arresto rappresenta una misura accettabile di sicurezza in caso di undershoot, poiché il limite minimo previsto per la RSA, pari a 600 piedi (circa 183 metri), garantisce prima dell'EMAS uno spazio pavimentato usufruibile da un velivolo, evitando che questo tocchi direttamente il letto d'arresto, evento che potrebbe dare origine a conseguenze critiche.

Infine, anche l'ente italiano ENAC, nelle *Linee guida per la progettazione, l'installazione e il collaudo dei letti di arresto (EMAS)*, conferma tale visione, affermando che i letti d'arresto possono essere installati:

*"Negli aeroporti che, per vincoli preesistenti o altro impedimento, non sono in grado di fornire una RESA standard (240 mt); in questi casi un letto di arresto potrebbe fornire lo stesso livello di sicurezza." [55]*

Pur non utilizzando esplicitamente il termine “equivalente”, l’ENAC ribadisce sostanzialmente il medesimo concetto espresso dalle normative FAA ed EASA.

Il livello di sicurezza fornito da un letto d’arresto è strettamente correlato alle conseguenze di un potenziale evento di overrun, con riferimento alla struttura del velivolo e ai suoi occupanti.

Tali conseguenze si manifestano principalmente attraverso le sollecitazioni subite dall’aeromobile durante il meccanismo d’arresto e le decelerazioni imposte agli occupanti.

La capacità di un EMAS di arrestare in sicurezza un velivolo al suo interno risulta particolarmente cruciale negli aeroporti in cui una fuoriuscita dalla RESA potrebbe comportare conseguenze catastrofiche.

Si pensi, ad esempio, a piste caratterizzate da una RESA limitata e dalla presenza di ostacoli naturali quali un dirupo o un bacino d’acqua immediatamente oltre il suo confine: in tali casi, la presenza di un EMAS risulterebbe determinante, riducendo drasticamente la probabilità che l’aeromobile superi l’area di sicurezza ed incontri l’ostacolo, con effetti potenzialmente molto dannosi tanto per la struttura del velivolo quanto per i suoi occupanti. Confrontando lo scenario in presenza di un EMAS con quello in sua assenza, emerge chiaramente come il sistema d’arresto riduca notevolmente il rischio legato ad un evento di overrun, fornendo un livello di sicurezza che, almeno a livello concettuale, sembrerebbe equivalente, o perlomeno comparabile, a quello di una RESA standard, la quale offrirebbe uno spazio sufficiente per contenere il velivolo prima dell’ostacolo.

Nei paragrafi seguenti si tratterà di alcuni modelli sviluppati per determinare il livello di sicurezza garantito da un EMAS. Successivamente, si discuterà in maniera separata della sicurezza del velivolo e di quella degli occupanti, indagando sull’esistenza di valori limite di decelerazione applicabili a un sistema d’arresto EMAS, al fine di evitare che ci siano gravi danni alla struttura e lesioni a passeggeri e membri dell’equipaggio.

### 8.1.1. Modelli di valutazione del livello di sicurezza

Come anticipato nel paragrafo precedente, il livello di sicurezza fornito da un sistema d’arresto EMAS durante un evento di overrun è strettamente correlato agli effetti indotti dal meccanismo d’arresto sulla struttura dell’aeromobile e sui suoi occupanti.

Le conseguenze che derivano da un evento di questo tipo sono legate in particolar modo alla posizione finale e all’ambiente in cui il velivolo si arresta. Infatti, la presenza di ostacoli potrebbe risultare in seri danni al velivolo e quindi agli occupanti.

In letteratura vengono presentati alcuni modelli e software di valutazione che permettono di stimare il livello di sicurezza di situazioni specifiche.

Il primo modello presentato è quello proposto dal Report 3 dell'ACRP, intitolato *Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas*. [40]

L'obiettivo del Report è lo sviluppo di un approccio per la valutazione del rischio negli eventi di overrun e undershoot e di un modello di rischio, basato su dati storici e risultati scientifici. Tale modello è fondato su un approccio probabilistico per restituire il livello di rischio di scenari specifici. Per tale motivo, può essere utilizzato anche nella valutazione delle alternative progettuali ad una RESA, laddove vincoli di varia natura impediscano di realizzarla secondo i requisiti standard.

La struttura è composta da tre sotto-modelli che stimano:

1. la probabilità dell'evento, dipendente da condizioni operative quali le condizioni atmosferiche, le prestazioni dell'aeromobile e le caratteristiche dell'aeroporto;
2. la probabilità della posizione finale, funzione delle condizioni operative e della tipologia di terreno in cui avviene l'incidente;
3. le conseguenze dell'incidente, derivanti dalla posizione finale, dalla natura e dalle dimensioni degli ostacoli eventualmente presenti e dalle caratteristiche del velivolo.

Unendo questi tre elementi, il modello è in grado di restituire un valore di rischio grazie al quale è possibile confrontare scenari diversi.

I tre sotto modelli sono stati sviluppati a loro volta a partire da dati storici, come il numero di movimenti nell'aeroporto di riferimento in uno specifico lasso di tempo.

Tale modello è stato successivamente aggiornato. Pertanto, per descrivere in maniera più completa l'approccio adottato, è opportuno fare riferimento al modello evoluto, proposto dal Report 50 dell'ACRP, intitolato *Improved Models for Risk Assessment of Runway Safety Areas*. [42]

La struttura base del nuovo modello di rischio risulta la stessa adottata nel primo modello, come dimostrato dalla seguente figura:

A differenza del primo modello, nella versione evoluta si considerano cinque diversi modelli specifici per ogni tipologia di evento, ovvero overrun in atterraggio o in decollo, undershoot in atterraggio e veer-off in atterraggio o in decollo.

L'obiettivo del Report 50 è lo sviluppo di un software utilizzabile come strumento di valutazione, in grado di simulare anche scenari in presenza di un letto d'arresto EMAS, assente nel modello originario del Report 3.

Riferendosi a dati storici risalenti ad un arco di tempo di 27 anni, il modello di probabilità di accadimento dell'evento è stato calibrato tramite una regressione logistica all'indietro,

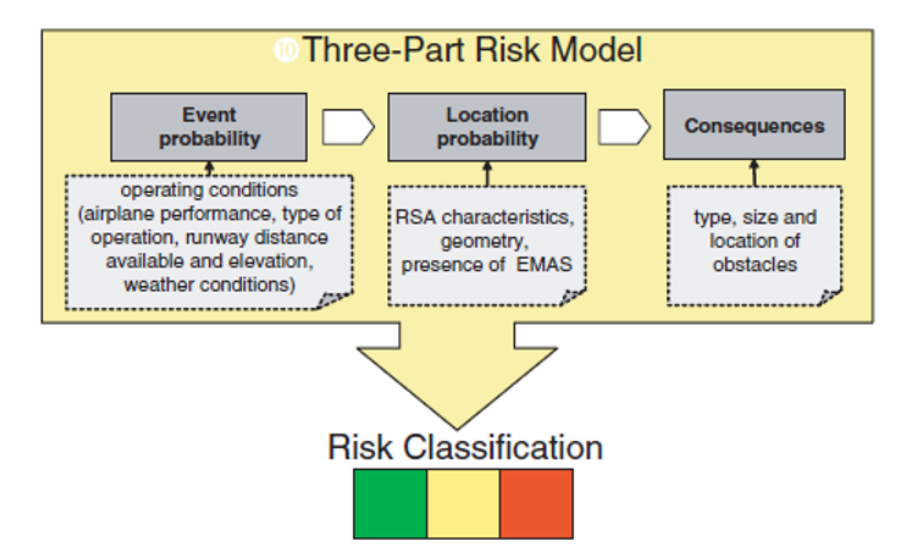


Figura 8.1: Struttura del modello di rischio (ACRP Report 50, Figura 15)

con la quale la probabilità viene calcolata come segue:

$$P(\text{Accident\_Occurrence}) = \frac{1}{1 + e^{b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots}} \quad (8.1)$$

La probabilità di accadimento viene espressa in percentuale; le variabili  $x_i$  sono variabili indipendenti che rappresentano le condizioni operative in cui avviene l'evento (tipologia di aereo, visibilità, vento, precipitazioni, ecc.) e assumono valori tabulati, stabiliti a seguito di un'attenta calibrazione a partire dai dati storici; i coefficienti  $b_i$  sono coefficienti di regressione, anch'essi tabulati.

L'evoluzione del modello rispetto a quello precedente risiede nella considerazione di più parametri che influenzano l'incidente, come la presenza di vento contrario (*headwind*) o di vento a favore (*tailwind*).

La probabilità della posizione finale d'arresto, invece, viene definita lungo l'asse longitudinale di pista (coordinata X) e lungo l'asse perpendicolare a quest'ultimo (coordinata Y), ponendo come origine del sistema di riferimento un punto variabile a seconda dell'evento considerato:

$$P\{\text{Location} > x\} = e^{-ax^n} \quad (8.2)$$

$$P\{\text{Location} > y\} = e^{-by^m} \quad (8.3)$$

I parametri  $a$ ,  $b$ ,  $n$  e  $m$  sono coefficienti di regressione i cui valori sono tabulati in funzione della tipologia di evento in esame.

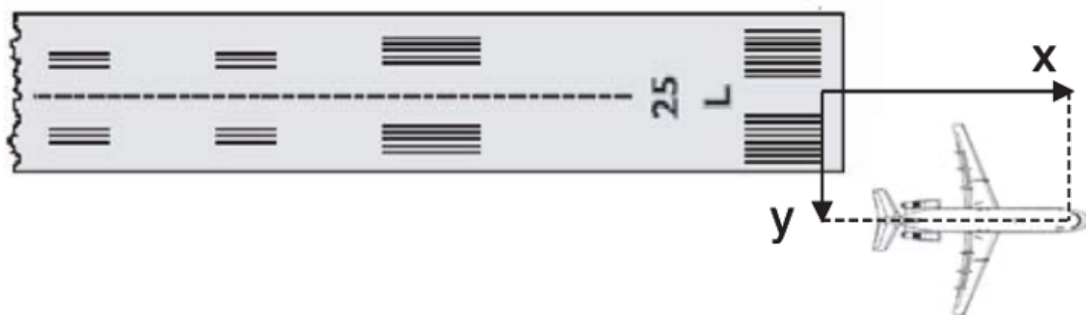


Figura 8.2: Sistema di riferimento per eventi di overrun (ACRP Report 50, Figura 17)

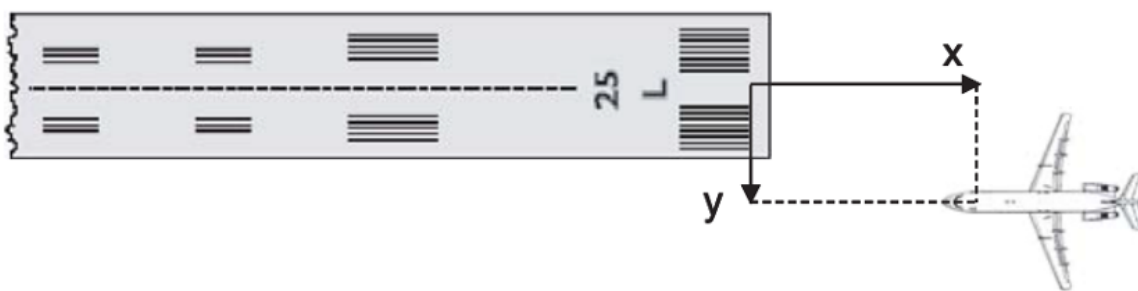


Figura 8.3: Sistema di riferimento per eventi di undershoot (ACRP Report 50, Figura 18)

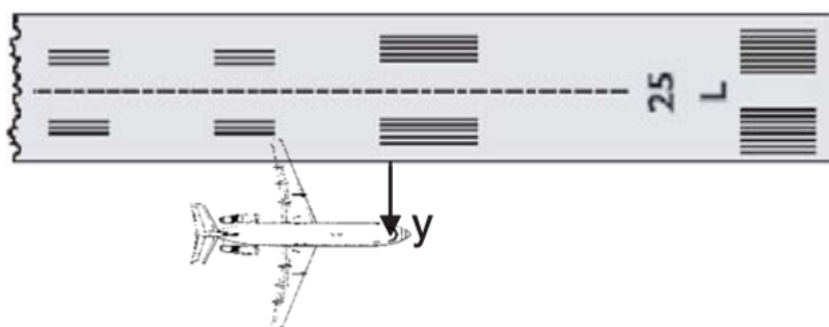


Figura 8.4: Sistema di riferimento per eventi di veer-off (ACRP Report 50, Figura 19)

Il terzo e ultimo sotto modello sfrutta quello di probabilità di posizione finale d'arresto per poter stimare le conseguenze dell'evento, sulla base di informazioni riguardanti le dimensioni e la velocità dell'aeromobile e la tipologia, le dimensioni, il numero e la posizione degli ostacoli presenti.

Poste le condizioni operative e la distanza longitudinale  $D_0$  dell'ostacolo rispetto al fine

pista, viene costruito un grafico che rappresenta la probabilità dell'aeromobile di colpire l'ostacolo e, eventualmente, le possibili conseguenze che derivano dall'energia di impatto e quindi dalla velocità dell'aeromobile.

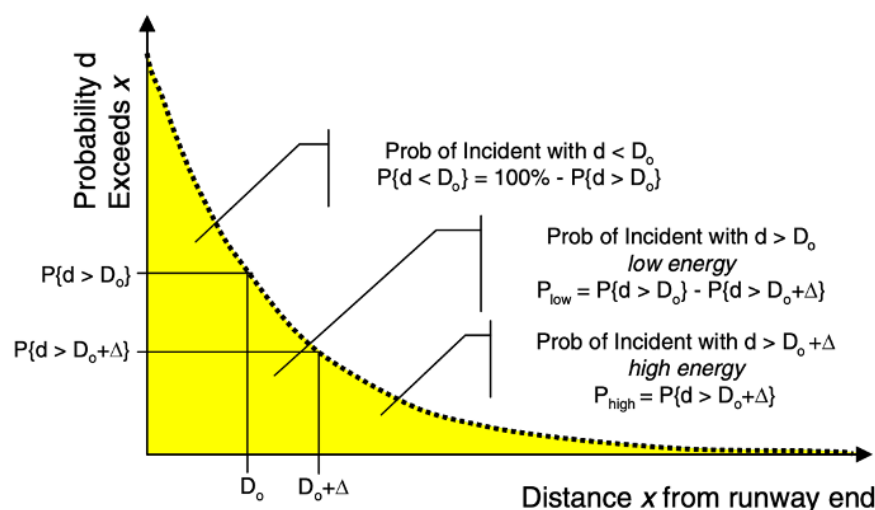


Figura 8.5: Modello delle conseguenze (ACRP Report 50, Figura 30)

Nel grafico sono evidenziabili tre diverse zone:

1. **Zona tra l'origine e  $D_0$ :** in questa zona l'overrun si arresta ad una distanza  $x$  inferiore a  $D_0$ ; l'ostacolo non viene quindi colpito e le conseguenze sono nulle o trascurabili.
2. **Zona tra  $D_0$  e  $D_0 + \Delta$ :** qui la posizione finale di arresto  $x$  è maggiore di quella dell'ostacolo. L'aeromobile colpisce l'ostacolo, ma con velocità ed energia ridotte, provocando danni lievi al velivolo e lesioni minori agli occupanti. Il valore di  $\Delta$  dipende dall'accelerazione del velivolo su differenti tipologie di superficie e dai requisiti di crashworthiness del velivolo.
3. **Zona oltre  $D_0 + \Delta$ :** in questa zona l'aereo colpisce l'ostacolo a velocità ed energia elevate, con gravi conseguenze per la struttura del velivolo e per gli occupanti.

Il modello così costruito può essere applicato anche in presenza di un EMAS. In tal caso, la simulazione viene eseguita allo stesso modo considerando una RSA di lunghezza tale da rappresentare in maniera equivalente gli effetti che si avrebbero in presenza di un EMAS. Per fare ciò, è necessario normalizzare la lunghezza del letto d'arresto a una distanza di RSA convenzionale equivalente, correggendola tramite il fattore RLF (*Runway Length Factor*) che tiene conto del rapporto tra l'accelerazione all'interno di un EMAS e quella in una RSA.

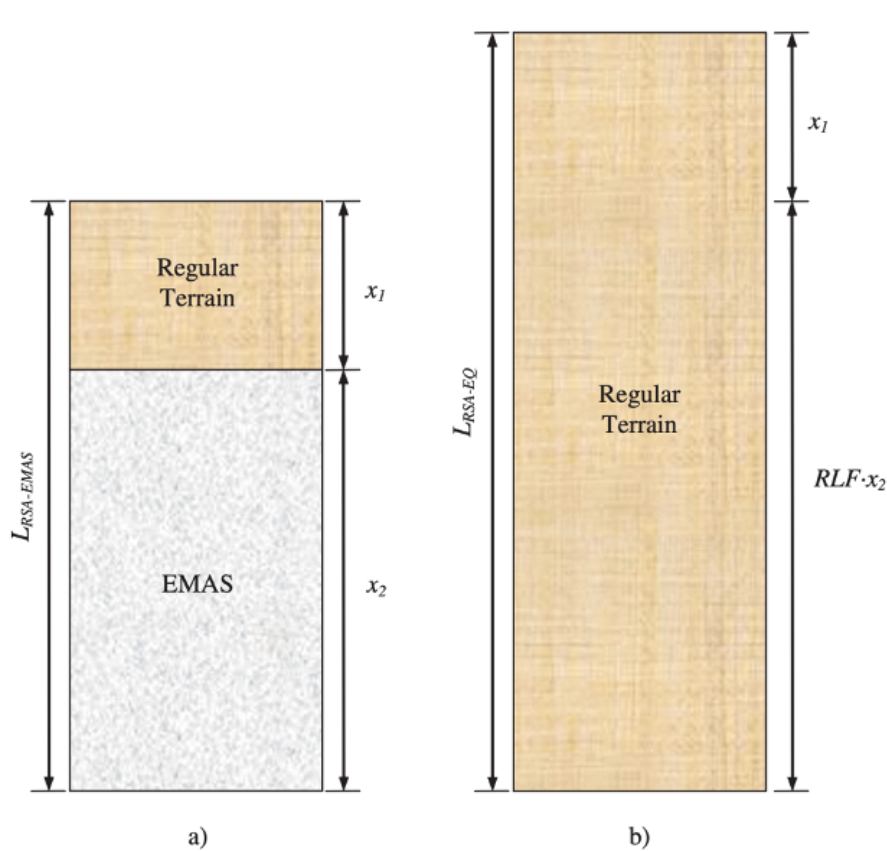


Figura 8.6: a) RSA con EMAS, b) RSA equivalente convenzionale (ACRP Report 50, Figura E1)

In conclusione, viene presentato in breve il modello di rischio proposto dalla ricerca condotta nel 2011 dall'EASA, denominata *Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas (RESA)*. [61]

Il modello ha una struttura analoga a quella esaminata in precedenza. Ai fini della presente trattazione, si fa riferimento alla sua applicazione a casi reali.

A tal proposito, un concetto centrale è quello del *Target Level of Safety (TLS)*, definito come un livello di rischio quantificato in termini probabilistici, solitamente espresso come tasso di incidenti. Il TLS rappresenta la soglia di probabilità al di sopra della quale un determinato evento, caratterizzato da una certa probabilità di accadimento e da specifiche conseguenze, non viene ritenuto accettabile dalla società.

Il valore di tali soglie è solitamente definito da enti regolatori che vogliono garantire un livello di sicurezza minimo.

L'ICAO, ad esempio, ha adottato un TLS di carattere generale pari a  $6,6 \times 10^{-7}$ , senza tuttavia fare riferimento alle conseguenze dell'evento. Ciò significa che un evento viene considerato accettabile qualora presenti una probabilità di accadimento pari a 6,6 casi

ogni milione di voli.

All'interno del modello dell'EASA, il TLS viene utilizzato come parametro di confronto per verificare l'accettabilità di uno specifico scenario incidentale. Ad esempio, esso viene confrontato con la probabilità di fuoriuscita di un aeromobile dalla RESA, conoscendo le sue caratteristiche e le dimensioni dell'area di sicurezza. Nel caso in cui il TLS risulti inferiore rispetto alla probabilità di fuoriuscita dall'area di sicurezza, sono necessari degli interventi progettuali.

Il TLS può dunque essere utilizzato anche nella valutazione del livello di sicurezza in presenza di un sistema d'arresto EMAS, verificando che la probabilità di fuoriuscita dalla RESA in presenza del letto risulti minore della soglia predefinita.

Il documento afferma che, se applicato ad aeromobili Large e a piste strumentali, il valore di TLS più ragionevole risulta pari a  $1 \times 6,6 \times 10^{-7}$ . Tale diminuzione rispetto al valore di TLS proposto dall'ICAO è legata al fatto che quest'ultimo non tiene conto delle possibili conseguenze derivanti da un evento incidentale.

Nel caso di aerei più piccoli o di piste non strumentali il valore di TLS assume un valore maggiore, dal momento che, ad esempio, il livello di sicurezza per i velivoli di taglia minore in una pista strumentale è minore.

In sintesi, i tre modelli analizzati mirano alla definizione del livello di sicurezza associato a vari scenari operativi. Essi possono pertanto essere adottati per valutare la sicurezza offerta da un determinato sistema d'arresto EMAS, verificando che risulti equivalente a quella garantita da una RESA conforme agli standard dimensionali.

## 8.2. Sicurezza del velivolo

Una delle due declinazioni fondamentali della sicurezza offerta da un sistema d'arresto EMAS è rappresentata dalla sicurezza del velivolo.

Secondo le normative vigenti, la forza decelerante (*drag load*) imposta sui carrelli dell'aeromobile durante il meccanismo d'arresto deve essere in grado di diminuire gradualmente la velocità del mezzo fino al suo arresto in sicurezza, senza però generare danni strutturali, come ad esempio il collasso di entrambi i carrelli.

Lo scopo del presente paragrafo è indagare i possibili danni subiti dall'aeromobile prima e durante l'arresto nell'EMAS, con particolare riferimento alle componenti maggiormente esposte al danneggiamento. In relazione ad ognuno di questi danni, si analizzano i limiti progettuali imposti dalle aziende produttrici e dagli enti normativi. Tali limiti verranno successivamente integrati con i limiti di tolleranza umana, per capire se sia possibile

determinare un unico limite di decelerazione che può essere imposta da un EMAS su un aeromobile, in ordine da evitare danni alla struttura e agli occupanti.

### 8.2.1. Collasso del carrello di atterraggio

Tutte le normative vigenti si trovano d'accordo con il significato che si cela dietro la parola "sicurezza". Si riportano le parole dell'EASA all'interno della *CS ADR-DSN.C.236*, in cui l'agenzia europea afferma che un EMAS dovrebbe:

*“decelerare un aeromobile in fuoriuscita dalla pista esercitando sul carrello di atterraggio delle forze, senza causare danni strutturali maggiori all'aeromobile ed evitando lesioni sugli occupanti;”* [62]

Come si evince da tali parole, durante il meccanismo di arresto le sollecitazioni indotte dal sistema EMAS vengono trasmesse alla struttura dell'aeromobile principalmente attraverso il contatto con il carrello. Di conseguenza, il rischio più significativo durante la decelerazione è rappresentato dal collasso del carrello di atterraggio, una condizione critica che potrebbe condurre alla perdita di controllo del velivolo e compromettere l'intera integrità strutturale della cellula.

Pertanto, questo rappresenta l'evento primario da tenere in considerazione nella progettazione di un sistema d'arresto, risultando sia il più rilevante dal punto di vista ingegneristico sia il più probabile tra gli scenari di danno che possono manifestarsi durante l'interazione aeromobile – EMAS.

Le forze che nascono all'interfaccia tra pneumatici e superficie del letto d'arresto sono strettamente correlate alla decelerazione imposta dall'EMAS. Pertanto, è fondamentale individuare e analizzare i limiti di decelerazione entro i quali è possibile escludere il collasso del carrello e altri danni significativi alla struttura dell'aeromobile.

In generale, non esiste un limite di decelerazione unico e universale entro il quale si possa impedire tale evento. Infatti, i regolamenti non impongono una decelerazione massima specifica, bensì si occupano di normare le condizioni di carico che un aeromobile e i suoi componenti devono garantire durante un atterraggio normale o di emergenza, considerando varie modalità di contatto con la pista.

Alla luce di queste considerazioni, il Report 29 dell'ACRP del 2009 risulta un riferimento utile. Il programma infatti raccoglie i risultati ottenuti da prove sperimentali, rapporti di ricerca e prove d'impatto (*crash test*) eseguite su scala reale con sezioni di fusoliera, presentando delle soglie indicative di decelerazione, rappresentative di varie tipologie di velivoli. [41]

Event/Criteria		Deceleration
Nose Gear Rearward Failure		0.23 g
Main-Gear Rearward Failure		1.13 g
Combined Main- and Nose-Gear Rearward Failure		1.36 g
Traumatic Brain Injury (TBI) Threshold	Long duration (typical arrest)	4.00 g
	Short duration (<1 sec)	9.00 g
<i>Typical EMAS Deceleration (Section 5.2.1)</i>		<i>~ 0.35 to 0.85 g</i>

Figura 8.7: Soglie di decelerazione per danni all'aeromobile e lesioni degli occupanti (ACRP Report 29, Tabella 4-1) [41]

Secondo tali studi, il collasso del carrello anteriore di un aeromobile si verifica con una decelerazione di 0,23 g, mentre il collasso del carrello principale si verifica intorno a 1,13 g, con g pari all'accelerazione di gravità ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Si osserva che il limite di decelerazione per il carrello anteriore risulta nettamente inferiore, dal momento che questo ha dimensioni minori ed è meno sollecitato rispetto a quello principale.

Tuttavia, tali valori rappresentano delle condizioni irrealistiche poiché assumono che i carrelli siano sollecitati separatamente. Nella realtà, infatti, durante l'atterraggio entrambi i carrelli sono simultaneamente sottoposti a forze deceleranti. Per tale motivo, si assume un limite di decelerazione combinato pari a 1,36 g, corrispondente allo scenario peggiore in cui avviene il collasso di entrambi i carrelli. Tale limite corrisponde alla somma dei singoli limiti dei due carrelli, riflettendo una distribuzione uniforme dei carichi tra i due carrelli e supponendo che ciascuno di essi raggiunga il proprio limite di tolleranza.

In generale, dal momento che il collasso del carrello di atterraggio costituisce il rischio principale per un aeromobile in un EMAS, la progettazione del letto è sempre stata limitata ai carichi massimi sopportabili dal carrello anteriore, più sensibile di quello principale. Considerando i limiti di tolleranza umana ed i limiti di carico del carrello anteriore, generalmente gli EMAS impongono decelerazioni comprese tra 0,35 e 0,85 g.

Tuttavia, il Report spiega che il collasso del carrello anteriore, come osservato in alcuni test eseguiti su sistemi EMAS, comporterebbe lesioni minime per gli occupanti. Pertanto, in alcuni casi è possibile ammettere decelerazioni limite maggiori, permettendo la realizzazione di letti d'arresto più performanti, ovvero capaci di imporre forze di decelerazione maggiori, riducendo le distanze d'arresto e quindi la lunghezza e il costo del letto stesso.

Le condizioni di carico definite dalle normative mirano a garantire che il carrello e dunque

l'intera struttura del velivolo mantenga la sua integrità sia durante un atterraggio normale sia in caso di atterraggio difficile o di emergenza.

L'EASA, ad esempio, regola le condizioni di carico in atterraggio all'interno del *Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25* [60]. La *CS 25.473 Landing load conditions and assumptions* specifica che i metodi di analisi di un velivolo e dei carichi sul carrello d'atterraggio devono tener conto delle caratteristiche dinamiche del carrello, della risposta del corpo rigido, dei fenomeni di spin-up e spring back e della risposta strutturale della cellula.

Nel caso di un atterraggio con azionamento dei freni si fa riferimento alla *CS 25.493 Braked roll conditions*: il velivolo deve essere progettato assumendo un fattore per il limite di carico verticale pari a 1,2 al peso di atterraggio di progetto e una forza orizzontale (*drag load*) pari alla reazione verticale moltiplicata per il coefficiente di attrito di 0,8, applicata nel punto di contatto tra la ruota e i freni.

Inoltre, è prevista la valutazione del movimento dinamico di beccheggio causato dall'applicazione improvvisa della massima frenatura.

In generale, le caratteristiche dinamiche del carrello di atterraggio, secondo la *CS 25.723 Shock absorption tests*, devono essere definite tramite delle prove di assorbimento di energia, in cui il carrello deve essere in grado di assorbire energia senza crollare a una velocità di discesa di 3,7 m/s (12 fps) al peso di progetto all'atterraggio, assumendo una portanza non superiore al peso dell'aeromobile.

In sintesi, non esistono limiti di decelerazione universali entro i quali è possibile evitare il collasso del carrello. Le normative sanciscono le condizioni di carico con cui progettare e certificare un velivolo e dunque esistono limiti di carico propri per ogni tipologia di aeromobile.

Per tale motivo, nella progettazione di un EMAS è sempre necessario confrontare i carichi sul carrello dell'aeromobile di progetto con quelli massimi applicabili, al fine di prevenirne il collasso durante il meccanismo d'arresto.

### 8.2.2. Ulteriori danni del velivolo

Il collasso del carrello di atterraggio non costituisce l'unico tipo di danno che può verificarsi prima e durante l'ingresso di un aeromobile in un sistema d'arresto. Esistono infatti molte altre possibili tipologie di danneggiamento che devono essere prevenute per garantire il rispetto dei requisiti di sicurezza sanciti dalle normative vigenti.

Una frenata di emergenza prima dell'ingresso nell'EMAS o una decelerazione troppo brusca all'interno del letto possono provocare gravi danni meccanici e strutturali, come ad

esempio il distacco di una ruota dal carrello, un incendio al sistema frenante e la perdita di carburante durante la corsa.

Di seguito si analizzeranno i principali tipi di danneggiamento che possono verificarsi, con particolare attenzione all'esistenza, anche in tali casi, di limiti normativi di carico e decelerazione.

### 1. Scoppio di uno pneumatico e rottura della ruota

Un valore eccessivo di decelerazione, raggiungibile durante l'atterraggio o nei decolli interrotti, può creare delle condizioni estreme che conducono allo scoppio dello pneumatico. In realtà, la decelerazione in sé non è la causa primaria dello scoppio, ma agisce come innesco di effetti fisici che lo provocano, tra cui:

- **surriscaldamento dei freni:** il calore viene trasferito agli pneumatici, innalzando la loro pressione interna e dunque aumentando il rischio di scoppio;
- **stress meccanico eccessivo:** la combinazione di decelerazione brusca, carichi sugli pneumatici e velocità elevata può comportare sollecitazioni eccessive che provocano lo scoppio.

Per prevenire tale fenomeno, la *CS 25.731 Wheels* specifica che ogni ruota deve essere dotata di dispositivi che, controllando il livello di pressione all'interno dello pneumatico, ne prevengono lo scoppio e quindi la rottura della ruota. Un esempio di dispositivo è rappresentato dai tappi fusibili, valvole termosensibili che si fondono quando la temperatura interna nella ruota raggiunge un determinato limite e rilasciano così gradualmente la pressione nell'aria, evitando di conseguenza lo scoppio dovuto al surriscaldamento.

L'EASA aggiunge che pneumatici e ruote devono essere progettati per resistere ai carichi derivanti dalla combinazione più critica di peso e baricentro dell'aeromobile. Tuttavia, anche in tal caso non vengono esplicitati dei valori limite di carico per ruote e pneumatici, poiché la normativa si limita a stabilire le condizioni di carico con cui queste componenti devono essere progettate e certificate.

### 2. Danni all'apparato frenante

Un eventuale danneggiamento dei freni è un evento che viene sempre tenuto in considerazione nella progettazione di un EMAS. Le normative, infatti, suggeriscono di progettare il sistema d'arresto considerando lo scenario di progetto più critico, corrispondente ad un

aeromobile in ingresso senza che i freni siano stati azionati dal pilota, come a seguito di un decollo interrotto per guasto all'apparato frenante.

Nonostante un danno di questo tipo possa compromettere la capacità dell'aeromobile di arrestarsi entro i limiti della pista, la frenatura rimane comunque possibile, seppur in minor misura, grazie ad altre componenti come gli inversori di spinta. Il rischio maggiore derivante da un guasto all'apparato frenante, tuttavia, è il surriscaldamento dei freni che può innescare un incendio.

Il rischio di surriscaldamento dei freni è elevato quando l'energia assorbita durante la frenatura risulta maggiore o uguale di un limite specifico per ogni aeromobile, denominato *Maximum Energy Braking*. Tale parametro rappresenta l'energia cinetica massima che l'aeromobile è capace di assorbire durante una frenata ed il suo valore viene definito durante la fase di certificazione del velivolo. Come specificato in un documento dell'azienda produttrice Airbus [38], tale valore viene stabilito a seguito di una prova di arresto dell'aeromobile testato in uno scenario di decollo abortito: il velivolo, caricato al suo massimo peso al decollo, raggiunge una velocità corrispondente alla sua massima energia certificata ed in seguito viene fatto frenare applicando la massima forza frenante fino all'arresto.

In ogni caso, come specificato dalla *CS 25.735 Brakes and braking systems*, ogni ruota frenante deve essere dotata di dispositivi che prevengono il surriscaldamento della ruota e quindi diminuiscono il rischio di incendio.

### 3. Perdita di carburante

La perdita di carburante costituisce un fenomeno ad alto rischio, che può verificarsi prima o durante l'ingresso dell'aeromobile nel sistema d'arresto. Il pericolo principale risiede nell'alto rischio di incendio e, inoltre, lo sversamento di carburante potrebbe creare problemi ai materiali del letto d'arresto, nonostante essi vengano selezionati tenendo conto di eventi di questo tipo.

La perdita di carburante può essere causata da deformazioni o rotture dei serbatoi e dei loro tubi, dal danneggiamento dei portelloni di rifornimento o da malfunzionamenti delle valvole di controllo del carburante.

Dato l'elevato rischio associato al fenomeno, tutte le varie componenti di un aeromobile vengono progettate per prevenire sversamenti di carburante che possano innescare un incendio. Ad esempio, la *CS 25.735 Brakes and braking systems* specifica che l'apparato frenante deve essere dimensionato in modo tale che, in caso di guasto, non si verifichino sversamenti di fluido idraulico che possano provocare un incendio, sia in volo sia a terra.

In generale, una brusca decelerazione non costituisce di per sé la causa diretta della perdita di carburante, bensì può generare danni a componenti strutturali che ne determinano la fuoriuscita. In particolare, le componenti più critiche sono i serbatoi e le ali.

La *CS 25.963 Fuel tanks: general* indica che i serbatoi di carburante sono progettati per resistere a determinate sollecitazioni, dovute sia ad impatti esterni sia a pressioni interne al serbatoio. Tutti i coperchi situati in luoghi esposti alla possibilità di urto con altri oggetti devono essere dimensionati per ridurre la probabilità di penetrazione e deformazione delle superfici. I serbatoi devono essere progettati per resistere alle pressioni più critiche, come quelle che scaturiscono dal limite di accelerazione dell'aeromobile supposto a serbatoio pieno.

#### 4. Deformazione dei portelloni

Una possibile deformazione della fusoliera potrebbe comportare una difficoltà nell'apertura del portellone di emergenza, con conseguenti criticità nell'evacuazione dei passeggeri a seguito dell'incidente.

Infatti, le forze generate da una decelerazione brusca possono causare sollecitazioni strutturali significative sulla fusoliera e sui portelloni, portando a deformazioni che ne compromettono la funzionalità.

Si riporta un passo della *CS 25.783 Doors*, applicabile a tutte le porte e portelloni apribili di un aeromobile: *“Ogni porta esterna deve essere ragionevolmente esente da inceppamenti dovuti alla deformazione della fusoliera in caso di incidente di lieve entità.”* Dal momento che un'eventuale deformazione della fusoliera indotta dalla decelerazione può essere considerata di entità limitata, la normativa risulta applicabile al caso in esame. Per tale motivo, non dovrebbe sussistere il rischio che i portelloni di emergenza non possano essere aperti per consentire l'evacuazione degli occupanti dell'aeromobile, anche in presenza di un lieve danno della fusoliera.

Inoltre, i portelloni devono essere sottoposti a test di carico statico e aerodinamico, simulando varie combinazioni di carico, e a test di pressurizzazione, per verificare che essi resistano senza deformazioni plastiche a cambiamenti anche bruschi della differenza di pressione tra interno ed esterno del velivolo.

In conclusione, dalla lettura delle normative emerge che non esistono limiti di decelerazioni specifici per prevenire i danneggiamenti delle componenti di un aeromobile, bensì vengono definite le condizioni di carico che tali componenti devono soddisfare per garantire un adeguato livello di sicurezza.

Pertanto, per ottimizzare la sicurezza durante la progettazione di un sistema d'arresto EMAS, si consiglia di tenere sempre in considerazione i limiti di carico specifici delle componenti più critiche dell'aeromobile, in particolare quelli relativi al carrello di atterraggio, primo e unico elemento che riceve direttamente la forza decelerante trasferita dal letto d'arresto e, dunque, il più esposto al danneggiamento.

### 8.3. Sicurezza degli occupanti

Il secondo aspetto complementare che merita particolare attenzione riguarda il livello di sicurezza offerto agli occupanti di un aeromobile, siano essi passeggeri o membri dell'equipaggio.

In generale, sia nelle normali fasi di frenata sia durante il meccanismo di arresto innescato nel sistema EMAS, la decelerazione sull'aeromobile viene trasferita ai suoi occupanti, i quali dunque vengono sottoposti a sollecitazioni di varia natura. Per garantire la loro sicurezza, è di fondamentale importanza verificare che tali sollecitazioni rispettino le soglie di tolleranza fisiologica umana, in modo tale da prevenire lesioni anche di minore entità.

Oltre ad un'importanza di tipo operativo, la sicurezza degli occupanti riveste un ruolo significativo anche sotto un aspetto economico. Infatti, in caso di incidente, il gestore aeroportuale o i soggetti responsabili sono tenuti a sostenere le spese relative al risarcimento dei danni subiti ad ogni singolo occupante, in funzione della tipologia di lesione. Per tale motivo, come verrà analizzato nel dettaglio nel Capitolo 10, nella stima del costo di vita utile di un EMAS occorre tenere in considerazione anche le spese correlate alle lesioni subite dagli occupanti in un eventuale incidente all'interno del letto.

A titolo esemplificativo, si fa riferimento alla Sezione 2 del documento FAA *Economic values for FAA investment and regulatory decisions* [99] riguardo la stima del valore della vita e delle lesioni durante un'analisi economica. La FAA adotta la scala AIS (*Abbreviated Injury Scale*), un codice numerico utilizzato in medicina legale per quantificare l'entità delle lesioni in base alla loro gravità. Nel documento, la FAA associa ad ogni categoria AIS un costo medio per il risarcimento delle lesioni subite dall'occupante, espresso in dollari statunitensi del 2023:

AIS	Gravità della lesione	Descrizione	Valore
1	Minore	Graffi o tagli superficiali; distorsione di un dito; ustione di primo grado; trauma alla testa con mal di testa o vertigini, senza altri segni neurologici evidenti.	\$39.600
2	Moderata	Graffi o tagli maggiori; concussione cerebrale (incoscienza per meno di 15 minuti); amputazione di un dito; frattura pelvica.	\$620.400
3	Seria	Lacerazione maggiore dei nervi; frattura multipla delle costole; contusione addominale; amputazione di una mano, un piede o un braccio.	\$1.386.000
4	Severa	Rottura della milza; schiacciamento della gamba; perforazione della parete toracica; commozione cerebrale con altri sintomi, come perdita di coscienza per meno di 24 ore.	\$3.511.200
5	Critica	Lesione del midollo spinale con sezionamento completo; ustioni di secondo o terzo grado; commozione cerebrale con sintomi gravi, come perdita di coscienza per più di 24 ore.	\$8.827.600
6	Fatale	Lesioni che, pur non causando la morte nei primi 30 giorni dopo l'incidente, portano comunque al decesso in seguito.	\$13.200.000

Tabella 8.1: Costo delle lesioni per categoria AIS (Economic values for FAA investment and regulatory decisions, FAA)

### 8.3.1. Certificazione del sedile e dei sistemi di ritenuta

Il sedile e i sistemi di ritenuta costituiscono la primaria misura di mitigazione del rischio per gli occupanti. Le sollecitazioni generate durante le diverse fasi di volo e di rullaggio vengono infatti trasferite all'individuo attraverso tali dispositivi, che svolgono quindi il ruolo di interfaccia tra l'occupante e le forze agenti direttamente sulla struttura del velivolo. Di conseguenza, è necessario analizzare i requisiti progettuali richiesti dalle normative vigenti per la loro progettazione e certificazione.

A tale scopo, si fa di nuovo riferimento alla *Certification Specifications for Large Aeroplanes CS- 25* dell'agenzia europea EASA, in particolare alla *CS 25.562 Emergency landing dynamic conditions* [60]. Questa norma si riferisce alla progettazione di sedili e sistemi di ritenuta per garantire la sicurezza dell'occupante durante un atterraggio d'emergenza, a condizione che ne venga fatto un utilizzo corretto.

Ogni sedile deve essere certificato ed approvato tramite dei test dinamici, che prevedono l'utilizzo di un manichino di 77 kg seduto normalmente in posizione eretta su un sedile di prova. Nella prova viene simulato un aeromobile con asse longitudinale orizzontale e imbardata di 10 gradi a destra o a sinistra, secondo la condizione più sfavorevole, sottoposto ad una variazione di velocità longitudinale in avanti non inferiore a 13,4 m/s e ad un picco di decelerazione al pavimento pari ad almeno 16 g, raggiunto entro 0,09 secondi. Per ottenere la certificazione, devono essere soddisfatti alcuni parametri prestazionali per garantire la sicurezza dell'occupante durante l'atterraggio di emergenza:

- i carichi di tensione nelle cinghie per la parte superiore del busto non devono eccedere 794 kg se singole, 907 kg se doppie;
- il carico massimo di compressione misurato tra il bacino e la colonna lombare non deve superare i 680 kg;
- durante l'impatto, le cinghie per la parte superiore del busto devono rimanere sulla spalla del manichino e la cintura di sicurezza addominale sul bacino;
- ogni occupante deve essere protetto da lesioni alla testa, per cui si richiede un HIC minore di 1000;
- i carichi assiali di compressione non devono eccedere i 1021 kg per ogni femore;
- il sedile deve rimanere fissato in tutti i punti di ancoraggio, anche se la struttura cede.

Il parametro HIC (*Head Injury Criterion*), è una misura della probabilità di lesione alla

testa a seguito di un impatto. Esso si calcola come segue:

$$\text{HIC} = \max_{t_1, t_2} \left[ (t_2 - t_1) \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \right] \quad (8.4)$$

dove  $t_1$  e  $t_2$  sono gli estremi dell'intervallo di integrazione e  $a(t)$  è l'accelerazione nel tempo, misurata tramite un accelerometro posizionato nel baricentro della testa del manichino. Ad un HIC pari a 1000 corrisponde una probabilità del 18 % di lesioni severe alla testa, del 55 % di lesioni serie e del 9 % di lesioni moderate, considerando un occupante adulto medio.

Questo è un parametro molto utilizzato per valutare la sicurezza di un occupante in un veicolo, per dispositivi di protezione individuale e per attrezzature sportive. [20]

Da tali requisiti di certificazione, dunque, si ricava che il sedile è progettato per resistere a decelerazioni di almeno 16 g, proteggendo il passeggero e garantendo l'integrità strutturale dei vari sistemi di ritenuta. Tuttavia, tale valore di decelerazione non rappresenta la decelerazione direttamente imposta sull'occupante, in quanto questo viene protetto dai sistemi di ritenuta che dunque ne contengono l'effetto diretto deformandosi in maniera controllata.

### 8.3.2. Soglie di decelerazione

Negli anni sono stati condotti vari studi che si sono posti come obiettivo principale quello di definire delle soglie di decelerazione ammissibili per il velivolo, al di sotto delle quali si potessero garantire il comfort e l'incolumità di passeggeri e membri dell'equipaggio.

Il primo di questi studi fu condotto nel 1974 dalla NASA ed i risultati vennero riportati nel documento intitolato *Simulation of decelerating landing approaches on an externally blown flap STOL transport airplane* [100]. Nonostante questa prova sia stata effettuata su velivoli STOL a decollo e atterraggio corti, risulta comunque di rilevanza come primo tentativo di definire i limiti di decelerazione ammissibile per garantire il comfort dei passeggeri.

Testando quattro diverse tecniche di atterraggio, come quella con decelerazione attivata manualmente e quella con velocità controllata automaticamente, è risultato che tassi di decelerazione fino a  $1,22 \text{ m/s}^2$  (circa 0,12 g) sono generalmente accettabili.

Al giorno d'oggi gli aeromobili commerciali risultano molto più grandi e pesanti; pertanto, sono soggetti a sollecitazioni molto più severe e complesse e sedili e sistemi ritenuta devono resistere a decelerazioni molto più elevate. I velivoli STOL sono molto più leggeri e l'energia da dissipare è notevolmente minore, ma, nonostante ciò, il test eseguito dalla

NASA rappresenta la prima prova a dare il via ad una serie di studi di questo tipo, adattandosi nel tempo ai nuovi modelli di aeromobili in commercio.

Tre anni più tardi, nel 1977, il Dipartimento dei Trasporti statunitense effettuò degli esperimenti su soggetti umani seduti su sedili di sistemi di tipo transit per studiare la decelerazione massima ammissibile e tollerabile dai passeggeri durante una frenata di emergenza, gli effetti della variazione di decelerazione (*jerk*) sul comfort e sulla tenuta della posizione e l'influenza di inclinazione e orientamento del sedile sulle sollecitazioni trasferite all'occupante [47].

Durante questi esperimenti, il veicolo strumentato è soggetto a vari livelli di decelerazione ed i soggetti vengono testati con diverse posizioni, con un sedile rivolto in avanti non inclinato, un sedile rivolto di lato e un sedile rivolto in avanti ed inclinato di 5°.

Nonostante questa prova non sia stata rivolta ai mezzi aerei, risulta comunque importante studiare l'approccio adottato ed i risultati ottenuti, cercando poi di adattarli al contesto aereo.

Si sottolinea che nel test non vengono utilizzate cinture di sicurezza, ma solo cinture allentate che permettono il movimento in avanti del passeggero.

Lo studio ha identificato tre diversi valori limite di decelerazione per ognuna delle tre posizioni del sedile: 0,47 g per il sedile rivolto in avanti e non inclinato, 0,41 g per il sedile rivolto di lato e 0,52 g per il sedile rivolto in avanti e inclinato di 5°.

Si nota che la posizione rivolta in avanti e l'inclinazione del sedile permettono di sopportare decelerazioni maggiori.

Nel mondo dell'aviazione, i passeggeri sono sempre seduti e allacciati e le forze a cui vengono sottoposti sono significativamente maggiori rispetto a quelle in altri mezzi quali bus e treni. Per tale motivo, i valori di decelerazione accettabili possono essere superiori a quelli riportati nello studio, così come i picchi possono essere raggiunti in tempi molto più brevi (0,09 secondi per la certificazione del sedile).

Nonostante tali differenze, tutti gli studi condividono il medesimo obiettivo: studiare le soglie di tollerabilità umana per ottimizzare le prestazioni di un mezzo in relazione al livello di sicurezza offerto ai suoi occupanti.

Infine, si fa riferimento all'Appendice E del Report 29 dell'ACRP, riguardante lo studio delle lesioni umane. [41] Lo studio si è occupato di revisionare i test militari di espulsione dal sedile, i test di decelerazione effettuali e le ricostruzioni di alcuni incidenti aeronautici, con valori di decelerazione compresi tra 2 e 220 g e tempi di applicazione da 0,002 a 115 secondi. Per ognuno degli eventi e test considerati, si sono registrate le lesioni subite dagli occupanti, con l'obiettivo di costruire delle soglie di decelerazione connesse con l'intervallo di tempo di applicazione della sollecitazione, come strumento di progettazione

dei sistemi d'arresto. Pertanto, l'ACRP ha individuato tre soglie per tre diverse durate della decelerazione e li ha successivamente confrontati con il limite di decelerazione con cui i sedili vengono certificati, dimostrando che essi risultano minori rispetto a tale limite di certificazione:

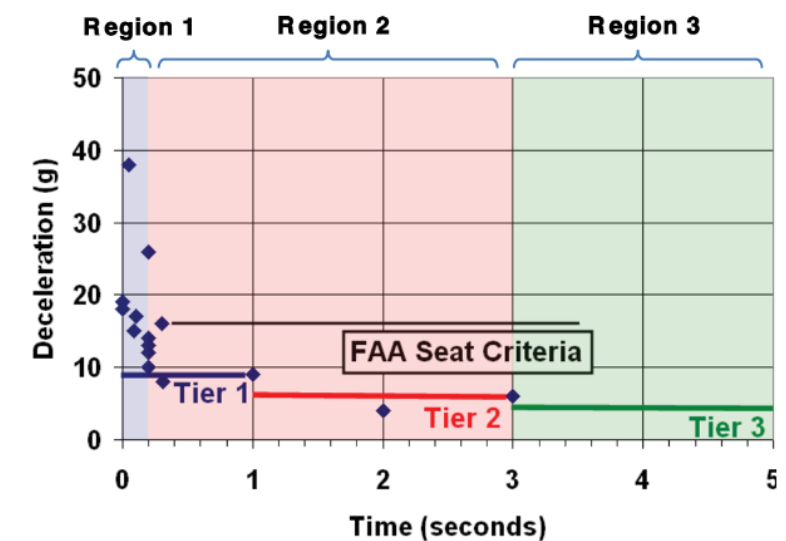


Figura 8.8: Soglie di decelerazione e criterio di progettazione dei sedili FAA (ACRP Report 29, Figura E-1)

Come si nota dal grafico, le tre soglie individuate sono:

- **9 g per decelerazioni di durata minore di un secondo:** le lesioni derivanti da applicazioni istantanee di decelerazione sono dovute al rapido spostamento dei fluidi corporei. Sotto i 9 g, la cabina rimane intatta e, nel caso in cui l'occupante colpisca la testa con la struttura interna del velivolo, è dimostrato che non possono avvenire danni cerebrali. Inoltre, entro questo limite è evitabile il rischio di incapacità reversibile, risultante in una momentanea perdita di coscienza che può limitare la capacità di un individuo di evacuare l'aereo;
- **6 g per decelerazioni di durata compresa tra uno e tre secondi:** entro i 6 g, i piloti hanno ancora capacità cognitive sufficienti per controllare il velivolo e i passeggeri possono evacuare la struttura;
- **4 g per decelerazioni di durata superiore ai tre secondi:** l'applicazione prolungata della forza decelerante può provocare danni gravi come l'oscuramento della vista, la perdita del respiro, vertigini e perdita di coscienza. Per tale motivo, il limite di decelerazione deve essere contenuto ulteriormente a 4 g.

Dallo studio dell'ACRP, si ottiene che la durata dell'applicazione della forza decelerante ha un ruolo cruciale nella definizione delle lesioni che un occupante può subire. Dal momento che le decelerazioni imposte dai sistemi d'arresto assumono valori fortemente variabili in base ad un numero considerevole di fattori, non è possibile assumere un unico criterio di decelerazione limite, bensì differenziarne i valori in base al tempo di applicazione.

Le soglie presentate dal Report 29 risultano un ottimo strumento che può fungere da ausilio alla progettazione di un letto d'arresto EMAS.

## 8.4. La *crashworthiness* di un aeromobile

La sicurezza del velivolo e la sicurezza degli occupanti sono i due ingredienti principali che definiscono l'intero livello di sicurezza offerto dal sistema d'arresto EMAS.

Questi due aspetti complementari trovano un legame comune nel concetto di *crashworthiness*, ovvero nella capacità dell'aeromobile e dei suoi sottosistemi di proteggere gli occupanti durante gli urti, assorbendo l'energia d'impatto. [10]

In tali termini, la *crashworthiness* rappresenta un requisito integrante ambo la sicurezza dei passeggeri e la sicurezza del velivolo.

Progettare la *crashworthiness* di un velivolo significa definire ed ottimizzare le caratteristiche fisiche e dinamiche della cellula aerea, in modo da renderla capace di deformarsi e quindi di assorbire energia sufficiente per garantire l'incolumità degli occupanti al suo interno.

Nel caso di un incidente, infatti, la *crashworthiness* costituisce l'ultima barriera per garantire la sopravvivenza degli occupanti dell'aeromobile.

La sicurezza offerta da un sistema d'arresto EMAS è strettamente connessa con la *crashworthiness* dell'aeromobile in ingresso. Difatti, l'ingresso del velivolo nel letto d'arresto è considerabile come un impatto in cui le varie componenti della cellula aerea devono garantire un assorbimento di energia sufficiente per trasferire agli occupanti carichi e decelerazioni tollerabili per la loro sopravvivenza.

I primi studi sugli effetti della decelerazione sul corpo umano risalgono agli anni '40 e '50 per opera di John Stapp, considerato il pioniere di questa branca di studi.

Successivamente, durante la guerra in Vietnam, tali studi vennero approfonditi quando l'esercito americano sentì la necessità di realizzare degli aerei militari dotati di sedili in grado di assorbire energia durante gli impatti, al fine di diminuire la probabilità di lesioni alla spina dorsale tanto nelle esercitazioni quanto nei combattimenti veri e propri. Tale necessità condusse gli esperti a sviluppare nuove tecnologie per aumentare la sicurezza e la resistenza agli urti degli elicotteri militari. Ricerche ed esperimenti condussero così

l'esercito americano a pubblicare alla fine degli anni '60 un testo di riferimento per la *crashworthiness*, denominato *Aircraft Crash Survival Design Guide*. Questo testo venne successivamente diviso in vari volumi, che condividevano tutti il medesimo obiettivo: esporre agli ingegneri le richieste dell'esercito da integrare nel progetto dei velivoli militari, in modo tale da ottenere un migliore assorbimento di energia e dunque maggiori possibilità di sopravvivenza.

#### 8.4.1. Progettazione e verifica della *crashworthiness*

Innanzitutto, occorre specificare che non esiste una certificazione di *crashworthiness* di un aeromobile, in quanto la valutazione della resistenza agli urti viene integrata all'interno dell'intero processo di certificazione. In questa fase, infatti, il produttore è tenuto a dimostrare la capacità del velivolo di proteggere i suoi occupanti tramite deformazioni controllate, limitando al contempo le accelerazioni e i carichi su di essi.

La progettazione della *crashworthiness* si affida a test in scala reale (*drop test*) o simulazioni basate su modelli agli elementi finiti, utilizzando software come MSC.Dytran, Abaqus e LS-DYNA. Questi riproducono o simulano l'impatto di una sezione di fusoliera sotto determinate condizioni, analizzandone il comportamento durante l'urto. In particolare, viene prestata attenzione alle modalità di deformazione della fusoliera, ai valori massimi di deformazione e alla sequenza temporale degli eventi.

Occorre sottolineare che una progettazione di questo tipo mira prima di tutto alla sopravvivenza degli occupanti, anche a discapito di un danneggiamento della struttura del velivolo.

Per discutere principi e modalità di progettazione della *crashworthiness* di un aeromobile, si fa riferimento ad un testo degli autori H. Mou, J. Xie, Z. Feng e X. Shi intitolato *Review on the crashworthiness design and evaluation of fuselage structure for occupant survivability*. [73] Questo è una rassegna dei requisiti normativi e dei risultati teorici e sperimentali presenti in letteratura.

La valutazione della *crashworthiness* è suddivisa in verifica della sicurezza all'impatto e verifica della sopravvivenza degli occupanti.

Nel primo caso, a seguito dell'impatto la struttura solitamente deve rispettare i seguenti requisiti:

- mantenere un volume di sopravvivenza sufficiente, ovvero uno spazio abitativo adeguato alla sopravvivenza e all'evacuazione degli occupanti;

- trattenere la caduta di oggetti massivi;
- mantenere l'integrità strutturale delle componenti più critiche, come il serbatoio del carburante;
- trasferire agli occupanti delle sollecitazioni che soddisfino i limiti di tolleranza umana;
- mantenere liberi percorsi e uscite di emergenza per permettere l'evacuazione dell'aeromobile.

Nel secondo caso, il documento propone una serie di indicatori che possono essere utilizzati per quantificare le lesioni subite dalle varie parti del corpo dell'occupante, come:

- il parametro **HIC** per la testa (visto precedentemente);
- il **NIC** (*Neck Injury Criterion*) per il collo;
- il **DRI** (*Dynamic Response Index*) per la spina dorsale.

I test in scala reale che vengono condotti per valutare la capacità di assorbimento di energia cinetica di un velivolo durante un impatto vengono chiamati *drop test* e sono correlati, come verrà spiegato successivamente, con i *crash test* sugli autoveicoli. Durante queste prove, una sezione di fusoliera rappresentativa dell'aeromobile in esame viene fatta cadere verticalmente da un'altezza specifica, per valutarne la risposta all'impatto.

Uno dei primi *drop test* risale al 2001, quando la FAA, la NASA e l'esercito americano collaborarono per eseguire un crash test verticale su una sezione di 3 metri proveniente dalla fusoliera di un Boeing 737-200. Il test venne condotto su scala reale e i risultati vennero utilizzati per calibrare il software MSC.Dytran, basato sugli elementi finiti ed utilizzabile per valutare la *crashworthiness* di un aeromobile. [52]

La sezione fu dotata di sei gruppi di tre sedili affiancati con dei manichini strumentati, di una porta laterale sul lato destro e un serbatoio ausiliario riempito con 404 galloni di acqua. La sezione di fusoliera venne fatta cadere da un'altezza di 14 piedi (circa 4,27 metri) a una velocità d'impatto di 30 ft/s (circa 9,14 m/s).

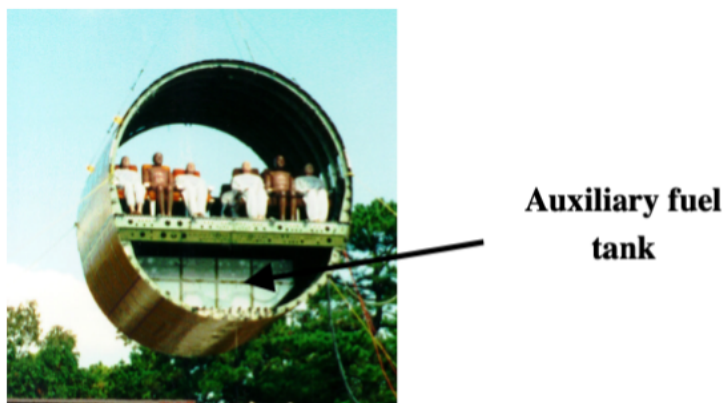


Figura 8.9: Sezione di prova di un Boeing 737-200 prima del drop test (Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test, Figura 1)

A seguito della prova, si osservarono delle fratture e piegature asimmetriche nella parte inferiore della fusoliera, delle deformazioni di maggiore entità sul lato sinistro privo di porta laterale e una perforazione del serbatoio.



Figura 8.10: Sezione di prova di un Boeing 737-200 dopo il drop test (Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test, Figura 3)

In generale nei *drop test*, le deformazioni osservate e i carichi misurati dalle strumentazioni interne ai manichini rappresentano dei risultati significativi, che se tradotti restituiscono la risposta dell'intera struttura all'impatto.

Le condizioni di prova svolgono un ruolo cruciale, poiché possono influire anche in maniera significativa sulla risposta finale della fusoliera. Infatti, fattori quali la velocità d'impatto, la tipologia di suolo, la geometria strutturale della sezione e la presenza di elementi come

serbatoi e vani nella parte inferiore della fusoliera possono influenzare in misura notevole le deformazioni subite e le forze che agiscono sugli occupanti.

È importante evidenziare che la capacità di assorbimento di energia cinetica di un velivolo non si riferisce solamente alla fusoliera, ma anche ai sistemi di ritenuta e agli oggetti interni in cabina che, seppur in misura minore, possono contribuire anch'essi alla sopravvivenza degli occupanti.

Ad esempio, il Volume IV del manuale militare *Aircraft Crash Survival Design Guide* [96] analizza il ruolo che hanno i sedili, i sistemi di ritenuta e gli oggetti interni della cabina nella protezione degli occupanti durante l'urto. Il documento spiega come anche la struttura interna del velivolo possa giocare un ruolo fondamentale nella *crashworthiness* complessiva di un aeromobile. I cuscinetti di imbottitura dei sedili, ad esempio, devono essere progettati per rendere più "dolce" l'urto della testa dell'occupante con il sedile, assorbendo l'energia cinetica e dunque limitando l'intensità delle forze agenti.

#### 8.4.2. Requisiti normativi della *crashworthiness*

Le normative vigenti stabiliscono dei criteri da soddisfare per garantire un certo livello di *crashworthiness* di un velivolo.

È chiaro che una delle fasi più critiche del volo è quella di atterraggio, soprattutto se questo viene effettuato in condizioni di emergenza. Per questo motivo, l'EASA espone alcuni criteri di progettazione dei velivoli per garantire un certo livello di *crashworthiness* durante un atterraggio di emergenza.

Di seguito si riportano alcuni passi della *CS 25.561 General* [60], riguardo i criteri di progettazione della *crashworthiness* di un aeromobile in condizioni di atterraggio di emergenza:

*"La struttura deve essere progettata per dare ad ogni occupante ogni ragionevole possibilità di evitare lesioni gravi durante un atterraggio d'emergenza con impatto minore quando:*

1. *Viene fatto un uso adeguato di sedili, cinture e di ogni altro dispositivo di sicurezza;*
2. *Le ruote sono retratte (quando applicabile);*
3. *L'occupante è sollecitato dalle seguenti forze ultime d'inerzia, agenti separatamente, relative alla struttura circostante:*
  - (a) *verso l'alto: 3,0 g;*
  - (b) *in avanti: 9,0 g;*
  - (c) *di lato: 3,0 g sulla cellula e 4,0 g sui sedili e sui loro fissaggi;*

(d) verso il basso: 6,0 g;

(e) indietro: 1,5 g.

(...) *I sedili e gli oggetti di massa (e le loro strutture di supporto) non devono deformarsi se sottoposti ai carichi suddetti in alcun modo che possa impedire una rapida evacuazione degli occupanti.*"

La norma impone dei valori specifici di accelerazione sugli occupanti nelle varie direzioni ed afferma che, entro tali limiti, la struttura dell'aeromobile deve garantire che non ci siano lesioni gravi.

Nel caso dell'ingresso di un aeromobile nel sistema d'arresto EMAS, la componente che merita particolare attenzione è ovviamente la decelerazione, il cui valore viene fissato a 9,0 g facendo riferimento all'occupante. Si nota che tale valore coincide con il valore soglia riportato dal Report 29 dell'ACRP per decelerazioni applicate per una durata di tempo minore di un secondo e risulta minore del limite di decelerazione di progetto del sedile e dei sistemi di ritenuta, pari a 16 g. [41]

Si riporta di seguito un altro passo della stessa *CS 25.561* riguardo gli oggetti di massa presenti nei vani bagagli in cabina, durante un atterraggio d'emergenza: *"Questi oggetti devono essere posizionati in modo tale che, qualora si liberino, sia improbabile che:*

- 1. causino lesioni dirette sugli occupanti;*
- 2. penetrino nei serbatoi o nelle linee di carburante, o provochino un rischio di incendio o esplosione derivante dal danneggiamento dei sistemi adiacenti;*
- 3. rendano nulle tutte le vie di fuga da utilizzare in un atterraggio d'emergenza."*

In conclusione, la normativa europea definisce i requisiti cui devono conformarsi le varie componenti strutturali di un aeromobile, in modo tale da assicurare la sopravvivenza degli occupanti e garantire la possibilità di un'evacuazione sicura del velivolo a seguito dell'evento.

### 8.4.3. Correlazione con i *crash test* automobilistici

La valutazione della *crashworthiness* degli aeromobili presenta delle analogie significative con le prove di impatto (*crash test*) che vengono eseguite nel settore automobilistico per verificare la sicurezza di autovetture, autocarri e motociclette. [9]

L'obiettivo comune, infatti, è verificare la capacità del mezzo di trasporto di assorbire l'energia cinetica generata durante un impatto, al fine di preservare la sopravvivenza dei suoi occupanti e ridurre la probabilità di lesioni gravi.

Ulteriori analogie si riscontrano con le prove di impatto che vengono condotte sui sistemi di ritenuta stradali (barriere, guard-rail e attenuatori d'urto) tramite un veicolo di prova, per validarne l'efficacia nell'assorbimento di energia durante l'impatto.

I principi fisici su cui si basano i *crash test* automobilistici e le prove di *crashworthiness* per gli aeromobili si fondano sugli stessi concetti della meccanica dell'urto e della dissipazione di energia.

Le principali differenze tra le due tipologie di prova risiedono nelle condizioni operative: le masse e le velocità coinvolte in ambito aeronautico, infatti, sono notevolmente superiori, con conseguenze potenzialmente più gravi che possono coinvolgere un numero considerevole di persone, innalzando il livello di rischio.

Inoltre, mentre il sistema d'arresto EMAS è un dispositivo di sicurezza progettato appositamente per accogliere e arrestare un aeromobile al suo interno, i sistemi di ritenuta stradali hanno il compito di contenere e deviare il veicolo incidentato, assorbendone l'energia cinetica senza generare effetti disastrosi.

In entrambe le valutazioni vengono utilizzati degli indici rappresentativi degli effetti dell'urto sul veicolo e sull'occupante. All'interno della UNI EN 1317-1 [95], riguardante i sistemi di ritenuta stradali, vengono presentati alcuni parametri che, seppur concepiti per il settore stradale, permettono di comprendere anche il significato della *crashworthiness* di un aeromobile.

Il primo indice è l'ASI (*Acceleration Severity Index*), che misura le accelerazioni subite dagli occupanti del veicolo di prova durante l'impatto con il sistema di ritenuta. Esso è un indice adimensionale dipendente dalla variabile temporale, che comprende in sé tutte le componenti di accelerazione e quantifica l'esposizione dell'occupante a subire delle lesioni durante l'impatto. Tanto più l'ASI è maggiore di 1, tanto più il rischio per l'occupante risulta maggiore.

Il secondo indice è il VCDI (*Vehicle Cockpit Deformation Index*), un parametro alfanumerico che misura l'estensione e la posizione delle principali deformazioni subite dall'abitacolo di un veicolo a seguito dell'urto. Come visto in precedenza, infatti, la struttura contenente gli occupanti del mezzo, in ambito aeronautico la fusoliera, deve poter deformarsi in maniera controllata garantendo comunque uno spazio abitabile all'interno, senza trasferire carichi eccessivi sugli occupanti.

Infine, il terzo parametro di interesse è il THIV (*Theoretical Head Impact Velocity*), che rappresenta la velocità teorica d'urto della testa contro le superfici interne del veicolo. Il parametro tiene conto della cinematica dell'occupante stesso, ipotizzando che la sua testa si muova liberamente fino all'impatto con una parete del veicolo.

In base ai valori assunti dall'ASI e dal THIV, è possibile stabilire tre livelli di severità

dell'urto (A, B, C), specifici del sistema di ritenuta.

Nei *crash test* per valutare la sicurezza degli autoveicoli, invece, vengono simulate varie tipologie di scontro del veicolo testato con barriere statiche o mobili. [9] In Europa le valutazioni della sicurezza dei veicoli stradali sono condotte dall'EuroNCAP (*European New Car Assessment Programme*) [63], programma europeo che si occupa di testare mezzi di nuova produzione valutando la loro sicurezza con dei punteggi a stelle, da una a cinque, a seconda dei risultati ottenuti. Le analisi condotte mirano a valutare la protezione di occupanti adulti e bambini, nonché la protezione degli utenti deboli della strada (pedoni e ciclisti) in caso di urto con il veicolo testato. In questo elaborato si fa riferimento al documento *Assessment Protocol – Adult Occupant Protection* riguardo le tipologie di impatto e le modalità di giudizio della sicurezza del veicolo nei confronti di passeggeri adulti. In tal caso, la “*crashworthiness*” del veicolo stradale viene testata simulando un urto frontale, uno laterale, uno posteriore e la possibilità di salvare ed evacuare i passeggeri all'interno a seguito di un incidente. Per ciascuna prova, ogni area del corpo dell'occupante viene valutata tramite un punteggio, a partire dai dati di risposta registrati del manichino. Il punteggio finale si basa sulla cinematica assunta dall'occupante e sulle prestazioni strutturali del veicolo.

In conclusione, aeromobili e veicoli terrestri condividono obiettivi e metodologie simili nella valutazione della sicurezza, con la priorità assoluta della salvaguardia degli occupanti. In entrambe le valutazioni, la resistenza all'urto viene valutata tramite l'analisi delle deformazioni subite e delle modalità di deformazione, mentre gli effetti sugli occupanti vengono quantificati tramite coefficienti specifici.

Nel contesto aeroportuale, questa logica si estende ai sistemi EMAS, che rappresentano un'applicazione peculiare dei principi di *crashworthiness* alla sicurezza aeronautica, con l'obiettivo di ridurre le conseguenze di eventi rari ma potenzialmente catastrofici.

## 8.5. Considerazioni finali

L'installazione di un sistema d'arresto EMAS è una misura di mitigazione del rischio derivante da un eventuale evento di overrun.

La condizione fondamentale per la sua realizzazione è che venga garantito un livello di sicurezza equivalente a quello fornito da un'area di sicurezza a fine pista dimensionata secondo gli standard normativi.

Nonostante l'ICAO abbia riscontrato una difficoltà nello stabilire un legame di equivalenza tra l'EMAS e la RESA, si è dimostrato che grazie all'utilizzo di software di simulazione è possibile definire un livello di sicurezza di entrambi gli scenari, in termini di probabilità

di fuoriuscita dall'area di sicurezza e di gravità delle conseguenze subite dalla struttura e dagli occupanti.

La sicurezza operativa garantita dal letto EMAS si declina in due aspetti apparentemente diversi, ma complementari: la sicurezza del velivolo e la sicurezza degli occupanti.

Nel primo caso, sono state analizzate le condizioni di carico da adottare nella progettazione dei carrelli d'atterraggio, il cui collasso rappresenta l'evento più probabile e rischioso che può verificarsi all'ingresso nell'EMAS, e le specifiche riguardanti le altre tipologie di danni possibili.

Nell'ambito della sicurezza degli occupanti, sono state specificate le condizioni di certificazione dei sedili e alcune soglie limite di decelerazione, proposte in base alla durata di applicazione della forza. In particolare, i sedili sono progettati per resistere a picchi di decelerazione di almeno 16 g applicati per 0,09 secondi, valore che risulta maggiore rispetto alle tre soglie fissate dall'ACRP a seguito di studi e simulazioni per tempi di applicazione diversi.

Ciò vuol dire che il sedile viene progettato per resistere a decelerazioni superiori alle soglie di tolleranza umana, a prescindere dal tempo di applicazione.

Il punto di contatto tra le due tipologie di sicurezza è rappresentato dalla *crashworthiness* di un aeromobile, il cui progetto mira a garantire che la struttura del velivolo sia in grado di assorbire durante un urto una quantità di energia sufficiente a preservare la sopravvivenza degli occupanti.

In particolare, i requisiti normativi europei stabiliscono che la struttura del velivolo debba essere concepita per assicurare l'incolumità degli occupanti durante un atterraggio di emergenza, a condizione che la decelerazione trasmessa all'occupante non superi il valore di 9,0 g.

Alla luce di tali considerazioni, nella progettazione di un letto d'arresto EMAS si ritiene raccomandabile considerare con attenzione i requisiti di *crashworthiness* previsti dalle normative (in Europa la *CS 25.561* dell'EASA [60]), verificando che le varie sollecitazioni imposte sugli occupanti rispettino i valori fissati dalla normativa. In questo modo si assicura che il velivolo mantenga al suo interno delle condizioni di sicurezza tali da garantire la sopravvivenza di ciascun occupante.

Per quanto riguarda invece la sicurezza strutturale, i sedili e i sistemi di ritenuta sono certificati per resistere a decelerazioni anche superiori rispetto ai limiti imposti dai requisiti di *crashworthiness*. Parallelamente, risulta opportuno considerare anche i limiti di carico specifici del carrello di atterraggio, così da prevenirne il collasso, evento che rappresenta la condizione più probabile e critica durante il meccanismo d'arresto.

## 9 | Manutenzione di un EMAS

La manutenzione rappresenta un aspetto imprescindibile nella vita di servizio di qualunque opera di ingegneria civile, sia essa di tipo strutturale o infrastrutturale. Essa ha come obiettivo fondamentale il mantenimento del livello di servizio iniziale e delle prestazioni progettuali durante l'intero ciclo di vita dell'opera, intervenendo tempestivamente per prevenire guasti o difetti.

In ambito aeroportuale, la manutenzione assume un ruolo di primaria importanza per garantire un elevato livello di sicurezza operativa durante ogni fase del volo.

Una caratteristica particolarmente vantaggiosa di un sistema d'arresto EMAS è la possibilità di prevederne il comportamento e di garantire prestazioni invariabili durante il suo intero ciclo di vita utile, di norma fissato a 20 anni.

Ciò viene reso possibile in prima misura in fase di progettazione, attraverso la selezione di materiali con proprietà specifiche, testati e verificati per resistere agli agenti esterni che potrebbero alterarne il comportamento. Inoltre, vengono condotte prove su scala reale e simulazioni per verificare le prestazioni complessive del letto.

Oltre alla progettazione, un ruolo altrettanto cruciale viene svolto dalla manutenzione del letto d'arresto, che prevede la verifica del suo livello di servizio ad intervalli di tempo periodici. L'obiettivo infatti è garantire che il profilo sforzo – deformazione dei materiali costituenti resti invariato nel tempo ed indagare sulla presenza di eventuali agenti che possono compromettere la durabilità del sistema.

Una buona manutenzione, dunque, garantisce sicurezza, efficienza e regolarità del sistema.

In termini economici, le attività di manutenzione comportano dei costi non trascurabili che sussistono durante l'intera vita utile del sistema. Nonostante ciò, questi rappresentano un investimento necessario per limitare le spese future derivanti da riparazioni straordinarie o sostituzioni dell'intero letto d'arresto.

Infatti, in questi termini, un vantaggio di particolare rilevanza è la possibilità di contenere i costi associati ad eventuali guasti e malfunzionamenti del letto d'arresto. Identificare un possibile guasto del sistema permette di prevenire conseguenze più gravi e di agire

tempestivamente, ad esempio isolando la sezione danneggiata senza dover agire sull'intero letto EMAS.

Per il gestore aeroportuale, ciò si traduce in maggiore fiducia nell'efficacia del sistema d'arresto e nella continuità del servizio.

## 9.1. Requisiti normativi

Le normative vigenti richiedono al produttore del sistema d'arresto di redigere un programma di ispezione e manutenzione contenente tutte le informazioni principali riguardo l'EMAS, le tecniche di ispezioni da condurre periodicamente e le procedure di manutenzione e riparazione. Tale programma dovrà poi essere implementato dal gestore aeroportuale.

Secondo l'ICAO [66], tale programma deve contenere misure sia preventive sia correttive e deve essere redatto prima dell'installazione dell'EMAS, a volte dopo l'approvazione dello Stato. Le misure da adottare possono variare in funzione della tipologia di letto e da quanto stabilito dal produttore. In generale, le operazioni preventive includono ispezioni visive e controlli del contenuto di umidità, per prevenire l'assorbimento d'acqua dalla superficie del letto.

Le operazioni di manutenzione hanno l'obiettivo comune di valutare il livello di servizio del letto e schedare riparazioni o sostituzioni prima del raggiungimento della fine della vita utile.

Gli addetti alla manutenzione possono essere operatori aeroportuali o dipendenti dell'azienda produttrice o di terze parti.

In Italia, l'ENAC stabilisce che l'Appaltatore debba produrre un programma di prova con una validità di almeno 20 anni, suddiviso in manutenzione ordinaria giornaliera/settimanale/mensile, ordinaria annuale e manutenzione e verifica delle performance quinquennale.

Tale programma deve contenere tipologie e frequenze di prova, comprese metodologie per misurare il livello di servizio e prevedere la fine della vita utile del sistema.

La normativa, in particolare, si sofferma sulle operazioni di rimozione di neve e ghiaccio dal sistema d'arresto, richiedendo che nel programma vengano specificate le procedure ed i mezzi adeguati per svolgere tali operazioni.

Il sistema d'arresto deve essere riparato entro 45 giorni dall'evento di overrun, escludendo quei giorni in cui non è possibile eseguire le operazioni necessarie, ad esempio per meteo avverso o vincoli di natura operativa. Tale vincolo è stato fissato per incontrare le esigenze operative dell'aeroporto.

Secondo l'ENAC, l'Appaltatore è tenuto a presentare una lista di materiali, attrezzature e parti di ricambio da immagazzinare in aeroporto, al fine di minimizzare i tempi di intervento nel caso di riparazioni. [55]

## 9.2. Operazioni di manutenzione

Dato il carattere riproducibile e prevedibile dell'EMAS, le operazioni di manutenzione sono tipicamente di natura predittiva e preventiva.

Il gestore aeroportuale può decidere di occuparsi direttamente delle operazioni di manutenzione, oppure affidarle a soggetti terzi o al personale dell'azienda produttrice.

Le procedure di manutenzione, infatti, devono essere fornite e dettagliate dal produttore del sistema d'arresto EMAS.

Di seguito, si analizzeranno le tecniche manutentive proposte dall'azienda produttrice svedese per preservare le prestazioni di un EMAS nel tempo, riducendo al contempo i periodi di inattività del sistema ed evitando costi imprevisti. In assenza di un'attenta ispezione periodica, infatti, potrebbero verificarsi guasti improvvisi che comporterebbero spese ben più onerose e possibili interruzioni del servizio aeroportuale.

L'azienda svedese specifica che le procedure di manutenzione sono state progettate appositamente per il gestore aeroportuale, con l'obiettivo di contenere le spese da sostenere a lungo termine. [24]

La manutenzione di un EMAS si traduce in:

- **Ispezioni e manutenzione ordinaria:** l'obiettivo è identificare e riparare in tempo i piccoli guasti, prima che essi possano diventare più costosi. L'azienda produttrice svedese offre servizi di ispezione annuali o semi-annuali, oltre ad ispezioni straordinarie per eventi eccezionali come terremoti, alluvioni e altri eventi di forza maggiore.
- **IM&R training:** è l'addestramento del personale addetto alla manutenzione. L'azienda sviluppa un piano di addestramento per l'ispezione, la manutenzione e la riparazione dei sistemi d'arresto (*Inspection, Maintenance & Repair training*). Disporre di personale addestrato periodicamente consente di contenere i costi ed essere sempre in regola con i requisiti normativi. Si raccomanda che l'addestramento venga condotto ogni tre anni.
- **Seam seal rehabilitation:** è la misura primaria di prevenzione dell'assorbimento d'acqua nel letto, favorendo il controllo del contenuto di umidità tramite la sigilla-

tura delle giunzioni e dello strato di rivestimento. In tal modo, si garantisce sempre una barriera contro la penetrazione di acqua ed agenti aggressivi.

- **Materiali approvati e testati:** vengono utilizzati materiali sempre approvati, certificati e testati, con proprietà specifiche, in maniera tale da conoscere sempre le procedure di manutenzione e riparazione da effettuare, riducendo tempi e costi.
- **Verifica del mix di traffico:** dal momento che l'EMAS viene progettato per uno specifico mix di aeromobili ma il traffico aereo è in continuo sviluppo, la compagnia svedese offre un servizio di verifica periodica delle prestazioni e della resistenza al jet blast nei confronti di nuove tipologie di mix di aerei. Tale verifica viene condotta tramite l'utilizzo di un software di simulazione approvato dalla FAA, che prende in ingresso informazioni degli aeromobili (come MTOW e MLW) e dell'aeroporto (come la lunghezza della RESA/RSA e il profilo della pista).
- **Field Strength Test (FST):** è un test approvato dalla FAA che viene utilizzato solamente per l'EMAS in calcestruzzo. Esso misura la resistenza dei blocchi di calcestruzzo cellulare per verificare che questa rientri nelle fasce di tolleranza di progetto. In tal modo, è possibile analizzare l'invecchiamento del sistema, ovvero prevedere la fine della sua vita utile ed organizzare tempestivamente la sua sostituzione, ottimizzando i tempi disponibili. L'azienda suggerisce di condurre tali test ogni tre o cinque anni, in maniera tale da ottimizzare l'intera vita di servizio dell'EMAS.



Figura 9.1: Field Strength Test in un EMAS in blocchi di calcestruzzo cellulare

In conclusione, si evidenzia come le attività di manutenzione consentano di individuare eventuali sezioni danneggiate del sistema d'arresto e di procedere alla loro sostituzione senza dover intervenire sull'intero letto. Questa caratteristica rappresenta un vantaggio significativo in termini di contenimento dei costi di gestione e si applica tanto ai sistemi in calcestruzzo alleggerito quanto ai sistemi in schiuma di vetro.



# 10 | Analisi economica

L'impatto tecnico ed operativo di un sistema d'arresto EMAS è stato analizzato in relazione ai requisiti normativi che disciplinano le fasi di progettazione, installazione e manutenzione. È emerso come il meccanismo di arresto che si innesca nel sistema sia funzione di una molteplicità di fattori, quali la struttura geometrica e planimetrica del letto, le prestazioni operative dell'aeromobile di progetto e le condizioni operative al contorno. Oltre a ciò, si è dimostrata l'estrema importanza assunta dal tema della sicurezza operativa offerta da un EMAS, declinabile nei due aspetti complementari di sicurezza strutturale del velivolo e sicurezza degli occupanti.

Come per ogni opera di ingegneria civile, sia essa strutturale o infrastrutturale, risulta indispensabile indagare anche sull'impatto economico che questa ha durante il suo intero ciclo di vita utile. In tal modo, infatti, è possibile valutare non solamente i costi iniziali di pianificazione, progettazione e realizzazione dell'opera, ma anche i costi di esercizio e manutenzione che devono essere sostenuti durante l'intera vita di esercizio e che possono incidere fortemente sul costo complessivo dell'opera a lungo termine. Allo stesso tempo, un'analisi economica permette di stimare i benefici ottenibili, diretti e indiretti, e di eseguire un confronto tra diversi scenari progettuali.

In quest'ottica, come si vedrà in seguito, l'integrazione dell'analisi costi – benefici con un'attenta analisi del rischio permette di orientare le scelte progettuali verso la soluzione più sicura ed efficace tanto in campo operativo quanto in campo economico. [2]

Nel presente Capitolo, verrà presentata una stima dei costi relativi alle tre principali alternative progettuali attuabili nel caso in cui non sia possibile realizzare un'area di sicurezza a fine pista di dimensioni standard: l'installazione di un sistema d'arresto EMAS, lo spostamento della soglia di pista con conseguenti limitazioni operative e l'ampliamento delle dimensioni della RESA per rispettare gli standard normativi.

Successivamente, si fornirà una stima del costo delle possibili conseguenze derivanti da un evento di overrun, con riferimento ad eventuali danni sulla struttura dell'aeromobile e a lesioni di varia entità sugli occupanti.

In seguito, verrà proposto un modello decisionale che possa essere usato come strumento di supporto da un gestore aeroportuale, in modo tale da identificare e scegliere l'alternativa progettuale più adeguata, sulla base di alcuni criteri di scelta rilevanti (economico, ambientale, operativo, ecc.) e del livello di rischio conseguente ai vari scenari progettuali.

## 10.1. Considerazioni iniziali

La prima fase della progettazione di un'opera di ingegneria civile è costituita dallo studio di fattibilità tecnico – economica, attraverso il quale, tra le varie alternative progettuali possibili, si identifica quella che presenta il miglior rapporto tra costi da sostenere e benefici ottenibili durante il suo intero ciclo di vita.

Pertanto, l'analisi costi – benefici assume un ruolo cruciale, in quanto è in grado di stabilire l'efficacia di uno specifico progetto, come l'installazione di un sistema d'arresto EMAS, in termini monetari.

L'ente americano FAA fornisce una guida sull'esecuzione di un'analisi costi – benefici (BCA) per un intervento in ambito aeroportuale, denominata *FAA Airport Benefit – Cost Analysis Guidance* [98].

Al suo interno, l'analisi costi – benefici viene definita come una metodologia per determinare se un determinato output debba essere realizzato e come realizzarlo al meglio. Ciò richiede l'analisi di tutti i costi relativi alla produzione e all'esercizio di tale output, indipendentemente che i costi siano generati dal produttore, dall'utente o da terze parti. Parallelamente, l'analisi richiede lo studio di tutti gli effetti che risultano dall'output, siano essi diretti o indiretti, positivi o negativi.

L'obiettivo è la quantificazione dei benefici potenziali che si possono ottenere per una società, in maniera tale da giustificare i costi potenziali da sostenere per realizzare e gestire l'opera. Qualora tale analisi venga condotta su un'opera tesa ad ottimizzare il livello di sicurezza dell'aeroporto, la FAA specifica che i benefici debbano essere monetizzati e includere la riduzione delle fatalità e del numero di feriti, nonché la riduzione nelle perdite di proprietà e dei danni commessi.

Per quanto riguarda l'analisi dei costi da sostenere durante l'intero ciclo di vita utile dell'opera, la guida della FAA presenta un riassunto grafico ideale che rappresenta l'andamento delle varie componenti di costo nel tempo. Si sottolinea che il grafico rappresenta una situazione ideale, per cui non tutte le componenti di costo di un'opera seguono il profilo mostrato. Le componenti principali sono le seguenti:

- **costi di pianificazione, ricerca e sviluppo (R&D Cost):** è la componente riferita al periodo iniziale di pianificazione dell'opera, in cui i costi aumentano

progressivamente nel tempo finché non insorgono i costi di investimento;

- **costi di investimento (Capital Cost):** sorgono durante le prime fasi del ciclo di vita dell'opera ed in genere comprendono i costi per il terreno, i costi di costruzione ed equipaggiamento dell'area di cantiere ed i costi operativi;
- **costi di esercizio e manutenzione (Operations and Maintenance Cost):** rappresentano i costi da sostenere durante l'intera vita utile del progetto, il cui valore totale aumenta nel tempo di pari passo con l'invecchiamento dell'opera e quindi con la necessità di essere mantenuta, per poi diminuire nell'ultima fase di vita;
- **costo di chiusura del progetto (Termination Cost):** sono i costi da sostenere alla fine della vita utile dell'opera per eventuali operazioni di smantellamento e ripristino del sito.

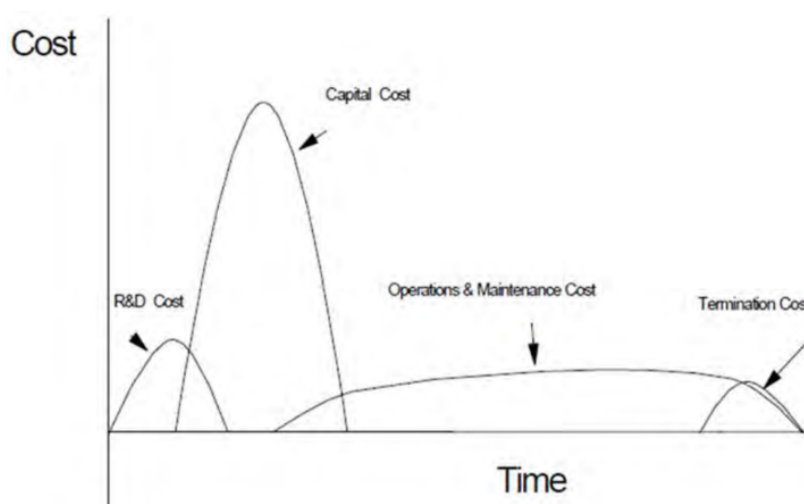


Figura 10.1: Modello del costo del ciclo di vita di un'opera (FAA Airport Benefit – Cost Analysis, Exhibit 11-1)

Il presente elaborato si pone come obiettivo lo studio dell'impatto economico dell'installazione di un sistema d'arresto EMAS, la quale costituisce una delle alternative progettuali possibili per garantire un livello di sicurezza accettabile ed equiparabile a quello di una RESA standard tradizionale.

A questo proposito, è necessario poter eseguire un confronto dei vari scenari progettuali, tanto sul piano operativo di sicurezza quanto sul piano economico. In termini economici, è necessario dunque definire una stima dei costi delle tre alternative progettuali possibili e dei relativi benefici che ne conseguono, in modo da identificare lo scenario più sicuro, efficiente ed adeguato al contesto aeroportuale di inserimento.

## 10.2. Stima del costo di vita utile di un EMAS

Di seguito, si presentano alcuni strumenti validi per eseguire una stima del costo di vita utile dell'alternativa progettuale in esame nel presente elaborato: l'installazione di un sistema d'arresto EMAS.

### 10.2.1. FAA Order 5200.9

Per stimare il costo di vita utile di un EMAS, il testo di riferimento principale è rappresentato dalla *FAA Order 5200.9, Financial Feasibility and Equivalency of Runway End Safety Area Improvements and Engineered Material Arresting System* [97].

Il documento rappresenta uno strumento di supporto con due obiettivi principali:

- la determinazione del massimo costo economicamente sostenibile per migliorare una RSA (o RESA);
- l'identificazione dell'alternativa più praticabile e finanziariamente fattibile per il miglioramento di una RSA (o RESA).

Dunque, la guida si propone di aiutare un gestore aeroportuale nella scelta dell'alternativa economicamente più fattibile, in relazione alle sue disponibilità economiche e alle necessità da soddisfare per migliorare o adeguare il livello di sicurezza di una RSA (o RESA).

Per stabilire il massimo costo economicamente sostenibile per migliorare la RSA, la FAA propone un metodo semplificato che si basa sull'utilizzo di due grafici, come descritto nei passaggi successivi:

1. determinazione dell'aeromobile critico di progetto e del suo massimo peso al decollo (MTOW), in base alla definizione fornita dai testi normativi;
2. utilizzo del grafico in Figura 10.2 per definire la lunghezza del sistema d'arresto EMAS necessaria ad arrestare in sicurezza il velivolo di progetto scelto al punto 1, identificato dal suo MTOW;
3. utilizzo del grafico in Figura 10.3 per la definizione del massimo costo economicamente sostenibile per migliorare la RSA, in base alla lunghezza di EMAS ottenuta al punto 2.

Il massimo costo economicamente sostenibile rappresenta il limite massimo di spesa che un gestore aeroportuale è ragionevolmente tenuto a sostenere per migliorare la RSA di una pista. Ogni alternativa il cui costo risulta superiore è considerata non sostenibile economicamente e dunque deve essere scartata.

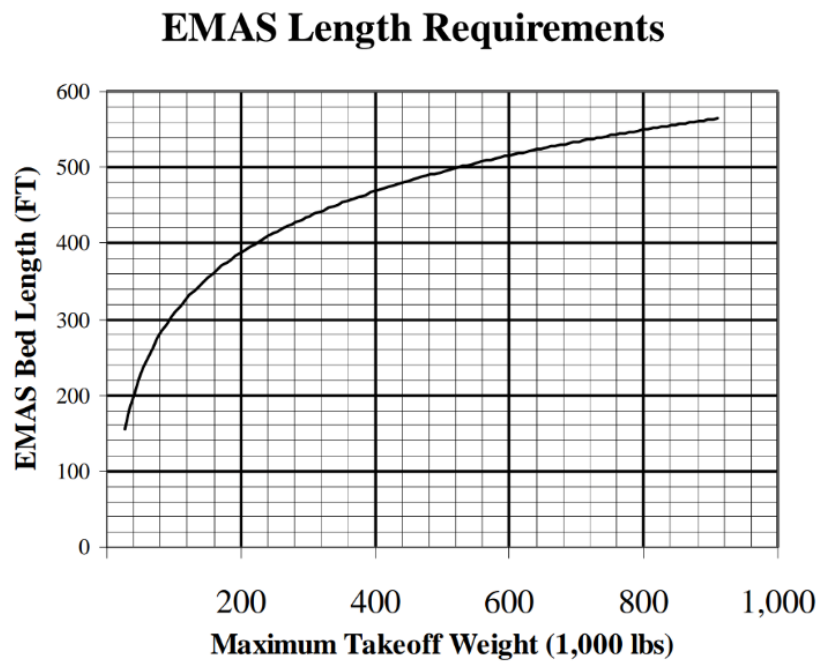


Figura 10.2: Definizione della lunghezza del letto d'arresto EMAS in funzione del MTOW dell'aeromobile critico (FAA, Order 5200.9, Figura 3)

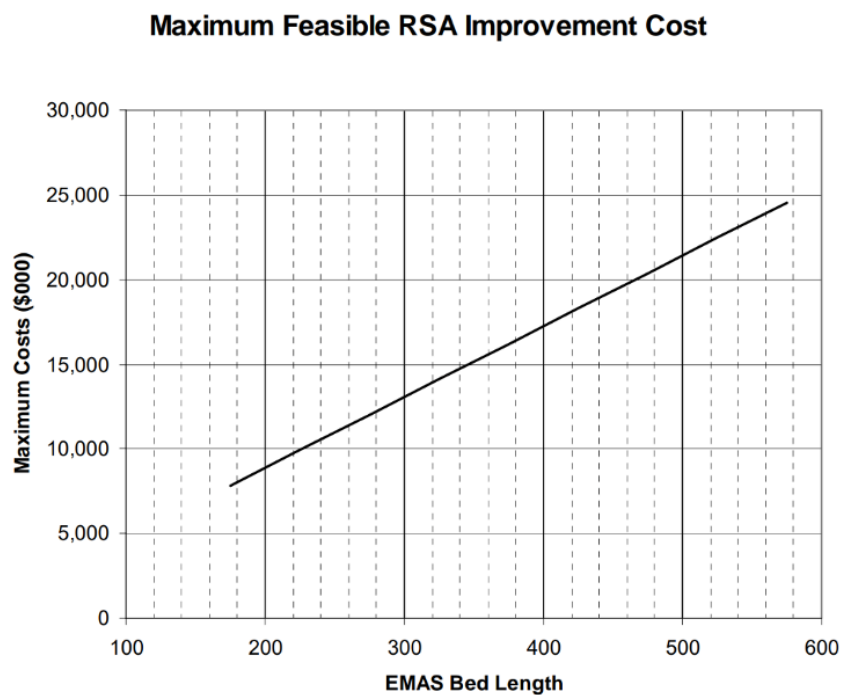


Figura 10.3: Definizione del massimo costo economicamente sostenibile in funzione della lunghezza del letto EMAS (FAA, Order 5200.9, Figura 4)

Il limite di questo metodo, tuttavia, è che il costo massimo economicamente sostenibile viene definito solamente in funzione del peso massimo al decollo dell'aeromobile critico di progetto, che per definizione viene identificato con un velivolo che opera regolarmente in pista (con almeno 500 movimenti all'anno, specifica la FAA) e che richiede una maggiore capacità di arresto ad un EMAS. Ciò sottintende che tale aeromobile sia rappresentativo dell'intera flotta operante nella pista interessata. Ciò vuol dire che non vengono considerati altri fattori influenzanti il costo finale e la disponibilità economica del gestore aeroportuale. Tuttavia, se il velivolo scelto non rappresentasse fedelmente il traffico reale operante, la lunghezza dell'EMAS e il massimo costo potrebbero non essere adeguati. In tal caso, ciò dovrebbe essere un fattore da considerare nel caso in cui si volesse definire un costo massimo economicamente sostenibile più basso.

Per realizzare il confronto tra il massimo costo economicamente sostenibile ed i costi delle varie alternative progettuali, la FAA fornisce degli strumenti e dei prezzi unitari per stimare il costo di vita utile LCC (*Life Cycle Cost*) di un EMAS. Come visto precedentemente, il costo complessivo tiene conto di varie componenti di spesa da sostenere non solamente al momento iniziale di pianificazione e progettazione dell'opera, ma anche durante l'esercizio, per la gestione e la manutenzione del sistema. Pertanto, il costo di vita utile di un EMAS per un arco di 20 anni viene calcolato nel seguente modo:

$$P_{\text{life}} = P_{\text{emas}} + \frac{F}{1.97} + A \cdot 9.93 \quad (10.1)$$

dove  $P_{\text{emas}}$  rappresenta il costo di realizzazione del letto,  $F$  è il costo per una futura sostituzione del letto dopo dieci anni dall'installazione e  $A$  è il costo per le ispezioni e le manutenzioni annuali. I coefficienti numerici tengono conto dell'effetto dell'inflazione con un tasso del 7 % e dell'anno o intervallo di tempo in cui le componenti di costo devono essere sostenute, ovvero il decimo anno per le spese di sostituzione e dal secondo al nono e dall'undicesimo al diciannovesimo anno per le spese di ispezione e manutenzione.

Il costo di realizzazione del sistema d'arresto  $P_{\text{emas}}$  include la preparazione del sito, l'installazione del letto e altre operazioni eventualmente necessarie, come la ricollocazione della soglia di pista, lo spostamento e/o la modifica dei sistemi di aiuto alla navigazione, l'estensione della pista e le modifiche alle taxiway.

La *FAA Order 5200.9* propone i seguenti costi unitari espressi in dollari statunitensi del 2004, stimati dall'analisi di quattro installazioni reali:

- per la preparazione del sito: \$14 per piede quadrato;
- per l'installazione del letto EMAS: \$78 per piede quadrato;

- per le spese di manutenzione: \$1 per piede quadrato ogni tre anni (cioè \$0,33 per piede quadrato all'anno).

In particolare, la preparazione del sito prevede la rimozione della superficie esistente e l'installazione di una base in materiale granulare e di una superficie asfaltata, oltre a spese di mobilitazione e smobilitazione del cantiere ed i costi di progettazione ed ispezione dei lavori.

L'installazione del letto, invece, include le spese per i materiali, l'operazione di installazione, la superficie di rivestimento e la segnaletica orizzontale.

La FAA sottolinea che i costi unitari proposti sono utilizzabili come riferimento per la stima del costo di vita utile di un sistema EMAS. Tuttavia, è necessario tener conto di altri fattori che possono influenzare l'analisi economica, come le condizioni di esposizione del letto e gli interventi operativi da adottare per realizzare l'opera. Ad esempio, condizioni climatiche estreme potrebbero indurre a scegliere dei materiali con caratteristiche di resistenza elevate contro gli agenti atmosferici, comportando di conseguenza dei costi maggiori per l'acquisto dei materiali e per gli interventi di manutenzione. Inoltre, nel caso in cui l'installazione di un EMAS dovesse richiedere interventi infrastrutturali importanti come lo spostamento della soglia di pista con eventuali modifiche al traffico aereo e limitazioni operative, il costo finale del ciclo di vita di un EMAS risulterebbe notevolmente superiore rispetto a quello ottenibile dai costi unitari proposti.

Un esempio di applicazione del metodo di valutazione economica suggerito dalla Order 5200.9 è rappresentato dal *LAX Runway Safety Area Practicability Study* [91], un progetto volto a migliorare la sicurezza operativa al Los Angeles International Airport (LAX) per le piste 6L-24R e 6R-24L. Data la necessità di conformare le estremità delle RSA di entrambe le piste agli standard normativi, nel progetto vengono presentate alcune alternative progettuali, tra cui l'espansione fisica delle RSA tramite l'acquisizione di nuovi terreni, l'installazione di un EMAS, lo spostamento della soglia riducendo la lunghezza di pista, il riallineamento della pista o combinazioni di vario tipo.

Per la valutazione di ogni alternativa, viene definito il massimo costo economicamente sostenibile utilizzando i grafici forniti dalla FAA, supponendo come aereo di riferimento un Airbus A380-800.

Di conseguenza, tale costo viene utilizzato per verificare l'impatto economico di ciascuna alternativa, per la quale sono stati definite tutte le componenti di costo, tra cui i costi operativi di costruzione, i costi operativi alla fine della costruzione, i costi di progetto e i costi ambientali. Pertanto, alcune alternative sono state scartate in quanto non finanziariamente praticabili, mentre altre sono state considerate tecnicamente valide anche se il costo finale è risultato elevato. In conclusione, la soluzione più adeguata a entrambe

le piste è stata identificata nella modifica delle distanze dichiarate spostando la soglia di pista, alternativa con il minor impatto economico ed ambientale complessivo.

Disponendo di piste molto lunghe, pari a circa 3.300 e 2.700 metri rispettivamente per le piste 6R/24L e 6L/24R, lo spostamento della soglia è risultato un intervento accettabile, senza imporre particolari limitazioni operative con conseguenti spese significative nel corso degli anni, come verrà analizzato successivamente.

Tale discorso è difficilmente applicabile nel contesto italiano, dove, come evidenziato in precedenza, la maggior parte degli aeroporti ha origine bellica e l'alta densità urbanistica e la presenza di vincoli di varia tipologia limitano fortemente l'espansione della RESA. Per tale motivo, è necessario valutare tutte le alternative progettuali, considerando i relativi impatti sia sotto il profilo tecnico – operativo sia sotto il profilo economico.

### 10.2.2. Problematiche della FAA Order 5200.9

L'Airport Cooperative Research Program (ACRP), eseguendo una ricerca su dodici aeroporti americani nel 2009, ha sollevato delle perplessità sui costi unitari proposti dalla FAA nella Order 5200.9. [41]

Dei dodici aeroporti americani intervistati, otto di questi fornirono informazioni sui costi sostenuti per l'installazione e la manutenzione di undici letti d'arresto, realizzati tra il 1999 e il 2007.

I prezzi medi unitari, ottenuti normalizzando i costi totali per le aree interessate dalle lavorazioni, sono tuttavia risultati nettamente superiori rispetto a quelli proposti dalla FAA. La tabella seguente confronta tali prezzi, espressi in dollari statunitensi del 2007:

	<b>FAA Order 5200.9</b>	<b>Survey</b>
Normalized Preparatory Paving Cost per Square Foot	\$15	\$48
Normalized Installation Cost per Square Foot	\$85	\$134
Cost to Establish EMAS (CTEE) per Square Foot	\$100	\$182
Cost for 150 x 300-ft Bed	\$4.5M	\$8.2M

Figura 10.4: Confronto dei costi unitari medi normalizzati tra FAA Order 5200.9 e la ricerca condotta dall'ACRP (ACRP, Report 29, Tabella 3-5)

Come si evince dalla tabella, il costo unitario finale per realizzare un EMAS risulta quasi pari al doppio rispetto a quello proposto dalla FAA Order 5200.9.

Tali differenze possono essere dimostrate graficamente, ponendo a confronto il costo finale del letto in funzione della sua lunghezza con il massimo costo economicamente sostenibile proposto dalla FAA:

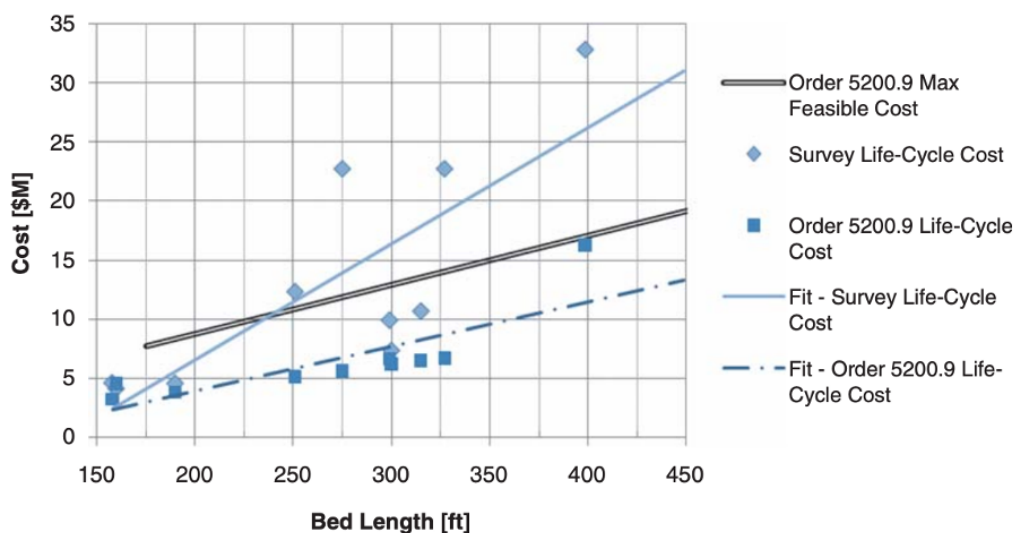


Figura 10.5: Confronto del costo di vita utile di un EMAS tra la ricerca dell'ACRP e la FAA Order 5200.9 (ACRP, Report 29, Figura 3-9)

Utilizzando i costi unitari proposti dalla FAA, il prezzo totale del ciclo di vita di un EMAS risulta minore rispetto al massimo costo economicamente sostenibile. Se invece si considerassero i prezzi medi unitari stimati dalla ricerca dell'ACRP, il costo finale del ciclo di vita del sistema d'arresto risulterebbe superiore al massimo costo sostenibile stabilito dalla FAA Order 5200.9, per cui l'alternativa dovrebbe essere scartata.

Tale risultato è stato giustificato dall'ACRP dal fatto che i costi sono stati calcolati per RSA e non per singolo letto EMAS, come nel caso dell'Order 5200.9 della FAA. Uno degli aeroporti interessati dalla ricerca dispone di una RSA con due letti d'arresto posti ad entrambe le estremità della pista; pertanto, non è possibile stabilire una piena equivalenza tra i costi della FAA e quelli dell'ACRP.

### 10.2.3. Stima del costo di vita utile di un EMAS nel contesto italiano

Data la forte sensibilità dei prezzi di fronte al contesto di installazione dell'EMAS e ai diversi fattori economici, ambientali e operativi di un aeroporto, nel presente elaborato viene proposta una stima parziale del costo di installazione di un EMAS nel territorio italiano.

In particolare, tale stima è rivolta alle operazioni di preparazione del sito di installazione. I costi dell'installazione vera e propria del letto d'arresto e degli interventi di manutenzione non sono stati stimati in questo elaborato. Ciò è determinato dal fatto che l'EMAS è una tecnologia che non si è ancora diffusa in Italia; pertanto, non si dispone attualmente di dati sufficienti per poter definire dei prezzi medi unitari attendibili e si invita a fare riferimento ai costi unitari proposti dalla FAA Order 5200.9 [97], opportunamente convertiti nella valuta attuale.

La stima dei costi di preparazione del sito è stata condotta per tre regioni italiane rappresentative del Nord, Centro e Sud Italia, al fine di restituire un quadro di riferimento economico nel territorio italiano. Le tre regioni scelte sono la Lombardia, il Lazio e la Campania.

Le voci di prezzo sono state ricavate dai relativi prezzi regionali aggiornati [90][86][88][89][87] e dal listino prezzi *Nuove Costruzioni, Manutenzione Programmata* del 2025 della società ANAS [46]. Si sottolinea che i prezzi considerati contengono le spese generali e gli utili di impresa.

Si specifica che le voci di prezzo sono state scelte in relazione alle cinque macrocategorie di intervento o prezzo previste dalla FAA nella Order 5200.9 [97] per la preparazione del sito di installazione:

1. rimozione del materiale di superficie esistente;
2. installazione di un materiale di base aggregato;
3. installazione di uno strato superficiale in asfalto;
4. costi di ingegneria e ispezione;
5. costi di mobilitazione e smobilitazione del cantiere.

Nella presente stima, si considerano le seguenti lavorazioni:

- uno scavo di profondità pari a 60 cm;
- un reinterro in materiale granulare dello spessore di 30 cm;
- una sovrastruttura pavimentata costituita da uno strato di base di 15 cm, uno strato di binder di 9 cm ed uno strato di usura di 6 cm.

Si specifica che, per ciascuna regione considerata, laddove possibile, sono stati determinati due differenti valori di costo unitario:

- uno relativo alla pavimentazione di supporto per il sistema d'arresto;

- l'altro riferito alla pavimentazione di *setback*, alla quale vengono richieste prestazioni più elevate in termini di resistenza e aderenza.

Tale distinzione si è resa necessaria dal momento che lo spazio di *setback* è tenuto ad accogliere un aeromobile in caso di overrun, prima del suo ingresso nel letto d'arresto. Per tale motivo, la pavimentazione deve essere in grado non solo di sopportare il carico accidentale dell'intero velivolo, ma anche di garantire proprietà antisdrucchiolo e ad alta aderenza, così da assicurare il massimo livello di controllabilità del mezzo.

Dal prezzario ANAS 2025 sono state selezionate alcune voci non rinvenibili all'interno dei prezzari regionali. In particolare, dal prezzario ANAS è stata considerata, tra le altre, la voce relativa alla fornitura di materiale di riporto, distinta in funzione dell'area geografica di applicazione (Nord, Centro e Sud Italia). [46]

Per i costi di progettazione e ispezione è stata assunta una percentuale pari al 10% del costo totale di costruzione, mentre per i costi di sicurezza e di allestimento del cantiere è stata considerata una quota pari al 4% del costo di costruzione. Tali valori sono stati adottati in quanto rappresentano valori tipici nelle opere infrastrutturali, coerenti con le stime normalmente adottate per questo tipo di intervento.

Si precisa inoltre che alcuni costi unitari sono riportati in €/m<sup>3</sup>; per uniformare i dati, tali valori sono stati poi convertiti in €/m<sup>2</sup>, in funzione dello spessore previsto per le specifiche lavorazioni considerate, come spiegato in precedenza.

Le singole voci di costo con le relative descrizioni e prezzi unitari delle tre regioni italiane analizzate sono riportate in dettaglio all'interno dell'Allegato C.

I risultati che sono stati ottenuti sono i seguenti:

	<b>Pavimentazione di supporto al sistema d'arresto EMAS</b>	<b>Pavimentazione di <i>setback</i></b>
<b>LOMBARDIA</b>	109,30 €/m <sup>2</sup>	121,42 €/m <sup>2</sup>
<b>LAZIO</b>	166,93 €/m <sup>2</sup>	127,85 €/m <sup>2</sup>
<b>CAMPANIA</b>	145,55 €/m <sup>2</sup>	109,91 €/m <sup>2</sup>

Tabella 10.1: Stima dei costi di preparazione del sito di installazione di un EMAS in tre regioni italiane

Si osserva che il costo unitario della pavimentazione dell'area di *setback* risulta superiore rispetto ad altre aree, in quanto è richiesta una maggiore prestanza meccanica e proprietà antiscivolo ad alta aderenza superficiale.

Inoltre, si rileva una variazione del costo unitario tra le diverse regioni italiane, con un valore significativamente inferiore per la pavimentazione di supporto all'EMAS nella regione Lombardia.

Considerando un approccio di valore medio su tutto il territorio nazionale, si ottengono i seguenti risultati:

Pavimentazione di supporto al sistema d'arresto EMAS	Pavimentazione di <i>setback</i>
140,60 €/m <sup>2</sup>	119,73 €/m <sup>2</sup>

Tabella 10.2: Stima dei costi medi di preparazione del sito di installazione di un EMAS in Italia

### 10.3. Stima del costo dello spostamento della soglia di pista

Una delle soluzioni progettuali adottabili per adeguare una RESA agli standard normativi prevede la modifica delle distanze dichiarate della pista attraverso lo spostamento della soglia. In tal modo, è possibile garantire un'area di sicurezza a fine pista di dimensioni maggiori, senza ricorrere a interventi costruttivi, come ad esempio l'installazione di un sistema d'arresto EMAS, o ad operazioni particolarmente onerose, come l'ampliamento dell'area oltre i confini del dominio aeroportuale.

Tuttavia, tale alternativa, pur presentando dei vantaggi in termini di riduzione dei costi infrastrutturali iniziali, comporta delle limitazioni operative anche significative, che si traducono in costi operativi permanenti a carico del gestore aeroportuale, delle compagnie aeree e di soggetti terzi coinvolti nella gestione e nell'esercizio dell'aeroporto. Questi costi insorgono immediatamente dopo la modifica e persistono per l'intero periodo di esercizio. Pertanto, è assolutamente indispensabile tener conto delle conseguenze economiche delle limitazioni operative introdotte da tale soluzione progettuale.

Nel presente elaborato viene proposta una stima dei costi operativi in quattro diversi aeroporti italiani di interesse nazionale, scelti in base al rispettivo numero di movimenti

annuali, al fine di fornire una panoramica degli effetti che lo spostamento della soglia avrebbe nelle diverse categorie di scalo in Italia.

Lo spostamento della soglia comporta la diminuzione della distanza disponibile all'atterraggio LDA (*Landing Distance Available*), definita come la distanza compresa tra la soglia e la fine della pista. Le altre distanze dichiarate (TORA, TODA, ASDA), invece, rimangono invariate e la porzione di spazio compresa tra la nuova soglia e il margine finale di pista resta disponibile per le operazioni di decollo.

Le normative vigenti consentono di adottare combinazioni diverse delle alternative progettuali. In tal caso, lo spostamento della soglia può essere integrato dall'installazione di un sistema d'arresto EMAS nella RESA ottenuta.

In tale panoramica, lo spostamento della soglia garantisce anche una misura di sicurezza in eventi di undershoot; infatti, viene garantito uno spazio ulteriore di allontanamento tra il letto d'arresto e la soglia, diminuendo di conseguenza la probabilità che l'aeromobile atterri direttamente sul sistema d'arresto, eventualità che potrebbe comportare conseguenze gravi tanto sugli occupanti quanto sulla struttura del velivolo.

### 10.3.1. **Stima dei costi operativi**

Come anticipato nel paragrafo precedente, il presente elaborato propone una stima dei costi operativi derivanti dallo spostamento della soglia di una pista.

Tale intervento determina infatti delle limitazioni operative, la cui influenza sul piano economico varia in funzione della modifica apportata alla pista. In particolare, a seguito di modifiche rilevanti, alcune categorie di aeromobili potrebbero non avere più la possibilità di operare nella pista interessata, dal momento che le distanze disponibili non risulterebbero sufficienti per le operazioni di atterraggio. Viceversa, nel caso di modifiche di lieve entità, gli effetti si traducono principalmente in limitazioni sul peso massimo consentito agli aeromobili, con conseguente riduzione del numero di passeggeri che possono essere trasportati.

La riduzione della capacità di trasporto passeggeri genera una serie di effetti a catena, che interessano non solo le compagnie aeree e il gestore aeroportuale, ma anche l'insieme degli operatori economici che contribuiscono alle attività aeroportuali. Ad esempio, vengono interessati gli esercizi commerciali presenti nei terminal aeroportuali (come bar, ristoranti e negozi di vario genere) ed i servizi di trasporto e parcheggio che consentono ai passeggeri raggiungere l'aeroporto e lasciare il proprio veicolo in sosta.

Dal momento che ogni aeroporto dispone di proprie dotazioni infrastrutturali e offre ai propri passeggeri servizi commerciali e modalità di accesso all'infrastruttura di vario ge-

nere, è opportuno distinguere il valore dei costi operativi in funzione della categoria di aeroporto. Tale distinzione consente di comprendere meglio i risvolti economici dello spostamento della soglia di pista in vari contesti aeroportuali.

### 10.3.2. Classificazione e scelta degli aeroporti analizzati

Per l'analisi di contesti aeroportuali specifici in territorio nazionale, si fa riferimento alla classificazione per connettività fornita dal *Piano Nazionale degli Aeroporti* dell'ENAC. Il Piano, infatti, definisce le seguenti categorie aeroportuali [57]:

- **Aeroporti di rilevanza intercontinentale:** sono definiti “porte del continente”;
- **Aeroporti di rilevanza internazionale:** effettuano collegamenti a medio e corto raggio internazionali;
- **Aeroporti di rilevanza nazionale:** comprende gli scali con collegamenti su territorio prevalentemente nazionale.

A tale classificazione, si aggiunge la categoria di **aeroporti regionali**, caratterizzata da un traffico limitato di passeggeri e da collegamenti locali e nazionali.

Di seguito viene fornito un elenco di aeroporti italiani, in base alla loro classificazione:

CLASSE	AEROPORTO ITALIANO
<b>Aeroporti regionali</b>	Aeroporto della Valle d'Aosta (AOT) Aeroporto di Bolzano – Dolomiti (BZO) Aeroporto di Crotone – Sant'Anna "Pitagora" (CRV) Aeroporto Internazionale dell'Umbria – Perugia "San Francesco d'Assisi" (PEG)
<b>Aeroporti di rilevanza nazionale</b>	Aeroporto Internazionale di Pisa "Galileo Galilei" "(PSA) Aeroporto di Roma – Ciampino "G. B. Pastine" (CIA) Aeroporto Internazionale di Lamezia Terme (SUF) Aeroporto di Torino "Sandro Pertini "(Caselle) (TRN)
<b>Aeroporti di rilevanza internazionale</b>	Aeroporto di Bergamo – Orio al Serio "Il Caravaggio" (BGY) Aeroporto di Catania – Fontanarossa "Vincenzo Bellini" (CTA) Aeroporto di Napoli – Capodichino "Ugo Niutta" (NAP) Aeroporto di Bologna "Guglielmo Marconi" (BLQ)
<b>Aeroporti di rilevanza intercontinentale</b>	Aeroporto di Roma – Fiumicino "Leonardo da Vinci" (FCO) Aeroporto di Milano Malpensa "Silvio Berlusconi" (MXP) Aeroporto di Venezia "Marco Polo" (VCE)

Tabella 10.3: Classificazione degli scali aeroportuali in Italia secondo il Piano Nazionale degli Aeroporti

Le limitazioni operative, come spiegato in precedenza, possono limitare il peso massimo consentito agli aeromobili per eseguire le operazioni di decollo e atterraggio.

Le stime dei costi operativi sono state eseguite per tutte le classi ad eccezione degli aeroporti di rilevanza intercontinentale, in quanto in Italia questi non presentano delle necessità reali di conformare la RESA agli standard normativi.

Per eseguire le stime, con le opportune considerazioni che verranno specificate in seguito, per ciascuna classe si è associato un velivolo rappresentativo della flotta aerea operante:

- Aeroporti regionali: ATR 72-600;
- Aeroporti di rilevanza nazionale: Boeing 737-800;
- Aeroporti di rilevanza internazionale: Boeing 787-900.



Figura 10.6: ATR 72-600



Figura 10.7: Boeing 737-800



Figura 10.8: Boeing 787-900

Successivamente, attraverso l'analisi di articoli di settore [82] e di dati di mercato delle varie compagnie aeree relativi alle tariffe dei biglietti aerei [12][25][28], si è proceduto alla stima dei prezzi medi dei biglietti per ciascuna tipologia di volo operato in ciascuna classe aeroportuale. In particolare, sono stati presi in esame i prezzi in funzione delle tipologie di volo (interno, nazionale, europeo e internazionale) e delle rotte operative più frequenti per ciascuno scalo. Tale approccio ha permesso di definire una serie di valori medi di riferimento dei prezzi di mercato dei biglietti aerei, utili per stimare i costi operativi derivanti dalle limitazioni imposte dallo spostamento della soglia di pista.

Si sottolinea che, nella stima, sono state considerate le oscillazioni stagionali dei prezzi dei biglietti. I valori riportati rappresentano quindi una media ponderata delle tariffe rilevate, al fine di fornire una stima più realistica.

I prezzi medi stimati sono i seguenti:

- per un aeroporto regionale: vengono effettuati prevalentemente voli interni e voli nazionali, per i quali si è stimato un prezzo del biglietto pari a € 55,00 e € 65,00 rispettivamente;
- per un aeroporto di rilevanza nazionale: è interessato da voli nazionali e alcune tratte europee, per cui si stimano dei prezzi medi del biglietto rispettivamente pari a € 65,00 e € 75,00;
- per un aeroporto di rilevanza internazionale: si stimano € 65,00 per un volo nazionale, € 75,00 per un volo europeo e € 550,00 per un volo internazionale.

A seguito di tali risultati e considerazioni, le stime dei costi operativi sono state sviluppate prendendo come riferimento un aeroporto italiano per ciascuna categoria individuata

dal Piano Nazionale degli Aeroporti dell'ENAC. I risultati ottenuti possono pertanto essere considerati rappresentativi dell'intera tipologia di scali a cui appartiene l'aeroporto selezionato.

### 10.3.3. Metodologia utilizzata

Prima di analizzare le tre categorie di scalo, è necessario fare alcune considerazioni sulle componenti del prezzo di un biglietto, per comprendere in maniera esaustiva i soggetti interessati dai costi operativi.

Quando un passeggero acquista un biglietto per un volo con una certa compagnia aerea, il prezzo è suddivisibile generalmente nelle seguenti componenti:

- guadagno della compagnia aerea: è la componente di maggior peso sul prezzo totale del biglietto;
- tasse aeroportuali: ogni gestore aeroportuale impone al passeggero il pagamento delle tasse per le operazioni effettuate in aeroporto;
- tasse governative e IVA: rappresentano la quota di pagamento che il passeggero è tenuto a sostenere per il Comune;
- commissioni di vendita: per le agenzie e altre componenti di minor peso.

Le tasse aeroportuali vengono definite *diritti aeroportuali* e vengono distinte in funzione del servizio offerto dallo scalo aeroportuale al passeggero. Infatti, essi si distinguono tipicamente in diritti di imbarco e di approdo e partenza per i servizi offerti ai gate e ai banchi check-in, e diritti di sicurezza rivolti al passeggero e ai bagagli a mano e da stiva, per i controlli di sicurezza sulla persona e sul bagaglio e per le operazioni di movimentazione dei bagagli da stiva.

Tali componenti di prezzo devono essere definite dal gestore aeroportuale e per la stima di questo elaborato sono state considerate le componenti specifiche di ciascun aeroporto analizzato.

L'addizionale comunale è un'imposta applicata dal Comune dell'aeroporto ad ogni passeggero in partenza. Inizialmente questa è stata introdotta per risarcire il Comune dell'inquinamento acustico generato dagli aeromobili dell'aeroporto; tuttavia, il valore di imposta è cresciuto di anno in anno e al giorno d'oggi, nella maggior parte degli scali aeroportuali italiani, risulta pari a € 6,50, fino ad arrivare a € 9,00 all'aeroporto di Venezia, il più caro. [72]

Tutte le varie componenti di prezzo sono state tratte dai siti ufficiali dei gestori degli

aeroporti analizzati, in maniera tale da rendere ancora più realistica la stima dei costi operativi.

Infine, occorre specificare nel dettaglio il procedimento utilizzato per definire i costi operativi. Innanzitutto, si sottolinea che la stima del numero di passeggeri persi da ogni volo operante è stata condotta in riferimento al peso al decollo ammesso per ciascun velivolo in funzione della lunghezza di pista disponibile. Alla luce di ciò, le stime sono state condotte assumendo il caso più gravoso, corrispondente all'operatività del velivolo al massimo peso consentito.

Per tale motivo, sono stati utilizzati i grafici che esprimono per ogni aeromobile il massimo peso al decollo ammesso in base alla lunghezza di pista disponibile e utile al decollo. Tali grafici, definiti *Takeoff Performance Charts*, sono stati ricavati dai manuali delle aziende costruttrici dei velivoli di rappresentanza scelti per ciascuna classe di aeroporto. In questo modo, si è valutata la diminuzione di peso ammesso in funzione dell'accorciamento della pista dovuto allo spostamento della soglia.

Si è ipotizzato di poter aver un accorciamento massimo della pista pari a circa 150 metri, in conformità le richieste dimensionali delle normative per una RESA standard.

Per definire il numero di passeggeri persi dall'accorciamento della pista, si è ipotizzato che la diminuzione di peso ammesso sia possibile solamente trasportando un numero minore di passeggeri e bagagli. Supponendo un peso medio di 100 - 125 chilogrammi per ogni passeggero, comprensivo del peso di eventuali bagagli a mano o da stiva, si è ottenuto così il numero di passeggeri persi per ogni diminuzione di lunghezza della pista.

Di conseguenza, conoscendo il prezzo medio stimato del biglietto per ogni tipologia di volo, è stato possibile calcolare le perdite economiche relative al prezzo del biglietto.

Oltre al prezzo del biglietto, sono state considerate le spese medie sostenute da ogni passeggero per l'utilizzo del parcheggio dell'aeroporto, ipotizzando un tasso medio di occupazione di 1,5 passeggeri per ogni auto e una sosta media di 2 giorni per un aeroporto regionale, 3 giorni per un aeroporto di rilevanza nazionale e 4 giorni per un aeroporto di rilevanza internazionale.

Per ogni parcheggio, si è valutata la percentuale gestita dal gestore aeroportuale, per considerare dunque anche la perdita di guadagno del gestore per il mancato utilizzo dei parcheggi.

Infine, è stata studiata la perdita di guadagno dei vari servizi di trasporto che consentono ai passeggeri di giungere all'aeroporto, quali taxi, autobus e treni. Dall'analisi di alcuni studi di mobilità e di dati espressamente dichiarati dai gestori aeroportuali nei loro

Masterplan, è stato possibile definire le distribuzioni modali dei passeggeri ed assegnare dunque ad ogni modalità di trasporto la rispettiva percentuale di passeggeri che ne usufruiscono.

Di conseguenza, a partire dal prezzo medio del biglietto o della corsa per giungere all'aeroporto, è stata stimata anche la perdita di guadagno delle varie compagnie di trasporto.

#### 10.3.4. Analisi di un aeroporto regionale

Lo scalo rappresentante della categoria di aeroporti regionali dispone di una sola pista, la cui lunghezza utile per il decollo risulta pari a circa 1.400 metri.

Dal tariffario dei servizi offerti dall'aeroporto sono stati ricavati i seguenti diritti aeroportuali imposti dal gestore [4]:

- €40,45 per tonnellata servita per servizi di base di assistenza a terra, quali accettazione ed imbarco, assistenza passeggeri in arrivo/transito, smistamento bagagli, assistenza al parcheggio dell'aeromobile;
- €37,37 per tonnellata servita per servizi di varia entità, quali comunicazioni, servizio acqua, servizio toilette, pulizia interna, carico e scarico aeromobile;
- €6,50 per passeggero come addizionale comunale.

Per quanto riguarda i servizi commerciali offerti nel terminal, l'aeroporto dispone di un solo bistrot per cui si stima una spesa media per passeggero pari a € 6,00.

Il gestore aeroportuale, di norma, trattiene una quota di circa il 10-15 % del guadagno dell'attività, per cui in tale stima si considera il 10%.

L'aeroporto è raggiungibile solamente con auto privata, taxi e autobus.

L'auto privata costituisce il mezzo di trasporto più utilizzato per raggiungere lo scalo, attirando un bacio d'utenza che include anche utenti con un viaggio di circa un'ora e mezza. Pertanto, si stima che il 60 % dei passeggeri raggiunga l'aeroporto con la propria auto privata, facendola così sostare nel parcheggio dell'aeroporto. Questo è di proprietà del gestore e da un prezzo medio di 12,00 €/giorno, secondo le tariffe ufficiali ricavate dal sito dell'aeroporto.

Del 40% di passeggeri che giungono in aeroporto in taxi o autobus, si stimano delle distribuzioni pari a 10% e 30% rispettivamente.

Con un tasso medio di occupazione di 1,5 passeggeri per taxi, si può raggiungere lo scalo dal centro urbano o dalle stazioni ferroviarie del paese.

Dato un costo medio di €20-24 per una corsa dal centro urbano e di €14-18 dalla principale stazione ferroviaria, si stima un costo medio pari a €19,00.

Allo stesso modo, i passeggeri possono arrivare in aeroporto dal centro città o dalle stazioni ferroviarie utilizzando l'autobus, con un costo del biglietto di € 2,00. [26]

Le componenti di guadagno di un gestore aeroportuale sono rappresentate dagli introiti derivanti dalle tasse aeroportuali imposte ad ogni passeggero, dai guadagni sulle attività commerciali ed eventualmente sui parcheggi.

Per le perdite economiche delle attività commerciali si intendono quelle totali relative ai parcheggi e ai negozi e servizi di ristorazione interni al terminal.

Infine, per perdite economiche dei servizi di trasporto si intende la somma degli introiti persi da ogni singolo servizio, in riferimento alla distribuzione modale presentata.

Di seguito si riportano gli andamenti in funzione dello spostamento della soglia delle perdite del gestore aeroportuale, dei servizi di trasporto e delle attività commerciali e dei parcheggi per ogni volo con limitazioni operative:

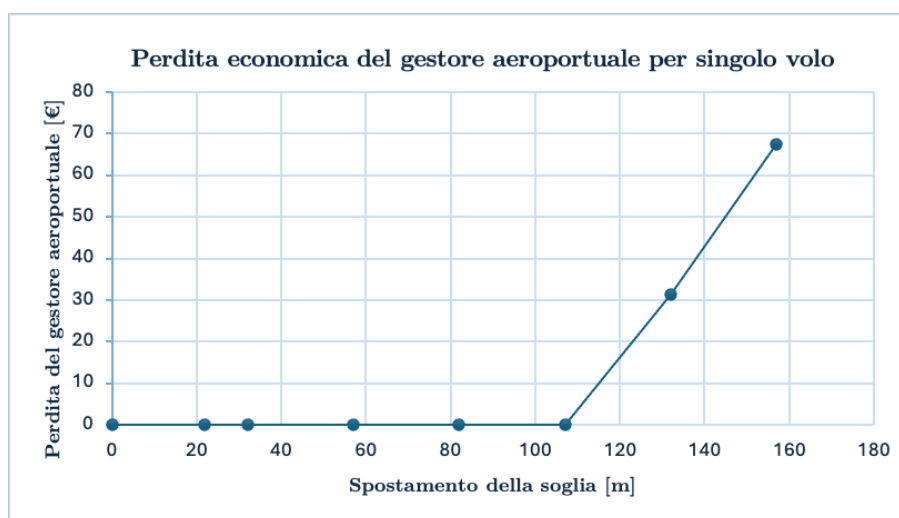


Figura 10.9: Perdita del gestore per singolo volo, Aeroporto regionale

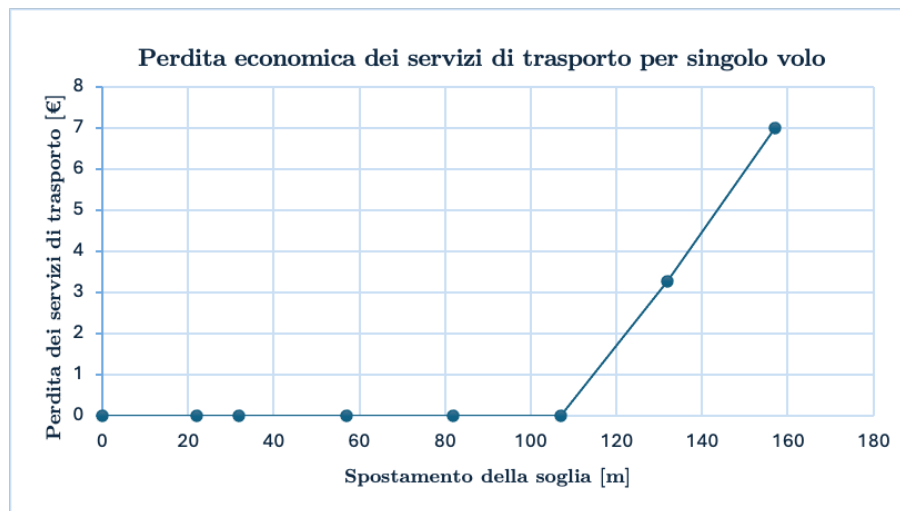


Figura 10.10: Perdita dei servizi di trasporto per singolo volo, Aeroporto regionale

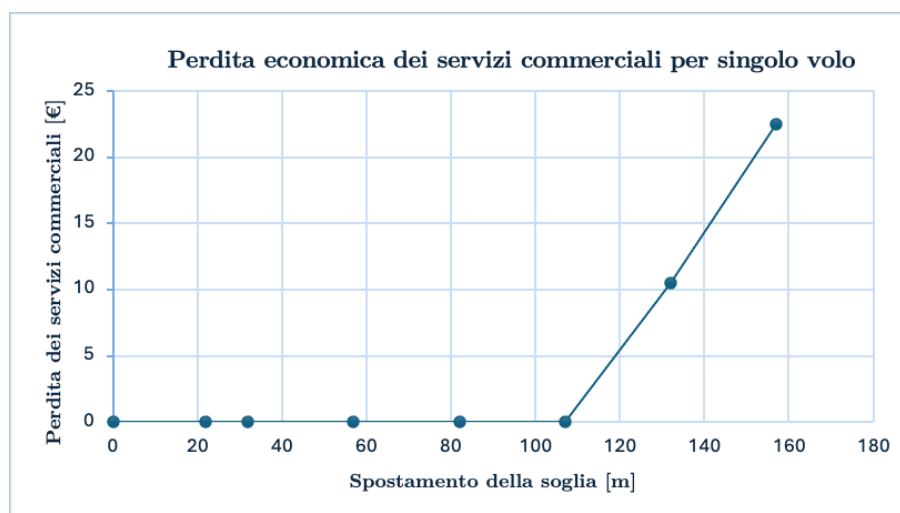


Figura 10.11: Perdita dei servizi commerciali per singolo volo, Aeroporto regionale

Tali valori rappresentano le perdite economiche per un singolo volo.

Nell'analisi dell'alternativa progettuale, tuttavia, si ritiene più opportuno e utile eseguire la stessa stima considerando il numero di movimenti all'anno, così da ottenere le tre tipologie di perdite per ogni anno di limitazioni operative.

Dall'analisi dei dati forniti dall'Archivio Assaeroporti, si è rilevato che nel 2024 l'aeroporto in esame ha registrato un totale di circa 15.000 movimenti. [3]

Per una stima futura, si fa riferimento alla previsione elaborata da EUROCONTROL sull'andamento del traffico aereo in Europa. Questa stima un tasso medio annuo di crescita del 2,0 % tra il 2025 e il 2033. [58] Dal momento che di anno in anno, dunque, si

verifica un aumento del 2,0 % del numero dei movimenti, si deduce che le tre tipologie di perdite economiche subiscono anch'esse un aumento del 2,0 % ogni anno.

Considerando un aumento del 2,0 %, pertanto, nel 2025 si stimano circa 15.300 movimenti e si stima che le perdite totali annuali ammontino a circa € 1.500.000,00 per un accorciamento massimo di 150 metri, con una conseguente perdita di circa quattro passeggeri per ciascun volo effettuato.

L'andamento delle tre tipologie di perdite nell'anno 2025 in funzione dello spostamento della soglia è illustrato all'interno dell'Allegato D, assieme ad altri grafici utili alla comprensione della stima.

### 10.3.5. **Analisi di un aeroporto di rilevanza nazionale**

Lo scalo rappresentante della categoria di aeroporti di rilevanza nazionale dispone di una sola pista la cui lunghezza utile al decollo risulta pari a circa 2.200 metri.

La stima viene eseguita in tale contesto facendo riferimento a voli a medio – lungo raggio che vengono effettuati nello scalo da un Boeing 737-800.

Dal tariffario dei servizi offerti dall'aeroporto si sono ottenute le seguenti informazioni [6][35]:

- diritti di imbarco: 9,16 €/pax per voli UE;
- diritti di sicurezza passeggero e bagaglio a mano: 3,97 €/pax;
- diritti di sicurezza bagaglio da stiva: €1,20 €/pax;
- diritti di approdo e partenza: 10,23 €/tonnellata servita fino a 25 tonnellate, poi 10,23 € per ogni tonnellata aggiuntiva;
- addizionale comunale: 6,50 €/pax;
- tassa per la città: 1,00 €/pax.

Il terminal dell'aeroporto dispone di un'ampia scelta di servizi di ristorazione (caffetterie, ristoranti italiani e internazionali e fast food), un duty-free e una libreria. Per tale motivo, si stima una spesa media per passeggero di €6,00 per i servizi di ristorazione (ad esempio per l'acquisto di un panino o di un caffè e un cornetto) e di €5,00 per i servizi commerciali, per un totale di €11,00 per passeggero in partenza.

Si stima che al gestore spetti il 15% del ricavato.

Secondo i dati pubblicati dall'ENAC all'interno del Piano Nazionale degli Aeroporti, elaborati sulla base dei Masterplan pubblicati e disponibili, il 54 % dei passeggeri raggiunge lo scalo aeroportuale in esame utilizzando il trasporto pubblico, di cui solamente l'1 % ricorre al trasporto ferroviario dai principali poli attrattivi della città. [57]

Pertanto, il 46 % dei passeggeri giunge all'aeroporto con la propria auto privata. Il costo medio giornaliero del parcheggio, ottenuto dalla media delle tariffe ufficiali dei parcheggi disponibili [6], risulta pari a € 17,00. Si sottolinea inoltre che il parcheggio non è gestito interamente dal gestore aeroportuale. Tuttavia, questo assume una percentuale non nota dai guadagni dei parcheggi, stimata nell'elaborato pari al 20%.

Del 54 % dei passeggeri che utilizza il trasporto pubblico, di cui l'1 % usufruisce del servizio ferroviario, si stima una distribuzione pari al 15 % per il trasporto via taxi e al 38 % per il trasporto via autobus da varie località italiane.

Il taxi risulta molto comodo per raggiungere l'aeroporto dai principali poli attrattivi della città e da altre destinazioni nelle vicinanze dello scalo. Sulla base delle tariffe fisse pubblicate nel sito dell'aeroporto, si stima un prezzo medio di € 40,00 per singola corsa, con un tasso di occupazione di 1,5 passeggeri per taxi.

Per quanto riguarda le altre modalità, il biglietto ferroviario per il collegamento diretto con la stazione principale ha un costo pari a € 2,70 [29], mentre per il trasporto via autobus è stata condotta una simulazione di diversi itinerari nazionali, che ha portato a stimare un costo medio di € 22,00 per passeggero. [15][16]

Di seguito si riportano le perdite economiche del gestore aeroportuale, dei servizi di trasporto e dei servizi commerciali in funzione dello spostamento della soglia di pista:

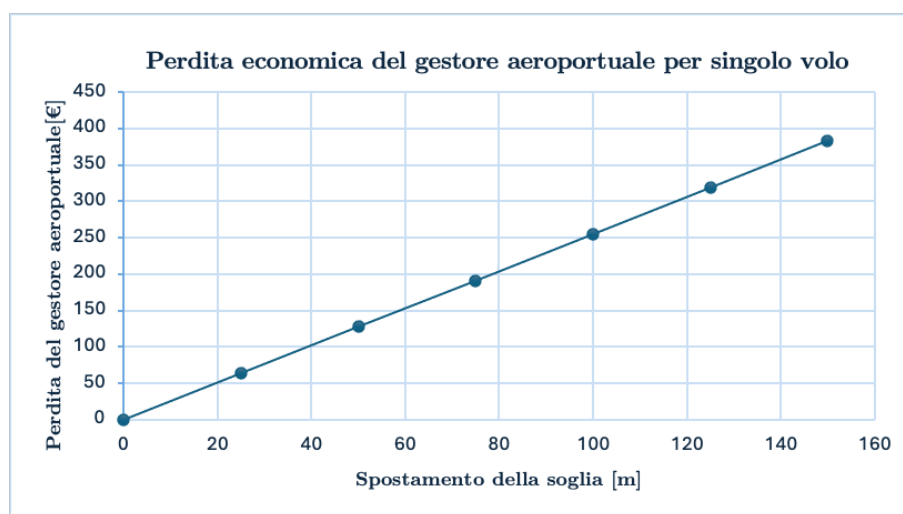


Figura 10.12: Perdita del gestore per singolo volo, Aeroporto di rilevanza nazionale

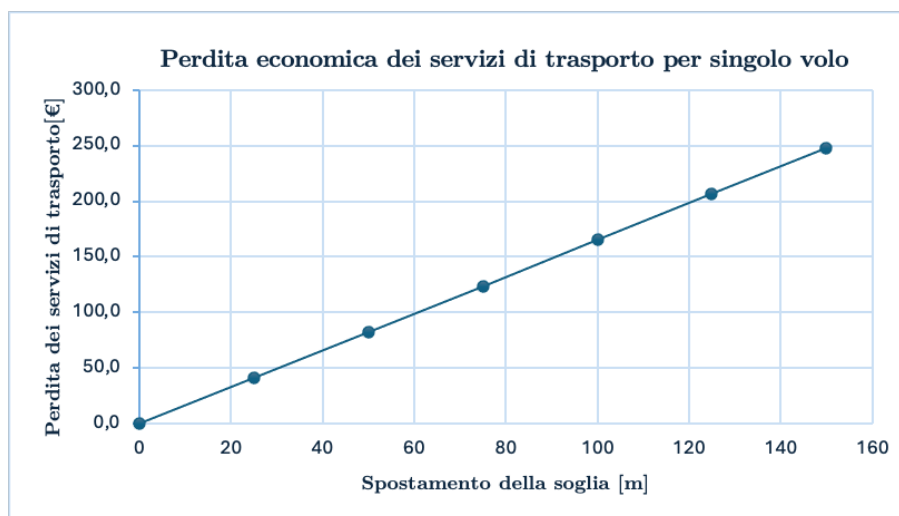


Figura 10.13: Perdita dei servizi di trasporto per singolo volo, Aeroporto di rilevanza nazionale

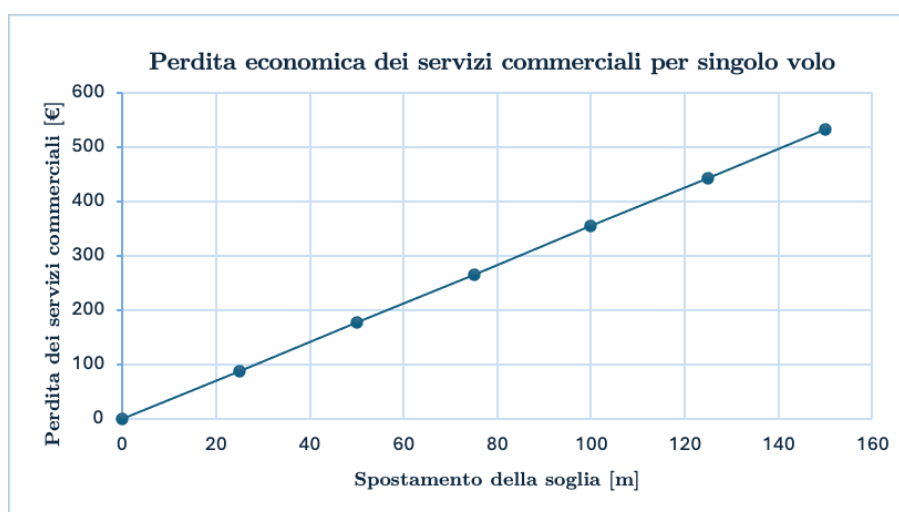


Figura 10.14: Perdita dei servizi commerciali per singolo volo, Aeroporto di rilevanza nazionale

Il numero complessivo di movimenti registrato dall'aeroporto nell'anno 2024 è risultato pari a circa 45.000.[3] La stima riportata si riferisce ai voli operati da un Boeing 737-800 a medio e lungo raggio, che rappresentano circa il 20% del totale dei movimenti annuali dello scalo.

Considerando il fattore medio annuo di crescita del traffico aereo pari al 2,0% definito dal EUROCONTROL [58], il numero di movimenti di questo tipo previsto per l'anno 2025 risulta pari a circa 9.200.

Sulla base di tali ipotesi, si stima una perdita economica del solo gestore aeroportuale di circa € 3.500.000,00 per il 2025 in caso di accorciamento della pista di 150 metri, corrispondente a una riduzione di venti passeggeri per volo per ciascun aeromobile.

L'andamento delle tre tipologie di perdite nell'anno 2025 in funzione dello spostamento della soglia è illustrato all'interno dell'Allegato D, assieme ad altri grafici utili alla comprensione della stima.

### 10.3.6. Analisi di un aeroporto di rilevanza internazionale

L'aeroporto di rilevanza internazionale preso in esame dispone di un'unica pista di lunghezza utile al decollo pari a circa 2.600 metri. La presente stima è stata condotta con riferimento ai voli di lungo raggio operati da aeromobili Boeing 787-900, i quali si assumono pari a circa il 5% del totale dei movimenti annuali effettuati dallo scalo in esame.

Dal tariffario dei servizi offerti dall'aeroporto si ottengono i seguenti dati [23][71]:

- diritti di imbarco: 7,24 €/pax per voli intera EU, 10,93 €/pax per voli extra EU;
- servizi di sicurezza: 2,80 €/pax per controllo passeggeri e 1,35 €/pax per il controllo dei bagagli da stiva;
- addizionale comunale: 6,50 €/pax.

Il terminal dispone di varie attività commerciali di diverse tipologie e di numerosi bar e ristoranti di varie fasce di costo. Considerando che un passeggero in transito trascorre mediamente più tempo all'interno del terminal rispetto a chi utilizza l'aeroporto come destinazione finale, si è stimata una spesa media pari a €10,00 per i servizi di ristorazione e ulteriori €10,00 per le attività commerciali presenti nello scalo (negozi, edicole, duty free, ecc.). Ne consegue una spesa complessiva di circa €20,00 per passeggero in partenza. Si stima che il gestore assuma una percentuale del 15% sul ricavato delle attività nel terminal.

Dal Piano Nazionale degli Aeroporti dell'ENAC, si ottiene la ripartizione modale sulla base dei Masterplan disponibili dell'aeroporto: l'83 % dei passeggeri raggiunge lo scalo con un mezzo privato, mentre solamente il 17 % utilizza il trasporto pubblico, consistente in autobus e taxi. Si assume una ripartizione modale del trasporto pubblico del 5 % per il servizio taxi e del 12 % per il trasporto via autobus. [57]

Il parcheggio non è interamente di proprietà del gestore, ma si stima che questo trattenga circa il 20% del guadagno. Dall'analisi dei prezzi dei vari parcheggi presenti nello scalo [23], si stima un prezzo medio giornaliero di circa € 19,00.

Per il trasporto via taxi, sono disponibili delle tariffe prefissate in funzione della tratta eseguita. Dai prezzi pubblicati, si ottiene un prezzo medio di circa € 55,00 per corsa, assumendo un'occupazione media di 1,5 persone per veicolo. [48]

Infine, simulando varie corse via autobus a partire dal centro città, da alcune località regionali e dalle principali città italiane nelle vicinanze dell'aeroporto [16], si è stimato un prezzo medio del biglietto pari a € 17,00.

A seguito di tali considerazioni, si riportano le perdite economiche del gestore aeroportuale, dei servizi di trasporto e dei servizi commerciali in funzione dello spostamento della soglia di pista:

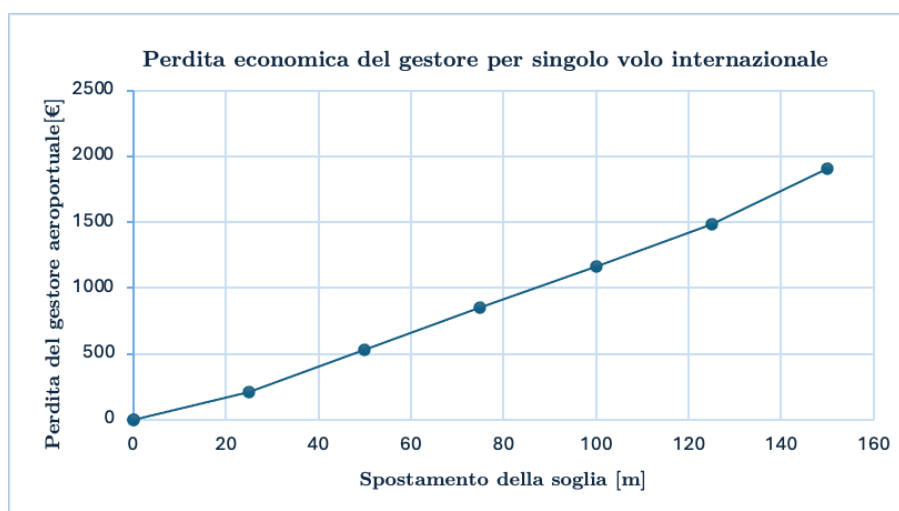


Figura 10.15: Perdita del gestore per volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale

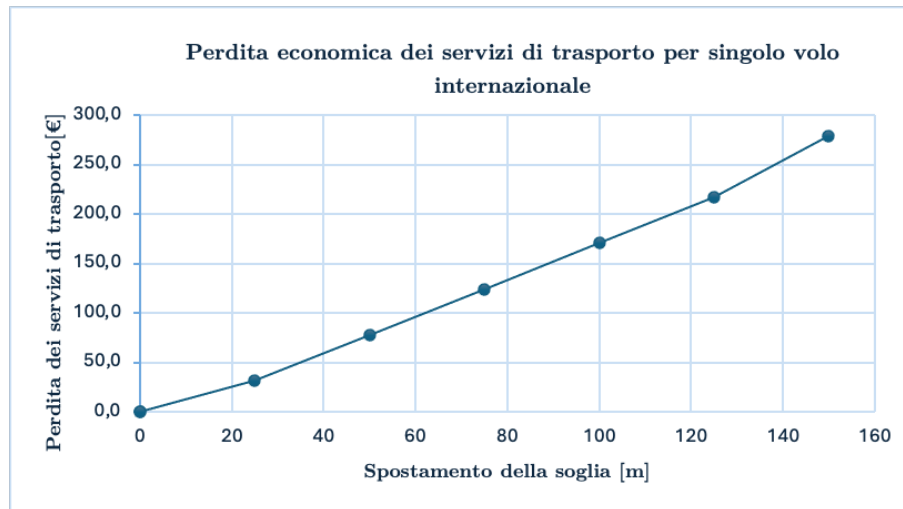


Figura 10.16: Perdita dei servizi di trasporto per volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale

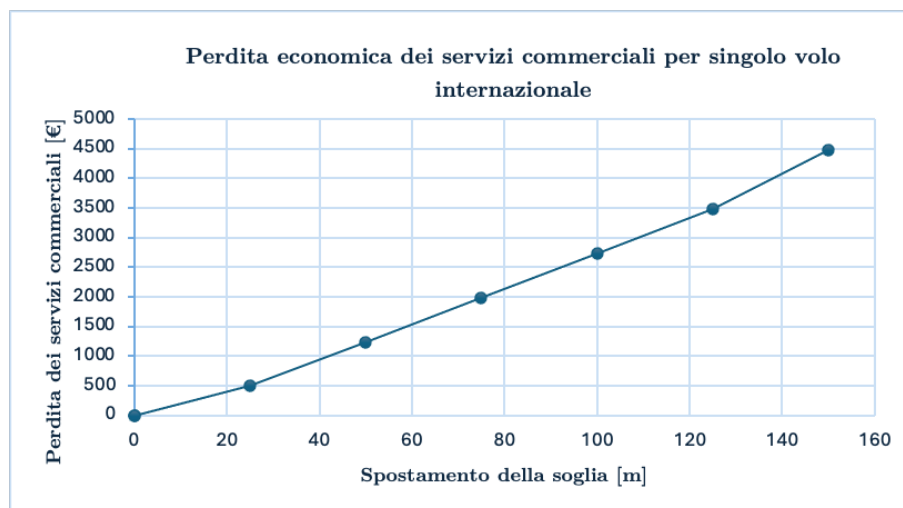


Figura 10.17: Perdita dei servizi commerciali per volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale

Nel 2024 l'aeroporto ha registrato un totale di circa 85.000 movimenti.[3] Supponendo che i voli intercontinentali effettuati da un Boeing 787-900 siano pari al 5 % del totale dei movimenti effettuati ogni anno, si ottiene un numero di movimenti pari a circa 4.200. Dal fattore medio annuo di crescita del traffico aereo del 2,0 %, si stima di conseguenza circa 4.300 movimenti nell'anno 2025.

Per un accorciamento di 150 metri della lunghezza di pista utile al decollo, si assume una perdita di 72 passeggeri per ogni volo.

Dal numero di movimenti atteso per tale tipologia di voli, si stima una perdita del gestore aeroportuale di circa € 8.000.000,00 nel 2025.

L'andamento delle tre tipologie di perdite nell'anno 2025 in funzione dello spostamento della soglia è illustrato all'interno dell'Allegato D, assieme ad altri grafici utili alla comprensione della stima.

## 10.4. Stima del costo dell'espansione fisica della RESA

La terza e ultima delle principali soluzioni progettuali adottabili per rendere conforme una RESA agli standard normativi è rappresentata dall'estensione fisica della RESA oltre i confini del dominio aeroportuale.

Questa rappresenta una soluzione particolarmente dispendiosa e complessa, in quanto entrano in gioco numerosi fattori economici, tecnici e amministrativi che non possono essere definiti in un unico caso di esempio. Infatti, gli interventi necessari possono differenziarsi notevolmente in funzione del contesto territoriale in cui i lavori vengono eseguiti. Si pensi, ad esempio, all'estensione di una RESA nel mare, che può richiedere la realizzazione di opere marittime come banchine aggiuntive per garantire un'area di sicurezza di dimensioni maggiori. In un contesto montano o collinare, invece, possono essere necessari tagli di rilevati, scavi profondi o opere di sostegno particolarmente complesse, con possibili vincoli geologici, idrogeologici e ambientali.

Dal punto di vista economico, questa soluzione comporta costi iniziali significativamente superiori rispetto a quelli derivanti dall'installazione di un EMAS o dall'adozione di limitazioni operative. Oltre ai costi di costruzione e di acquisizione dei terreni, possono essere rilevanti anche gli oneri amministrativi e legali legati ad espropri, permessi, compensazioni o eventuali contenziosi con i proprietari e le comunità locali.

Anche i costi di esercizio possono risultare non trascurabili, in quanto le operazioni di gestione e manutenzione devono essere applicate ad un'area molto più ampia, richiedendo più personale, mezzi e risorse.

Infine, a differenza dell'EMAS, l'allargamento fisico della RESA non possiede un valore specifico di vita utile definito. Questa caratteristica è evidenziata nella seguente figura riportata nella FAA Order 5200.9 [97]:

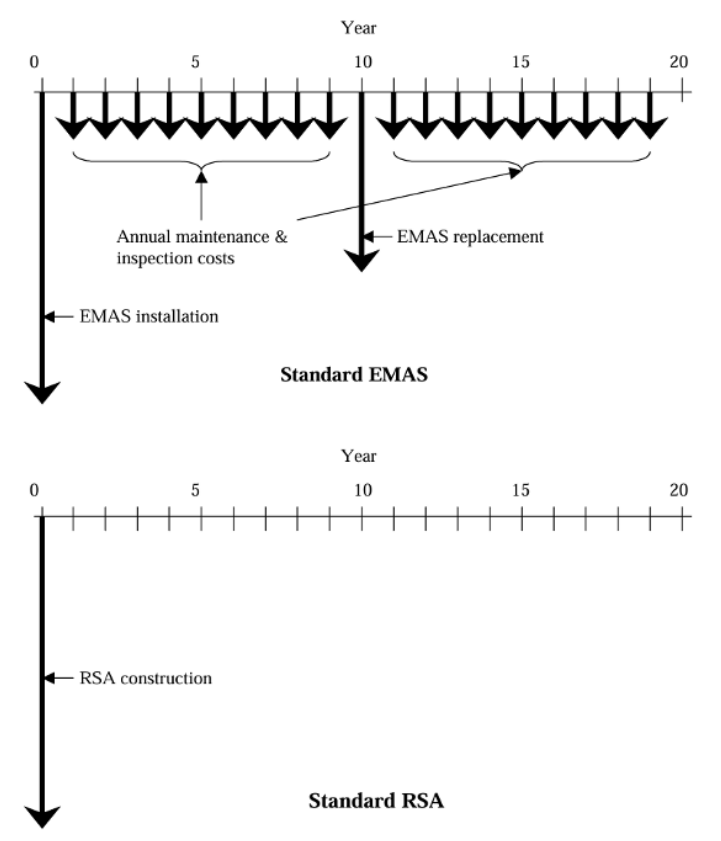


Figura 10.18: Confronto dei costi tra l'installazione di un EMAS e l'espansione di una RESA (FAA Order 5200.9, Figura B1)

Dal punto di vista ambientale, inoltre, questa alternativa risulta nettamente più impattante rispetto alle altre due. Essa, infatti, comporta l'utilizzo di nuovi terreni, che potrebbero altrimenti essere destinati a nuove coltivazioni o attività, nonché il disturbo della fauna e della vegetazione presenti nell'area prima dell'intervento.

Di fronte a tali problematiche ambientali e ai numerosi potenziali disagi che possono essere arrecati alle attività e ai residenti della zona interessata, tale soluzione potrebbe riscontrare forti resistenze o opposizioni da parte della società coinvolta.

Nel presente elaborato la stima dei costi viene presentata in maniera separata tra quelli necessari per espandere il dominio aeroportuale e quelli relativi alla preparazione della RESA.

#### 10.4.1. Costi di espansione dei confini aeroportuali

Data l'estrema sensibilità delle operazioni necessarie al contesto territoriale interessato, non è possibile fornire una stima unica del costo da sostenere per espandere i confini di

un dominio aeroportuale.

Per tale motivo, di seguito si fornisce una lista di alcune possibili operazioni necessarie all'espandimento dell'area di sicurezza:

- acquisto di nuovi terreni;
- espropri per terreni agricoli;
- espropri per zone residenziali e commerciali;
- demolizione di edifici ed eventuale ricollocazione;
- deviazione e/o rinterro di strade e ferrovie, piste ciclabili, elettrodotti, metanodotti, fognature, acquedotti, oleodotti, ecc.;
- indennizzi a residenti e attività;
- permessi demaniali per acquisire aree marittime;
- opere marittime di vario tipo;
- taglio di rilevati e controllo della stabilità dei versanti;
- drenaggi;
- barriere antineve e antivalanga.

Di seguito si forniscono alcune indicazioni di prezzo, a titolo esemplificativo.

Secondo i valori agricoli medi del 2024 della provincia di Sondrio (SO) in Lombardia, forniti dall'Agenzia delle Entrate, il costo al metro quadrato di un terreno agricolo semplice risulta pari a 1 €/m<sup>2</sup> per un terreno incolto, 3 €/m<sup>2</sup> per un terreno seminativo ordinario e 18 €/m<sup>2</sup> per un vigneto. Per l'acquisto di un terreno edificabile il costo cresce nettamente fino a 600 €/m<sup>2</sup> [36]. Nel caso, inoltre, di espropri di terreni agricoli, vengono previste delle maggiorazioni, ad esempio pari al 25 % del valore di mercato del terreno qualora il proprietario accettasse subito l'indennità, oltre a spese amministrative di circa 0,3 – 0,8 €/m<sup>2</sup>.

Se le operazioni prevedono la demolizione di aree residenziali e commerciali, occorre tener conto degli indennizzi nei confronti di residenti e commercianti: un residente, ad esempio, è tenuto a ricevere il valore di mercato del suo immobile oltre ai costi aggiuntivi per il trasloco, lo spostamento delle utenze e le spese notarili. Nel caso di un commerciante, devono essere garantite anche delle indennità per la perdita o l'interruzione dell'attività commerciale. Secondo il prezzario della regione Lombardia, il costo unitario di demolizione è pari a 19,36 €/m<sup>3</sup> per un edificio residenziale in conglomerato cementizio e a 10,80 €/m<sup>3</sup>

per un edificio industriale di materiale generico, incluso il carico e il trasporto dei detriti a discariche autorizzate.

Una componente significativa dei costi complessivi è rappresentata dallo spostamento e dall'interramento di opere infrastrutturali, quali strade e linee ferroviarie, necessari per garantire la continuità della viabilità a seguito della realizzazione del progetto. A titolo esemplificativo, per l'interramento di 6,20 km della linea ferroviaria Catania–Siracusa, finalizzato all'allungamento della pista dell'aeroporto di Catania, è stato stimato un costo superiore a 412 milioni di euro [21]. Questo dato evidenzia l'elevato onere economico richiesto da tali interventi, che costituiscono soltanto una parte della spesa totale necessaria per incrementare in tal caso la lunghezza della pista.

Già dall'analisi dei costi previsti per l'acquisto di nuovi terreni e per le indennità da corrispondere a residenti e attività commerciali, risulta evidente l'entità significativa degli investimenti necessari per realizzare questa soluzione progettuale, considerando che tali voci rappresentano solamente una parte dei costi iniziali complessivi.

#### **10.4.2. Stima dei costi per la preparazione della RESA**

Analogamente a quanto eseguito nella stima dei costi di preparazione del sito di installazione di un EMAS, viene fornita una stima dei costi necessari alla preparazione dell'area di sicurezza, una volta estesi i confini aeroportuali.

In tal caso, si è fatto riferimento al Prezzario della Regione Lombardia, ai Prezzari ANAS 2024 e 2025 e ad alcune relazioni di progetti aeroportuali italiani.

[46][45] Le percentuali relative ai costi di progettazione e di allestimento del cantiere sono state mantenute pari al 10 % e 4 % del costo di costruzione, rispettivamente.

Di seguito vengono rappresentate le varie lavorazioni considerate con i relativi prezzi unitari:

OPERAZIONE	PREZZO
Taglio superficiale dell'area da bonificare	0,36 €/m <sup>2</sup>
Bonifica profonda	2,08 €/m <sup>2</sup>
Bonifica superficiale	0,37 €/m <sup>2</sup>
Sbancamento (30 cm)	3,80 €/m <sup>2</sup>
Fornitura di materiale	7,02 €/m <sup>2</sup>
Riporto di terreno	7,96 €/m <sup>2</sup>
Stabilizzazione	5,12 €/m <sup>2</sup>
Compattazione	0,65 €/m <sup>2</sup>
Livellamento	0,12 €/m <sup>2</sup>
Copertura con strato erboso	21,13 €/m <sup>2</sup>
Inerbimento	16,40 €/m <sup>2</sup>
Sistemi di drenaggio interni all'infrastruttura	25,00 €/m <sup>2</sup>
Segnaletica verticale della viabilità interna	54,50 €/cad
Rimozione della segnaletica orizzontale esistente	3,51 €/m <sup>2</sup>
Segnaletica orizzontale della viabilità interna	0,72 €/m <sup>2</sup>

Tabella 10.4: Stima dei costi per la preparazione della RESA

Oltre ai costi già menzionati, è necessario considerare le spese relative allo spostamento degli aiuti alla navigazione aerea, ai sistemi di illuminazione e ai dispositivi elettronici, nonché alle eventuali opere di sostegno e al posizionamento di nuove recinzioni perimetrali.

I prezzi forniti in precedenza hanno carattere esemplificativo e rappresentano solo una parte della spesa complessiva necessaria per l'ampliamento fisico della RESA.

In conclusione, questa soluzione progettuale risulta complessa e costosa, con un impatto ambientale significativo, ma consente di ottenere un'area di sicurezza conforme agli standard normativi ICAO ed ENAC.

## 10.5. Stima del costo delle conseguenze

Il livello di sicurezza operativa offerto da un sistema d'arresto EMAS è strettamente correlato alle conseguenze potenziali derivanti da un evento di overrun.

In un'analisi economica, è necessario tenere conto di tutti i costi che devono essere sostenuti durante il ciclo di vita utile del letto d'arresto, ossia i costi iniziali di progettazione e installazione ed i costi di esercizio per la gestione e la manutenzione del sistema.

Oltre ai costi, è fondamentale valutare e quantificare in termini monetari anche i benefici ottenibili dall'installazione di un letto d'arresto. In tal modo, è possibile effettuare un confronto tra gli oneri da sostenere ed i vantaggi economici derivanti dal progetto.

In particolare, la valutazione economica delle conseguenze evitabili risulta di particolare utilità per quantificare le spese che non si renderebbero necessarie grazie alla presenza di un EMAS, rispetto ad altre soluzioni progettuali quali l'estensione fisica della RESA o lo spostamento della soglia di pista.

In quest'ottica, è possibile anche confrontare tipologie e configurazioni diverse di sistemi d'arresto EMAS, al fine di individuare la geometria e le capacità prestazionali più adeguate e preferibili in ambito tecnico ed economico.

Un confronto di questo tipo permette, ad esempio, di scegliere tra un letto d'arresto di lunghezza maggiore e con minore capacità decelerante ed un letto più corto ma capace di imprimere una forza decelerante più elevata sull'aeromobile. La prima opzione, pur risultando più onerosa per la realizzazione e la manutenzione, garantisce un arresto più graduale e moderato e meno traumatico, con un minore impatto sul comfort dei passeggeri. Questo si traduce in un livello di sicurezza maggiore, data la riduzione dei potenziali danni strutturali e sugli occupanti. D'altra parte, la seconda opzione risulta economicamente più conveniente, ma la maggiore intensità della decelerazione potrebbe comportare dei danni alla struttura e agli occupanti che, seppur di lieve entità, genererebbero dei costi aggiuntivi da includere in un'analisi economica.

Alla luce di queste considerazioni, la stima dei costi delle possibili conseguenze risulta fondamentale, sia che queste siano di lieve entità (danni superficiali all'aeromobile, lesioni minime sugli occupanti) o di grave entità (collasso del carrello anteriore, lesioni maggiori sugli occupanti). Tali stime possono essere sviluppate sia per scenari con EMAS sia per scenari in sua assenza, consentendo un confronto delle alternative progettuali in termini

di sicurezza operativa e di vantaggio economico.

### 10.5.1. Conseguenze sull'aeromobile

Per stimare il costo delle possibili conseguenze subite dalla struttura di un aeromobile durante un overrun, si ricorre alla quinta sezione della guida economica della FAA intitolata *Economic values for FAA investment and regulatory decisions, A guide: 2024 Update* [99]. Il quinto capitolo del documento presenta dei costi di riferimento relativi alla sostituzione o all'eventuale riparazione di danni per varie tipologie di aeromobili.

Per i costi di sostituzione (*replacement*), si assume che un aeromobile distrutto venga rimpiazzato con un sostituto di valore equivalente e non di nuova produzione. Infatti, il valore di un nuovo velivolo comporterebbe una sovrastima della perdita, introducendo un valore aggiunto rispetto al velivolo distrutto.

Nello studio, è stato creato un database di velivoli a seguito di un'analisi degli aerei in volo negli Stati Uniti d'America fino al novembre 2023, stimando di conseguenza il valore medio di mercato per ogni tipologia, pesato sul numero di aeromobili in attività ed espresso in dollari statunitensi del 2023:

Aircraft Category	Passenger		All-Cargo	
	Number of Aircraft	Weighted Average Current Market Value (millions)	Number of Aircraft	Weighted Average Current Market Value (millions)
Widebody 580k lbs or more MTOW	195	\$34.0		
Widebody less than 580k lbs MTOW	311	\$55.0		
Four-engine widebody			120	\$65.8
Three-engine widebody			86	\$3.7
Two engine widebody			491	\$47.8
Narrowbody 165k lbs or more MTOW	3,138	\$28.7	116	\$13.2
Narrowbody less than 165k lbs MTOW	1,042	\$10.5	25	\$6.4
Regional jet 61-99 seats or equivalent	1,053	\$12.4	NR	NR
Regional jet less than 61 seats or equivalent	341	\$1.7	1	\$1.1
Turboprop more than 60 seats or equivalent	9	\$9.8	14	\$2.4
Turboprop 20-60 seats or equivalent	18	\$6.0	NR	NR
<b>All Aircraft</b>	<b>6,107</b>	<b>\$22.7</b>	<b>853</b>	<b>\$39.2</b>

Figura 10.19: Stima dei valori di mercato degli aeromobili commerciali (Unit replacement and restoration costs of damaged aircraft, Tabella 5-1)

Si osserva come la perdita totale di un aeromobile comporti dei costi estremamente elevati, con una media di circa 22,7 milioni di dollari.

Tale stima permette di sottolineare anche sotto il profilo economico l'importanza di garantire un livello di sicurezza operativa tale da prevenire delle conseguenze gravi in caso di overrun. In particolare, l'obiettivo deve essere quello di evitare che si verifichino dan-

ni di entità tale da richiedere la dismissione definitiva del velivolo e la sua conseguente sostituzione. Tale principio deve essere applicato in egual misura per tutte le possibili alternative progettuali.

Si pensi, ad esempio, al grande vantaggio economico derivante dall'installazione di un EMAS in una RESA che presenti un ostacolo naturale oltre il suo limite ultimo, come un dirupo o un bacino d'acqua. La presenza del sistema d'arresto, progettato appositamente per decelerare e arrestare un velivolo al suo interno, diminuisce notevolmente la probabilità di uscita del mezzo dalla RESA, evento che comporterebbe quasi sicuramente la distruzione del velivolo. In tal caso, è evidente il beneficio apportato dall'EMAS che, seppur comporti dei costi iniziali e di esercizio, permette di risparmiare una spesa di milioni di dollari nel caso di un overrun.

I costi di riparazione (*restoration*) di un aeromobile mirano al ripristino del velivolo danneggiato ad uno stato operativo sicuro e conforme, senza sostituirlo integralmente. La stima di tali costi è stata eseguita analizzando alcuni incidenti che hanno coinvolto aeromobili commerciali tra il 1° luglio 1998 e il 1° luglio 2018. In questo modo, è stato possibile definire per ogni categoria di velivolo la perdita economica media per la flotta statunitense:

Aircraft Category	Number of Accident Aircraft	Average Loss Percentage	Weighted Average Current Market Value (millions) of U.S. Fleet	Average Loss Value (millions) for U.S. Fleet
Widebody 580k lbs or more MTOW	76	12%	\$34.0	\$4.1
Widebody less than 580k lbs MTOW	79	16%	\$55.0	\$8.6
Narrowbody 165k lbs or more MTOW	197	15%	\$28.7	\$4.2
Narrowbody less than 165k lbs MTOW	138	25%	\$10.5	\$2.6
Regional jet 61-99 seats	40	26%	\$12.4	\$3.2
Regional jet less than 61 seats	48	24%	\$1.7	\$0.4
Turboprop more than 60 seats	68	21%	\$9.8	\$2.0
Turboprop 20-60 seats	62	27%	\$6.0	\$1.7
Turboprop under 20 seats	88	28%	NR	NA
Piston engine	2	52%	NR	NA
<b>All Aircraft</b>	<b>798</b>	<b>20%</b>	<b>\$22.7</b>	<b>\$4.4</b>

Figura 10.20: Costi medi di riparazione di aeromobili commerciali (Unit replacement and restoration costs of damaged aircraft, Tabella 5-4)

In base ai danni registrati negli incidenti analizzati, è stato stimato un costo medio di 4,4 milioni di dollari per la riparazione. Tale valore risulta sensibilmente inferiore rispetto al costo medio di sostituzione di un aeromobile distrutto, nonostante esso rappresenti comunque una spesa di entità rilevante.

In particolare, dal momento che il danno strutturale più probabile durante l'ingresso di un aeromobile in un EMAS è rappresentato dal collasso del carrello, si fa riferimento al prezzario delle sostituzioni e riparazioni della società lituana FL Technics [70], operante nel settore dell'aviazione. Per clienti senza contratto, la società stima un costo medio di rimpiazzo pari a € 8.800 per il carrello anteriore e € 15.900 per il carrello principale.

### 10.5.2. Conseguenze sugli occupanti

L'obiettivo fondamentale della progettazione di un letto d'arresto EMAS è garantire l'incolumità degli occupanti, prima ancora dell'integrità strutturale dell'aeromobile.

Le lesioni subite da passeggeri e membri dell'equipaggio comportano dei costi da considerare sempre in una valutazione economica. In tal modo, è possibile anche valutare la convenienza economica di un EMAS più corto e performante, pertanto più economico, ma comportante danni strutturali e lesioni accettabili, piuttosto che un EMAS più lungo e più costoso, ma che garantisce delle sollecitazioni minime alla struttura e agli occupanti, garantendo l'assenza di danni strutturali e lesioni sugli occupanti.

Si ricorre nuovamente al documento guida della FAA in ambito economico. [98] La seconda sezione, infatti, spiega come possano essere valutati i valori di ogni singola vita e delle lesioni subite durante un incidente.

Per quantificare il valore di una vita umana, la FAA ricorre al concetto di vita statistica (VSL, *Value of statistical life*). Questo non rappresenta il valore di una vita individuale, bensì è un'unità economica per quantificare i benefici in termini di vite salvate.

Per definizione, la VSL rappresenta la quota economica che la società sarebbe disposta a pagare per ottenere una riduzione anche minima del rischio di incidente.

Nel 2023 il VSL risultava pari a 13,2 milioni di dollari.

Sulla base del VSL, equiparabile al costo di una persona lesa mortalmente, la FAA ha realizzato una stima economica dell'entità delle lesioni che un occupante può subire, sfruttando la scala AIS (*Abbreviated Injury Scale*). L'AIS è una scala di sei livelli di severità delle lesioni, molto utilizzata nel mondo della medicina legale, già vista nel Capitolo 8.

Ad ogni livello AIS, la FAA ha associato un valore percentuale rispetto al VSL, ottenendo di conseguenza i costi da sostenere per ogni occupante ferito, in base alla gravità delle lesioni subite:

AIS Code	Description of Injury	Fractional Fatality Values Value of Life	Dollar Value
AIS 1	Minor	0.003	\$39,600
AIS 2	Moderate	0.047	\$620,400
AIS 3	Serious	0.105	\$1,386,000
AIS 4	Severe	0.266	\$3,511,200
AIS 5	Critical	0.593	\$7,827,600
AIS 6	Fatal	1.000	\$13,200,000

Figura 10.21: Stima del valore dei livelli AIS di severità delle lesioni subite dagli occupanti ("Treatment of the values of life and injury in economic analysis", Tabella 2-3)

Come si osserva, il valore della VSL coincide con il livello AIS 6, corrispondente a lesioni fatali. Inoltre, tale valutazione trova una corrispondenza con la classificazione delle lesioni condotta dall'ICAO, la quale prevede 3 livelli di severità (minore, grave, fatale).

Tale tabella risulta utile per comprendere meglio i risvolti economici di un incidente e permette di dare una risposta al confronto tra le due configurazioni di EMAS enunciate precedentemente.

Infatti, la realizzazione di un sistema d'arresto più corto ed economico comporterebbe dei costi iniziali e di gestione ridotti, ma, in caso di overrun, i danni potenziali all'aeromobile e le lesioni sugli occupanti, seppur di lieve entità, si tradurrebbero comunque in spese significative. Questi costi devono essere inclusi nell'analisi complessiva dei costi da sostenere durante il ciclo di vita utile dell'EMAS.

In tale elaborato si vuole porre come obiettivo prioritario la tutela della sicurezza degli occupanti. Per tale motivo, da un punto di vista strutturale risulta preferibile un EMAS più lungo che, seppur più oneroso, possa garantire la riduzione o l'assenza di danni strutturali e di lesioni sugli occupanti, mantenendo anche un livello accettabile di comfort dei passeggeri durante l'incidente. A seguito della valutazione economica dei danni e del valore della vita, tale soluzione si dimostra sostenibile anche sotto il profilo economico, poiché, nel caso in cui si verifichi un overrun, i costi complessivi risulterebbero inferiori rispetto a quelli associati a un sistema più corto e performante.

## 10.6. Confronto delle alternative progettuali

Alla luce dei risultati ottenuti e delle stime economiche condotte, è possibile eseguire un confronto delle tre tipologie di soluzioni progettuali presentate.

Per la preparazione del sito di installazione, i prezzi unitari medi ottenuti in Italia risultano pari a:

- 140,60 €/m<sup>2</sup> per la pavimentazione di supporto al sistema;
- 119,73 €/m<sup>2</sup> per la pavimentazione di *setback*.

Per quanto riguarda i costi di installazione e manutenzione, il Report 29 dell'ACRP ha evidenziato come i prezzi proposti dalla FAA Order 5200.9 siano generalmente sottostimati. [41] Al fine di ottenere una stima bilanciata, è stato pertanto adottato un costo medio unitario, calcolato considerando i valori riportati da entrambi i documenti, e opportunamente adeguato tenendo conto dell'inflazione intervenuta negli anni, così da evitare sia una sottostima sia una sovrastima del prezzo effettivo. Alla luce di ciò, si sono ottenuti i seguenti costi unitari, espressi in € del 2025:

- 1071,20 €/m<sup>2</sup> per l'installazione di un EMAS;
- 24,50 €/m<sup>2</sup> ogni anno per le operazioni di manutenzione.

Supponendo di installare un sistema d'arresto di larghezza pari a 45 metri e lunghezza di 90 metri, preceduto da una distanza di *setback* di 60 metri, si ottengono i seguenti risultati:

- circa 5.230.000 € per la preparazione del sito e l'installazione del letto d'arresto, da sostenere all'anno 0;
- circa 99.000 € da sostenere ogni anno per la manutenzione del sistema.

Di conseguenza, considerando un arco di vita utile di 20 anni, la spesa totale da sostenere per tale soluzione risulta pari a circa 5.330.000 €.

Il suddetto costo finale riferito ad un periodo di venti anni può essere così utilizzato per eseguire un confronto con le altre due tipologie di soluzioni considerate.

Per uno spostamento della soglia di 150 metri, l'analisi economica riportata nel paragrafo 10.3 ha restituito i seguenti risultati:

- Aeroporto regionale: perdita totale stimata di circa 1.500.000 € per l'anno 2025, corrispondente a circa 30.000.000 € nell'arco di venti anni;
- Aeroporto di rilevanza nazionale: perdita del solo gestore stimata in 3.500.000 € per i voli a medio e lungo raggio, pari a circa 70.000.000 € in venti anni;
- Aeroporto di rilevanza internazionale: considerando soltanto i voli internazionali operati da un Boeing 787-900, si stima una perdita del gestore di circa 8.000.000 € nel 2025, corrispondente a oltre 150.000.000 € nell'arco di venti anni.

Le stime riportate si riferiscono, inoltre, esclusivamente alle spese legate alle limitazioni operative conseguenti ad una riduzione del peso massimo ammesso al decollo per l'aeromobile di riferimento. A tali spese vanno aggiunti i costi iniziali sostenuti nell'anno 0 per lo spostamento della soglia e le varie operazioni correlate alla realizzazione di questa soluzione.

Per quanto riguarda l'estensione dei limiti della RESA tramite l'acquisizione di nuovi terreni oltre il confine aeroportuale, sono stati presentati dei costi unitari esemplificativi, ad esempio per l'acquisto di terreni di varia tipologia, per gli indennizzi nei confronti di residenti e commercianti e per la demolizione degli edifici esistenti. I prezzi indicati evidenziano come le spese necessarie per ampliare i confini aeroportuali siano ingenti, da aggiungere ai costi legati alla preparazione della nuova area destinata a diventare RESA.

Dunque, in termini economici riferiti alle spese di costruzione, progettazione e gestione delle tre alternative progettuali, l'installazione di un sistema d'arresto EMAS risulta l'alternativa economicamente più conveniente. Ciò vale a prima vista anche in contesti privi di vincoli particolari, nei quali i costi per l'allargamento fisico di una RESA possono essere inferiori rispetto a situazioni caratterizzate da numerosi vincoli da superare, ad esempio tramite interrimento di linee ferroviarie o strade esistenti.

Un ulteriore vantaggio economico legato all'installazione di un EMAS riguarda le tempistiche di realizzazione dell'intervento. Secondo l'azienda produttrice attuale, infatti, per l'installazione di un sistema d'arresto vengono previste circa 3-4 settimane, utilizzando solamente le ore notturne, quando il traffico aeroportuale è assente o molto ridotto. Le altre due alternative progettuali necessitano di tempi maggiori, con possibili disagi operativi quali la chiusura temporanea della pista o la rischedulazione dei voli, comportando perdite economiche aggiuntive.

Infine, un vantaggio significativo è legato alle conseguenze sugli occupanti, non solamente per quanto riguarda la sicurezza operativa, ma anche sotto il profilo economico. Un sistema d'arresto EMAS, infatti, è progettato appositamente secondo normativa per arrestare in sicurezza un velivolo, evitando danni strutturali e lesioni sugli occupanti grazie ad una decelerazione graduale e controllata.

Le altre alternative, pur garantendo RESA di maggiori dimensioni, non assicurano la protezione del velivolo né degli occupanti. La stima delle spese correlate alle lesioni, basata sulla categoria AIS, mostra costi elevati anche per lesioni minime; ad esempio, per una categoria AIS 3, corrispondente a lesioni gravi, le spese possono superare un milione di dollari per passeggero. L'EMAS consente di ridurre significativamente tali costi, e anche in caso di sostituzione parziale o totale dopo un overrun, rimane l'alternativa più conve-

niente economicamente.

Nonostante tali considerazioni, si suggerisce di effettuare un confronto economico completo del ciclo di vita delle varie alternative, da utilizzare come criterio di scelta per la soluzione progettuale finale di conformazione della RESA agli standard normativi. Tale analisi sarà approfondita nel Capitolo 11.



# 11 | Proposta di un modello decisionale

L'installazione di un sistema d'arresto EMAS rappresenta una delle principali soluzioni progettuali adottabili qualora ci fossero dei vincoli di varia natura che impediscono la realizzazione di un'area di sicurezza a fine pista conforme agli standard normativi.

Il gestore aeroportuale è tenuto a definire la soluzione progettuale più conveniente, sia dal punto di vista tecnico - operativo sia economico, in relazione alle risorse disponibili e alle esigenze specifiche del proprio scalo aeroportuale. Talvolta, tale scelta può nascondere delle difficoltà legate alla molteplicità di parametri di valutazione da considerare simultaneamente e ai vantaggi e svantaggi apportati da ogni singola alternativa.

Per tale motivo, nel presente elaborato viene proposto un modello finalizzato a supportare il gestore aeroportuale nell'identificazione dello scenario progettuale più adeguato al suo contesto aeroportuale.

Il modello decisionale proposto si basa su una valutazione del rischio (in inglese *Risk Assessment*) per definire l'urgenza e la necessità di un intervento progettuale. In seguito, la scelta della soluzione ottimale viene eseguita tramite una serie di criteri fondamentali, tra cui quelli economici, operativi e ambientali, che guidano la fase decisionale.

Prima di presentare il modello, si ritiene opportuno eseguire una breve trattazione sulla valutazione del rischio, analizzando come questa venga applicata nel contesto italiano, secondo le disposizioni dell'Ente Nazionale dell'Aviazione Civile (ENAC).

Inoltre, viene proposta una nuova soglia nella matrice di rischio, in grado di identificare delle situazioni particolarmente critiche in cui l'installazione di un letto d'arresto EMAS risulta indispensabile per minimizzare le conseguenze di un potenziale overrun.

## 11.1. Valutazione del rischio

Per definizione, la valutazione del rischio consiste in un'analisi globale dei pericoli e dei rischi per la salute e la sicurezza associati ad una situazione definita.

Nel mondo ingegneristico, la valutazione del rischio rappresenta un processo fondamentale per identificare le opere necessarie alla prevenzione e protezione dei soggetti ed oggetti esposti ad un pericolo definito.

Infatti, l'identificazione dei rischi e pericoli associati ad una situazione specifica permette di valutare i possibili fattori di mitigazione e compensazione che possono essere attuati per garantire un livello di rischio accettabile.

Il principio fondamentale è l'impossibilità di annullare un rischio legato ad una attività specifica. Nel caso di overrun, l'evento è sempre definito da un certo livello di rischio, il cui annullamento risulterebbe in una cessazione di tutte le attività aeroportuali.

L'analisi del rischio è una componente di un processo più grande e complesso, definito come gestione del rischio (in inglese *Risk Management*). In tal caso, vengono identificati gli *hazard* relativi ad una situazione o attività specifica, ovvero le fonti potenziali di danno o conseguenze indesiderate. Successivamente, per ogni *hazard* viene quantificato il livello di rischio, valutando se questo sia accettabile, tollerabile o non accettabile. Di fronte a tale valutazione, si definiscono delle strategie di intervento per rendere accettabile o al limite tollerabile il rischio residuo. [54]

Le due componenti fondamentali del rischio sono la probabilità di accadimento e la severità delle conseguenze apportate dallo specifico *hazard*.

Il rischio associato ad un evento di overrun è pertanto espressione della probabilità di accadimento della fuoriuscita e della gravità delle conseguenze apportate tanto alla struttura dell'aeromobile quanto ai suoi occupanti.

L'ente regolatore italiano ENAC prevede le seguenti fasi per condurre un *Risk Assessment* [56]:

1. consultazione degli stakeholders: si identificano tutti i soggetti coinvolti nella valutazione;
2. definizione e descrizione del contesto e del sistema;
3. identificazione degli hazard e dei rischi associati;
4. valutazione della probabilità che un evento si verifichi;
5. definizione delle potenziali conseguenze (severità);
6. valutazione del rischio;
7. definizione delle mitigazioni e valutazione del rischio residuo;
8. monitoraggio del livello di rischio e Risk Assessment Review.

### 11.1.1. Valutazione della probabilità di accadimento

La valutazione della probabilità di accadimento può essere svolta qualitativamente o quantitativamente, a seconda dei dati disponibili relativi all'evento in esame. Infatti, qualora non si disponesse di dati quantitativi sufficienti, l'ENAC ricorre al concetto di *likelihood*, ovvero una stima qualitativa della probabilità o della frequenza di accadimento di un evento specifico.

L'ENAC fornisce una tabella che rapporta le tre definizioni possibili di probabilità:

- *likelihood*, in termini qualitativi;
- *probability*, ovvero la probabilità di occorrenza di un evento espressa in forma esponenziale in riferimento al numero di movimenti o di ore di volo;
- *frequency*, ovvero la frequenza di accadimento in riferimento a vari intervalli temporali.

Likelihood	Meaning <sup>3</sup>	Frequency	Probability	Airports
<b>Frequent</b>	<i>Likely to occur many times (has occurred frequently)</i>	More than once per week	Probability of occurrence per operation/operational_hour equal to or greater than $1 \times 10^{-3}$	Expected to occur more than once per week or every 2500 departures, whichever occurs sooner
<b>Occasional</b>	<i>Likely to occur sometimes (has occurred infrequently)</i>	Expected to occur about once every month	Probability of occurrence per operation/operational_hour less than $1 \times 10^{-3}$ but equal to or greater than $1 \times 10^{-5}$	Expected to occur about once every month or 250,000 departures, whichever occurs sooner
<b>Remote</b>	<i>Unlikely to occur, but possible (has occurred rarely)</i>	Expected to occur about once every year	Probability of occurrence per operation/operational_hour less than $1 \times 10^{-5}$ but equal to or greater than $1 \times 10^{-7}$	Expected to occur about once every year or 2.5 million departures, whichever occurs sooner
<b>Improbable</b>	<i>Very unlikely to occur (not known to have occurred)</i>	Expected to occur once every 10-100 years	Probability of occurrence per operation/operational_hour less than $1 \times 10^{-7}$ but equal to or greater than $1 \times 10^{-9}$	Expected to occur once every 10-100 years or 25 million departures, whichever occurs sooner
<b>Extremely Improbable</b>	<i>Almost inconceivable that the event will occur</i>	Expected to occur less than every 100 years	Probability of occurrence per operation/operational_hour less than $1 \times 10^{-9}$	Expected to occur less than every 100 years

Figura 11.1: Correlazione tra le varie espressioni di probabilità di accadimento di un evento (Elaborazione e valutazione del Safety Risk Assessment, ENAC, Tabella 2) [56]

Successivamente, ciascuna probabilità di accadimento viene quantificata tramite un valore numerico da 1 a 5:

<i>Likelihood</i>	<i>Meaning</i>	<i>Value</i>
Frequent	Likely to occur many times (has occurred frequently)	5
Occasional	Likely to occur sometimes (has occurred infrequently)	4
Remote	Unlikely to occur, but possible (has occurred rarely)	3
Improbable	Very unlikely to occur (not known to have occurred)	2
Extremely improbable	Almost inconceivable that the event will occur	1

Figura 11.2: Quantificazione della probabilità di accadimento (Elaborazione e valutazione del Safety Risk Assessment, ENAC, Tabella 1) [56]

### 11.1.2. Valutazione della severità delle conseguenze

La seconda componente del rischio viene espressa utilizzando i livelli di severità delle conseguenze dell'ICAO all'interno del Doc 9859 [78]:

<b>Severity</b>	<b>Meaning</b>	<b>Value</b>
<b>Catastrophic</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aircraft / equipment destroyed</li> <li>• Multiple deaths</li> </ul>	A
<b>Hazardous</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A large reduction in safety margins, physical distress or a workload such that operational personnel cannot be relied upon to perform their tasks accurately or completely</li> <li>• Serious injury</li> <li>• Major equipment damage</li> </ul>	B
<b>Major</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A significant reduction in safety margins, a reduction in the ability of operational personnel to cope with adverse operating conditions as a result of an increase in workload or as a result of conditions impairing their efficiency</li> <li>• Serious incident</li> <li>• Injury to persons</li> </ul>	C
<b>Minor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuisance</li> <li>• Operating limitations</li> <li>• Use of emergency procedures</li> <li>• Minor incident</li> </ul>	D
<b>Negligible</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Few consequences</li> </ul>	E

Figura 11.3: Livelli di severità del rischio (ICAO Doc 9859, Tabella 2 [78])

Si osserva come il grado di severità si riferisca sia alle conseguenze sulla struttura dell'aeromobile, sia a quelle sugli occupanti. Ciò lo rende un criterio di riferimento utile e immediato per stimare il livello di severità associato a un evento di overrun.

### 11.1.3. Matrice di rischio

Dopo aver definito la probabilità di accadimento dell'evento e la severità delle possibili conseguenze, tali componenti vengono integrate per definire il livello di rischio, secondo la relazione:

$$R = f(P, S) \quad (11.1)$$

con  $P$  probabilità nelle sue varie forme di espressione e  $S$  severità delle conseguenze.

Le varie combinazioni che generano i diversi livelli di rischio vengono raccolti per costruire la cosiddetta matrice di rischio.

In base alla probabilità di accadimento dell'evento e alla severità delle potenziali conseguenze, vengono identificati tre livelli di accettabilità del rischio, definiti dall'ENAC come segue:

- **Rischio non accettabile (zona rossa):** sono necessarie delle mitigazioni che riconducano ad un rischio tollerabile o accettabile;
- **Rischio tollerabile (zona gialla):** è necessario definire delle misure di mitigazione per ricondurre il rischio al livello più basso ragionevolmente possibile;
- **Rischio accettabile (zona verde):** è consigliabile, laddove possibile, la riduzione ulteriore del rischio al livello più basso ragionevolmente praticabile.

L'ENAC adotta la stessa matrice di rischio presentata dall'ente internazionale ICAO all'interno del Doc 9859 [78]:

Risk probability	Risk severity				
	Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
Frequent 5	<b>5A</b>	<b>5B</b>	<b>5C</b>	<b>5D</b>	<b>5E</b>
Occasional 4	<b>4A</b>	<b>4B</b>	<b>4C</b>	<b>4D</b>	<b>4E</b>
Remote 3	<b>3A</b>	<b>3B</b>	<b>3C</b>	<b>3D</b>	<b>3E</b>
Improbable 2	<b>2A</b>	<b>2B</b>	<b>2C</b>	<b>2D</b>	<b>2E</b>
Extremely improbable 1	<b>1A</b>	<b>1B</b>	<b>1C</b>	<b>1D</b>	<b>1E</b>

Figura 11.4: Matrice di rischio (ICAO Doc 9859)

Tale matrice di rischio costituisce la base di partenza del modello decisionale proposto. Infatti, attraverso la valutazione del rischio è possibile individuare il livello di rischio associato a una determinata situazione aeroportuale, sulla cui base si potrà stabilire la necessità di adottare un intervento infrastrutturale o, in alternativa, di introdurre limitazioni operative finalizzate a ridurre il valore.

Secondo il Doc 9859 *Safety Management Manual* dell'ICAO [78], le misure di mitigazione del rischio si traducono in generale in cambiamenti nelle procedure operative, negli equipaggiamenti dell'infrastruttura e nell'infrastruttura vera e propria.

L'ICAO suddivide le misure di mitigazione in tre tipologie:

- **misure di evitamento:** il rischio viene eliminato completamente ponendo fine all'attività, dal momento che il rischio eccederebbe i benefici apportabili applicando una qualsiasi altra misura di mitigazione;
- **misure di riduzione:** riducono la frequenza o la gravità delle conseguenze;
- **misure di segregazione:** sono interventi che riducono l'impatto di un rischio, isolandone gli effetti evitando che questo si propaghi o creando ridondanza per garantire che, anche in caso di guasto o di evento, la sicurezza sia preservata.

Nel modello decisionale proposto verranno prese in considerazione esclusivamente le misure di riduzione come interventi di mitigazione del rischio. Difatti, al fine di minimizzare le conseguenze di un overrun e diminuire la probabilità che l'aeromobile fuoriesca dall'area di sicurezza a fine pista, le alternative progettuali adottabili mirano a ridurre il livello di rischio, senza tuttavia ricorrere né all'eliminazione dell'attività né all'isolamento gli effetti dei potenziali danni.

#### 11.1.4. Proposta di una soglia nella matrice di rischio

Nel presente elaborato viene introdotta una soglia aggiuntiva all'interno della matrice di rischio. Qualora il livello di rischio risulti superiore a tale soglia, l'installazione di un sistema d'arresto EMAS rappresenta l'unica soluzione concretamente perseguibile per mitigare le conseguenze derivanti da un potenziale evento di overrun.

La soglia introdotta può essere definita come soglia di intervento ed è strettamente correlata al concetto di rischio. Come evidenziato nella figura 11.5, infatti, essa coincide con la soglia che distingue il livello di rischio tollerabile dal livello di rischio non accettabile. Tuttavia, la sua validità è limitata a contesti particolarmente critici, caratterizzati dalla presenza di vincoli di varia natura (infrastrutturale, naturale, ecc.) che possono limitare

fortemente la possibilità di estendere una RESA e che determinano un livello di rischio molto elevato. In tali situazioni, un evento di overrun può comportare conseguenze catastrofiche o molto gravi, qualora un aeromobile oltrepassi il limite dell'area di sicurezza.

In tali contesti, data l'elevata criticità derivante da un evento di overrun e l'alta frequenza attesa di tali eventi, è necessario intervenire nel più breve tempo possibile. La soglia introdotta nella matrice di rischio consente di ridurre i tempi decisionali, optando direttamente per l'installazione di un letto d'arresto.

Pertanto, la soglia funge da strumento per facilitare e velocizzare l'identificazione dell'alternativa progettuale più adeguata e sicura ad uno specifico contesto, senza dover valutare le altre soluzioni.

Nonostante le normative prevedono che tutte le soluzioni siano applicabili a condizione che venga garantito un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA standard in caso di overrun, l'EMAS, a dispetto delle altre opzioni progettuali, offre una maggiore certezza del contenimento dell'aeromobile entro i confini aeroportuali, prevenendo danni strutturali al velivolo e lesioni a passeggeri e membri dell'equipaggio.

Si pensi, ad esempio, a una pista aeroportuale con un'area di sicurezza limitata, oltre il cui confine sia presente una linea ferroviaria (vincolo infrastrutturale) o un complesso residenziale o commerciale (vincolo urbanistico). L'espansione fisica della RESA comporterebbe dei costi significativamente elevati, considerando l'eventuale interrimento della linea ferroviaria o la demolizione e lo spostamento del complesso con relativi indennizzi, mentre lo spostamento della soglia potrebbe generare limitazioni operative potenzialmente dannose per l'infrastruttura.

L'installazione di un EMAS rappresenta in questo contesto l'unica scelta ammissibile, essendo un sistema concepito per arrestare in sicurezza un velivolo e i suoi occupanti, applicando una forza decelerante e dissipando così gradualmente la sua energia cinetica. Ciò si traduce in una significativa riduzione della probabilità che il velivolo superi il limite dell'area di sicurezza, evitando conseguenze potenzialmente molto gravi ed economicamente rilevanti.

Risk probability	Risk severity				
	Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
Frequent 5	<b>5A</b>	<b>5B</b>	<b>5C</b>	5D	5E
Occasional 4	<b>4A</b>	<b>4B</b>	4C	4D	4E
Remote 3	<b>3A</b>	3B	3C	3D	<b>3E</b>
Improbable 2	2A	2B	2C	<b>2D</b>	<b>2E</b>
Extremely improbable 1	1A	<b>1B</b>	<b>1C</b>	<b>1D</b>	<b>1E</b>

Figura 11.5: Soglia nella matrice di rischio

L'utilizzo di tale soglia di intervento verrà ripreso all'interno del modello decisionale proposto, al fine di semplificare e velocizzare l'identificazione delle situazioni in cui l'installazione di un sistema d'arresto EMAS rappresenta l'unica alternativa progettuale praticabile.

## 11.2. Modello decisionale proposto

A seguito della trattazione della valutazione del rischio e dell'introduzione della nuova soglia, si propone uno strumento di supporto e consultazione per un gestore aeroportuale nella fase di identificazione e scelta della soluzione progettuale più adeguata alle esigenze proprie e dello scalo aeroportuale.

Lo scopo del modello proposto, infatti, è riunire tutti i vari criteri di scelta adottabili per ottimizzare la fase di scelta dell'alternativa progettuale.

Secondo il Doc 9859 *Safety Management Manual* dell'ICAO [78], ogni possibile misura di mitigazione del rischio deve essere valutata attraverso una serie di criteri, tra cui:

- l'efficacia: come la misura riduce effettivamente il livello di rischio, in termini di probabilità di accadimento di un evento e di gravità delle conseguenze attese;
- il rapporto costi/benefici: i benefici percepiti devono essere quantificabili per renderli confrontabili con le spese da sostenere per la realizzazione e la gestione della misura di mitigazione;

- la praticabilità: la possibilità e la semplicità di porre in atto la misura, in funzione ad esempio delle tecnologie e delle risorse finanziarie e amministrative disponibili;
- l'accettabilità: la misura deve essere accettata dai soggetti coinvolti nella sua applicazione;
- la durabilità: deve essere valutata la durata del ciclo di vita della misura e le attività di manutenzione necessarie per garantire un livello di servizio accettabile;
- il tempo: bisogna tener conto del tempo impiegato per porre in atto la misura.

Il modello decisionale si propone di considerare tutti i diversi aspetti e criteri di valutazione disponibili, al fine di condurre una valutazione complessiva e realistica, in grado di integrare tutte le problematiche e le variabili rilevanti legate alla scelta progettuale.

Il modello decisionale proposto è illustrato nella figura 11.9.

In una prima fase, il modello prevede la verifica dimensionale della RESA in esame rispetto ai requisiti imposti dalla normativa italiana. Qualora tali requisiti non risultino soddisfatti, viene condotta una valutazione del rischio (*Risk Assessment*) con riferimento ad un potenziale evento di overrun nella configurazione attuale della RESA.

In base al livello di rischio rilevato, vengono previste soluzioni diverse:

- **rischio accettabile:** non è necessario alcun intervento migliorativo, in quanto la configurazione attuale viene ritenuta in grado di garantire un livello complessivo di sicurezza adeguato;
- **rischio tollerabile:** in un primo momento vengono previste delle misure di mitigazione di tipo non infrastrutturale, ma operativo. Tali misure consistono infatti in limitazioni operative che hanno l'obiettivo di rendere il livello di rischio accettabile. Esse possono comprendere ad esempio la riduzione del MTOW e/o del MLW per ridurre la distanza di decollo e/o atterraggio necessaria e restrizioni ambientali come il divieto di effettuare delle operazioni in condizioni meteorologiche critiche. Nel caso in cui il rischio residuo risulti non accettabile, viene stabilita la necessità di un intervento infrastrutturale;
- **rischio non tollerabile:** il livello di rischio è superiore rispetto alla soglia di accettabilità, per cui sono necessari degli interventi di mitigazione. In tal caso, il modello invita a consultare la soglia proposta della matrice di rischio, in modo da semplificare e velocizzare la fase decisionale ed installare direttamente un sistema d'arresto EMAS. Questo approccio, come specificato nel paragrafo precedente, è applicabile in contesti critici, in cui la presenza di vincoli oltre i confini aeroportuali

limita fortemente l'estensione della RESA e il superamento dei suoi limiti potrebbe comportare conseguenze catastrofiche o comunque gravi.

Nel caso in cui il contesto in esame non presenti tali caratteristiche, il modello riconduce ad una serie di procedimenti atti a definire la soluzione più adeguata.

Una volta definita la necessità di un intervento, si valuta se sia possibile estendere i confini dell'area di sicurezza all'interno del dominio aeroportuale, senza dunque ricorrere all'acquisizione di nuovi terreni. Se ciò risulta possibile, viene condotto uno studio di fattibilità economica, tecnica e ambientale per valutare se procedere con tale operazione o scartarla.

Se la misura di mitigazione non è ancora stata definita, il modello propone due metodologie da condurre separatamente ma simultaneamente:

- da un lato, si calcola il costo del ciclo di vita (*LCC, Life Cycle Cost*) del sistema d'arresto EMAS, utilizzando le indicazioni fornite dalla FAA Order 5200.9 [97] ed i risultati ottenuti nel Capitolo 10;
- parallelamente, si definiscono tutte le alternative progettuali possibili per conformare la RESA, esclusa l'installazione di un letto d'arresto, identificando l'alternativa più economica in termini di costo del ciclo di vita a parità di livello di sicurezza offerto.

È opportuno sottolineare che da normativa tutte le soluzioni progettuali sono ammissibili, a condizione che venga garantito un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA di dimensioni standard. Per tale motivo, tra le varie opzioni ad esclusione dell'EMAS, il criterio economico assume un ruolo cruciale per individuare la soluzione più economicamente conveniente, a parità di sicurezza operativa.

In seguito, viene eseguito un confronto tra i costi LCC di un EMAS e dell'alternativa progettuale più economica scelta.

Dal momento che l'EMAS viene ritenuto l'alternativa progettuale in grado di garantire un grado di sicurezza maggiore in un evento di overrun in cui ci sia il rischio di fuoriuscita dalla RESA, qualora questo risulti anche la soluzione più economica, la scelta ricade direttamente sulla sua installazione.

Qualora il costo LCC dell'alternativa più economica risulti inferiore a quello di un EMAS, il modello prevede una valutazione multi-criteriale finalizzata a individuare la soluzione più conveniente sotto il profilo operativo. I criteri applicabili possono essere di varia natura, come ad esempio di tipo tecnico – costruttivo, ambientale o amministrativo.

Dal punto di vista tecnico – costruttivo, infatti, occorre tenere in considerazione i tempi

previsti per l'intera fase di progettazione e realizzazione dell'alternativa, in modo tale da eseguire un confronto con le esigenze operative della pista e del gestore aeroportuale. Inoltre, la fase costruttiva può comportare ritardi, cancellazioni o modifiche dei voli operanti nella pista interessata dai lavori, con conseguenti costi da sostenere. A tal proposito, si fa riferimento ai dati pubblicati dall'EUROCONTROL all'interno del documento *Standard Inputs for Economic Analysis* del 2024 [59], fonte di riferimento ufficiale europea per analisi economiche in ambito aeronautico:

Flight phase	Cost per minute
<b>Ground</b>	
At-Gate	€ 18
Taxi in / out	€ 47
<b>Airborne</b>	
En-Route (cruise extension)	€ 83

Figura 11.6: Costi strategici dei ritardi di un volo (EUROCONTROL, Standard Input for Economic Analyses, Tabella 22)

	Narrow body			Wide body		
	Traditional network carrier	Low-cost carrier	Traditional network carrier	Low-cost carrier	Traditional network carrier	
Seats	50	120	180	189	250	400
Cost of cancellation	€ 6,790	€ 16,640	€ 25,720	€ 18,570	€ 85,570	€ 123,900
<i>of which passenger care and compensation</i>	€ 3,100	€ 7,600	€ 12,400	€ 17,500	€ 40,500	€ 64,800

Figura 11.7: Costi di cancellazione di un volo (EUROCONTROL, Standard Input for Economic Analyses, Tabella 20)

Type of flight	Cost of diverted flight <sup>1</sup>
Regional flights	€ 1,000 – € 7,000
Continental flights	€ 1,400 – € 10,500
Intercontinental flights	€ 7,000 – € 77,200

Figura 11.8: Costi di diversione di un volo (EUROCONTROL, Standard Input for Economic Analyses, Tabella 25)

I costi presentati sono dei valori medi che l'EUROCONTROL propone come riferimento per le valutazioni di carattere economico. È pertanto necessario includere tali componenti di costo come criterio di scelta nella selezione della soluzione progettuale.

L'azienda svedese produttrice dei letti d'arresto EMAS prevede circa 3-4 settimane per la realizzazione del sistema, mentre le altre alternative prevedono tempi di realizzazione più lunghi, anche a causa della maggiore ampiezza dell'area interessata dall'intervento. Per tale motivo, sotto il profilo temporale, l'installazione di un EMAS presenta un vantaggio significativo rispetto alle altre due opzioni, che si traduce in minori spese, come evidenziato dai dati presentati.

Dal punto di vista ambientale, un EMAS viene installato all'interno del perimetro aeroportuale, con un impatto minimo sul paesaggio esterno e sull'assetto territoriale. Infatti, non è necessario disturbare o apportare delle modifiche alla flora e alla fauna presente prima dell'installazione e la presenza a lungo termine di un EMAS comporta un inquinamento acustico minimo. Inoltre, anche in fase costruttiva, il disturbo ambientale è circoscritto ad una zona limitata, interna comunque al perimetro aeroportuale.

Tali caratteristiche ambientali si contrappongono in maniera netta a quelle relative all'espansione di una RESA oltre i confini dello scalo aeroportuale. In tal caso, infatti, l'operazione prevede espropri, demolizioni e utilizzo di terreni altrimenti utili ad opere di coltivazione o di altra tipologia. Ciò comporta una significativa alterazione del paesaggio e della vita faunistica presente e, di conseguenza, potrebbe incontrare delle resistenze da parte della società.

Pertanto, qualora l'EMAS risultasse più oneroso rispetto ad un'altra alternativa progettuale, il modello invita il gestore aeroportuale a considerare non soltanto l'aspetto economico, ma anche altri fattori, come i benefici ambientali e sociali, che potrebbero giustificare l'investimento aggiuntivo.

La sequenza decisionale del modello proposto nasconde una scala di priorità dei criteri di scelta della soluzione progettuale:

- **il livello di sicurezza:** il calcolo del costo LCC dell'EMAS avviene in maniera separata dalla valutazione di tutte le altre alternative possibili, tra le quali si identifica quella più economica a parità di sicurezza operativa. Questo approccio evidenzia il grado di sicurezza garantito dall'installazione di un EMAS, equivalente almeno a quello di una RESA standard, ma ritenuto superiore in contesti particolarmente critici. Esso, infatti, è un sistema progettato appositamente per decelerare gradualmente un aeromobile in overrun e arrestarlo in sicurezza, mentre tutte le altre alternative garantiscono un'estensione fisica della RESA, ma non permettono di

prevedere il comportamento di un velivolo in overrun nella nuova area di sicurezza. Questo criterio viene adottato anche nella soglia introdotta nella matrice di rischio: qualora il livello di rischio sia particolarmente critico, infatti, si procede direttamente con l'installazione dell'EMAS;

- **l'economicità:** il costo LCC di un EMAS viene confrontato con quello dell'alternativa più economica scelta nel passo precedente. Se il costo dell'EMAS risulta inferiore, il sistema di arresto si rivela automaticamente la soluzione più sicura ed economica e si opta per la sua installazione;
- **altri criteri di varia natura:** si tratta di criteri di importanza secondaria ma comunque utili, in grado di orientare la scelta finale del gestore aeroportuale.

In sintesi, il modello decisionale proposto consente di individuare la soluzione progettuale più idonea bilanciando sicurezza, costi e impatti di vario genere, garantendo al gestore aeroportuale un processo di scelta strutturato e trasparente.

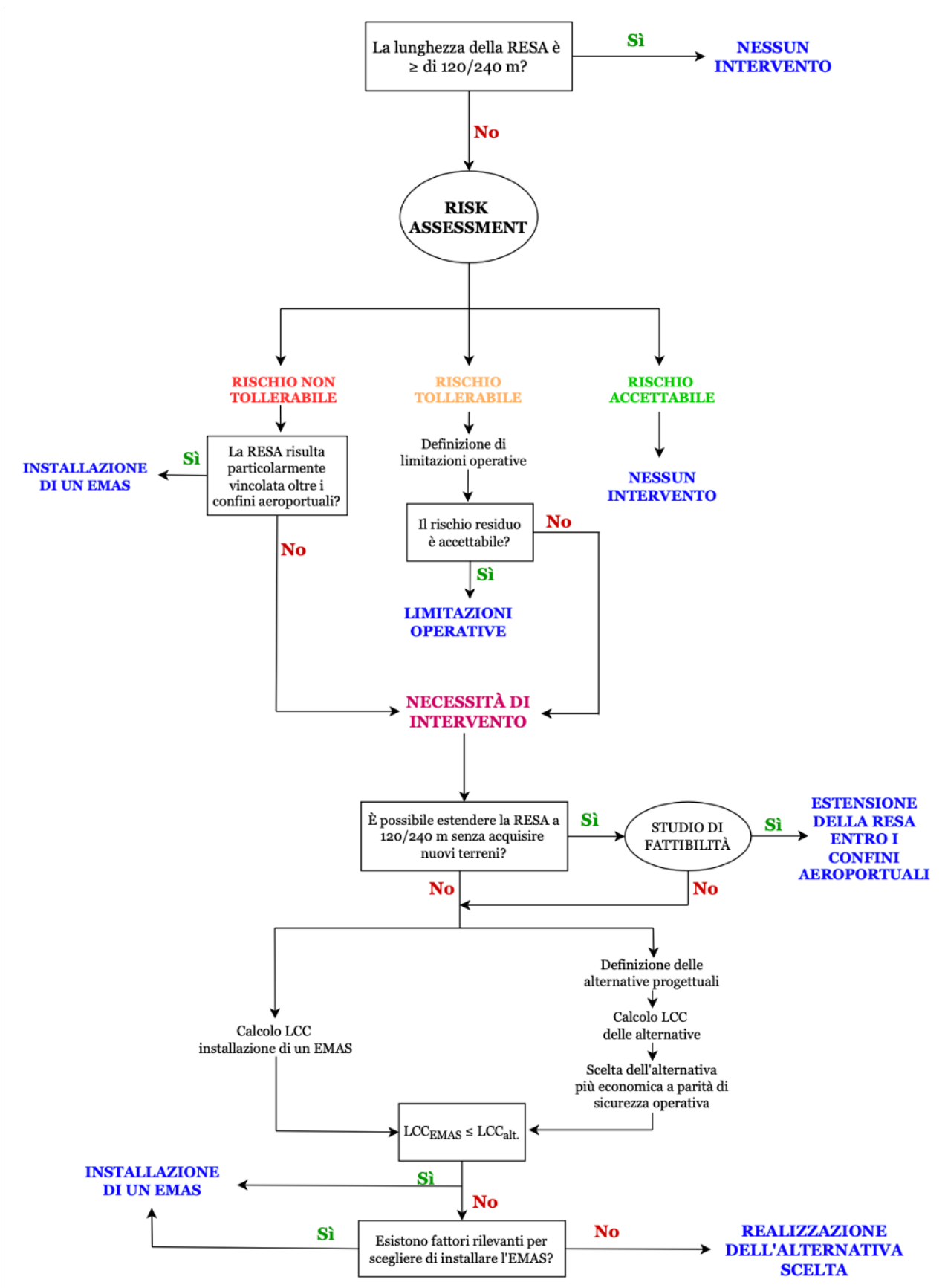


Figura 11.9: Modello decisionale proposto

# 12 | Conclusioni

La crescita costante del traffico aereo globale, con un conseguente maggior numero di passeggeri ed aeromobili in volo, ha ricalcato sempre di più il ruolo cruciale della sicurezza operativa, sia in fase progettuale sia nell'esercizio delle infrastrutture aeroportuali.

Il trasporto aereo continua ad affermarsi come la modalità di trasporto più utilizzata per effettuare tratte a medio e lungo raggio. Per tale motivo, garantire un livello di sicurezza accettabile ed innalzare il comfort dei passeggeri sono stati negli ultimi decenni gli obiettivi principali degli organi di regolazione nel mondo dell'aviazione e delle compagnie aeree.

Nel presente elaborato, l'attenzione è stata rivolta alle escursioni degli aeromobili dalla pista, in particolare agli eventi di overrun.

La misura primaria di mitigazione del rischio che viene prevista è la realizzazione della RESA, un'area di sicurezza posta oltre l'estremità della pista, priva di ostacoli e concepita come spazio aggiuntivo per accogliere velivoli che fuoriescano dalla pista.

Tuttavia, spesso vincoli di diversa natura impediscono di realizzare una RESA con dimensioni tali da garantire un livello di sicurezza riconosciuto globalmente come accettabile. Per tale motivo, si rende necessaria l'individuazione di soluzioni alternative che aumentino il livello di sicurezza.

L'installazione di un sistema di arresto EMAS si è rivelata, nell'analisi tecnica ed economica svolta in questo elaborato, una soluzione particolarmente efficace nella riduzione del rischio derivante da un overrun. Sin dalle prime fasi della progettazione, infatti, la sicurezza assume priorità assoluta, rivolta ambo alla struttura dell'aeromobile coinvolto e ai suoi occupanti.

Nonostante un EMAS sia concepito appositamente per mitigare le conseguenze derivanti da un evento di overrun e non specificamente per ridurre il rischio in caso di undershoot, è stato dimostrato che la sicurezza operativa complessiva di un aeroporto viene comunque incrementata.

Analizzando con attenzione i requisiti di progettazione, installazione e manutenzione di un EMAS emanati dalle normative vigenti in campo internazionale e nazionale, è stato possibile definire le principali modalità progettuali di un sistema d'arresto, nota l'elevata

complessità legata alla molteplicità di fattori coinvolti.

I materiali svolgono un ruolo molto importante nel meccanismo d'arresto messo in atto da un EMAS; pertanto, l'indagine e la definizione delle proprietà principali assumono un'importanza cruciale. Per tale motivo, è stata presentata una lista di prove normalizzate volte a verificare e validare il comportamento dei singoli materiali costituenti, nonché una serie di prove che possono essere effettuate sull'intero sistema per verificarne l'efficacia strutturale, sia in condizioni operative normali sia in condizioni di emergenza.

In seguito, è stata proposta una classificazione progettuale dei sistemi di arresto EMAS scegliendo come criterio il peso massimo al decollo (MTOW) dei velivoli che operano più frequentemente nella pista interessata dall'intervento progettuale. Pertanto, si suggerisce di progettare e verificare il comportamento di un EMAS facendo riferimento non ad un singolo aeromobile critico, bensì ad un gruppo rappresentativo del traffico prevalente.

La classificazione proposta può essere uno strumento utile per facilitare e velocizzare sia la progettazione da parte dell'azienda produttrice, sia la scelta dell'EMAS più adeguato da parte di un gestore aeroportuale. È importante sottolineare, inoltre, che la progettazione finale deve essere sempre accompagnata dalla valutazione delle condizioni operative ed economiche del sito di installazione, in maniera tale da adattare la soluzione alle esigenze specifiche del contesto.

Successivamente, l'indagine sulle decelerazioni ammissibili dalle componenti strutturali di un velivolo e dagli occupanti ha condotto ad evidenziare l'importanza di consultare i requisiti di *crashworthiness* di un aeromobile. Difatti, verificando che le sollecitazioni subite dagli occupanti durante il meccanismo di arresto siano minori rispetto a quelle sancite da tali requisiti, si garantisce che la struttura del velivolo preservi la loro incolumità, anche grazie ai sedili e ai sistemi di ritenuta progettati per resistere a decelerazioni di 16 g applicate in 0,09 secondi.

Inoltre, si raccomanda di fare riferimento ai carichi massimi ammissibili dal carrello di atterraggio specifico dell'aeromobile in esame, al fine di verificare che le sollecitazioni trasmesse dall'EMAS siano tollerabili, evitando di conseguenza danni strutturali importanti.

L'importanza della sicurezza del velivolo e dei suoi occupanti ha trovato riscontro anche all'interno dell'analisi economica, in cui si è presentata una stima del costo delle potenziali conseguenze derivanti da un incidente, tra cui un overrun.

Sono state presentate delle stime economiche relative alle tre principali soluzioni progettuali adottabili per rendere conforme una RESA agli standard normativi, evidenziando per ciascuna i relativi vantaggi e svantaggi sul piano sia operativo sia economico. In particolare, la stima dei costi è stata condotta facendo riferimento al contesto italiano, per

restituire un'analisi maggiormente realistica e adattabile al territorio nazionale.

Infine, è stato sviluppato un nuovo modello decisionale come strumento di supporto per un gestore aeroportuale nella scelta dell'alternativa progettuale più adeguata al singolo caso. Tale modello si basa su una valutazione multicriterio che attribuisce priorità al livello di rischio legato a un evento di overrun, seguito dal criterio economico e, in subordine, da altri criteri quali quello ambientale.

Inoltre, introducendo una nuova soglia nella matrice di rischio, sono stati individuati scenari particolarmente critici in cui l'installazione di un EMAS rappresenta l'unica alternativa applicabile.

Dal confronto tecnico-operativo ed economico tra le varie soluzioni per conformare una RESA alle dimensioni standard, il sistema di arresto EMAS si è confermato come la soluzione progettuale più sicura e spesso economicamente più conveniente per quegli aeroporti in cui vincoli di varia natura impediscano la realizzazione di un'area di sicurezza a fine pista di dimensioni standard.

Ciò è stato dimostrato sotto vari aspetti:

- dal punto di vista della sicurezza, sebbene tutte le soluzioni siano ammesse a condizione che garantiscano un livello di sicurezza equivalente a quello di una RESA standard, l'EMAS offre un livello di certezza superiore nel contenimento dell'aeromobile in overrun all'interno dei confini della RESA disponibile. Esso, infatti, è un sistema concepito specificamente per arrestare un velivolo e i suoi occupanti tramite una graduale dissipazione della sua energia cinetica, applicando sollecitazioni tollerabili tanto dalla struttura dell'aeromobile quanto dai suoi occupanti;
- dal punto di vista economico, nonostante la vita utile del sistema sia generalmente limitata a circa venti anni, con necessaria sostituzione dell'intero impianto al termine del ciclo di vita, il confronto con le altre alternative ha permesso di dimostrare che l'EMAS è l'alternativa più conveniente a breve e a lungo termine.

A breve termine, infatti, il costo di installazione dell'EMAS risulta significativamente inferiore rispetto all'espansione fisica della RESA tramite l'acquisizione di nuovi terreni, che potrebbe comportare demolizioni, indennizzi a residenti e commercianti e interramenti di infrastrutture esistenti.

A lungo termine, invece, le perdite derivanti dalle limitazioni operative successive allo spostamento della soglia di pista risultano nettamente superiori alle spese complessive sostenute durante la vita utile dell'EMAS, relative alla manutenzione del sistema.

Alla luce dei risultati ottenuti, si ritiene che l'EMAS debba rappresentare la primaria

scelta progettuale da considerare, pur senza escludere a priori altre soluzioni, da valutare comunque attraverso una comparazione fondata sui già citati criteri di varia tipologia.

## Bibliografia e Sitografia

- [1] Aggregato leggero. URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Aggregato\\_leggero](https://it.wikipedia.org/wiki/Aggregato_leggero).
- [2] Analisi costi - benefici. URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Analisi\\_costi-benefici](https://it.wikipedia.org/wiki/Analisi_costi-benefici).
- [3] Dati di traffico, Assaeroporti. URL <https://assaeroporti.com/dati-di-traffico/>.
- [4] Sito ufficiale dell'Aeroporto di Bolzano. URL <https://www.bolzanoairport.it/it/>.
- [5] Cavo d'arresto. URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Cavo\\_d%27arresto](https://it.wikipedia.org/wiki/Cavo_d%27arresto).
- [6] Sito ufficiale dell'Aeroporto di Roma Ciampino. URL <https://www.adr.it/ciampino>.
- [7] Calcestruzzo aerato autoclavato, . URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo\\_aerato\\_autoclavato](https://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo_aerato_autoclavato).
- [8] Calcestruzzo cellulare: caratteristiche e impieghi, . URL <https://www.infobuild.it/approfondimenti/calcestruzzo-cellulare/>.
- [9] Crash test, . URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Crash\\_test](https://it.wikipedia.org/wiki/Crash_test).
- [10] Crashworthiness, . URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Crashworthiness>.
- [11] Portale online Aeronautical Information Publication. URL <https://idcs-a3f17b97a76349e995d811502db471c8.identity.oraclecloud.com/ui/v1/signin>.
- [12] Sito della compagnia aerea easyJet. URL <https://www.easyjet.com/it>.
- [13] Engineered materials arrestor system. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Engineered\\_materials\\_arrestor\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Engineered_materials_arrestor_system).
- [14] EASA FAQ n.19117. URL <https://www.easa.europa.eu/en/faq/19117>.
- [15] Sito Fiumicino Express. URL <https://www.fiumicinoexpress.com/>.

- [16] Sito ufficiale Flixbus. URL [www.flixbus.it](http://www.flixbus.it).
- [17] Sito Google Earth. URL <https://www.google.it/intl/it/earth/index.html>.
- [18] "Come fanno gli aerei a decollare da una portaerei e ad atterrarci sopra? ". URL <https://www.geopop.it/come-fanno-gli-aerei-a-decollare-da-una-portaerei-e-ad-atterrarci-sopra/>.
- [19] Sito Google Maps. URL <https://www.google.com/maps>.
- [20] Head Injury Criterion. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Head\\_injury\\_criterion](https://en.wikipedia.org/wiki/Head_injury_criterion).
- [21] "Interramento della linea ferroviaria Catania Siracusa per allungamento pista aeroporto di Catania". URL [https://opencoesione.gov.it/it/dati/progetti/5mtra1b2r008/?utm\\_](https://opencoesione.gov.it/it/dati/progetti/5mtra1b2r008/?utm_).
- [22] Key West International Airport. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Key\\_West\\_International\\_Airport](https://en.wikipedia.org/wiki/Key_West_International_Airport).
- [23] Sito ufficiale Aeroporto di Napoli. URL <https://www.aeroportoedinapoli.it/en/home>.
- [24] Sito Runway Safe. URL <https://runwaysafe.com/>.
- [25] Sito della compagnia aerea Ryanair. URL <https://www.ryanair.com/it/it>.
- [26] SASA SpA. URL <https://www.sasabz.it/>.
- [27] B737, New York La Guardia USA, 2016, . URL <https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/b737-new-york-la-guardia-usa-2016>.
- [28] Motore di ricerca Skyscanner, . URL <https://www.skyscanner.it/>.
- [29] Sito ufficiale Trenitalia. URL <https://www.trenitalia.com/it.html>.
- [30] Volo Southwest Airlines 1248. URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Volo\\_Southwest\\_Airlines\\_1248](https://it.wikipedia.org/wiki/Volo_Southwest_Airlines_1248).
- [31] Zodiac Aerospace. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Zodiac\\_Aerospace](https://en.wikipedia.org/wiki/Zodiac_Aerospace).
- [32] DL 81/2008, Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul lavoro. *BibLus*, Aprile 2008.
- [33] "The Case for EMAS: Improving the Outcome of a Runway Overrun", Maggio 2012. URL <https://nbaa.org/aircraft-operations/safety/in-flight-safety/runway-safety/the-case-for-emas-improving-the-outcome-of-a-runway-overrun/?utm>.

- [34] “Aerei, IATA predice un 2025 monstre. Passeggeri oltre 5 miliardi, fatturato sopra i 1000 mld dollari”, Dicembre 2024. URL [https://www.repubblica.it/viaggi/2024/12/10/news/traffico\\_aereo\\_iata\\_prevede\\_doppio\\_record\\_2025-423874255/](https://www.repubblica.it/viaggi/2024/12/10/news/traffico_aereo_iata_prevede_doppio_record_2025-423874255/).
- [35] Aeroporti di Roma. Fiumicino - Airport Fees. Technical report, Aprile 2025.
- [36] Agenzia delle Entrate. Valori Agricoli Medi della provincia di Sondrio, Annualità 2024. Technical report, Maggio 2024.
- [37] Airbus. A320 - Aircraft characteristics, Airport and Maintenance Planning. Technical report, .
- [38] Airbus. Maximum Energy Braking. .
- [39] Airbus. A statistical analysis of commercial aviation accidents 1958-2023. Technical report, febbraio 2024.
- [40] Airport Cooperative Research Program. Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas Sponsored by the Federal Aviation Administration. Technical report.
- [41] Airport Cooperative Research Program. *ACRP Report 29, Developing improved civil aircraft arresting systems*. Transportation Research Board, 2009.
- [42] Airport Cooperative Research Program. *Improved models for risk assessment of runway safety areas*. Transportation Research Board, 2011.
- [43] Amministrazione dell'aviazione civile della Cina. CAAC MH/T 5111-2015. Technical report, Gennaio 2016.
- [44] ATR Aircraft. ATR 72 Operating Manual. Technical report, 1999.
- [45] Azienda Nazionale Autonoma delle Strade Statali. Listino prezzi ANAS 2024, Prove, Indagini e Monitoraggio. Technical report, 2024.
- [46] Azienda Nazionale Autonoma delle Strade Statali. Listino Prezzi ANAS 2025, Nuove Costruzioni, Manutenzione Programmata. Technical report, 2025.
- [47] C.N. Abernethy and G.R. Plank and E.O. Sussman. Effects of deceleration and rate of deceleration on live seated human subjects. Technical report, Ottobre 1977.
- [48] Comune di Napoli. Tariffario taxi, Aeroporto di Napoli. Technical report. URL [www.comune.napoli.it](http://www.comune.napoli.it).

- [49] Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile. Manuale di Formazione Aeroportuale. Technical report, Marzo 2014.
- [50] Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile, Direzione Centrale per la Formazione. DM 10/03/1998. Technical report.
- [51] Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile, Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica, Ministero dell'Interno. DM 10/03/1998, Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro. Technical report, Marzo 1998.
- [52] Edwin L Fasanella and Karen E Jackson and Yvonne T Jones and Gary Frings and Tong Vu. Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test. Technical report, 2001.
- [53] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti. Technical report, Ottobre 2003.
- [54] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. Il Safety Management System (SMS), Linee Guida e Strategie. Technical report, Settembre 2005.
- [55] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. Linee guida per la progettazione, l'installazione e il collaudo dei letti d'arresto (EMAS). Luglio 2019.
- [56] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. Elaborazione e valutazione del Safety Risk Assessment. Technical report, Giugno 2021.
- [57] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. Piano Nazionale degli Aeroporti. Ottobre 2022.
- [58] EUROCONTROL. EUROCONTROL Seven - year Forecast 2025-2031. Technical report.
- [59] EUROCONTROL. EUROCONTROL Standard Inputs for Economic Analyses. Technical report, 2024.
- [60] European Aviation Safety Agency. Certification Specifications for Large Aeroplanes, CS 25. Settembre 2007.
- [61] European Aviation Safety Agency. Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas (RESA). Technical report, Luglio 2014.
- [62] European Aviation Safety Agency. Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN). Technical report, Marzo 2022.

- [63] European New Car Assessment Programme. Assessment Protocol - Adult Occupant Protection. Technical report, 2024.
- [64] Federal Aviation Administration (FAA) U.S. Department of Transportation. DOT/FAA/CT-93/80, Soft Ground Arresting Systems for Airports. Technical report, Dicembre 1993.
- [65] Federal Aviation Administration (FAA) U.S. Department of Transportation. AC 150/5220-22B, Engineered Materials Arresting Systems (EMAS) for Aircraft Overruns, 27 September 2012. Technical report, Settembre 2012.
- [66] Federal Aviation Administration (FAA) U.S. Department of Transportation. AC 150/5300-13B, Airport Design, March 31, 2022 Consolidated to include Change 1, August 16, 2024 (errata updates as of 4/3/2025). Technical report, Agosto 2024.
- [67] Federal Aviation Administration U.S. Department of Transportation. Advisory Circular 150/5300-13, Airport Design (Consolidated AC incorporates Changes 1-15). Technical report, Settembre 1989.
- [68] Federal Aviation Administration U.S. Department of Transportation. DOT/FAA/AOV 90-1, Location of Commercial Aircraft Accidents/Incidents Relative to Runways. Technical report, Luglio 1990.
- [69] Federal Aviation Administration U.S. Department of Transportation. Order 7360.1D Aircraft Type Designators. Technical report, 2018.
- [70] FLTechnics. Additional aircraft services price list 2022. Technical report, 2022.
- [71] GESAC S.p.A. Tariffe aeroportuali Agosto-Dicembre 2025, Aeroporto di Napoli.
- [72] Gianni Dragoni. "Cos'è l'addizionale comunale sui voli, la tassa che Assaeroporti chiede di ridurre", Marzo 2024. URL <https://www.ilsole24ore.com/art/cos-e-1-addizionale-comunale-voli-tassa-che-assaeroporti-chiede-abolire-AF6V6rCD>.
- [73] Haolei Mou and Jiang Xie and Zhenyu Feng and Xiaopeng Shi. Review on the crashworthiness design and evaluation of fuselage structure for occupant survivability, Luglio 2024.
- [74] International Air Transport Association. *Runway Safety Accident Analysis Report 2010-2014, 1st Edition*. 2015.
- [75] International Air Transport Association. IATA Annual Safety Report 2024. Technical report, 2024.

- [76] International Air Transport Association. Runway Excursion Safety Risk Assessment. Technical report, Luglio 2025.
- [77] International Civil Aviation Organization. DOC 8643, Edition no 37.
- [78] International Civil Aviation Organization. *Doc 9859, Safety management manual*. International Civil Aviation Organization, 2018.
- [79] International Civil Aviation Organization. Doc 9157, Aerodrome Design Manual, Part 1 - Runways. 2020.
- [80] International Civil Aviation Organization. Annex 14 - Aerodromes, Volume I - Aerodrome Design and Operations. Luglio 2022.
- [81] M. Ketabdari, E. Toraldo, M. Crispino, and V. Lunkar. Evaluating the interaction between engineered materials and aircraft tyres as arresting systems in landing overrun events. *Case Studies in Construction Materials*, 13, marzo 2020.
- [82] Leonard Berberi. "Biglietti aerei, il 2024 sarà l'anno più caro? Nei primi cinque mesi prezzi su del 20%", Gennaio 2024. URL [https://www.corriere.it/economia/consumi/24\\_gennaio\\_28/biglietti-aerei-2024-sara-l-anno-piu-caro-primi-cinque-mesi-prezzi-del-20percento-0b2fc540-bba5-11ee-996d-60eabc1bbbc8.shtml](https://www.corriere.it/economia/consumi/24_gennaio_28/biglietti-aerei-2024-sara-l-anno-piu-caro-primi-cinque-mesi-prezzi-del-20percento-0b2fc540-bba5-11ee-996d-60eabc1bbbc8.shtml).
- [83] M. Ketabdari and E. Toraldo and M. Crispino. Analyzing the bearing capacity of materials used in arresting systems as a suitable risk mitigation strategy for runway excursions in landlocked aerodromes. In *Proceedings of the 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRA 2022*. CRC Press/Balkema, 2022. ISBN 97803222880.
- [84] Marinella Giunta. "Le pavimentazioni aeroportuali - Portanza dei sottofondi - Portanza delle pavimentazioni". URL <https://www.slideserve.com/josephine/lecture-10-le-pavimentazioni-aeroportuali-portanza-dei-sottofondi-portanza-delle-pavimentazioni>.
- [85] National Transportation Safety Board. Runway Overrun and Collision Southwest Airlines Flight 1248 Boeing 737-7H4, N471WN Chicago Midway International Airport. Dicembre 2005.
- [86] Regione Campania. Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici, 2025, allegato b. Technical report.

- [87] Regione Lazio. Tariffa Regione Lazio 2023 - Parte C: Sistemazione Aree a Verde e Impianti Sportivi. Technical report, .
- [88] Regione Lazio. Tariffa Regione Lazio 2023 - Parte A: Opere Edili. Technical report, .
- [89] Regione Lazio. Tariffa Regione Lazio 2023 - Parte B: Opere Stradali e Infrastrutture a Rete. Technical report, .
- [90] Regione Lombardia. Prezzario regionale Regione Lombardia, Parte 1 - Civile, Urbanizzazione, Difesa Suolo, Agroforestale. Technical report, 2025.
- [91] Ricondo & Associates, Inc. Runway Safety Area Practicability Study Runways 6L-24R & 6R-24L. Technical report, Aprile 2010.
- [92] The Boeing Company. 737 Airplane Characteristics for Airport Planning. Technical report, 2020.
- [93] The Boeing Company. 787 Airplane Characteristics for Airport Planning. Technical report, 2023.
- [94] The Boeing Company. Statistical summary of commercial jet airplane accidents, 1959 - 2024. Technical report, Aprile 2025.
- [95] UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Raccolta di norme UNI EN e UNI EN ISO consultate ai fini del lavoro di tesi.
- [96] US Army Aviation Aviation Applied Technology Directorate. Aircraft Crash Survival Design Guide, Volume IV - Aircraft Seats, Restraints, Litters, and Cockpit:Cabin Delethalization.
- [97] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (FAA). FAA Order 5200.9, Financial Feasibility and Equivalency of Runway Safety Area Improvements and Engineered Material Arresting Systems, 15 Marzo 2004. Technical report.
- [98] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (FAA). FAA Airport Benefit - Cost Analysis Guidance. Technical report, Settembre 2020.
- [99] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (FAA). Economic values for FAA Investment and Regulatory Decisions, A guide: 2024 Update. Technical report, Novembre 2024.

- [100] William D Grantham and Luat T Nguyen and Perry L Deal. NASA: Technical note simulation of decelerating landing approaches on an externally blown flap STOL transport airplane. Technical report, Maggio 1974.

# A | Allegato A

Di seguito si riportano gli elenchi delle prove normalizzate volte alla valutazione del comportamento dei materiali, come descritto nel Capitolo 6. [95] Il primo elenco si riferisce al componente principale per l'assorbimento di energia, mentre il secondo riguarda il materiale supplementare di rivestimento.

Per garantire una maggiore chiarezza e facilità di lettura, gli elenchi sono stati presentati con orientamento orizzontale.

REQUISITO NORMATIVO	AMBITO DI PROVA	COMPONENTE PRINCIPALE PER L'ASSORBIMENTO DI ENERGIA
<p style="text-align: center;"><b>DURABILITÀ</b></p> <p>I materiali devono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- non causare alcun impatto sull'ambiente o sulla salute umana durante l'installazione, il funzionamento e lo smaltimento;</li> <li>- essere resistenti all'acqua, in modo che la sua presenza non influenzi le prestazioni del sistema;</li> </ul>	<p><b>Caratteristiche fisiche e geometriche</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>EN 12390 - 7</b> Testing hardened concrete, Density</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 678</b> Determination of the dry density of autoclaved aerated concrete</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 933 - 8</b> Test for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines – Sand equivalent test</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 13055</b> Lightweight aggregates</p>
	<p><b>Resistenza alla penetrazione di acqua</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>EN 12390 - 8</b> Testing hardened concrete, Depth of penetration of water under pressure</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 1353</b> Determination of moisture content of autoclaved aerated concrete</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 772 – 11</b> Methods of test for masonry units. Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural</p>

<p>- permettere la rimozione di ghiaccio e neve ed evitare l'accumulo di acqua;</p>	<p><b>Resistenza alla penetrazione di acqua</b></p>	<p>stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units  <b>EN 772 – 15</b>  Methods of test for masonry units. Determination of water vapour permeability of autoclaved aerated concrete masonry units  <b>EN 1097 - 5</b>  Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the water content by drying in a ventilated oven  <b>EN 1097 - 6</b>  Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption</p>
<p>- mantenere costanti nel tempo le caratteristiche di resistenza e densità in ogni condizione climatica, entro un intervallo di temperature appropriato in base alla posizione geografica;</p>	<p><b>Caratteristiche meccaniche: resistenza a compressione, a trazione, a taglio, a flessione</b></p>	<p><b>EN 12390 - 3</b>  Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens  <b>EN 12390 – 17</b>  Testing hardened concrete. Determination of creep of concrete in compression  <b>EN 679</b>  Determination of the compressive strength of autoclaved aerated concrete  <b>EN 1352</b>  Determination of static modulus of elasticity under compression of autoclaved aerated concrete or lightweight aggregate concrete with open structure</p>

- avere una resistenza meccanica tale da evitare danneggiamenti a seguito del passaggio degli addetti alla manutenzione;

**Caratteristiche  
meccaniche:  
resistenza a  
compressione, a  
trazione, a taglio, a  
flessione**

**EN 1355**

Determination of creep strains under compression of autoclaved aerated concrete or lightweight aggregate concrete with open structure

**EN 13286 - 41**

Unbound and hydraulically bound mixtures. Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures

**EN 13286 - 43**

Unbound and hydraulically bound mixtures. Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures

**EN 1097 - 11**

Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of compressibility and confined compressive strength of lightweight aggregates

**EN 12390 - 6**

Testing hardened concrete.

Tensile splitting strength of test specimens

**EN 13286 - 42**

Unbound and hydraulically bound mixtures. Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures

**EN 12390 - 5**

Testing hardened concrete. Flexural strength of test specimens

**EN 1351**

Determination of flexural strength of autoclaved aerated concrete

<ul style="list-style-type: none"> <li>- non attrarre, o essere fisicamente vulnerabili ai parassiti, uccelli, fauna selvatica o altre creature, nella massima misura possibile;</li> <li>- Essere resistenti al deterioramento dovuto a: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ sale;</li> <li>➤ liquidi de-icing approvati per gli aeromobili e la pista, fluidi e solidi anti-icing;</li> <li>➤ carburante, fluidi idraulici e oli lubrificanti; <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ raggi UV;</li> </ul> </li> <li>➤ acqua;</li> <li>➤ grandine;</li> <li>➤ congelamento/scongelamento;</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>Resistenza al gelo e disgelo e alla temperatura</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>EN 206</b></p> <p>Concrete. Specifications, performance, production and conformity</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 12390 - 9</b></p> <p>Testing hardened concrete. Determination of freeze-thaw resistance – Scaling</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 15304</b></p> <p>Determination of the freeze.thaw resistance of autoclaved aerated concrete</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 1367 - 1</b></p> <p>Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Determination of resistance to freezing and thawing</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 1367 - 7</b></p> <p>Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Determination of resistance to freezing and thawing of lightweight aggregates</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 1367 - 6</b></p> <p>Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Determination of resistance to freezing and thawing in the presence of salt (NaCl)</p>
	<p><b>Resistenza alla penetrazione di agenti esterni</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>EN 206</b></p> <p>Concrete. Specifications, performance, production and conformity</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 11747</b></p> <p>Testing hardened concrete. Determination of depth of penetration of chloride ions</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ sabbia e neve trasportate dal vento;</li> <li>➤ vernici;</li> <li>➤ erbicidi.</li> </ul>	<b>Resistenza alla penetrazione di agenti esterni</b>	<p style="text-align: center;"><b>EN 12390 - 11</b></p> <p>Testing hardened concrete. Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 12390 -12</b></p> <p>Testing hardened concrete. Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method</p>
<p style="text-align: center;"><b>RESISTENZA AL FUOCO</b></p> <p style="text-align: center;"><b>I materiali devono:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- essere anti-scintilla;</li> <li>- essere non infiammabili;</li> <li>- non promuovere la combustione;</li> <li>- non generare né accrescere il rischio di incendio per un aereo in ingresso;</li> </ul>	<b>Anti-scintilla</b>	<p style="text-align: center;"><b>EN ISO 11925 – 2</b></p> <p>Reaction to fire tests. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame - Single-flame source test</p>
	<b>Non infiammabile</b>	<p style="text-align: center;"><b>EN 13501 - 1</b></p> <p>Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from reactions to fire tests</p>
	<b>Non promuovere la combustione</b>	<p style="text-align: center;"><b>EN ISO 1182</b></p> <p>Reaction to fire tests for products. Non-combustibility test</p> <p style="text-align: center;"><b>EN 13823</b></p> <p>Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item</p> <p style="text-align: center;"><b>EN ISO 1716</b></p> <p>Reaction to fire tests for products - Determination of the gross heat of combustion (calorific value)</p>

---

- **non emettere fumi tossici o maleodoranti in caso di incendio dopo l'installazione.**

**Non emettere fumi tossici o maleodoranti in caso di incendio**

**EN 13501 - 1**

Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from reactions to fire tests

REQUISITO NORMATIVO	AMBITO DI PROVA	MATERIALE SUPPLEMENTARE
<p>Lo strato di rivestimento deve:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- non essere generatore di FOD (Foreign Object Debris).</li> </ul>	<p><b>Caratteristiche meccaniche</b></p>	<p><b>EN ISO 604</b> Plastics – Determination of compressive properties <b>EN ISO 527 – 1</b> Plastics – Determination of tensile properties, General principles <b>ISO 178</b> Plastics – Determination of flexural properties</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- essere resistente all'acqua;</li> </ul>	<p><b>Resistenza alla penetrazione di acqua</b></p>	<p><b>EN ISO 62</b> Plastics – Determination of water absorption <b>EN 1931</b> Flexible sheets for waterproofing - Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing - Determination of water vapour transmission properties</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- essere resistenti alle alte e basse temperature: non si dovrebbero registrare modifiche dell'aspetto e</li> </ul>	<p><b>Resistenza alle temperature</b></p>	<p><b>EN ISO 75 - 2</b> Plastics – Determination of temperature of deflection under load. Plastics and ebonite <b>EN ISO 1062 – 3</b> Paints and varnishes – Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Determination of liquid water permeability</p>

<p>della resistenza a flessione superiore del 20 % in un intervallo di temperatura compreso tra -30 °C e 70 °C;</p>		<p><b>ISO 1147</b> Plastics/rubber – Polymer dispersions and synthetic rubber latices – Freeze-thaw cycle stability test</p> <p><b>ISO 20394</b> Thermal-insulating materials. Determination of freeze-thaw resistance</p>
<p>- essere resistente ai sali e ai liquidi per il de-icing: massa, dimensioni e resistenza a flessione possono modificarsi al massimo del 2 %, 2 % e 20 % rispettivamente e non si devono notare modifiche del comportamento;</p>	<p><b>Resistenza agli agenti esterni</b></p>	<p><b>EN ISO 2812 – 1</b> Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Immersion in liquids other than water</p> <p><b>EN ISO 2812 – 2</b> Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Water immersion methods</p> <p><b>EN ISO 2812 – 4</b> Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Spotting methods</p> <p><b>EN 13583</b> Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of hail resistance</p>
<p>- essere resistente ai raggi UV: la resistenza a flessione può modificarsi al massimo del 20 %;</p>	<p><b>Resistenza ai raggi UV</b></p>	<p><b>EN 4892 – 3</b> Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 3: Fluorescent UV lamps</p> <p><b>ISO 16474-3</b> Paints and varnishes - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 3: Fluorescent UV lamps</p>

		<p align="center"><b>ASTM-D4799-08</b></p> <p align="center">Standard Practice for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials (Fluorescent UV, Water Spray, and Condensation Method)</p>
<p>- essere resistente al fuoco;</p>	<p align="center"><b>Resistenza al fuoco</b></p>	<p align="center"><b>UNI 5659 - 2</b></p> <p align="center">Plastics – Smoke generation, Determination of optical density by a single-chamber test</p> <p align="center"><b>UNI ISO 10093</b></p> <p align="center">Plastics – Fire tests - Standard ignition sources</p> <p align="center"><b>EN ISO 1182</b></p> <p align="center">Reaction to fire tests for products. Non-combustibility test</p> <p align="center"><b>EN 13501 - 1</b></p> <p align="center">Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from reactions to fire tests</p>
<p>- essere antiscivolo;</p>	<p align="center"><b>Caratteristiche superficiali</b></p>	<p align="center"><b>EN 13036 – 4</b></p> <p align="center">Road and airfield surface characteristics – Test methods. Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test</p> <p align="center"><b>EN ISO 8295</b></p> <p align="center">Plastics – Film and sheeting – Determination of the coefficients of friction</p> <p align="center"><b>EN ISO 7784 – 2</b></p>

---

		<p>Paints and varnishes – Determination of resistance to abrasion. Method with abrasive rubber wheels and rotating test specimen</p>
--	--	--

**EN ISO 4628**

Paints and varnishes – Evaluation of degradation of coatings – Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance



# B | Allegato B

In questa appendice si presenta un elenco dei principali aeromobili presenti al giorno d'oggi nelle piste aeroportuali, con le relative categorie ICAO e FAA in base al loro massimo peso al decollo (MTOW). A ciascun aeromobile è stata poi assegnata una classe di progettazione di un EMAS, come spiegato nel Capitolo 7.

<b>ID AEROMOBILE</b>	<b>NOME AEROMOBILE</b>	<b>MTOW [kg]</b>	<b>Categoria ICAO</b>	<b>Categoria FAA</b>	<b>Classe EMAS</b>
A388	Airbus A380-800	560.000	Super	Super	1
B748	Boeing 747-8	447.700	Heavy	Heavy	1
B744	Boeing 747-400	396.900	Heavy	Heavy	1
B74R	Boeing 747-400ER	412.770	Heavy	Heavy	1
B742	Boeing 747-200	377.800	Heavy	Heavy	1
A346	Airbus A340-600	367.400	Heavy	Heavy	1
A359	Airbus A350-900	268.000	Heavy	Heavy	2
A35K	Airbus A350-1000	308.000	Heavy	Heavy	1
B77L	Boeing 777-200ER	347.450	Heavy	Heavy	1
B77W	Boeing 777-300ER	351.800	Heavy	Heavy	1
B778	Boeing 777-8	351.500	Heavy	Heavy	1
B779	Boeing 777-9	351.500	Heavy	Heavy	1
B773	Boeing 777-300	299.370	Heavy	Heavy	2
MD11	McDonnell Douglas MD-11	273.300	Heavy	Heavy	2
A342	Airbus A340-200	253.500	Heavy	Heavy	2
A343	Airbus A340-300	276.700	Heavy	Heavy	2
B788	Boeing 787-8	228.000	Heavy	Heavy	2
B789	Boeing 787-9	254.000	Heavy	Heavy	2

B78X	Boeing 787-10	254.000	Heavy	Heavy	2
A332	Airbus A330-200	242.000	Heavy	Heavy	2
A333	Airbus A330-300	242.000	Heavy	Heavy	2
A339	Airbus A330-900 (neo)	251.000	Heavy	Heavy	2
B762	Boeing 767-200ER	179.169	Heavy	Heavy	2
B763	Boeing 767-300ER	186.880	Heavy	Heavy	2
B764	Boeing 767-400ER	204.116	Heavy	Heavy	2
DC10	McDonnell Douglas DC-10	251.744	Heavy	Heavy	2
A306	Airbus A300-600	165.000	Heavy	Heavy	2
A30F	Airbus A300-600F	170.500	Heavy	Heavy	2
A312	Airbus A310-200	142.000	Heavy	Heavy	2
A313	Airbus A310-300	157.000	Heavy	Heavy	2
B752	Boeing 757-200	116.000	Medium	Large	3
B753	Boeing 757-300	124.000	Medium	Large	3
A321	Airbus A321	83.000	Medium	Large	3
A21N	Airbus A321neo	89.000	Medium	Large	3
B736	Boeing 737-600	65.544	Medium	Large	3
B737	Boeing 737-700	70.080	Medium	Large	3
B738	Boeing 737-800	79.016	Medium	Large	3
B739	Boeing 737-900ER	85.139	Medium	Large	3
B37M	Boeing 737 MAX 7	80.285	Medium	Large	3

B38M	Boeing 737 MAX 8	82.190	Medium	Large	3
B39M	Boeing 737 MAX 9	88.314	Medium	Large	3
A320	Airbus A320-200	73.000	Medium	Large	3
A20N	Airbus A320neo	73.000	Medium	Large	3
A221	Airbus A220-100	63.100	Medium	Large	3
A223	Airbus A220-300	69.900	Medium	Large	3
A319	Airbus A319	70.000	Medium	Large	3
A19N	Airbus A319neo	70.000	Medium	Large	3
A318	Airbus A318-100	61.500	Medium	Large	3
B712	Boeing 717-200 BGW	49.895	Medium	Large	4
B712	Boeing 717-200 HGW	54.884	Medium	Large	3
B721	Boeing 727-100	72.699	Medium	Large	3
B722	Boeing 727-200	83.900	Medium	Large	3
F100	Fokker F100	46.000	Medium	Large	4
RJ85	Avro RJ 85	42.000	Medium	Large	4
CRJ2	Bombardier CRH 200	24.000	Medium	Large	4
CRJ7	Bombardier CRH 700	34.000	Medium	Large	4
CRJ9	Bombardier CRH 900	38.330	Medium	Large	4
CRJX	Bombardier CRH 1000	41.640	Medium	Large	4
E170	Embraer E170	38.600	Medium	Large	4
E175	Embraer E175	40.370	Medium	Large	4

E190	Embraer E190	51.800	Medium	Large	3
E195	Embraer E195	52.290	Medium	Large	3
E145	Embraer ERJ 145	22.000	Medium	Large	4
E120	Embraer EMB 120 Brasilia	11.500	Medium	Small	4
AT72	ATR 72	21.500	Medium	Large	4
AT42	ATR 42	16.700	Medium	Small	4
MD80	McDonnell Douglas MD-80	67.812	Medium	Large	3
MD90	McDonnell Douglas MD-90	61.200	Medium	Large	3
MD95	McDonnell Douglas MD-95	49.895	Medium	Large	4
Q200	De Havilland Canada Dash 8 Q200	16.466	Medium	Small	4
Q300	De Havilland Canada Dash 8 Q300	19.505	Medium	Large	4
Q400	De Havilland Canada Dash 8 Q400	30.481	Medium	Large	4



# C | Allegato C

La valutazione del costo unitario per la preparazione del sito di installazione di un EMAS è stata effettuata facendo riferimento ai prezzi regionali di tre regioni italiane, rappresentative rispettivamente del Nord, del Centro e del Sud Italia. Alcune voci di costo sono state invece ricavate dal prezzo ANAS 2025. [90][86][88][89][87][46]

Nell'allegato sono riportate le singole voci di prezzo identificate per le lavorazioni da eseguire, raggruppate secondo le cinque macrocategorie definite dalla FAA Order 5200.9 [97]. Si specifica che le pavimentazioni sono state suddivise in due tipologie:

- **Tipologia 1:** pavimentazione prevista per la distanza di *setback*, alla quale viene richiesta una portanza superiore e delle caratteristiche superficiali ad alta aderenza;
- **Tipologia 2:** pavimentazione di supporto al sistema d'arresto EMAS, per la quale vengono previste caratteristiche standard.

I risultati ottenuti sono stati definiti all'interno del Capitolo 10.

## REGIONE LOMBARDIA

OPERAZIONE (FAA Order 5200.9)	CODICE	OPERA	DESCRIZIONE	Unità di misura	€/u.m.
1. Rimozione del materiale di superficie esistente	LOM252.OC.EEA.Mc09.A6400.Na000.0005	Scotico di terra generico; spessore [cm] > 20	Scavo con mezzo meccanico. Incluso: estirpazione erba, arbusti, alberi di piccole dimensioni; demolizione e rimozione recinzioni; deposito terre in cantiere. SPECIFICHE TECNICHE: a sezione aperta eseguita con escavatore; alberi di piccole dimensioni eliminabili facilmente con i normali mezzi d'opera.	m <sup>3</sup>	<b>5,41</b>
	A02.003 (ANAS 2025)	Fornitura materiali per rilevati da cava o impianto di recupero o riciclo con distanza fino a 5 km	Fornitura in cantiere di materiali per la formazione di rilevati e il riempimento di cavi, gruppi A1, A2-4, A2-5, A3. Area: nord Italia. Compresa l'eventuale cavatura, il carico, il trasporto e lo scarico del materiale e tutti gli altri oneri indicati nel capitolato speciale d'appalto, rispondenti ai CAM secondo la normativa vigente, per quanto applicabili, nonché alle relative eventuali indicazioni di progetto.	m <sup>3</sup>	<b>23,41</b>
2. Installazione di un materiale di base aggregato	LOM252.OC.EEA.Pa04.A6600.Na000.0025	Reinterro di terra generico. Aggregato misto granulare di roccia minerale naturale	Formazione. Incluso: carico, trasporto e scarico a luogo d'impiego; spianamenti e costipazione a strati non superiori a 50 cm; bagnatura; ricarichi.	m <sup>3</sup>	<b>26,52</b>
	A02.020.b (ANAS 2025)	Stabilizzazione e sistemazione di terreni con calce	Compreso l'onere della fornitura del legante da dosare, secondo le esigenze di stabilizzazione in quantità secche comprese tra i 40 e 60 kg/mc finito, ed ogni altro onere per la completa posa in opera del materiale stabilizzato.	m <sup>3</sup>	<b>17,06</b>

	A02.001.c (ANAS 2025)	Preparazione del piano di posa dei rilevati senza sostituzione di terreni A1/A3	Preparazione con compattazione del piano di posa per appoggio di rilevati, anche stradali, su strati superficiali di terreno tipo A1, A2-4, A2-5, A3 per i quali non è necessario sostituire lo strato superficiale.	m <sup>2</sup>	0,65
	LOM252.OC.ADB.Mc10.A6200.Na000.0000.b	Livellamento di terra generico	Movimentazione con mezzo meccanico SPECIFICHE TECNICHE: su volumi tra i 10 e 40 cm	m <sup>2</sup>	0,12
3. Installazione di uno strato superficiale in asfalto	<b>Tipologia 1: PAVIMENTAZIONE DI SETBACK</b>				
	LOM252.OC.ITA.Pa04.D0900.J0009.0005.b	Strato di base, ad elevate prestazioni di conglomerato bituminoso; geometria: due strati   tout-venant; impiego: opere stradali; spessore 15cm	Formazione. Incluso: pulizia sede; stesa; costipazione. SPECIFICHE TECNICHE: impasto con bitume normale e compound polimerici a moderata additivazione; dosaggio emulsione bituminosa [kg/m <sup>2</sup> ] = 0,70.	m <sup>2</sup>	37,18
	LOM252.OC.ITA.Pa04.D0901.J0009.0000.b	Strato di binder, ad elevate prestazioni di conglomerato bituminoso, opere stradali, s = 8cm	Formazione. Incluso: pulizia sede; stesa; costipazione. SPECIFICHE TECNICHE: impasto con bitume normale e compound a moderata additivazione; dosaggio emulsione bituminosa [kg/m <sup>2</sup> ] = 0,70.	m <sup>2</sup>	21,42
	LOM252.OC.ITA.Pa04.D1201.J0009.0000.d	Strato di usura stradale, ad elevata aderenza di conglomerato bituminoso; impiego: opere stradali; spessore medio [mm] = 60; aderenza superficiale BPN [-] ≥ 60.	Formazione. Incluso: pulizia sede; stesa; costipazione. SPECIFICHE TECNICHE: dosaggio emulsione bituminosa [kg/m <sup>2</sup> ] = 0,70; impasto con: aggregati impastati a caldo con bitume normale (dosaggio minimo di bitume totale su miscela [%] = 5,6), additivo attivante l'adesione (dopes di adesività) e compound di polimeri e fibre in pellets immessi direttamente nel mescolatore durante la fase produttiva (dosaggio su peso aggregati [%] = 0,2 ÷ 0,6).	m <sup>2</sup>	22
	<b>Tipologia 2: PAVIMENTAZIONE A SOSTEGNO DEL SISTEMA D'ARRESTO EMAS</b>				
LOM252.OC.ITA.Pa04.D0900.J0009.0505.b	Strato di base di conglomerato	Formazione. Incluso: pulizia sede; stesa; costipazione.	m <sup>2</sup>	34,83	

		bituminoso; geometria: due strati   tout-venant; impiego: opere stradali; spessore [cm] = 15.	SPECIFICHE TECNICHE: impasto con bitume normale; dosaggio emulsione bituminosa [kg/m <sup>2</sup> ] = 0,70.		
	<b>LOM252.OC.ITA.Pa04.D0901.J0009.0250.b</b>	Strato di binder di conglomerato bituminoso; impiego: opere stradali   sede stradale; spessore [cm] = 8.	Formazione. Incluso: pulizia sede; stesa; costipazione. SPECIFICHE TECNICHE: impasto con bitume normale; dosaggio emulsione bituminosa [kg/m <sup>2</sup> ] = 0,70.	m <sup>2</sup>	<b>19,95</b>
	<b>LOM252.OC.ITA.Pa04.D1201.J0009.0785.d</b>	Strato di usura stradale di conglomerato bituminoso; impiego: opere stradali; spessore medio [mm] = 60; aderenza superficiale BPN [-] ≥ 55.	Formazione. Incluso: pulizia sede; stesa mediante finitrice meccanica; costipazione a mezzo di rulli. SPECIFICHE TECNICHE: dosaggio emulsione bituminosa [kg/m <sup>2</sup> ] = 0,70; impasto con: aggregati impastati a caldo con bitume normale (dosaggio su miscela [%] = 4,80) ed additivo attivante l'adesione.	m <sup>2</sup>	<b>16,98</b>
<b>4. Costi di ingegneria e ispezione</b>	Pari al 10 % del costo di costruzione			m <sup>2</sup>	<b>Tipologia 1: 10,47 Tipologia 2: 9,59</b>
<b>5. Costi di mobilitazione e smobilitazione del cantiere</b>	Pari al 4 % del costo di costruzione			m <sup>2</sup>	<b>Tipologia 1: 6,23 Tipologia 2: 3,84</b>

## REGIONE LAZIO

OPERAZIONE (FAA FAR 5200.9)	CODICE	OPERA	DESCRIZIONE	Unità di misura	€/u.m.
<p>1. Rimozione del materiale di superficie esistente</p> <p>2. Installazione di un materiale di base aggregato</p>	A 2.01.1.b	Scavo a sezione aperta	<p>Scavo a sezione aperta per sbancamento e splateamento in rocce di qualsiasi natura e consistenza con resistenza inferiore a 8 N/mmq (argille sciolte e compatte, sabbie, ghiaie, pozzolane, lapilli, tufi ecc.) compreso il taglio e la rimozione di radici, ceppaie, pietre e trovanti di roccia e muratura di volume fino a 0,50 mc sia in asciutto che in bagnato, anche in presenza di acqua stabilizzantesi nel cavo fino all'altezza di 0,20 m esclusa l'acqua proveniente da falda, compreso e compensato l'onere per il rispetto di costruzioni sotterranee preesistenti da mantenere quali fognie, condutture in genere, cavi, ecc., inoltre, lo spianamento e la configurazione del fondo, anche se a gradoni, l'eventuale profilatura di pareti, scarpate e cigli, l'eventuale tiro in alto sull'orlo</p> <p>del cavo e comunque in posizione di sicurezza: eseguito con mezzi meccanici, compreso il carico sui mezzi di trasporto.</p>	m <sup>3</sup>	<b>9,10</b>
	A02.003 (ANAS 2025)	Fornitura materiali per rilevati da cava o impianto di recupero o riciclo con distanza fino a 5 km	<p>Fornitura in cantiere di materiali per la formazione di rilevati e il riempimento di cavi, gruppi A1, A2-4, A2-5, A3. Area: centro Italia. Compresa l'eventuale cavatura, il carico, il trasporto e lo scarico del materiale e tutti gli altri oneri indicati nel capitolato speciale d'appalto, rispondenti ai CAM secondo la normativa vigente, per quanto applicabili, nonché alle relative eventuali indicazioni di progetto.</p>	m <sup>3</sup>	<b>21,71</b>
	A 2.02.43	Reinterro manuale con terreno di riporto	<p>Per trincee di scavo di qualsiasi sezione e forma, comprensivo di scariolatura e spianamento del terreno.</p>	m <sup>3</sup>	<b>65,45</b>

	<b>A02.020.b (ANAS 2025)</b>	Stabilizzazione e sistemazione di terreni con calce	Compreso l'onere della fornitura del legante da dosare, secondo le esigenze di stabilizzazione in quantità secche comprese tra i 40 e 60 kg/mc finito, ed ogni altro onere per la completa posa in opera del materiale stabilizzato.	m <sup>3</sup>	<b>17,06</b>
	<b>A02.001.c (ANAS 2025)</b>	Preparazione del piano di posa dei rilevati senza sostituzione di terreni A1/A3	Preparazione con compattazione del piano di posa per appoggio di rilevati, anche stradali, su strati superficiali di terreno tipo A1, A2-4, A2-5, A3 per i quali non è necessario sostituire lo strato superficiale.	m <sup>3</sup>	<b>0,65</b>
		Livellamento di terra generico	Compreso nella voce A 2.02.43		
	<b>Tipologia 1: PAVIMENTAZIONE DI SETBACK</b>				
	<b>B 1.05.9.c</b>	Conglomerato bituminoso per strato di base. Bitume modificato hard	Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base, provvisto di certificazione CE di prodotto secondo UNI EN 13108 e nel rispetto delle nuove norme tecniche di capitolato, steso con idonee vibrofinitrici e compattato con rulli di idonea massa. Misurato in opera dopo costipamento.	m <sup>3</sup>	<b>281,95</b>
	<b>B 1.05.11.c</b>	Conglomerato bituminoso per strato di collegamento (binder). Bitume modificato hard	Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base, provvisto di certificazione CE di prodotto secondo UNI EN 13108 e nel rispetto delle nuove norme tecniche di capitolato, steso con idonee vibrofinitrici e compattato con rulli di idonea massa. Misurato in opera dopo costipamento.	m <sup>3</sup>	<b>326,3</b>
	<b>B 1.05.15.a – b</b>	Conglomerato bituminoso per strato di usura antisdrucchiolo	Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base, provvisto di certificazione CE di prodotto secondo UNI EN 13108 e nel rispetto delle nuove norme tecniche di capitolato, steso con idonee vibrofinitrici e compattato con rulli di idonea massa. Misurato in opera dopo costipamento.. Spessore di 6cm	m <sup>3</sup>	<b>37,39</b>
	<b>Tipologia 2: PAVIMENTAZIONE A SOSTEGNO DEL SISTEMA D'ARRESTO EMAS</b>				
	<b>B 1.05.9.a</b>	Conglomerato bituminoso per strato di base. Bitume tradizionale	Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base, provvisto di certificazione CE di prodotto secondo UNI EN 13108 e nel rispetto delle nuove norme tecniche di capitolato, steso con idonee vibrofinitrici e	m <sup>2</sup>	<b>34,83</b>

### 3. Installazione di uno strato superficiale in asfalto

			compattato con rulli di idonea massa. Misurato in opera dopo costipamento.		
	<b>B 1.05.11.a</b>	Conglomerato bituminoso per strato di collegamento (binder). Bitume tradizionale	Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base, provvisto di certificazione CE di prodotto secondo UNI EN 13108 e nel rispetto delle nuove norme tecniche di capitolato, steso con idonee vibrofinitrici e compattato con rulli di idonea massa. Misurato in opera dopo costipamento.	m <sup>2</sup>	<b>19,95</b>
	<b>B 1.05.14.a</b> <b>B 1.05.14.1.a</b>	Conglomerato bituminoso per strato di usura con bitume tradizionale	Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base, provvisto di certificazione CE di prodotto secondo UNI EN 13108 e nel rispetto delle nuove norme tecniche di capitolato, steso con idonee vibrofinitrici e compattato con rulli di idonea massa. Misurato in opera dopo costipamento e per uno spessore di 6cm	m <sup>2</sup>	<b>16,98</b>
<b>4. Costi di ingegneria e ispezione</b>	Pari al 10 % del costo di costruzione			m <sup>2</sup>	<b>Tipologia 1: 14,64</b> <b>Tipologia 2: 11,21</b>
<b>5. Costi di mobilitazione e smobilitazione del cantiere</b>	Pari al 4 % del costo di costruzione			m <sup>2</sup>	<b>Tipologia 1: 5,85</b> <b>Tipologia 2: 4,49</b>

## REGIONE CAMPANIA

OPERAZIONE (FAA FAR 5200.9)	CODICE	OPERA	DESCRIZIONE	Unità di misura	€/u.m.
<p><b>1. Rimozione del materiale di superficie esistente</b></p> <p><b>2. Installazione di un materiale di base aggregato</b></p>	<b>CAM25_E01.010.010.A</b>	Scavo a sezione aperta eseguito con mezzi meccanici	Scavo a sezione aperta per sbancamento, eseguito con mezzi meccanici, anche in presenza di battente d'acqua fino a 20 cm sul fondo, compresi i trovanti di volume fino a 0,30 mc, la rimozione di arbusti, lo sradicamento di ceppaie, la regolarizzazione delle pareti secondo profili di progetto, lo spianamento del fondo, anche a gradoni, il paleggiamento sui mezzi di trasporto o l'accantonamento in appositi siti indicati dal D.L. nell'ambito del cantiere, compresi il rispetto di costruzioni preesistenti sotterranee. In rocce sciolte (con trovanti fino a 0,3 mc)	m <sup>3</sup>	<b>4,49</b>
	<b>A02.003 (ANAS 2025)</b>	Fornitura materiali per rilevati da cava o impianto di recupero o riciclo con distanza fino a 5 km	Fornitura in cantiere di materiali per la formazione di rilevati e il riempimento di cavi, gruppi A1, A2-4, A2-5, A3. Area: sud Italia. Compresa l'eventuale cavatura, il carico, il trasporto e lo scarico del materiale e tutti gli altri oneri indicati nel capitolato speciale d'appalto, rispondenti ai CAM secondo la normativa vigente, per quanto applicabili, nonché alle relative eventuali indicazioni di progetto.	m <sup>3</sup>	<b>20,08</b>
	<b>CAM25_A01.040.400.A</b>	Reinterro di terreno	Rinterro di terreno, precedentemente asportato, mediante l'utilizzo di piccolo mezzo meccanico e con l'ausilio di personale per lo spostamento del terreno in zone di difficile accesso per il mezzo e pistonatura	m <sup>3</sup>	<b>20,80</b>
	<b>A02.020.b (ANAS 2025)</b>	Stabilizzazione e sistemazione di terreni con calce	Compreso l'onere della fornitura del legante da dosare, secondo le esigenze di stabilizzazione in quantità secche comprese tra i 40 e 60 kg/mc finito, ed ogni altro onere per la completa posa in opera del materiale stabilizzato.	m <sup>3</sup>	<b>17,06</b>
	<b>A02.001.c (ANAS 2025)</b>	Preparazione del piano di posa dei rilevati senza	Preparazione con compattazione del piano di posa per appoggio di rilevati, anche stradali, su strati	m <sup>2</sup>	<b>0,65</b>

		sostituzione di terreni A1/A3	superficiali di terreno tipo A1, A2-4, A2-5, A3 per i quali non è necessario sostituire lo strato superficiale.			
	<b>CAM25_V07.040.010.A</b>	Livellamento del terreno	Livellamento del terreno eseguito con trattrice su volumi limitati fino a 30 - 40 cm	m <sup>2</sup>	<b>35,25</b>	
<b>3. Installazione di uno strato superficiale in asfalto</b>	<b>CAM25_U05.020.090.A</b>	Conglomerato bituminoso per strato di base	Conglomerato bituminoso per strato di base costituito da miscela di aggregati e di bitume, in idonei impianti di dosaggio, steso in opera con vibrofinitrici, costipato con appositi rulli compressori. Spessore 15cm	m <sup>2</sup>	<b>35,25</b>	
	<b>CAM25_U05.020.095.A</b>	Conglomerato bituminoso per strato di collegamento (binder)	Conglomerato bituminoso per strato di collegamento (binder) costituito da miscela di aggregati e bitume, confezionato a caldo in idonei impianti, steso in opera con vibrofinitrici, e costipato con appositi rulli. Spessore 9cm	m <sup>2</sup>	<b>23,31</b>	
	<b>Tipologia 1: PAVIMENTAZIONE DI SETBACK</b>					
	<b>CAM25_U05.020.024.A</b>	Conglomerato bituminoso per strato di usura di tipo antiskid	Conglomerato bituminoso per manto di usura di tipo antiskid, con alto contenuto di graniglia. Spessore 3 cm	m <sup>2</sup>	<b>24,18</b>	
	<b>Tipologia 2: PAVIMENTAZIONE A SOSTEGNO DEL SISTEMA D'ARRESTO EMAS</b>					
	<b>CAM25_U05.020.096.A</b>	Conglomerato bituminoso per strato di usura	Conglomerato bituminoso per strato di usura (tappetino), costituito da una miscela di pietrischetti e graniglie aventi perdita di peso alla prova Los Angeles (CRN BU n° 34) 20% confezionato a caldo in idoneo impianto, con bitume in quantità non inferiore al 5% del peso degli inerti, e conformemente alle prescrizioni del CsdA; compresa la fornitura e stesa del legante di ancoraggio in ragione di 0,7 kg/m <sup>2</sup> di emulsione bituminosa al 55%; steso in opera con vibrofinitrice meccanica e costipato con appositi rulli.	m <sup>2</sup>	<b>17,10</b>	
<b>4. Costi di ingegneria e ispezione</b>	Pari al 10 % del costo di costruzione			m <sup>2</sup>	<b>Tipologia 1: 12,77 Tipologia 2: 9,64</b>	

5. Costi di mobilitazione e smobilitazione del cantiere	Pari al 4 % del costo di costruzione	m <sup>2</sup>	<b>Tipologia 1:</b> <b>5,10</b> <b>Tipologia 2:</b> <b>3,86</b>
---	--------------------------------------	----------------	--

# D | Allegato D

Nel presente allegato sono riportati, per ciascun aeroporto analizzato, la *Takeoff Performance Chart* dell'aeromobile di riferimento e i grafici relativi all'andamento delle diverse grandezze in funzione dello spostamento della soglia, in relazione alle considerazioni presentate all'interno del Capitolo 10.

La diminuzione del peso massimo ammesso al decollo e del numero di passeggeri sono relativi ad un singolo volo, considerando l'aereo rappresentativo scelto.

In seguito, vengono fornite le perdite relative alle varie tipologie di voli effettuati nello scalo in esame, con riferimento al prezzo medio del biglietto proposto all'interno del Capitolo 10.

Infine, vengono presentate le tre tipologie di perdite (gestore aeroportuale, servizi di trasporto e servizi commerciali) nell'anno 2025, sulla base del numero di movimenti definito per ogni scalo.

## Analisi di un aeroporto regionale

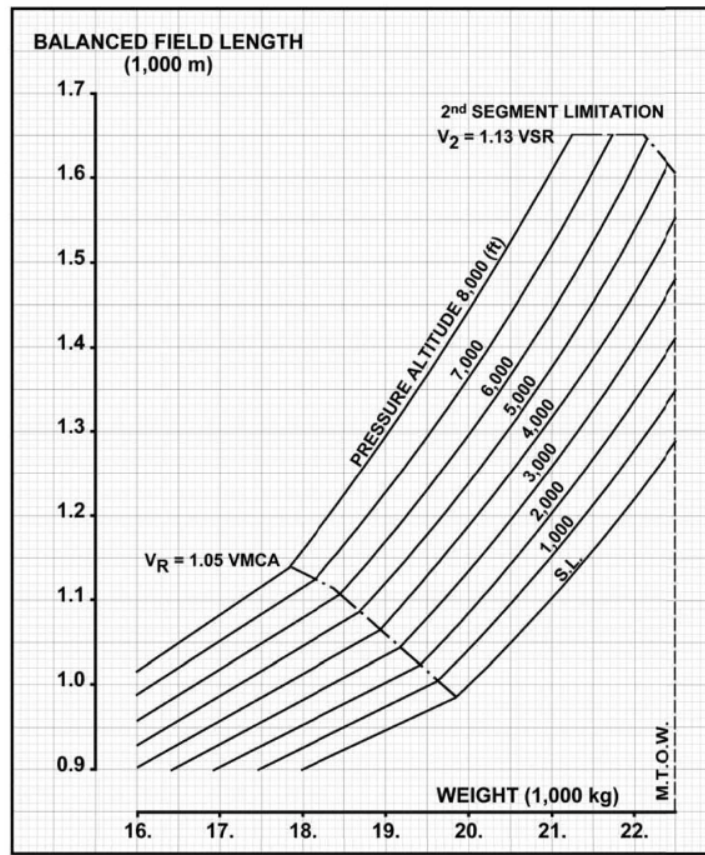


Figura D.1: *Takeoff Performance Chart*, ATR 72-600 [44]

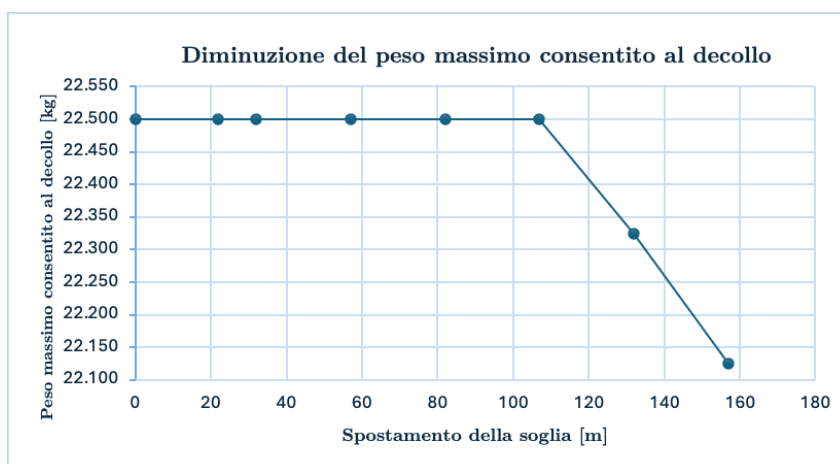


Figura D.2: Diminuzione del peso massimo al decollo, Aeroporto regionale

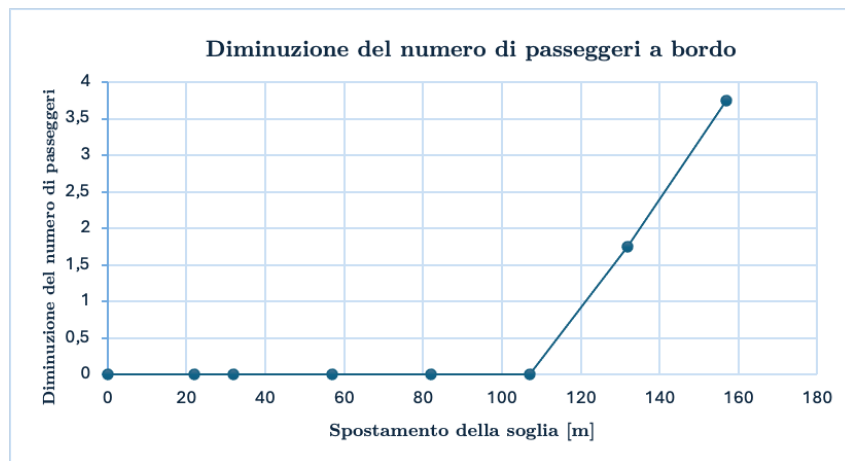


Figura D.3: Diminuzione del numero di passeggeri, Aeroporto regionale

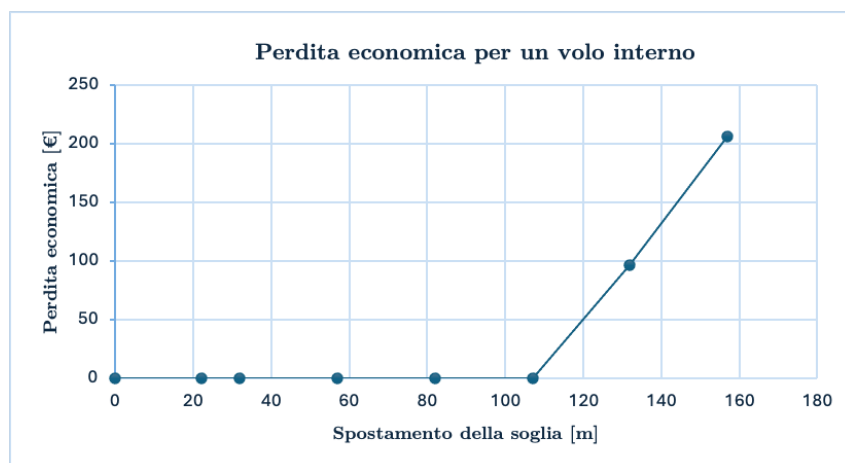


Figura D.4: Perdita per un volo interno, Aeroporto regionale

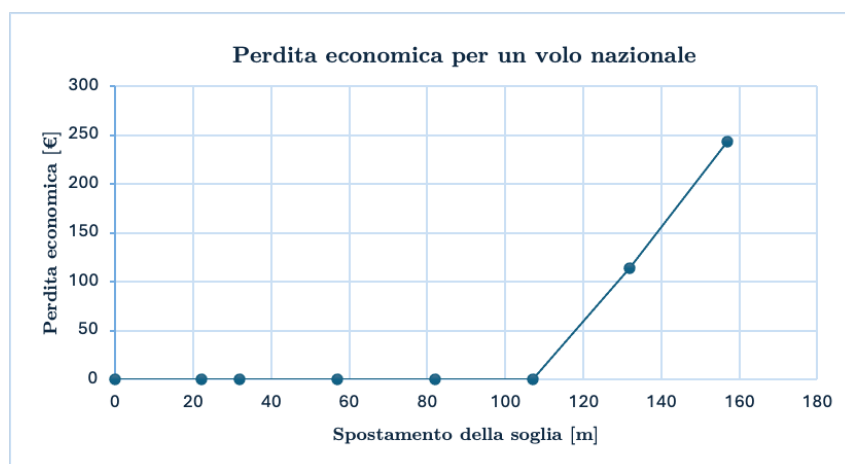


Figura D.5: Perdita per un volo nazionale, Aeroporto regionale

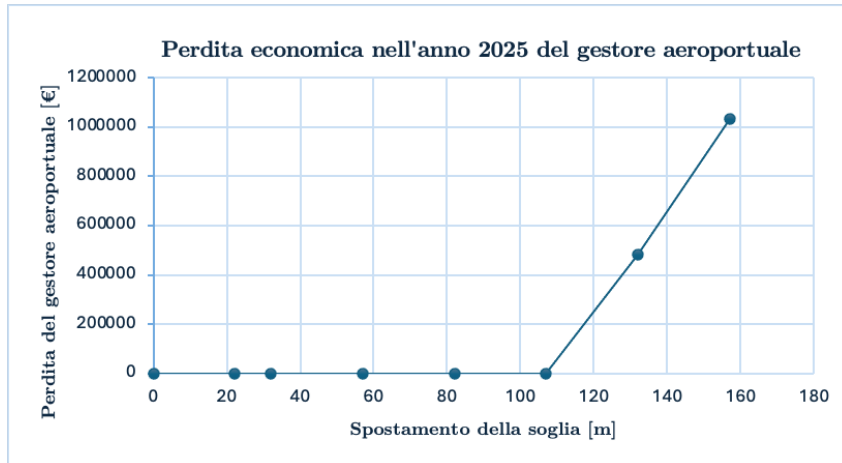


Figura D.6: Perdita del gestore aeroportuale nel 2025, Aeroporto regionale

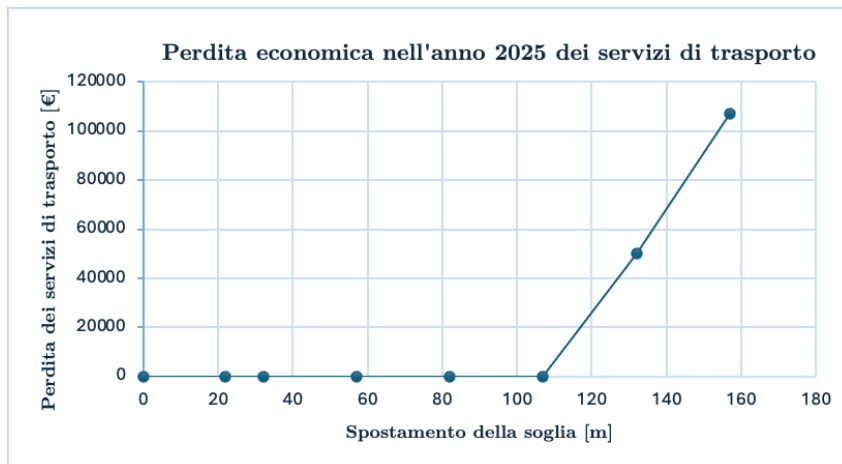


Figura D.7: Perdita dei servizi di trasporto nel 2025, Aeroporto regionale

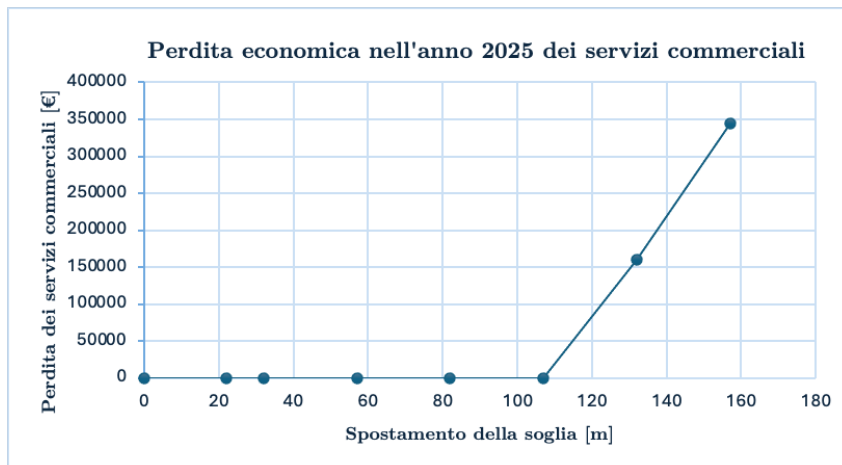


Figura D.8: Perdita dei servizi commerciali nel 2025, Aeroporto regionale

## Analisi di un aeroporto di rilevanza nazionale

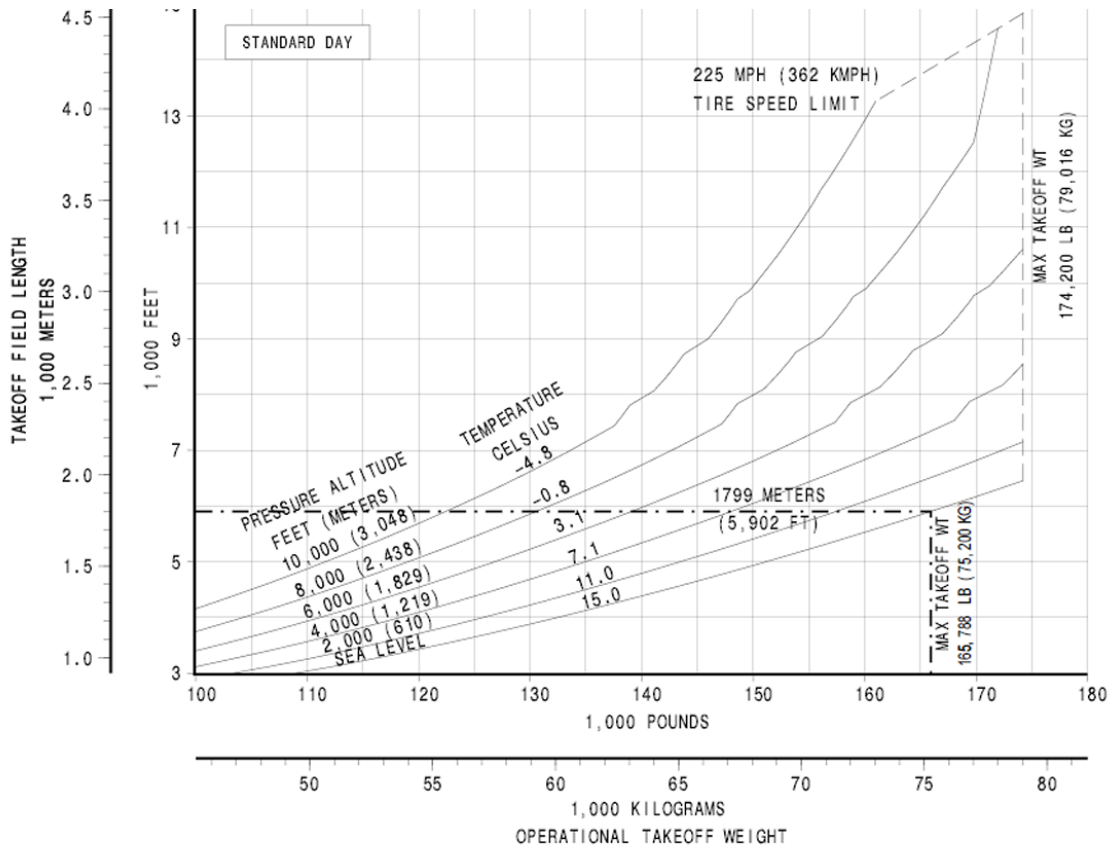


Figura D.9: Takeoff Performance Chart, Boeing 737-800 [92]

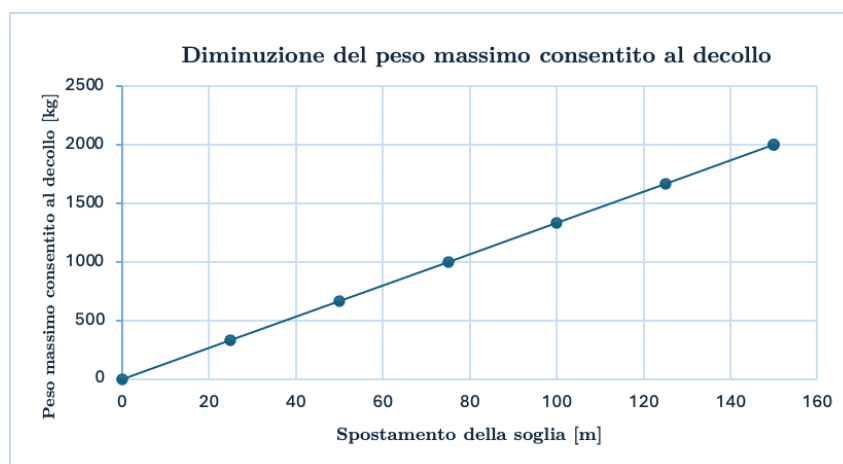


Figura D.10: Diminuzione del peso massimo al decollo, Aeroporto di rilevanza nazionale

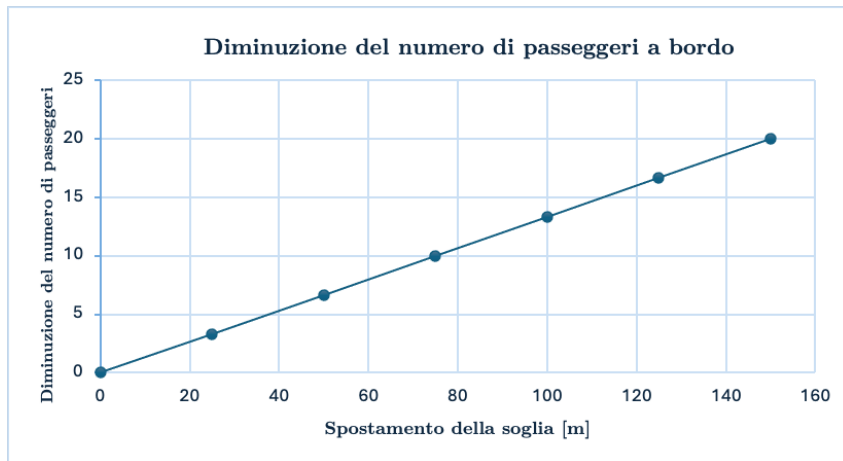


Figura D.11: Diminuzione del numero di passeggeri, Aeroporto di rilevanza nazionale

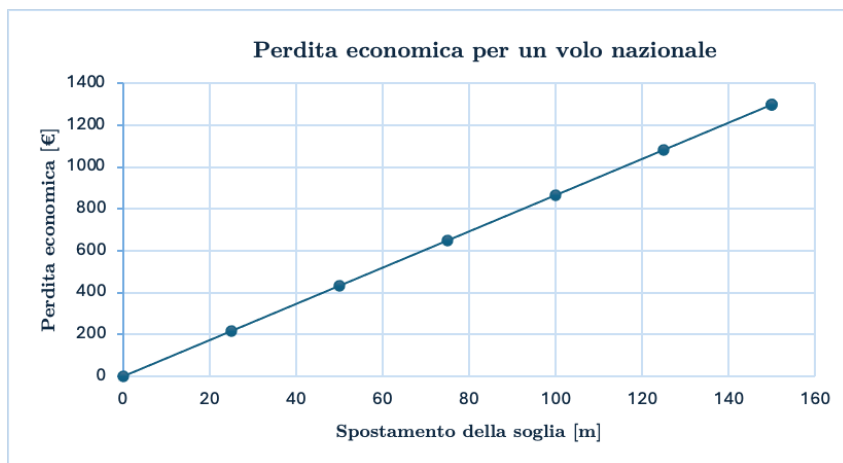


Figura D.12: Perdita per un volo nazionale, Aeroporto di rilevanza nazionale

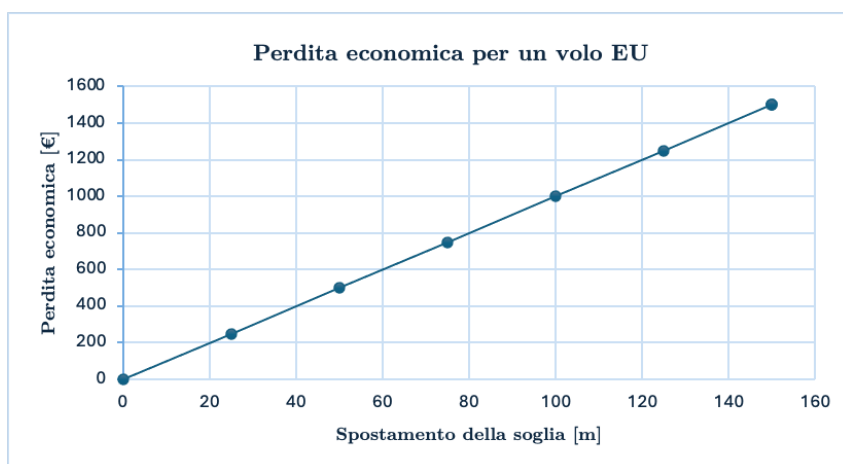


Figura D.13: Perdita per un volo EU, Aeroporto di rilevanza nazionale

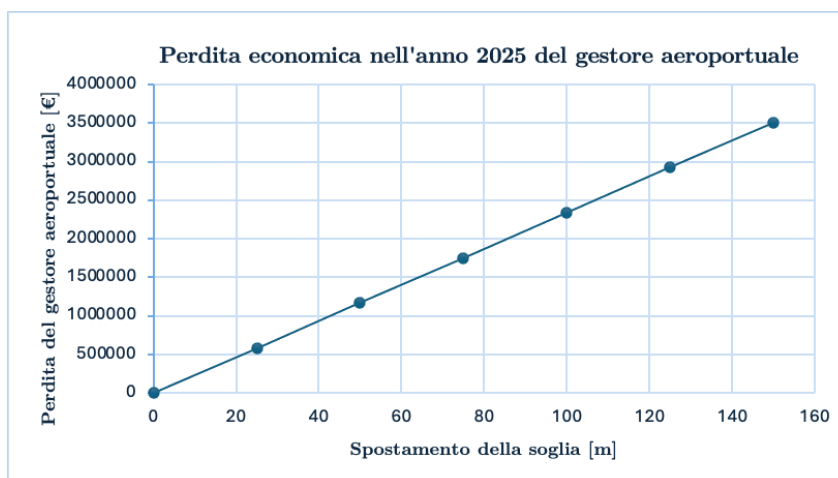


Figura D.14: Perdita del gestore nel 2025, Aeroporto di rilevanza nazionale

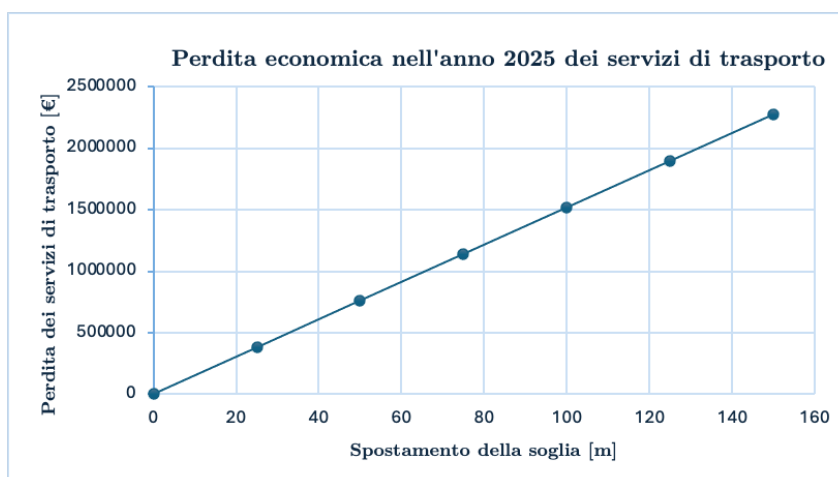


Figura D.15: Perdita dei servizi di trasporto nel 2025, Aeroporto di rilevanza nazionale

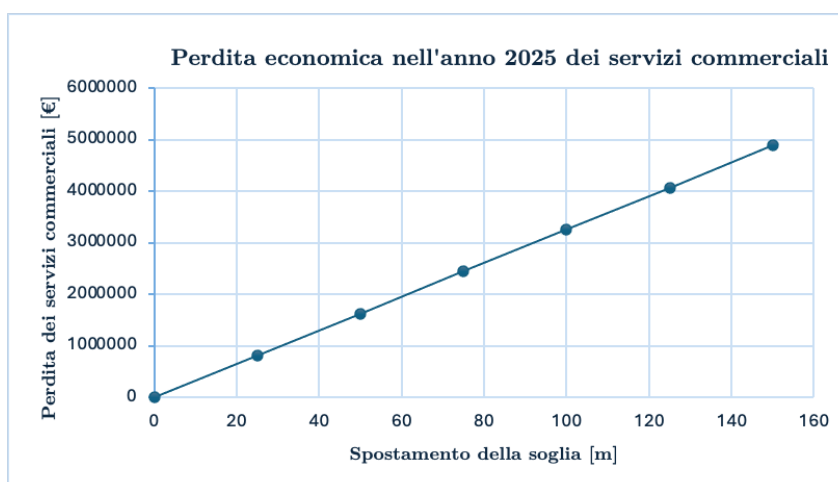


Figura D.16: Perdita dei servizi commerciali nel 2025, Aeroporto di rilevanza nazionale

## Analisi di un aeroporto di rilevanza internazionale

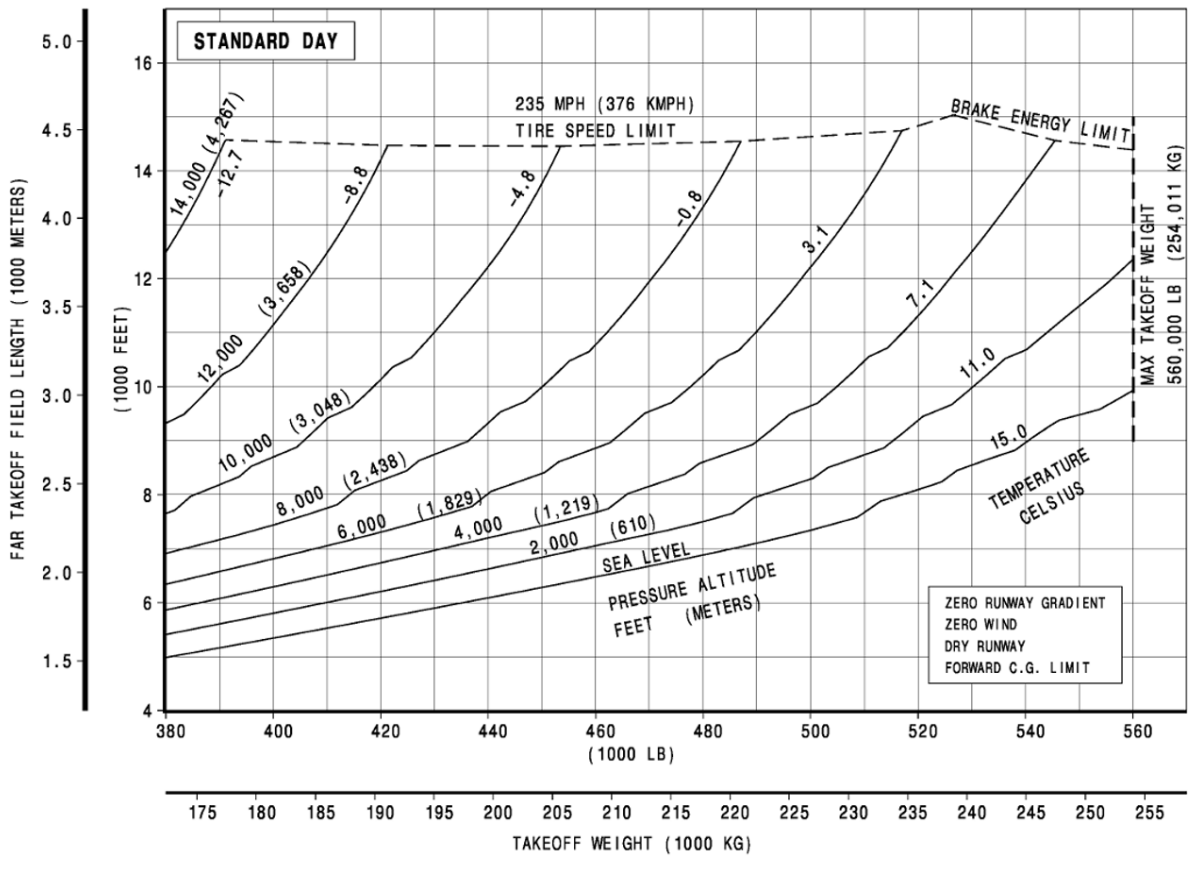


Figura D.17: Takeoff Performance Chart, Boeing 787-900 [93]

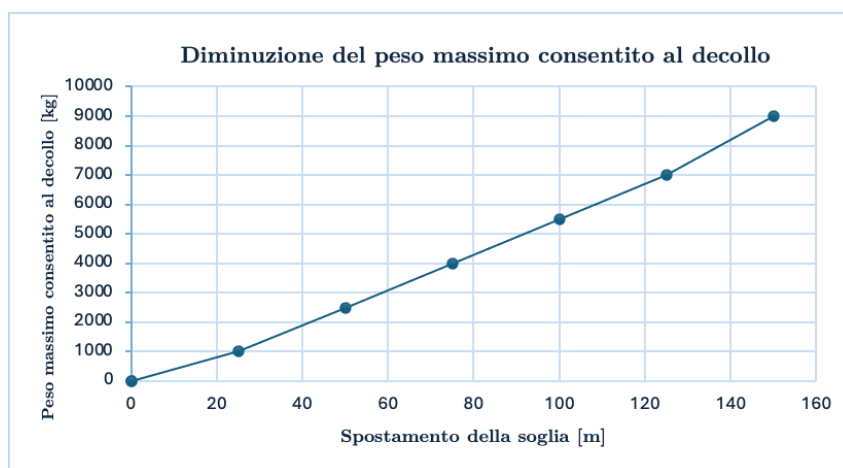


Figura D.18: Diminuzione del peso massimo al decollo, Aeroporto di rilevanza internazionale

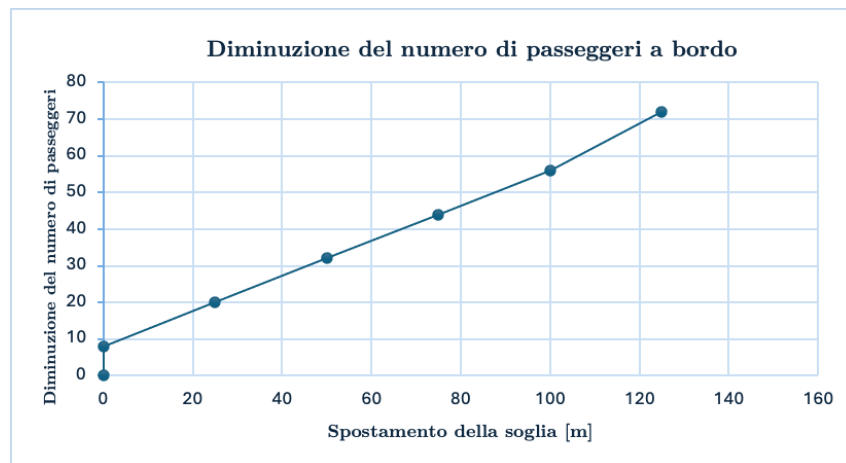


Figura D.19: Diminuzione del numero di passeggeri, Aeroporto di rilevanza internazionale

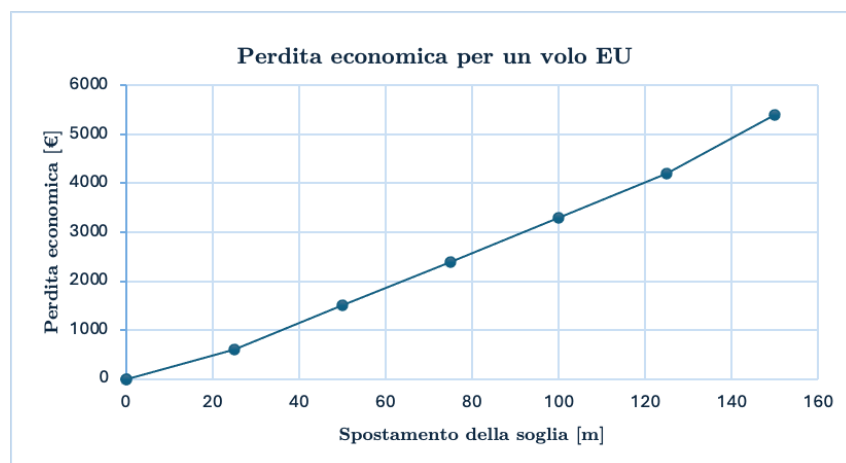


Figura D.20: Perdita per un volo in UE, Aeroporto di rilevanza internazionale

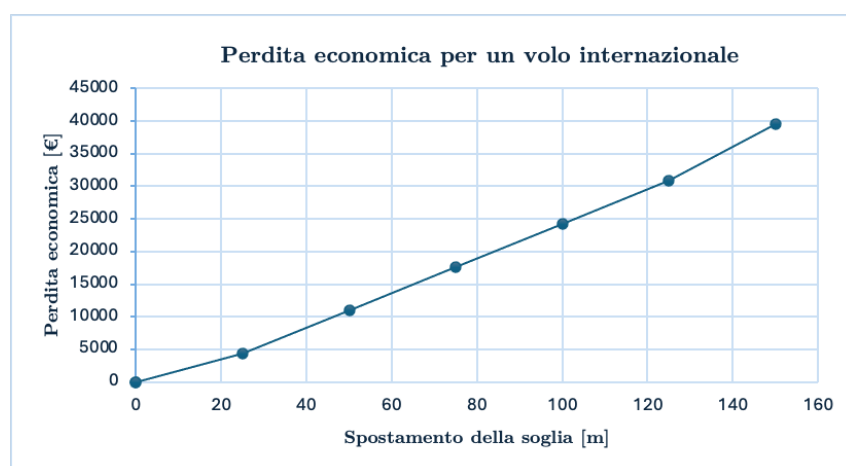


Figura D.21: Perdita per un volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale

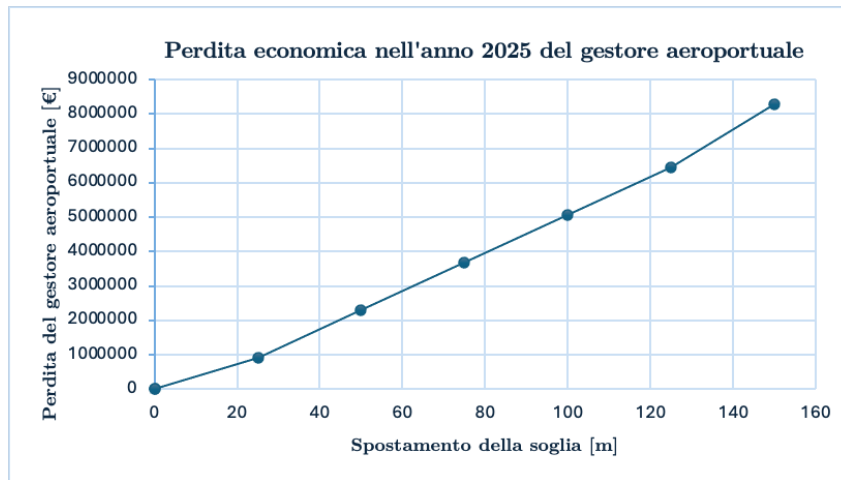


Figura D.22: Perdita del gestore nel 2025 per un volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale

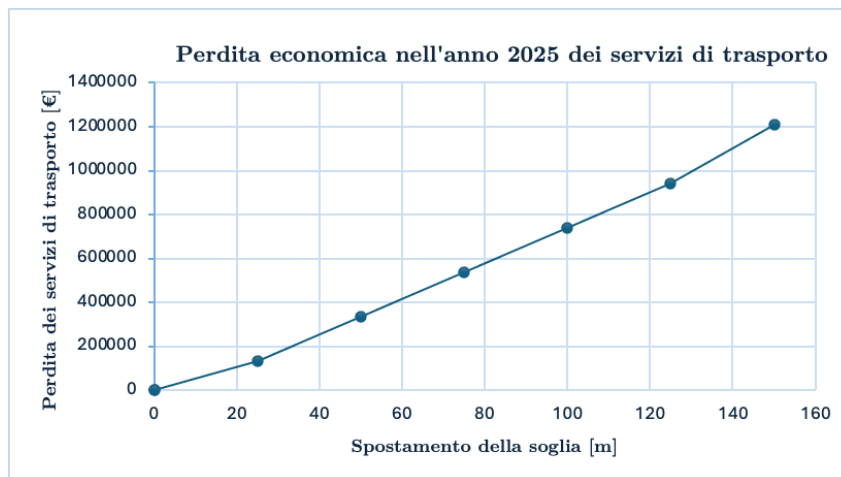


Figura D.23: Perdita dei servizi di trasporto nel 2025 per un volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale

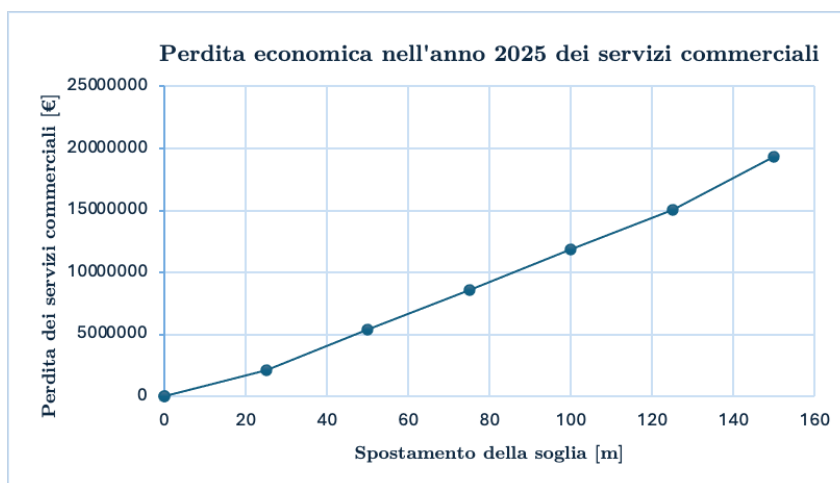


Figura D.24: Perdita dei servizi commerciali nel 2025 per un volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale



## Elenco delle figure

2.1	Tassi incidentali per milione di partenze e partenze totali, Panoramica decennale (Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, The Boeing Company, Aprile 2025) . . . . .	7
2.2	Escursioni di pista nel 2023, 2024 e negli ultimi cinque anni (Runway Excursion, Safety Risk Assessment, IATA, Maggio 2025 [76]) . . . . .	8
2.3	Distribuzione degli eventi (LDOR Overrun in atterraggio, TOOR Overrun in decollo, LDUS Undershoot in atterraggio) (Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas, ACRP Report 3, 2008) . . . . .	9
2.4	Fattori causali di un overrun in atterraggio (Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas, EASA, 2014) . . . . .	10
2.5	Fattori causali di un overrun in decollo (Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas, EASA, 2014) . . . . .	11
2.6	Incidente del volo Southwest Airlines 1248 (8 dicembre 2005), Wikipedia . . . . .	13
2.7	Fattori causali di un undershoot in atterraggio (Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas, EASA, 2014 [61]) . . . . .	14
2.8	Area di sicurezza a fine pista (RESA) per una pista di codice 3 o 4 (EASA, CS-ADR-DSN, Figura GM-C-1) . . . . .	19
2.9	Area di sicurezza di pista (RSA) secondo FAA (FAA, AC 150/5300-13B, Figura 3-19) . . . . .	20
3.1	L'overrun del DC-10 nella pista 4R all'aeroporto JFK, 28 Febbraio 1984 . . . . .	29
3.2	Affondamento del carrello principale nel letto d'arresto EMAS [24] . . . . .	31
3.3	Composizione di un blocco in calcestruzzo alleggerito [24] . . . . .	34
3.4	Vista laterale della prima tipologia di letto d'arresto [24] . . . . .	35
3.5	EMAS in calcestruzzo alleggerito, Pista 4R dell'Aeroporto Internazionale John Fitzgerald Kennedy, New York [17] . . . . .	36
3.6	Composizione di un EMAS in schiuma di vetro [24] . . . . .	37
3.7	Vista laterale di un EMAS in schiuma di vetro [24] . . . . .	38

3.8	EMAS in schiuma di vetro, Aeroporto Internazionale di Zurigo - Kloten [17]	38
4.1	Planning chart fornita dalla FAA per la definizione della lunghezza di un EMAS, Boeing 737-400 (FAA AC 150/5220-22B)[65]	50
4.2	Sezione tipica di un EMAS (FAA AC 150/5220-22B) [65]	51
4.3	Requisiti di progetto per l'installazione di un EMAS standard in piste con codice di approccio C e D (FAA AC 150/5220-22B) [65]	54
4.4	Vista dall'alto di un EMAS e della distanza di setback (ENAC, Linee guida per la progettazione, l'installazione ed il collaudo dei letti di arresto (EMAS))	57
5.1	Parametri di progetto stabiliti dalla FAA ACRP Report 29, Figura 4-1 [41]	62
5.2	Curve di probabilità degli overrun contenuti in funzione della velocità di uscita ACRP Report 29, Figura 5-1 [41]	65
5.3	Variazione sul costo finale del sistema EMAS in funzione della velocità di uscita di progetto ACRP Report 29, Figura 5-6 [41]	65
5.4	Forze agenti sull'aeromobile durante l'arresto nell'EMAS ACRP Report 29, Figura 7-4	68
5.5	Interfaccia pneumatico - EMAS ACRP Report 29, Figura 7-1 [41]	69
5.6	Curva sforzo-deformazione di una schiuma deformabile ACRP Report 29, Figura 7-2 [41]	70
5.7	Schema input e output dell'APC ACRP Report 29, Figura G-1	72
5.8	Esempio di mappa di rischio probabilistico in presenza di un EMAS(M. Ketabdari, E. Toraldo, M. Crispino) [83]	74
5.9	Esempio di mappa di rischio probabilistico in assenza di un EMAS(M. Ketabdari, E. Toraldo, M. Crispino)[83]	74
5.10	Planimetria generale di un sistema d'arresto EMAS	75
5.11	Posizioni finali di arresto dei velivoli in overrun tra il 1978 e il 1987 (Analisi del comportamento dinamico di letti di arresto per aeromobili, M. Bassani, 1999)	77
5.12	Caso 1: decolli e atterraggi RWY09	79
5.13	Caso 1: decolli da RWY27	80
5.14	Distanze percorse dal jet blast per un A320-200 [37]	81
6.1	Blocchi di calcestruzzo cellulare a bassissima densità [8]	87
6.2	Preparazione di EMAS in schiuma di vetro	88
8.1	Struttura del modello di rischio (ACRP Report 50, Figura 15)	119
8.2	Sistema di riferimento per eventi di overrun (ACRP Report 50, Figura 17)	120

8.3	Sistema di riferimento per eventi di undershoot (ACRP Report 50, Figura 18) . . . . .	120
8.4	Sistema di riferimento per eventi di veer-off (ACRP Report 50, Figura 19)	120
8.5	Modello delle conseguenze (ACRP Report 50, Figura 30) . . . . .	121
8.6	a) RSA con EMAS, b) RSA equivalente convenzionale (ACRP Report 50, Figura E1) . . . . .	122
8.7	Soglie di decelerazione per danni all'aeromobile e lesioni degli occupanti (ACRP Report 29, Tabella 4-1) [41] . . . . .	125
8.8	Soglie di decelerazione e criterio di progettazione dei sedili FAA (ACRP Report 29, Figura E-1) . . . . .	135
8.9	Sezione di prova di un Boeing 737-200 prima del drop test (Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test, Figura 1) . . . . .	139
8.10	Sezione di prova di un Boeing 737-200 dopo il drop test (Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test, Figura 3) . . . . .	139
9.1	Field Strength Test in un EMAS in blocchi di calcestruzzo cellulare . . . . .	148
10.1	Modello del costo del ciclo di vita di un'opera (FAA Airport Benefit – Cost Analysis, Exhibit 11-1) . . . . .	153
10.2	Definizione della lunghezza del letto d'arresto EMAS in funzione del MTOW dell'aeromobile critico (FAA, Order 5200.9, Figura 3) . . . . .	155
10.3	Definizione del massimo costo economicamente sostenibile in funzione della lunghezza del letto EMAS (FAA, Order 5200.9, Figura 4) . . . . .	155
10.4	Confronto dei costi unitari medi normalizzati tra FAA Order 5200.9 e la ricerca condotta dall'ACRP (ACRP, Report 29, Tabella 3-5) . . . . .	158
10.5	Confronto del costo di vita utile di un EMAS tra la ricerca dell'ACRP e la FAA Order 5200.9 (ACRP, Report 29, Figura 3-9) . . . . .	159
10.6	ATR 72-600 . . . . .	166
10.7	Boeing 737-800 . . . . .	166
10.8	Boeing 787-900 . . . . .	167
10.9	Perdita del gestore per singolo volo, Aeroporto regionale . . . . .	171
10.10	Perdita dei servizi di trasporto per singolo volo, Aeroporto regionale . . . . .	172
10.11	Perdita dei servizi commerciali per singolo volo, Aeroporto regionale . . . . .	172
10.12	Perdita del gestore per singolo volo, Aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	174
10.13	Perdita dei servizi di trasporto per singolo volo, Aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	175

10.14	Perdita dei servizi commerciali per singolo volo, Aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	175
10.15	Perdita del gestore per volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale . . . . .	177
10.16	Perdita dei servizi di trasporto per volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale . . . . .	178
10.17	Perdita dei servizi commerciali per volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale . . . . .	178
10.18	Confronto dei costi tra l'installazione di un EMAS e l'espansione di una RESA (FAA Order 5200.9, Figura B1) . . . . .	180
10.19	Stima dei valori di mercato degli aeromobili commerciali (Unit replacement and restoration costs of damaged aircraft, Tabella 5-1) . . . . .	185
10.20	Costi medi di riparazione di aeromobili commerciali (Unit replacement and restoration costs of damaged aircraft, Tabella 5-4) . . . . .	186
10.21	Stima del valore dei livelli AIS di severità delle lesioni subite dagli occupanti ("Treatment of the values of life and injury in economic analysis", Tabella 2-3) . . . . .	188
11.1	Correlazione tra le varie espressioni di probabilità di accadimento di un evento (Elaborazione e valutazione del Safety Risk Assessment, ENAC, Tabella 2) [56] . . . . .	195
11.2	Quantificazione della probabilità di accadimento (Elaborazione e valutazione del Safety Risk Assessment, ENAC, Tabella 1) [56] . . . . .	196
11.3	Livelli di severità del rischio (ICAO Doc 9859, Tabella 2 [78]) . . . . .	196
11.4	Matrice di rischio (ICAO Doc 9859) . . . . .	197
11.5	Soglia nella matrice di rischio . . . . .	200
11.6	Costi strategici dei ritardi di un volo (EUROCONTROL, Standard Input for Economic Analyses, Tabella 22) . . . . .	203
11.7	Costi di cancellazione di un volo (EUROCONTROL, Standard Input for Economic Analyses, Tabella 20) . . . . .	203
11.8	Costi di diversione di un volo (EUROCONTROL, Standard Input for Economic Analyses, Tabella 25) . . . . .	203
11.9	Modello decisionale proposto . . . . .	206
D.1	<i>Takeoff Performance Chart</i> , ATR 72-600 [44] . . . . .	248
D.2	Diminuzione del peso massimo al decollo, Aeroporto regionale . . . . .	248
D.3	Diminuzione del numero di passeggeri, Aeroporto regionale . . . . .	249
D.4	Perdita per un volo interno, Aeroporto regionale . . . . .	249

D.5 Perdita per un volo nazionale, Aeroporto regionale . . . . .	249
D.6 Perdita del gestore aeroportuale nel 2025, Aeroporto regionale . . . . .	250
D.7 Perdita dei servizi di trasporto nel 2025, Aeroporto regionale . . . . .	250
D.8 Perdita dei servizi commerciali nel 2025, Aeroporto regionale . . . . .	250
D.9 <i>Takeoff Performance Chart</i> , Boeing 737-800 [92] . . . . .	251
D.10 Diminuzione del peso massimo al decollo, Aeroporto di rilevanza nazionale	251
D.11 Diminuzione del numero di passeggeri, Aeroporto di rilevanza nazionale . .	252
D.12 Perdita per un volo nazionale, Aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	252
D.13 Perdita per un volo EU, Aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	252
D.14 Perdita del gestore nel 2025, Aeroporto di rilevanza nazionale . . . . .	253
D.15 Perdita dei servizi di trasporto nel 2025, Aeroporto di rilevanza nazionale .	253
D.16 Perdita dei servizi commerciali nel 2025, Aeroporto di rilevanza nazionale .	253
D.17 <i>Takeoff Performance Chart</i> , Boeing 787-900 [93] . . . . .	254
D.18 Diminuzione del peso massimo al decollo, Aeroporto di rilevanza interna- zionale . . . . .	254
D.19 Diminuzione del numero di passeggeri, Aeroporto di rilevanza internazionale	255
D.20 Perdita per un volo in UE, Aeroporto di rilevanza internazionale . . . . .	255
D.21 Perdita per un volo internazionale, Aeroporto di rilevanza internazionale .	255
D.22 Perdita del gestore nel 2025 per un volo internazionale, Aeroporto di rile- vanza internazionale . . . . .	256
D.23 Perdita dei servizi di trasporto nel 2025 per un volo internazionale, Aero- porto di rilevanza internazionale . . . . .	256
D.24 Perdita dei servizi commerciali nel 2025 per un volo internazionale, Aero- porto di rilevanza internazionale . . . . .	257



## Elenco delle tabelle

7.1	Classificazione degli EMAS proposta . . . . .	112
8.1	Costo delle lesioni per categoria AIS (Economic values for FAA investment and regulatory decisions, FAA) . . . . .	131
10.1	Stima dei costi di preparazione del sito di installazione di un EMAS in tre regioni italiane . . . . .	161
10.2	Stima dei costi medi di preparazione del sito di installazione di un EMAS in Italia . . . . .	162
10.3	Classificazione degli scali aeroportuali in Italia secondo il Piano Nazionale degli Aeroporti . . . . .	165
10.4	Stima dei costi per la preparazione della RESA . . . . .	183

