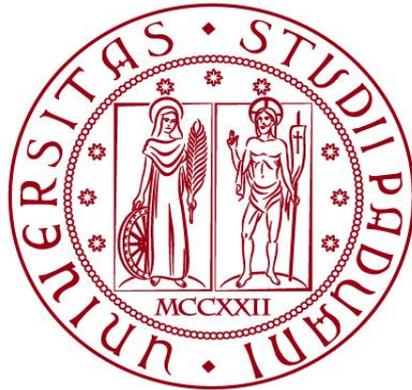


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Sistemi e Infrastrutture di Trasporto



TESI DI LAUREA

**REALIZZAZIONE DI RESA AEROPORTUALE CON LETTI D'ARRESTO DI TIPO
EMAS: DIMENSIONAMENTO E CASI STUDIO**

Relatore:
Chiar.mo PROF. MARCO PASETTO

Laureando: ANDREA CARRER

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

REALIZZAZIONE DI RESA AEROPORTUALE CON LETTI D'ARRESTO DI TIPO EMAS:
DIMENSIONAMENTO E CASI STUDIO*

ANDREA CARRER

Sommario

1.INTRODUZIONE	2
2. RIFERIMENTI NORMATIVI PER LA PROGETTAZIONE DELLA RESA ED EVENTUALE REALIZZAZIONE DI LETTI D'ARRESTO EMAS.....	3
3. RIFERIMENTI NORMATIVI PER LA REALIZZAZIONE DELL' EMAS.....	5
4. PROCESSO STORICO CHE PORTA ALL'INTRODUZIONE DELL' EMAS.....	7
5. CARATTERISTICHE EMASMAX®	11
6. FORMULAZIONE DISTANZA D'ARRESTO	13
7. CASI STUDIO: AEROPORTI ITALIANI.....	15
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	34

* Nel presente documento si offre una sintesi della tesi magistrale intitolata “Realizzazione di RESA aeroportuale con letti d'arresto di tipo EMAS: dimensionamento e casi studio”. La tesi è stata premiata, in data 24 febbraio 2025, dal ‘comitato 8 ottobre 2001: Per non dimenticare’ per aver approfondito il tema della governance dell'emergenza nell'ambito del trasporto multimodale.

1.INTRODUZIONE

Le piste di volo degli aeroporti sono progettate, dal punto di vista geometrico, per consentire, in condizioni di massima sicurezza, le manovre di decollo, atterraggio e movimentazione di un aeromobile. Ciò comporta che l'aeromobile può effettuare tutte le possibili manovre, comprese quelle di emergenza per avarie e malfunzionamento delle parti strutturali e/o strumentazioni di bordo. Le piste di volo vengono quindi dimensionate considerando tutte quelle problematiche incidentali che la storia del volo ha registrato e il cui verificarsi deve consentire l'arresto dell'aeromobile entro il fine pista. L'evoluzione della Safety ha però indotto ad introdurre nella normativa maggiori accortezze a causa del possibile verificarsi di eventi negativi causati dall'aeromobile o dall'umano. È per tale motivo che le piste degli aeroporti sono state dotate di idonee aree di sicurezza che le contornano: la strip e la RESA (Runway End Safety Area). In particolare, la seconda, viene realizzata per evitare atterraggi o decolli lunghi (overrun) e atterraggi corti (undershoot). Nei casi in cui si voglia migliorare la sicurezza all'atterraggio/decollo e non vi è la possibilità di realizzare in modo esteso e nelle corrette dimensioni la RESA (estensione a 240 metri), si può realizzare, a fine pista, un letto d'arresto che consente, occupando meno spazio, di arrestare in sicurezza l'aeromobile. Tali provvedimenti, quali l'introduzione della RESA o di un tappeto d'arresto, vengono presi al fine di minimizzare il rischio di overrun, frequenti anche nell'attualità, e le sue conseguenze. Le escursioni dalla pista rappresentano la categoria di incidenti più frequente. Tali escursioni hanno però il tasso di mortalità associato molto inferiore rispetto alle altre categorie di incidenti, come la perdita di controllo in volo (LOC-I) o il volo controllato sul terreno (CFIT). Infatti, la percentuale di sopravvivenza a tali escursioni è pari al 98%. Il superamento del fine pista è normalmente causato da una combinazione di diversi fattori, i quali comportano ad avere un'elevata energia che non viene ridotta abbastanza rapidamente durante l'atterraggio con conseguente impossibilità di fermare l'aeromobile entro il fine pista.

I fattori principali sono:

- Velocità eccessiva,
- Applicazione tardiva dei freni,
- Atterraggi lunghi,
- Piste scivolose,
- Forte vento in coda,
- Malfunzionamento dell'aeromobile,
- Scarsa visibilità

Osservando i dati raccolti e forniti dall'associazione IATA (*International Air Transport Association*) tramite documento 'safety report', si possono registrare le seguenti informazioni: Il numero totale di incidenti (comprendendo tutte le tipologie di incidente) nel periodo 2017 - 2021 è stato pari a 221 eventi, i quali hanno causato un totale di 1035 vittime. Il numero di escursioni da runway/taxiway sono pari a 58 tra il 2017 e il 2021 (geolocalizzate come rappresentato in Figura 1.3), mentre nel singolo anno 2021 sono pari a 0. Per quanto riguarda invece gli ultimi dati raccolti, l'associazione IATA ha evidenziato che nel 2023 ci sono state solamente due escursioni da runway, entrambe non fatali.

2. RIFERIMENTI NORMATIVI PER LA PROGETTAZIONE DELLA RESA ED EVENTUALE REALIZZAZIONE DI LETTI D'ARRESTO EMAS

I riferimenti normativi forniti da ICAO (Volume 1: Aerodrome design and operations International) e EASA (Regulations on Aerodromes (Reg. (CE) 216/2008, Reg. (CE) 139/2014, Certifications Specifications-ADR- DSN, AMC e GM) danno informazioni riguardo la progettazione e l'installazione di RESA aeroportuale ed i relativi letti d'arresto. La RESA (Runway End Safety Area) è un'area, priva d'ostacoli, simmetrica rispetto al prolungamento dell'asse pista e adiacente alla fine della striscia di sicurezza, destinata primariamente a ridurre il rischio di danni agli aeromobili che dovessero atterrare troppo corti (undershoot) o uscire oltre il fine della pista, in fase di decollo o atterraggio (overrun). Gli standard e le raccomandazioni per la realizzazione della RESA sono riportati nell'Annesso 14 dell'ICAO, al paragrafo 3.5 e dipendono dal codice di classificazione della pista. La RESA deve estendersi fino a:

- 240 metri quando il codice della pista è 3 o 4 (pista strumentale)
- 120 metri quando il codice della pista è 1 o 2 (pista strumentale)
- 30 metri quando il codice della pista è 1 o 2 (pista non strumentale)

Il valore raccomandato della RESA (inteso come lunghezza), indicato pari a 240 metri, deriva da un'analisi statistica nella quale si è constatato che circa il 90% degli overrun compiuti dagli aeromobili sono contenuti entro un raggio di 300 metri dalla fine della pista (che corrispondono alla sommatoria di 60,00 mt di runway strip e 240,00 mt di RESA). Tale distanza può però essere ridotta nel caso in cui venisse installato un sistema d'arresto. La larghezza della RESA deve essere almeno il doppio della larghezza della pista (runway). La RESA però non sempre può essere realizzata con le corrette dimensioni richieste; molto spesso, infatti, vi possono essere vincoli paesaggistici, naturali (ad esempio: vicinanza ad aree residenziali, scogliere, corsi d'acqua, montagne ecc.) ed economici

che impediscono l'estensione di tale zona priva d'ostacoli. Ne consegue che, al fine di mantenere le condizioni di safety desiderate, nei casi in cui non risulti possibile estendere la RESA alle dimensioni raccomandate, i gestori aeroportuali dovranno valutarne il rischio ed eventualmente, qualora non rientrante nei limiti di accettabilità, attuare misure di mitigazione adeguate a ricondurre il rischio a livelli accettabili. Un intervento di mitigazione di tipo infrastrutturale è rappresentato dal posizionamento di un letto d'arresto oltre il fine pista, come l'EMAS (Engineered Materials Arresting Systems), nei casi in cui non è fattibile un adeguamento di tipo standard della RESA. Per tale motivo la realizzazione di un letto di arresto è potenzialmente motivabile e ragionevole in tutte le piste con RESA inferiore a 240 metri. Negli ultimi anni la Federal Aviation Administration (FAA) degli Stati Uniti ha intrapreso programmi di ricerca per sviluppare e valutare EMAS. Questa ricerca è stata guidata dal riconoscimento che molte piste, in particolare quelle realizzate prima dell'adozione di requisiti più rigorosi per la RESA (1999), con ostacoli naturali, sviluppo locale e/o vincoli ambientali, avevano un potenziale limitato per la RESA. Inoltre, in alcuni di questi aeroporti, si sono verificati incidenti per i quali la capacità di fermare un aeromobile in corsa all'interno della RESA avrebbe evitato gravi danni all'aeromobile e/o lesioni ai passeggeri. Per quanto riguarda la realizzazione del letto d'arresto va però specificato che tale intervento, pur comportando sicuri vantaggi in termini di overrun, potrebbe comportare svantaggi in termini di undershoot in quanto, nel caso di atterraggio corto, la presenza di un letto d'arresto aumenterebbe il rischio di incidente e di contatto aeromobile-EMAS. Per valutarne, quindi, la sostenibilità in termini di incremento complessivo della safety occorre procedere alla valutazione del rischio comparando entrambe le situazioni: in caso di overrun il posizionamento ideale sarebbe a prosecuzione del fine pista mentre al contrario, in caso di undershoot, andrebbe posizionato il più lontano possibile dallo stesso (idealmente sarebbe meglio che non ci fosse). Per tenere in considerazione tale aspetto, un eventuale EMAS, qualora ritenuto opportuno, verrà quindi realizzato in posizione tale da non creare evidenti svantaggi per entrambi i casi. Il processo di scelta per la realizzazione di un letto d'arresto per una pista di volo che abbia una RESA inferiore a 240 mt dovrebbe seguire un percorso statistico/economico che analizzi puntualmente le seguenti problematiche:

- verifica propedeutica sulla fattibilità tecnica/economica di estendere la RESA a 240 metri mediante l'acquisizione delle aree eventualmente necessarie;
- valutazione dell'eventuale effetto benefico sulla safety effettuando un'analisi del rischio attraverso un risk assessment;
- verifica della possibilità di adottare misure mitigatrici del rischio e/o limitazioni operative;

- individuazione della tipologia di letto di arresto da realizzare dal punto di vista tecnico/economico;
- sostenibilità economica della realizzazione e della relativa manutenzione.

Va pertanto compiuta una valutazione della RESA che aiuti il gestore aeroportuale ad individuare delle azioni per ridurre il rischio e la probabilità di superamento. Tali azioni consistono in:

- Miglioramento delle superfici delle piste e misurazione dell'attrito
- Miglioramento della conoscenza, della registrazione e della diffusione da parte della direzione dell'aeroporto dei dati sul vento (Wind shear) e di qualsiasi altra informazione meteorologica
- Miglioramento degli aiuti visivi e strumentali all'atterraggio
- Riposizionamento, spostamento o riallineamento della pista
- Esaminare l'eventuale spostamento della soglia per aumentare la RESA o la pista (eventuale riduzione della lunghezza della pista nel caso in cui gli attuali aerei critici richiedano meno lunghezza di pista di quella disponibile)
- Aumentare le dimensioni della RESA includendo ulteriori appezzamenti di terreno anche se la loro inclusione comporterà una RESA di forma irregolare

La valutazione delle alternative, e dunque la scelta della miglior azione da eseguire per ridurre le conseguenze degli overrun, dipende da molti fattori che caratterizzano un aeroporto tra cui: lo storico incidenti, le caratteristiche dell'aereo di progetto (più o meno requisiti necessari), vincoli del sito (dislivello del terreno, esistenza di corpi idrici, zone umide, autostrade, ferrovie ad estremità pista), prevalenti condizioni meteorologiche, disponibilità di aiuti visivi ed elettronici per l'atterraggio.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI PER LA REALIZZAZIONE DELL'EMAS

Lo scopo fondamentale per il quale è stata sviluppata la tecnologia dei letti d'arresto è quello di limitare i danni derivanti dai possibili fenomeni di "overrunning" degli aeromobili. Con tale terminologia si intendono quegli eventi in cui l'aeromobile oltrepassa il fine pista durante un atterraggio. È stato verificato che nel 90% dei casi l'overrun avviene a una velocità di 70 nodi o meno e che l'aeromobile si arresta generalmente entro una distanza di 300 mt dal fine pista. Tali tappeti d'arresto vengono realizzati, come già espresso in precedenza, negli aeroporti che per vincoli preesistenti o altri impedimenti, non sono in grado di fornire una RESA standard (240 mt). La progettazione dell'EMAS viene effettuata considerando l'aereo di progetto (critico) ossia

l'aeromobile con dimensioni e peso maggiori che utilizza regolarmente la pista. La normativa enuncia i principali requisiti progettuali richiesti per la realizzazione dei letti d'arresto (EMAS):

- Un EMAS è progettato per arrestare un aeromobile in overrunning esercitando una decelerazione prevedibile sui carrelli, tramite l'assorbimento dell'energia cinetica. Tale tecnologia deve prevedere una progettazione che minimizzi i potenziali danni all'aeromobile e ai passeggeri. La vita utile richiesta dovrebbe coprire un arco temporale di almeno 20 anni.
- Ubicazione: Il letto d'arresto EMAS è da collocarsi oltre il fine pista in posizione centrata rispetto al center line. L'installazione deve essere realizzata alla massima distanza possibile dal fine pista (a fine strip) per evitare danni alla stessa installazione dovuti al jet blast o all'aeromobile ed occupanti in caso di undershooting.
- Larghezza: La larghezza minima richiesta corrisponde a quella della pista.
- Base: È richiesta una base pavimentata in grado di sopportare il passaggio occasionale dell'aereo critico e i mezzi dei VVF e di soccorso a pieno carico.
- Velocità di ingresso: La velocità di ingresso da considerarsi è pari a 70 nodi (EMAS standard). Qualora, a causa di spazi insufficienti, non fosse possibile installare un EMAS standard si richiede comunque un valore minimo della velocità di ingresso pari a 40 nodi (EMAS non-standard).
- Evacuazione: Il letto d'arresto EMAS deve essere dimensionato per permettere ingresso, uscita e movimentazione dei mezzi dei VVF. Per tale motivo vengono progettati degli scivoli per consentire l'ingresso dei mezzi di soccorso sia dal lato anteriore sia da quelli laterali.
- Manutenzione: Il letto d'arresto EMAS deve essere in grado di sopportare, senza alcuna deformazione, il traffico pedonale del personale addetto alla manutenzione. Non è invece progettato per sopportare traffico veicolare (per scopi manutentivi).
- Aiuti visivi luminosi: Il letto d'arresto EMAS deve consentire l'alloggiamento delle luci di avvicinamento (frangibili in due punti).
- Drenaggi: Il letto d'arresto EMAS deve evitare accumuli d'acqua sulla sua superficie, sulla runway o sulla RESA. Inoltre, deve essere progettato per consentire la rimozione della neve e del ghiaccio.
- Jet blast: Il letto d'arresto EMAS deve essere progettato affinché non sia danneggiabile dal jet blast.
- Riparazioni: Il letto d'arresto EMAS deve essere progettato in modo tale da poter essere riparato entro 45 giorni da un evento di overrun.

I materiali con i quali si realizza il letto di arresto EMAS devono garantire:

- Requisiti di sforzo e deformazione: i materiali devono avere un profilo tale da assicurare caratteristiche di uniformità e quindi risposte prevedibili all'ingresso di un aeromobile all'interno del sistema di arresto;
- Specifiche caratteristiche tra cui:
 - Resistenza all'acqua
 - Anti-scintilla
 - Non infiammabile
 - Non favorire la combustione
 - Non attrarre uccelli, animali selvatici o altre creature
 - Non emettere fumi tossici
 - Non favorire la crescita involontaria di piante
 - Resistenza al deterioramento dovuto a: sale, liquidi antigelo e antighiaccio, carburanti per aeromobili, raggi UV, acqua, sabbia, neve.
- Requisiti di conformità: i produttori dell'EMAS devono stabilire un programma di campionamento e di prove.
- Non devono causare alcun impatto sull'ambiente o sulla salute umana durante l'installazione, il funzionamento e lo smaltimento.

Per evitare problemi in caso di undershoot, il tappeto di arresto viene posto il più lontano possibile dal fine pista, normalmente alla fine della runway strip.

4. PROCESSO STORICO CHE PORTA ALL'INTRODUZIONE DELL' EMAS

Le prime ricerche sperimentali condotte sui sistemi d'arresto per aeromobili risalgono alla fine degli anni Sessanta e derivano da analoghi sistemi già sperimentati in ambito stradale. Le prime prove, eseguite dalla Royal Aircraft Establishment, sperimentarono l'efficacia di letti soffici costruiti con schiuma di formaldeide (composto organico volatile ovvero un gas nocivo per l'uomo) ma a queste non fecero seguito applicazioni pratiche a causa degli elevati costi. Un altro dei primi tentativi fu quello relativo all'installazione di letti di arresto di ghiaia a fine pista ma si è dimostrato non ottimale in quanto il materiale, con il quale è stato realizzato il letto, tendeva a forare i serbatoi di carburante posizionati nelle ali dell'aeromobile provocando di conseguenza un incendio.

L'evento chiave che ha portato le autorità a promuovere opportune ricerche al fine di realizzare un sistema di arresto da collocare al termine delle piste fu il superamento all'atterraggio del fine pista

(overrun) da parte di un SAS DC10-30 (Scandinavian Airlines), a seguito di un tardivo touchdown sulla pista, avvenuto a New York JFK nel febbraio 1984. L'incidente ha causato sia lesioni ai passeggeri sia danni sostanziali all'aeromobile. Dopo tale evento, FAA e United States Air Force (USAF) hanno concordato di determinare la fattibilità e sviluppare criteri per la progettazione di sistemi di arresto soft-ground e nel 1989 è stato avviato un programma sperimentale per condurre esperimenti su tali materiali. Lo scopo di questi esperimenti era quello di verificare i calcoli teorici delle distanze di arresto. I test sono stati condotti su schiuma fenolica e cemento cellulare utilizzando un Boeing 727 nell'estate del 1990. Il Technical Center della FAA ha condotto due arresti di successo, impiegando lo stesso Boeing 727 nell'estate del 1993, utilizzando un letto di schiuma fenolica lungo 207 metri, largo 15 metri e profondo 0.45 metri. Tra il 1994 e il 1996, FAA e l'operatore di New York JFK hanno sviluppato e installato un prototipo di letto di arresto costruito con blocchi di cemento cellulare prefabbricato per la pista 04R all'aeroporto internazionale di New York/John F Kennedy. Nel 1998, FAA ha emesso la prima specifica generica per la progettazione, installazione e la manutenzione di EMAS. Da allora ha incoraggiato il primo produttore (Statunitense) di un sistema EMAS, Zodiac Aerospace, nello sviluppo del suo prodotto EMASMAX® per un uso civile più diffuso. Nel febbraio 2020 Runway Safe ha acquisito la gamma di prodotti EMASMAX® da ESCO ed attualmente è l'unico produttore di prodotti EMAS che soddisfano gli standard FAA della circolare consultiva 150-5220-22B, "Engineered Materials Arresting Systems for Aircraft Overruns". I due sistemi EMAS che Runway Safe produce sono: il sistema di blocchi di cemento cellulare (EMASMAX®) e un sistema di schiuma di silice chiamato greenEMAS®.

Da quando i primi EMAS sono stati installati sulle piste 04R e 22L a New York JFK nel 1996, c'è stato un costante aumento delle installazioni in modo che a metà del 2018, i sistemi erano stati installati in circa 106 estremità delle piste in 63 aeroporti negli Stati Uniti, tra cui Boston 15R e 04L, Chicago O'Hare 04R/22L e in tutte e quattro le piste a Chicago Midway. Le prime installazioni al di fuori degli Stati Uniti sono state effettuate su entrambe le estremità del 02/20 a Jiuzhai-Huanglong (Cina) e successivamente su 10 a Taipei Songshan (Taiwan) e su 33L e 33R a Madrid Barajas (Spagna).

Ad oggi, in tutto il mondo, si contano oltre 120 installazioni di letti d'arresto in blocchi di calcestruzzo alleggerito ed alcune di esse sono già state interessate da reali casi di overrun tutte con esito positivo a comprova dell'efficacia del sistema. Ad oggi, ci sono stati 21 incidenti in cui i sistemi EMAS hanno fermato in sicurezza 21 aeromobili, i quali trasportavano a bordo 430 persone (membri dell'equipaggio e passeggeri). Negli anni però son state eseguite diverse ricerche e test per valutare il miglior materiale con il quale realizzare EMAS con l'obiettivo di trovare l'opzione che offra prestazioni migliori, costi inferiori e maggior durata. La soluzione migliore dovrà garantire un arresto

efficace dell'aeromobile in arrivo ad una velocità di 70 nodi senza causare danni ad esso e ai suoi passeggeri. Uno dei test più significativi è stato eseguito da 'Universal Energy System' (Stati Uniti) nell'agosto del 1987 e i risultati sono stati riportati da FAA. Nella prima parte del test sono state sperimentate diverse soluzioni 'soft ground' a livello terreno (senza creare uno "scalino") utilizzando i seguenti materiali: Argilla, sabbia e acqua. Codeste soluzioni son state studiate e per ognuna di essere son state trovate delle criticità:

- Argilla: per essere efficace dovrebbe avere $CBR = 2$ o 3 e tale proprietà è difficilmente mantenibile nel tempo e nelle diverse condizioni climatiche. Sotto gli zero gradi Celsius l'acqua che è penetrata dentro l'argilla potrebbe ghiacciare e ciò comporterebbe l'inefficacia dell'argilla come materiale d'arresto. A temperature superiori, invece, l'argilla potrebbe asciugarsi troppo velocemente.
- Sabbia: per essere efficace dovrebbe essere asciutta. Per mantenere tale secchezza la sabbia dovrebbe essere avvolta da delle borse impermeabili che sono però facilmente distruttibili in caso di overrun. Inoltre, pioggia e neve che penetrano nei vuoti della sabbia potrebbero ghiacciare rendendo meno efficace il materiale.
- Acqua: a basse temperature potrebbe ghiacciare rendendo la soluzione inefficace. Impedisce l'accesso a veicoli di soccorso che devono intervenire in caso di incidente. (Figura 5.1.1)

Nella seconda parte di questo Test Americano son stati provati altri due materiali d'arresto che, a differenza dei primi tre, creano uno "scalino" per cercare di contrastare il moto dell'aeromobile: Gravel (ghiaia/ciottoli) e Polystyrene Foam (schiuma di polistirene). I materiali son stati testati simulando l'arresto di cinque aeromobili aventi peso diverso, velocità d'ingresso pari a 70 nodi e nell'ipotesi di mancato utilizzo dei freni e freno motore (spesso nei casi di overrun vi è ghiaccio o neve in pista, dunque tali meccanismi non funzionano). Dai risultati si è dedotto che il materiale Gravel è adatto per l'arresto di aeromobili in caso di overrun con velocità di entrata pari a 70 nodi o inferiore. Ciò che rende attrattiva tale soluzione è il costo relativamente basso per realizzare il tappeto d'arresto con questo materiale. L'aspetto negativo è legato ai frammenti di gravel che si sollevano, durante il contatto EMAS-aeromobile, rischiando di causare problemi meccanici se arrivano a contatto con particolari elementi dell'aeromobile. D'altro canto, il materiale schiuma di polistirene permette però di avere delle decelerazioni dell'aeromobile più costanti durante l'arresto, motivo per cui è considerata la soluzione migliore di quelle studiate in questo test. Inoltre, codesto materiale, ha una bassa densità, per cui un eventuale frammento di materiale che si dovesse staccare, causa contatto tra EMAS ed aeromobile, non creerà problemi all'aeromobile. Altro vantaggio della schiuma di polistirene è il mantenimento delle caratteristiche indipendentemente dalle condizioni climatiche presenti negli Stati Uniti e nel resto del mondo.

Successivamente ai primi test, è stata effettuata una ricerca i cui risultati sono stati riportati nel rapporto 'ACRP 29: Developing Improved Civil Aircraft Arresting System'.

L'obiettivo di questa ricerca era quello di promuovere lo sviluppo di sistemi alternativi di arresto degli aerei civili in caso di superamento della pista. La ricerca ha cercato di valutare alternative all'attuale tecnologia EMASMAX®, con l'obiettivo di trovare opzioni che potrebbero offrire prestazioni migliori, costi inferiori o maggiore durata.

L'attuale EMAS (EMASMAX®) prevede blocchi di cemento cellulare (schiumato) di dimensioni 4 x 4 piedi (1,2 metri). I blocchi hanno spazi stretti tra loro per la ventilazione e il drenaggio, e le parti superiori di questi giunti sono sigillate contro la pioggia. La profondità dei blocchi varia a seconda del design del letto. Ai lati del letto vi sono dei gradini per l'accesso pedonale e dei mezzi di soccorso. Prima di installare un EMAS, il sito deve essere preparato con una superficie pavimentata che fornisca una solida base per il letto e un adeguato drenaggio.

In questo studio sono stati selezionati tre dispositivi d'arresto le cui prestazioni verranno successivamente confrontate con l'attuale EMAS:

- Schiuma di vetro (Glass foam)
- Schiuma di aggregati (Aggregate foam)
- Aggregato ingegnerizzato (Engineered aggregate)

Per osservare il comportamento di questi materiali si è simulato l'arresto di tre aeromobili con velocità d'entrata pari a settanta nodi. Gli aerei in questione sono: CRJ-200 (MTOW=51000 lb), B737-800 (MTOW=174200 lb), B747-400 (MTOW=875000 lb).

Ciascuna soluzione ha mostrato relativi punti di forza e di debolezza. Tutte e tre le opzioni forniscono una maggiore durabilità del materiale rispetto al cemento cellulare, il che comporta cicli di vita più lunghi e minori requisiti di manutenzione. Inoltre, tutte le soluzioni prevedono costi di realizzazione del letto d'arresto inferiori rispetto all'attuale EMAS.

Tra i sistemi candidati valutati, il concetto di arresto in schiuma di vetro è il più simile all'attuale EMAS mentre il più lontano è l'aggregato ingegnerizzato in quanto trattasi di materiale spostabile.

La schiuma di vetro ha fornito un comportamento dinamico equivalente al sistema EMAS attualmente approvato. Anche le sue prestazioni e la sua struttura sono simili all'attuale EMAS. Tuttavia, l'uso della schiuma di vetro con una struttura monolitica offre una manutenzione ridotta e una maggiore durata. Tale materiale porta ad avere decelerazioni costanti dell'aereo (indipendenti dalla velocità).

L'aggregato ingegnerizzato è resistente all'umidità e all'immersione in acqua. È dunque il materiale più durevole di quelli analizzati. Tuttavia, anche se il materiale non si degrada con tali esposizioni, la

risposta meccanica cambia, mostrando un aumento dei carichi di arresto quando esso è bagnato. Un altro aspetto negativo di questa soluzione è che la decelerazione varia durante il processo di arresto mostrando una forte dipendenza dalla velocità dell'aereo. Le lunghezze del letto d'arresto sono più lunghe rispetto a quelle relative all'attuale tecnologia a causa delle già citate proprietà dell'arresto dipendenti dalla velocità.

La soluzione con schiuma di aggregati, avendo una semplice fase di costruzione, di riempimento e copertura, comporta costi di produzione e installazione inferiori rispetto ai metodi di costruzione a blocchi utilizzati attualmente. Questo potenziale vantaggio è controbilanciato dalla possibilità che il materiale possa depositarsi nel tempo e comportare prestazioni di arresto alterate. Le simulazioni mostrano una decelerazione abbastanza costante durante l'arresto senza dunque dipendere dalle velocità. Le lunghezze dei letti d'arresto sono leggermente più lunghe rispetto a quelle dell'attuale EMAS (15% in più).

5. CARATTERISTICHE EMASMAX®

L'attuale soluzione utilizzata per realizzare l'EMAS: EMASMAX®, un letto di blocchi di cemento cellulare prefabbricati, progettati per schiacciarsi e frantumarsi al passaggio dell'aeromobile e di conseguenza fornire una decelerazione controllata per ottenere l'arresto completo. Tale soluzione, in caso di overrun e di utilizzo dell'EMAS, consente ai passeggeri e all'equipaggio di uscire dall'aereo in sicurezza, nonché di rimuovere facilmente l'aeromobile dal letto d'arresto. EMASMAX® è largo almeno quanto la pista, è dimensionato per arrestare aeromobili con velocità pari a 70 nodi ed è realizzato nei casi in cui non vi è la possibilità di estendere la RESA.

Il primo EMASMAX® è stato installato presso l'aeroporto internazionale JFK (New York) nel 1996 ed oggi è presente su più di 120 piste in tutto il mondo (112 in USA, gli altri (8) sono presenti in Cina, Spagna, Taiwan, Norvegia e Arabia Saudita). EMASMAX® viene installato alla fine della pista e prevede dei gradini laterali attorno al perimetro che consentono ai veicoli antincendio e di soccorso di salire sul letto d'arresto in caso di emergenza, consentendo anche ai passeggeri di scendere. Davanti al letto d'arresto viene installato un deflettore per detriti per proteggere EMASMAX® da detriti di oggetti estranei o dai getti d'aria degli aerei che operano nella direzione opposta. La prima parte del letto d'arresto, oltre il deflettore per detriti, è costituita da una rampa leggermente in salita seguita da una parte in piano (plateau). Mediamente un letto d'arresto EMASMAX® è composto da 2000 a 4000 blocchi di cemento cellulare prefabbricato di dimensioni 4x4 piedi (1.2 x 1.2 metri). Ogni blocco è incapsulato da un vassoio di plastica nella parte superiore e inferiore, mentre ai lati è ricoperto da un telo di Nylon (contenente un rivestimento che conferisce resistenza ai raggi UV e ai getti d'aria). All'interno del rivestimento è presente il blocco di cemento cellulare con sopra di esso uno strato di

schiuma. Prima di iniziare le fasi per la realizzazione di EMASMAX® va innanzitutto pavimentata l'area di sicurezza (dall'estremità della pista fino a fine EMAS) in modo da poter sostenere i carichi degli aeromobili e dei veicoli di soccorso.

Tali indicazioni descritte sono necessarie per il raggiungimento dello scopo dell'EMAS ossia quello di fornire una decelerazione controllata per ottenere l'arresto completo dell'aeromobile. Ciò avviene fornendo resistenze all'aereo (principalmente agenti sul carrello anteriore, il primo a contatto con EMAS) sfruttando l'interfaccia pneumatico-materiale e la frantumazione dei blocchi di cemento cellulare. A seguito del contatto pneumatico-EMAS e della frammentazione di quest'ultimo, si generano una forza verticale (contrastata dal peso dell'aereo) e una forza orizzontale di resistenza opposta al moto che porta ad una decelerazione dell'aeromobile. La soluzione EMASMAX®, come già affermato, è già stata introdotta in alcuni aeroporti e negli ultimi anni ha già portato alcuni successi andando ad arrestare il moto dell'aeromobile soggetto ad overrun. Uno di questi avvenne all'aeroporto di Charleston (Carolina, USA) nel 19 gennaio 2010 dove un CRJ-200 ebbe problemi in fase di decollo e dovette arrestarsi utilizzando EMAS. Non vi fu nessun infortunio per i 34 passeggeri e l'equipaggio; in cinque ore la pista è stata riaperta (e tornata al servizio dopo tre giorni, per ricostruire EMAS invece occorrono 45 giorni). Altri successi dell'EMAS sono i seguenti: maggio 1999 a New York JFK, maggio 2003 a New York JFK, gennaio 2005 a New York JFK, giugno 2006 a Greenville e giugno 2008 a Chicago.

Dopo aver scelto posizionamento e dimensioni del letto d'arresto si prosegue eseguendo in ordine le seguenti fasi con l'intento di costruire EMASMAX®:

- 1) Controllo della perpendicolarità e della rettilineità della trave a inizio tappeto d'arresto.
- 2) Utilizzando uno strumento di foratura, vengono perforati dei bulloni nella trave.
- 3) Realizzare il layout della griglia determinando le posizioni dei blocchi di cemento.
- 4) Installazione di altri bulloni per fissare un deflettore per rifiuti (Debris Deflector).
L'installazione di tali dispositivi deve iniziare dal centro e finire alle estremità
- 5) Trasportare i blocchi di cemento nella zona di lavorazione utilizzando dei Pallet di allestimento
- 6) Posizionamento dei blocchi (facilmente trasportabili con un carrello elevatore grazie a delle fessure di cui sono dotati nella parte inferiore)
- 7) Applico aria condizionata calda per ogni singolo blocco prima di posizzarli effettivamente.
- 8) Nel caso vi siano da posizionare luci o altri aiuti visivi nei blocchi, essi vengono forati e pure induriti nel caso in cui, in futuro, vi fosse la necessità di rimuovere il blocco (utilizzando delle cinghie di sollevamento posizionate in fase di installazione) per eseguire una manutenzione degli aiuti visivi presenti in esso

- 9) Applicazione di silicone estruso per sigillare i lati del letto d'arresto
- 10) Installazione di prese d'aria in corrispondenza di ciascun giunto esterno (laterale) situato al piano terreno

6. FORMULAZIONE DISTANZA D'ARRESTO

Per realizzare il letto d'arresto EMAS con le dimensioni corrette, le quali garantiscono un completo arresto dell'aeromobile, è opportuno determinare e prevedere la distanza d'arresto necessaria per fermare il velivolo in base alla tipologia e alla velocità d'ingresso nel tappeto di quest'ultimo. Per tale motivo si è deciso di studiare una particolare formulazione che potesse determinare tale distanza.

La formulazione oggetto di studio è frutto di una ricerca americana eseguita da Richard DeLoach (NASA Langley Research Center), Jill M. Marlowe (NASA Langley Research Center) e Thomas J. Yager (ATK Space Systems). L'articolo "Uncertainty Analysis for the evaluation of a passive runway arresting system" riporta le spiegazioni e i passaggi matematici necessari per arrivare alla formulazione finale della distanza d'arresto.

L'articolo considera la distanza d'arresto di un aeromobile soggetto a superamento della pista (overrun) quando quest'ultima è dotata di tappeto d'arresto che produce attrito e resistenza. La ruota dell'aereo, immersa nel tappeto d'arresto, subisce una forza orizzontale costituita da forza d'attrito e di resistenza, il cui lavoro dissipa l'energia cinetica dell'aeromobile lungo la distanza d'arresto. Per questo motivo, per prevedere la distanza d'arresto, ci basiamo sulla forza orizzontale totale.

Da analisi effettuate dai ricercatori si è notato che il lavoro svolto per dissipare l'energia cinetica è la forza orizzontale totale integrata sulla distanza d'arresto e che la distanza d'arresto dipende dal rapporto tra forza di resistenza e forza d'attrito (e non dalla somma delle due). Ciò suggerisce che l'attrito e la resistenza debbano essere calcolati in modo indipendente essendo entrambi influenti. Inoltre, poiché le forze di resistenza dipendono dalla velocità a differenza delle forze d'attrito, maggiore è la velocità d'ingresso dell'aeromobile nell'EMAS maggiore sarà la differenza tra gli effetti delle due forze agenti.

In questa ricerca viene quindi derivata la formulazione per prevedere la distanza d'arresto dell'aeromobile in funzione delle forze d'attrito e di resistenza per una specifica velocità d'ingresso dell'aeromobile assumendo piste pianeggianti e trascurando resistenze dell'aria, effetti delle precipitazioni, aquaplaning e spinta residua del motore.

Consideriamo dunque la forza orizzontale totale F_H composta dalla forza di resistenza allo spostamento d e dalla forza d'attrito f . Nota la forza d'attrito come il prodotto tra il carico verticale (F_v) e il coefficiente di frizione μ , assumiamo, grazie a risultati di test empirici, che la forza di

resistenza sia analoga alla resistenza aerodinamica agente su un oggetto che attraversa un fluido ad una determinata velocità (Rayleigh Drag). Si hanno quindi:

$$F_H = f + d \quad (1)$$

$$f = -\mu F_V \quad (2)$$

$$d = -\frac{1}{2}\rho V^2 AC_D \quad (3)$$

Dove d è la resistenza allo spostamento dovuta all'EMAS, ρ è la densità del materiale del tappeto d'arresto, V è la velocità d'entrata dell'aeromobile, A è la superficie alare dell'aereo e C_D è il coefficiente di resistenza pari a:

$$C_D = C_{D0} + C_{Di} = C_{D0} + \frac{C_L^2}{e\pi\lambda} \quad (3.1)$$

Dove C_{D0} è il coefficiente di resistenza a portanza nulla, e è il fattore di Oswald, λ indica l'aspect ratio (allungamento alare) e il coefficiente di portanza C_L è pari a:

$$C_L = \frac{2W}{\rho V^2 S} \quad (3.2)$$

Dove W è il peso dell'aeromobile, V è la velocità di crociera, S è la superficie alare e ρ è la densità dell'aria.

Partendo dall'equazione numero (3) possiamo riscrivere d con la seguente formula:

$$d = -KV^2 \quad (4)$$

Dove la costante K è pari a

$$K = \frac{1}{2}\rho AC_D \quad (5)$$

Combinando le equazioni (1) (2) e (4) con la seconda legge di Newton otteniamo la seguente equazione del moto per l'aeromobile che attraversa l'EMAS:

$$F_H = ma = -KV^2 - mg\mu \quad (6)$$

L'aeromobile si fermerà quando la forza dell'equazione (6) (F_H) genererà una quantità di lavoro tale da consumare tutta l'energia cinetica dell'aeromobile, ossia quando:

$$\frac{1}{2}mV^2 = \int_0^R F_H dx \quad (7)$$

Dove R rappresenta la distanza d'arresto. Dopo numerosi passaggi matematici riportati nella tesi si arriva alla formulazione finale per determinare la distanza d'arresto:

$$R = \frac{m}{2K} \ln \left[1 + \left(\frac{KV_0^2}{mg\mu} \right) \right]$$

7. CASI STUDIO: AEROPORTI ITALIANI

Dopo aver ricavato la formulazione per determinare la distanza d'arresto di un aeromobile dal suo ingresso nell'EMAS, si è deciso di applicarla con lo scopo di dimensionare dei letti d'arresto in alcuni aeroporti italiani. Per effettuare il dimensionamento si prendono in considerazione gli aeromobili ritenuti maggiormente vincolanti in termini di peso e sollecitazione applicata sulle sovrastrutture che utilizzano, o potrebbero utilizzare, le piste di volo degli aeroporti analizzati. Oltre alle informazioni riguardanti gli aeromobili, si devono utilizzare le planimetrie dell'aeroporto analizzato per controllare e verificare la disponibilità di spazi per consentire o meno la realizzazione dell'opera.

I casi studio presi in considerazione sono stati selezionati con l'intento di verificare la fattibilità della realizzazione dell'opera per ogni classe di aeroporto presente in Italia:

- Aeroporto di Milano Malpensa
- Aeroporto Marco Polo di Tessera (Venezia)
- Aeroporto Antonio Canova di Treviso
- Aeroporto "Pitagora" di Crotone

Il primo caso studio proposto riguarda la progettazione del letto d'arresto a fine pista nelle due piste che sono presenti nell'aeroporto di Milano Malpensa.

La classificazione ICAO dell'aeroporto, ossia il codice alfanumerico assegnato in base alla capacità della pista di permettere alle varie categorie di aeromobili di compiere le operazioni, è 4F ossia:

- La pista ha una lunghezza superiore a 1800 metri (4)
- L'aeroporto può ospitare aeromobili con apertura alare maggiore o uguale a 65 metri ma inferiore a 80 metri; distanza esterna tra i carrelli principali maggiore o uguale a 14 metri ma inferiore a 16 metri. (F)

L'aeroporto è dotato di due piste, utilizzate per le fasi di atterraggio, decollo e movimentazione dell'aeromobile, aventi le seguenti caratteristiche: (Figura 1 e Figura 2)

Designazione RWY Designation	QTE Rilevamento Vero True Bearing	Dimensioni RWY Dimension of RWY (M)
1	2	3
17L	169.03°	3920 x 60
35R	349.03°	3920 x 60
17R	169.02°	3920 x 60
35L	349.03°	3920 x 60

Figura 1 – Designazione e dimensioni delle piste

Designazione RWY Designation	Pendenza di RWY-SWY Slope	Dimensioni SWY SWY dimension (M)	Dimensioni CWY CWY dimension (M)	Dimensioni strip strip dimension (M)	Dimensioni RESA RESA dimension (M)
1	7	8	9	10	11
17L	Pendenza longitudinale 0.60% Longitudinal slope 0.60%	NIL	120 x 150	4040 x 300	240 x 150
35R	Pendenza longitudinale 0.60% Longitudinal slope 0.60%	NIL	160 x 150	4040 x 300	240 x 150
17R	Pendenza longitudinale 0.58% Longitudinal slope 0.58%	NIL	200 x 150	4040 x 300	240 x 150
35L	Pendenza longitudinale 0.58% Longitudinal slope 0.58%	NIL	60 x 150	4040 x 300	200 x 150

Figura 2 – Dimensioni RESA di fine pista

Per quanto riguarda planimetrie e informazioni geometriche e dimensionali più accurate è stata esaminata la carta AIP dell'aeroporto messa a disposizione da ENAV tramite un sito d'informazione pubblica.

Le ultime informazioni necessarie per progettare il letto d'arresto sono quelle riguardanti gli aeromobili critici che utilizzano, o potrebbero utilizzare, l'aeroporto. Per il caso studio di Malpensa sono stati presi in considerazione due tipologie di aeromobile:

- 1) Boeing 777-300ER: il più grande aeromobile al mondo dotato di due motori.

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all'atterraggio MLW = 251290 kg
- Velocità di crociera $V = 288,05$ m/s
- Superficie alare = $436,8$ m²
- Apertura alare = $64,8$ m

- 2) Airbus A380: Prodotto dalla Airbus, è un aeromobile di linea quadrimotore utilizzato prevalentemente dalla compagnia aerea “Emirates” ed è l’aeromobile critico preso in considerazione per progettare le piste aeroportuali di Malpensa.

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all’atterraggio MLW = 394000 kg
- Velocità di crociera $V = 291,38$ m/s
- Superficie alare = 845 m²
- Apertura alare = $79,75$ m

Una volta raccolte tutte le informazioni necessarie per dimensionare il letto d’arresto procediamo calcolando la distanza d’arresto utilizzando la formulazione ricavata al capitolo 7 e i dati relativi alla soluzione EMASMAX® tra cui:

densità cemento cellulare $\rho = 1600$ kg/m³;

coefficiente di frizione pneumatico-cemento cellulare = 0.03;

Velocità d’ingresso nel letto d’arresto = 70 nodi (pari a 129.64 km/h).

RISULTATI:

Airbus A380: sono necessari 72 metri di EMASMAX® per il completo arresto dell’aeromobile.

Boeing 777-300ER: sono necessari 85 metri di EMASMAX® per il completo arresto dell’aeromobile.

Dai risultati si può notare che l’aeromobile che richiede maggior distanza d’arresto è il Boeing 777-300ER e quindi si devono realizzare dei letti d’arresto con dimensioni non inferiori a 85 metri.

Per concludere l’analisi del caso studio si verifica la disponibilità dello spazio necessario per realizzare l’opera utilizzando le informazioni planimetriche delle piste e immagini satellitari fornite da Google Maps sulle quali verranno rappresentati i letti d’arresto a fine pista aeroportuale (Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6):



Figura 3 – Realizzazione EMAS (60 X 85 metri) a fine pista 35L



Figura 4 – Realizzazione EMAS (60 X 85 metri) a fine pista 17L



85 m

60 m

Figura 5 – Realizzazione EMAS (60 X 85 metri) a fine pista 17R



Figura 6 – Realizzazione EMAS (60 X 85 metri) a fine pista 35R

Come si può osservare dalle ultime figure, in tutte e quattro le aree di fine pista vi è spazio sufficiente per ospitare la realizzazione di EMAS all'interno della RESA originaria. Per quanto concerne il posizionamento del letto d'arresto si è scelto di iniziare a realizzarlo a fine Runway strip ossia a inizio

RESA originaria (60 metri oltre il fine pista). Un'altra soluzione potrebbe essere quella di posizionare EMAS facendo coincidere la fine di EMAS con la fine della RESA originaria in modo da realizzarlo più lontano possibile dal fine pista creando così meno problemi in caso di atterraggio anticipato dell'aeromobile.

Il secondo caso studio proposto riguarda la progettazione del letto d'arresto a fine pista nelle due piste che sono presenti nell'aeroporto Marco Polo di Tessera (VE), scelto come caso studio anche a causa della sua vicinanza geografica.

La classificazione ICAO dell'aeroporto, ossia il codice alfanumerico assegnato in base alla capacità della pista di permettere alle varie categorie di aeromobili di compiere le operazioni, è 4E ossia:

- La pista ha una lunghezza superiore a 1800 metri (4)
- L'aeroporto può ospitare aeromobili con apertura alare maggiore o uguale a 52 metri ma inferiore a 65 metri; distanza esterna tra i carrelli principali maggiore o uguale a 9 metri ma inferiore a 14 metri. (E)

L'aeroporto è dotato di due piste, utilizzate per le fasi di atterraggio, decollo e movimentazione dell'aeromobile, aventi le seguenti caratteristiche: (Figura 7 e Figura 8)

Designazione RWY Designation	QTE Rilevamento Vero True Bearing	Dimensioni RWY Dimension of RWY (M)
1	2	3
04L	042.10°	2738 x 45
22R	222.12°	2738 x 45
04R	042.11°	3300 x 45
22L	222.13°	3300 x 45

Figura 7 – Designazione e dimensioni delle piste

Designazione RWY Designation 1	Pendenza di RWY-SWY Slope 7	Dimensioni SWY SWY dimension (M) 8	Dimensioni CWY CWY dimension (M) 9	Dimensioni strip strip dimension (M) 10	Dimensioni RESA RESA dimension (M) 11
04L	Longitudinale/longitudinal: vedi/see AOC Trasversale/transverse: 1.31%	NIL	360 x 180	2858 x 225	240 x 150
22R	Longitudinale/longitudinal: vedi/see AOC Trasversale/transverse: 1.31%	NIL	242 x 180	2858 x 225	240 x 150
04R	Longitudinale/longitudinal: vedi/see AOC Trasversale/transverse: RWY 1.4%	NIL	220 x 300	3420 x 300	240 x 145
22L	Longitudinale/longitudinal: vedi/see AOC Trasversale/transverse: RWY 1.4%	NIL	220 x 300	3420 x 300	240 x 150

Figura 8 – Dimensioni RESA di fine pista

Per quanto riguarda planimetrie e informazioni geometriche e dimensionali più accurate è stata esaminata la carta AIP dell'aeroporto messa a disposizione da ENAV tramite un sito d'informazione pubblica.

Le ultime informazioni necessarie per progettare il letto d'arresto sono quelle riguardanti gli aeromobili critici che utilizzano, o potrebbero utilizzare, l'aeroporto. Per il caso studio di Venezia sono stati presi in considerazione due tipologie di aeromobile:

- 1) Airbus A380: Prodotto dalla Airbus, è un aeromobile di linea quadrimotore utilizzato prevalentemente dalla compagnia aerea "Emirates". Non ha mai utilizzato l'aeroporto Marco Polo, il quale però è progettato per poterlo eventualmente ospitare.

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all'atterraggio MLW = 394000 kg
- Velocità di crociera $V = 291,38$ m/s
- Superficie alare = 845 m²
- Apertura alare = $79,75$ m

- 2) Boeing 777-300ER: il più grande aeromobile al mondo dotato di due motori. Tale aeromobile è attualmente il più pesante che utilizza la pista aeroportuale di Venezia.

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all'atterraggio MLW = 251290 kg
- Velocità di crociera $V = 288,05$ m/s
- Superficie alare = $436,8$ m²
- Apertura alare = $64,8$ m

Una volta raccolte tutte le informazioni necessarie per dimensionare il letto d'arresto procediamo calcolando la distanza d'arresto utilizzando la formulazione ricavata al capitolo 7 e i dati relativi alla soluzione EMASMAX® tra cui:

densità cemento cellulare $\rho = 1600$ kg/m³;

coefficiente di frizione pneumatico-cemento cellulare = 0.03;

Velocità d'ingresso nel letto d'arresto = 70 nodi (pari a 129.64 km/h).

RISULTATI

Airbus A380: sono necessari 72 metri di EMASMAX® per il completo arresto dell'aeromobile.

Boeing 777-300ER: sono necessari 85 metri di EMASMAX® per il completo arresto dell'aeromobile.

Dai risultati si può notare che l'aeromobile che richiede maggior distanza d'arresto è il Boeing 777-300ER e quindi si devono realizzare dei letti d'arresto con dimensioni non inferiori a 85 metri.

Per concludere l'analisi del caso studio si verifica la disponibilità dello spazio necessario per realizzare l'opera utilizzando le informazioni planimetriche delle piste e immagini satellitari fornite da Google Maps sulle quali verranno rappresentati i letti d'arresto a fine pista aeroportuale (Figura 9 e Figura 10):



Figura 9 – Realizzazione EMAS (45 X 85 metri) a fine pista 22L e 22R



Figura 10 – Realizzazione EMAS (45 X 85 metri) a fine pista 04R

Come si può osservare dalle ultime figure, solamente in tre aree di fine pista su quattro vi è spazio sufficiente per ospitare la realizzazione di EMAS all'interno della RESA originaria. A fine pista 04L non vi è infatti la possibilità di realizzare il letto d'arresto in quanto, se realizzato a 60 metri dal fine pista, renderebbe inutilizzabile la via di rullaggio che collega le due piste. L'alternativa potrebbe essere quella di realizzare EMAS a fine pavimentazione della via di rullaggio ma in questo caso non vi è lo spazio sufficiente per realizzare un EMAS 45 x 85 metri a causa della presenza di un piccolo corso d'acqua.

Per quanto concerne il posizionamento del letto d'arresto si è scelto di iniziare a realizzarlo a fine Runway strip ossia a inizio RESA originaria (60 metri oltre il fine pista).

Il terzo caso studio proposto riguarda la progettazione del letto d'arresto a fine pista nell'aeroporto Antonio Canova di Treviso.

La classificazione ICAO dell'aeroporto, ossia il codice alfanumerico assegnato in base alla capacità della pista di permettere alle varie categorie di aeromobili di compiere le operazioni, è 4D ossia:

- La pista ha una lunghezza superiore a 1800 metri (4)
- L'aeroporto può ospitare aeromobili con apertura alare maggiore o uguale a 36 metri ma inferiore a 52 metri; distanza esterna tra i carrelli principali maggiore o uguale a 9 metri ma inferiore a 14 metri. (D)

L'aeroporto è dotato di una pista, utilizzata per le fasi di atterraggio, decollo e movimentazione dell'aeromobile, avente le seguenti caratteristiche: (Figura 11 e Figura 12)

Designazione RWY Designation	QTE Rilevamento Vero True Bearing	Dimensioni RWY Dimension of RWY (M)
1	2	3
07	071.28°	2420 x 45
25	251.28°	2420 x 45

Figura 11 – Designazione e dimensioni della pista

Designazione RWY Designation	Pendenza di RWY-SWY Slope	Dimensioni SWY SWY dimension (M)	Dimensioni CWY CWY dimension (M)	Dimensioni strip strip dimension (M)	Dimensioni RESA RESA dimension (M)
1	7	8	9	10	11
07	Longitudinale/longitudinal: 0.15% Trasversale/transverse: 1.5%	NIL	60 x 150	2540 x 300	130 x 150
25	Longitudinale/longitudinal: 0.15% Trasversale/transverse: 1.5%	NIL	76 x 150	2540 x 300	90 x 90

Figura 12 – Dimensioni RESA di fine pista

Per quanto riguarda planimetrie e informazioni geometriche e dimensionali più accurate è stata esaminata la carta AIP dell'aeroporto messa a disposizione da ENAV tramite un sito d'informazione pubblica. Le ultime informazioni necessarie per progettare il letto d'arresto sono quelle riguardanti gli aeromobili critici che utilizzano l'aeroporto. Per il caso studio di Treviso sono stati presi in considerazione le due tipologie di aeromobile maggiormente vincolanti che utilizzano la pista aeroportuale:

- 1) Airbus A321: aeromobile di linea bimotore appartenente alla famiglia Airbus A320.

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all'atterraggio MLW = 73500 kg
- Velocità di crociera $V = 267,5$ m/s
- Superficie alare = 128 m²
- Apertura alare = 34 m

2) Boeing 737 MAX 8-200: aeromobile a fusoliera stretta prodotto da Boeing.

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all'atterraggio MLW = 69308 kg
- Velocità di crociera $V = 270,83$ m/s
- Superficie alare = 127 m²
- Apertura alare = 35,92 m

Una volta raccolte tutte le informazioni necessarie per dimensionare il letto d'arresto procediamo calcolando la distanza d'arresto utilizzando la formulazione ricavata al capitolo 7 e i dati relativi alla soluzione EMASMAX® tra cui:

densità cemento cellulare $\rho = 1600$ kg/m³;

coefficiente di frizione pneumatico-cemento cellulare = 0.03;

Velocità d'ingresso nel letto d'arresto = 70 nodi (pari a 129.64 km/h).

RISULTATI

Airbus A321: sono necessari 83,7 metri di EMASMAX® per il completo arresto dell'aeromobile.

Boeing 737 MAX 8-200: sono necessari 78,4 metri di EMASMAX® per il completo arresto dell'aeromobile.

Dai risultati si può notare che l'aeromobile che richiede maggior distanza d'arresto è l'Airbus A321 e quindi si devono realizzare dei letti d'arresto con dimensioni non inferiori a 83,7 metri.

Per concludere l'analisi del caso studio si verifica la disponibilità dello spazio necessario per realizzare l'opera utilizzando le informazioni planimetriche delle piste e immagini satellitari fornite da Google Maps sulle quali verranno rappresentati i letti d'arresto a fine pista aeroportuale (Figura 13 e Figura 14):



84 m
45 m

Figura 13 – Realizzazione EMAS (45 X 84 metri) a fine pista 25

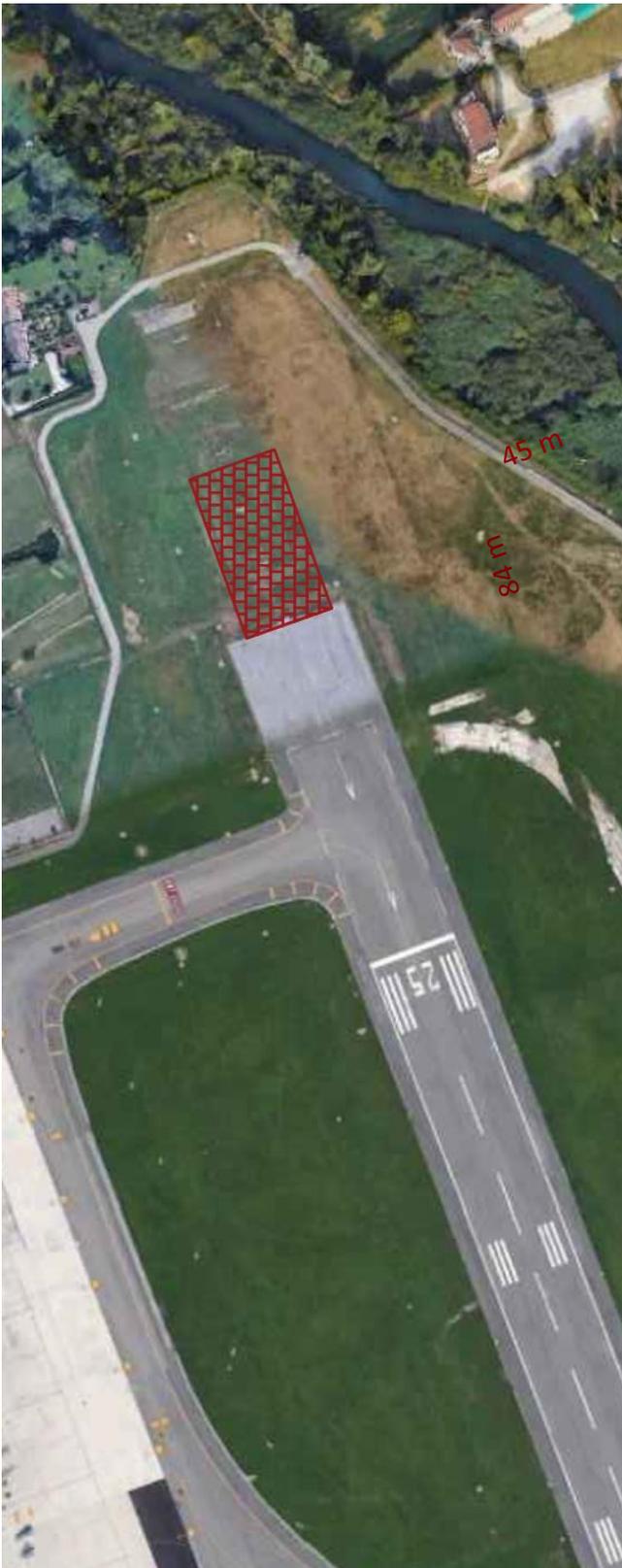


Figura 14 – Realizzazione EMAS (45 X 84 metri) a fine pista 07

Come si può osservare dalle ultime figure, in tutte e due le aree di fine pista vi è spazio sufficiente per ospitare la realizzazione di EMAS all'interno della RESA originaria. Per quanto concerne il

posizionamento del letto d'arresto si è scelto di iniziare a realizzarlo a fine Runway strip ossia a inizio RESA originaria (60 metri oltre il fine pista).

Il quarto ed ultimo caso studio proposto riguarda la progettazione del letto d'arresto a fine pista nell'aeroporto di Crotona.

La classificazione ICAO dell'aeroporto, ossia il codice alfanumerico assegnato in base alla capacità della pista di permettere alle varie categorie di aeromobili di compiere le operazioni, è 4C ossia:

- La pista ha una lunghezza superiore a 1800 metri (4)
- L'aeroporto può ospitare aeromobili con apertura alare maggiore o uguale a 24 metri ma inferiore a 36 metri; distanza esterna tra i carrelli principali maggiore o uguale a 6 metri ma inferiore a 9 metri (C)

L'aeroporto è dotato di una pista, utilizzata per le fasi di atterraggio, decollo e movimentazione dell'aeromobile, avente le seguenti caratteristiche: (Figura 15 e Figura 16)

Designazione RWY Designation	QTE Rilevamento Vero True Bearing	Dimensioni RWY Dimension of RWY (M)
1	2	3
17	NIL	2000 x 45
35	NIL	2000 x 45

Figura 15 – Designazione e dimensioni della pista

Designazione RWY Designation	Pendenza di RWY-SWY Slope	Dimensioni SWY SWY dimension (M)	Dimensioni CWY CWY dimension (M)	Dimensioni strip strip dimension (M)	Dimensioni RESA RESA dimension (M)
1	7	8	9	10	11
17	- 0.11%	NIL	85 x 150	2120 x 280	90 x 90
35	+ 0.11%	NIL	110 x 150	2120 x 280	90 x 90

Figura 16 – Dimensioni RESA di fine pista

Per quanto riguarda planimetrie e informazioni geometriche e dimensionali più accurate è stata esaminata la carta AIP dell'aeroporto messa a disposizione da ENAV tramite un sito d'informazione pubblica.

Le ultime informazioni necessarie per progettare il letto d'arresto sono quelle riguardanti gli aeromobili critici che utilizzano l'aeroporto. Per il caso studio di Crotona è stato preso in considerazione l'aeromobile maggiormente vincolante che utilizza la pista aeroportuale ossia il Boeing 737 MAX 8-200:

Parametri e informazioni utili per i calcoli progettuali:

- Peso massimo all'atterraggio MLW = 69308 kg
- Velocità di crociera $V = 270,83$ m/s
- Superficie alare = 127 m²
- Apertura alare = $35,92$ m

Procediamo calcolando la distanza d'arresto utilizzando la formulazione ricavata al capitolo 7 e i dati relativi alla soluzione EMASMAX® tra cui:

densità cemento cellulare $\rho = 1600$ kg/m³;

coefficiente di frizione pneumatico-cemento cellulare = 0.03 ;

Velocità d'ingresso nel letto d'arresto = 70 nodi (pari a 129.64 km/h).

RISULTATI

Boeing 737 MAX 8-200: sono necessari $78,4$ metri di EMASMAX® per il completo arresto dell'aeromobile.

Per concludere l'analisi del caso studio si verifica la disponibilità dello spazio necessario per realizzare l'opera utilizzando le informazioni planimetriche delle piste e immagini satellitari fornite da Google Maps sulle quali verranno rappresentati i letti d'arresto a fine pista aeroportuale (Figura 17 e Figura 18):



Figura 17 – Realizzazione EMAS (45 X 79 metri) a fine pista 35



Figura 18 – Realizzazione EMAS (45 X 79 metri) a fine pista 17

Come si può osservare dalle ultime figure, in entrambe le aree di fine pista vi è spazio sufficiente per ospitare la realizzazione di EMAS all'interno della RESA originaria. Per quanto concerne il posizionamento del letto d'arresto si è scelto di iniziare a realizzarlo a fine Runway strip ossia a inizio RESA originaria (60 metri oltre il fine pista).

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Airport Cooperative Research Program; Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Improved Models for Risk Assessment of Runway Safety Areas” (2011)
2. Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Developing Improved Civil Aircraft Arresting Systems” (2009)
3. Federal Aviation Administration, “Location of commercial aircraft accidents/incidents relative to runways”
4. Federal Aviation Administration, “Runway safety area program”
5. Federal Aviation Administration, “Financial feasibility and equivalency of runway safety area improvements and engineered material arresting systems.”
6. J.N.M Van Eekeren, “Estimated Cost – Benefit analysis of runway severity reduction based on actual arrestments”
7. Runway Safe, “Desktop study and budgetary price indication Maurice Bishop airport, Grenada”
8. Federal Aviation Administration, “Soft ground arresting system for airports”
9. Runway Safe, “FAA – ICAO – EASA regulations”
10. Runway Safe, “EMAS general presentation”
11. Runway Safe, “EMASMAX construction”
12. Federal Aviation Administration, Advisory circular (AC) 150/5220-22B “Engineered material arresting systems (EMAS) for aircraft overruns.”
13. Sally A. Shoop, “Finite element modeling of tire-terrain interaction”
14. IATA, “2021 safety report”
15. ENAC, “Linee guida per la progettazione, l’installazione ed il collaudo dei letti d’arresto (EMAS)” (Edizione 2019-02)
16. ICAO, Volume 1, “Aerodrome design and operations International”
17. EASA, “Regulations on Aerodromes (Reg. (CE)216/2008, Reg. (CE)139/2014, Certifications Specifications-ADR-DSN, AMC e GM)”
18. J.N.M Van Eekeren, “Safety assessment of landing performance factors of business type of aircraft”
19. R.F.Cook, “Soft-ground aircraft arresting system”
20. IATA, “Runway safety accident analysis report 2010-2014”
21. J.Y. Wong, “Some thought on simulations in terramechanics”
22. <https://www.iata.org/en/publications/safety-report/interactive-safety-report/>

23. https://runwaysafe.com/wp-content/uploads/2021/09/RWS-EMASMAX_20210901_Letter_FINAL_web.pdf
24. Zodiac Aerospace, “Zodiac Arresting systems-ESCO, EMASMAX aircraft arresting systems for runway overrun protection.”
25. <https://skybrary.aero/articles/engineered-materials-arresting-system-emas>
26. [https://onlineservices.enav.it/enavWebPortalStatic/AIP/AIP/\(A02-24\)_2024_02_22/index.html](https://onlineservices.enav.it/enavWebPortalStatic/AIP/AIP/(A02-24)_2024_02_22/index.html)
27. Richard DeLoach, Jill M.Marlowe, Thomas J.Yager, “Uncertainty analysis for the evaluation of a passive runway arresting system”