



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA

Sede di Forlì

Corso di laurea in

INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN
COSTRUZIONI AERONAUTICHE

***Advanced Air Mobility: modellazione di un vertiporto
per la simulazione di scenari di drone delivery***

Candidato:

Francesco Pietracupa

Relatore:

Prof.ssa Sara Bagassi

Correlatori:

Marzia Corsi

Tommaso Fadda

Anno accademico 2022/2023

Abstract

L'*Advanced Air Mobility* (AAM) è una definizione recente che indica i servizi di mobilità aerea, abilitati da aeromobili autonomi, per la consegna di merci e il trasporto di passeggeri in aree urbane e rurali, altrimenti difficili da raggiungere. L'intento che si prefigge è quello di rivoluzionare gli spostamenti a corto raggio e a bassa quota al fine di garantire lo sviluppo e la crescita delle aree urbane (*Urban Air Mobility* – UAM) ed extra urbane (*Regional Air Mobility* – RAM). Gli obiettivi che si pone di raggiungere sono l'abbattimento delle emissioni di CO₂ e di sostanze inquinanti generate dai mezzi di trasporto tradizionali, la velocizzazione del trasporto di persone e merci all'interno della città e delle zone limitrofe, oltre all'introduzione di un sistema di trasporto nuovo e rivoluzionario, che sia anche efficiente e sicuro. Questa nuova tipologia di mobilità, tuttavia, deve inserirsi all'interno dello spazio aereo, un volume fortemente regolamentato, e deve farlo con dei velivoli e delle infrastrutture che, ad oggi, sono ancora in fase di sperimentazione o di definizione. Ciononostante, per via delle enormi prospettive di sviluppo che si prefigurano all'orizzonte, la materia, attualmente, è fonte di numerosi studi e ricerche. Tra esse si inserisce anche questo lavoro, il cui obiettivo è quello di modellare un vertiporto, da inserire all'interno di un preesistente scenario aeroportuale virtuale, garantendo, attraverso l'inserimento di velivoli, traiettorie ed animazioni, lo sviluppo di un ambiente dedicato alla simulazione di scenari di *drone delivery*. Per farlo, si è partiti da considerazioni preliminari riguardo al caso di studio scelto, basato sull'aeroporto Guglielmo Marconi di Bologna. In seguito alle dovute ipotesi sul posizionamento del vertiporto all'interno dello scenario aeroportuale, sul dimensionamento e sulla tipologia di traffico che può gestire, si è passati alla modellazione del vertiporto e al suo inserimento all'interno dello scenario esistente. Infine, attraverso l'inserimento delle traiettorie e delle relative animazioni di un velivolo, si è raggiunto l'obiettivo e si è creato un ambiente di simulazione funzionante e utile per la futura simulazione di scenari di AAM.

Indice

Indice delle figure	6
1. Introduzione.....	8
1.1. Motivazioni e obiettivi	8
1.2. Struttura della tesi.....	10
2. Advanced Air Mobility.....	11
2.1. Cenni storici e prospettive di sviluppo della UAM.....	11
2.2. Lo stato attuale dello sviluppo della AAM in Europa.....	12
2.2.1. Lo sviluppo dell’AAM nel contesto delle “smart city”	13
2.3. Tecnologie attuali e progressi fatti	14
2.3.1. I velivoli	14
2.3.2. Le infrastrutture.....	19
3. Introduzione al caso di studio	22
3.1. La mobilità aerea avanzata in Italia.....	22
3.2. L’aeroporto di Bologna	24
3.2.1. Motivazioni di un vertiporto all’interno dell’aeroporto	25
3.3. Individuazione delle aree disponibili alla collocazione del vertiporto all’interno dell’aeroporto	26
3.4. Normative e linee guida sulla progettazione di vertiporti	29
3.4.1. Inserimento di traiettorie secondo le linee guida	33
3.4.2. Ipotesi su dimensioni, tipologia di velivoli e materiali.....	35
3.5. Individuazione di possibili destinazioni	36
4. Ambienti di simulazione.....	40
4.1. Realtà estesa e realtà virtuale	40
4.2. Scenari di simulazione e relativi utilizzi	42
4.3. Creazione di scenari virtuali: modellazione e simulazione	44
4.4. I programmi utilizzati	45
4.4.1. Blender	46
4.4.2. Gimp.....	49

5. Modellazione del vertiporto.....	50
5.1. Preparazione delle texture da applicare ai modelli.....	51
5.2. Realizzazione delle singole parti del vertiporto	54
5.3. Configurazioni finali del vertiporto.....	56
6. Scenario finale di simulazione di drone delivery	62
6.1. Inserimento del vertiporto all'interno dello scenario dell'aeroporto di Bologna.....	62
6.2. Modellazione di traiettorie da e per il vertiporto.....	65
6.3. Inserimento di velivoli e animazioni	68
7. Conclusioni.....	79
7.1. Sviluppi futuri.....	79
Bibliografia	81

Indice delle figure

Figura 1: Velivolo VoloCity dell'azienda Volocopter	15
Figura 2: Velivolo S4 2.0 dell'azienda Joby Aviation	16
Figura 3: Velivolo Alia dell'azienda Beta	16
Figura 4: Velivolo VoloDrone dell'azienda Volocity	17
Figura 5: Velivolo MK30 sviluppato da Amazon.....	18
Figura 6: Area a imbuto sovrastante un vertiporto	20
Figura 7: Esempio di vertiporto sopraelevato (vertibase).....	21
Figura 8: Esempio di vertiporto a terra	21
Figura 9: Vertiporto di test UV-0 nei pressi dell'aeroporto di Roma-Fiumicino	23
Figura 10: L'aeroporto G. Marconi visto dall'alto.....	25
Figura 11: Carta ICAO dell'aerodromo di Bologna.....	27
Figura 12: L'aeroporto di Bologna visto dall'alto con evidenziate l'area del parcheggio dismesso e la zona cargo DHL	27
Figura 13: Vista dall'alto della zona cargo ovest e parcheggio dismesso	28
Figura 14: Parcheggio non più utilizzato, visto da “via della Salute”	28
Figura 15: Dimensione di controllo D [16].....	30
Figura 16: Indicatore vertiporto, punto di mira e indicatore perimetro FATO [16]	30
Figura 17: FATO e Safety Area associata secondo le linee guida EASA [16].....	31
Figura 18: Taxiway/Ground taxi-route per un velivolo eVTOL secondo le linee guida EASA	32
Figura 19: Stand per velivoli eVTOL, con percorsi di svolta, ad uso simultaneo	32
Figura 20: Manovra di decollo da un punto sopraelevato.....	33
Figura 21: Manovra di decollo standard da vertiporto a terra.....	33
Figura 22: Manovra di decollo verticale	34
Figura 23: Atterraggio in sicurezza grazie a VTOL di categoria avanzata.....	34
Figura 24: Atterraggio in sicurezza grazie a VTOL di categoria di base	35
Figura 25: Confronto TLOF-VoloDrone	36
Figura 26: Configurazione delivery del velivolo VoloDrone	38
Figura 27: Edificio di Esselunga, visto dall'alto	39
Figura 28: Diagramma esplicativo sulle differenze tra AR, VR, MR e XR	40
Figura 29: Le quattro categorie del Virtuality Continuum	41
Figura 30: Rappresentazione delle attuali tecnologie di XR secondo lo spettro di immersione	42
Figura 31: Simulatore di volo di un Boeing 737-800	43
Figura 32: Simulatore di traffico aereo	44
Figura 33: Schermata iniziale di Blender all'apertura del programma	46
Figura 34: Sezione aggiungi (add) della object mode.....	47
Figura 35: Suddivisione schermo per texturizzazione con UV/Image Editor	48
Figura 36: Timeline di Blender.....	49
Figura 37: Texture per il TLOF realizzata durante il percorso di tirocinio	51
Figura 38: Texture per le taxiway realizzata durante il percorso di tirocinio	51
Figura 39: Texture definitiva da utilizzare per il TLOF	52
Figura 40: Texture definitiva da utilizzare per gli stand.....	53
Figura 41: Linea curva utilizzata nei vari modelli creati	53
Figura 42: Modello della sezione relativa a TLOF e FATO.....	54
Figura 43: Modello della sezione relativa alla taxiway	55
Figura 44: Modello della sezione relativa allo stand di stazionamento	56

Figura 45: Configurazione 1 del vertiporto.....	57
Figura 46: Configurazione 2 del vertiporto.....	58
Figura 47: Configurazione 3 del vertiporto.....	59
Figura 48: Configurazione finale scelta per il vertiporto.....	60
Figura 49: Configurazione alternativa del vertiporto.....	61
Figura 50: Vista del vertiporto nella posizione scelta.....	63
Figura 51: Sovrapposizione del vertiporto a una immagine satellitare dell'aeroporto.....	64
Figura 52: Vista dall'alto e dalla destra dei due vertiporti implementati	64
Figura 54: Vista dall'alto dell'intero aeroporto, con implementati i due vertiporti.....	65
Figura 53: Vista dall'alto e dalla sinistra dei due vertiporti implementati	65
Figura 55: Possibile traiettoria in decollo o atterraggio.....	67
Figura 56: Traiettoria di atterraggio realizzata su Blender	67
Figura 57: Traiettoria di atterraggio su Blender percorsa da un velivolo	68
Figura 58: Animazione di una procedura di atterraggio (a).....	69
Figura 59: Animazione di una procedura di atterraggio (b).....	69
Figura 60: Animazione di una procedura di atterraggio (c).....	70
Figura 61: Animazione di una procedura di atterraggio (d).....	70
Figura 62: Animazione di una procedura di atterraggio (e).....	71
Figura 63: Animazione di una procedura di atterraggio (f)	71
Figura 64: Animazione di una procedura di atterraggio (g).....	72
Figura 65: Animazione di una procedura di atterraggio (h).....	72
Figura 66: Animazione di una procedura di atterraggio (i)	73
Figura 67: Animazione di una procedura di decollo (a)	74
Figura 68: Animazione di una procedura di decollo (b)	74
Figura 69: Animazione di una procedura di decollo (c)	75
Figura 70: Animazione di una procedura di decollo (d)	75
Figura 71: Animazione di una procedura di decollo (e)	76
Figura 72: Animazione di una procedura di decollo (f).....	76
Figura 73: Animazione di una procedura di decollo (g).....	77
Figura 74: Animazione di una procedura di decollo (h)	77
Figura 75: Animazione di una procedura di decollo (i).....	78
Figura 76: Animazione di una procedura di decollo (j).....	78

1. Introduzione

La Mobilità Aerea Avanzata – *Advanced Air Mobility* (AAM) – è una innovativa forma di mobilità che si pone l’obiettivo principale di introdurre e affermare, all’interno della società odierna e del futuro, una nuova tipologia di mezzi di trasporto, che sia in grado di rivoluzionare le attuali metodologie, gestioni e tempistiche di viaggio. Essa consiste nello sviluppo un nuovo sistema di trasporto per i passeggeri e in parallelo uno legato a velivoli cargo per il trasporto di merci (*delivery*), utilizzando aeromobili a propulsione prevalentemente elettrica e a decollo e atterraggio verticale – *electric Vertical Take-Off and Landing* (eVTOL) – i quali, ad oggi, prevedono, a seconda delle dimensioni e della tipologia del velivolo, due modalità di volo: quella autonoma o con pilotaggio remoto e quella con un pilota a bordo. In particolare, la AAM è destinata agli spostamenti a bassa quota e a corto raggio, in zone urbane o extra urbane. L’intento è quello di poter spostare persone o merci all’interno della città, o al di fuori di questa, in maniera rapida e sicura, riducendo il traffico a terra e cercando di diminuire le emissioni di CO₂. La AAM si occupa di definire i mezzi di trasporto adatti a gestire questa nuova tipologia di spostamenti, le infrastrutture di terra che possano ospitarli e guidarli nelle fasi di decollo e atterraggio; tra le altre cose, si occupa inoltre di definire le traiettorie, di risolvere le problematiche relative al transito in una specifica area dello spazio aereo e quelle che riguardano la propulsione, il controllo e la gestione dei velivoli.

1.1. Motivazioni e obiettivi

Data la complessità del nuovo sistema di mobilità urbana ed extra urbana introdotta dalla AAM, la necessità di doversi inserire all’interno di uno spazio aereo già fortemente regolamentato e quella di dover convivere con un traffico aereo già complesso e saturo, risulta necessario trovare delle soluzioni per garantire la corretta evoluzione delle tematiche in esame. La AAM, pertanto, presenta ad oggi un numero considerevole di problematiche ancora da risolvere (come, ad esempio, quelle relative all’inserimento di infrastrutture e rotte di volo all’interno del contesto urbano attuale). Per cercare di affrontare al meglio questi punti ancora irrisolti, acquisisce sempre maggiore importanza la simulazione di scenari di realtà virtuale, all’interno di un ambiente protetto e completamente configurabile, in cui è possibile testare varie soluzioni, concetti, scenari, situazioni di emergenza ecc. Da questa esigenza nasce il seguente lavoro di tesi, con l’intento di contribuire al progresso, in costante crescita, relativo alla tematica della AAM e di poter collaborare, seppur in piccola parte, alla definizione di quelle regolamentazioni e tecnologie che sono ancora in fase di realizzazione. In particolare, lo scopo è quello di riuscire a delineare simulazioni di scenari di AAM, in modo da sfruttarle per poter fare tutte le valutazioni, di concetti e soluzioni, che saranno poi necessarie alle

applicazioni che nasceranno in futuro nella realtà. Lo scopo predisposto, pertanto, consiste nel poter riprodurre, in forma digitale, ogni situazione di volo o di gestione delle operazioni di terra, relative a tali scenari, così da sviluppare più rapidamente le tecnologie e le norme adeguate alla nascita di questa nuova modalità di trasporto. Nasce pertanto con l'obiettivo di contribuire ad accelerare il processo di crescita a cui, inevitabilmente, la AAM sta andando incontro. Con esso si vuole riuscire a fornire un ambiente legato a una nuova ipotesi di simulazione, relativa a uno scenario di *drone delivery* o più in generale di trasporto merci. Occupandosi della fase iniziale della progettazione di questi scenari, l'elaborato si concentra sulla modellazione delle infrastrutture di terra e delle traiettorie relative alle fasi terminali del volo. Si è pensato, infatti, di affrontare la modellazione di un vertiporto, da inserire all'interno di uno scenario aeroportuale, garantendo, attraverso l'inserimento di velivoli, traiettorie ed animazioni, lo sviluppo dell'ambiente dedicato alla simulazione degli scenari di *drone delivery*; il tutto basandosi su uno scenario di riferimento, relativo all'aeroporto G. Marconi di Bologna, già implementato e disponibile, in cui in futuro potranno essere simulate queste operazioni. In particolare, il Laboratorio di Realtà Virtuale e Simulazione dell'Università di Bologna ha reso disponibile tale scenario di simulazione, già modellato per interno all'interno del programma Blender, nella sua versione 2.78. Questo, oltre a rappresentare interamente l'aeroporto, contiene anche un vertiporto, pensato per i velivoli eVTOL di trasporto passeggeri, realizzato in un altro lavoro di tesi svolto precedentemente. Per tale motivo, era necessaria l'implementazione di un'ulteriore infrastruttura, in grado di gestire velivoli per il trasporto merci, così da completare uno scenario che potrebbe verosimilmente verificarsi tra qualche anno.

Nel fare ciò, sono stati identificati alcuni passaggi specifici che occorrerà affrontare:

- fare uno studio preliminare sulle opportunità offerte dallo scenario urbanistico della città di Bologna (in termini, ad esempio, di centralità geografica della città, della sua importanza come scalo di merci e passeggeri, della sua rilevanza turistica ecc.) e sui conseguenti possibili utilizzi di vertiporti nella città;
- studiare documentazione, casi di studio e velivoli disponibili per valutare il migliore posizionamento e il dimensionamento del vertiporto;
- identificare la migliore configurazione e collocazione del vertiporto, in virtù dei punti precedenti;
- modellare il vertiporto secondo quanto emerso dalle considerazioni e inserirlo all'interno dello scenario aeroportuale;
- infine, modellare le traiettorie per le fasi terminali di volo e inserire nello scenario dei velivoli che lo percorrano.

1.2. Struttura della tesi

Il lavoro di tesi descritto è stato diviso in diversi capitoli per facilitare la piena comprensione degli argomenti trattati. Nel capitolo 2 si introduce il concetto di mobilità aerea avanzata dando un contesto storico relativo alla nascita della tematica e un accenno al possibile sviluppo che si pensa possa avere nel futuro. Nello stesso capitolo sono stati introdotti i velivoli e le infrastrutture che, ad oggi, sono già in grado di garantire un ambiente che, seppur in continua evoluzione, si sviluppa in quella specifica direzione. In seguito, si è parlato dell'espansione della tematica in Europa, introducendo gli enti predisposti a tale progresso mentre, nel capitolo 3, si è introdotto lo stato di avanzamento dell'AAM in Italia e delle prima infrastrutture nascenti. A tale scopo è stato presentato l'aeroporto di Bologna, con i possibili utilizzi e benefici che un vertiporto al suo interno potrebbe garantire, delineandone mete ed utilità. Prima di procedere alla modellazione, sono state introdotte le due linee guida principali prese come riferimento per la realizzazione dell'infrastruttura di terra e sono state definite ipotesi e assunzioni fatte a tale proposito. Successivamente è stata trattata una breve introduzione riguardo alla reale motivazione per la quale è nato questo lavoro di tesi: l'ampliamento di uno scenario di realtà virtuale. Pertanto, viene introdotto l'argomento, delineando le applicazioni in ambito aeronautico di questa tecnologia. Il capitolo 4 si chiude con una descrizione sulle tecniche di modellazione ed animazione nei vari programmi utilizzati. Si passa infine, nei capitoli 5 e 6, alla descrizione dell'intero processo che ha portato alla realizzazione finale del vertiporto, attraverso la preparazione delle texture, la realizzazione delle singole parti dell'infrastruttura e poi della configurazione complessiva; si è descritta, per concludere, la fase di inserimento del progetto all'interno dello scenario aeroportuale, con annesse traiettorie e animazioni.

2. *Advanced Air Mobility*

Al fine di dare il giusto contesto al lavoro che si è pensato di svolgere, nei seguenti capitoli verranno trattate le tematiche principali che motivano e argomentano il lavoro di tesi svolto.

2.1. Cenni storici e prospettive di sviluppo della UAM

L'*Advanced Air Mobility* è un concetto introdotto dalla NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) per indicare i servizi, abilitati da aeromobili autonomi, per la consegna di merci e il trasporto di passeggeri in aree urbane e rurali, altrimenti difficili da raggiungere. Una delle sfide più importanti della AAM è quella di controllare i velivoli operanti proprio all'interno di aree urbane. Gli edifici rendono difficile la localizzazione dei velivoli, per cui delle speciali precauzioni devono essere prese in modo da garantire che questi non feriscano persone e non danneggino gli edifici. Affinché ciò sia possibile è richiesto un robusto sistema di controllo, il quale viene garantito da un concetto specifico, all'interno di quello più generale della AAM: la *Urban Air Mobility*, o UAM [1]. Per mobilità aerea urbana, infatti, si intende il sistema di trasporto aereo per passeggeri e merci in ambienti urbani densamente popolati ed edificati.

'*Advanced Air Mobility*' è un termine che unisce '*Urban Air Mobility*' (UAM), la quale implica il trasporto di persone e merci al di sopra del traffico cittadino e '*Regional Air Mobility*' (RAM), la quale si concentra maggiormente sul collegare periferie, paesi e piccole cittadine di campagna. A inizio 2020, la "*National Academies of Sciences, Engineering and Medicine*" ha pubblicato una relazione con lo scopo di espandere il concetto nascente di UAM al di là dei confini del centro di Manhattan [2]. Successivamente, a partire da marzo 2020, la UAM è stata considerata un elemento chiave del più ampio concetto che va sotto il nome di *Advanced Air Mobility*. Tale termine venne usato per la prima volta dalla NASA. Tuttavia, al di là dell'origine del nome, non è semplice definire con precisione dove e quando è nato il concetto della AAM. Un primo video relativo a un prototipo di velivolo eVTOL di trasporto passeggeri fu pubblicato dalla NASA nel 2009. La simulazione mostrava un mezzo rudimentale denominato Puffin [3]. Nello stesso periodo, numerosi investimenti iniziarono a prendere piede da parte di alcune società interessate allo sviluppo della tematica (come Uber e Google); fu tentato anche qualche primo test, principalmente nella città di New York, che coinvolgeva inizialmente i mezzi che si avevano a disposizione, come gli elicotteri tradizionali, causando però eccessivo inquinamento acustico e dell'aria. La NASA confermò che gli eVTOL dovevano essere di gran lunga più silenziosi degli elicotteri [4]. Inoltre, uno dei primi intenti definiti è stato, fin dal principio, quello di sviluppare velivoli che limitassero quanto più possibile le emissioni di CO₂. Qualche anno più tardi, proprio mentre l'ambiente dell'AAM stava acquisendo sempre più

risonanza e slancio, la pandemia del Covid-19 ha forzato la società a fermarsi dalla propria quotidianità attraverso lockdown in tutte le nazioni del mondo, rendendo difficile anche la crescita della tematica relativa allo sviluppo della AAM, ancora nelle sue fasi iniziali. Durante la pandemia, tuttavia, le compagnie hanno assistito ad una crescita sostanziale nel numero e nel valore degli investimenti sui velivoli eVTOL e sul mercato dei droni per il trasporto merci. Oggi, infatti, le prospettive di questo settore sono di grande interesse; nel corso del periodo 2021-2030 per il mercato mondiale della Mobilità Aerea Avanzata è attesa una crescita annua media a un tasso pari a circa il 20-25%, raggiungendo un valore stimato di circa 38-55 miliardi di euro al 2030 [5].

2.2. Lo stato attuale dello sviluppo della AAM in Europa

In Europa una delle istituzioni maggiormente impegnata nello sviluppo della AAM è l'Agencia Europea per la Sicurezza Aerea – *European Union Aviation Safety Agency* (EASA) – un ente giuridico indipendente, dotato di autonomia amministrativa e finanziaria, che tuttavia rende conto del suo operato agli Stati membri ed alle istituzioni europee. L'EASA elabora le normative inerenti alla sicurezza aerea e fornisce consulenze tecniche alla Commissione europea e agli Stati membri. Tra le altre cose, si occupa della certificazione dei prodotti aeronautici e delle ispezioni, supporta la Commissione nell'individuazione degli standard di sicurezza e collabora con altri soggetti, pubblici e privati, come ICAO (*International Civil Aviation Organization*) o FAA (*Federal Aviation Administration*). L'ICAO, a cui partecipa anche l'Italia, promuove l'elaborazione e l'adozione di norme internazionali e convenzioni in materia di navigazione aerea, trasporto di passeggeri e merci e sicurezza del trasporto aereo.

Il costante aumento delle attività con mezzi a pilotaggio remoto ha portato l'Europa a dover pensare ad una nuova organizzazione dello spazio aereo. Quest'ultimo è il luogo dove si svolgono le operazioni di volo; è costituito da una porzione tridimensionale di cielo, all'interno del quale gli aeromobili devono sottostare a particolari condizioni e attenersi a norme o procedure disposte localmente dall'autorità aeronautica di giurisdizione, oppure stabilite dall'ICAO. Fisicamente lo spazio delle operazioni di volo si estende dalla superficie terrestre fino ad una quota di 100.000 metri, dove per convenzione non è più possibile sostenere un aeromobile grazie alla forza aerodinamica [6]. Al fine di gestire l'ambiente all'interno del quale si spostano gli aeromobili e di organizzare gli spazi aerei e le rotte sono state introdotte le operazioni di controllo del traffico aereo e i servizi di navigazione aerea: l'*Air Traffic Management* (ATM) e gli *Air Navigation Services* (ANS). Il cielo europeo oggi è frammentato, gestito e controllato da oltre 60 centri di controllo che ancora seguono i confini degli stati nazionali (mentre gli Stati Uniti, ad esempio, con una superficie di monitoraggio

simile, ne hanno soltanto 20). Questa frammentazione è causa di possibili ritardi, rotte inutilmente più lunghe, sprechi di carburante e maggior produzione di CO₂. Per risolvere queste problematiche la Commissione Europea ha iniziato, quasi vent'anni fa, a lavorare ad un programma per offrire all'Europa un sistema di gestione moderno, sicuro e in grado di far fronte alle necessità del settore. È stato quindi lanciato nel 1999 il progetto del Cielo Unico Europeo – *Single European Sky* (SES) – nato con l'obiettivo di migliorare lo svolgimento delle attività di gestione del traffico aereo e dei servizi di navigazione aerea grazie ad una migliore e rinnovata integrazione dello spazio aereo europeo. Al fine di raggiungere tale obiettivo è nato il programma SESAR (*Single European Sky ATM Research*). Questo viene attualmente gestito da *SESAR 3 Joint Undertaking* [7], un partenariato pubblico e privato, lanciato nel 2021 dalla Commissione Europea e cofinanziato dall'Unione Europea, volto proprio a revisionare completamente lo spazio aereo europeo e il suo sistema di gestione del traffico, a favore del SES.

Tuttavia, le caratteristiche di volo dei droni sono diverse da quelle degli aeromobili con equipaggio, per cui il tradizionale sistema di gestione del traffico aereo non può essere visto come l'unico mezzo appropriato per gestire in modo sicuro ed efficiente il traffico UAS (*Unmanned Aircraft System*). Si inizia a parlare così dello *U-Space* [8], l'insieme dei servizi che fanno affidamento su un nuovo livello di digitalizzazione e di automazione e l'insieme delle procedure specifiche volte a regolare l'accesso sicuro ed efficiente di un elevato numero di droni all'interno dello spazio aereo. A supporto di questa iniziativa SESAR ha iniziato a definire in che modo sia possibile rendere operativo lo *U-Space* [9]. Ai droni sarebbe destinata la porzione di spazio aereo fino a 120 metri dal suolo con limitazioni in alcune aree, come ad esempio nei pressi di un aeroporto. L'obiettivo dello *U-Space* è quello di garantire l'integrazione tra il traffico aereo tradizionale e quello dei mezzi a pilotaggio remoto [10]. Al fine di raggiungere tale obiettivo, i servizi *U-Space* garantiscono forme avanzate di interazione con l'ambiente attraverso lo scambio di informazioni e dati digitali.

2.2.1. Lo sviluppo dell'AAM nel contesto delle “smart city”

Coerentemente con l'ambiente di UAM descritto, è doveroso immaginare anche come sarà lo scenario urbano dei prossimi anni, nel quale tale ambiente si andrà ad inserire. Nell'immaginare come saranno le città del futuro, prende sempre più piede il termine “*smart city*”; esse si prospettano essere dei luoghi nei quali le risorse disponibili saranno amministrare in maniera ottimizzata, al fine di garantire uno sviluppo urbano sostenibile in numerosi settori. Ciò è in linea con la direzione presa dall'Unione Europea al fine di tentare di ridurre l'impatto delle attività umane su quelle problematiche da affrontare con sempre più urgenza, quali il riscaldamento globale, l'inquinamento e i cambiamenti climatici. Nelle città dei prossimi anni risulterà fondamentale gestire in modo intelligente le risorse

energetiche, ambientali ed economiche. La definizione di "città intelligente" comprende: un largo uso di fonti energetiche rinnovabili, sistemi di riscaldamento e raffreddamento sostenibili, reti di trasporto urbano più sviluppate, un approvvigionamento idrico potenziato e migliori strutture di smaltimento dei rifiuti. Sono già in atto diverse proposte e iniziative dell'UE che promuovono aree urbane più sostenibili e competitive. Una su tutte è costituita da finanziamenti sulla ricerca e sull'innovazione per trasformare il sistema energetico dell'UE in un sistema a basse emissioni di carbonio. Una *smart city* deve privilegiare l'uso di fonti energetiche sostenibili e la conseguente diminuzione dell'utilizzo di sostanze inquinanti. Si farà un uso progressivamente più ampio dell'Intelligenza Artificiale (AI), ci saranno ampi spazi verdi e la mobilità sarà fondata sull'abbattimento delle emissioni di CO₂. In tale scenario, insieme allo sviluppo in parallelo di un trasporto a terra più "green", si inserisce perfettamente il concetto di base della UAM, attraverso lo sviluppo di una rete sempre più fitta di trasporto urbano, che fa uso di velivoli elettrici a basso ambientale, comodi e veloci.

2.3. Tecnologie attuali e progressi fatti

La ricerca e lo sviluppo sui droni per il trasporto commerciale in larga scala di persone e merci annunciano un'ampia rivoluzione nel panorama dei mezzi di trasporto. Al fine di definirne uno scenario completo e di individuare ogni punto da sviluppare per la realizzazione della UAM, si presentano in questo paragrafo le due tematiche principali che, ad oggi, sono state già affrontate e parzialmente sviluppate: i velivoli pensati per questa nuova categoria di mobilità urbana, con le varie problematiche da risolvere in termini di caratteristiche tecniche, e le infrastrutture in grado di ospitarli e consentire le operazioni a terra.

2.3.1. I velivoli

Il nuovo sistema di trasporto aereo UAM sarà reso possibile dagli aeromobili a decollo e atterraggio verticale dotati di propulsione elettrica. Questi mezzi, ad oggi, prevedono due modalità di volo: quella autonoma e quella con un pilota a bordo. La tendenza per il futuro, tuttavia, sembra essere legata alla prima modalità. Un velivolo con sistema a pilotaggio remoto è controllato da un computer a bordo oppure tramite il controllo remoto di un navigatore o di un pilota a terra. Tra i vantaggi di questi sistemi le aziende sperano di poter contare sulla loro facilità di utilizzo, la loro versatilità e la possibilità di essere utilizzati in situazioni di pericolo nelle aree inaccessibili o impervie. Capaci di decollare e atterrare verticalmente senza l'ausilio di una pista, gli eVTOL sono molto più silenziosi, versatili e "green" degli elicotteri. Così come questi ultimi, per contrastare il peso del velivolo e generare la trazione necessaria alla loro movimentazione, sono forniti di rotori (o eliche). La spinta

generata dipende, tra le altre cose, dalla potenza dei motori, dal numero di eliche e dalle caratteristiche di queste (tra cui il passo e il diametro).

Di seguito vengono illustrati alcuni di questi velivoli eVTOL, per il trasporto merci o passeggeri, attualmente già esistenti. Si parte dalla descrizione di un velivolo per il trasporto passeggeri il quale, seppur non costituisca il caso di studio per questo lavoro di tesi, è di particolare interesse in quanto è uno dei velivoli eVTOL più sviluppati in assoluto e già pronto all'utilizzo.

Questo velivolo è il **VoloCity** [11], un'aerotaxi sviluppato da Volocopter, azienda tedesca di punta nel campo della mobilità aerea urbana. Con i suoi 18 motori alimentati a batterie agli ioni di litio è in grado di sollevare un carico massimo di 200 kg al momento del decollo, con un'autonomia di volo di circa 35 km; nei piani dell'azienda il VoloCity dovrebbe essere altamente silenzioso e in grado di limitare il più possibile le emissioni inquinanti. Con oltre mille test di volo effettuati dal 2011, la compagnia ha già ottenuto diverse certificazioni preliminari per poter volare in città come Amburgo, Dubai, Helsinki e Singapore.



Figura 1: Velivolo VoloCity dell'azienda Volocopter

Interessante dal punto di vista delle prestazioni, seppur anch'esso riservato solo al trasporto di passeggeri, è il velivolo **S4 2.0**, concepito dall'americana Joby Aviation [12]. Il mezzo infatti, alimentato anch'esso elettricamente, è in grado di volare per oltre 240 km alla velocità di circa 322 km/h grazie alla spinta di sei eliche, posizionate sia sull'ala fissa che sulla coda.



Figura 2: Velivolo S4 2.0 dell'azienda Joby Aviation

Alia [13] invece è l'aerotaxi progettato dalla compagnia americana Beta, con sede nel Vermont, il cui design aerodinamico prende spunto dalla conformazione delle sterne artiche. Con un'apertura alare di oltre 15 metri, Alia è in grado di coprire distanze fino a circa 400 km, raggiungendo una velocità di 278 km/h. Alimentato in maniera completamente elettrica, può essere ricaricato in 50 minuti, trasportando fino a sei metri cubi di merce nella modalità cargo o sei persone, compreso il pilota, nel modello dedicato ai passeggeri. È interessante, appunto, per la versatilità del modello e per i diversi utilizzi per cui può essere utilizzato.



Figura 3: Velivolo Alia dell'azienda Beta

VoloDrone [14] invece è il velivolo utilizzato unicamente per il trasporto di merci, sviluppato sempre dall'azienda Volocopter. Dotato di un potenziale carico utile di 200 kg, il VoloDrone è in grado di coprire un'area molto vasta anche in condizioni operative difficili; è il primo drone di grandi dimensioni adatto a utilizzi in ambito agricolo. Anch'esso è alimentato da 18 rotori, con un diametro complessivo di 9,2 m e dispone di un azionamento completamente elettrico che utilizza batterie agli ioni di litio intercambiabili. Il telaio del drone invece è dotato di un flessibile sistema di aggancio del carico utile. Questo velivolo può essere utilizzato tramite controllo remoto oppure automaticamente su una rotta pre-programmata.



Figura 4: Velivolo VoloDrone dell'azienda Volocity

Questi sono solo alcuni dei velivoli attualmente già realizzati e pronti ad essere utilizzati. Numerosi altri mezzi invece sono in fase di progettazione o in attesa delle certificazioni necessarie per iniziare i test di volo. Ad esempio, Amazon è una delle aziende con i progetti più ambiziosi riguardo alla consegna di merci attraverso velivoli eVTOL. Tra gli ultimi modelli di velivoli cargo a pilotaggio remoto sviluppato dall'azienda c'è l'**MK30**: questo è dotato di sensori e telecamere che permettono di rilevare ed evitare autonomamente gli ostacoli durante il volo. Rispetto ai modelli precedenti questo è più silenzioso grazie ad un sistema di eliche ottimizzato e può volare anche in caso di leggera pioggia o temperature rigide. Ogni drone può trasportare un carico utile fino a 2,3 kg.



Figura 5: Velivolo MK30 sviluppato da Amazon

Possibili applicazioni dei velivoli eVTOL

La missione della AAM è rendere gli eVTOL utili a diversi scopi, dal trasporto all'assistenza, facendo in modo che i passeggeri e le merci possano raggiungere la propria destinazione in maniera rapida e sicura. Diversi servizi possono essere creati, o ridisegnati basandosi sull'impiego dei droni e della loro capacità di svolgere missioni aeree. Le possibili applicazioni, oltre al trasporto di persone o merci, comprendono numerosi settori e ambiti di azione, quali ad esempio: la gestione dell'ordine pubblico, della sicurezza urbana e delle attività di logistica, il monitoraggio delle condizioni meteo o di infrastrutture e reti (come gasdotti, oleodotti o rete ferroviaria), il controllo di territori ampi o complessi da raggiungere (come confini e aree alluvionate) e diversi impieghi nell'agricoltura. In particolare, lo scenario ipotizzato per i velivoli cargo ha come scopo quello di trasportare dei payload pesanti, utilizzati ad esempio in ambito medico, agricolo o industriale; diverso invece è lo scenario pensato per quei mezzi, di dimensioni più contenute, il cui fine è la consegna di prodotti a domicilio o presso apposite aree di raccolta. Un simile ambiente è sviluppato principalmente dalle singole aziende interessate e viene successivamente approvato dagli organi di competenza nazionali (come ENAV ed ENAC) ed internazionali (EASA per l'Europa o FAA per gli Stati Uniti). Alcune delle aziende che hanno già avviato i test di consegna in alcune città sono Amazon (negli USA) e Wing (in Australia).

Principali problematiche degli eVTOL

Al fine di dare un quadro completo sullo stato di sviluppo di questa materia, è necessario illustrare le principali problematiche a cui vanno incontro gli eVTOL e le relative soluzioni che si stanno

adottando per contrastarle. I velivoli UAV (*unmanned aerial vehicles*), ad esempio, spesso incontrano delle aree dove non possono volare. Se due di essi volassero troppo vicini ad un aeroporto, infatti, creerebbero un pericolo per gli aerei in fase di atterraggio o decollo. Per contrastare questo problema viene usata una nuova tecnologia detta *geofencing*. Questa utilizza le coordinate GPS o le trasmissioni in frequenze radio, che possono essere usate per definire un perimetro geografico virtuale. Se il velivolo si avvicina troppo all'area confinata, un sistema di controllo lo rileva e fa sì che il velivolo si allontani dal confine. Un altro problema che l'AAM cerca di risolvere è la possibile collisione tra due UAV, quando questi volano lungo dei percorsi che li portano troppo vicini gli uni agli altri. Attraverso un sistema chiamato DAA (*Detect and Avoid*), un velivolo determina automaticamente se c'è un pericolo e corregge la propria rotta per schivare gli altri UAV. Per far ciò viene utilizzato lo stesso sistema di controllo utilizzato per definire il perimetro geografico virtuale. Inoltre, sebbene tutti gli aerei siano condizionati dal meteo, questo ha un impatto maggiore sugli UAV piuttosto che sui velivoli tradizionali e sugli elicotteri. Questo per via del fatto che qualunque modifica indesiderata alla rotta di un UAV costituisce un pericolo, in quanto questi velivoli operano nei pressi di persone, edifici ed altri droni. Il sistema di controllo monitora le condizioni meteorologiche e comanda il decollo o l'atterraggio del velivolo in base ad esse. In presenza di vento, ad esempio, corregge le traiettorie e la velocità.

2.3.2. Le infrastrutture

È importante notare che gli eVTOL, dedicati al trasporto di persone e merci in ambiente urbano, non possono atterrare e decollare ovunque, in quanto interferirebbero con gli altri mezzi di trasporto. Affinché lo scenario di UAM descritto possa effettivamente verificarsi quindi è necessaria l'ideazione e la realizzazione di un'infrastruttura adatta a garantire il decollo, l'atterraggio e lo stazionamento dei velivoli; questa prende il nome di vertiporto, la cui realizzazione dovrebbe avvenire in più parti della città. Secondo la definizione data dalla EASA, un vertiporto è “un'area su terraferma o specchio d'acqua oppure una struttura utilizzata (o destinata a essere utilizzata) per il decollo e l'atterraggio di un aeromobile eVTOL”. Ciò significa che i vertiporti sono aree dedicate che mettono a disposizione l'infrastruttura necessaria per il trasporto aereo commerciale sicuro di passeggeri o merci mediante eVTOL. Al fine di garantire decolli e atterraggi in sicurezza, senza ostacoli, si definisce un'area a imbuto: uno spazio aereo con tale forma sovrastante il vertiporto, denominato “volume scevro da ostacoli”, permette agli eVTOL di effettuare decolli e atterraggi sfruttando un segmento verticale non trascurabile e tenendo conto delle restrizioni ambientali e acustiche degli ambienti urbani. I vertiporti devono essere facilmente accessibili, attraverso buoni servizi di collegamento con strade, stazioni

ferroviarie, autobus, ecc. Possono essere allocati in cima a degli edifici già esistenti oppure in infrastrutture autonome, ideate appositamente per le operazioni di questi velivoli.

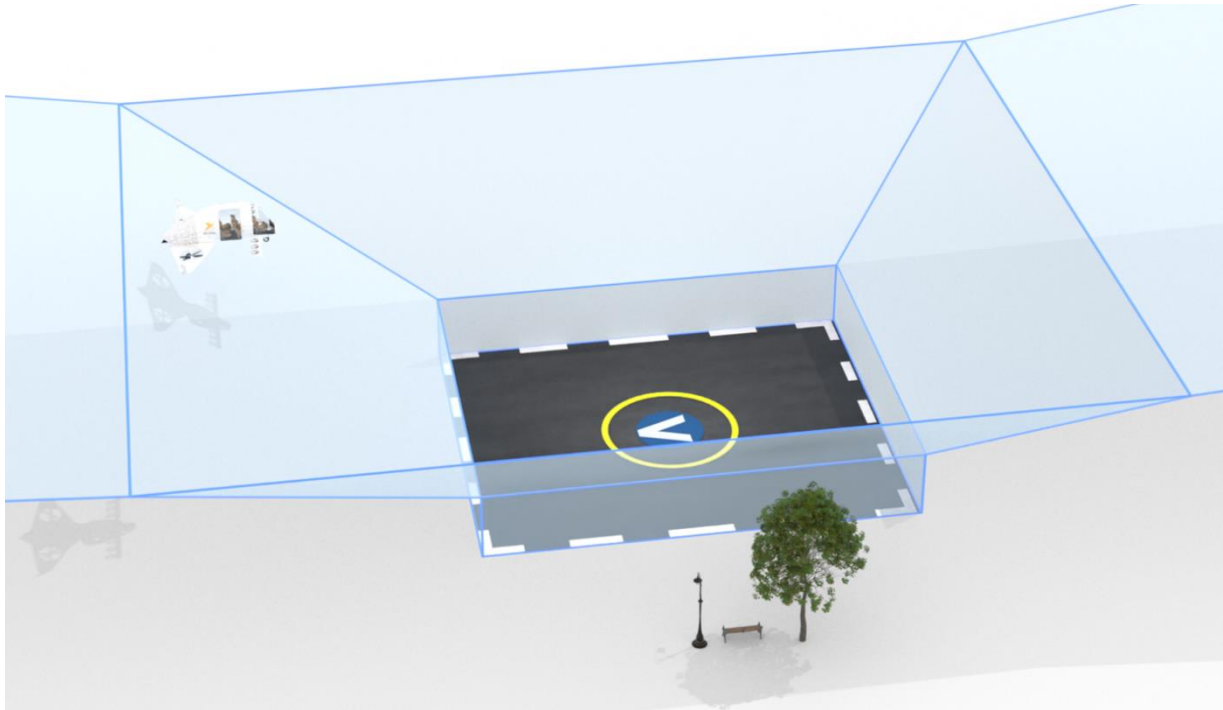


Figura 6: Area a imbuto sovrastante un vertipuerto

La maggior parte dei progetti legati a questi nuovi ambienti, ad oggi, sono ancora in fase di realizzazione o di ideazione, non essendoci delle strutture già operative. I vertipuerto necessitano di meno spazio rispetto agli aeroporti, e tramite gli eVTOL si possono raggiungere zone delle città in precedenza inaccessibili agli elicotteri. Non essendoci delle normative europee o internazionali ufficiali sulla progettazione di questi nuovi spazi, i relativi enti di aviazione, di sicurezza aerea e controllo del traffico aereo hanno emanato delle linee guida per iniziare ad incentivare la progettazione e la realizzazione di queste apposite infrastrutture. Tra queste, le due principali linee guida sulla realizzazione e la gestione dei vertipuerto emanate e riconosciute a livello internazionale sono quelle redatte e pubblicate rispettivamente dalla FAA [15] e dalla EASA [16]. Dal momento che ogni tipologia di velivolo ha le proprie esigenze e deve assolvere i propri compiti, gli eVTOL potrebbero avere la necessità di atterrare in strutture specifiche oppure di ricevere degli appositi servizi; si definiscono pertanto diverse tipologie di vertipuerto.

La variante più complessa è il **vertihub**. Questa è una struttura indipendente, con diverse aree di decollo, di atterraggio e di stazionamento, oltre che infrastrutture di manutenzione e riparazione per eVTOL. Solitamente, essendo di grandi dimensioni, viene collocato nella periferia della città.

La seconda variante è costituita dalla **vertibase**. Questa è la tipologia di infrastruttura che può essere collocata sulle coperture superiori degli edifici già esistenti, abbattendo così i costi di realizzazione, e viene realizzata nel caso in cui non sia presente sufficiente spazio al suolo.

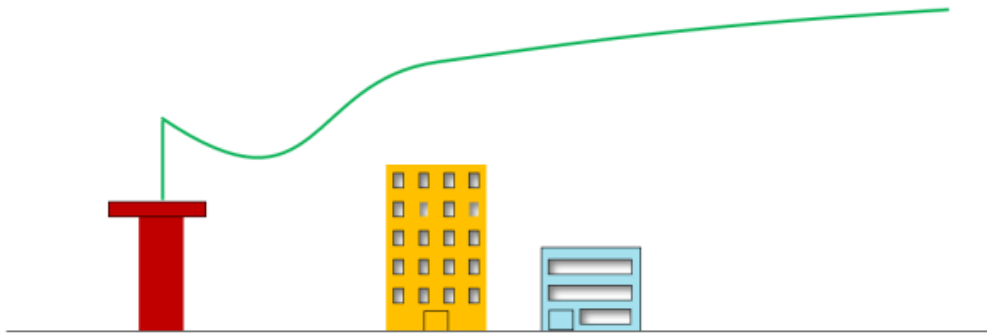


Figura 7: Esempio di vertipuerto sopraelevato (vertibase)

Il **vertistop** invece presenta dimensioni inferiori (una o due piazzole di atterraggio). Viene utilizzato solo per il prelievo e lo sbarco di passeggeri o merci e funge da punto di collegamento tra i vertiporti più grandi. Essendo una struttura di modeste dimensioni è versatile e collocabile in piccole aree, come nelle intersezioni fra strade.

Infine, l'ultima variante è costituita dal **vertipad**; è la più piccola tipologia di infrastruttura e ha delle funzioni limitate; esso offre una singola area di decollo e atterraggio, oltre a uno spazio molto limitato dedicato allo stazionamento del velivolo o alla sua manutenzione. Questo è anche il vertipuerto con i prezzi di realizzazione e manutenzione più bassi.



Figura 8: Esempio di vertipuerto a terra

3. Introduzione al caso di studio

Al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati, relativi alla modellazione di un vertiporto per la simulazione di scenari di *drone delivery*, si è svolto innanzitutto uno studio teorico sullo stato attuale dell'AAM in Italia, facendo anche riferimento alle prime infrastrutture nascenti. Individuati gli enti nazionali predisposti alla materia e presi in esame alcuni progetti nella penisola già ultimati o ancora in fase di realizzazione, si è passati allo studio, nel dettaglio, dell'aeroporto di Bologna; questo costituisce il caso di studio su cui si è scelto di lavorare, dovendo posizionare il vertiporto ideato al suo interno. Si sono successivamente esaminate le zone disponibili e maggiormente affini al traffico cargo dell'aeroporto. Una volta individuata l'area definitiva si è passati allo studio delle normative, alla formulazione delle ipotesi da prendere in considerazione per la realizzazione del vertiporto e al dimensionamento di questo, adattandolo alla posizione scelta, al suo orientamento e alla vicinanza con strade, edifici e traffico aereo. Infine, si è fatto uno studio sulle ipotetiche destinazioni da raggiungere e sui benefici che un vertiporto all'interno di un aeroporto potrebbe garantire.

3.1. La mobilità aerea avanzata in Italia

L'attuale sviluppo riguardante le strutture, i mezzi e l'organizzazione di tutto ciò che orbita attorno alla mobilità aerea avanzata è in corso anche in Italia. Tra le società che contribuiscono maggiormente alla crescita dell'AAM c'è D-Flight [17], società del gruppo ENAV (Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo) la quale costituisce la piattaforma che offre i servizi per la gestione del traffico droni; questa sta allineando i propri strumenti alla definizione dello *U-Space* e supporta ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) nell'implementazione della legge europea; persegue lo sviluppo e l'erogazione di servizi per la gestione del traffico aereo a bassa quota, di aeromobili a pilotaggio remoto e di tutte le altre tipologie di aeromobili che rientrano nella categoria UAV. La società ha un partner industriale costituito da Leonardo S.p.A. e Telespazio S.p.A. Lo scopo di D-flight è quello di contribuire a creare un ambiente in cui i droni siano oggetti comuni e pienamente accettati nella vita quotidiana di tutti i cittadini, anche negli affollati ambienti urbani; i velivoli devono essere utilizzati in sicurezza e garantire servizi in maniera efficiente, innovativa, economica e sostenibile. Sempre per incentivare lo sviluppo della UAM, nel 2019 il Ministro per l'innovazione tecnologica e la digitalizzazione e il Presidente dell'ENAC hanno sottoscritto un Protocollo d'Intesa per l'avvio del progetto nazionale di *Urban Air Mobility* "Innovazione e Mobilità", in coerenza con la strategia dell'Unione Europea sancita dalla "Dichiarazione di Amsterdam" e in continuità, a livello nazionale, con quella del Governo in materia di sviluppo tecnologico, digitale e sostenibilità ambientale [18]. Inoltre, l'ENAC ha introdotto un nuovo Piano

nazionale degli aeroporti [19], il quale traccia il futuro della mobilità aerea in Italia fino al 2035. Nel documento è descritta la mappa dei vertiporti da cui potranno decollare e atterrare i futuri taxi volanti. Il primo in Italia è stato inaugurato alla fine del 2022 presso l'aeroporto "Leonardo da Vinci" di Roma-Fiumicino, ma altri ne sorgeranno lungo tutta la penisola. Parte del documento cita: "per l'integrazione della mobilità aerea in ambito nazionale, è prevista a breve e medio termine la realizzazione di almeno sette vertiporti urbani e tre vertiporti in aree aeroportuali, localizzati nelle città italiane e nei relativi scali ritenuti maggiormente strategici per lo sviluppo dell'AAM, ovvero: Milano (due vertiporti urbani-vertihub ed uno aeroportuale-vertihub), Roma (due vertiporti urbani-vertipads ed uno aeroportuale-vertihub), Torino, Venezia (vertiporto in ambito aeroportuale-vertihub), Bari e Cortina (vertipads). La scelta, confermata dallo studio EASA, ha l'obiettivo di effettuare le prime dimostrazioni di mezzi e infrastrutture pronte all'utilizzo per la AAM in occasione degli eventi attrattivi che il nostro paese ospiterà nei prossimi anni, quali il Giubileo Religioso nel 2025 e le Olimpiadi invernali di Milano-Cortina nel 2026". Per sottolineare l'importanza del nostro Paese per quanto riguarda lo sviluppo delle infrastrutture, quello inaugurato nell'ottobre del 2022 in prossimità dell'aeroporto di Roma-Fiumicino è il primo vertiporto di test in Europa: realizzato dall'azienda UrbanV, il Vertiporto di Test UV-0 è un polo di innovazione con l'obiettivo di supportare i partner industriali nel migliorare le proprie soluzioni, garantire la conformità con le future normative e di collaudare processi, tecnologie e scenari per facilitare lo sviluppo rapido della mobilità aerea avanzata sia per operazioni di aereotaxi che di trasporto merci. È strategicamente posizionato vicino alla rotta che collega il terminal passeggeri dell'aeroporto al centro città di Roma.



Figura 9: Vertiporto di test UV-0 nei pressi dell'aeroporto di Roma-Fiumicino

3.2. L'aeroporto di Bologna

In coerenza con il Piano Strategico Nazionale “*Advanced Air Mobility - AAM (2021-2030)*” predisposto da ENAC, è lecito nominare un caso di studio già avviato e molto interessante relativo alla costruzione di un vertiporto all'interno dell'aeroporto Guglielmo Marconi di Bologna (denominato LIPE nel codice aeroportuale ICAO). In particolare, è stata incaricata la società UrbanV, la stessa che ha realizzato il primo vertiporto di test a Roma-Fiumicino, di dare il via ad uno studio di fattibilità per lo sviluppo di una nuova rete di collegamenti tramite eVTOL, soluzione che permetterà di raggiungere in maniera rapida, sicura e sostenibile i principali punti di interesse della città e del territorio regionale, in un raggio di circa 100-120 km. Tra i progetti della società, oltre a quelli di Roma, Venezia e della Costa Azzurra, c'è anche quello relativo alla città di Bologna per via dei suoi flussi turistici in crescita, delle numerose fiere aziendali che si tengono annualmente nella regione e per la vicinanza di grandi cluster industriali, come la Motor Valley [20]. Lo studio di UrbanV comprenderà il design dei vertiporti da realizzare, la gestione delle operazioni a terra ed in volo, la definizione di un business plan, l'analisi delle possibili rotte, le infrastrutture elettriche necessarie per la ricarica dei velivoli, le attività cargo e ogni altro possibile caso d'utilizzo.

L'Aeroporto di Bologna, infatti, è uno dei principali aeroporti in Italia, in costante crescita grazie alla sua posizione geografica strategica. È dotato di una pista di 2803 m, completamente rinnovata nel settembre 2020, la cui larghezza è di 45 m e con orientamento 12/30. Per ciò che riguarda l'infrastruttura, l'aeroporto ha tra gli obiettivi strategici dei prossimi anni un importante piano di sviluppo relativo soprattutto all'espansione del Terminal passeggeri. Dopo un drastico calo dei volumi di traffico nel 2020 in seguito alla pandemia di Covid-19, il 2022 ha segnato una progressiva ripresa, fino al raggiungimento dei numeri dell'anno pre-Covid. Nel 2022 sono state raggiungibili direttamente da Bologna 127 destinazioni, in aumento rispetto al 2019 di 7 unità e di 14 rispetto al 2021. Lo scalo di Bologna si è confermato anche nel 2022 il terzo aeroporto italiano nel settore cargo. Questa tipologia di traffico aereo ha presentato un incremento complessivo del 13%, superiore rispetto alla crescita media italiana del 2022 (pari al circa il 2%). In linea con la tendenza generale del momento a privilegiare gli spostamenti all'interno dei confini nazionali, nella classifica delle destinazioni con più collegamenti da e per Bologna nel 2021 ci sono tre aeroporti italiani ai primi tre posti: Catania, Palermo e Bari; seguono Brindisi, Barcellona, Tirana, Madrid, Parigi Charles de Gaulle, Amsterdam e Olbia [21].



Figura 10: L'aeroporto G. Marconi visto dall'alto

3.2.1. Motivazioni di un vertiporto all'interno dell'aeroporto

Il traffico aereo che coinvolge la città di Bologna, in ripresa dopo l'emergenza pandemica, è destinato a crescere ulteriormente; per tale motivo potrà risultare ancora più necessaria l'introduzione di uno scenario di *U-Space* urbano, in modo da garantire un numero e una qualità superiore di servizi riservati al trasporto di passeggeri o merci. In particolare, dovendo svolgere un'analisi specifica sulle infrastrutture dedicate a velivoli cargo per il trasporto merci, è importante delineare gli aspetti più importanti riguardo alla logistica e allo stoccaggio della merce e la centralità dell'aeroporto in questo studio. Un vertiporto, nella collocazione data, ha lo scopo principale di collegare l'aeroporto di Bologna alla città; in particolare, il Marconi trasporta ogni giorno circa 150 tonnellate di merci, la quale viene riunita e smistata all'interno dei magazzini di stoccaggio delle varie aziende presenti nel settore merci, posizionato principalmente nella parte occidentale dell'aeroporto. Questo giustificherebbe e renderebbe fondamentale la presenza di un'infrastruttura in grado di collegare l'aeroporto con la città e rendere possibile la consegna di questa merce in altre aree di raccolta, adibite allo smistamento e alla relativa consegna. Affinché questo possa svilupparsi, sarà necessario realizzare correttamente le postazioni di decollo e atterraggio e definire le traiettorie di volo in modo da non interferire con gli edifici presenti nei dintorni; bisognerà inoltre ottimizzare le operazioni, evitando il rischio di collisione tra UAV e di interferenza al parallelo traffico aereo. Si potrebbe pensare inoltre di realizzare dei vertiporti, utili per il trasporto di persone e merci, nei pressi delle principali attrazioni della città o nei posti di maggior interesse turistico, economico o culturale. Alcuni di essi, pertanto, potrebbero nascere nei pressi di piazza Maggiore, dei Giardini Margherita o dello stadio Dall'Ara, oltre al vertiporto principale all'interno dell'aeroporto. Lo scenario riguardante i

velivoli UAV per il trasporto merci, attraverso la consegna a domicilio o in appositi punti di raccolta, può avere invece uno sviluppo più ramificato e complesso. In tal senso, è importante rilevare l'attuale e futuro sviluppo dell'aeroporto di Bologna, in termini di traffico aereo e di adeguamento logistico e organizzativo. A tal proposito va dedicata particolare attenzione al programma di ampliamento di tutta la regione dell'aeroporto riservata alle strutture, alle utenze e ai velivoli relativi al trasporto di merci: la zona cargo, situata a ovest dell'aeroporto. Gli obiettivi di tali lavori di ampliamento sono: aumentare le aree adibite allo stoccaggio delle merci in import ed export (unificando i relativi magazzini), ottimizzare gli spazi interni, migliorare la distribuzione dei flussi e aumentare gli standard di sicurezza. Parte dei lavori, in particolare quelli relativi alla zona di stazionamento per velivoli cargo e di aviazione generale, sono stati ultimati nella seconda metà del 2023; altri lavori invece sono ancora in fase di realizzazione.

3.3. Individuazione delle aree disponibili alla collocazione del vertiporto all'interno dell'aeroporto

Il primo aspetto che è stato considerato nello sviluppo del caso di studio è stato proprio quello di immaginarne il posizionamento adatto; la nuova infrastruttura è stata pensata e progettata per accogliere velivoli cargo di diverse dimensioni. È necessaria, pertanto, la ricerca di una postazione ottimale, così da garantire il massimo rendimento in termini di gestione, revisione, controllo, manutenzione e trasporto delle merci (*payload*), ma anche dei velivoli stessi. Inizialmente si è pensato di collocare il vertiporto dove sono stati completati i primi lavori di ampliamento della zona cargo, in prossimità delle strutture di DHL Express, ovvero di fianco all'Apron 4 (si veda l'area delimitata da un cerchio giallo nella Figura 12); in alternativa si può pensare di posizionarlo su qualche superficie non asfaltata fuori dal sedime dell'aeroporto; si potrebbe sfruttare un qualunque suolo erboso attualmente non utilizzato. Un'ottima postazione dove collocarlo è accanto al terminal di aviazione generale, in prossimità di un parcheggio non più utilizzato. Sfruttando questo spazio si è sufficientemente lontani dai luoghi maggiormente trafficati dell'aeroporto, dove c'è un elevato rischio di interferenze con il traffico aereo, così da non disturbare alcun movimento degli aerei in partenza, in atterraggio o in fase di rullaggio; in questa zona, inoltre, si è lontani dalle aree con la maggiore concentrazione di persone in quanto si è distanti dal Terminal passeggeri e dalle strutture maggiormente frequentate. L'unica eccezione è costituita dal Terminal di Aviazione Generale, il quale è esattamente adiacente alla zona scelta; questo, tuttavia, viene frequentato quotidianamente da un numero estremamente ridotto di persone. Trovandoci poi in un'area periferica e nella zona cargo

dell'aeroporto, si è collegati molto bene con l'esterno. La stessa area è delimitata su un lato da "via della Salute".

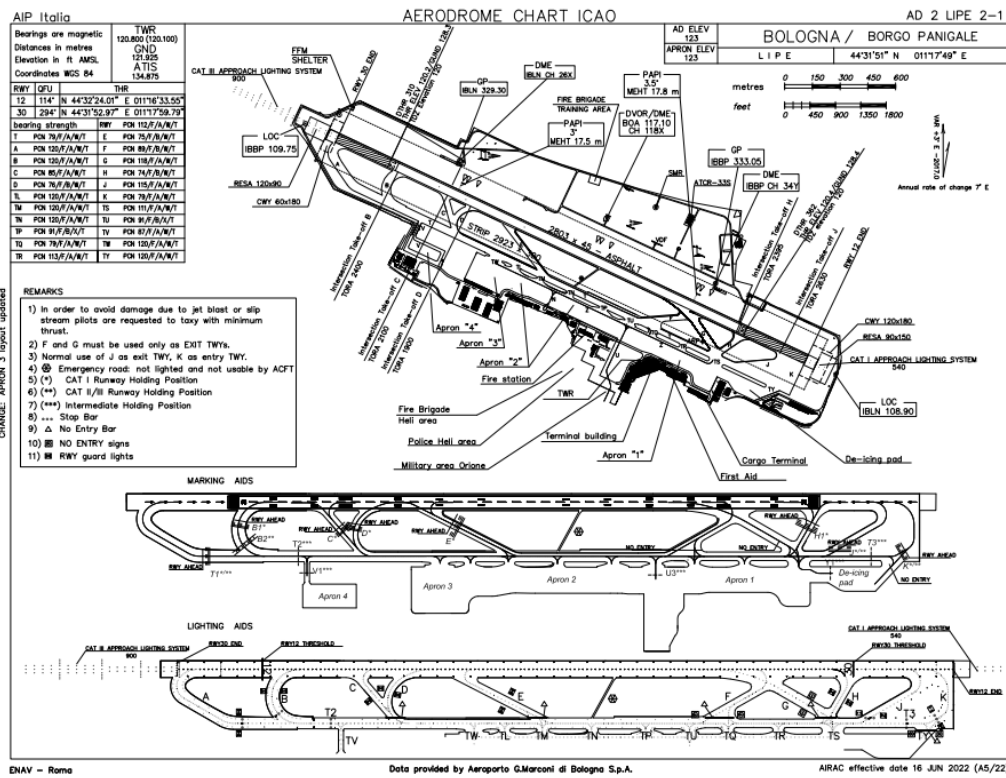


Figura 11: Carta ICAO dell'aerodromo di Bologna

Di seguito vengono riportate alcune immagini dell'ipotetico luogo dove si è pensato di posizionare il vertiporto, una volta realizzato. Si è evidenziata in rosso la zona relativa al parcheggio dismesso, nell'area ovest dell'aeroporto. Si vede come questa sia una postazione periferica e ben collegata con il resto della città.

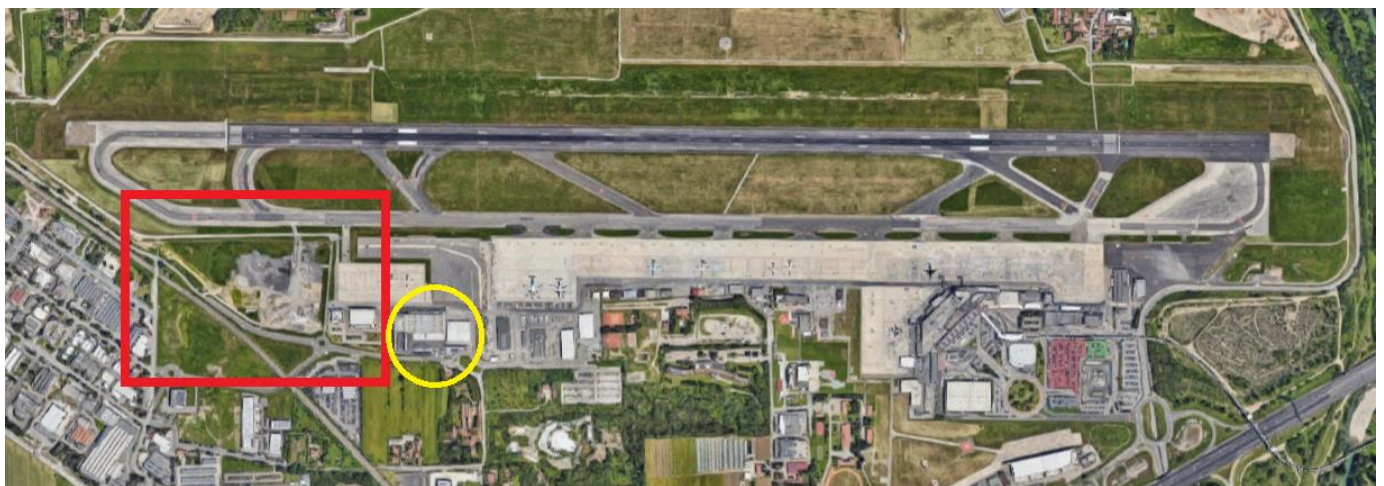


Figura 12: L'aeroporto di Bologna visto dall'alto con evidenziate l'area del parcheggio dismesso e la zona cargo DHL

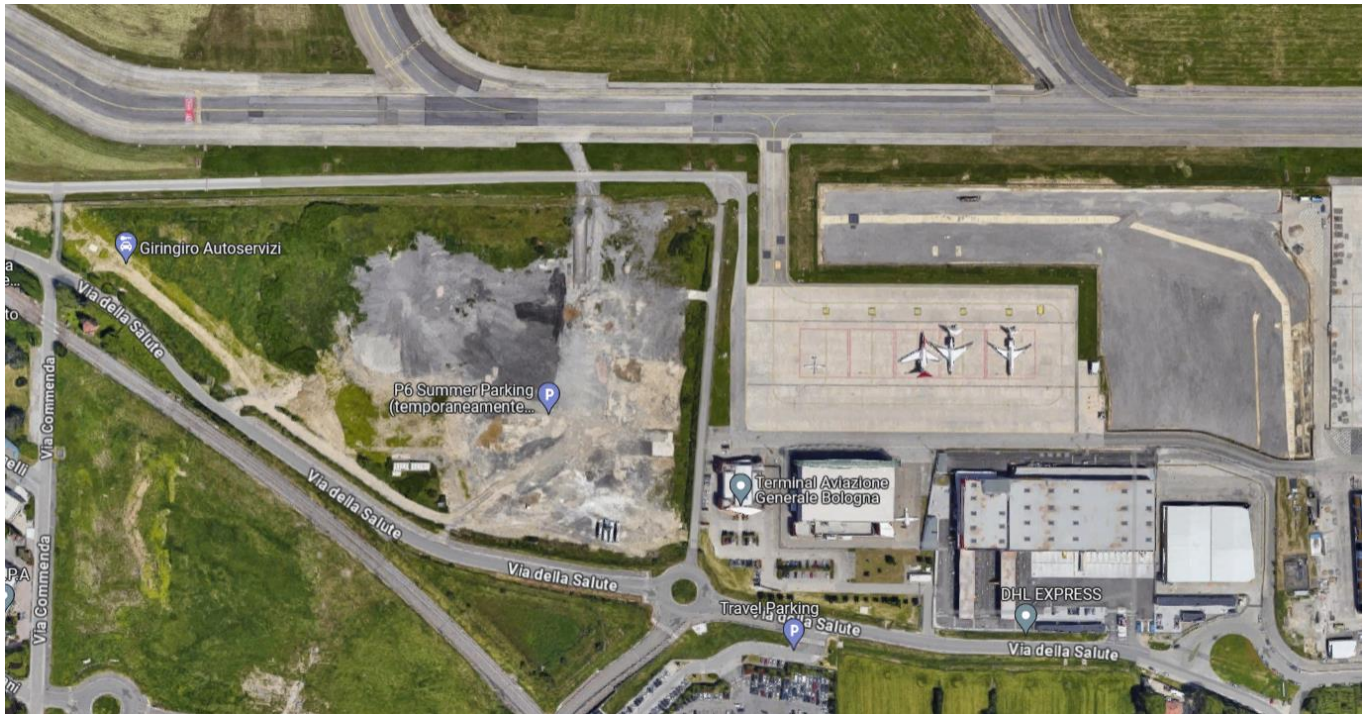


Figura 13: Vista dall'alto della zona cargo ovest e parcheggio dismesso

Viene riportata infine una vista del parcheggio dalla strada perimetrale (“via della Salute”). Tale immagine dà un’idea delle potenzialità di un’area non sfruttata, così grande, all’interno del sedime aeroportuale.



Figura 14: Parcheggio non più utilizzato, visto da “via della Salute”

3.4. Normative e linee guida sulla progettazione di vertiporti

Una volta definito il posizionamento ottimale del vertiporto all'interno del Marconi, si è passati alla fase di progettazione, ancor prima di quella relativa alla modellazione. Per la realizzazione del vertiporto, infatti, è stato necessario ricercare informazioni sulle strutture già esistenti nel mondo, da prendere come riferimento. Tuttavia, non essendoci delle strutture già operative, la ricerca è stata inizialmente incentrata sugli eliporti, le loro strutture e i servizi offerti, immaginando uno scenario simile anche per i futuri vertiporti. Gran parte del lavoro si è poi basato sulla lettura e sullo studio delle due linee guida più diffuse sulla realizzazione dei vertiporti emanate e riconosciute a livello internazionale, pubblicate rispettivamente da FAA [15] per gli Stati Uniti ed EASA [16] per l'Unione Europea. Si è deciso di basare il lavoro di progettazione del vertiporto principalmente sulle regole dettate da quest'ultima (in quanto organo di controllo del settore aeronautico dell'Unione Europea, e quindi dell'Italia), integrando queste, in alcune parti, con le direttive della FAA. L'obiettivo è stato quello di ricercare informazioni, nello specifico, riguardo a vertiporti in grado di garantire il decollo e l'atterraggio a velivoli ad ala fissa o rotante utilizzati per il *delivery*, piuttosto che per trasporto umano; particolare attenzione è stata rivolta ai mezzi a scopo medico, in grado di trasportare organi in modo veloce e sicuro. Non si è presentata, in ogni caso, la necessità di strutture di servizio particolari, né di appositi percorsi a terra.

Di seguito si riportano le indicazioni più importanti sulle norme di realizzazione dei vertiporti, prese dalle due linee guida descritte.

Le principali sezioni che costituiscono un vertiporto sono:

- TLOF (Touchdown and Lift-Off Area)
- FATO (Final Approach and Takeoff Area)
- Safety Area
- Taxiway
- Stand

Ogni vertiporto si basa, nella sua progettazione, sulla dimensione D di un velivolo VTOL presa come riferimento: la dimensione di controllo. D è il diametro della più piccola circonferenza circoscritta alla proiezione del velivolo su un piano orizzontale.

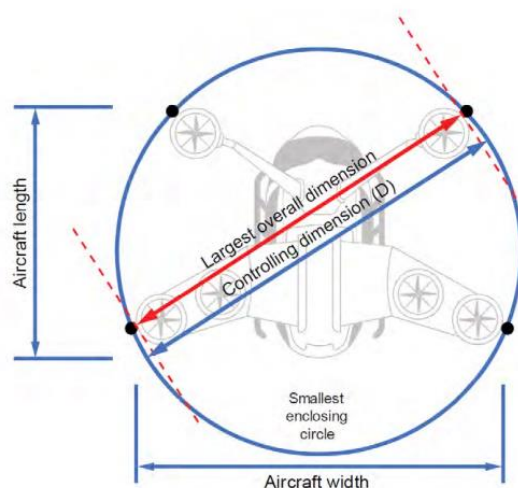


Figura 15: Dimensione di controllo D [16]

Di seguito si descrivono le principali sezioni che compongono un vertiporto.

La **TLOF** è un'area pavimentata, centrata nella FATO, su cui i velivoli VTOL compiono un decollo o un atterraggio. Un vertiporto deve essere provvisto di almeno una TLOF. Essa deve fornire un'area priva di ostacoli e avere dimensioni e forma sufficientemente grandi da essere in grado di contenere i carrelli di atterraggio dei velivoli VTOL più ingombranti tra quelli che la TLOF prevede di servire. Essa deve essere associata con una FATO e deve avere una larghezza e una lunghezza minime di $1D$. Per le TLOF circolari il diametro minimo è ugualmente di $1D$. Circolari, quadrate o rettangolari, le TLOF devono avere la stessa forma geometrica di FATO e Safety Area.

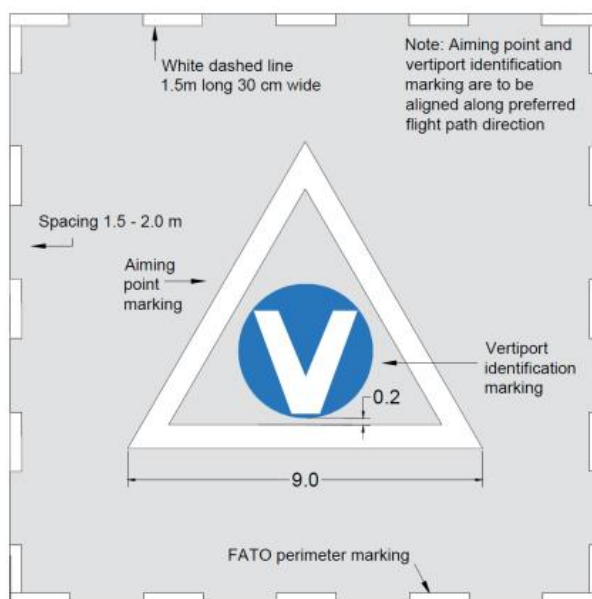


Figura 16: Indicatore vertiporto, punto di mira e indicatore perimetro FATO [16]

La **FATO** è una specifica area sopra la quale i velivoli VTOL completano la fase finale di un hovering o di un atterraggio e da cui il velivolo intraprende il decollo. È un'area priva di ostacoli con dimensioni e forma sufficientemente grandi da essere in grado di contenere ogni singola parte del velivolo VTOL nella fase finale di atterraggio o in quella iniziale di decollo. Essa deve essere associata a una Safety Area e centrata all'interno di essa. La larghezza e la lunghezza minime di una FATO, secondo le linee guida EASA, deve essere pari al valore più grande tra $1.5 D$ e la lunghezza di “*rejected take-off*” dovuta alle procedure descritte nei manuali di volo dei velivoli; avendo predisposto la gestione di diverse tipologie di eVTOL all'interno del vertiporto, si è preso come riferimento una grandezza maggiore, pari a $2D$, e corrispondente a quella definita dalle linee guida FAA.

La **SAFETY AREA** è una specifica area, circondante la FATO, intesa a ridurre il rischio di danni ai VTOL che deviano involontariamente dalla FATO. Essa serve a compensare gli eventuali errori in manovra dei velivoli in presenza di avverse condizioni ambientali. Deve essere una superficie adiacente alla FATO, resistente agli effetti di downwash e garantire un corretto drenaggio. Le dimensioni minime della SA, secondo EASA, devono essere progettate in modo da estendersi di almeno $0.25 D$ dal bordo della FATO.

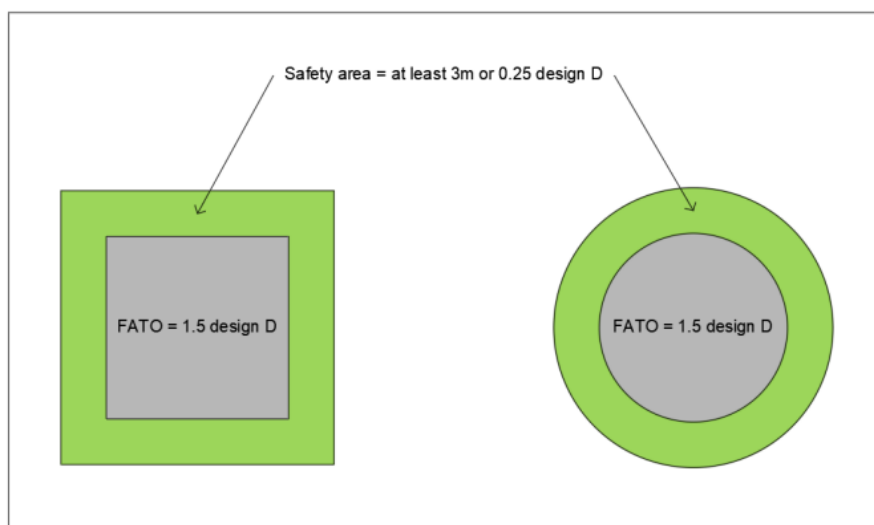


Figura 17: FATO e Safety Area associata secondo le linee guida EASA [16]

Una **TAXIWAY** (pista di rullaggio) per velivoli VTOL viene progettata per permettere il movimento superficiale di questi, che avviene in maniera autonoma oppure mediante apposite attrezzature per il movimento a terra. Essa deve essere progettata in modo da fornire un'area in grado di contenere i mezzi necessari alla movimentazione o i carrelli di atterraggio dei velivoli VTOL più esigenti tra quelli che la TLOF prevede di servire. Una taxiway deve essere associata a un percorso di rullaggio

(taxi-route). La larghezza minima di una taxiway per VTOL è pari a due volte la larghezza del carrello di atterraggio del velivolo più grande che si è in grado di servire. La distanza minima, invece, tra due taxiway adiacenti deve essere così dimensionata: la separazione tra due linee di mezzeria parallele deve essere 1.25 volte la massima larghezza del velivolo più grande considerato. La taxi-route a terra invece deve avere una larghezza minima pari a 1.5 volte la larghezza dell'eVTOL più grande.

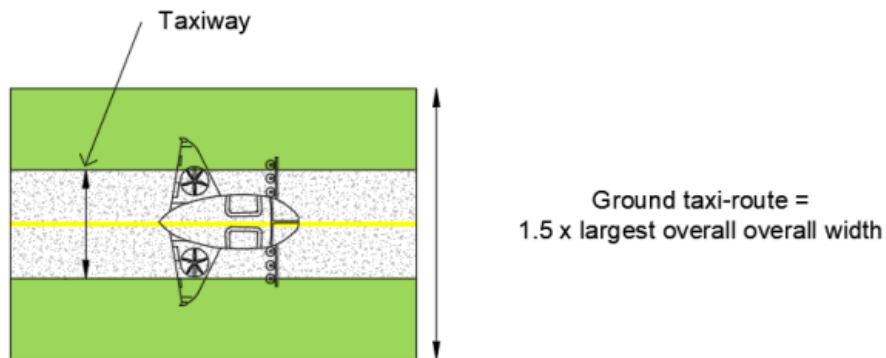


Figura 18: Taxiway/Ground taxi-route per un velivolo eVTOL secondo le linee guida EASA

Quando forniti, gli **STAND** e le aree di stazionamento devono permettere l'imbarco e lo sbarco in sicurezza di persone e/o merci, oltre alle operazioni di manutenzione dei velivoli senza interferire con il traffico aereo. Questi devono essere caratterizzati da un'area priva di ostacoli, con dimensioni e forma sufficientemente grandi da essere in grado di contenere ogni singola parte del velivolo VTOL più grande che si è progettato di ospitare, quando questo è parcheggiato all'interno dello stand di stazionamento. La sua dimensione minima deve essere pari a 1.2 D. È necessario fornire, inoltre, anche un'area di protezione che circondi lo stand.

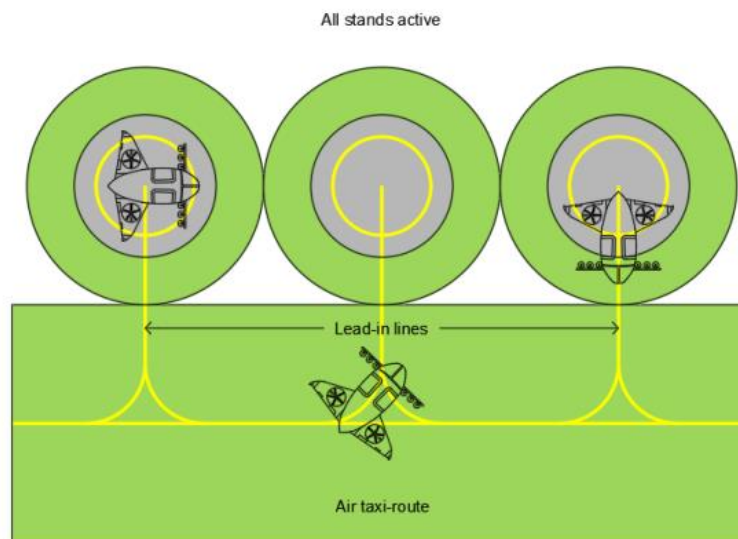


Figura 19: Stand per velivoli eVTOL, con percorsi di svolta, ad uso simultaneo

3.4.1. Inserimento di traiettorie secondo le linee guida

Esaminata la sezione delle linee guida utili a pianificare la progettazione di un vertiporto, è necessario affrontare in seguito la parte relativa all'inserimento di traiettorie all'interno dello scenario. La fase di traiettoria verticale di un velivolo VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*) può essere limitata, per definizione, alle sole fasi di decollo e atterraggio mentre il resto della traiettoria di volo può svilupparsi, dovendo rimanere a bassa quota, lungo una direzione orizzontale. Le traiettorie di volo di UAM, effettuate da questi velivoli, devono tener conto della presenza di ostacoli, delle traiettorie di altri eVTOL o di aeromobili, dell'orientamento secondo il quale è disposto il vertiporto e della presenza di edifici nelle vicinanze. È possibile definire tre diversi profili di decollo. Nella Figura 7 è possibile visionare la prima tipologia di decollo, ovvero quello da un punto elevato. Il VTOL decolla da un punto sopraelevato di una città (ad esempio il tetto di un edificio alto), cosa che consente anche un possibile abbassamento della traiettoria, utile in caso di determinati guasti.

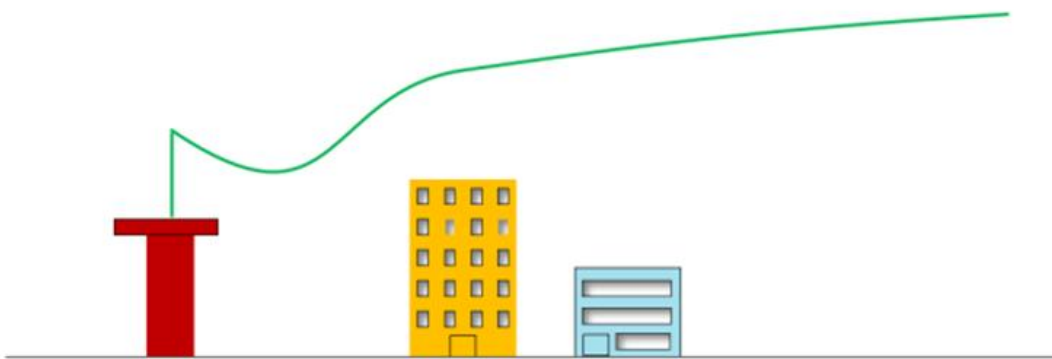


Figura 20: Manovra di decollo da un punto sopraelevato

La seconda variante di decollo, illustrata in Figura 8, costituisce il decollo standard. In questo caso il VTOL decolla in una zona senza ostacoli nelle vicinanze. Il vertiporto potrebbe anche avere una piccola pista atta a consentire un iniziale rullaggio. Anche qui, in caso di guasti al velivolo in seguito al decollo, è possibile l'abbassamento della traiettoria in sicurezza, data l'assenza di edifici nei paraggi.



Figura 21: Manovra di decollo standard da vertiporto a terra

Infine, c'è il decollo verticale, specifico per la presenza di un ambiente denso di ostacoli, in cui una gran parte della traiettoria del VTOL è verticale. Anche in queste circostanze alcuni guasti sono gestibili.

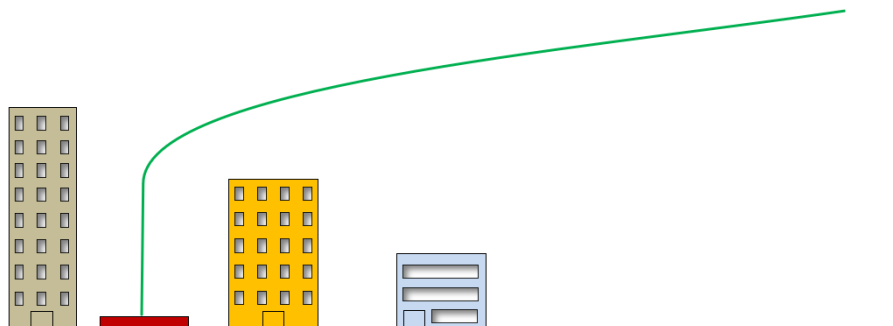


Figura 22: Manovra di decollo verticale

Gli aeromobili VTOL possono essere certificati attraverso due categorie, di base o avanzata. Queste sono stabilite in base alle caratteristiche dei velivoli (come affidabilità, ridondanza e sicurezza) che determinano il modo in cui evitano i possibili malfunzionamenti. I più alti requisiti di sicurezza sono stati fissati per la categoria avanzata (*enhanced*), che è obbligatoria per i voli negli affollati cieli urbani o per il trasporto aereo commerciale di passeggeri (aerotaxi). La categoria di base (*basic*) è caratterizzata invece da requisiti di sicurezza meno stringenti. Può applicarsi al trasporto aereo non commerciale di passeggeri al di fuori di aree congestionate, per esempio in zone rurali. In caso di eventi come un guasto del motore il velivolo si comporta in maniera diversa a seconda della categoria a cui è stato associato.

Per la categoria avanzata, i VTOL che percorrono cieli urbani in aree congestionate come le città devono essere in grado di eseguire un volo e un atterraggio sicuri continuati (ossia in condizioni di sicurezza ininterrotta), anche in caso di malfunzionamento, in quanto un atterraggio immediato potrebbe non essere possibile in città, se non in un vertiporto.

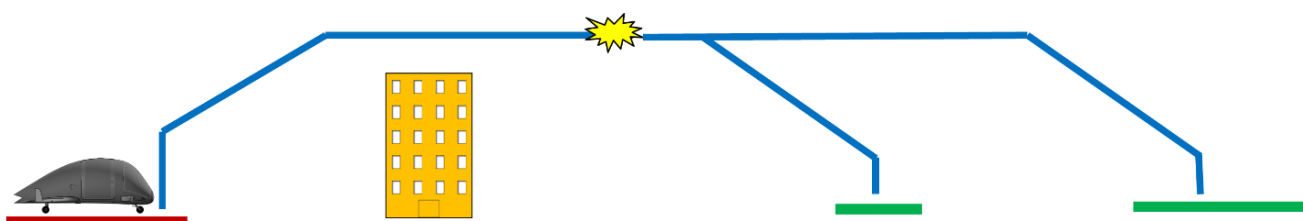


Figura 23: Atterraggio in sicurezza grazie a VTOL di categoria avanzata

Per quanto riguarda la categoria di base, invece, i VTOL che volano in aree non congestionate hanno più opzioni per eseguire un atterraggio di emergenza controllato. Tale atterraggio può avvenire al di fuori di un vertiporto ma deve essere controllato, come è il caso degli elicotteri o degli aeroplani in perdita di potenza.



Figura 24: Atterraggio in sicurezza grazie a VTOL di categoria di base

3.4.2. Ipotesi su dimensioni, tipologia di velivoli e materiali

L'infrastruttura a cui si è pensato in questo lavoro deve essere in grado di gestire (cioè, di far decollare, atterrare e sostare) mezzi cargo di grandi e piccole dimensioni. Il velivolo più grande che si è pensato di riuscire a gestire è il VoloDrone, dell'azienda Volocopter; si è preso questo modello come riferimento massimo in dimensioni. Tale scelta permette di definire un limite, decisamente elevato, alle dimensioni dei velivoli da accogliere nel vertiporto. Oltre che per mezzo dei velivoli cargo più grandi, è possibile atterrare nella nuova infrastruttura, da inserire all'interno dell'aeroporto di Bologna, anche con velivoli di dimensioni ridotte, grazie a degli stand più piccoli e a taxiway adeguate. La caratteristica più importante del velivolo, utile per il dimensionamento del vertiporto, è il diametro: $D=9,2$ m. Questa misura, in entrambe le linee guida di riferimento presentate in precedenza (EASA ed FAA), è quella da utilizzare per definire le dimensioni delle varie parti del vertiporto. Nel caso del VoloDrone tale riferimento D coincide semplicemente con il diametro del velivolo, visto dall'alto. Si sono quindi ottenute le seguenti misure per le varie componenti del vertiporto:

- TLOF: 9.2 m (D)
- FATO: 18.4 m ($2D$)
- SAFETY AREA: 27.6 m ($3D$)

Lo stesso riferimento va poi anche utilizzato per determinare la larghezza della taxiway e relativa ground taxi-route, oltre che degli stand di stazionamento.

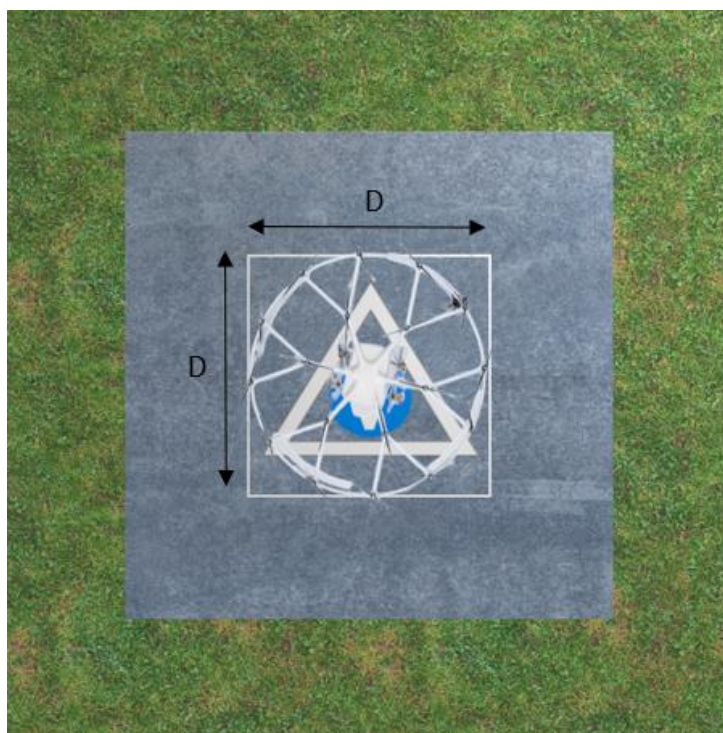


Figura 25: Confronto TLOF-VoloDrone

Dal momento che le linee guida EASA non delineano in maniera esaustiva i materiali da utilizzare per la realizzazione delle diverse sezioni del vertiporto, si è pensato di seguire le norme dettate dalla FAA e di adottarle per la progettazione del vertiporto. Per modellare TLOF, FATO e stand si è scelto quindi come materiale il calcestruzzo. Una superficie in asfalto non è consigliata in quanto sensibile alle alte temperature; infatti, questa potrebbe cedere sotto il peso di un velivolo pesante parcheggiato, creando detriti. Per quanto riguarda le taxiway invece, seguendo sempre le regole FAA, si è utilizzato l'asfalto.

3.5. Individuazione di possibili destinazioni

Nella analisi preliminare svolta sulle possibili mete di questi velivoli all'interno dello scenario ipotizzato, si prende sempre il VoloDrone come riferimento; questo può avere una autonomia chilometrica fino a 40 km. Dal momento che è in grado di trasportare un carico utile fino a 200 kg, non è difficile immaginare la quantità di merce che questo velivolo può consegnare all'interno di un simile raggio di azione. In particolare, per quello che è lo scopo di un vertiporto all'interno dell'aeroporto di Bologna, questi velivoli più grandi potranno essere pensati come il mezzo di trasporto più rapido, sicuro e sostenibile per trasportare un grosso carico di merci all'interno della città; questi potrebbero sostituire i furgoni, più inquinanti, dedicati al trasporto dei prodotti, da consegnare successivamente attraverso il servizio porta a porta nei centri di raccolta. In seguito, il percorso logistico ottimale coinvolgerebbe i velivoli eVTOL più piccoli, i quali preleverebbero i

singoli pacchi dal centro di raccolta e li consegnerebbero nelle rispettive destinazioni. Tali operazioni costituiscono un percorso green, rapido ed efficiente. Il VoloDrone nasce dall'esigenza di creare un velivolo elettrico in grado di trasportare grandi quantità di merci, oltre che dall'esigenza di farne ampio uso in agricoltura; per tali motivazioni, e considerata la sua autonomia, è possibile immaginare delle prime semplici rotte in cui il mezzo, in seguito al decollo dall'aeroporto, percorra un tratto rettilineo fino alla sua destinazione, consegua il suo obiettivo e poi torni nell'aeroporto; oppure, seguendo il percorso inverso, si può pensare a un tragitto in cui il VoloDrone, partendo dall'aeroporto, faccia rifornimento con un grande carico in uno dei paesaggi rurali o di campagna nei pressi della periferia bolognese e poi torni nel vertiporto, dove il materiale verrà consegnato, stoccato e raccolto. È possibile immaginare una qualunque missione da compiere, con un raggio d'azione non piccolo seppur ristretto. Tra gli altri, è possibile immaginare per esso scopi medici come il trasporto d'emergenza di organi o sangue, oppure missioni di salvataggio, di prevenzione e interventi relativi agli incendi, oltre che a diversi altri scopi. La distanza raggiungibile dal drone varia in base alla tipologia di missione da conseguire: nel caso in cui il velivolo debba solamente trasportare e consegnare un payload è possibile spingersi a destinazioni distanti fino a 17 o 18 km (non si andrebbe oltre per lasciare un certo margine di sicurezza). In questo caso, una missione cargo di semplice consegna della merce, seguendo una rotta rettilinea, potrebbe avere come destinazione uno dei borghi appartenenti all'area periferica di Bologna come Castel Maggiore, Castelfranco Emilia, San Giovanni in Persiceto, così come i diversi Parchi regionali, le riserve naturali o i terreni attraversati dal Reno. Immaginando invece di posizionare un altro vertihub, oppure un più semplice vertistop o vertipad, ad Imola, il VoloDrone potrebbe avere l'autonomia necessaria per arrivarci e consegnare il payload, oppure per caricare le batterie e raggiungere altre destinazioni, altrimenti inaccessibili. Lo stesso può essere pensato in direzione ovest, verso Modena o Sassuolo. Una configurazione standard del VoloDrone, che non sarà comunque oggetto di studio in quanto si è interessati solo ai suoi scopi di trasporto e delivery anziché a quello di assolvere scopi agricoli, prevede il fissaggio di due serbatoi, una pompa ed uno spruzzatore, così da garantire la irrorazione dei campi. Il velivolo, tuttavia, permette di agganciare diversi tipi di carico, in base alle esigenze del lavoro da svolgere.



Figura 26: Configurazione delivery del velivolo VoloDrone

Così come per il VoloDrone, è possibile immaginare specifiche rotte e destinazioni per qualunque velivolo di dimensioni inferiori (e quindi per la maggior parte degli UAV) a cui pertanto è consentito atterrare e decollare dal vertiporto pensato. In particolare, si prendono in considerazione quei velivoli estremamente piccoli il cui unico scopo è quello di consegnare un oggetto o un pacco in punti specifici della città che il drone è in grado di individuare; in seguito, questo dovrà essere in grado di raggiungerlo, consegnare la merce e tornare nel punto di partenza. Affinché ciò sia possibile è necessario introdurre un sistema di delivery in grado di non interferire con il traffico urbano, aereo e pedonale. Si prende come riferimento il velivolo cargo a pilotaggio remoto sviluppato da Amazon, l'MK30. Questo è tra le prime aziende ad avere già un sistema di consegna a domicilio attraverso droni, in cui sperimenta questa nuova modalità e ne verifica la fattibilità. L'MK30, versione che sarà operativa a partire dal 2024, dovrebbe avere una autonomia che si aggira intorno ai 15 km; questo dovrebbe consegnare il pacco per mezzo di un lungo cavo mentre resta in hovering a diversi metri d'altezza. Il drone dovrà essere in grado da solo di identificare il miglior percorso possibile, evitando gli ostacoli e riuscendo a determinare quando le condizioni per la consegna diventano troppo avverse. Non avendo una autonomia troppo elevata, e dovendo utilizzare almeno la metà di essa per tornare alla base, sarà necessario posizionare diverse infrastrutture all'interno della città così da garantire un servizio utile nell'area più ampia possibile, che coinvolga non solo il centro della città ma anche le zone più lontane da esso.

Inoltre, per evitare che si presenti nelle nostre città, in futuro, una problematica quotidiana di sovraffollamento tale per cui risultino necessarie misure di limitazioni del traffico aereo urbano,

partire da oggi con un ambiente non affollato, sicuro e confortevole può rivelarsi la scelta giusta. A tal fine è possibile immaginare di introdurre dei punti di raccolta, molto simili a quelli che l'azienda Amazon ha già introdotto all'interno dei centri commerciali oppure in determinati punti della città, così da evitare di intensificare il traffico aereo e da limitare il numero di droni che sorvolano la città prima di arrivare ad ogni singola abitazione. Si immagina pertanto, in un simile ambiente, di individuare dei punti strategici della città emiliana in cui posizionare questi punti di raccolta. Alcuni di essi potrebbero essere collocati nei pressi del centro della città, nei luoghi maggiormente frequentati come piazza Maggiore, posizionandoli però in postazioni tali da evitare che troppi velivoli sorvolino esattamente i luoghi di maggiore attrazione turistica. Di maggiore utilità invece potrebbero essere delle postazioni nelle zone dei quartieri più densamente popolati, così come quelle nelle zone molto frequentate anche se più lontane dal centro (in presenza di musei, stadi o parchi). Un'altra idea potrebbe essere invece quella di utilizzare i tetti piatti di grandi edifici, fiere, stazioni e, soprattutto, dei grandi centri commerciali. Un luogo interessante potrebbe essere la Galleria Cavour; riuscendone a sfruttare la copertura superiore, potrebbe essere il luogo ottimale in cui consegnare i pacchi, riunirli e dare così la possibilità ai clienti di andarli a ritirare autonomamente. Considerate, tuttavia, le dimensioni ridotte della struttura e le conseguenti possibili problematiche di gestione della merce all'interno, si potrebbero prediligere piuttosto i punti di vendita di grandi dimensioni, presenti principalmente nelle parti meno centrali della città. In particolare, la superficie relativa alla copertura deve essere in grado di ospitare almeno un paio postazioni per velivoli eVTOL; in questo modo non dovrebbe essere difficile gestire lo stoccaggio dei pacchi e l'organizzazione per il ritiro degli stessi. Uno scenario simile potrebbe verificarsi nei grandi centri commerciali delle frazioni limitrofe di Bologna, come a Gran Reno o a Meridiana.

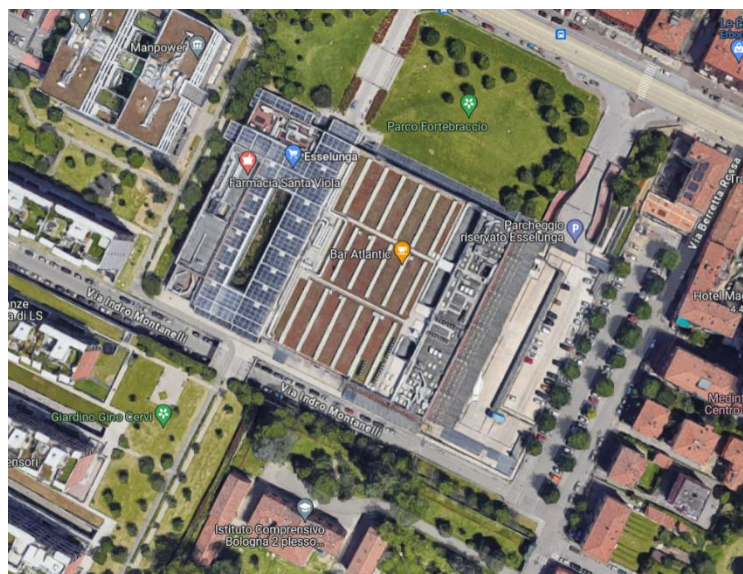


Figura 27: Edificio di Esselunga, visto dall'alto

4. Ambienti di simulazione

In questo capitolo si andrà ad introdurre la teoria alla base del concetto di simulazione e quali sono le tecnologie attuali che ne consentono la realizzazione. Si analizzeranno le varie sfumature del concetto di virtualità e le diverse tipologie di sviluppi digitali contemporanei. Si descriveranno, inoltre, gli strumenti utilizzati nel percorso di tesi al fine di conseguire gli obiettivi predisposti. Questi strumenti sono stati utili per la realizzazione degli scenari da realizzare, i quali andranno a costituire, in futuro, una ambientazione protetta e completamente configurabile, necessaria al fine di sviluppare simulazioni utili ed ulteriormente implementabili.

4.1. Realtà estesa e realtà virtuale

Per realtà estesa (XR, *Extended Reality*) si intende ogni sorta di tecnologia che altera la realtà attraverso l'aggiunta di elementi digitali al mondo fisico [22]. La realtà estesa è un termine complessivo che combina le esperienze di Realtà Aumentata (AR, *Augmented Realty*), Realtà Virtuale (VR, *Virtual Reality*) e Realtà Mista o ibrida (MR, *Mixed Reality*). Tutte queste costituiscono degli strumenti informatici che, seppur in continua evoluzione, stanno trovando sempre più spazio in applicazioni aeronautiche; alcune infatti sono ormai usate con costanza in modo affidabile e verranno descritte nei paragrafi successivi.

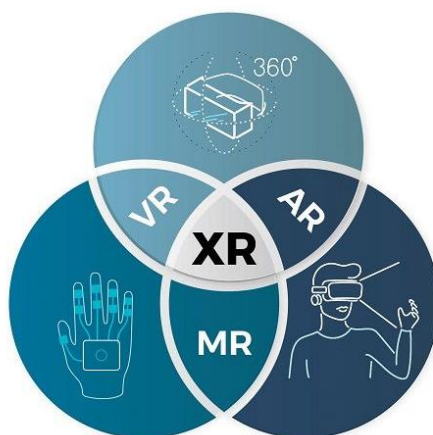


Figura 28: Diagramma esplicativo sulle differenze tra AR, VR, MR e XR

Di particolare interesse ai fini della realizzazione di questa tesi è solo uno dei diversi aspetti della XR, ovvero la realtà virtuale. Questa consiste in una tecnologia che permette la creazione di un ambiente digitale completamente immersivo. Nelle esperienze di VR, l'ambiente del mondo fisico è completamente tenuto fuori. Lo sviluppo di questa tecnologia ha raggiunto un livello tale da rendere

possibile la navigazione in ambienti completamente virtuali dall'aspetto realistico, e l'interazione, anche molto complessa, con gli elementi che popolano questi ambienti. L'interazione tra gli utenti e questi contenuti può avvenire sia tramite dispositivi tradizionali (come schermi, soluzioni visive tridimensionali, audio surround, casse acustiche o motion tracking) sia per mezzo di interfacce avanzate di nuova generazione (ad esempio usando i comandi vocali o gestuali), i quali consentono una immersione maggiore nell'ambiente virtuale.

Per cercare di capire meglio il concetto di base che sta dietro a questi termini, bisogna introdurre uno strumento che sia in grado di definire per bene la differenza tra mondo reale e mondo virtuale, delineando espressamente tutte le varie sfumature che si interpongono tra i due estremi. Questo prende il nome di “*virtuality continuum*” [23]. Esso rappresenta l'intero spettro di possibilità tecnologiche tra il mondo completamente fisico, ovvero l'ambiente reale e il mondo totalmente digitale, cioè l'ambiente virtuale. Include tutte le attuali tecnologie che alterano la realtà per mezzo delle grafiche generate al computer, realizzando tutte le possibili variazioni e composizioni di oggetti reali e virtuali. Attraverso il diagramma di Milgram [24] vengono generalmente definiti quattro livelli, a seconda della preponderanza dell'overlay di elementi digitali (o virtuali), rispetto al mondo reale:

- **Ambiente reale**, consiste semplicemente nel mondo degli oggetti fisici, reali.
- **Realtà aumentata**, in cui l'esperienza e la percezione che l'utente ha dell'ambiente reale vengono “aumentate” grazie alla sovrainpressione di una serie di elementi digitali rispetto alla sua versione del mondo reale.
- **Virtualità aumentata**, dove il mondo virtuale si estende attraverso l'inclusione degli oggetti fisici.
- **Ambiente virtuale**, in cui l'utente è immerso in – e interagisce con – un ambiente composto unicamente da elementi virtuali.

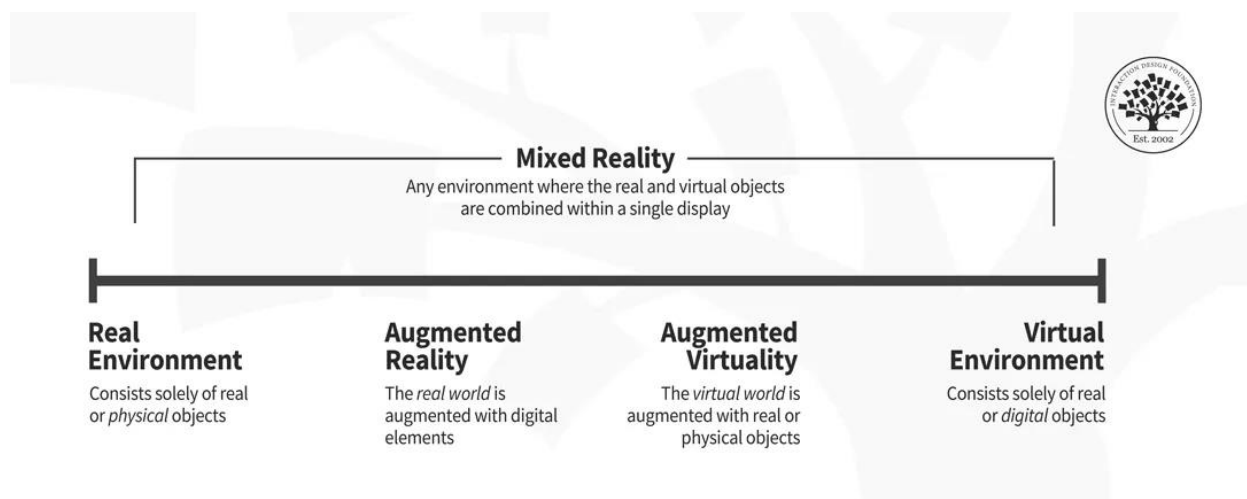


Figura 29: Le quattro categorie del Virtuality Continuum

Le diverse tipologie di tecnologie, ad oggi esistenti, per la visualizzazione di elementi virtuali vanno ad inserirsi all'interno di queste categorie, in base alle proporzioni tra mondo reale e mondo digitale che queste hanno nelle loro definizioni. La realtà virtuale, ad esempio, si colloca nella estremità totalmente virtuale del *virtuality continuum*. Questo, quindi, è una struttura teorica che può aiutare a visualizzare e a capire meglio le differenze tra le varie tecnologie attualmente esistenti e quelle che dovranno ancora essere inventate. Ad esempio, è possibile definire il concetto di uno spettro di immersione, in cui in una estremità c'è bassa immersione e nell'altra alta immersione e collocarvi le diverse tecnologie in base a tale grado.

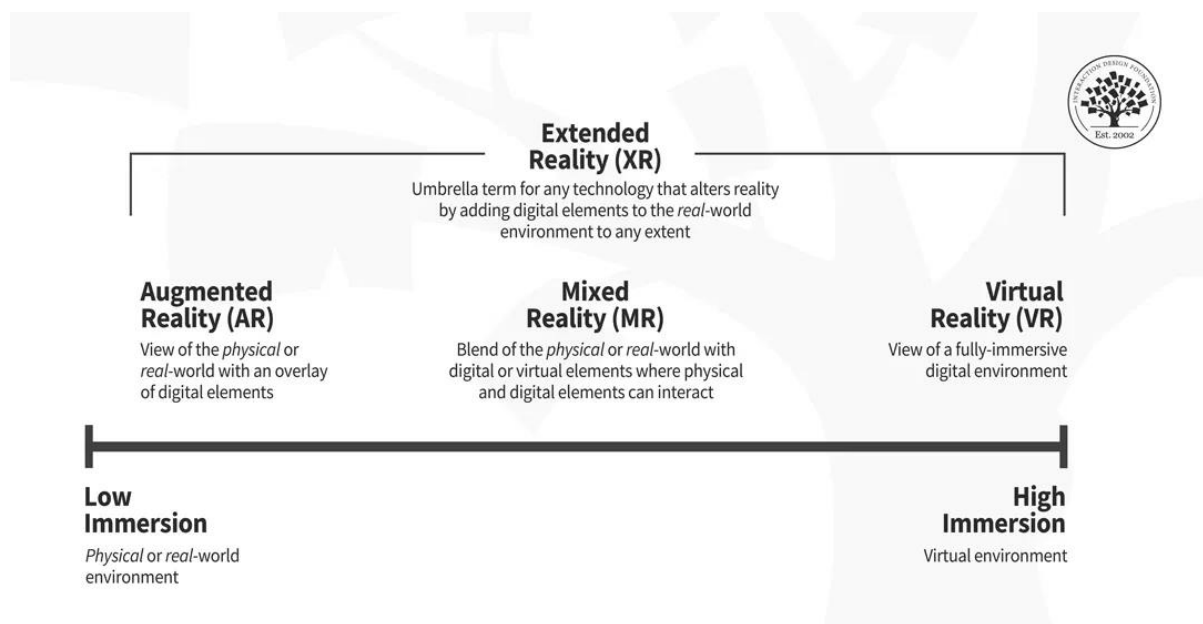


Figura 30: Rappresentazione delle attuali tecnologie di XR secondo lo spettro di immersione

4.2. Scenari di simulazione e relativi utilizzi

Queste nuove tecnologie, in tutte le loro accezioni e sfumature, possono essere sfruttate in diversi campi, contribuendo a creare un mondo di simulazioni che spesso si è rivelato fondamentale per la rapidità con la quale nascono nuove tecnologie, per l'abbattimento dei costi e per la valutazione di scenari altrimenti impossibili da testare. Le applicazioni di questa materia coinvolgono i campi più disparati: dal campo aeronautico a quello biomedicale, da quello archeologico al mondo del cinema, dal turismo all'apprendimento. È possibile, ad esempio, sfruttare la VR in ambito riabilitativo, oppure nell'ambito dell'architettura per realizzare tour virtuali di ambienti reali. La tematica della VR sta diventando sempre più popolare e, ad oggi, i mezzi attraverso i quali si sviluppano questi scenari possono essere installati anche sui dispositivi personali come smartphone o pc, il che significa che le tecnologie si stanno sviluppando ad una velocità estremamente elevata. Questo rende possibile la

sperimentazione di soluzioni in Realtà Virtuale e Aumentata in ambito aeronautico anche con budget limitati. Inoltre, la progressiva miniaturizzazione delle apparecchiature necessarie per fruire di queste tecnologie rende possibile la loro implementazione in ambienti sempre più piccoli, in modo da non aver bisogno di spazi troppo grandi dedicati solo alla realizzazione di questi scenari. Gli utilizzi di interesse, in considerazione del lavoro di tesi svolto, sono incentrati ovviamente nel settore aeronautico. Le principali applicazioni della VR in questo campo sono costituite da: simulatori di volo per i piloti e simulatori del traffico aereo per controllori di volo e radaristi.

Il simulatore di volo è uno strumento che permette di riprodurre la cabina di pilotaggio (*cockpit*) di un aereo replicandola fedelmente, e in scala reale, utilizzando gli stessi elementi dei velivoli reali. Costituiscono degli strumenti fondamentali per la formazione di ogni pilota: servono a fare pratica di volo in totale sicurezza, riproducendo esattamente le condizioni in cui andranno a operare e offrendo la possibilità di simulare tutte le situazioni di volo, compreso ogni scenario di emergenza, garantendo una formazione aeronautica e militare per l'addestramento completo e sicuro, che sarebbe altrimenti impossibile da compiere. Potersi allenare con un simulatore permette infatti ai principianti di iniziare la pratica di volo in totale sicurezza, riproducendo però esattamente le condizioni in cui andranno a operare. In particolare, i simulatori di volo sono dei sistemi che tentano di simulare l'esperienza di pilotaggio di un aereo nel modo più vicino possibile alla realtà per mezzo di attuatori idraulici o elettromeccanici controllati da computer.



Figura 31: Simulatore di volo di un Boeing 737-800

Tra i vantaggi di queste tecnologie, oltre alla maggiore sicurezza e alla possibilità di poter simulare ogni tipologia di situazione emergenziale, c'è anche un notevole risparmio economico, sia per i piloti che per le compagnie aeree. Esse garantiscono una grande versatilità di utilizzo e una perfetta interiorizzazione delle procedure, annullando i rischi di un volo reale. Attraverso i simulatori, inoltre, è possibile realizzare il perfezionamento delle comunicazioni radio e ricostruire per intero la scena di una situazione che ha portato ad un incidente (solitamente ricostruita dalla scatola nera) per simularla ed evitare che accada nuovamente.

Un simulatore di traffico aereo invece rappresenta un ambiente di addestramento per i controllori del traffico. È costituito da un ambiente che mostra una rappresentazione di tutto ciò che è presente nell'aeroporto e nelle sue vicinanze, simulando diversi scenari possibili; vengono trattate le principali problematiche di gestione e come queste vengono risolte. La miniaturizzazione delle apparecchiature per realizzare scenari di VR ha reso possibile l'introduzione di queste tecnologie anche all'interno delle torri di controllo, in quanto è necessario non occupare eccessivo spazio e non ingombrare la visuale con grandi strumentazioni. Un esempio è rappresentato da ATOMS [25], il nuovo simulatore di traffico aereo progettato e sviluppato da Techno Sky, società del Gruppo ENAV, utilizzato dai fornitori di servizi per la navigazione aerea – *Air Navigation Service Provider* (ANSP) – per validare nuovi scenari operativi, formare il personale e supportare la fase di test di nuovi sistemi ATM.



Figura 32: Simulatore di traffico aereo

4.3. Creazione di scenari virtuali: modellazione e simulazione

Affinché questi ambienti di VR possano essere realizzati e rappresentati all'interno dei simulatori, ci sono numerosi programmi in cui è possibile creare lo scenario da andare ad implementare poi

all'interno delle applicazioni descritte. Per poterli realizzare è necessario apprendere degli strumenti molto utili, che coincidono in ognuno dei programmi di creazione tridimensionale e che sono risultati estremamente importanti per la realizzazione dello scenario del vertiporto: tra questi ci sono la modellazione, il texturing, il rendering e l'animazione. La modellazione 3D è il processo volto a definire la rappresentazione di un oggetto o di una forma tridimensionale all'interno dello spazio virtuale generato al computer. La costruzione solitamente parte da una forma scelta tra le primitive geometriche, la quale viene successivamente modificata, estrusa o unita ad altre primitive. Affinché il modello creato possa avere la corretta disposizione visiva di colori, luci ed ombre, esiste poi il texture mapping, un processo che permette di proiettare una o più texture sulla superficie di un modello 3D, utilizzando le coordinate UV; la mappatura UV infatti è una tecnica di *texture mapping* che permette di applicare efficacemente e correttamente le texture sul modello. Una volta ottenuto l'oggetto completo, per come è stato pensato, nel caso in cui l'obiettivo finale sia quello di creare delle immagini statiche, si può procedere attraverso il rendering; questo è un processo di resa, ovvero di generazione di un'immagine, a partire da una descrizione matematica di una scena tridimensionale, interpretata da algoritmi che definiscono il colore di ogni punto dell'immagine digitale. Indica un'operazione atta a produrre una rappresentazione di qualità. Se l'obiettivo finale invece è quello di creare degli scenari dinamici con lo scopo di realizzare ambienti di simulazione o effetti visivi particolari, l'ultimo passaggio è quello dell'animazione, così da riuscire a dare una specifica movimentazione ai modelli all'interno della scena creata. L'animazione 3D è uno strumento utilizzato in tantissimi campi, come il cinema e la televisione, i videogiochi, l'architettura e il design, la prototipazione e la formazione.

Il lavoro di tesi di cui si sta parlando ha richiesto l'apprendimento e l'utilizzo della maggior parte di queste tecniche al fine di riuscire a realizzare uno scenario, quanto più realistico possibile, in modo da poterlo inserire all'interno di quello già realizzato relativo all'aeroporto di Bologna espandendo le possibilità di simulazione a futuri scenari di AAM. Il progetto complessivo del Marconi, integrato anche con l'infrastruttura per eVTOL, può essere implementato all'interno di specifici software ed utilizzato sia per le simulazioni di volo che per quelle di traffico aereo. Si contribuisce così alla realizzazione di uno strumento estremamente utile, economico e moderno.

4.4. I programmi utilizzati

Questo paragrafo descrive nello specifico gli strumenti che sono stati utilizzati durante il lavoro di tesi. L'utilizzo di questi è risultato indispensabile per la realizzazione del modello di vertiporto in

quanto, questi strumenti, sono gli stessi con i quali è stato modellato lo scenario di simulazione dell'aeroporto di Bologna.

4.4.1. Blender

Blender è un programma di creazione 3D open source, sviluppato dallo studio di animazione NeoGeo e gestito da Blender Foundation.

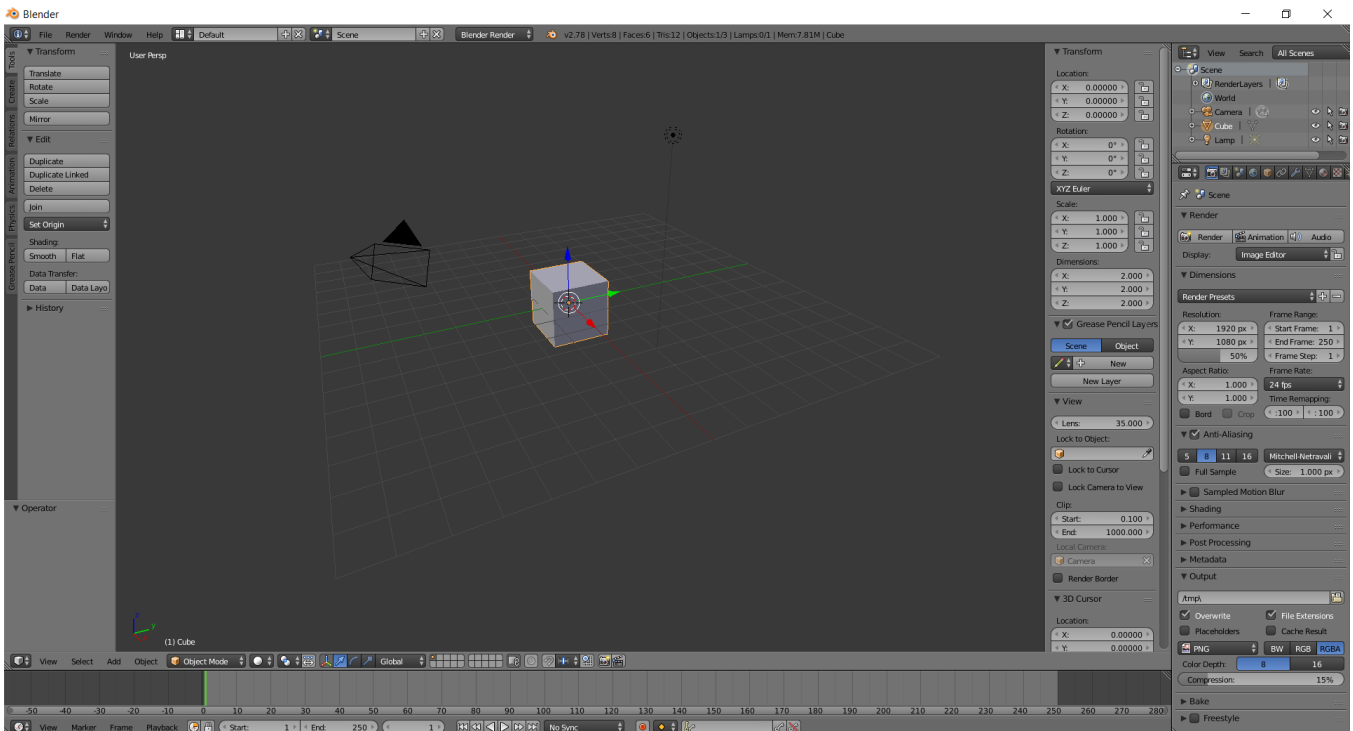


Figura 33: Schermata iniziale di Blender all'apertura del programma

Esso offre una vasta gamma di strumenti per modellazione, rendering, animazione, editing video, *compositing*, *texturing* e programmazione e simulazione di scenari. Dispone inoltre di funzionalità per mappature UV, simulazioni di fluidi, di rivestimenti, di particelle, altre simulazioni non lineari e creazione di applicazioni o giochi 3D. Blender è multiplatforma, con una interfaccia grafica OpenGL personalizzabile con script Python. Il mio lavoro ha richiesto un approfondimento in particolare delle funzionalità di modellazione, texturizzazione (attraverso la funzionalità UV/Image Editor) ed animazione.

Quando si apre un nuovo file in Blender, la modalità di default è la *object mode*, ovvero la modalità oggetto. Questa serve per gestire la posizione, la dimensione, la rotazione ecc. degli oggetti, sia che questi siano delle mesh (maglie poligonali) sia delle luci o camere. Blender supporta una grande

varietà di primitive geometriche, incluse le mesh poligonali e le curve di Bézier. Dalla *object mode* è possibile aggiungere mesh di varie forme base (piano, cubo, cerchio, sfera, cilindro, ecc.) per creare, attraverso vari strumenti di disegno, oggetti complessi e articolati.

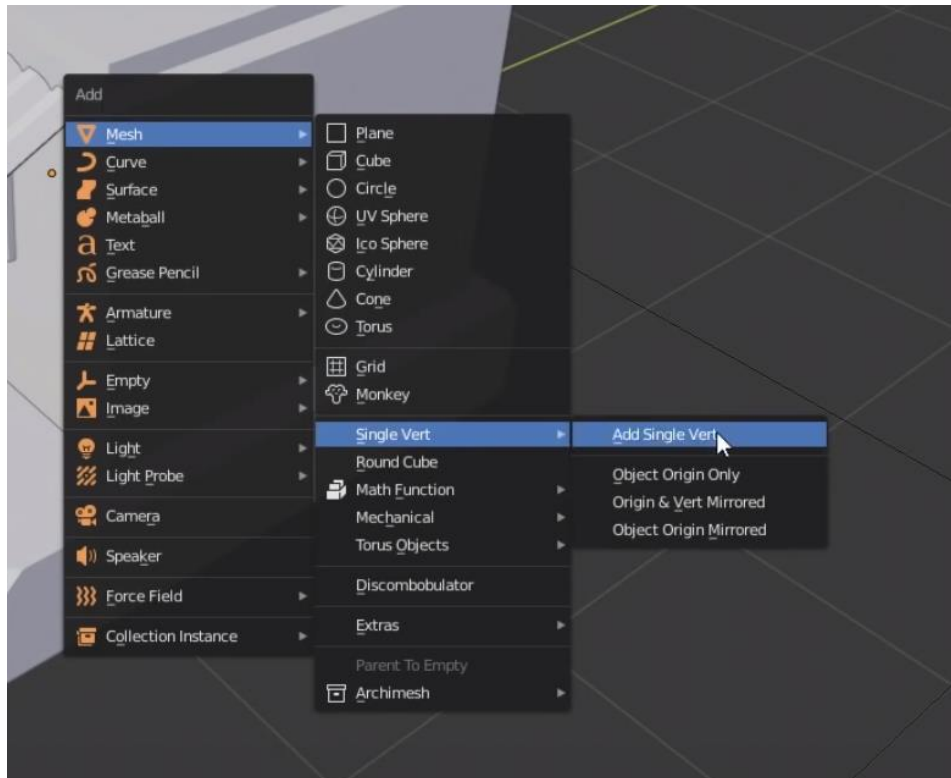


Figura 34: Sezione aggiungi (add) della *object mode*

Le modalità sono una funzione orientata agli oggetti, il che significa che le modalità disponibili variano in base al tipo di oggetto attivo selezionato. Ogni modalità è progettata per modificare un aspetto di esso. Per modellare correttamente un oggetto si deve passare alla modalità modifica (*edit mode*). In questa modalità si ha la possibilità di decidere se quello che si vuole selezionare sono facce, spigoli o vertici. Mentre in *object mode* si possono svolgere le operazioni che riguardano l'intero oggetto e le sue proprietà globali, in *edit mode* si svolgono operazioni che riguardano la geometria dell'oggetto. Gli oggetti geometrici sono infatti composti da vertici che ne definiscono la struttura. In tale modalità è possibile estrarre le facce degli oggetti, crearne delle sezioni, smussarne i contorni e tagliarne parti intere.

Oltre alla parte di modellazione, un aspetto che è stato approfondito è quello che riguarda la texturizzazione, in particolare attraverso la funzionalità *UV/Image Editor*. Per poterne usufruire bisogna selezionare l'oggetto che si vuole texturizzare e passare alla *edit mode*. Dopodiché, suddividendo lo schermo, è possibile applicare una texture, con precisione, all'oggetto selezionato.

Una mappa UV è una rappresentazione bidimensionale di una superficie dell'oggetto tridimensionale. È costituita da coordinate UV o texture che corrispondono ai vertici del modello. Ogni coordinata texture ha un punto corrispondente nello spazio 3D, un vertice. Queste coordinate pertanto servono come punti di marcatura che definiscono quali pixel della texture corrispondono a quali vertici.

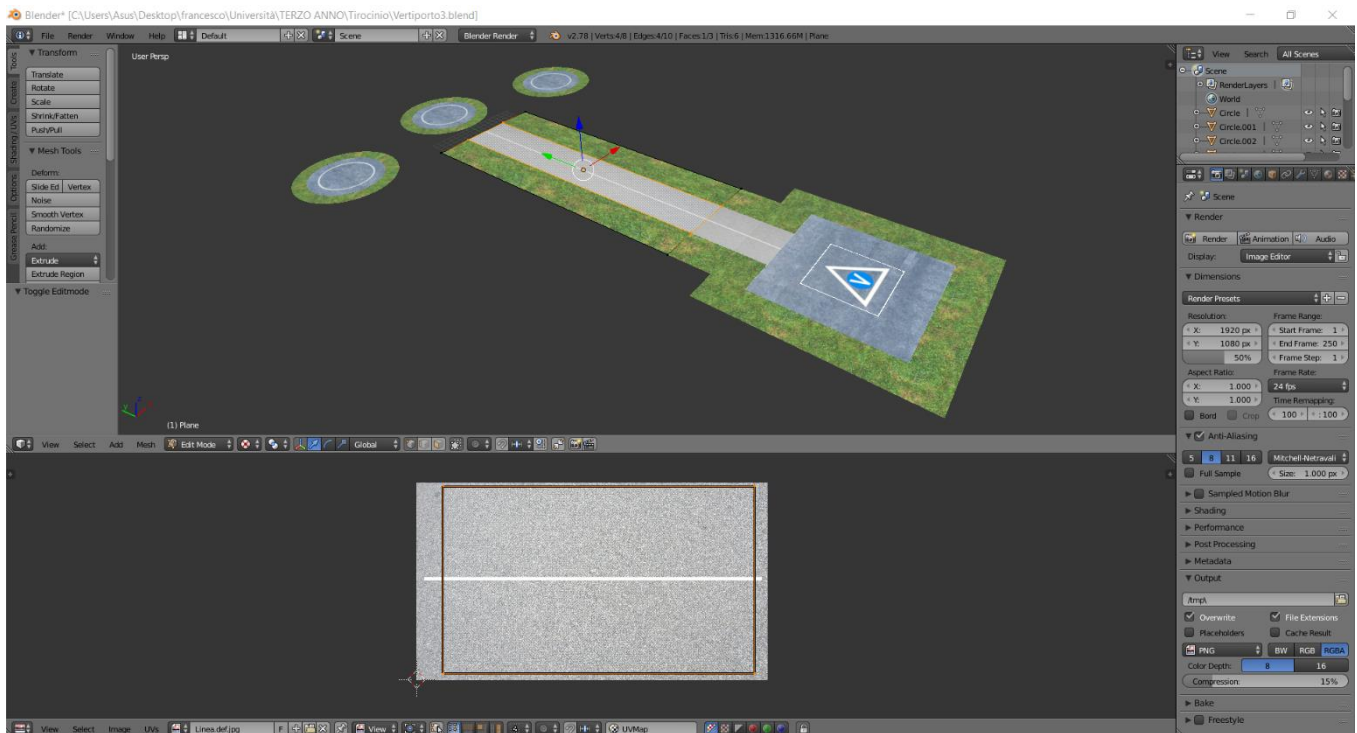


Figura 35: Suddivisione schermo per texturizzazione con UV/Image Editor

La parte di animazione in Blender invece è risultata utile in quanto è stato necessario inserire delle traiettorie di volo, da far compiere a dei velivoli, per simulare un atterraggio e un decollo dalla piattaforma realizzata. Innanzitutto, Blender presenta una finestra denominata *Timeline*: questa linea del tempo rappresenta la durata dell'animazione che si vuole realizzare ed è divisa in un numero di fotogrammi (frame), ovvero i singoli frammenti che andranno a comporre l'animazione finale. Solitamente, 24 frame stanno a rappresentare un secondo di tempo. Il numero di frame che si vuole visualizzare poi può essere modificato manualmente, andando così a cambiare la durata dell'animazione. La tecnica di animazione più semplice è quella basata sul *keyframe* (fotogramma chiave). Il fotogramma attuale può essere selezionato da un'apposita casella della finestra dei pulsanti, selezionando poi l'oggetto che si vuole animare e creando il nuovo fotogramma chiave. Si selezionano quindi le trasformazioni che si intendono animare: *Loc* per la posizione, *Rot* per l'angolo, *Scale* per la dimensione ed è possibile agire anche su tutte le loro combinazioni. I fotogrammi chiave inseriti possono essere visti in una finestra chiamata *Timeline* e vengono mostrati come barre verticali

gialle, mentre il fotogramma corrente è denotato da una linea verde. La finestra permette anche di specificare il fotogramma iniziale e finale del filmato.



Figura 36: Timeline di Blender

4.4.2. Gimp

Gimp (*GNU Image Manipulation Program*) è un software libero multiplatforma per l'elaborazione digitale, la creazione e la modifica di immagini di ogni tipo. Fra i vari usi possibili vi sono fotoritocco, fotomontaggio, conversioni tra molteplici formati di file e animazioni (ad esempio in formato GIF). Gimp è uno dei più completi e popolari software per il ritocco fotografico e la grafica bitmap. Nel lavoro di tesi si è preferito imparare ed utilizzare anche Gimp piuttosto che il solo Paint, programma di grafica più semplice. Quest'ultimo è stato utile per creare delle immagini e delle simbologie che non è stato possibile reperire in altro modo. Ad esempio, in Paint si è creato il simbolo a "V" posto esattamente nel centro del TLOF. Gimp invece è stato necessario nel sovrapporre, manipolare e adattare le diverse texture e immagini a disposizione. Ancor prima è risultato fondamentale nel ritagliare immagini da utilizzare nelle sovrapposizioni citate. Tutto questo con il fine di creare la segnaletica orizzontale; si è riusciti così ad avere un'unica immagine finale per ogni sezione del vertiporto, in modo da poterla texturizzare in Blender.

5. Modellazione del vertiporto

In questo capitolo si vogliono descrivere, nel dettaglio, tutti i passaggi compiuti con l'intento di realizzare la modellazione del vertiporto, da implementare poi all'interno del preesistente scenario virtuale dell'aeroporto di Bologna; questo va realizzato sempre ai fini di riuscire a fornire un ambiente virtuale relativo a una nuova ipotesi di simulazione su scenari di *drone delivery*. In particolare, si descrivono adesso i processi che hanno portato alla modellazione finale del vertiporto, mentre nel capitolo 6 si parlerà dell'inserimento del vertiporto all'interno dello scenario aeroportuale, con riferimento a posizionamento, animazioni e traiettorie. Verranno brevemente descritte le operazioni svolte durante il precedente tirocinio di preparazione alla tesi. Sono stati sfruttati infatti, oltre che le nozioni teoriche apprese, numerosi modelli e diverse texture direttamente dal percorso di tirocinio, migliorandole e unendole per ottenere la configurazione finale proposta in questo elaborato. In particolare, unendo i risultati dei due lavori svolti, si è arrivati alla realizzazione delle texture complete e corrette, da applicare ai modelli relativi alle singole parti del vertiporto; in seguito, si è passati alla realizzazione di numerose configurazioni finali di vertiporto, create unendo e disponendo in modo differente le singole parti che si avevano già in precedenza. Si è pensato di realizzare molte versioni dell'infrastruttura così da scegliere quella che risulti essere la più adatta nello scenario dell'aeroporto Marconi, in base a molteplici considerazioni fatte sulla geometria, sull'utilità delle singole sezioni in quella specifica posizione, sul numero di stand e taxiway, sul posizionamento e sull'orientamento all'interno dell'aeroporto.

Durante il percorso di tirocinio intrapreso, utilizzando le linee guida visionate, si sono modellate, separatamente, le singole parti del vertiporto, le quali sono state successivamente unite per creare l'infrastruttura complessiva dedicata a quel lavoro. In seguito, si sono applicate le texture (asfalto, cemento ed erba) alle singole parti. Affinché ciò fosse possibile, si è dovuto in primo luogo creare la segnaletica orizzontale e poi sovrapporla alle immagini che si avevano, pronte per essere texturizzate. Per raggiungere tale obiettivo sono stati utilizzati i due programmi già descritti: Paint e Gimp.

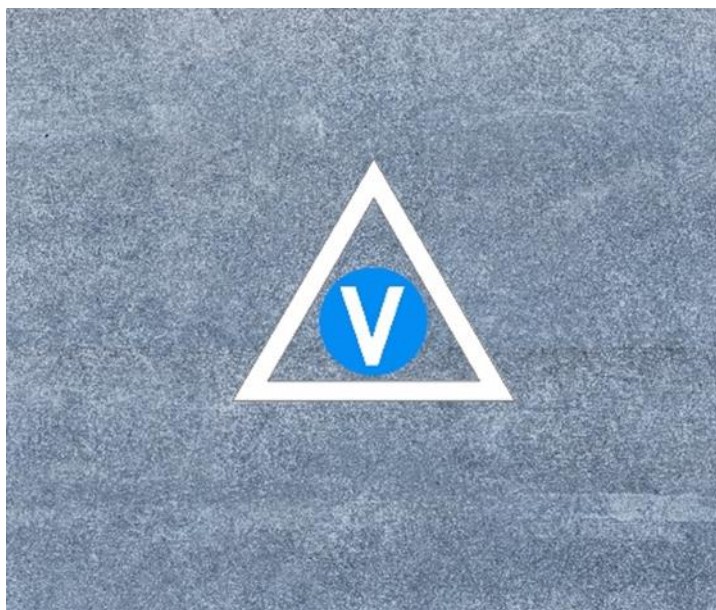


Figura 37: Texture per il TLOF realizzata durante il percorso di tirocinio



Figura 38: Texture per le taxiway realizzata durante il percorso di tirocinio

5.1. Preparazione delle texture da applicare ai modelli

Nel lavoro di tesi è stato innanzitutto necessario migliorare le texture realizzate, per poi implementare i modelli precedentemente creati delle singole sezioni grazie a queste nuove immagini, ora corrette e complete; le parti indipendenti, una volta assemblate, sono andate a costituire il modello finale di vertiporto, nelle varie configurazioni ideate. Tale procedimento è risultato necessario in quanto nei modelli sviluppati durante il tirocinio non è stato possibile realizzare le texture in modo approfondito, per via della mancanza di chiarezza e uniformità delle due linee guida prese in considerazione e ancor

di più per le difficoltà incontrate nel texturizzare il modello. Per compiere questo passaggio, che risulta essere fondamentale ai fini della corretta e realistica realizzazione della struttura, si è lavorato sul programma Gimp, aggiungendo parte della segnaletica orizzontale mancante in precedenza. Nella figura seguente viene mostrata la texture definitiva che è stata utilizzata per il modello del TLOF; rispetto alla texture realizzata nel percorso di tirocinio, questa presenta la linea tratteggiata, di forma quadrata, che contiene il simbolo per identificare il vertiporto. Grazie a questa, così, è ancora più evidente la presenza dell'infrastruttura e sicuramente più riconoscibile da un velivolo in volo. Con GIMP è stata fatta una sovrapposizione tra le linee tratteggiate bianche e la texture relativa al modello di TLOF già precedentemente implementato.

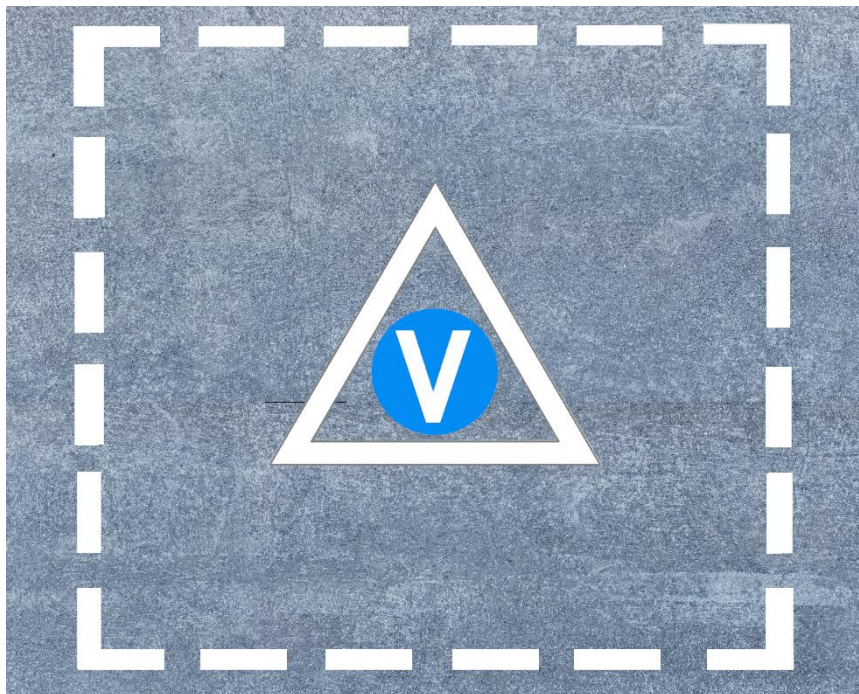


Figura 39: Texture definitiva da utilizzare per il TLOF

In seguito, viene presentata la texture definitiva, utilizzata invece per delimitare lo spazio dedicato agli stand di stazionamento. Anche questa è stata migliorata rispetto alla precedente versione, sempre tramite l'aggiunta di una parte di segnaletica orizzontale; in particolare è stata inclusa la linea continua verticale, la quale segna il percorso a terra che il velivolo dovrebbe idealmente seguire per arrivare allo stand. Ciò è stato reso possibile dalla sovrapposizione della vecchia texture, con la nuova linea creata, attraverso il programma Gimp.

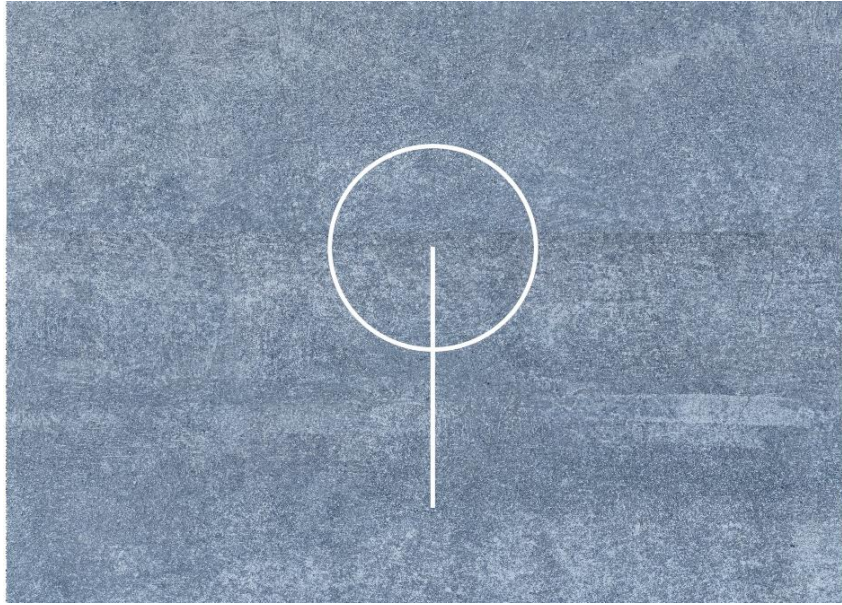


Figura 40: Texture definitiva da utilizzare per gli stand

Per ultimo, il modello di vertiporto creato in precedenza, sempre per via dei problemi nel realizzare la segnaletica a terra su Blender, non presentava alcuna tipologia di linea curva di raccordo dei percorsi di rullaggio. Tuttavia, queste linee risultano fondamentali nei vertiporti, così come negli aeroporti, per far in modo che il velivolo possa seguire correttamente il percorso fino ad un particolare stand o passare da una taxiway a un'altra. È quindi risultato necessario creare un modello indipendente su un file a parte di Blender, a cui è stata applicata una texture bianca. La curva è stata realizzata attraverso la modellazione di una successione di piani di forma rettangolare, disposti in modo da dare la giusta curvatura al modello. Successivamente questo modello è stato sovrapposto ai modelli già creati di taxiway, stand ecc. variandone le dimensioni e l'orientamento, così che risulti visibile e utile nelle configurazioni finali.

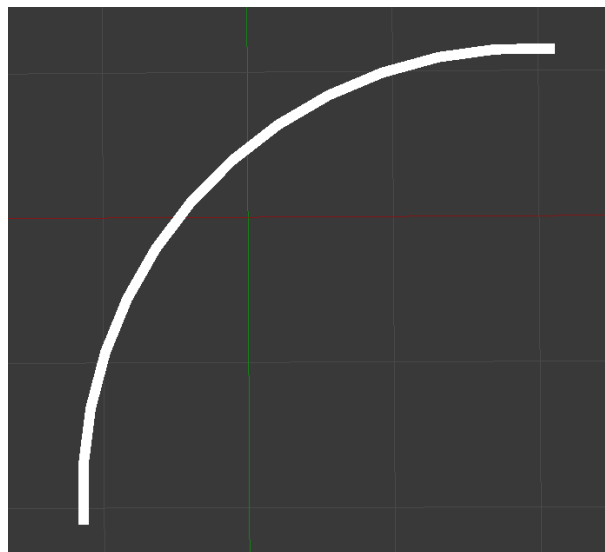


Figura 41: Linea curva utilizzata nei vari modelli creati

Queste nuove texture migliorate sono state implementate quindi nei modelli di Blender riguardanti le singole sezioni del vertiporto, andando a sostituire le texture utilizzate nel lavoro di tirocinio.

5.2. Realizzazione delle singole parti del vertiporto

Si è passati quindi alla realizzazione delle singole frazioni dell'infrastruttura, applicando le nuove texture. Di seguito queste vengono illustrate e descritte nella loro configurazione finale, nella fase precedente all'assemblaggio. A differenza dei modelli realizzati nel programma di tirocinio tuttavia, questi non presentano, in nessuno di essi, la sezione ricoperta da manto erboso, come ad esempio la Safety Area. Questo per via del fatto che il modello realizzato durante il lavoro di tesi parte da considerazioni preliminari riguardo al posizionamento del vertiporto all'interno del sedime aeroportuale di Bologna; per tale motivo, individuata l'aerea realizzata in asfalto attorno al quale si va a posizionare il vertiporto, non risultano più necessarie le parti di modellazioni, su Blender, delle aree costituite da suolo erboso. In ogni caso, comunque, il dimensionamento della Safety Area è stato considerato per il posizionamento all'interno dell'aeroporto. Le sezioni create sono:

- **TLOF e FATO (fase di decollo/atterraggio)**

È stato creato in un file Blender un unico modello della sezione del vertiporto relativa alla fase di decollo e atterraggio. Esso riunisce TLOF e FATO. Si è utilizzata la texture realizzata precedentemente su Gimp partendo da quella del calcestruzzo già disponibile e aggiungendo segnaletica e simbologia adatte.

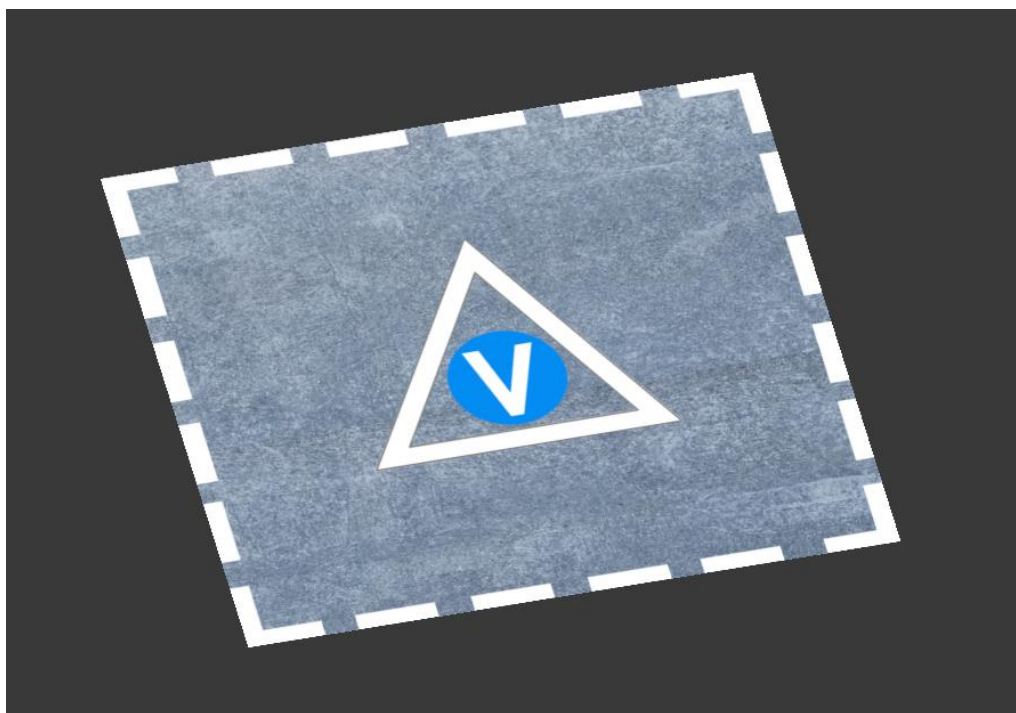


Figura 42: Modello della sezione relativa a TLOF e FATO

- **TAXIWAY (fase di rullaggio)**

In un altro file invece ho realizzato la taxiway; questa è implementata attraverso un piano rettangolare texturizzato con l'immagine dell'asfalto contenente la linea di mezzeria, realizzata su Gimp.

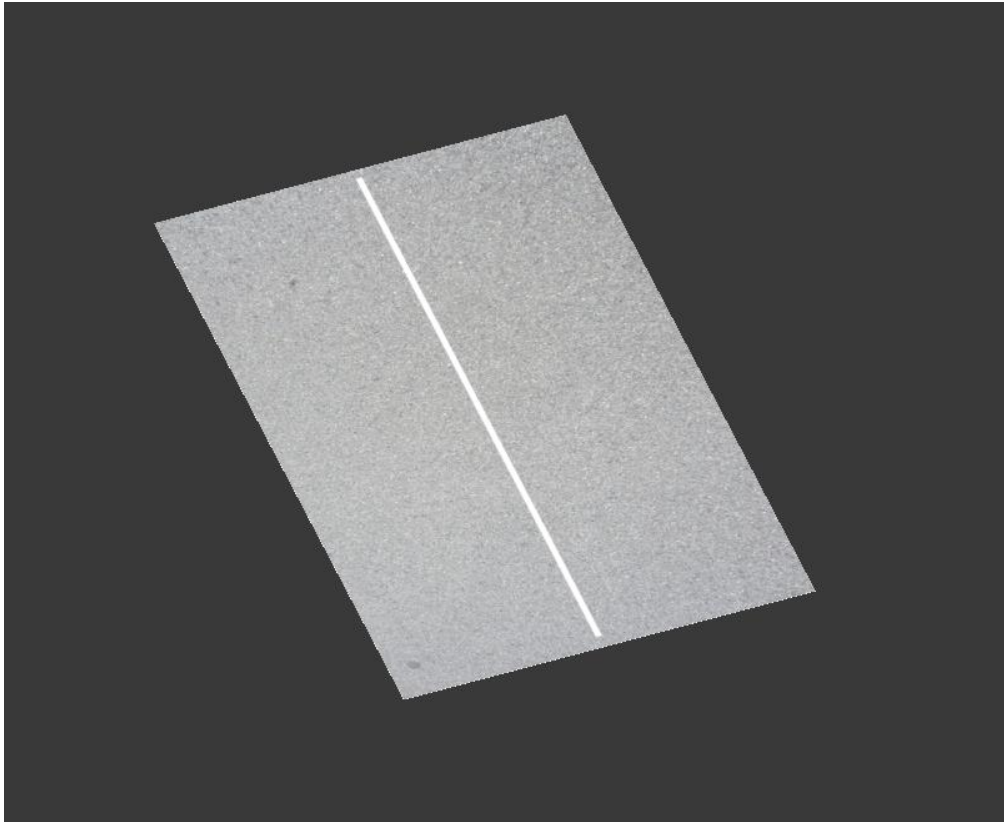


Figura 43: Modello della sezione relativa alla taxiway

- **STAND (parcheggio dei velivoli)**

Nell'ultimo file ho creato uno stand, necessario per la sosta e lo stazionamento dei velivoli. Esso ha una forma circolare ed è realizzato sempre con dei piani ai quali ho applicato le mie texture. La difficoltà di tale modello sta nel dover texturizzare un oggetto che, non avendo contorni rettilinei, è costituito, in *edit mode*, da decine di elementi rettangolari più piccoli. Questi danno una serie di problemi nella modalità UV/Image Editor. È stato inserito inoltre, all'interno di un altro piano rettangolare pavimentato ed è stato completato attraverso la linea continua bianca, realizzata in un'unica texture in precedenza.

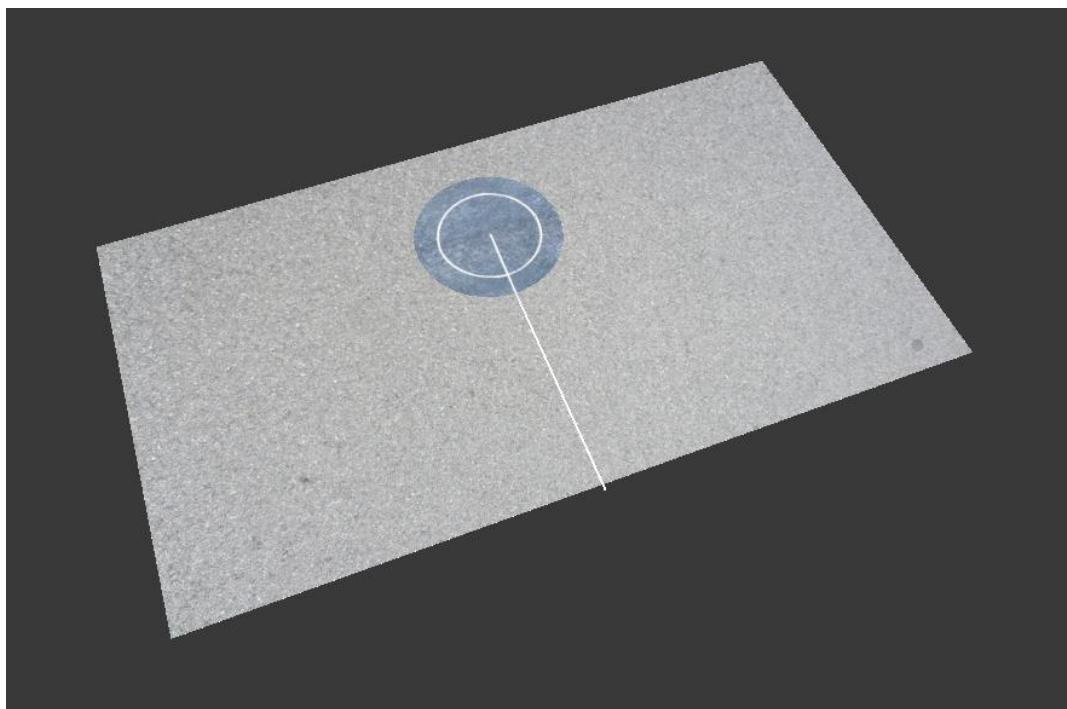


Figura 44: Modello della sezione relativa allo stand di stazionamento

5.3. Configurazioni finali del vertiporto

Nella fase successiva ho utilizzato i modelli creati separatamente e li ho uniti in modi diversi, e secondo differenti disposizioni, per cercare di ottenere una serie di possibili configurazioni per il vertiporto, nel complesso. In questa fase sono affiorate numerose difficoltà dovute all'incapacità del programma di riconoscere e ampliare le texture realizzate separatamente. È stato spesso necessario, quindi, trasferire i singoli prodotti risultanti dalla sola modellazione in un nuovo file e creare nuove texture; oppure, in altri casi, è stato necessario ricreare alcuni elementi nel nuovo file e aggiungere raccordi, taxiway o texture aggiuntive. Uno dei problemi affiorati, evidenziato anche nelle conclusioni del tirocinio, era quello di riuscire a trovare una soluzione costruttiva adatta a dei velivoli di dimensioni piccole o medie. Il vertiporto creato infatti, adotta come dimensione di riferimento il diametro del VoloDrone, pari a $D = 9,2$ m. È necessaria, pertanto, una soluzione in grado di garantire una movimentazione fluida e più correttamente proporzionata per i velivoli di dimensioni più contenute. A tal fine si è pensato di realizzare gli stand e le taxiways di dimensioni inferiori rispetto a quelle pensate inizialmente, adattando le texture create a queste configurazioni più ridotte. Queste sono state quindi aggiunte ai modelli già descritti, andando poi a progettare diverse configurazioni, fino a trovare quella che potesse maggiormente assolvere a tutti i compiti e requisiti richiesti.

Di seguito vengono riportate delle bozze di queste nuove configurazioni, create solamente a scopo progettuale, per cercare di capire quale fosse praticamente realizzabile, fattibile e comoda per tutte le tipologie di velivoli citate. Pertanto, questi primi modelli non hanno le texture complete finali con

l'aggiunta anche dei raccordi e delle linee continue, le quali rappresentano invece la corretta segnaletica orizzontale, ma costituiscono quindi solamente un'idea progettuale, da andare eventualmente a definire correttamente in seguito.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- **Configurazione 1**

Questa prima configurazione di vertiporto nasce dall'esigenza di immaginare un'infrastruttura che sia in grado di ospitare quanti più velivoli possibili, sempre di varie dimensioni. Per farlo, è risultato necessario alternare taxiways e stand di dimensioni più grandi a quelli invece più contenuti. Si è immaginato pertanto, attraverso questa geometria a "doppia X", di riuscire a garantire lo stazionamento, in contemporanea, di 4 velivoli dalle dimensioni pari o leggermente inferiori a quelle del VoloDrone e 4 velivoli di dimensioni più ridotte. Una tale geometria è stata pensata con il preciso scopo di ottimizzare lo spazio a disposizione con uno sviluppo radiale a partire dalla postazione di decollo e atterraggio. In questo modo inoltre si cerca di limitare gli spostamenti non rettilinei in fase di rullaggio, anche grazie agli stand di stazionamento posti alla fine della taxiway: infatti, risulta possibile atterrare sulla TLOF, posizionarsi lungo la direzione che porta allo stand e raggiungerlo direttamente senza alcun tipo di virata a terra lungo il percorso. Lo stesso procedimento, ma al contrario, avviene per il decollo.

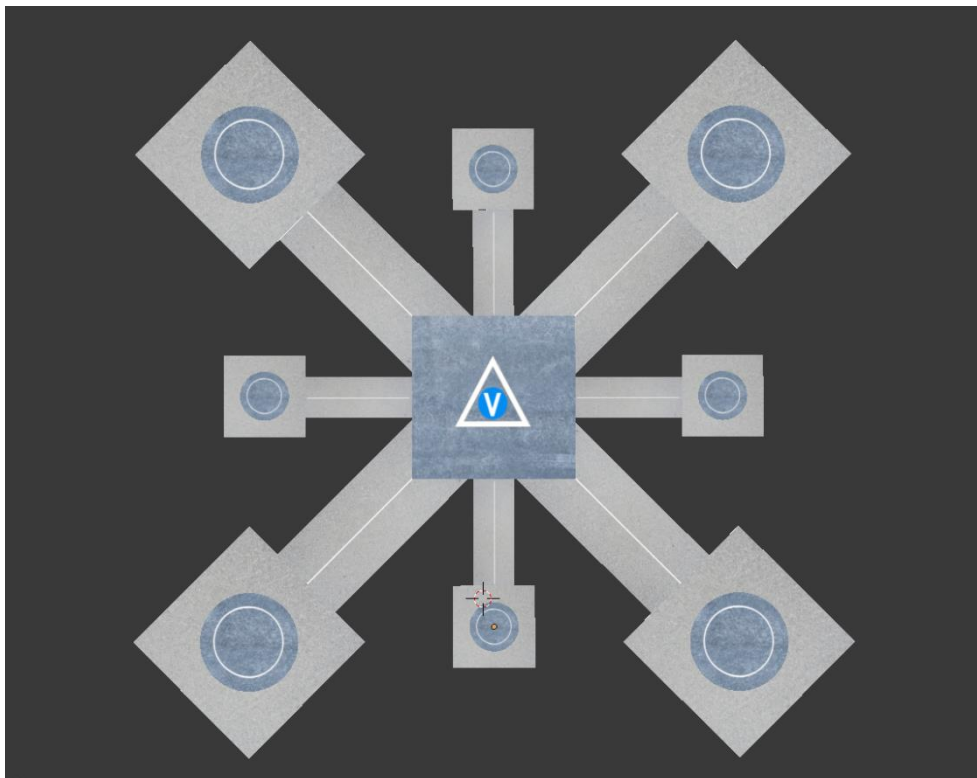


Figura 45: Configurazione 1 del vertiporto

- **Configurazione 2**

Una configurazione molto simile alla precedente, soprattutto nelle premesse e negli obiettivi che si cerca di raggiungere dalla geometria, è la seconda configurazione. Anche questa nasce dall'esigenza di poter gestire contemporaneamente numerosi velivoli e di varie dimensioni. La differenza con la precedente versione sta nella direzione in cui si sviluppano le taxiways e i relativi stand di dimensioni più grandi, favorendo una distribuzione meno compatta ma più schematica e geometrica. Si è preferito, qui, definire solo due direzioni, anziché quattro: una longitudinale e una trasversale. La problematica principale di questa tipologia consiste nella distanza troppo corta che si interpone tra due taxiways nello stesso verso di direzione e tra i relativi due stand. Per tale motivo è necessario ideare altre configurazioni.

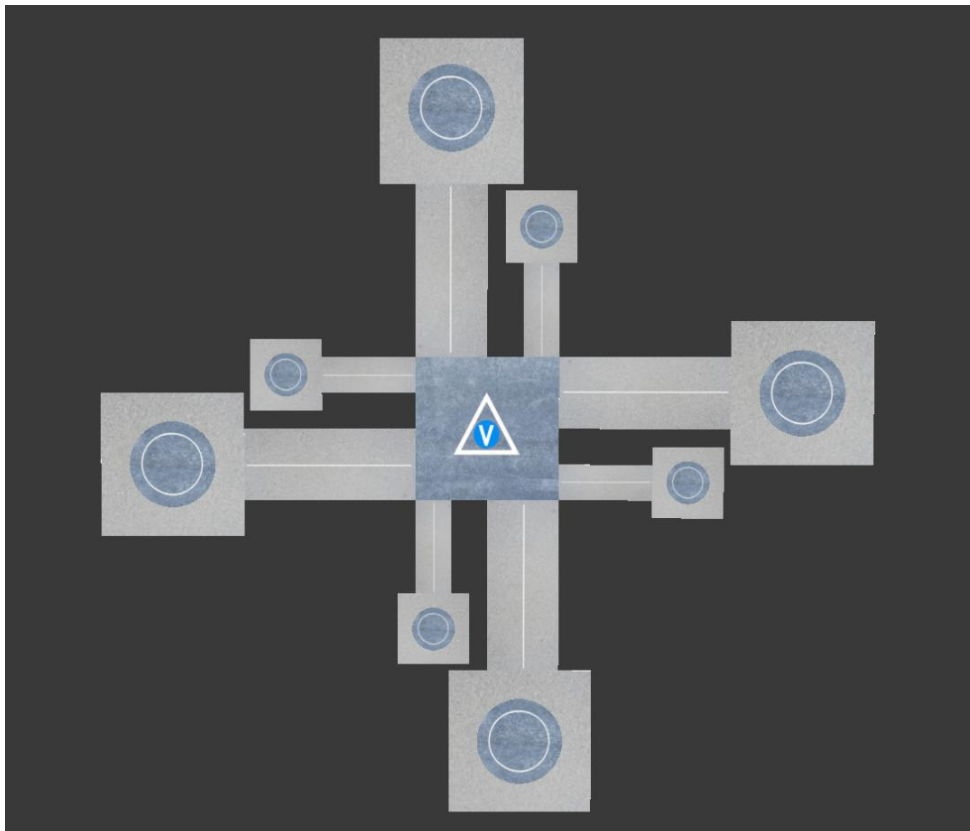


Figura 46: Configurazione 2 del vertiporto

- **Configurazione 3**

Un'ultima configurazione di valutazione si fonda sull'idea di limitare lo spazio occupato in direzione longitudinale (assunto come asse longitudinale quello che divide in due parti uguali il simbolo V), ma di prediligere piuttosto l'estensione in direzione trasversale. Si è pensato pertanto di posizionare, a partire dal blocco TLOF/FATO, due taxiway lateralmente, che si sviluppino in direzioni opposte, e di un'altra invece lungo la direzione longitudinale. Quest'ultima si è immaginato potesse garantire lo stazionamento dei velivoli di dimensioni

simili al VoloDrone, dedicandovi tre stand; alla fine di ognuna delle due taxiway laterali, più piccole, si è invece pensato di posizionare due stand per i velivoli di dimensioni inferiori. Tale configurazione è risultata essere la migliore in assoluto per via della sua particolare geometria; si è scelto, pertanto, di realizzare la versione finale e completa a partire da questo design. Esso evita di avere degli stand di stazionamento posti esattamente al di sotto della porzione di spazio aereo che costituirà l'ultima zona attraversata dal velivolo in atterraggio e la prima di un velivolo in decollo. Immaginando la traiettoria iniziale dei velivoli, prima di virare per raggiungere la destinazione, diretta lungo l'asse longitudinale, attraverso questa configurazione il velivolo potrà decollare e atterrare in sicurezza, al di sopra di una superficie non occupata da altri mezzi, garantendo così l'incolumità anche degli altri velivoli parcheggiati.

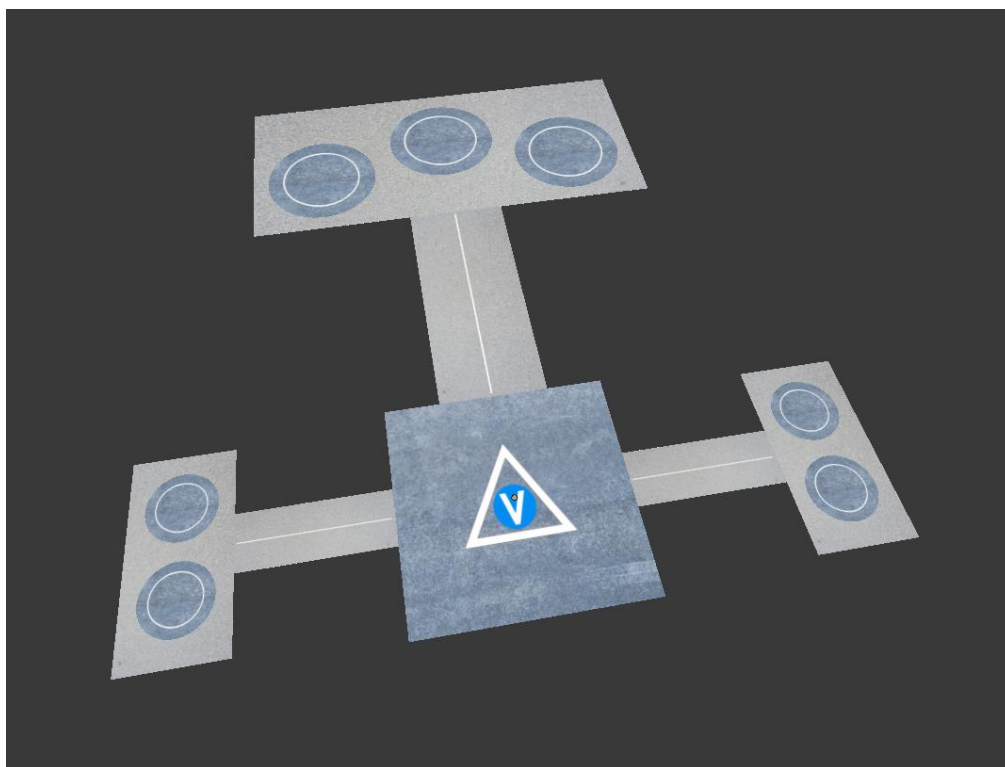


Figura 47: Configurazione 3 del vertiporto

Tutti questi modelli realizzati, come già detto quindi, rappresentano delle idee su delle possibili soluzioni del vertiporto, eventualmente da perfezionare, che andrebbero implementate all'interno dello scenario dell'aeroporto G. Marconi di Bologna, già realizzato in ambiente Blender. Scelta la configurazione 3 come soluzione definitiva, questa è stata migliorata attraverso un corretto dimensionamento di ogni parte del vertiporto, una giusta segnaletica orizzontale e una simbologia adatta. Pertanto, la versione definitiva è:

- **Configurazione finale**

La configurazione finale riprende la geometria della configurazione 3 ma garantisce ai velivoli di compiere il percorso a terra adatto grazie all'implementazione nel modello delle texture aggiornate e di una segnaletica a terra continua e completa. È possibile garantire lo stazionamento in contemporanea a tre velivoli di dimensioni più grandi e a quattro invece più piccoli.

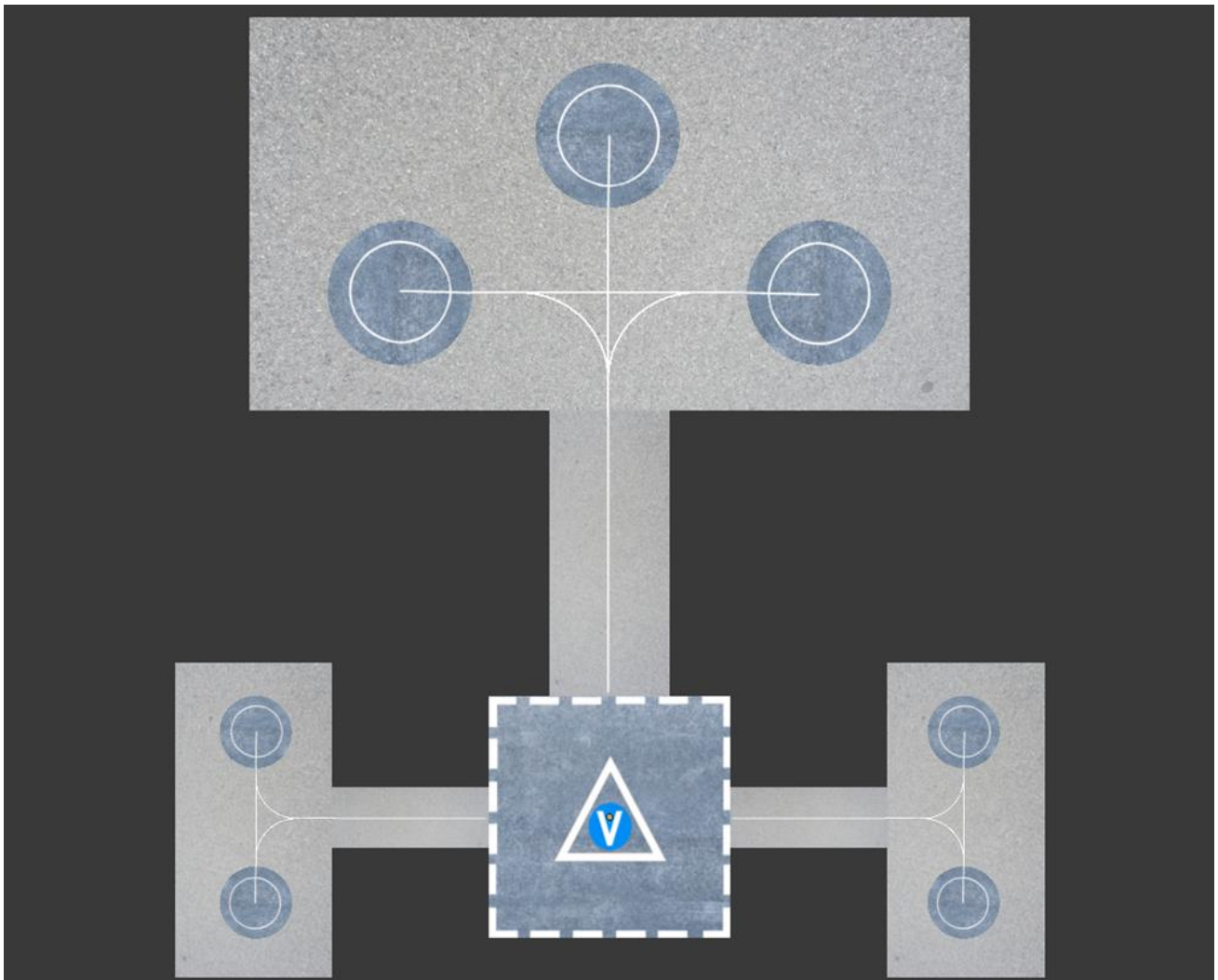


Figura 48: Configurazione finale scelta per il vertiporto

Infine, con il solo scopo di trovare un vertiporto diverso che possa offrire un'alternativa alla configurazione scelta, nel caso ce ne fosse la necessità, si è pensato di ideare un'ultima soluzione:

- **Soluzione alternativa**

Questa ultima versione predilige invece un'unica direzione di percorrenza, in entrambi i versi, ovvero la direzione longitudinale del vertiporto. Questa può risultare utile in quanto può essere realizzata in spazi stretti, tra due bassi edifici o tra altre due infrastrutture ravvicinate e garantisce lo stesso numero di postazioni della configurazione scelta per i velivoli più grandi, mentre è dotata di tre stand per i velivoli piccoli. È una soluzione che rende più compatti gli stand di pari dimensioni ma che allontana quelli di dimensioni differenti e li dispone su direzioni opposte.

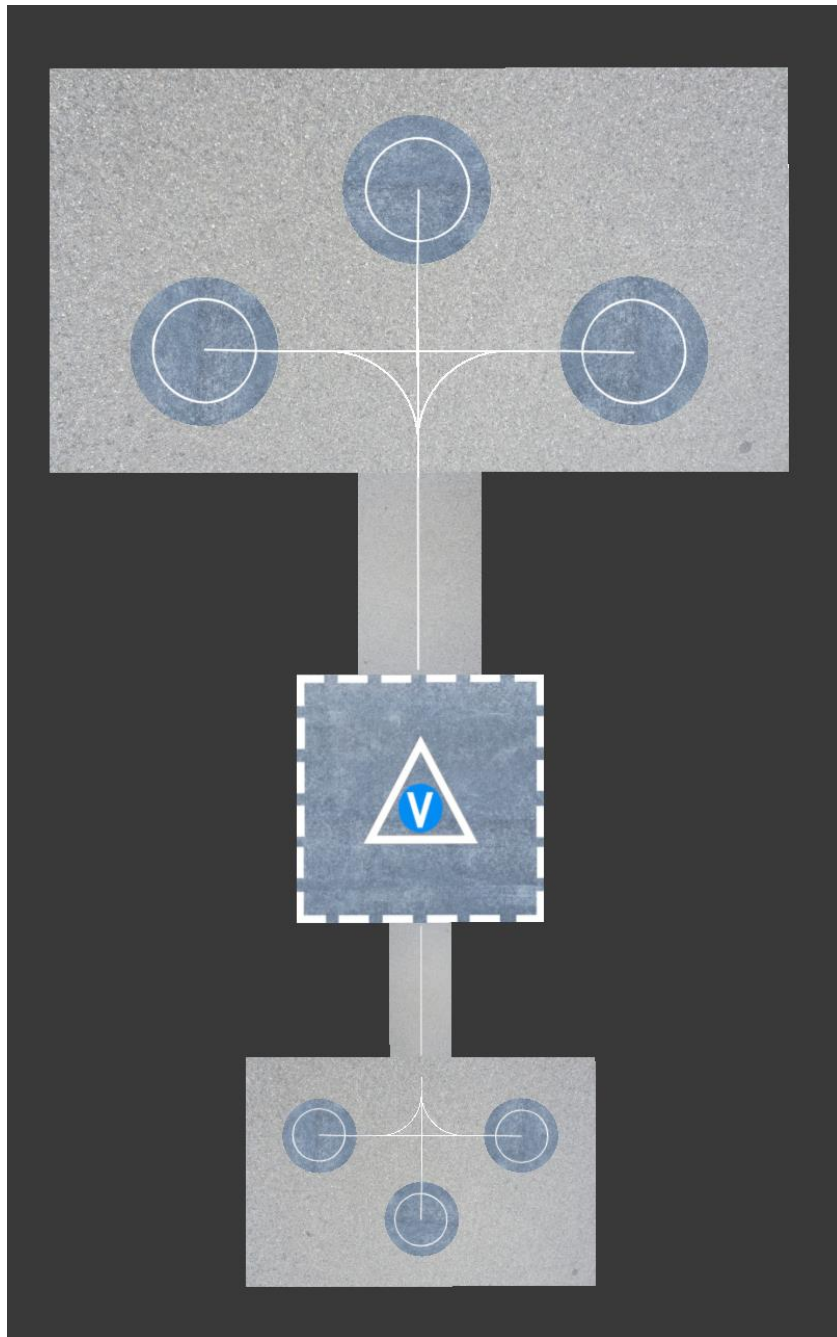


Figura 49: Configurazione alternativa del vertiporto

6. Scenario finale di simulazione di *drone delivery*

Una volta scelta la configurazione finale tra quelle modellate, si è passati al suo inserimento nello scenario completo rappresentante l'aeroporto Marconi di Bologna. Pertanto, è stato necessario andare concretamente ad integrare il modello Blender del vertiporto all'interno dello scenario di simulazione, anch'esso realizzato in Blender. Solo in seguito, si è completato il progetto con l'inserimento di traiettorie – già implementate e disponibili come parte di progetti precedentemente realizzati – da far compiere ai modelli dei velivoli. A tale scopo, sono state necessarie delle modifiche alle traiettorie preesistenti, in modo da adattarle alla nuova infrastruttura e alla nuova direzione di percorrenza. Infine, tramite l'aggiunta delle relative animazioni, in cui i velivoli, già presenti nello scenario aeroportuale, seguono le traiettorie modellate, è stato possibile realizzare uno scenario animato di simulazione relativo a un atterraggio e uno relativo a un decollo.

6.1. Inserimento del vertiporto all'interno dello scenario dell'aeroporto di Bologna

Individuata la posizione ottimale in cui inserire la nuova infrastruttura e realizzata quest'ultima, nella sua configurazione finale su Blender, si è passati all'inserimento del modello realizzato all'interno dello scenario dell'aeroporto; entrambi i progetti sono stati realizzati nella versione 2.78 di Blender, per garantire la massima compatibilità tra di essi. Il programma non ha riscontrato particolari problematiche, se non in qualche iniziale errore di compatibilità delle texture. Queste, nel modello di vertiporto creato, erano state inserite tramite l'*UV/Image Editor* e risultavano pertanto visibili solamente nella modalità *Texture* di Blender. Nell'implementare il modello all'interno del file Blender contenente l'intero aeroporto è stato necessario pertanto abbinare, ad ogni singola sezione del vertiporto (ad esempio la taxiway laterale di sinistra, quella di destra, le piazzole di stazionamento ecc.), un materiale, al quale associare la texture necessaria. In questo modo il nuovo modello è risultato visibile in diverse modalità disponibili: come *Texture*, *Solid* e in particolare *Material*, che è la modalità usata nello scenario aeroportuale durante le simulazioni.

Nelle figure seguenti viene mostrato il risultato finale del lavoro di modellazione e posizionamento. Come detto, il vertiporto è stato posizionato nei pressi del parcheggio abbandonato, in prossimità della fine della pista e nella zona adiacente al settore cargo della parte occidentale.



Figura 50: Vista del vertiporto nella posizione scelta

In realtà, come si può notare facendo un paragone con le immagini satellitari, il modello di aeroporto presente in laboratorio, all'interno del quale si è andati a posizionare la nuova infrastruttura, predispone una grande zona coperta da manto erboso, proprio in prossimità della zona sotto esame. Tuttavia, lì, sono presenti zone asfaltate, il parcheggio dismesso e nel mezzo è anche presente una strada per il passaggio di mezzi per il trasporto delle merci. Vediamo proprio questo paragone sovrapponendo l'immagine del vertiporto creato con una immagine reale dell'area. L'edificio rappresentato nello scenario di simulazione esattamente di fianco al vertiporto è il Terminal di Aviazione Generale e rappresenta, ai nostri fini, un ottimo punto di riferimento per il paragone. Si nota come l'area a cui ci si riferisce non è uguale a quella rappresentata nel modello. Inoltre, come già sottolineato nel capitolo 3, la zona è soggetta ad ampliamento e lavori di ristrutturazione in fase di esecuzione o ancora da realizzare; ciononostante, è stata assunta come ipotesi nella fase di posizionamento del vertiporto, che la zona reale sia effettivamente realizzata con un prato, come quella presente nella simulazione; ciò non impedisce al modello, di adattarsi in futuro alla disposizione che la zona assumerà, mantenendo intatti i modelli di vertiporto realizzati nella simulazione.



Figura 51: Sovrapposizione del vertiporto a una immagine satellitare dell'aeroporto

Si riportano adesso alcune immagini relative alla configurazione finale del vertiporto adottata, comprendenti però anche un vertiporto, per trasporto passeggeri, realizzato in un precedente lavoro di tesi. I due vertiporti, insieme, vanno a costituire il primo blocco, fondamentale, per la simulazione futura di operazioni di UAM nello scenario aeroportuale.

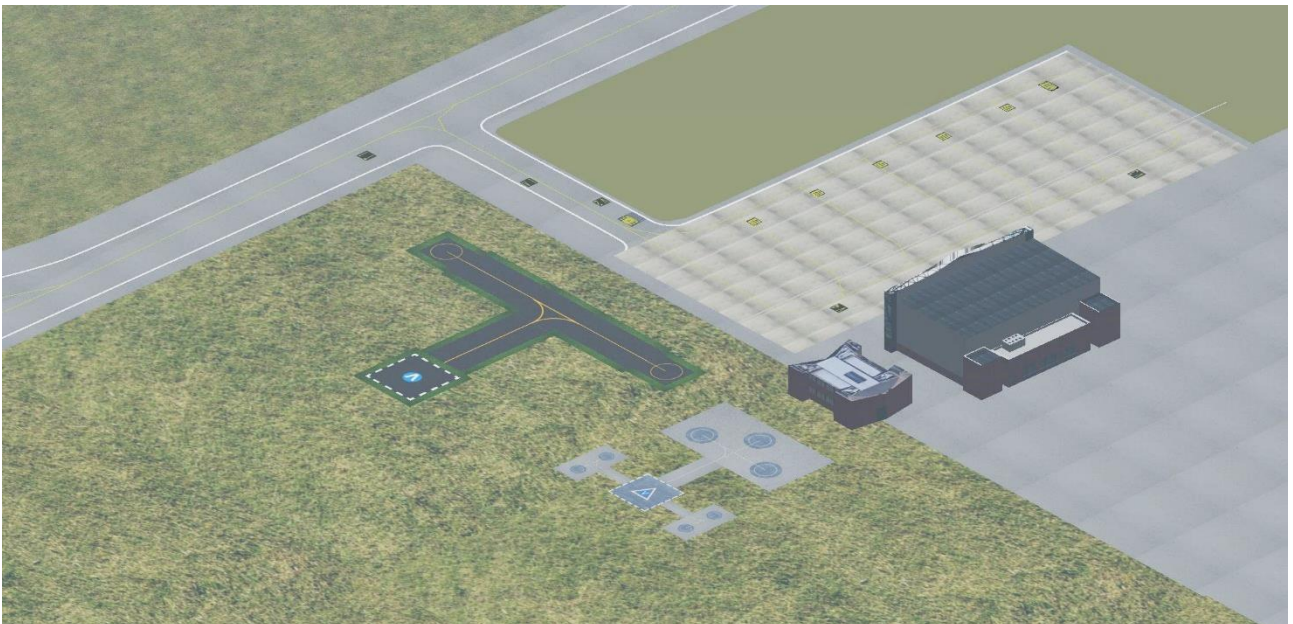


Figura 52: Vista dall'alto e dalla destra dei due vertiporti implementati

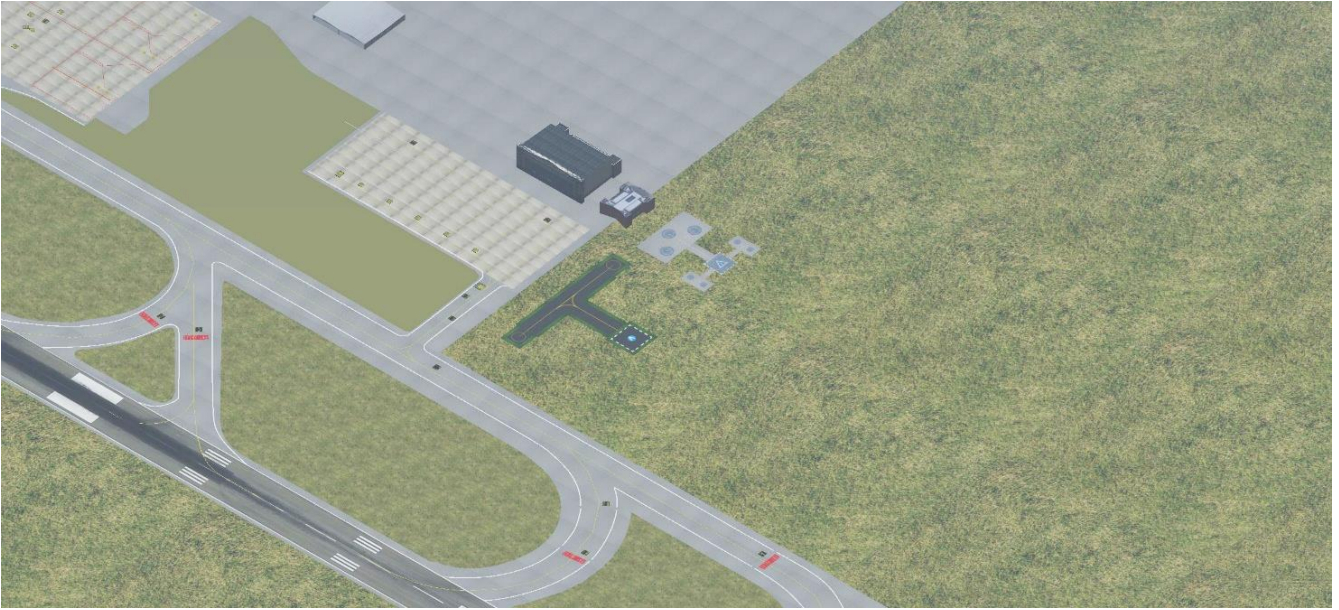


Figura 54: Vista dall'alto e dalla sinistra dei due vertiporti implementati



Figura 53: Vista dall'alto dell'intero aeroporto, con implementati i due vertiporti.

6.2. Modellazione di traiettorie da e per il vertiporto

Non volendo limitare il lavoro di tesi alla modellazione e al successivo posizionamento del vertiporto all'interno dello scenario aeroportuale di Bologna, si è pensato di integrare l'ambiente delineato attraverso delle animazioni che consentano di visualizzare un velivolo in movimento all'interno dello scenario. In particolare, sono state implementate due diverse traiettorie, entrambe riferite al vertiporto realizzato durante il percorso di questa tesi: una di decollo e una di atterraggio. Le traiettorie sono state realizzate, nel programma Blender, grazie all'utilizzo e alla modellazione di curve. Blender mette a disposizione due tipologie di curve: sia Bézier che NURBS. Entrambe sono definite in termini di un insieme di punti di controllo (o vertici di controllo) che definiscono un poligono di controllo. Il

vantaggio principale dell'utilizzo di curve invece di mesh poligonali è che le curve sono definite da meno dati e quindi possono produrre risultati utilizzando meno memoria e spazio di archiviazione in fase di modellazione. Le traiettorie create, nello specifico, sono state realizzate con curve NURBS; attraverso la creazione di più punti di controllo, e spostando questi nello spazio, è stato possibile modellare la forma desiderata alla traiettoria. Affinché questo fosse realizzabile, si è partiti da una preesistente traiettoria di avvicinamento per un velivolo eVTOL, andando ad inserirla opportunamente all'interno dello scenario aeroportuale. È stato necessario modificare la forma geometrica della traiettoria, posizionarla correttamente al di sopra del vertiporto e migliorarne la curvatura. Nelle ipotesi affrontate, per quanto riguarda il decollo, si è assunto di dover evitare il traffico aereo in decollo o atterraggio in prossimità dell'aeroporto; per il motivo citato non è possibile quindi attraversare la pista oppure andare incontro ai velivoli in fase di atterraggio. È meglio evitare, inoltre, di decollare verso il terminal passeggeri del Marconi, così da evitare qualunque rischio e interferenza alla routine di persone e traffico. Pertanto, si è scelto alla fine di decollare verso ovest, in direzione parallela alla pista dell'aeroporto. Seguendo questa traiettoria, la parte iniziale del decollo, quella più critica, avviene entro i limiti di una zona attualmente adibita al parcheggio dismesso, per cui non c'è alcun rischio di interferenza esterna. Successivamente, si troverebbe a volare al di sopra degli edifici; per tale motivo si è pensato di attuare subito una virata, rendendo in realtà la traiettoria curva, così da limitare il tempo di sorvolo degli edifici e attraversare nuovamente un'area non abitata e sicura per eventuali atterraggi di emergenza. Dopodiché il velivolo è libero di seguire il tragitto stabilito per raggiungere la propria destinazione. Seguendo la stessa identica traiettoria curva, ma invertendo le fasi di volo, è stato possibile definire anche un tragitto di atterraggio. Questo ha consentito di gettare le basi per l'animazione di un velivolo che, nella simulazione, eseguisse le manovre proposte.

In figura si mostra la traiettoria ipotizzata, indicandola su di una immagine satellitare.



Figura 55: Possibile traiettoria in decollo o atterraggio

Le figure seguenti invece presentano l'effettiva traiettoria, realizzata attraverso la successione di un elevato numero di vertici di controllo in un'unica curva NURBS, che è stata creata nell'ambiente Blender ed è stata poi applicata allo scenario aeroportuale.

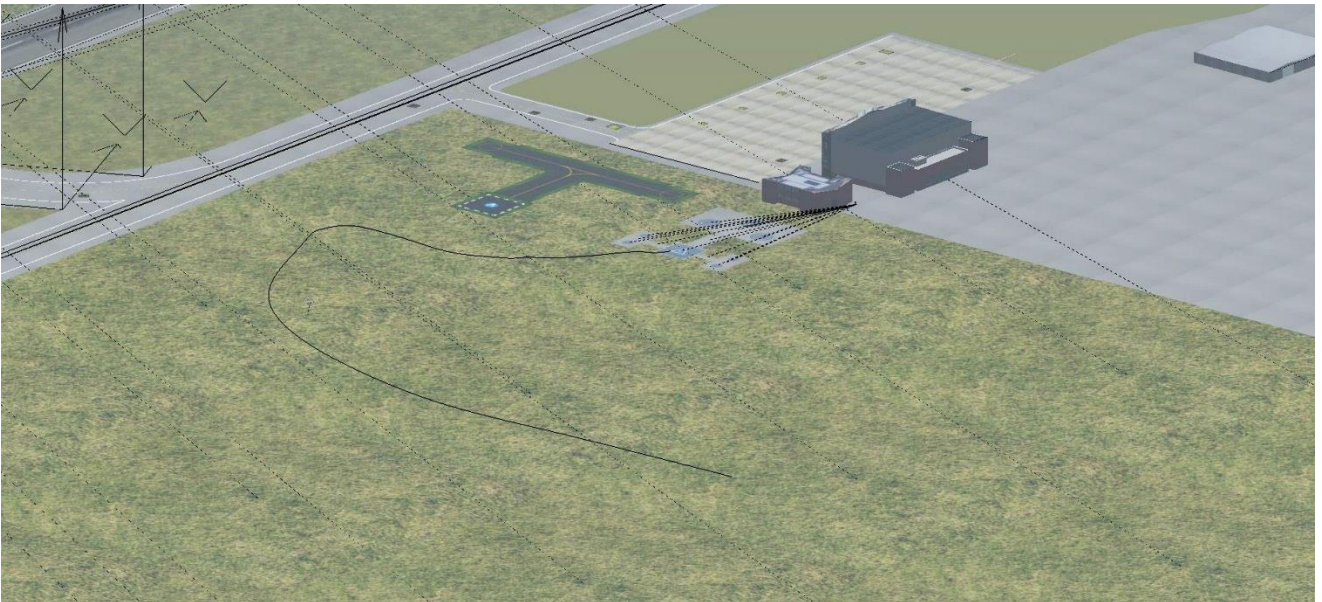


Figura 56: Traiettoria di atterraggio realizzata su Blender

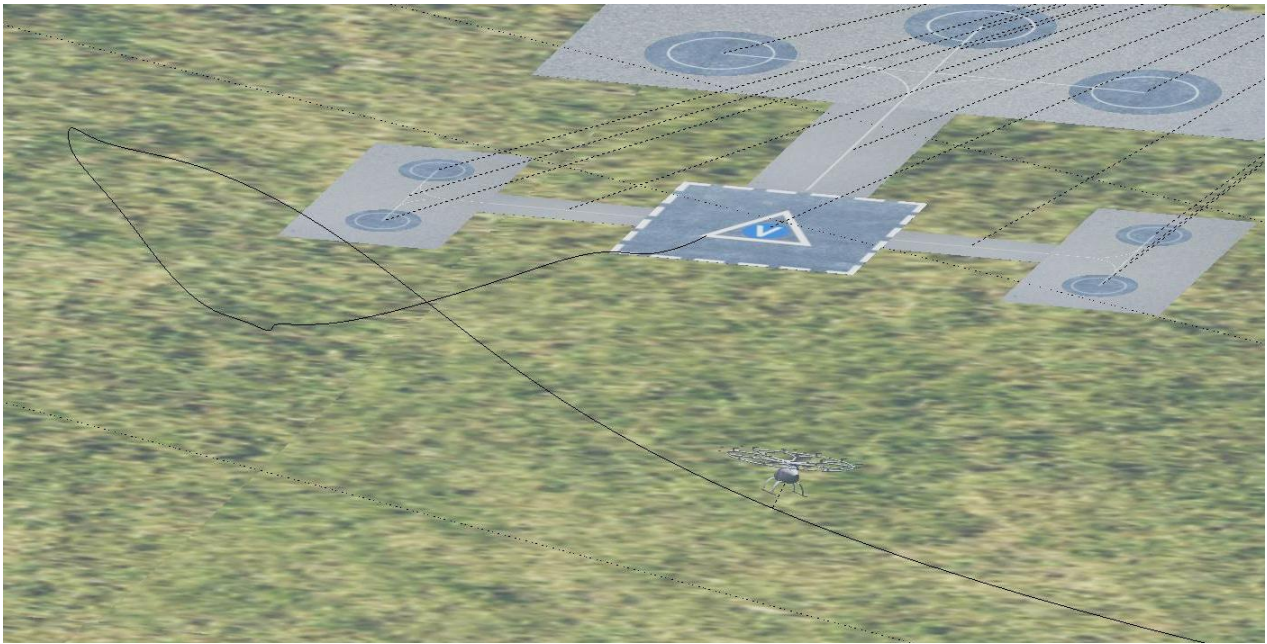


Figura 57: Traiettoria di atterraggio su Blender percorsa da un velivolo

6.3. Inserimento di velivoli e animazioni

Proprio al fine di realizzare le animazioni immaginate è stato necessario inserire il modello di un velivolo nel programma Blender, che potesse accompagnare la grafica in movimento nel seguire la traiettoria definita. Si è preso un modello del velivolo VoloCity, dell'azienda Volocopter, già disponibile, con relativa texture già implementata. In realtà, definita la traiettoria, il velivolo utilizzato potrà, in futuro, essere rimpiazzato da qualunque altro modello di eVTOL che sarà disponibile; meglio, in linea con gli obiettivi di questo lavoro di tesi svolto, se questo sarà un velivolo per il trasporto merci.

Definiti i percorsi quindi, e scelto il modello di velivolo, è stata realizzata l'animazione di questo grazie alle funzionalità di Blender e alla possibilità di sfruttare le traiettorie citate. Essendo l'animazione del velivolo difficile da visualizzare in un lavoro di tesi, di seguito si riporta una successione di diverse immagini, alcune prese dalla stessa angolatura e altre invece spostate al fine di mostrare meglio la traiettoria percorsa. Di seguito vengono mostrate una sequenza di immagini relativa alla traiettoria e animazione di atterraggio e una relativa al decollo.

Manovra di atterraggio



Figura 58: Animazione di una procedura di atterraggio (a)



Figura 59: Animazione di una procedura di atterraggio (b)



Figura 60: Animazione di una procedura di atterraggio (c)

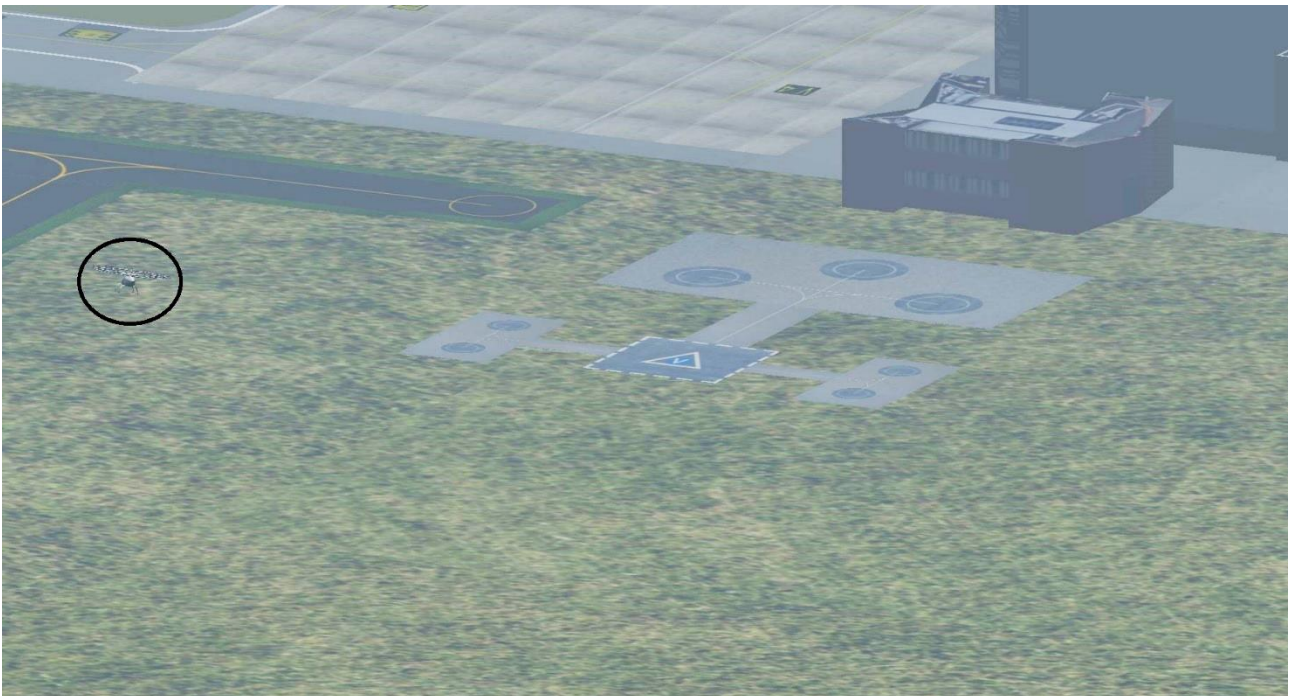


Figura 61: Animazione di una procedura di atterraggio (d)

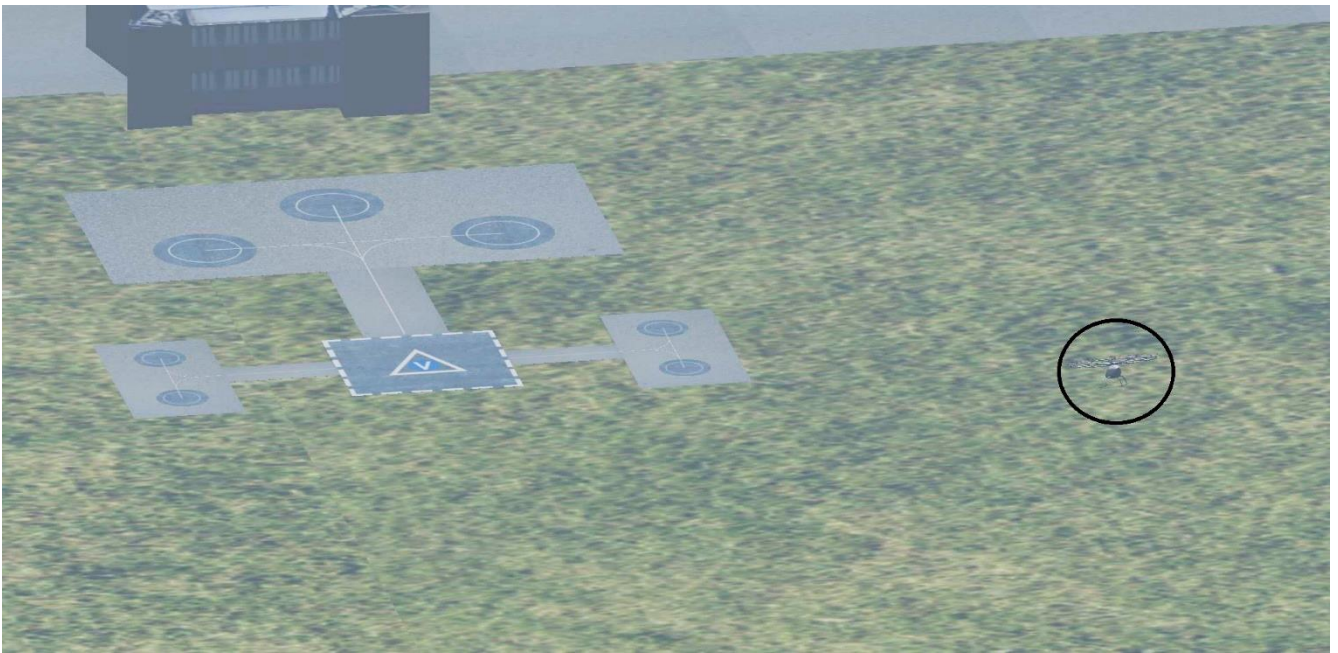


Figura 62: Animazione di una procedura di atterraggio (e)

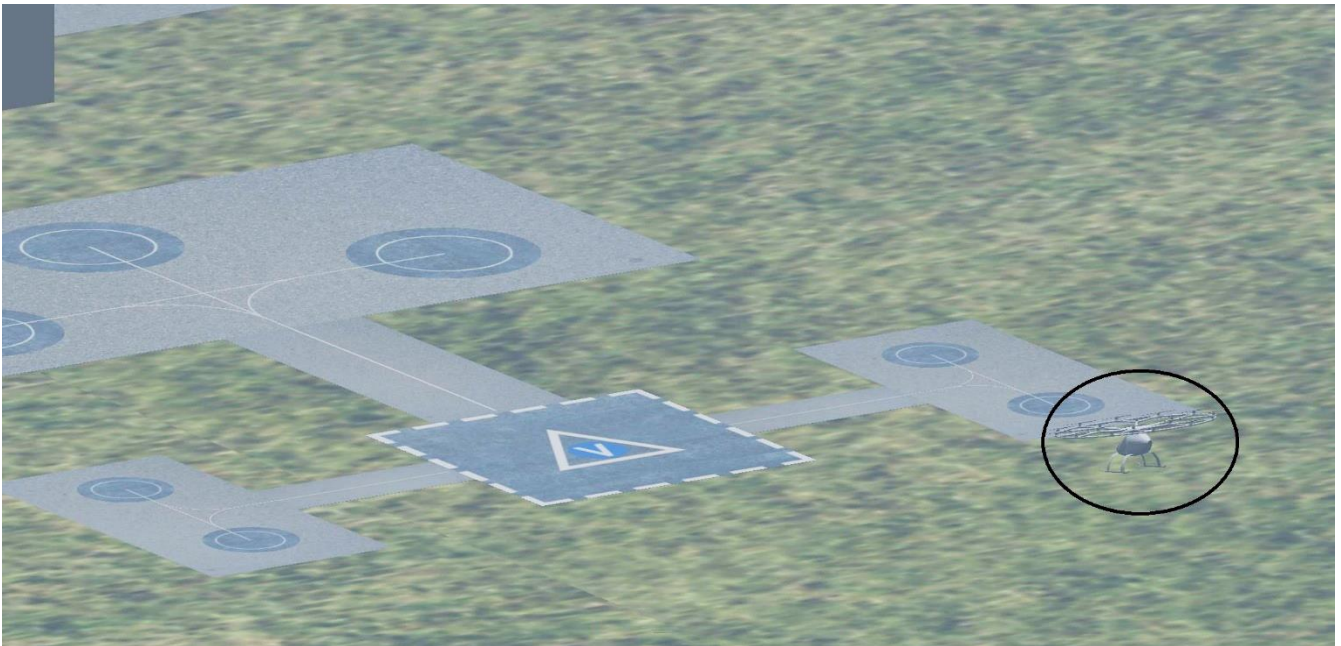


Figura 63: Animazione di una procedura di atterraggio (f)

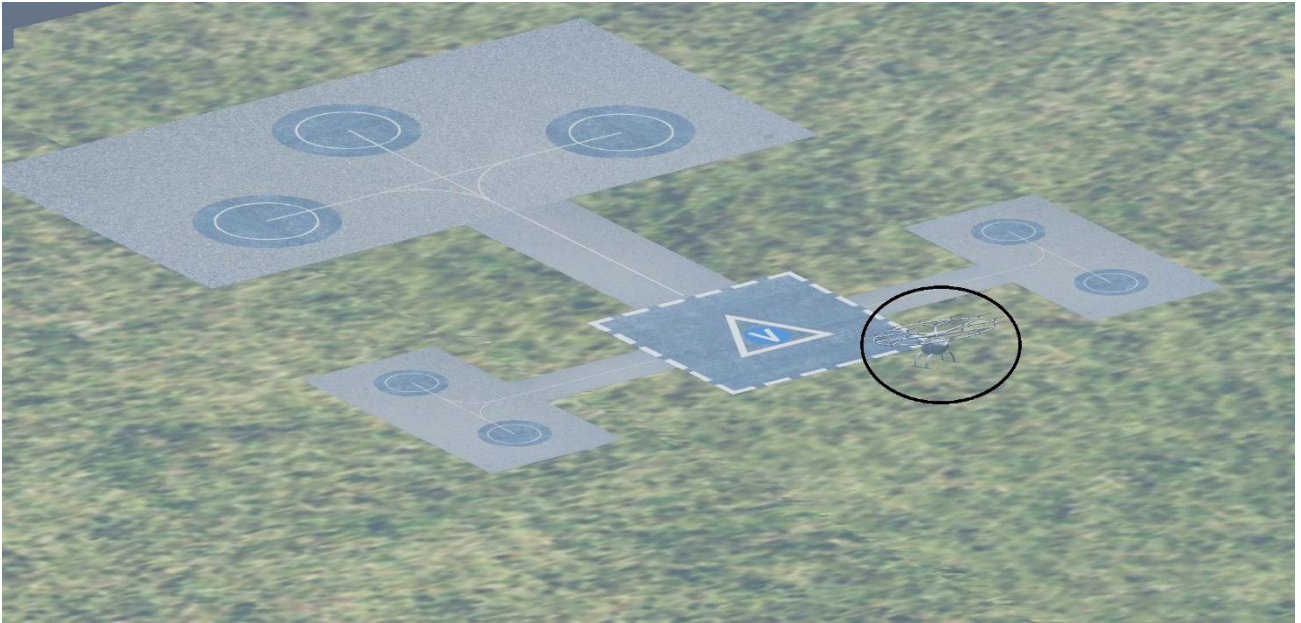


Figura 64: Animazione di una procedura di atterraggio (g)

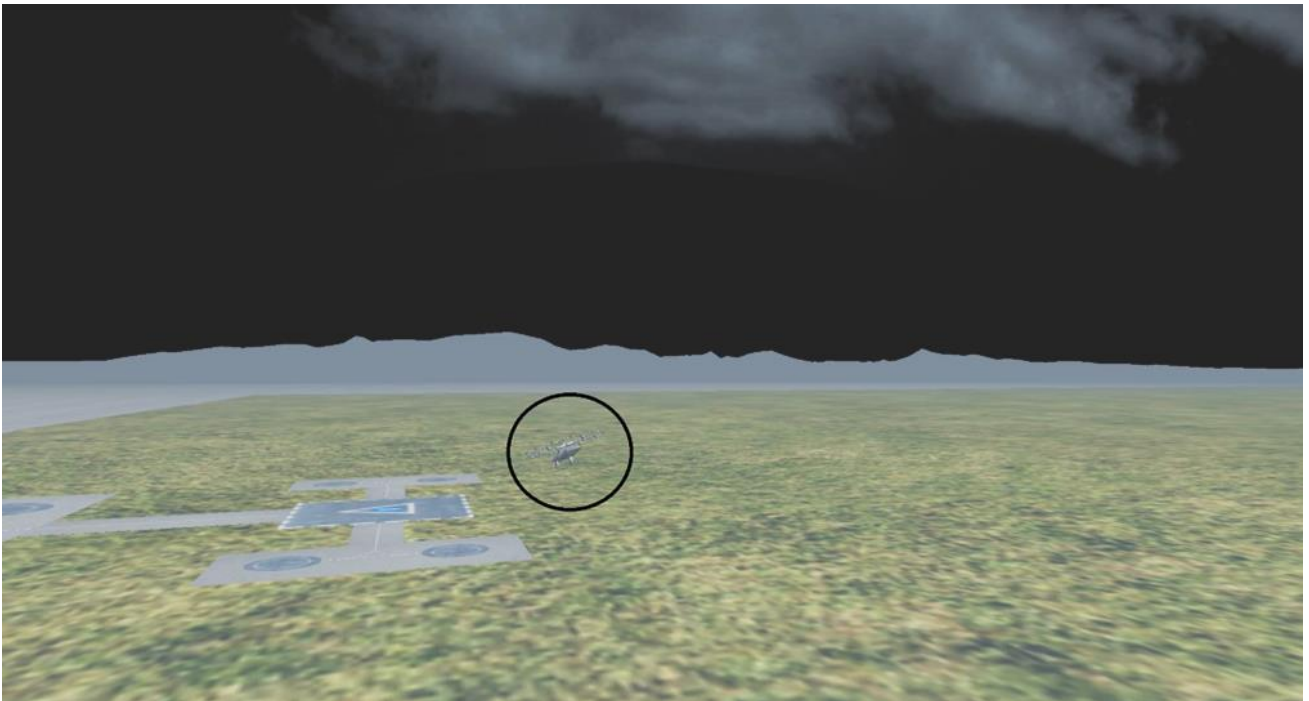


Figura 65: Animazione di una procedura di atterraggio (h)

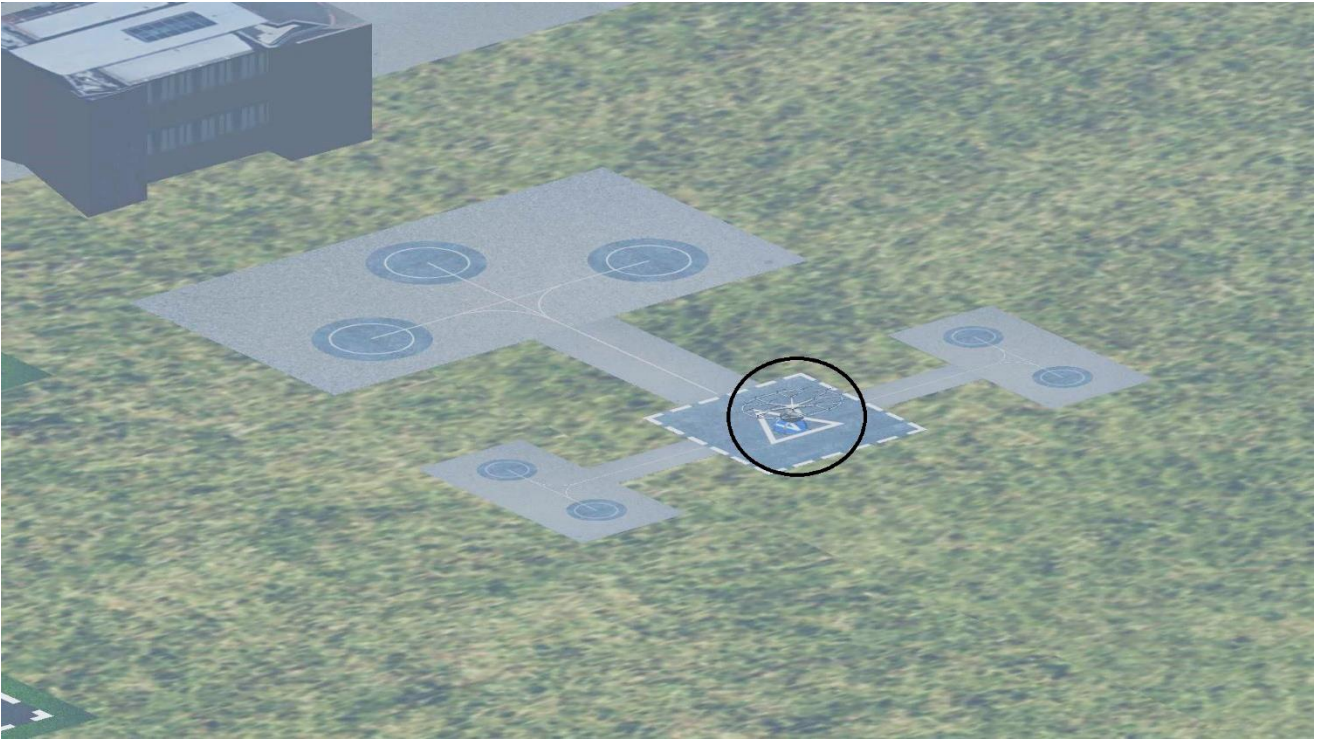


Figura 66: Animazione di una procedura di atterraggio (i)

Manovra di decollo



Figura 67: Animazione di una procedura di decollo (a)



Figura 68: Animazione di una procedura di decollo (b)

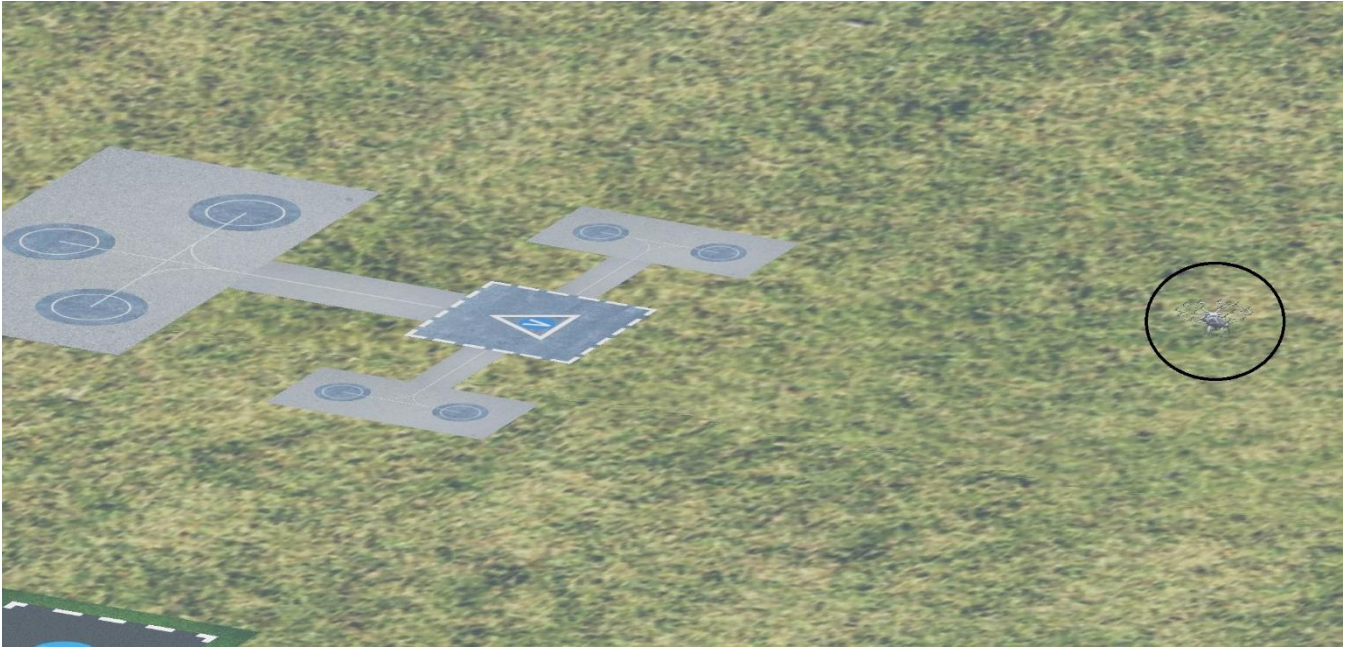


Figura 69: Animazione di una procedura di decollo (c)



Figura 70: Animazione di una procedura di decollo (d)



Figura 71: Animazione di una procedura di decollo (e)



Figura 72: Animazione di una procedura di decollo (f)

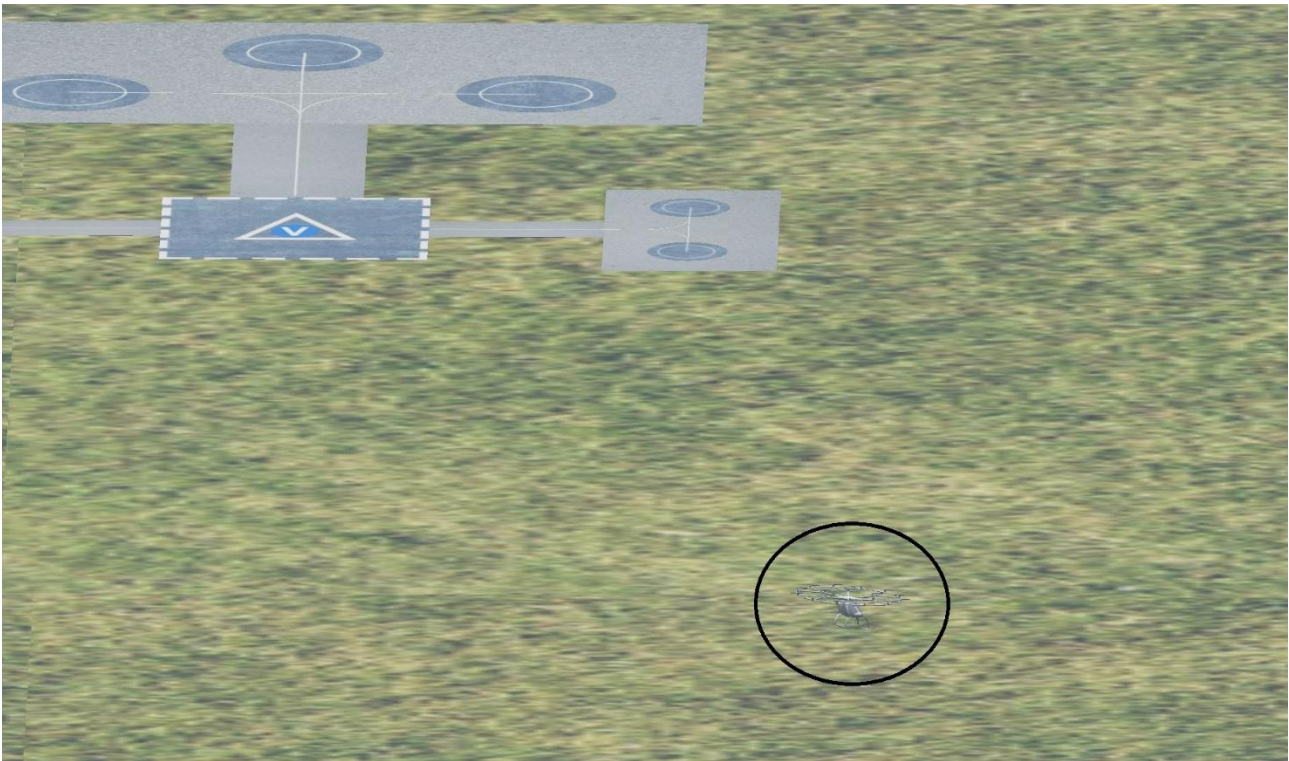


Figura 73: Animazione di una procedura di decollo (g)



Figura 74: Animazione di una procedura di decollo (h)

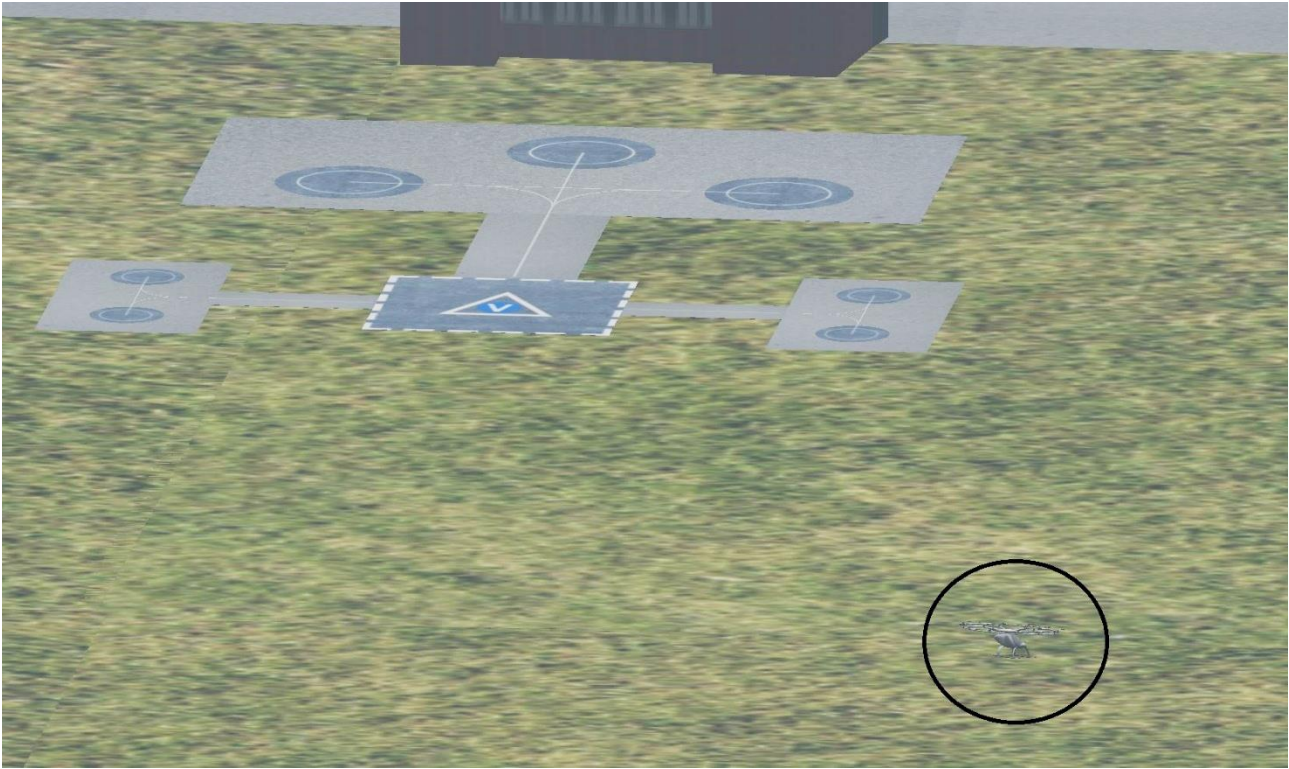


Figura 75: Animazione di una procedura di decollo (i)

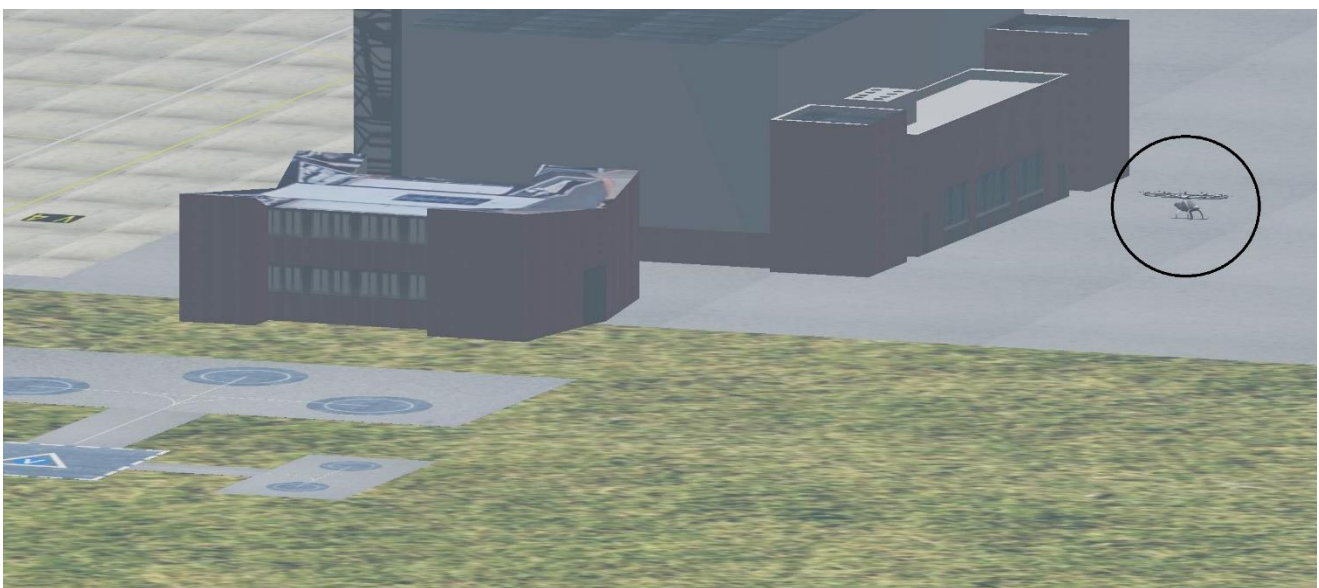


Figura 76: Animazione di una procedura di decollo (j)

7. Conclusioni

L'elaborato, esplicativo del lavoro di tesi svolto, ha presentato la modellazione di un vertiporto, da inserire all'interno di un apposito modello virtuale dell'aeroporto di Bologna, già usato in passato per simulare scenari di traffico aeroportuale, per poter espandere tale modello e adeguarlo alla simulazione futura di scenari di AAM. Prima della realizzazione del vertiporto, è stato valutato il suo posizionamento, dimensionamento e il conseguente impatto che avrebbe sul traffico aereo dell'aeroporto G. Marconi, tenendo in considerazione la normativa attualmente disponibile. In seguito, dopo aver inserito due traiettorie, una relativa al decollo e una all'atterraggio, oltre al modello di un velivolo a cui far percorrere queste traiettorie, sono state realizzate le relative animazioni; il tutto è stato possibile sfruttando le innumerevoli funzionalità del programma Blender. È da sottolineare il fatto che le stime delle traiettorie realizzate sono state molto approssimative in quanto la regolamentazione *U-Space* è ancora in fase di sviluppo a riguardo.

Lo scopo principale, che al termine del percorso può essere considerato pienamente raggiunto, è stato quello di riuscire a creare uno scenario virtuale in grado di fornire un ambiente di simulazione di *drone delivery*, il quale non era ancora stato implementato all'interno dello scenario presente nel Laboratorio di Realtà Virtuale dell'Università di Bologna. L'ambiente relativo all'aeroporto Marconi, già realizzato per intero e disponibile in laboratorio, non includeva la presenza di un vertiporto utilizzato da eVTOL di trasporto merci, né alcun tipo di simulazione di velivoli UAV nell'area cargo. Era stato solamente implementato, per mezzo di un recente lavoro di tesi, un vertiporto per velivoli adibiti al trasporto di passeggeri (gli aerotaxi). Attraverso il lavoro di tesi presentato in questo elaborato, per mezzo della modellazione di un vertiporto per *drone delivery* e dell'aggiunta di traiettorie ed animazioni, si è stati in grado di completare l'ambiente precedentemente a disposizione, consentendo così la simulazione di un numero maggiore di scenari in realtà virtuale. Avere a disposizione all'interno dell'ambiente aeroportuale due vertiporti, che assolvono alle due diverse funzioni per i quali si stanno sviluppando gli eVTOL, garantisce la possibilità di poter gestire e simulare un ambiente di UAM che, sebbene ad oggi abbia coinvolto solo voli dimostrativi e nonostante le numerose problematiche riguardo ai velivoli e alle normative, risulta essere in continua crescita e allarga sempre di più i propri orizzonti.

7.1. Sviluppi futuri

Dal momento che le tematiche affrontate nell'elaborato rappresentano, con ogni probabilità, uno degli argomenti che verranno maggiormente sviluppati in futuro, in chiave positiva per via del progresso del quale beneficerà la società mondiale, e con la consapevolezza che questa tematica entri a far parte

sempre di più della sua quotidianità, è possibile immaginare l'utilità del lavoro svolto. In particolare, questo risulta importante in quanto, non essendoci uno scenario di *drone delivery* già realizzato, ed essendo ancora agli inizi dello sviluppo di scenari di simulazioni per delivery, può essere utilizzato come riferimento per le analisi e le valutazioni attuali. Il lavoro presentato in queste pagine, inoltre, si presta inevitabilmente a future implementazioni; si riesce ad immaginarlo, ad esempio, come il punto di partenza per poter creare, successivamente, un ambiente di VR relativo all'aeroporto di Bologna ancora più completo e immersivo di quello attuale, in cui, oltre alla simulazione dell'attuale traffico aereo, si potrà implementare anche il traffico di aerotaxi e di *drone delivery*. Potrà essere integrato all'interno di piattaforme specifiche per la simulazione, come un ambiente CAVE, e adeguato all'integrazione con applicazioni di realtà aumentata, come già fatto in precedenza per testare nuove tecnologie, ad esempio in un simulatore di controllo del traffico aereo. Si può immaginare poi che una simulazione simile a quella creata, in futuro, possa essere utile, ad esempio, alle compagnie che gestiranno il traffico aereo relativo al *drone delivery*, in quanto sarà possibile così simulare rotte e traiettorie da far seguire ai propri velivoli in modo da ottimizzare il tempo di viaggio; si potrà contribuire, attraverso questa possibile applicazione, a rendere la consegna di pacchi e il generico trasporto urbano delle merci, una realtà sicura ed efficiente.

Bibliografia

- [1] *Advanced Air Mobility: What is AAM? Student Guide*, NASA, maggio 2020
https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/05/what-is-aam-student-guide_0.pdf
- [2] *Advancing Aerial Mobility: A National Blueprint*, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2020 <https://nap.nationalacademies.org/read/25646/chapter/1>
- [3] *NASA Puffin Electric Tailsitter VTOL Concept*, NASA, 13 settembre 2022
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110011311/downloads/20110011311.pdf>
- [4] *Practical Conceptual Design of Quieter Urban VTOL Aircraft*, NASA, maggio 2021
https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/77-2021-0202_Silva.pdf
- [5] *Advanced Air Mobility: il nuovo paradigma dei servizi di trasporto aereo sicuro e sostenibile*, Leonardo. Ultimo aggiornamento 2022-07-05. <https://www.leonardo.com/it/focus-detail/-/detail/advanced-air-mobility> (Consultato il 09/10/2023)
- [6] *Cosa si intende per spazio aereo*, ENAC. Ultimo aggiornamento 2022-11-15.
<https://www.enac.gov.it/spazio-aereo/spazio-aereo-definizioni-regolazione/cosa-si-intende-per-spazio-aereo> (Consultato il 12/10/2023)
- [7] SESAR Joint Undertaking, <https://www.sesarju.eu/> (Consultato il 12/10/2023)
- [8] *Comprendere come il nuovo U-space consentirà l'integrazione in sicurezza dei droni nello spazio aereo europeo*, EASA https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2023-Gen/U-space%20%282023%29%20IT_v3.0.pdf
- [9] *U-space Blueprint*, Sesar, 9 giugno 2017.
<https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20Blueprint%20brochure%20final.PDF>
- [10] *U-Space: lo spazio aereo dei droni*, ENAV. <https://www.enav.it/innovazione/lo-spazio-aereo-dei-droni> (Consultato il 12/10/2023)
- [11] Volocopter, <https://www.volocopter.com/en/solutions/volocity> (consultato il 12/10/2023)
- [12] Joby Aviation, <https://www.jobyaviation.com/> (consultato il 12/10/2023)
- [13] Beta, <https://www.beta.team/aircraft/> (consultato il 12/10/2023)

- [14] Volocopter, <https://www.volocopter.com/en/solutions/volodrone> (consultato il 12/10/2023)
- [15] *Engineering Brief No. 105, Vertiport Design*, FAA Airport Engineering Division, 21 settembre 2022. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/eb-105-vertiports.pdf>
- [16] *Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category*, EASA, Cologne, Germany, 24th of March 2023. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/prototype-technical-design-specifications-vertiports>
- [17] D-flight, https://www.d-flight.it/new_portal/ (Consultato il 14/10/2023)
- [18] *Urban/Advanced Air Mobility*, ENAC. Ultimo aggiornamento 2022-08-13. <https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/innovazione-ricerca/urbanadvanced-air-mobility> (Consultato il 14/10/2023)
- [19] *Piano nazionale degli aeroporti*, ENAC, ottobre 2022. <https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-10/Piano%20Nazionale%20degli%20Aeroporti.pdf>
- [20] Urban V, <https://www.urbanv.com/it/progetti-in-corso/> (Consultato il 14/10/2023)
- [21] Aeroporto di Bologna, 5 gennaio 2022. https://media.bologna-airport.it/System/2145694/COMUNICATO_BLQ_255_bis.pdf
- [22] Beyond AR vs. VR: What is the Difference between AR vs. MR vs. VR vs. XR? Ultimo aggiornamento 2023-07-23. Beyond AR vs. VR: What is the Difference between AR vs. MR vs. VR vs. XR? | IxDF (interaction-design.org) (Consultato il 15/10/2023)
- [23] Virtuality Continuum. Ultimo aggiornamento 2023. <https://www.interaction-design.org/literature/topics/virtuality-continuum> (Consultato il 15/10/2023)
- [24] Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995, December). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemanipulator and telepresence technologies* (Vol. 2351, pp. 282-292). Spie.
- [25] Atoms, ENAV. <https://www.enav.it/cosa-facciamo/soluzioni-mercati/air-traffic-management-atm-meteo-met/atoms> (Consultato il 15/10/2023)

Ringraziamenti

È doveroso, adesso, dedicare un piccolo spazio alle persone che hanno contribuito, in questi tre anni, a portare a termine il percorso di laurea intrapreso, dalle prime lezioni online fino agli ultimi sforzi finali, riservati alla stesura di questo elaborato.

Innanzitutto, desidero ringraziare la mia relattrice, la Professoressa Bagassi, per la disponibilità e il sostegno dimostratomi, oltre alla libertà concessami nell'impostazione del lavoro. Un sentito ringraziamento va anche ai due correlatori di questa tesi, i dottorandi Marzia Corsi e Tommaso Fadda, i quali mi hanno guidato, passo dopo passo, attraverso preziosi consigli, nella realizzazione dell'elaborato.

Il percorso portato a termine, oltre al bagaglio di conoscenze e competenze che mi ha donato, rappresenta per me molto di più. Da questo viaggio ho imparato diverse lezioni. Ho appreso la determinazione e la testardaggine di raggiungere l'obiettivo, al costo di sacrificare ogni altra cosa. Ho imparato a conoscere la fatica e il fallimento, a vedere il lato positivo in ogni sconfitta. Ho imparato a capire i propri sbagli e a cambiare i propri obiettivi. Ho imparato a adattarmi ai cambiamenti. Ho capito che non è facile sorridere dopo essere stato bocciato ad un esame, ma adesso so anche vederne il lato positivo. Ho iniziato a dare più colore alla mia vita, soprattutto quando la strada sembra essere sempre più grigia. Ho imparato a vedere le cose non solamente per come sono ma per come mi piacerebbe che fossero. Ho capito che, per quanto un percorso possa essere difficile e per quanto l'ansia e la paura spesso possano prendere il sopravvento, c'è sempre un modo per tornare ad avere il controllo: serve la felicità, quella incondizionata; serve spensieratezza e il sorriso stampato in faccia. Questo percorso mi lascia tanta forza e il desiderio di continuare a sognare, nonostante l'amarezza per aver vissuto i primi due anni in maniera non convenzionale. Dal terzo ho imparato a svegliarmi la mattina e andare a lezione felice, a saltellare durante le pause, a emanare gioia ed energia. Ho preso la coraggiosa decisione di essere di buon umore ogni giorno; ho cercato di essere felice, anche senza farlo a posta.

Ma queste consapevolezza, affrontando un percorso così arduo, arrivano solo grazie alle persone che ti sono a fianco durante il tragitto e che rendono speciale ogni singolo momento. E io ho decisamente avuto la fortuna di non essere mai solo. Per questo desidero ringraziarvi uno ad uno.

Un grazie speciale a mamma, papà e mio fratello, per avermi sempre incoraggiato a seguire il mio sogno, non importa quale, e a raggiungere l'obiettivo; per aver sempre accettato qualunque mia decisione ed esserne orgogliosi.

Grazie mamma, mia culla e rifugio quotidiano. Tu mi trasmetti amore, determinazione, passione. Ad ogni esame eri lì a tremare e a sudare con me; sei riuscita a capire, anche a 400 km di distanza, tutta la fatica che vivevo in una pesante giornata di studio. Eri con me ogni giorno, anche quando non ci sentivamo. A te che basta solo uno sguardo per capirmi (o a volte anche solo una smorfia in videochiamata), a te che spesso mi guardi e sorridi senza dire niente, grazie. La tua luce ha illuminato ogni passo di questo percorso; le tue parole di incoraggiamento e comprensione hanno ridato colore ad ogni momento buio. Grazie per avermi insegnato a non mollare e a crederci sempre.

Papà, mio modello di vita; a te che sei in grado di spronarmi anche solo con due parole e con un sorriso, grazie. Tu che mi lasci la libertà di poter scherzare con te su tutto; tu che mi hai insegnato cos'è l'autoironia, il sapersi prendere in giro, l'essere sempre di buon umore. Tu mi hai insegnato la complicità di uno sguardo, il potere di una risata e l'importanza di scherzare insieme. Mi hai insegnato ad essere umile ma al tempo stesso sicuro di me. Da te ho appreso la calma e al tempo stesso la grinta. Mi hai insegnato a credere sempre nei sogni e a lottare ogni giorno per raggiungerli. Al nostro legame speciale, che non ha bisogno di parole d'amore, grazie.

Grazie a te Michele, mia guida, mio riferimento, mia fonte d'ispirazione. Non c'è giorno che mi ricordi in cui non abbia seguito il tuo esempio. È bello partire avvantaggiati e io, grazie a te, ho avuto la fortuna di essere sempre un passo avanti. È un onore poterti guardare e vedere la versione più matura di me, poter scoprire come sarò tra 6 anni (anzi, diciamolo, tra 5 anni e 1 mese); a volte ti guardo negli occhi e intravedo una luce che brilla, la stessa che mi trasmetti ogni giorno e che mi ha dato la giusta spinta per affrontare questo percorso. Basterebbe questo per dirti grazie, ma per me sei molto di più: sei gli scatti di follia e gioia, sei le facce strane, sei la libertà di essere sé stessi. Grazie per continuare a farlo anche quando ti dico che sono stanco e non è la giornata giusta, consapevole di farmi innervosire ancora di più. Grazie per avermi insegnato ad essere follemente felice.

Grazie a tutta la mia famiglia, grande, bella, solare; a chi mi ha dato la forza attraverso abbracci o parole e a chi, vegliando su di me, si è fatto sentire ancora più forte. Grazie a tutti i miei zii e le mie zie, i cugini e i cuginetti, perché da ognuno di voi, di certo, il sostegno non è mancato; grazie, perché “allora dobbiamo andare sulla luna” non era solo una frase giocosa, ma un sogno da realizzare e che, anche grazie a voi, è diventato realtà.

Grazie nonna Concetta per l’amore che sprigionano i tuoi occhi e che vale più di mille parole. Il tuo sguardo mi avvolge e mi riscalda. Grazie per incoraggiarmi sempre, per applaudire e ballare insieme a me ogni volta che mi vedi; grazie per essere felice qualunque cosa faccia.

Grazie nonna Maria, tu che mi hai cullato e tranquillizzato lungo tutto il tragitto; tu che ti trasformavi in un arcobaleno in grado di sprigionare colori, gioia ed emozioni ogni volta che superavo un esame. Il calore delle tue mani rimarrà stampato sulle mie, il tuo sorriso nella mia mente. Mi hai insegnato a sorridere, anzi, a ridere sempre, per il puro gusto di farlo. Tu che sei fiera di me, del tuo ingegnere... emh, aspetta... ah sì... spaziale. Grazie.

Grazie agli amici di sempre, per esserci stati in ogni momento, per accettarmi e apprezzarmi per quello che sono, per darmi la possibilità di essere completamente me stesso. Con voi mi sento libero di essere Usmo al 100%. Grazie per avermi consegnato il dono della risata.

Grazie ai colleghi dell’università; voi avete reso il viaggio decisamente meno faticoso. In particolare, grazie a Gianluca, l’amico a cui hai dedicato un posto speciale dentro di te. Conoscerti, purtroppo su WhatsApp, è stato un po’ come ritrovare un pezzo di casa all’interno di un ambiente ostile e nuovo. Grazie per essere riuscito a regalarmi una risata in qualsiasi momento e circostanza. Abbiamo sudato (letteralmente) agli stessi esami e respirato lo stesso terrore nell’aria. Sei riuscito a non farmi sentire solo in alcun momento; mi hai dato la forza di lottare per ogni risultato raggiunto e per questo ti ringrazio.

Grazie agli amici di atletica, perché spesso nelle giornate più dure non vedevo l’ora di regalarmi quelle due ore di totale spensieratezza, in un posto magico nel quale ci sentivamo tutti un po’ a casa. Grazie in particolare ad Elena e Marco, per aver portato il nostro legame al di fuori del campo e per avermi dato una splendida via di fuga dalla routine quotidiana.

Infine, grazie a me stesso, per convincermi ogni giorno di odiare la banalità e le frasi fatte, di amare l’originalità. Grazie per essere stato convinto, per anni, che una volta arrivato il tuo momento non

avresti scritto i soliti ringraziamenti scontati e strappalacrime come fanno tutti; eri convinto che non avresti detto frasi come “grazie per essere stato al mio fianco nei momenti più bui”. Ebbene Francesco, grazie per avermi insegnato che sulla coerenza bisogna ancora lavorarci.

Insomma, grazie a tutti: a chi c'è da sempre e a chi ho perso per strada, a chi non se ne andrà mai e a chi è passato anche solo per un sorriso alla fermata dell'autobus. Grazie, perché ogni giorno mi sento una persona migliore, ed è solo grazie a voi.