

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria del
Cinema e dei Mezzi di Comunicazione

Tesi Magistrale

Fréjus VR

Sull'uso della Realtà Virtuale per lo Studio dei
Comportamenti Umani in Situazioni d'Emergenza



Relatori

Prof. Sanna Andrea
Prof. Lamberti Fabrizio
Prof. Borchellini Romano

Billi Michele

Ottobre 2017

Fréjus VR

Sull'uso della Realtà Virtuale per lo Studio dei Comportamenti
Umani in Situazioni d'Emergenza

Billi Michele

Realtore

Prof. Sanna Andrea, DAUIN

Co-Relatori

Prof. Lamberti Fabrizio, DAUIN

Prof. Borchiellini Romano, DENERG

Sommario

La Realtà Virtuale (VR), sin dalla sua comparsa, ha giocato un ruolo importante nello sviluppo di strumenti di formazione sempre più efficaci rispetto a quelli del passato. I simulatori di formazione potrebbero fornire all'utente inesperto un ambiente virtuale realistico, immersivo e sicuro, progettato per riprodurre con precisione uno scenario specifico con l'obiettivo di informare, formare e valutare. Questo documento mira a parlare della realizzazione di un strumento il cui scopo è quello di comunicare all'utente le procedure generali di emergenza relative a uno particolare scenario, ovvero un incendio che si sviluppa a partire da un veicolo pesante e si sviluppa all'interno del tunnel stradale di Fréjus.

Approfittando della collaborazione con l'Ente gestore del tunnel e sottoponendo un piano di valutazione, il documento fornisce anche un'analisi approfondita dei dati allo scopo di valorizzare la piattaforma sviluppata.

Ringraziamenti

Innanzitutto, desidero ringraziare i miei relatori, il Prof. Andrea Sanna, il Prof. Lamberti Fabrizio e il Prof. Romano Borchiellini per il costante supporto, la guida, la disponibilità e le parole di incoraggiamento che hanno profuso durante tutta la fase di sviluppo del progetto di Tesi.

Voglio anche esprimere la mia gratitudine a tutti i dipendenti SiTi, in particolare modo per Sergio Olivero, Massimo Migliorini, Alessandra Filieri, Valentina Dolci e Francesco Moretti, per il supporto logistico, organizzativo, tecnologico, tecnico, morale, ma soprattutto alimentare fornito durante i mesi trascorsi con loro.

Un ringraziamento particolare va Davide Calandra, compagno di viaggio instancabile con cui ho condiviso il fardello, le ansie, le notti insonni ma soprattutto le gioie che questo percorso ha comportato. Una grazie va anche a tutti i colleghi, e i professori che mi hanno accompagnato in questi 4 anni che mi hanno fatto scoprire e approfondire le mie passioni.

Grazie al collegio Universitario San Giovannino che mi ha ospitato in questi anni da studente fuori sede.

Grazie ai miei amici, vicini ma soprattutto lontani per le risate che hanno alleggerito i momenti difficili di questo percorso.

Infine grazie ai miei genitori, senza la quale oggi non sarei qua, alla mia famiglia, e a mia sorella Chiara a cui faccio un in bocca la lupo per la sua carriera universitaria.

Indice

1	Introduzione	17
1.1	Sicurezza nei trafori autostradali	17
1.2	Motivazione	17
1.2.1	SiTI - Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l’Innovazione	18
1.3	Scopo della Tesi	18
2	Caso di Studio	21
2.1	Scenari incidentali in galleria	21
2.1.1	Cause	21
2.1.2	Diffusione	22
2.1.3	Prodotti della combustione ed effetti sul corpo umano	22
2.1.4	Comportamento utente	23
2.2	Incidenti gravi avvenuti in trafori autostradali	23
2.2.1	Traforo del Monte Bianco (1999)	24
2.2.2	Traforo del San Gottardo (2001)	24
2.2.3	Traforo del Fréjus (2005, 2010)	24
2.3	Il Traforo autostradale del Fréjus	25
2.3.1	Struttura originale (1980)	25
2.3.2	Tunnel di sicurezza (2009)	27
2.3.3	Conversione del tunnel di sicurezza in seconda canna per il transito (2012-2019)	27
3	Stato dell’Arte	29
3.1	Realtà Virtuale come strumento di addestramento	29
3.2	Tecnologie e strumenti VR	29
3.2.1	Schermi montati sulla testa (HMD)	29
3.2.2	Controller a guanto	32
3.2.3	Locomozione	32

3.2.4	Cyberith Virtualizer	33
3.3	Serious Gaming e simulazioni di incendio	34
3.3.1	Un simulatore di formazione d'incendio basato VR integrato con i dati relativi alla dinamica di sviluppo (M. Cha, S. Han, J. Lee, B. Choi)	34
4	Design dello Scenario	37
4.1	Definizione dello scenario	38
4.2	Definizione di uno Storyboard	39
4.3	Modellazione 3D	46
4.3.1	Modellazione degli effetti fisici	46
4.3.2	Modellazione delle sorgenti Audio	46
4.3.3	Audio 3D	48
4.3.4	Modellazione 3D delle sorgenti di incendio	51
4.3.5	Modellazione del fenomeno di propagazione delle fiamme	51
4.3.6	Modellazione delle interazioni	52
4.3.7	Progettazione di sistemi di locomozione	52
4.3.8	Strumenti aggiuntivi	53
5	Sviluppo del Progetto	55
5.1	Acquisizione Informazioni necessarie	55
5.1.1	Ricerche preliminari	55
5.1.2	Contatti con gli operatori di sicurezza	55
5.1.3	Contatti con SITAF	56
5.2	Realizzazione	60
5.2.1	Segmentazione del Tunnel	60
5.2.2	Modellazione delle Fiamme	63
5.2.3	Modellazione dei Veicoli	65
5.2.4	Gestione dell'illuminazione	67
5.3	Sound Design	69
5.3.1	Tabella delle sorgenti sonore	71
5.4	Implementazione dei metodi di interazione	71
5.4.1	Iterazione con personaggi non giocabili (NPC)	72
5.5	Implementazione dei metodi di locomozione	73
5.5.1	Supporti per i Tracker	74
5.6	Interfaccia Utente	75

5.7	Tool Aggiuntivi	75
6	Valutazione	77
6.1	Introduzione	77
6.1.1	Usabilità	77
6.1.2	Malattia del Movimento	78
6.2	Metodo	79
6.3	Soggetti	80
6.4	Supporti	80
6.4.1	Presentazioni	80
6.4.2	Questionario VRUSE	80
6.4.3	Questionario per la malattia da simulazione (SSQ)	82
6.5	Procedura	83
6.6	Risultati	85
6.6.1	Osservazioni Generali	85
6.6.2	Analisi dei dati sulla locomozione	93
6.6.3	Analisi dei dati per partecipanti	101
6.6.4	Comportamento Utente	103
7	Conclusioni e Sviluppi Futuri	107
7.1	Conclusioni	107
7.2	Sviluppi Futuri	109
A	Simulation Questionnaire	111
A.1	Personal Data	111
A.2	Before simulation	111
A.2.1	Background Knowledge	111
A.2.2	Sickness	111
A.3	After simulation	112
A.3.1	Functionality	112
A.3.2	Locomotion	113
A.3.3	Interaction with objects	113
A.3.4	Sickness	114
A.3.5	Flexibility	114
A.3.6	Simulation fidelity	115

A.3.7	Sense of immersion and presence	115
A.3.8	Overall system usability	116
A.3.9	Simulation report	116
B	SSQ Evaluation	117
B.1	The calculations in the SSQ	117
B.1.1	Weights for Symptoms	117
B.1.2	Score	118

Elenco delle figure

1.1	Main Menu of FrejusVR	19
3.1	HTC® Vive™ HMD con controller e stazioni base	30
3.2	HTC® Vive™ Tracker con supporto per essere fissato alle gambe	31
3.3	Oculus Rift HMD	32
3.4	Pedana Cyberith Virtualizer, integrata con HTC® Vive™	33
4.1	Brochure ufficiale contenete le norme di sicurezza da mantenere all'interno del traforo	39
4.2	Storyboard - Pagina 1	41
4.3	Storyboard - Pagina 2	42
4.4	Storyboard - Pagina 3	42
4.5	Storyboard - Pagina 4	43
4.6	Storyboard - Pagina 5	43
4.7	Storyboard - Pagina 6	44
4.8	Storyboard - Pagina 7	44
4.9	Storyboard - Pagina 8	45
4.10	Tunnel versions comparison (before and after the on-site expedition).	47
4.11	Disposizione tipica delle sorgenti sonore in un impianto audio surround	48
4.12	Rappresentazione grafica sorgente audio 3D	48
4.13	Rappresentazione grafica della prossimità e del salto temporale	49
4.14	Misurazioni HRTF mediante manichino	50
4.15	Sintesi Binaurale	50
4.16	Scena dimostrativa del realismo Ultra Real Fire Effects Volume 1 rilasciato da Ultra Real	51
4.17	Dimostrazione del motore di calcolo Simple Fire Engine rilasciato da Mike Boere	52
5.1	Confronto resa grafica/foto del tunnel visto dalla piazzola di sosta	57

5.2	Confronto resa grafica/foto dell'entrata al rifugio s18	58
5.3	Confronto resa grafica/foto del rifugio s18	58
5.4	Confronto resa grafica/foto dell'entrata al rifugio A7	58
5.5	Confronto resa grafica/foto del pulsante SOS	59
5.6	Confronto resa grafica/foto della nicchia d'emergenza numero 50	59
5.7	Confronto resa grafica/foto dell'attrezzatura present nella nicchia	59
5.8	Confronto resa grafica/foto segnaletica rifugio più vicino	63
5.9	Confronto resa grafica/foto cartello sulle norme di comportamento	64
5.10	Confronto resa grafica/foto segnaletica rifugio più vicino	64
5.11	Esempio di utilizzo del particellare delle fiamme	65
5.12	Camion	66
5.13	Macchina utente	67
5.14	Camion	68
5.15	Sintesi Binaurale	70
5.16	Sintesi Binaurale	71
5.17	3D-printed support for the leg tracking device	74
5.18	Rendering of the support for the leg Controller on the left, Support adapted to work with Tracker on the right	74
6.1	Distribuzione dei partecipanti	80
6.2	Conoscenze pregresse degli utenti	81
6.3	un utente mentre prende dimestichezza con le iterazioni dello scenario	84
6.4	Risposte sulla Funzionalità	85
6.5	Confronto Punteggi Chinetosi Prima e Dopo la Simulazione	86
6.6	Durata della simulazione per singolo utente	86
6.7	Confronto risposte sulla Chinetosi prima e dopo la simulazione (parte 1)	87
6.8	Confronto risposte sulla Chinetosi prima e dopo la simulazione (parte 2)	88
6.9	Risposte sulla Locomozione	89
6.10	Risposte sulle Interazioni con Oggetti	90
6.11	Risposte sulla Flessibilità	90
6.12	Risposte sulla Fedeltà della Simulazione	91
6.13	Risposte sul Senso di Immersione e Presenza	92
6.14	Risposte sull'Usabilità generale del Sistema	93

6.15	Valutazione medie relative alla Funzionalità confrontando i metodi di Locomozione	95
6.16	Valutazione medie relative alla Locomozione	96
6.17	Valutazione medie relative all'Interazione con Oggetti confrontando i metodi di Locomozione	97
6.18	Valutazione medie relative alla Chinetosi confrontando i metodi di Locomozione	97
6.19	Valutazione medie relative alla Flessibilità confrontando i metodi di Locomozione	98
6.20	Valutazione medie relative alla Fedeltà di Simulazione confrontando i metodi di Locomozione	99
6.21	Valutazione medie relative al Senso di Immersione e Presenza confrontando i metodi di Locomozione	100
6.22	Valutazione medie relative all'Usabilità complessiva del sistema confrontando i metodi di Locomozione	101
6.23	Valutazione medie relative alla Chinetosi confrontando i partecipanti	102
6.24	Valutazione medie relative al Senso di Immersione e Presenza confrontando i partecipanti	102
6.25	Valutazione medie relative all'Usabilità complessiva del sistema confrontando i partecipanti	102
6.26	Comportamento Utente	103
6.27	Andamento Utente	104
6.28	Valutazione medie relative al Comportamento utente confrontando i metodi di Locomozione	105
6.29	Valutazione medie relative al Comportamento utente confrontando i partecipanti	105

Elenco delle tabelle

2.1	Lista dei messaggi trasmessi via radio	28
4.1	Procedure generali da seguire in fase di marcia	40
4.2	Procedure generali in caso di incidente	40
5.1	Sezione Tunnel Default	60
5.2	Sezione Tunnel Nicchia	61
5.3	Sezione Tunnel con rifugio	62
5.4	Sezione Tunnel SOS	62
5.5	Veicoli	66
5.6	Tracce audio utilizzate per ricreare l'ambiente	72
5.7	Interazioni disponibili all'interno del Tunnel	72
5.8	Interazioni disponibili all'interno del proprio veicolo	73
6.1	Fattori chiave di usabilità e obiettivi	82

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Sicurezza nei trafori autostradali

La sicurezza nei tunnel stradali è uno degli aspetti più critici in materia di gestione delle infrastrutture stradali; le gallerie sono elementi essenziali per i paesi in cui le reti stradali devono affrontare grandi ostacoli oro-geografici come catene montuose o colline. Considerando le particolari caratteristiche del tunnel, come la presenza di spazi confinati, la mancanza di sorgenti luminose non artificiali e le difficoltà sia di intervento che di evacuazione, la conseguenza logica è un investimento significativo e continuo per migliorare i dispositivi di sicurezza, le procedure di emergenza e i metodi di comunicazione per gli utenti e il personale.

A livello europeo, la direttiva 2004/54/EC stabilisce i requisiti obbligatori per tutte le gallerie incluse nella rete stradale trans europea.

Poi a livello nazionale ci sono paesi, come l'Italia, che registrano le percentuali più elevate di gallerie stradali a causa della morfologia del territorio; ciò incoraggia le amministrazioni di questi paesi a prevedere ulteriori progetti o iniziative a proprio carico o, in caso di infrastrutture transfrontaliere, in collaborazione con i paesi limitrofi al fine di migliorare le misure comunitarie.

1.2 Motivazione

Questa tesi è il risultato della collaborazione tra Politecnico di Torino e SiTI¹, svoltasi nel contesto del progetto europeo PRODIGE². Il sopra citato progetto è il risultato di una cooperazione tra le autorità Francesi e Italiane sulla gestione delle emergenze, realizzato con il patrocinio dell'Unione Europea e che può vantare come soci attivi il comune di Torino, SiTI, il comune di Cuneo, e il comando francese dei Vigili del Fuoco (SDIS04³).

L'acronimo di PRODIGE significa proteggere i cittadini, difendere le infrastrutture, gestire eventi importanti; è un compito difficile e le autorità incaricate della gestione

¹Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione

²Proteggere i cittadini, Difendere le Infrastrutture, Gestire i grandi eventi

³Service Départemental d'Incendie et de Secours

delle emergenze, come la protezione civile, i vigili del fuoco e le squadre di salvataggio, devono affrontarle ogni giorno, in un ambiente ostile segnato dai cambiamenti climatici e dalla crescente pressione antropica sul territorio e sulle infrastrutture.

Al fine di garantire l'efficacia delle Autorità precedentemente citate, è obbligatorio garantire un'efficace gestione degli operatori, assicurando anche il coordinamento delle squadre sul campo sia a livello nazionale che a livello transfrontaliero.

Nell'ambito di questo progetto molti sono stati sviluppati molti strumenti innovativi basati sulla tecnologia della realtà virtuale (VR, Virtual Reality). Queste soluzioni sono state rese disponibili per facilitare la transizione verso un nuovo approccio basato sull'unione di tecnologia, gestione e formazione.

L'obiettivo è quello di realizzare una piattaforma di realtà virtuale che insieme ad un sistema di raccolta dati sul territorio e una comunicazione costante con la popolazione possa migliorare la prevenzione dei rischi e la gestione delle emergenze. Per fare ciò si parte migliorando la formazione e l'addestramento degli operatori di protezione civile in Italia e in Francia e aumentando e facilitando la cooperazione nella risposta operativa.

Inizialmente sono stati lanciati quattro scenari pilota, ognuno caratterizzato da tecniche specifiche, per dimostrare i benefici principali che possono scaturire dall'utilizzo di tecnologia VR:

- Esondazione presso il parco fluviale Gesso e Stura in provincia di Cuneo;
- Alluvione e incidente stradale presso Saint-Paul-Sur-L'ubaye;
- Sversamento di sostanze chimiche nell'area del Colle della Maddalena;
- Incidente aeroportuale con formazione di nube tossica che investe un'area affollata.

Sebbene FréjusVR non faccia ufficialmente parte della lista, alcune attività sono state condotte in maniera da coadiuvare lo sviluppo e l'affinamento del primo e dell'ultimo scenario.

1.2.1 SiTI - Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione

SiTI è un'Associazione senza scopo di lucro, costituita nel 2002 da Politecnico di Torino e Compagnia di San Paolo, che svolge attività di ricerca e formazione orientate all'innovazione e alla crescita socio-economica.

Le sue attività si concentrano nel settore della logistica e dei trasporti, del patrimonio ambientale, della riqualificazione urbana e della sicurezza del territorio.

1.3 Scopo della Tesi

Il lavoro svolto si è concentrato sulla realizzazione di un serious game in uno scenario VR rappresentativo di una situazione d'emergenza all'interno del tunnel di Fréjus

(Figure 1.1); la situazione pericolosa in questione è un incendio massiccio, causato da un camion incidentato, che si sviluppa e propaga dal camion al tunnel.

A differenza dei quattro scenari principali sviluppati per PRODIGE, FréjusVR non è orientato all'operatore; infatti il pubblico di destinazione sono i civili, ovvero un utente del tunnel o "turista". L'obiettivo principale consiste nel comunicare alle persone le procedure da seguire per tutelare la loro sicurezza durante l'emergenza, facendo direttamente "vivere" loro la situazione e le conseguenze delle loro azioni.

Tra i risultati attesi del progetto, la dimostrazione dei vantaggi effettivi che la tecnologia VR può portare nei processi di gestione delle emergenze, con particolare riferimento alle tecniche di comunicazione ed applicazione delle procedure di sicurezza verso i cittadini, con l'obiettivo di ridurre al minimo i rischi per le persone e massimizzare l'efficacia delle operazioni delle Autorità preposte all'intervento.



Figura 1.1: Main Menu of FrejusVR

Capitolo 2

Caso di Studio

2.1 Scenari incidentali in galleria

Parlando di procedure antincendio, è convinzione diffusa che gli incendi in spazi confinati non siano particolarmente difficili da gestire in confronto ad altri tipi di eventi come i grandi incendi boschivi; seppur vera in parte, questa affermazione perde totalmente di valenza quando si tratta di incendi all'interno di tunnel.

Questo tipo di eventi può avere cause diverse e può diventare molto difficili da gestire in caso di mancanza di misure di sicurezza o di comportamenti sbagliati da parte dell'utente. Sono casi di studio interessanti in quanto ampiamente studiati dal corpo dei Vigili del fuoco. A partire dalle ricerche preliminari effettuate sull'argomento, è stato appurato che la causa principale di propagazione del fuoco nei tunnel è l'irraggiamento, favorito dalle altissime temperature che si sviluppano in pochi minuti ed al chiuso. In questo tipo di contesto il fuoco si può propagare ai veicoli adiacenti senza che ci sia bisogno di un contatto diretto con le fiamme. A queste temperature diventa presto impossibile anche solo avvicinarsi al punto di innesco, ed in caso di vento nel tunnel sia il calore che il gas si propagano molto velocemente nella stessa direzione, rendendo rischioso anche il ripararsi nei rifugi più vicini al fronte di fiamma. Per questo motivo spesso i soccorritori si limitano a mettere in salvo gli individui rimasti bloccati all'interno del tunnel, prima facendoli confluire nei rifugi in modo da evitare intossicazioni, poi evacuandoli tramite veicoli appositi o gallerie di emergenza prima che i rifugi stessi diventino insicuri, ed infine si attende che l'incendio perda di intensità prima di potersi avvicinare per intervenire. Una popolazione consapevole si rivela quindi fondamentale per coadiuvare l'intervento degli operatori preposti.

2.1.1 Cause

Le cause degli incendi all'interno delle gallerie, in particolare dei tunnel stradali, sono varie; nella maggior parte dei casi coinvolgono veicoli pesanti come, ad esempio, camion e questo amplifica il rischio a causa dei loro carichi infiammabili. Il fuoco può provenire da un malfunzionamento del motore, da una collisione tra veicoli, da una perdita di carburante o anche da fattori (ad esempio, una sigaretta gettata fuori dalla finestra).

Una volta innescato, la temperatura del fuoco inizia a crescere fino a quando dispone di carburante e ossigeno per auto alimentarsi; essendo il tunnel un ostacolo per la dispersione di calore, la temperatura può raggiungere picchi di 1000° , fondendo l'asfalto e facendo collassare la struttura del tunnel stesso. Per questo motivo un incendio tunnel può bruciare per ore, se non giorni, prima di essere raggiungibile dalle le squadre di fuoco.

2.1.2 Diffusione

Come accennato in precedenza, il fuoco può crescere rapidamente fino a diventare incontrollabile. In primo luogo, il fuoco si sparge dal punto di accensione all'intero veicolo bruciando i componenti infiammabili.

Quindi, l'alta temperatura dei gas prodotta fa sì che l'oggetto più vicino prenda fuoco attraverso il fenomeno dell'irraggiamento; questo è il modo in cui il fuoco del tunnel può successivamente colpire uno per uno tutti gli altri veicoli, irradiandosi attraverso il tunnel lungo la direzione del vento.

2.1.3 Prodotti della combustione ed effetti sul corpo umano

Per tutta la durata dell'incendio, molti combustibili vengono prodotti continuamente e questi hanno un enorme impatto sulla sopravvivenza delle persone coinvolte. Ci sono quattro tipi principali di prodotti di combustione: calore, fiamme, gas e fumo.

- Il calore è l'ostacolo maggiore quando si tratta di passare attraverso il tunnel in caso di incendio; il corpo umano non può resistere per più di cinque minuti con una temperatura di 150° , e anche le protezioni antincendio non possono garantire un isolamento completo o durevole[12]. Questo, insieme alle temperature estreme raggiunte dagli incendi in spazi confinati, può isolare intere sezioni del tunnel, rendendo inutile ogni sforzo per salvare le persone all'interno.
- Le fiamme sono fonti di emissione di calore e di luce generati dal bruciare di materiale combustibile, possono propagare il fuoco per contatto con altri combustibili e sono caratterizzati da un colore utile per stimare la temperatura relativa. La maggior parte delle protezioni antincendio hanno una resistenza molto limitata al contatto diretto con fiamme (di solito secondi).
- I gas prodotti dalla combustione sono numerosi, e dipendono dal tipo di combustibile coinvolto nella combustione; possono anche essere estremamente tossici e possono contribuire alla diffusione spostando enormi quantità di calore attraverso il tunnel.
- Il fumo, invece, è composto da piccole particelle solide non bruciate, che annullano la visibilità all'interno del tunnel e causano gravi sintomi a coloro che sono esposti, tra cui difficoltà respiratorie e ustioni al viso, alla pelle e al sistema respiratorio. Sebbene gli operatori non possano fare nulla per la visibilità, gli altri effetti del fumo possono essere evitati indossando attrezzature speciali come maschere o apparecchi respiratori.

2.1.4 Comportamento utente

In caso di emergenza, l'utente, se costretto a prendere decisioni in poco tempo, cede al panico e allo stress. Ciò potrebbe portare a decisioni sbagliate, in un comportamento errato che può mettere in pericolo se stesso e altre persone, nonché rendere ancora più arduo il già difficile intervento degli organi di intervento.

Tra i comportamenti non raccomandati, l'utente non dovrebbe.

- ignorare l'opuscolo consegnato all'ingresso contenente le norme di comportamento
- viaggiare lungo il traforo con la radio spenta
- rimanere nel proprio veicolo anche se incitati ad abbandonarlo da opuscolo e messaggio radio;
- in presenza di fumo e poca visibilità, cercare di superare un veicolo fermo in fiamme sulla propria corsia occupando la corsia opposta;
- passare vicino ad un veicolo in fiamme, spostando il flusso d'aria e alimentando la combustione;
- una volta usciti dalla vettura, ignorare pulsanti o telefoni SOS (molto pericoloso in passato quando non erano disponibili sistemi di rilevamento automatico di incidente e questi strumenti erano l'unico modo per dare l'allarme);
- uscire da un luogo sicuro una volta già dentro;
- fermare la propria auto troppo vicina ad altri veicoli;
- non segnalare la sosta ad altri veicolo che potrebbero sopraggiungere attivando le luci di emergenza;
- lasciare il motore acceso prima di abbandonare l'auto (il veicolo potrebbe prendere fuoco più facilmente).

Alcuni di questi comportamenti sbagliati hanno avuto un ruolo in alcuni degli eventi studiati e descritti nella sezione seguente.

2.2 Incidenti gravi avvenuti in trafori autostradali

Come accennato in precedenza, i grandi incendi sono le situazioni più pericolose dal punto di vista sia degli utenti che delle squadre di salvataggio. Per questo motivo, questi eventi sono sempre stati studiati e analizzati in modo diffuso per trovare i fattori coinvolti nell'origine, nell'evoluzione e nell'esaurimento del fenomeno. Il numero di eventi è molto vasto, quindi la ricerca si è concentrata su un insieme limitato di casi rappresentativi del vicino passato.

2.2.1 Traforo del Monte Bianco (1999)

Questo evento è stato probabilmente il più grave nella storia recente in termini di perdita di vite umane. Il 24 marzo 1999 un autocarro pesante prese fuoco nel tunnel del Monte Bianco e il grande incendio provocato dal veicolo ha causato la morte di 39 persone.

Il camion, carico di farina e margarina, stava viaggiando dalla Francia all'Italia. Il conducente, dopo aver notato le fiamme provenienti dal proprio veicolo, si fermò e cercò inutilmente di spegnere il fuoco iniziale. Il fuoco, alimentato dal carico del camion e amplificato dal tunnel stesso, raggiunse una temperatura estrema di 1000° che ha sciolto l'asfalto e ha causato il crollo del soffitto.

Il comportamento umano ha anche contribuito al peggioramento della situazione[19]. L'operatore responsabile per il controllo del sistema di ventilazione ha iniziato a pompare aria fresca per aiutare le persone all'interno di una metà del tunnel; facendo questo, ha anche diretto il fumo caldo verso la gente bloccata nell'altra metà, mentre allo stesso tempo ha alimentato il fuoco massiccio con l'ossigeno.

Inoltre, i veicoli sono stati ammessi ad entrare nel tunnel anche dopo l'innescò del camion, e i rifugi di emergenza non hanno resistito alle alte temperature raggiunte all'interno del tunnel. Ci sono voluti tre anni e centinaia di milioni di euro per rendere nuovamente operativo il tunnel stradale e la ristrutturazione ha portato un enorme miglioramento alle misure di sicurezza.

2.2.2 Traforo del San Gottardo (2001)

Il 24 ottobre 2001 alle 9.30 avviene una tragica collisione tra due camion all'interno della galleria di San Gottardo, in Svizzera[7]. I veicoli pesanti sono carichi di centinaia di pneumatici e uno dei serbatoi di carburante viene danneggiato dalla collisione, spargendo il suo contenuto sulla strada intorno al luogo dell'incidente. Quindi, una scintilla provocata da un cortocircuito ha acceso il liquido infiammabile, causando un'enorme esplosione seguita da un incendio violento.

In questo caso l'ingresso di ulteriori veicoli è stato subito impedito e le squadre di salvataggio sono state tempestivamente avvisate; nonostante questo, dieci persone sono morte per intossicazione e uno a causa delle bruciature.

2.2.3 Traforo del Fréjus (2005, 2010)

Dal momento che il tunnel di Fréjus è stato il principale obiettivo dello scenario in questione, gli ultimi eventi di incendio accaduti all'interno di questo tunnel sono stati notevolmente analizzati durante lo sviluppo del lavoro.

Il più grave[6], in termini di vite umane perse, si è svolto il 4 giugno 2005: alle 18:00, un camion carico di pneumatici ha subito una perdita di carburante, che ha generato un incendio a contatto con il motore del camion. Dopo aver fermato il suo veicolo, il conducente si è incamminato per 200 metri prima di premere uno dei pulsanti SOS posti ogni 20 metri; questo ha rallentato le procedure per identificare il problema, dato che il protocollo prevedeva che le telecamere di sicurezza inquadrassero l'area in cui era stato lanciato l'SOS.

Quattro altri veicoli hanno preso fuoco a causa dell'irraggiamento, dato che le temperature hanno presto superato i 1000°, e ci sono volute quattro ore per le squadre di salvataggio per raggiungere il fuoco dal lato francese. Poche ore dopo, due corpi umani sono stati trovati vicino al rifugio A6, probabilmente uccise dalle inalazioni di fumo prima di avere la possibilità di entrare.

L'ultimo evento[18], quello che ha ispirato maggiormente la progettazione del lavoro, è avvenuto il 23 novembre 2010 e non ha provocato alcuna perdita. Alle 8:25 un veicolo pesante entrò nel tunnel, e sei minuti dopo il motore ha iniziato a produrre fumo senza essere notato dal conducente. Allo stesso tempo, il sistema di rilevamento automatico notifica l'avvio di un incendio al centro di controllo, si accende automaticamente la telecamera più vicina.

Il conducente aveva fermato il camion accanto alla nicchia numero 44 e i veicoli della corsia opposta hanno continuato a passare, creando flussi d'aria e alimentando le fiamme. Contemporaneamente, la sala di controllo ha permesso il sistema di estrazione del fumo e ha avvisato i responsabili di salvataggio incaricati, seguendo il piano di emergenza bi-nazionale Italia-Francia.

Il conducente, una volta uscito dal camion, non ha premuto alcun tasto SOS, ed è stato salvato da un altro autista che ha attraversato il fuoco superando il camion, esponendosi a un enorme rischio di collisione. Più tardi, tutti i civili coinvolti hanno raggiunto o sono stati portati dentro i rifugi di sicurezza e poi evacuati, mentre i vigili del fuoco hanno lavorato all'estinzione del fuoco fino alle 8:50.

2.3 Il Traforo autostradale del Fréjus

Il tunnel di Fréjus è un tunnel stradale che collega la città francese di Modane con la città italiana di Bardonecchia; è lungo 12.895 Km ed è entrato in servizio nel 1980. È gestito da due società: SITAF ¹ e SFTRF ², ognuno con una sezione di competenza (6,8 Km lato Italia e i restanti 6 lato Francia).

2.3.1 Struttura originale (1980)

In origine, il tunnel era composto da una sola canna con le seguenti caratteristiche[14]:

- Lunghezza: 12.895 m
- Altitudine all'ingresso italiano: 1.297 m
- Altitudine all'ingresso francese: 1.228 m
- Pendenza (decescente da Italia a Francia): 0.54%
- Distanza media tra marciapiedi: 10.10 m
- Carreggiate: 2

¹Società Italiana per il Traforo Autostradale del Fréjus per Azioni

²Société Française du Tunnel Routier du Fréjus

- Larghezza adibita al traffico: 9 m
- Altezza massima consentita: 4.30 m
- Altezza massimo fino al controssoffitto: 4.48 m
- Piazzole di sosta: 5 (una ogni 2.100 m circa)
- Lunghezza piazzole di sosta: 40,5 m
- Larghezza piazzole di sosta: 2 m
- Piazzole di inversione di marcia: 5 (una ogni 2.100 m circa)
- Larghezza piazzole di inversione di marcia: da 3 m a 8,5 m
- Lunghezza piazzole di inversione di marcia: da 6 m a 7,5 m
- Area di servizio esterna lato Francia: 32.000 mq
- Area di servizio esterna lato Italia: 35.000 mq

A seguito dell'incidente al Monte Bianco (1999), la sicurezza del tunnel è stata notevolmente migliorata per evitare il ripetersi di eventi simili. In particolare, l'utente può trovare i seguenti strumenti:

- Luci gialle di controllo sulla banchina ogni 20 m
- Luci blu sulla banchina ogni 150 m indicano la distanza di sicurezza
- Semafori ogni 530 m
- Nicchie SOS 265 m, dotate di 2 estintori, una presa a muro da 220V/16 A e un telefono
- Pulsanti SOS ogni 20 m, in corrispondenza delle luci sulla banchina
- Idranti ogni 130 m, collegati alle tubazioni dell'acqua
- 11 rifugi di sicurezza ventilati, protetti da una porta a parete e dotati di un kit medico, due scaffali a 5 serbatoi di ossigeno, un modulo di comunicazione, un estintore, bottiglie d'acqua, un banco e un cartello informazioni (questi verranno gradualmente sostituiti dai nuovi luoghi sicuri che mettono in comunicazione l'attuale canna in uso alla seconda attualmente in costruzione)

Il traffico viene monitorato continuamente da 241 telecamere di sicurezza:

- 204 telecamere fisse all'interno del tunnel
- 11 telecamere di sicurezza all'interno dei rifugi
- 5 per le aree garage
- 12 telecamere nell'area di servizio italiana

- 9 telecamere nell'area di servizio francese

In caso di allarme, il filmato viene trasmesso alla sala di controllo su vari monitor a seconda del tipo di allarme (stradale o DAI³).

- L'allarme stradale viene attivato aprendo l'anta di una nicchia, premendo un pulsante SOS, aprendo una porta di uno dei rifugi, aprendo una delle porta che conducono al condotto di ventilazione o attivando il modulo di comunicazione all'interno del rifugio.
- L'allarme DAI viene abilitato automaticamente quando un veicolo si ferma o rallenta sotto la velocità minima obbligatoria, in caso di traffico stradale o quando un veicolo emette fumo in modo insolito. Questi tipi di allarmi vengono trasmessi alla sala di controllo sotto forma di sequenze video da un minuto su una console, consentendo all'operatore di ispezionare il filmato ed identificare la causa dell'incidente.

Come detto in precedenza, l'autorità incaricata della gestione del tunnel trasmette anche su due frequenze (103,3 FM e 107,7 FM) vari messaggi radio registrati per guidare l'utente in ogni tipo di situazione.(Table 2.1).

Inoltre, vengono riproposte un gran numero di radiofrequenze operative, al fine di garantire la comunicazione delle squadre di soccorso in caso di emergenza.

2.3.2 Tunnel di sicurezza (2009)

Il raddoppio del tunnel è stato programmato nel 2009, in linea di principio come tunnel di sicurezza; il lavoro è iniziato nel 2011 e lo scavo è stato completato nel 2014. Da allora, sia le Autorità italiane che le autorità francesi hanno avviato la creazione di un nuovo luogo sicuro, fornendo una connessione tra il tunnel di traffico e il nuovo tunnel di sicurezza; la metà francese ha già dismesso i vecchi rifugi a favore dei nuovi, mentre la metà italiana sta ancora lavorando alla conversione.

La presenza di un secondo tunnel migliora notevolmente la libertà di movimento delle squadre di soccorso, dando loro un modo per avvicinarsi al fuoco e per salvare le persone senza dover affrontare fumo, calore e veicoli abbandonati.

2.3.3 Conversione del tunnel di sicurezza in seconda canna per il transito (2012-2019)

L'attuale piano a lungo termine per il tunnel di sicurezza (formalizzato nel 2012 e previsto per il 2019) è una sua conversione in secondo tunnel stradale[1]. L'obiettivo principale di questa decisione è quello di ridurre la probabilità di scontri diretti tra automezzi dividendo le due direzioni di viaggio tra le due canne e allo stesso tempo aumentare il volume di traffico sopportabile dal tunnel.

³*Détection Automatique d'Incidents*, un tipo di allarme che scatta automaticamente in caso di allarme

Tabella 2.1: Lista dei messaggi trasmessi via radio

Tipo di messaggio	Contenuto del messaggio
Normale	Benvenuti al traforo del Fréjus. Per la vostra sicurezza il traforo è video sorvegliato. L'interdistanza obbligatoria è di 150 m. Due punti luminosi blu, disposti ad intervalli regolari di 150 m devono separare il vostro veicolo da quello che vi precede. Rispettate i limiti di velocità; minimo 50, massimo 70 chilometri orari. In caso di emergenza, arrestate il vostro veicolo il più possibile a destra e seguite le istruzioni di sicurezza che vi sono state consegnate al pedaggio. Rimanete costantemente all'ascolto della radio e fate buon viaggio
Emergenza	Attenzione! Attenzione! Fermatevi al semaforo rosso e spegnete il motore del vostro veicolo. Raggiungete rapidamente un luogo sicuro verde segnalato da luci lampeggianti. Non mancate di prestare aiuto a chi dovesse trovarsi in difficoltà
Dentro al Rifugio	Benvenuti in questo luogo sicuro. Questo locale è ventilato con aria pura e vi consente di attendere una squadra di soccorso. Assicuratevi che le porte di accesso siano ben chiuse. Seguite attentamente le nostre istruzioni e leggete i pannelli informativi. La vostra presenza in questo luogo sicuro è nota alla sala di controllo. In caso di emergenza, il pulsante SOS vi consente di parlare direttamente con un operatore. Non ritornate nel traforo. Restate in questo luogo sicuro; qui siete in sicurezza. Tranquillizzate le persone che sono con voi. Una squadra di soccorso è in arrivo per accompagnarvi all'uscita in totale sicurezza.

Capitolo 3

Stato dell'Arte

3.1 Realtà Virtuale come strumento di addestramento

La formazione è uno strumento indispensabile per aziende, istituzioni e corpi d'intervento che potrebbero diventare esorbitanti, difficili da gestire e ancora più difficili da organizzare. Ecco perché la realtà virtuale è sempre stata considerata un potente strumento per facilitare sempre di più l'addestramento, sviluppando soluzioni personalizzate in grado di ridurre tali costi garantendo una replicabilità gratuita.

Con la diffusione di nuovi dispositivi relativamente economici come HTC® Vive™ e lo sviluppo di nuove piattaforme (OpenVR, Windows Holographic), l'accesso alla VR diventa sempre più facile rendendo obsoleti e eccessivamente costose le vecchie soluzioni.

3.2 Tecnologie e strumenti VR

Negli ultimi anni il numero di dispositivi commerciali è cresciuto straordinariamente grazie all'elevato numero di aziende che cercano di entrare nel mercato VR con soluzioni innovative prima dei loro concorrenti.

3.2.1 Schermi montati sulla testa (HMD)

I display a testa HDM (let. Head-Mounted Display) sono il pilastro della VR commerciale e il loro scopo è quello di immergere l'utente nel mondo virtuale fornendo una visione a 360°. Esistono visori passivi che non dispongono di processori di calcolo complessi, o ne sono totalmente privi (ad esempio, Google Cardboard e Samsung Gear VR), e che sfruttano i sensori presenti nei moderni cellulari (giroscopio, accelerometro, magnetometro). Poi, esistono dispositivi più evoluti con schermi incorporati, sensori dedicati e controller esterni per ottenere un livello di immersione e interazione più elevati con l'ambiente virtuale (VE), ma di solito richiedono un processore di calcolo esterno, quale può essere un moderno computer. Per questo

lavoro sono stati inizialmente considerati due dispositivi, HTC® Vive™ e Facebook Inc. Oculus Rift, e successivamente si è deciso di optare per il primo.

- L'HTC® Vive™[21] (Figura 3.1) è stato inizialmente annunciato nel 2014 e ha raggiunto il mercato nel 2016; è caratterizzato da un casco a filo, da due controller e da due stazioni base denominate "Lighthouses" utilizzate per monitorare la posizione del giocatore all'interno della stanza.

Il display ha una frequenza di aggiornamento di 90 Hz ed è composto da due schermi da 1080x1200, mentre il casco ha un giroscopio, un accelerometro e un gran numero di sensori a infrarossi; l'auricolare contiene anche una telecamera anteriore, utilizzata dal sistema di sicurezza "Chaperone" che, insieme alle stazioni base, viene usata per disegnare un muro virtuale a griglie all'interno dell'ambiente virtuale.

Questo sistema di sicurezza è necessario per la modalità di locomozione detta "room scale", dove l'utente può naturalmente muoversi nella , ovviamente restando entro i limiti seganti. È possibile superare questo limite fisico aggiungendo meccaniche di gioco per spostare la "stanza", e di conseguenza l'utente, in una sezione diversa dell'ambiente virtuale (ad es. Teletrasporto). La sua piattaforma è Steam OnpenVR, sviluppata in collaborazione con Valve.

I suoi controller, dotati di un gruppo di sensori alle estremità superiori, vengono visualizzati continuamente all'interno dell'ambiente virtuale, facilitando le interazioni e migliorando il senso di presenza.

Inoltre, è possibile aggiungere un dispositivo di monitoraggio al sistema per



Figura 3.1: HTC® Vive™ HMD con controller e stazioni base

scopi più generali, il Vive™ Tracker(Figura 3.2); è fondamentalmente un controller senza manico e pulsanti, è dotato di un foro a vite da 1/4" per supporti standard utilizzati nella fotografia e può essere utilizzato per monitorare altri oggetti o parti del corpo all'interno dell'ambiente virtuale.



Figura 3.2: HTC® Vive™ Tracker con supporto per essere fissato alle gambe

- L'Oculus Rift[22] (Figura 3.3), il dispositivo prodotto da Oculus VR ¹, è stato inizialmente lanciato sul mercato insieme ad un normale gioco, quindi non è stato caratterizzato dallo stesso livello di interazione offerta dal Vive™; questo non è più vero poiché Oculus ha sviluppato e rilasciato una soluzione di controller dedicata per la sua HMD, in grado di tracciare la posizione delle dita grazie alla sua forma ergonomica e al layout dei suoi pulsanti. Dispone di due pannelli OLED ² da 1080x1200 e, diversamente dal Vive™, è dotato di cuffie integrate che forniscono effetti audio in 3D in tempo reale ed è accessorato di sensori da tavolo a connessione USB , che risultano molto più pratici rispetto ai sensori a parete del concorrente.

¹Una divisione di Facebook Inc.

²Organic Light Emitting Diode



Figura 3.3: Oculus Rift HMD

3.2.2 Controller a guanto

Sebbene la maggior parte dei dispositivi VR siano forniti con controller a mano dedicati, è possibile che sia richiesto un metodo di interazione più naturale per eseguire particolari operazioni. I guanti VR sono dispositivi di interazione progettati per fornire un'interazione completamente naturale, oltre a fornire feedback atipico tramite attuatori posizionati direttamente sulle dita.

3.2.3 Locomozione

La locomozione è uno degli aspetti più critici nelle applicazioni di realtà virtuale, in particolare quando si confrontano le dimensioni dell'ambiente virtuale rispetto a quelle più ristrette dello spazio reale disponibile per l'utente. Molte soluzioni sono state proposte o sviluppate, ma ogni metodo presenta diversi vantaggi e inconvenienti.

L'approccio "room scale" con teletrasporto, come detto in precedenza, è il metodo predefinito offerto da HTC® Vive™ nel suo SDK³ ed è ampiamente utilizzato per tutte le applicazioni in cui il realismo non è il focus principale. Questa tecnica risulta sicuramente il modo migliore per muoversi all'interno dell'ambiente, ma se l'ambiente è più ampio della stanza porterebbe al fallimento della simulazione.

Un'alternativa software a questo sistema è la tecnica "arm-swinging" (AS), una modalità di locomozione basata sul movimento delle braccia acquisito tramite il controller, che consente di spostare la stanza all'interno dell'ambiente virtuale mentre l'utente non si muove nel mondo reale. In alternativa, possono essere utilizzati sensori aggiuntivi per tenere traccia delle gambe dell'utente e catturare il movimento mentre è in posizione e spostare il lettore con lo stesso metodo del AS. Questa tecnica è chiamata "foot-swinging" (FS).

Infine, potrebbe essere adottata una soluzione hardware dedicata e interfacciata con il sistema VR, la Pedana VR. Questi dispositivi sono più costosi, più ingombranti e

³Software Development Kit, un pacchetto compreso di strumenti e di programmazione e documentazione per un dato prodotto

più difficili da ottenere, ma offrono idealmente un livello più elevato di naturalezza per muoversi all'interno dell'ambiente virtuale.

3.2.4 Cyberith Virtualizer

Il Cyberith Virtualizer (Figura 3.4) è un esempio di pedana VR omnidirezionale; ha una base piatta e scivolosa (vengono forniti apposite soprascarpe) con sensori per monitorare la camminata dell'utente e un anello direzionale che consente di tenere traccia dell'orientamento e della posizione del petto (in piedi, accovacciati).



Figura 3.4: Pedana Cyberith Virtualizer, integrata con HTC® Vive™

3.3 Serious Gaming e simulazioni di incendio

Nella prassi comune i serious game sono usati in ambiti educativi e riescono a coniugare aspetti ludici e seriosi. Si basano su tecnologie di diverso tipo e hanno un pubblico eterogeneo; spesso sono indistinguibili dai giochi di intrattenimento poiché è il giocatore che ne evidenzia il carattere formativo durante il suo uso. Da qui si intende dimostrare che per massimizzare l'impatto delle piattaforme sia necessario istruire il fruitore affinché passi da semplice giocatore ad utente consapevole di ciò che andrà a sperimentare, ovvero di un qualcosa che riproduce situazioni reali e dove le proprie azioni influenzeranno tanto l'ambiente ricreato quanto quello reale con cui si è quotidianamente a contatto.

I serious game hanno trovato facile sbocco in contesti dove, come già accennato, le esercitazioni sul campo rappresentano un momento di verifica di abilità acquisite durante corsi o addestramenti ma per difficoltà logistiche non possono essere replicate con frequenza elevata, e comportano costi significativi. I sistemi di realtà virtuale permettono di ripetere la simulazione all'infinito e possono essere applicate variazioni in maniera dinamica, riducendo in maniera esponenziale i tempi.

Quando si tratta della realtà virtuale, l'evoluzione dei dispositivi insieme alla crescita naturale del potere di calcolo rende difficile trovare opere simili usando lo stesso tipo di approccio. Tuttavia, una ricerca per opere precedenti è stata eseguita comunque, allo scopo di trovare utili punti di partenza per il lavoro.

3.3.1 Un simulatore di formazione d'incendio basato VR integrato con i dati relativi alla dinamica di sviluppo (M. Cha, S. Han, J. Lee, B. Choi)

Con questo documento gli autori propongono un interessante quadro per l'interfacciamento dei dati[3] relativi alla dinamica del fuoco ottenuti con CFD ⁴ in un sistema di simulazione antincendio basato su VR. Sono stati integrate tecniche di elaborazione dei dati al fine di ottenere una visualizzazione 3D di gas tossici e dei livelli di pericolo.

La logica del metodo è suddivisa in tre blocchi: simulazione numerica del fuoco, pre-elaborazione e elaborazione in tempo reale:

- La simulazione numerica del fuoco si basa su FDS⁵ in uno scenario specifico, dati i riferimenti geometrici, per il calcolo dello spazio. L'uscita viene quindi passata al secondo blocco.
- I dati grezzi provenienti dall'uscita della simulazione numerica vengono quindi convertiti in codice ASCII, ri-campionati, trasformati e suddivisi in tre ⁶.

⁴Computational Fluid Dynamic, un metodo di analisi numerica per la simulazione dinamica tramite computer

⁵Fire Dynamic Simulation, un modello CFD del flusso di fiamma

⁶struttura di albero utilizzata come metodo di partizione ricorsiva nella grafica 3D

- Nell'elaborazione in tempo reale, il database octree viene utilizzato insieme a un sistema di selezione LOD ⁷ e una logica di interpolazione di fotogrammi per fornire i dati utilizzati all'interno della simulazione.

Sfruttando questa tecnica, una simulazione di fuoco fisicamente precisa potrebbe essere integrata in un ambiente di realtà virtuale.

Un approccio diverso è stato seguito dagli autori di un simulatore VR di d'incendio che era in grado di eseguire una valutazione degli effetti del fumo[23]. Questi sono riconosciuti come una delle cause principali di morte durante un incendio. A fine della valutazione è stata progettata una tecnica di visualizzazione basata su dati dinamici e rendicontazione del volume per creare un simulatore caratterizzato da un ambiente di fumo realistico e preciso, ideale per la formazione e addestramento. Gli scenari investigati comprendevano una stazione della metropolitana e una scuola elementare.

⁷Level Of Detail, un metodo di ottimizzazione utilizzato nel sistema di grafica computerizzata

Capitolo 4

Design dello Scenario

Come già accennato, collaborazione con Siti, partner di Prodiges, nasce questo progetto di tesi che ha previsto la realizzazione di uno scenario in VR rappresentativo di una situazione di emergenza all'interno del Tunnel Fréjus, più precisamente di un incendio massivo causato da un incidente, che si diffonde progressivamente attraverso il tunnel coinvolgendo veicoli e persone. Qui, l'obiettivo sono gli utenti del traforo. Tra i risultati attesi del progetto, la dimostrazione dei vantaggi effettivi che la tecnologia VR può portare nei processi di comunicazione e applicazione delle procedure di sicurezza verso i cittadini, con l'obiettivo di ridurre al minimo i rischi per le persone e massimizzare l'efficacia delle operazioni delle Autorità preposte all'intervento. L'obiettivo principale consiste nel comunicare alle persone le procedure da seguire per tutelare la loro sicurezza durante l'emergenza, facendo direttamente "vivere" loro la situazione e le conseguenze delle loro azioni.

La definizione degli obiettivi è avvenuta presso SiTi dove sono state avviate le seguenti attività:

- definizione dei dettagli dello scenario (es. scelta del luogo, ecc.);
- definizione dello storyboard della simulazione (es. posizione ed entità delle sorgenti di propagazione dell'incendio, successione degli eventi);
- modellazione 3D dell'ambiente;
- realizzazione degli effetti audio;
- modellazione 3D delle sorgenti di incendio;
- modellazione del fenomeno di propagazione delle fiamme;
- modellazione delle interazioni con oggetti (es. spegnimento del fuoco);
- creazione di uno o più sistemi di locomozione per il movimento all'interno dello scenario;
- inserimento di strumenti aggiuntivi (es. contatore del tempo, contatore degli errori).

Il carico di lavoro è poi stato suddiviso con il collega tesista Calandra Davide che si è occupato più degli aspetti informatici, mentre chi scrive si è concentrato sui temi della resa grafica del suono e dell'analisi dei dati.

4.1 Definizione dello scenario

La definizione dello scenario ha richiesto una ricerca preliminare sull'argomento, ed è stata discussa per una quantità significativa di tempo prima di essere considerata definitiva.

L'obiettivo iniziale era la rappresentazione di un incendio all'interno di un tunnel che si sviluppava da un incidente stradale che coinvolgeva un veicolo pesante; doveva essere prestata molta attenzione alla rappresentazione del fuoco e del fumo, con l'obiettivo di sviluppare un sistema dinamico mantenendo un buon livello di fedeltà grafica.

Essendo SiTI un interlocutore di rilievo con i diversi corpi di sicurezza, ed essendo gli altri scenari di PRODIGE incentrati sulla formazione degli operatori, il pubblico di riferimento iniziale di FrejusVR era lo stesso. Tuttavia, dopo ulteriori analisi e considerazioni, l'attenzione è stata spostata verso un diverso tipo di utenti, i civili o "turisti".

Una delle ragioni di questa scelta sta nel fatto che il comportamento imprevedibile dell'utente in caso di emergenza sia un tema estremamente discusso da parte dei vigili del fuoco, della protezione civile e delle Autorità di tunnel. Dopo vari colloqui è emerso come esso si ripercuota sulle modalità di intervento. Le cause di questo cattivo comportamento potrebbero essere identificate in un fatto culturale (le persone non sono inclini a imparare o prestare attenzione alle istruzioni di sicurezza quando comunicate alla situazione di non emergenza) o in un problema di comunicazione (gli strumenti forniti per apprendere tali istruzioni sono mal progettate o inutilizzabili). Si è quindi riconosciuto che il primo passo per agevolare il lavoro degli operatori preposti fosse innanzitutto concentrarsi sull'istruire gli utenti. Questa scelta ha semplificato anche l'attività di test successiva, dal momento che la gente comune sarebbe stata molto più facile da coinvolgere rispetto ai vigili del fuoco, almeno in termini di numero e coordinamento.

Un altro punto di enfasi è stato posto sulla resa grafica del tunnel; dopo aver individuato nel tunnel di Frèjus lo scenario ideale, è stato deciso che la fedeltà della rappresentazione era una priorità, pertanto dovevano essere presi accordi con le Autorità incaricate della gestione de tunnel per raccogliere quante più informazioni utili e organizzare una spedizione in loco.

Ottenuto ciò, lo scenario doveva essere progettato per supportare una futura conversione da utilizzo civile all'uso dell'operatore, garantendo un livello ragionevole di flessibilità.

4.2 Definizione di uno Storyboard

Il processo creativo è iniziato con una definizione di uno storyboard che visualizzasse l'esperienza nei suoi elementi fondamentali. Nella fase di creazione, sono stati analizzati minuziosamente numerosi filmati e rapporti riguardanti incendi avvenuti in un tunnel. Il risultato dell'analisi ha mostrato che i veicoli più a rischio di malfunzionamento e quindi di incendio sono quelli pesanti, e non necessariamente a seguito di un incidente tra più veicoli.

Sono stati anche studiate le norme di comportamento stabilite dalle Autorità che gestiscono il traforo per identificare un insieme di interazioni utili da rappresentare nella nostra simulazione; in particolare, abbiamo cominciato dall'opuscolo ufficiale di sicurezza fornito al casello di ingresso al tunnel. In Figura 4.1 sono illustrate le pagine dove sono illustrate rispettivamente le norme da mantenere in fase di marcia (Tabella4.1) e in caso di incidente (Tabella4.2)

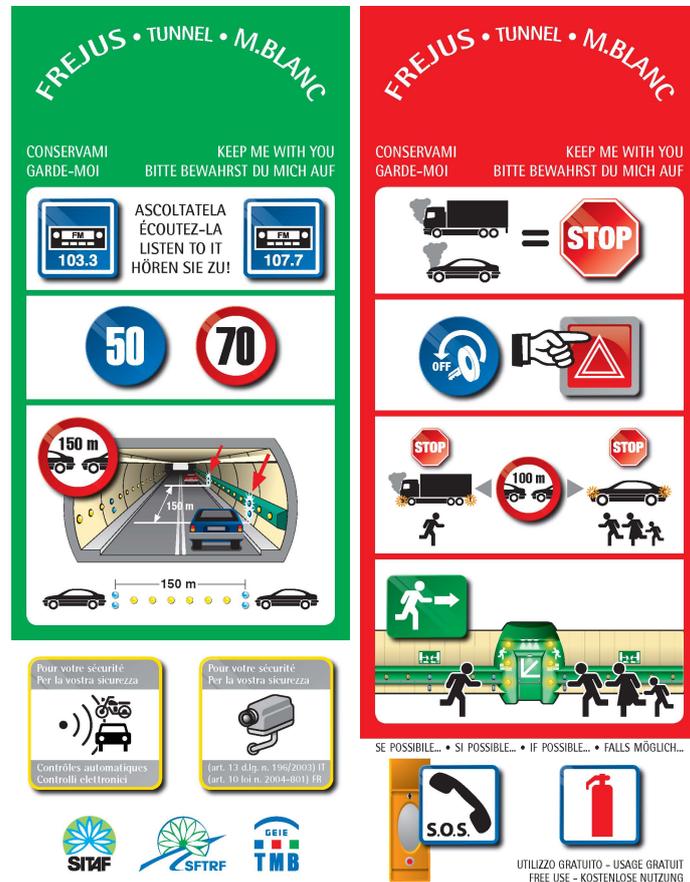


Figura 4.1: Brochure ufficiale contenete le norme di sicurezza da mantenere all'interno del traforo

Tabella 4.1: Procedure generali da seguire in fase di marcia

In fase di marcia:

- Ascoltare le frequenze radio evidenziate
- Mantenete una velocità minima di 50 Km/h e una massima di 70Km/h
- Mantenete una distanza minima di 150 m dal veicolo che vi precede(due luci blu consecutive vanno prese come riferimento)

Ricordare:

- Per ragioni di sicurezza il traforo è video sorvegliato

Tabella 4.2: Procedure generali in caso di incidente

In caso di incendio al proprio veicolo o di terzi:

- Fermare il proprio veicolo, mantenendo una distanza minima di 100 m dal veicolo in fiamme.
- Azionare le frecce di emergenza e spegnere il motore
- Abbandonare immediatamente l'automezzo lasciando inserite le chiavi
- In presenza di fumo intenso recarsi al rifugio più vicino

Se possibile:

- Attivare l'allarme antincendio utilizzando una colonnina SOS (od una nicchia di sicurezza)
- Correre verso la nicchia di sicurezza per avvisare i soccorsi e cercare l'estintore per un breve tentativo di spegnimento

Come risultato dell'analisi, è stato sviluppato il seguente storyboard:

1. All'avvio della simulazione (Figura ??) l'utente si trova a bordo del proprio veicolo in viaggio all'interno del tunnel. La radio sta trasmettendo le usuali istruzioni per i conducenti.

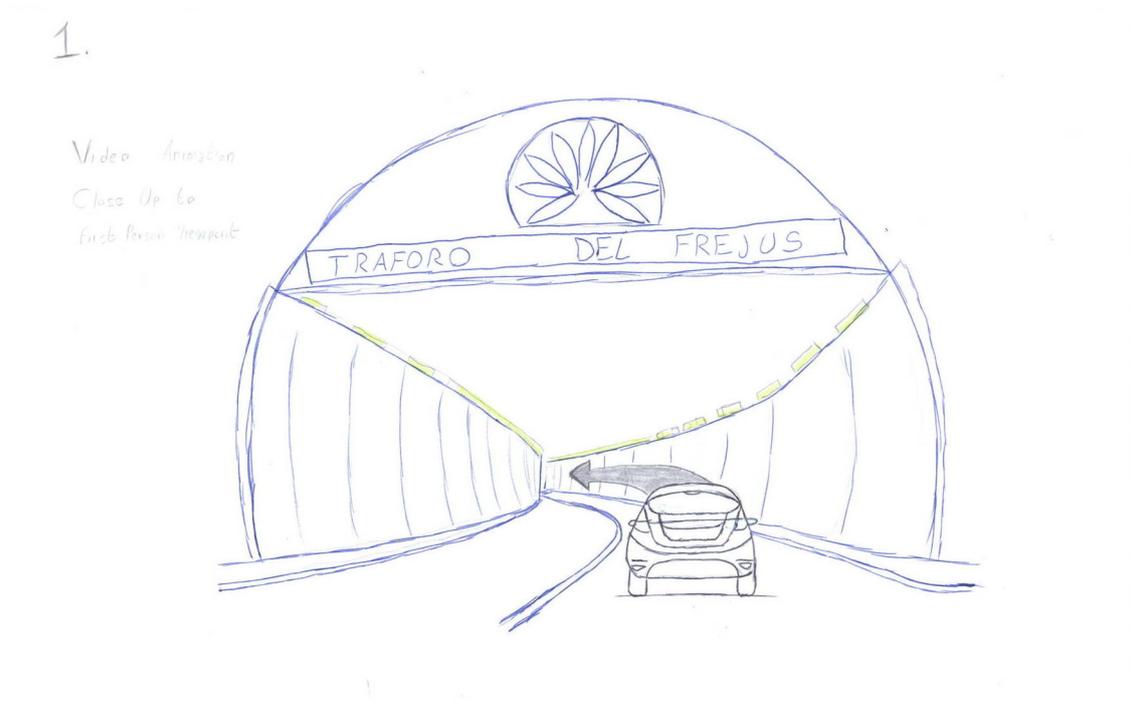


Figura 4.2: Storyboard - Pagina 1

2. Ad un certo punto è costretto a frenare a causa di un autocarro in fiamme (Figura 4.3) nella corsia opposta di marcia. L'utente potrà azionare manualmente i freni per mantenere la distanza di sicurezza di 100 metri dal pericolo, contribuendo così a prevenire la diffusione del fuoco. Arrestare l'auto a distanze inferiori comporterà un errore; lo stesso sarà nel caso l'utente non freni affatto (il veicolo frenerà autonomamente lasciando l'utente molto vicino al pericolo)
3. Dopo aver arrestato l'auto, l'utente sarà in grado di interagire liberamente con lo scenario (Figure dalla 4.4 alla 4.9) in modo da portare a termine la simulazione seguendo le indicazioni riportate nell'opuscolo. Alla conclusione della simulazione, ci sarà una sintesi degli errori e delle azioni effettuate dall'utente.

2.

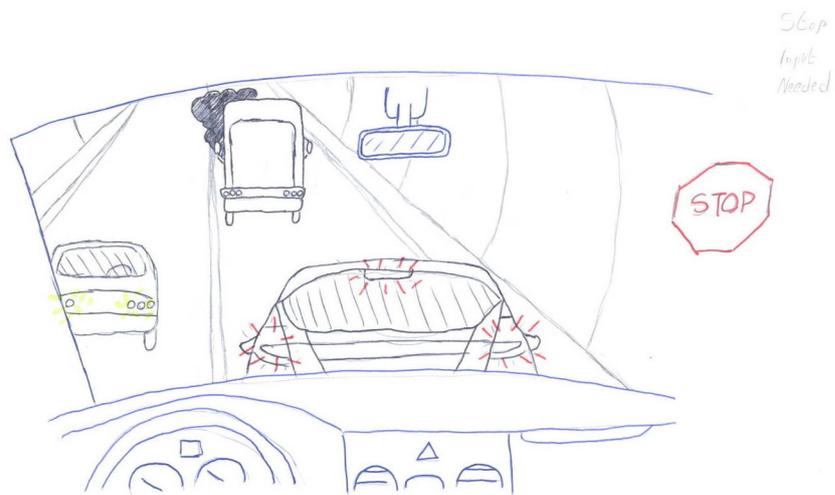


Figura 4.3: Storyboard - Pagina 2

3.



Figura 4.4: Storyboard - Pagina 3

4.

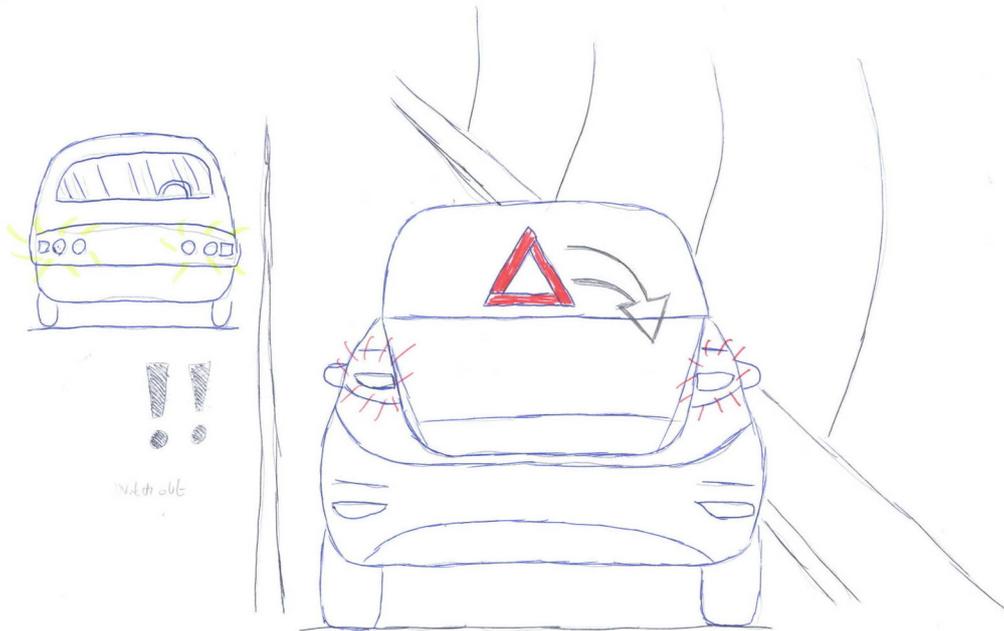


Figura 4.5: Storyboard - Pagina 4

5.

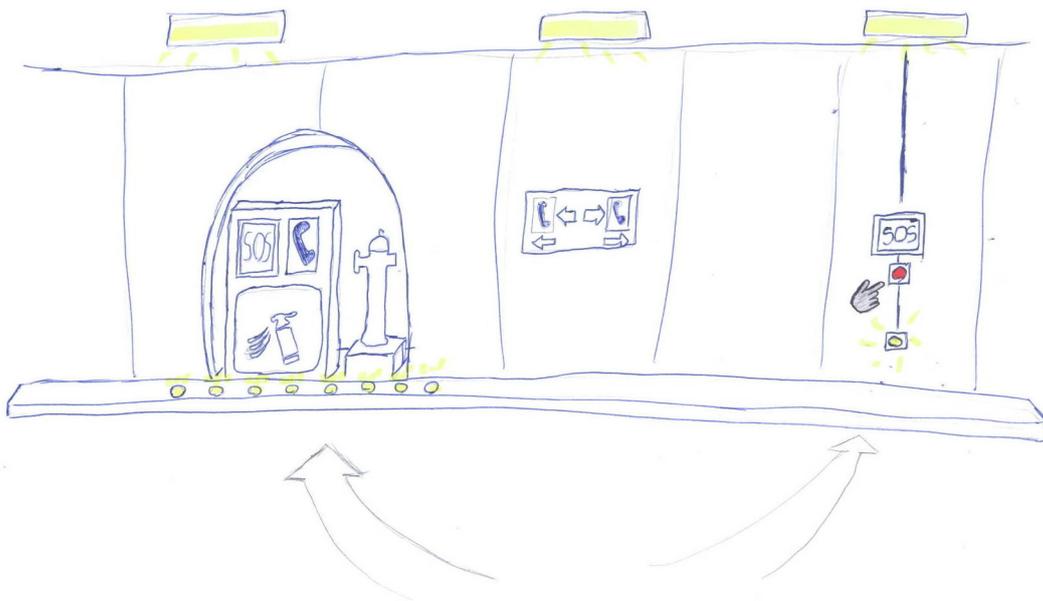


Figura 4.6: Storyboard - Pagina 5

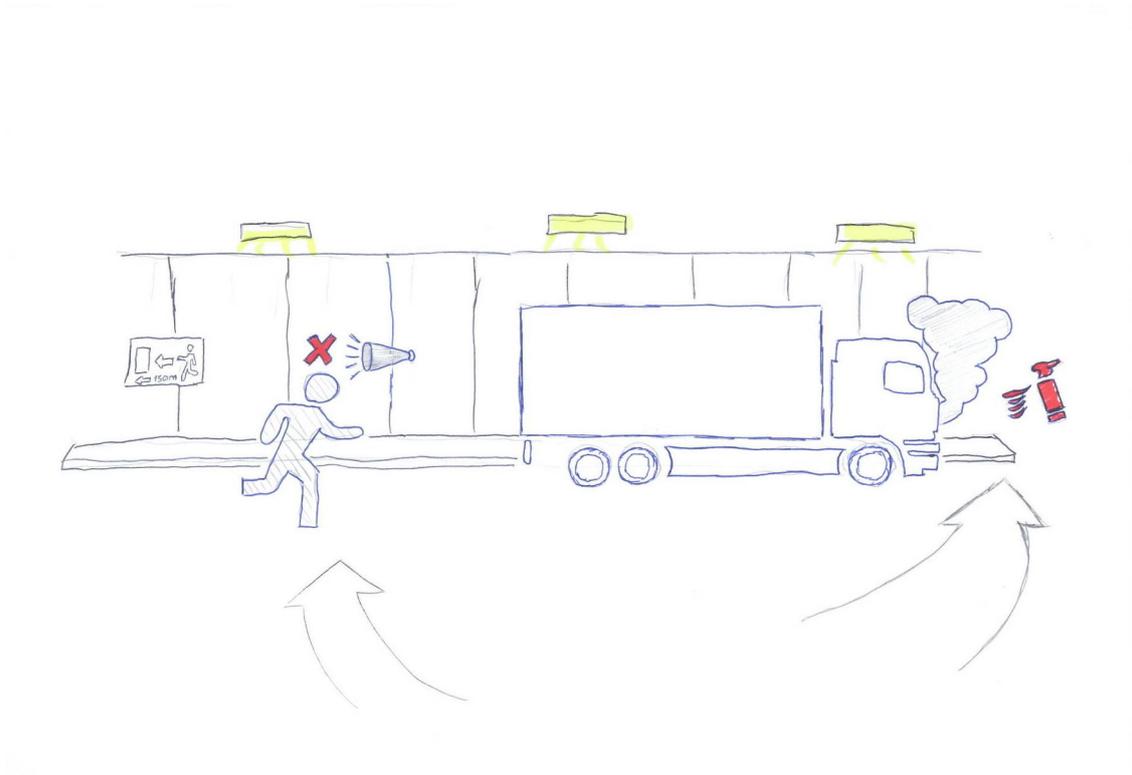


Figura 4.7: Storyboard - Pagina 6

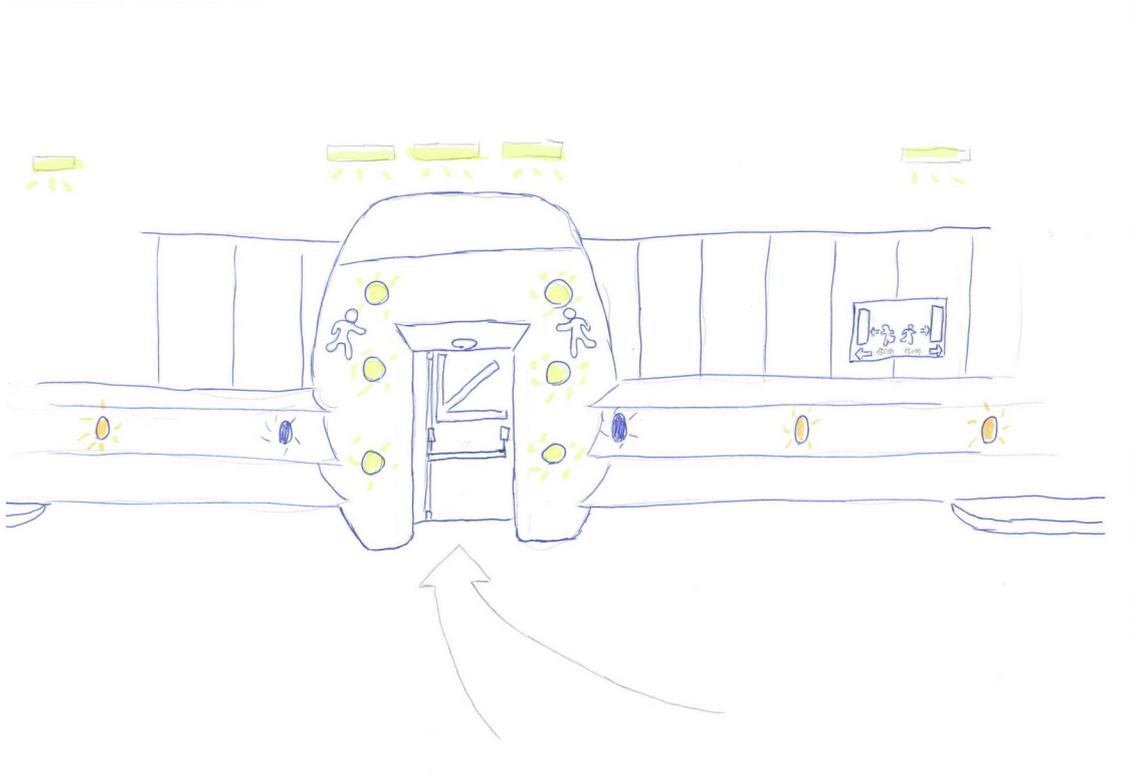


Figura 4.8: Storyboard - Pagina 7

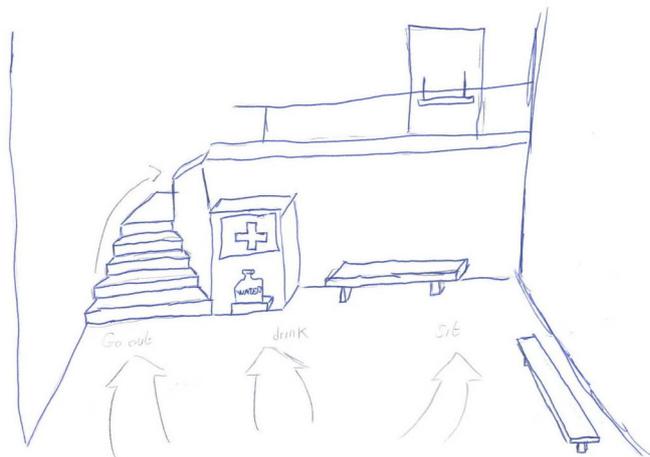


Figura 4.9: Storyboard - Pagina 8

Come per ogni produzione, alcune idee pensate in fase di storyboarding sono poi state scartate una volta entrati in piena produzione. Ad esempio era inizialmente previsto che l'utente potesse prendere ed indossare il giubbotto ad alta visibilità (Figura 4.4), ma poi l'idea è stata scartata poiché non valutata particolarmente significativa ai fini della simulazione. Bisognava mantenere il focus sulla necessità di recarsi quanto più velocemente possibile in un luogo sicuro.

4.3 Modellazione 3D

La fedeltà della simulazione ha rappresentato una parte fondamentale del lavoro; è stato quindi necessario investire tempo e sforzo nella modellazione 3D dell'ambiente.

Blender^{TM1} ver. 2.77 è stato selezionato come strumento di modellazione e animazione 3D, grazie ai suoi potenti strumenti, alla sua gratuità e perché è stato ampiamente spiegato in molti corsi accademici.

La modellazione è iniziata inizialmente da zero, reperendo informazioni su internet, allo scopo di sviluppare una prima versione del tunnel generico, obbligatorio per l'inizio del lavoro. Più tardi, grazie all'incontro presso SITAF, è stato possibile raccogliere un'enorme quantità di dati reali, permettendo così l'intera ricostruzione digitale del tunnel in maniera realistica.

4.3.1 Modellazione degli effetti fisici

Nella modellazione degli effetti fisici, eseguita sfruttando gli strumenti standard del motore di gioco, sono stati inclusi il vento, i movimenti dell'automobile e la fisica degli oggetti dinamici. La modellazione del fuoco, pur essendo un effetto fisico, viene considerata separatamente a causa della sua importanza.

4.3.2 Modellazione delle sorgenti Audio

Anche l'audio è stato considerato cruciale per un'esperienza completamente immersiva, quindi un grande numero di sorgenti sonore è stato inserito nel piano di realizzazione. La maggior parte di essi è stata reperita e tramite freesound.org, un database collaborativo di suoni gratuiti in licenza Creative Commons, mentre quelli più specifici come messaggi radio e allarmi sono stati registrati direttamente all'interno del tunnel o ricevuti dall'autorità tunnel. Per tagliare e modificare le numerose clip audio, è stato utilizzato lo strumento Audacity^{®2} ver. 2.1.3.

La premessa della VR è quella di creare una realtà alternativa. Aggiunge una nuova dimensione - letteralmente - all'esperienza di una narrazione attraverso l'immersione. Vi è un senso di "presenza" nella scena, di partecipazione personale. Dal punto di vista visivo, significa che il partecipante VR si presenta nella scena. Il suono è

¹Un software gratuito multi-piattaforma per la modellazione, la manipolazione, l'animazione, la simulazione di fisica, composizione, rendering e lo sviluppo di giochi

²Un strumento di manipolazione audio gratuito



Figura 4.10: Tunnel versions comparison (before and after the on-site expedition).

fondamentale per coinvolgere le persone e intensificare l'esperienza. Vi è una transizione dal passivo "essere lì" ad esserne parte integrante. Ad esempio, quando un utente sta cercando di determinare se un oggetto è un grande oggetto lontano o un piccolo oggetto vicino, visivamente, potrebbe elaborare l'illuminazione relativa, la profondità dell'oggetto all'interno del FOV, la parallasse e una pletora di altri aspetti visivi, oppure se l'oggetto produce un suono potrebbe spostare leggermente la testa per ascoltare la posizione dell'oggetto. Sulla base del volume, delle riflessioni e del timbro, la posizione relativa dell'oggetto diventa molto più evidente di quanto non sarebbe sfruttando solo un responso visivo. L'utente ha una comprensione istantanea dell'ambiente e degli elementi che lo popolano.

È stata fondamentale una parte di sound design. L'audio 3D è parte integrante della realtà virtuale. È diverso da quello che in genere le persone considerano "audio surround". Non solo immerge l'utente nello spazio virtuale, ma lo fissa nei singoli elementi dello spazio. Quando una persona guarda un film a casa collegato a un sistema audio surround (Figura 4.11), i suoni provengono dagli altoparlanti davanti, di lato e dietro allo spettatore. Se lo spettatore si muove, i suoni non cambiano

direzione. Inoltre gli altoparlanti posteriori e laterali sono sempre usati per gli effetti di riempimento ambientale e quasi mai per importanti segnali uditivi, perché farlo distoglierebbe il pubblico dall'azione sullo schermo davanti a loro. Con un HMD cambia tutto. Ora l'utente può girarsi in qualsiasi direzione e vedere una scena continua. Invece di provenire da vari altoparlanti, l'audio 3D (Figura 4.12) sembra provenire da punti infiniti intorno allo spettatore che indossa le cuffie. Non è una colonna sonora è una realtà virtuale che circonda l'utente.

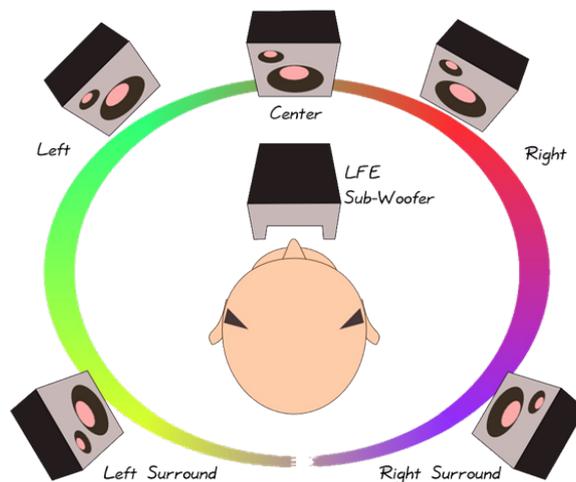


Figura 4.11: Disposizione tipica delle sorgenti sonore in un impianto audio surround

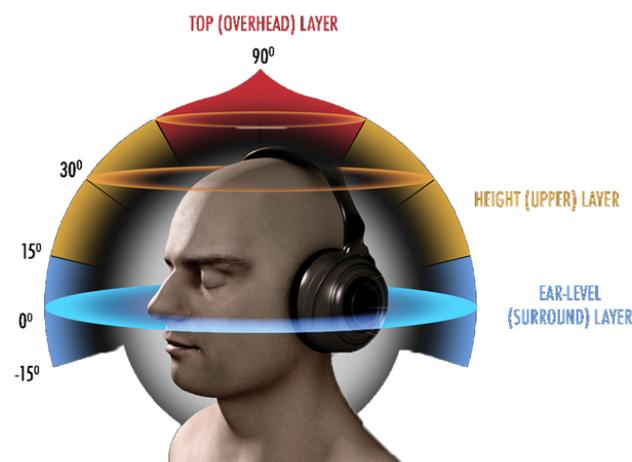


Figura 4.12: Rappresentazione grafica sorgente audio 3D

4.3.3 Audio 3D

Le orecchie umane percepiscono l'audio in tre dimensioni. Il nostro cervello riceve, riconosce e elabora informazioni sonore più rapidamente rispetto alle informazioni

visive. Quando si cerca di convincere il cervello che qualcosa è reale, il suono è il primo fronte di azione. Nel mondo fisico, l'utente percepisce cambiamenti continui negli effetti ambientali del suono: l'occlusione, la diffrazione, la diffusione, le riflessioni e l'assorbimento. Questo attento posizionamento dei rumori in uno spazio 3D (in alto e in basso, vicino e lontano) crea un ambiente sonoro spaziale che serve a offrire realismo e immersione oltre a direzione e storia. Ovviamente se il suono non è perfettamente sincronizzato con la grafica 3D, lo spettatore potrebbe essere immediatamente distolto dall'immersione. Il cervello elabora i segnali per spazializzare il suono. Uno degli indicatori più basilari è la prossimità. L'orecchio più vicino alla sorgente raccoglie le onde sonore prima dell'altro. C'è un salto temporale necessario per viaggiare da un orecchio all'altro. La distanza determina anche i livelli audio. Insieme, queste differenze aiutano il cervello a individuare l'esatta fonte del suono. Queste interazioni (riassunte in Figura 4.13) si possono riassumere nella misura della Head-Related Transfer Function (HRTF), che è diventata il fulcro dell'audio immersivo personalizzato.

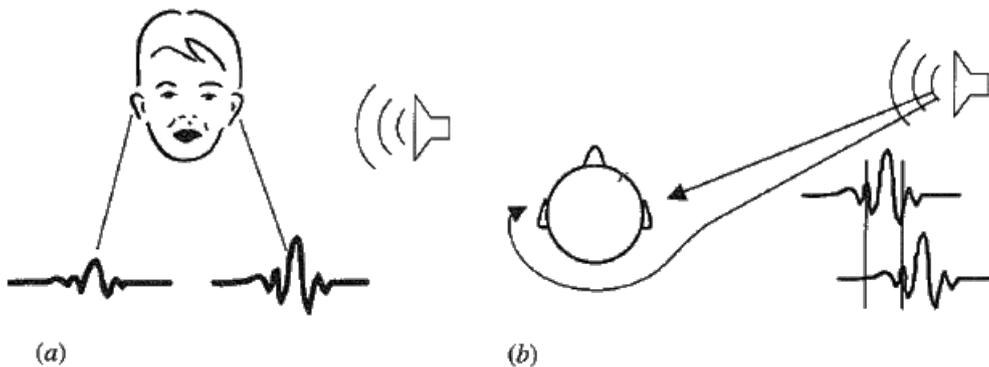


Figura 4.13: Rappresentazione grafica della prossimità e del salto temporale

L'HRTF per sua natura varia da persona a persona, in quanto l'anatomia delle orecchie di ognuno è unica, allora ci si rivolge a HRTF generali. I suoni HRTF vengono registrati con un paio di microfoni posizionati come orecchie all'interno di un contenitore che somiglia a una testa umana (Figura 4.14). Si può creare una chiara distinzione tra i suoni per orecchia sinistra e quella destra. L'operazione viene ripetuta per ogni posizione possibile della sorgente; alla fine si ha a disposizione un database con centinaia di HRTF[11].

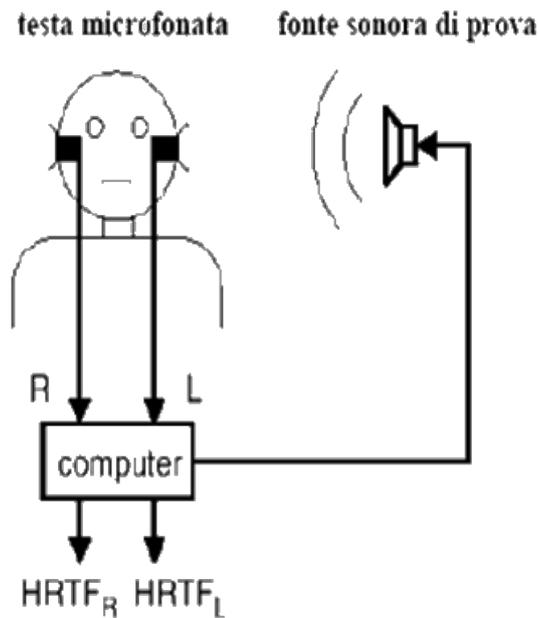


Figura 4.14: Misurazioni HRTF mediante manichino

La simulazione del processo di ascolto si ottiene implementando la coppia di HRTF ottenute dal precedente passo mediante una coppia di filtri digitali equalizzatori[11], parametrizzati sui valori ottenuti dalle funzioni di trasferimento. Questo processo è chiamato sintesi binaurale. A differenza del suono stereo che è stato progettato per rimanere intrappolato all'interno delle vostre cuffie, il suono personalizzato è percepito abbastanza lontano dalla testa da dimenticare che si sta indossando una cuffia (Figura 4.15). Questo tipo di realismo è essenziale per il VR.

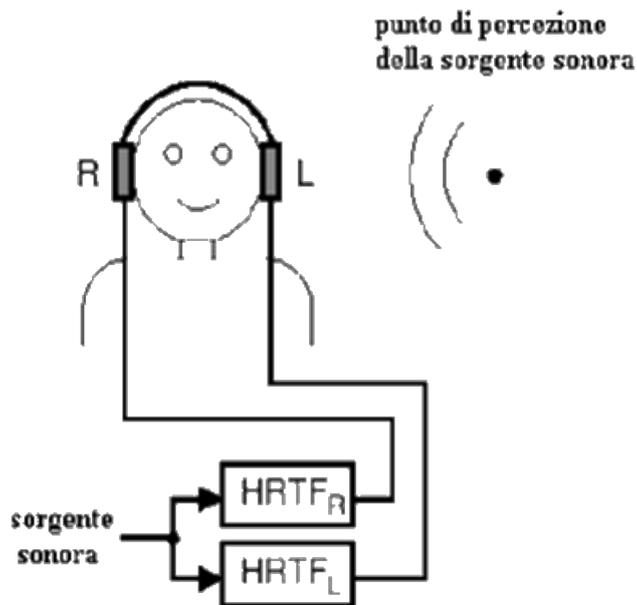


Figura 4.15: Sintesi Binaurale

La maggior parte delle sorgenti sonore è stata ottenuta e online sul sito freesound.org[4], un database di suoni di collaborazione gratuito con licenza Creative Commons, men-

tre quelli più specifici sono stati registrati direttamente all'interno del tunnel o ricevuti daliente che gestisce i tunnel. Per modificare le numerose clip audio, è stato utilizzato Audacity®³ ver. 2.1.3, un programma gratuito di elaborazione audio.

4.3.4 Modellazione 3D delle sorgenti di incendio

A differenza degli altri effetti di fisica, la rappresentazione visiva delle fonti di fuoco è stata curata nei minimi dettagli. In accordo con SiTI e come risultato di un piccolo investimento, l'asset Ultra Real Fire Effects Volume 1[15] (Figura 4.16) di Unity è stato utilizzato come punto di partenza per creare tutte le fonti di fuoco o fumo utili per lo scenario.

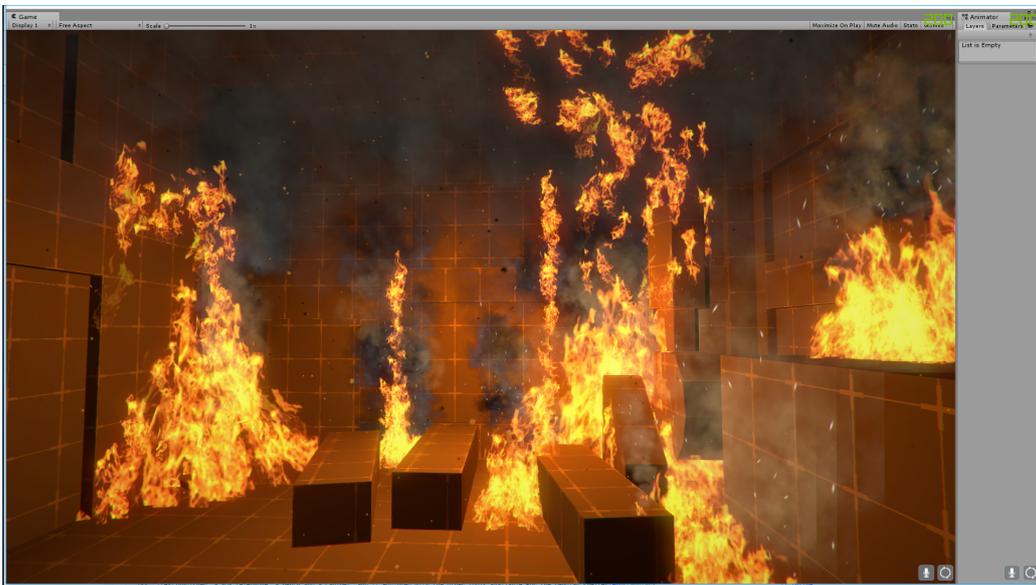


Figura 4.16: Scena dimostrativa del realismo Ultra Real Fire Effects Volume 1 rilasciato da Ultra Real

4.3.5 Modellazione del fenomeno di propagazione delle fiamme

Insieme alla rappresentazione visiva del fuoco, una forma di logica del fuoco era necessaria per raggiungere lo scopo. La natura non scalabile di questo tipo di algoritmi rende difficile progettare un'implementazione indipendente dallo scenario, di conseguenza il motore di gioco di solito non fornisce un modo standard per rendere il fenomeno sopra indicato.

Per quanto riguarda l'Ultra Real, sono stati studiate precedenti implementazioni per avere una base di partenza; il The Simple Fire Engine[2] (Figura 4.17) è stato scelto e poi fortemente modificato per implementare l'ampia lista di caratteristiche mancanti richieste per il lavoro.

³Un tool di editing audio gratuito

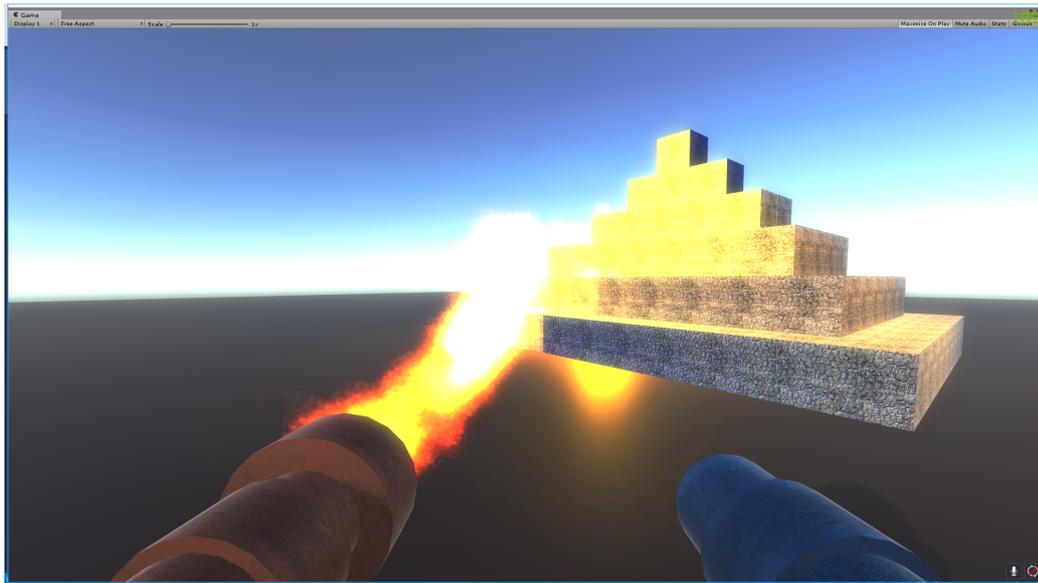


Figura 4.17: Dimostrazione del motore di calcolo Simple Fire Engine rilasciato da Mike Boere

4.3.6 Modellazione delle interazioni

Come già accennato, Unity 3D è stato selezionato come motore di gioco. Tra le diverse alternative, Unity è probabilmente una delle più flessibili grazie all'ampio panorama di impostazioni e al grande numero di dispositivi supportati. Fornisce anche una modalità dedicata per la creazione di applicazioni VR e tra le piattaforme di destinazione possiamo trovare OpenVR, Oculus SDK e piattaforme Windows Holographic.

L'HTC® Vive™ è stato preferito rispetto all'Oculus Rift grazie alle capacità di scala più elevate, insieme alla maggiore disponibilità di SiTI.

L'interazione con oggetti rappresenta un parte fondamentale della simulazione. Approfittando di tutte le principali caratteristiche del controller HTC® Vive™, è stato progettato e implementato un sistema di interazione intuitivo e robusto, che comprendesse ogni tipo di interazione richiesta dallo storyboard.

4.3.7 Progettazione di sistemi di locomozione

Per la locomozione, il progetto iniziale prevedeva l'utilizzo della sola pedana di locomozione Cyberith Virtualizer già disponibile nel laboratorio SiTI VR; insieme a questo metodo, sono poi state studiate varie alternative senza pedana per trovare il migliore e rendere l'applicazione utilizzabile disponendo solo di un HMD.

Come risultato di questa ricerca, sono stati identificati due metodi alternativi alla pedana:

- L'Arm-Swinging (AS), che è stato implementato a partire dal codice sorgente ArmSwinger[**armswing**] distribuito gratuitamente da ElectricNightOwl, mo-

dificandolo per mantenere una somiglianza con la logica SDK di movimento rilasciata da Cyberith (necessaria per i successivi test)

- Il Foot-Swinging (FS), una versione modificata del AS che utilizza le gambe anziché le braccia per il movimento, monitorandole attraverso sensori aggiuntivi.

A tal scopo sono stati inizialmente utilizzati due controller Vive™ aggiuntivi e successivamente sostituiti con i Tracker Vive™⁴.

4.3.8 Strumenti aggiuntivi

Si è considerato la realizzazione di molti strumenti aggiuntivi, ad esempio la possibilità di creare una modalità a "cabina di regia"⁵ o sviluppare una funzione multi utente, per consentire a più persone di entrare nella simulazione insieme.

Erano tutti strumenti interessanti e che un giorno potrebbero essere realizzati dando valore aggiunto alla simulazione, ma non erano fondamentali per lo scopo principale che rimane il monitoraggio del comportamento utente in condizioni di emergenza.

Quello che quindi si è fatto è stato progettare una logica che tenesse traccia delle azioni compiute dall'utilizzatore e che le visualizzasse al termine della simulazione.

⁴disponibili ufficialmente solo per gli sviluppatori

⁵Modalità di allenamento dove insieme all'utente c'è un supervisore che attraverso un secondo dispositivo potrebbe modificare la logica dello scenario in tempo reale

Capitolo 5

Sviluppo del Progetto

5.1 Acquisizione Informazioni necessarie

Durante la realizzazione dello scenario l'obiettivo era quello di raggiungere un alto livello di realismo. A questo scopo, è stato necessario innanzitutto realizzare una rappresentazione virtuale del tunnel quanto più dettagliata e realistica possibile. Dopo aver sviluppato una versione iniziale del tunnel basata su dati raccolti da fonti pubbliche come giornali e siti internet, è stata organizzata una riunione con SITAF per ottenere i primi commenti sul lavoro svolto e ulteriori dati, più affidabili, su cui lavorare.

Successivamente è stata eseguita una visita al traforo per raccogliere foto, suoni, piantine e tutte quelle informazioni vitali per la replicabilità del tunnel in tutte le sue parti.

5.1.1 Ricerche preliminari

Come accennato in precedenza, la prima parte della ricerca era incentrata sul recupero di dati pubblici sul tunnel, principalmente da Internet.

Questa scelta è stata necessaria a causa della necessità di iniziare con lo sviluppo dell'applicazione, senza dover aspettare un'interazione ufficiale con l'Autorità del tunnel.

Il risultato è stato una prima versione del tunnel sulla base di dati geometrici errati (state usate erroneamente le nuove misure del tunnel di sicurezza sono anziché quelle originali) e considerando il vecchio sistema di illuminazione (lampade al neon gialle) recentemente sostituito (luci a led bianche).

Nonostante il problema, questa versione approssimativa è stata utile per progettare, scrivere e testare la struttura logica del sistema che sarebbe solo poi dovuta essere calibrata per il tunnel effettivo.

5.1.2 Contatti con gli operatori di sicurezza

Oltre alla ricerca preliminare, sono stati eseguiti un numero significativo di incontri con diversi corpi di sicurezza al fine di familiarizzare con l'argomento in oggetto.

- al seminario "Multidisciplinare per la gestione delle emergenze di incendi boschivi" [20]. Si è parlato di algoritmi di modellazione delle fiamme che si basano su griglie 2D in cui le cellule sono caratterizzate da un valore di carburante. È servito per chiarire che la complessità di tali metodi era inadatto progetto. Alla fine del seminario, si è verificato uno scambio con il dipartimento forestale dei Vigili del fuoco che si è rivelato utile nell'identificare i pericoli principali e gli eventi frequenti che caratterizzano un incendio in un tunnel (le levate tempera rute e l'impossibilità di avvicinarsi da parte degli operatori).
- alla presentazione del progetto PRODIGE presso il parco fluviale di Cuneo. Qui, un secondo incontro con il dipartimento dei vigili del fuoco ha consentito di indagare sulle procedure di emergenza sia per i civili che per le squadre di salvataggio, oltre che per discutere degli errori più comuni che possono essere compiuti dagli utenti.
- altri incontri programmati successivamente a lavori già in corso. Questi sono serviti essenzialmente per mostrare gli avanzamenti dell'applicazione e ricevere le prime opinioni in merito. Queste hanno consentito di affinare la logica del simulatore (come propagazione fumo, tempistiche dell'incendio ed effetto intossicazione) nonché a migliorare gli aspetti strutturali della riproduzione del tunnel (come colore delle luci e posizione degli oggetti)

5.1.3 Contatti con SITAF

Il primo incontro con le Autorità del tunnel Fréjus è stato un punto focale per lo sviluppo del lavoro. Durante questo incontro, che ha coinvolto SITAF, Politecnico di Torino e SiTI, è stato presentato il progetto durante la quale è stata presentato un elenco dei dati mancanti necessari per la realizzazione:

- foto del manto stradale, segnaletica, pareti e soffitto
- dati relativi ai colori delle pareti e all'illuminazione
- dati e foto dei vari tipi di apparecchiature (dati geometrici e distanze)
- differenze strutturali tra lato francese e italiano
- dati e foto della piazzola di sosta
- misure delle nicchie SOS
- la strumentazione presente nelle nicchie
- informazioni geometriche sui luoghi sicuri
- foto all'interno e al contenuto dei luoghi sicuri
- eventuali informazioni sulla sicurezza sul tunnel
- foto dei cartelli a parete lungo il tunnel
- informazioni su come comportarsi all'interno di un luogo sicuro

- registrazioni audio ambientali nel tunnel in momenti con/senza traffico
- registrazioni audio degli allarmi
- risposta generica di un operatore quando qualcuno usa un telefono SOS
- messaggio radio

Come risultato di questo incontro, insieme ad un riscontro positivo sul progetto, è seguita la programmazione di un successivo per una visita guidata all'interno del tunnel, al fine di acquisire tutte le informazioni precedentemente elencate.

La spedizione è partita dal lato italiano ed è proseguita fino al confine; sono state fatte le seguenti rilevazioni:

- Nicchia 50 (Figure 5.6)
- Rifugio A7 (Figure 5.4)
- Rifugio S18 (di nuova generazione); esterno (Figure 5.2) ed interno (5.3).

I dati raccolti sono stati successivamente utilizzati in maniera intensiva per ottenere il massimo livello possibile di realismo.



Figura 5.1: Confronto resa grafica/foto del tunnel visto dalla piazzola di sosta



Figura 5.2: Confronto resa grafica/foto dell'entrata al rifugio s18



Figura 5.3: Confronto resa grafica/foto del rifugio s18

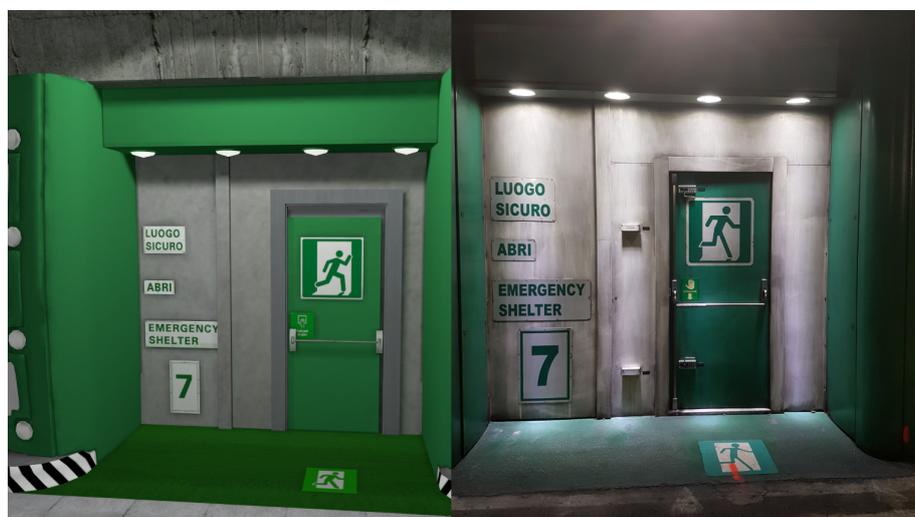


Figura 5.4: Confronto resa grafica/foto dell'entrata al rifugio A7



Figura 5.5: Confronto resa grafica/foto del pulsante SOS



Figura 5.6: Confronto resa grafica/foto della nicchia d'emergenza numero 50



Figura 5.7: Confronto resa grafica/foto dell'attrezzatura present nella nicchia

5.2 Realizzazione

Le attività di sviluppo sono cominciate fin da subito, grazie alla continua raffinazione operata sulla logica dell'applicazione seguendo i riscontri delle parti interessate.

5.2.1 Segmentazione del Tunnel

Per semplificare l'assemblaggio manuale del tunnel e garantire un buon livello di flessibilità, è stato deciso di suddividere il tunnel in unità di base di 10 m. Ciascun segmento sarà caratterizzato da una particolare funzione.

La libreria di sezioni tunnel creata con questo metodo è composta da 29 unità, che possono essere utilizzate per ricreare qualsiasi parte del tunnel. Lo scenario attuale, impostato sul confine tra Italia e Francia, riproduce la sezione che va dal km 7 al km 6 e richiede solo un sottoinsieme delle unità assemblate.

Nelle tabelle 5.1, 5.2 e 5.2 sono elencate e descritte tutte le unità di sezione tunnel disponibili.

Tabella 5.1: Sezione Tunnel Default

Tipo di sezione	Composizione
Default	L'unità base, composta da: <ul style="list-style-type: none">• 1x strada• 1x soffitto• 2x muro• 2x marciapiede• 2x luce bianca a LED su cavo• 1x elementi riflettenti (in mezzo alla carreggiata)
Default Green Front	la sezione, attrezzati: <ul style="list-style-type: none">• 1x muro verniciato di verde• 1x striscia di prossimità al rifugio (sul muro)• 1x segnale direzione rifugio (sul muro)
Default Green Back	Simile all'unità Default Green, ma con i segnali specchiati

Tabella 5.2: Sezione Tunnel Nicchia

Tipo di sezione	Composizione
Idrante	unità composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 1x nicchia ● 1x idrante (a sigillo italiano or francese) ● 2x monitor indicanti distanza minima di sicurezza (1 per lato)
Nicchia	unità composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 2x nicchie (una per lato) ● 1x idrante (a sigillo italiano or francese) ● 4x estintori (2 per nicchia) ● 2x armadietti (1 per nicchia) ● 2x telefoni SOS (1 per nicchia) ● 2x segnalatori esterni (1 per nicchia) ● 2x luci gialle al neon (1 per nicchia) ● 2x semafori ● 2x monitor indicanti la velocità massima consentita (1 per lato)

Tabella 5.3: Sezione Tunnel con rifugio

Tipo di sezione	Composizione
Inizio piazzola di sosta	unità nicchia composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 1x parete ad angolo ad indicare l'inizio della piazzola ● 1x marciapiede ad angolo ad indicare l'inizio della piazzola ● senza idrante
Piazzola di sosta	unità Default composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 1x camminamento lungo la piazzola di sosta ● 1x parete della piazzola di sosta
Fine Piazzola di Sosta	unità Default composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 1x parete ad angolo ad indicare la fine della piazzola ● 1x marciapiede ad angolo ad indicare la fine della piazzola ● 1x idrante (a sigillo italiano or francese)
Rifugio	unità composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 1x muro a parete verde ● 1x striscia di prossimità al rifugio (sul muro) ● 1x entrata al rifugio ● 4x segnalatori (2 per lato) ● 2x monitor di stop con luci lampeggianti ● 2x barriere
Rifugio Bypass	unità base del rifugio composta da: <ul style="list-style-type: none"> ● 1x estintore ● 1x telefono SOS ● 1x panchina ● 1x Armadietto ● 1x kit medico ● 1x bottigliette d'acqua

Tabella 5.4: Sezione Tunnel SOS

Tipo Sezione	Composizione
SOS 20	qualunque delle unità già descritte, ma dotate di: <ul style="list-style-type: none"> ● 2x luci di posizione gialle ● 2x pulsante di allarme SOS
SOS 150	qualunque delle unità già descritte, ma dotate di: <ul style="list-style-type: none"> ● 2x luci blu (due consecutive indicano distanza minima di sicurezza) ● 2x pulsante di allarme SOS

Realizzazione delle texture

Le texture che colorano le mesh 3D sono state tutte realizzate da zero tramite Photoshop di Adobe®, programma per l'elaborazione di immagine. Particolare attenzione è stata dedicata alla segnaletica stradale. Usando come riferimento le foto scattate al momento del sopralluogo sono state ricreate copie fedeli. In questo contesto ne citiamo solo alcune, le più significative:

- la segnaletica che indica il rifugio e le nicchie più vicine (Figura 5.8);
- la segnaletica che indica le nicchie SOS (Figura 5.9);
- le norme generali di comportamento (Figura 5.10).

A volte è stato necessario ricorrere alla programmazione per poter raggiungere determinati obiettivi ed ottimizzare il lavoro. Ad esempio le distanze relative ai rifugio più vicini sono calcolate dalla logica sottostante la simulazione e poi applicate a particolari oggetti resi disponibili da Unity per accettare caselle di testo come contenuto (le Canvas). L'alternativa sarebbe stata quella di doverle fare tutte a mano, ma viste le grosse dimensioni del tunnel si è subito desistito.



Figura 5.8: Confronto resa grafica/foto segnaletica rifugio più vicino

5.2.2 Modellazione delle Fiamme

Le fiamme e il fumo per loro natura possono essere descritti come oggetti complessi e amorfi non rappresentabili quindi mediante mesh 3D. Sono stati utilizzati dunque

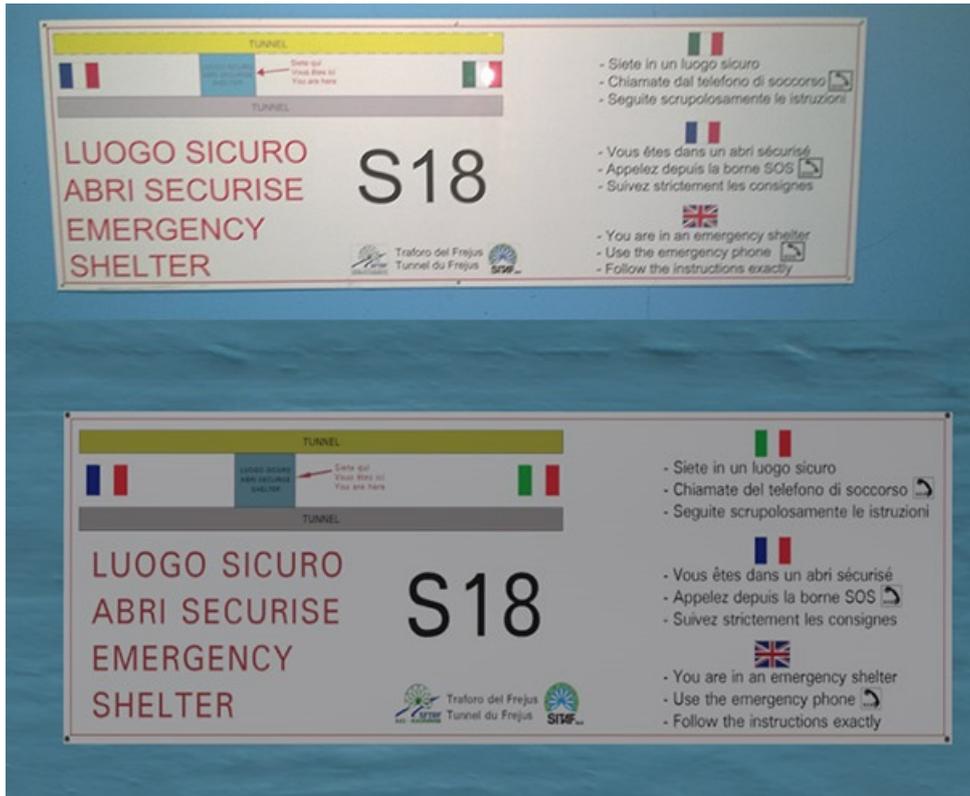


Figura 5.9: Confronto resa grafica/foto cartello sulle norme di comportamento



Figura 5.10: Confronto resa grafica/foto segnaletica rifugio più vicino

dei sistemi particellari, ovvero dei veri e propri generatori che producono una certa quantità di particelle. In genere, le particelle sono piani, formati da due triangoli (billboard) che hanno una texture e guardano sempre verso la telecamera. Oltre alle billboard, si possono usare anche mesh 3D come particelle, aumentando il realismo a discapito delle performance che diminuiranno drasticamente rispetto al primo metodo. Si è optato per un compromesso tra foto realismo e complessità di calcolo producendo un particellare con le seguenti caratteristiche: particelle di grandi dimensioni e scarse in numero dotate di una texture altamente foto realistica. Per coadiuvare l'effetto di perdita di visibilità dovuta al fumo è stato aggiunto l'effetto di nebbia disponibile in Unity che tronca il raggio visivo dell'utente.

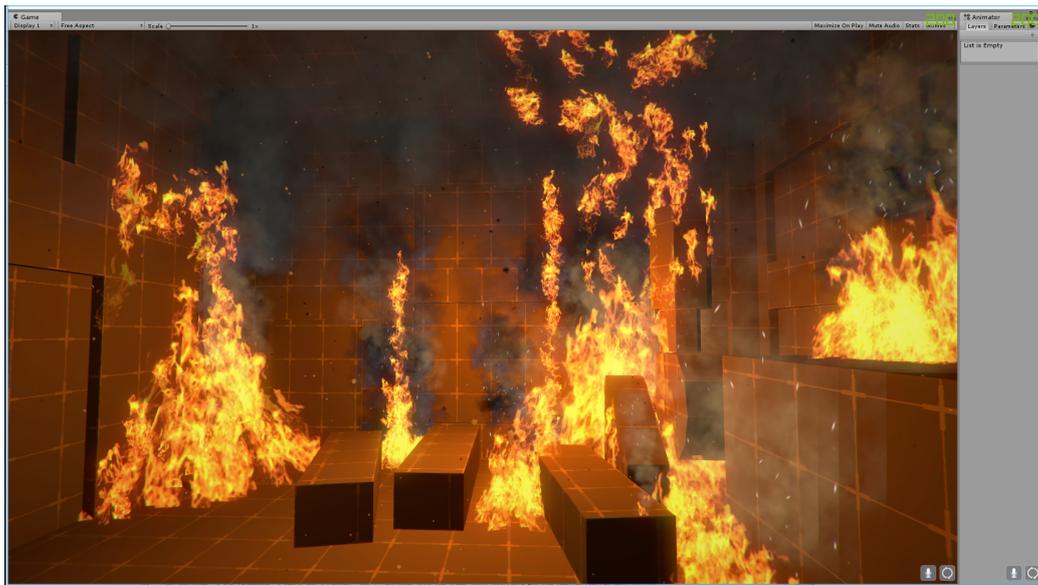


Figura 5.11: Esempio di utilizzo del particellare delle fiamme

5.2.3 Modellazione dei Veicoli

I modelli iniziali reperiti su free3d.com¹[5] sono stati per lo più inadatti allo scopo, essendo troppo dettagliati e modellati come blocchi singoli. La prima attività svolta è stata una semplificazione della geometria, gestita manualmente dissolvendo i vertici ridondanti e rimuovendo le parti indesiderate, seguita da una segmentazione del modello, utile per attuare al meglio una logica di interazione. La seguente tabella (5.5) elenca tutti i veicoli disponibili.

¹un sito di condivisione di modelli 3d

Tabella 5.5: Veicoli

Tipo di veicolo	Descrizione
Camion	Il mezzo pesante da cui partirà l'incendio, suddiviso in varie sezione infiammabili separatamente: <ul style="list-style-type: none">● carrozzeria principale;● portiera sinistra, portiera destra, portellone posteriore● Telone● Ruote
Macchina Utente	il veicolo dinamico guidato dall'utente, suddiviso in: <ul style="list-style-type: none">● carrozzeria ruote● ruote
Macchine NPC	Altri veicoli in movimento presenti nel tunnel



Figura 5.12: Camion



Figura 5.13: Macchina utente

5.2.4 Gestione dell'illuminazione

Gestire un numero elevato di sorgenti luminose è stato un compito impegnativo lungo tutta la fase di sviluppo. Sin dalla prima versione l'illuminazione real-time² ha mostrato la sua inadeguatezza prestazionale per il dato scenario. Sono state quindi studiate tecniche avanzate per aggirare il problema.

La prima azione intrapresa è stata quella di trasformare tutte le luci da Real-time a Mixed³ per iniziare ad abbassare la complessità globale.

Dopo di che, ogni oggetto stazionario all'interno dello scenario è stato impostato come Statico, per sfruttare la funzione pre-calcolo dell'illuminazione (Baking) aumentando le prestazioni in fase di esecuzione.

L'inconveniente di questa tecnica è il lungo tempo di pre-elaborazione richiesto dal, proporzionale al numero di oggetti statici e che può durare ore. Il risultato di questo oneroso calcolo è memorizzato su texture speciali⁴ dette mappe di luce⁵.

Una volta risolto il problema dell'illuminazione degli oggetti statici, è stata necessa-

²le luci real-time di Unity sono calcolate e aggiornate ogni fotogramma durante l'esecuzione del programma

³le luci miste di Unity possono cambiare le loro proprietà visive durante il periodo di esecuzione, ma con forti limitazioni

⁴Tecnica grafica computerizzata che consiste nel mappare un'immagine sulle superfici di un modello 3D

⁵Struttura dati che contiene l'illuminazione statica nelle formazioni sull'oggetto.



Figura 5.14: Camion

ria una seconda tecnica per gestire l'illuminazione di quelle dinamiche. A tale scopo, Unity 3D offre degli oggetti, detti Light Probe, che una volta posizionati all'interno dello scenario incapsulano le informazioni sulla luce che attraversa lo spazio durante il calcolo per gli oggetti statici e utilizzano i valori pre-calcolati per lanciare luci sugli oggetti dinamici. I proiettori sono stati quindi sapientemente collocati per gruppi all'interno di ogni unità di sezione tunnel, creando una rete che coprisse tutta la scena.

La combinazione di queste tre tecniche riduce drasticamente l'impatto di illuminazione sulle prestazioni, consentendo l'utilizzo di centinaia di luci per riprodurre fedelmente il sistema di illuminazione del tunnel Fréjus.

È stato adottato un abile sotterfugio per i fari delle macchine al fine di non appesantire ulteriormente il carico computazionale del pre-calcolo. Queste infatti sono composte da geometrie planari dotate di texture altamente realistiche e dotate di emissività.

5.3 Sound Design

Motori grafici come Unity dispongono di un proprio sistema di sintesi binaurale, basato su HTRF generiche. Unity permette di importare file audio di diversi formati: AIFF, WAV, MP3 e Ogg. Come in una semplificazione della realtà abbiamo una (o più) sorgenti e un punto di ascolto. Unity gestisce l'audio attraverso due componenti:

- AudioSource
- AudioListener

AudioSource

Il componente AudioSource (Figura 5.15) permette di settare tutte le caratteristiche della sorgente audio:

- Audio Clip, il file da dover eseguire;
- Differenti effetti di filtraggio (abilitati/disabilitati);
- Priority, quale priorità possiede fonte Sonora rispetto alle altre (0 = primo piano. 256 = meno importante. Default = 128. Usare 0 per le musiche di sottofondo per evitare che vengano scambiate per altro);
- Volume, il volume che deve avere la traccia alla distanza di 1m dall'ascoltatore;
- Pitch, la modifica del pitch (velocità dell'audioclip).
- 3D Sound Settings, identificano come l'audio debba decadere allontanandosi dalla sorgente (Rolloff).

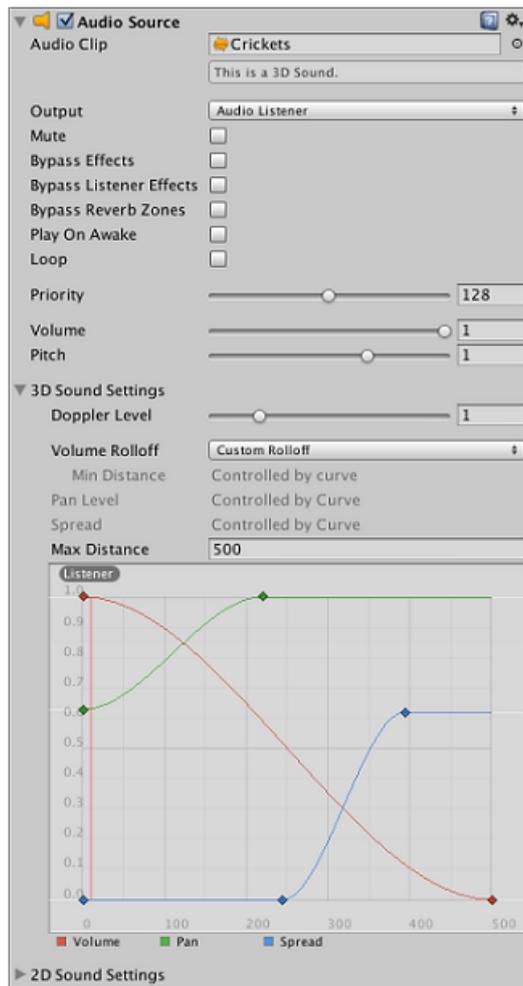


Figura 5.15: Sintesi Binaurale

AudioListener

Il componente AudioListener (Figura 5.16) non ha alcun parametro da gestire, e deve essere solamente presente nell'oggetto (character) che si muove nella scena. Ne deve essere presente e abilitato solo uno per volta. Ogni oggetto "Camera", quando creato, ha di base un audiolistener abilitato all'interno del GameObject.

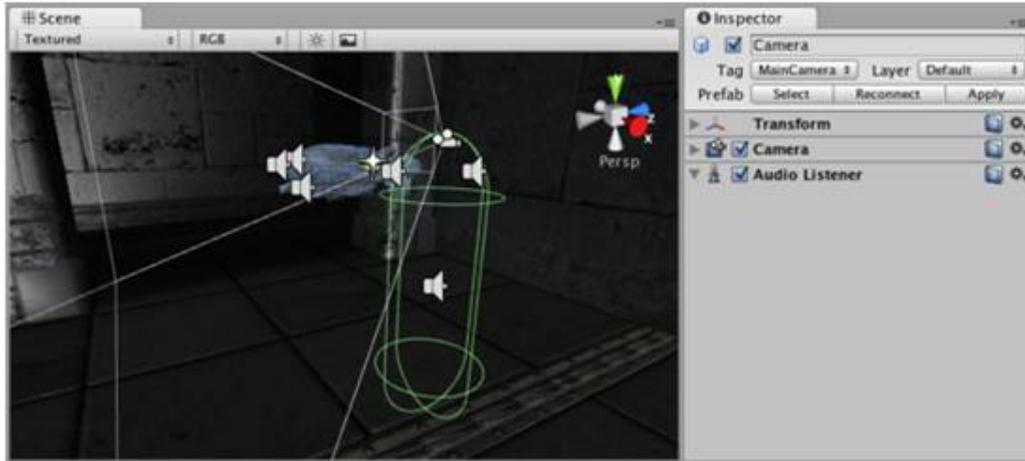


Figura 5.16: Sintesi Binaurale

5.3.1 Tabella delle sorgenti sonore

5.4 Implementazione dei metodi di interazione

Visore HTC® Vive™ dotato di due controller. I sensori integrati sono accelerometro, giroscopio e telecamera frontale.

Tramite Blender è stato possibile modellare e animare tutti gli oggetti presenti nello scenario in modo che potessero essere fruibili nell'applicativo. Le interazioni sono poi state programmate su Unity in modo che rispondessero agli input esterni dell'utente veicolati attraverso i controller.

La lista completa delle interazioni è riportata nelle tabelle 5.7 e 5.8.

Tabella 5.6: Tracce audio utilizzate per ricreare l'ambiente

Avvisi radio Fréjus	I messaggi che vengono trasmessi in maniera broadcast lungo tutto il traforo: - Norme di sicurezza - Avviso incidente - Norme di comportamento all'interno del luogo sicuro
Registrazioni ambientali all'interno del traforo	- Condizione con e senza traffico - Apertura porte esterne rifugi - Ventilazione all'interno del Bypass di sicurezza
Effetti audio derivanti dall'interazione con gli oggetti	- Estintore - Macchina (motore, frenata, luci di emergenza) - Utente (tosse, morte)

Tabella 5.7: Interazioni disponibili all'interno del Tunnel

Oggetto	Descrizione
Allarme antincendio	L'allarme antincendio, posizionato sulle colonnine SOS, permette di avvisare i centri di monitoraggio
Sportelli nicchia	Aprire lo sportello di una nicchia di sicurezza dà l'accesso al telefono e all'estintore.
Telefono SOS	Col telefono si possono chiamare i soccorsi e dare l'allarme
Estintore	L'estintore permette di spegnere il fuoco, ma è dotato di sicura e può essere usato
Porta rifugio	Si può entrare nel rifugio per evitare il fumo e questo comporta il Termine della simulazione
Portiera macchina	per rientrare in macchina

5.4.1 Iterazione con personaggi non giocabili (NPC)

Le procedure in caso di incendio non specificano comportamenti particolari da assumere nei confronti di altri individui coinvolti. Tuttavia, una interazione ideale potrebbe essere quella di dover entrare in contatto coi civili fermi per spingerli a scappare verso il rifugio, oppure il dover soccorrere un determinato individuo. L'interazione con un singolo personaggio non giocabile (NPC, Non Playable Character) è stata inizialmente pianificata, implementata e successivamente scartata per diverse ragioni, tra cui un impatto negativo sull'immersione globale (l'interazione con altre persone attraverso i controllori è estremamente innaturale) e lo sforzo insostenibile per farlo funzionare perfettamente insieme al resto della simulazione.

Di conseguenza, il conducente del camion inizialmente previsto per essere all'interno del tunnel che richiede aiuto dall'utilizzatore e che era stato programmato per camminare, funzionare ed eventualmente morire, è stato spostato all'interno del tunnel rifugio come semplice espediente estetico.

Tabella 5.8: Interazioni disponibili all'interno del proprio veicolo

Oggetto	Descrizione
Frecce di Emergenza	Il pulsante frecce di emergenza attiverà tale funzione
Chiavi	La chiave di accensione consente di spegnere il veicolo, permettendo al motore di raffreddarsi, ritardando una eventuale propagazione delle fiamme.
Maniglia	La maniglia della porta permetterà di uscire dal veicolo, proseguendo con la simulazione. Se si rimane nel veicolo, ci si espone a due possibilità: - Intossicazione da fumi - Il veicolo prende fuoco

5.5 Implementazione dei metodi di locomozione

Uno dei primi compiti che si è svolto durante lo sviluppo è stato lo sviluppo di diversi metodi di locomozione, tenendo sempre ben a mente l'obbiettivo di ottenere una buona operabilità riducendo al tempo stesso la motion-sickness⁶. È stato subito evidente l'impossibilità di adottare un approccio room scale⁷ a causa dell'incompatibilità tra spazio reale effettivo e quello virtuale. Ci si è quindi adoperati per adottare altri metodi disponibili, come ad esempio il Teleporting⁸. Purtroppo anche questo metodo è stato subito scartato a causa del poco realismo. In un contesto di training è fondamentale aver ben chiare le effettive dimensioni della zona e dei tempi di percorrenza da un punto all'altro. Sono stati quindi implementati tre metodi alternativi, uno di tipo hardware e 2 di tipo software integrati nella tecnologia Vive:

- Virtualizer (di CyberithTM): struttura per la camminata libera a base piatta e dotata di sensori; questi permettono di rilevare la velocità del movimento dei piedi. Un anello, invece assicura l'utente alla struttura e permettere di tenere traccia dell'latezza e della direzione di camminamento. Permette di muoversi avanti e indietro, di accovacciarsi, sedersi e saltare.

- Arm-Swinging: integrazione della simulazione di camminata nei controller principali. Il movimento è dato dall'oscillazione delle braccia.

- Foot-Swinging: camminata simulata mediante movimenti dei piedi sul posto. Questo metodo ha richiesto due controller aggiuntivi, poi sostituiti da due Tracker, col-

⁶Nausea provocata dalla mancanza di coerenza tra i movimenti virtuali e quelli reali

⁷Consiste nello sfruttare al meglio lo spazio a disposizione nell'ambiente reale

⁸Una volta selezionato un punto, si preme un tasto e ci si trova trasportati in quel punto

legati direttamente alle gambe mediante supporti appositamente progettati (Figure 5.17 e 5.18)



Figura 5.17: 3D-printed support for the leg tracking device



Figura 5.18: Rendering of the support for the leg Controller on the left, Support adapted to work with Tracker on the right

5.5.1 Supporti per i Tracker

Modellati tramite Blender e stampati tramite stampante 3d Makerbot®. Era inizialmente previsto che servissero come supporti per altri due controller usati per tracciare i movimenti delle gambe. A causa dei limiti dello SteamVR, che consente di tracciare direttamente solo due controller per volta, questi controller aggiuntivi

dovevano essere collegati al computer tramite cavo USB, rendendo tutto poco funzionale. Entrati in possesso dei tracker ci si è subito posti il problema se ristampare dei nuovi supporti o adattare quelli già fatti ai nuovi strumenti. Semplicemente tramite un foro praticato al centro e una vita da 1/4 di pollice si è risolto il problema lasciando i supporti riutilizzabili con entrambi gli strumenti.

5.6 Interfaccia Utente

Quando si tratta di Virtual Reality, la vecchia e consolidata UI ⁹ utilizzata per anni è diventata inadatta se non dannosa; qualsiasi tipo di sovrapposizione non è raccomandata, in quanto l'utente non è in grado di guardarsi attorno senza trascinare lo schermo fissato alla testa. La collocazione dell'interfaccia utente su piani 2D all'interno dell'ambiente 3D potrebbe essere un'alternativa, ma questa soluzione potrebbe ridurre il senso di immersione e influire sul campo visivo del soggetto.

Per evitare questi problemi, l'utilizzo dell'interfaccia utente 3D è stato limitato al menu principale. Prima scena dell'applicazione, in cui l'utente può selezionare il dispositivo di locomozione, fare una piccola pratica e quindi avviare la simulazione.

Un altro obiettivo durante la progettazione dell'interfaccia utente è stato lo sviluppo di una buona risposta alle interazioni utente; a tal fine sono stati analizzati un gran numero di applicazioni ViveTM per sfruttare tutte le funzionalità utili e rendere il sistema di interazione il più intuitivo possibile. Come risultato dell'indagine, all'interno del sistema di interazione sono state integrate le seguenti caratteristiche:

- Un Outline Shader, utilizzato per informare il giocatore quando può essere eseguire un'interazione evidenziando l'oggetto interattivo.
- Vibrazione, usato per informare il giocatore quando la sua mano tocca un oggetto interattivo.
- Un suono di selezione e un suono click, utilizzato solo per l'UI del menu principale.
- Un ulteriore Outline Shader contorno per il controller, usato per evidenziare uno o più pulsanti quando il giocatore può eseguire un'interazione.

5.7 Tool Aggiuntivi

Al termine della simulazione ne viene fatto un resoconto, il quale mette in evidenza gli errori dell'utente, il Tempo della simulazione e le operazioni compiute.

⁹Interfaccia utente, il modulo software progettato per visualizzare le informazioni e eventualmente interagire con l'utente.

Capitolo 6

Valutazione

6.1 Introduzione

Questo studio ha confrontato la facilità d'uso e la chinetosi di due (tre) differenti strategie di locomozione in ambienti virtuali indossando un visore di realtà virtuale (HMD). Nel primo, l'utente era inserito nella pedana multi-direzionale (Virtualizer di Cyberith) e incitato a muoversi liberamente. Nel secondo, l'utente, stando fermo sul posto, impartiva il comando di movimento premendo un tasto sui controller e oscillando le braccia (Arm-Swinging, AS) Trenta volontari sono stati selezionati per la prova; ventinove utenti hanno completato l'esperimento usando ciascuno un solo metodo di locomozione. Un solo utente si è ritirato dalla simulazione prima del suo termine, a causa di un'elevata nausea. Alcuni soggetti hanno riferito un leggero aumento in negativo dei sintomi durante l'uso della rispettiva strategia ma, per il gruppo nel suo complesso non ci sono stati grossi peggioramenti delle condizioni. Le maggiori differenze si sono riscontrate nella comodità e praticità (usabilità) del metodo di locomozione.

6.1.1 Usabilità

L'usabilità è un termine multidimensionale che si riferisce a aspetti diversi di un prodotto o di un sistema e comprende fattori quali la facilità d'uso, manipolazione degli errori, assistenza, ecc. Shackel (1981)[16] ha dichiarato che: "l'usabilità di un computer è misurata da quanto facilmente e in che modo il computer possa essere utilizzato da un gruppo specifico di utenti, dato particolari tipi di supporto, per eseguire un insieme fisso di attività, in un insieme definito di ambienti".

Con il crescente interesse per le applicazioni di realtà virtuale (VR) vi è un urgente bisogno di quantificare i benefici che la tecnologia VR può portare, perché il costo nel provvedere ad una soluzione VR può essere alto soprattutto laddove sono richieste alte prestazioni. Quando le persone provano i sistemi VR spesso si lamentano di una varietà di aspetti legati all'interfaccia, dalla risoluzione del display fino al metodo di interazione. Quando qualcuno lamenta che il display si aggancia o scatti, l'assunto naturale è che il computer non sia in grado di aggiornare il display

abbastanza velocemente. Tuttavia, un'analisi più dettagliata mostrerà che questa latenza può derivare da un certo numero di aree del sistema, ad esempio il sistema di tracciamento della testa, il motore grafico, un modello mal progettato, una simulazione inappropriata o addirittura il dispositivo di interazione utente. Solo dopo un'accurata interrogazione e un'analisi la causa reale può essere stabilita e quindi rettificata. L'utente non deve nemmeno sapere o preoccuparsi di come sia stato progettato il sistema VR, ma la loro percezione sull'utilità del sistema è fondamentale se si vogliono sviluppare sistemi VR efficaci.

La natura tridimensionale della VR ha introdotto, quindi, nuove problematiche riguardanti il modo più idoneo per progettare dispositivi di input per rendere il movimento più attivo e più intuitivo possibile in un ambiente virtuale (VE)(Sturman and Zeltzer, 1994) (come citato da Sarah Nichols, 1999) [13]. La locomozione all'interno del VE rappresenta al momento la sfida maggiore per i progettisti di applicazioni VR. Con l'aumento del potere di calcolo delle schede grafiche e il realismo sempre maggiore degli ambienti virtuali, fornire un metodo di locomozione efficace rappresenterebbe il tassello mancante per massimizzare il senso di presenza dell'utente nell'ambiente. Occorrono valutazioni di usabilità al fine di valutare i metodi di locomozione realizzati.

6.1.2 Malattia del Movimento

Uno degli errori più comuni nel design di applicazioni in realtà virtuale (VR) è quello di credere che basti sentirsi immerso nell'ambiente virtuale affinché la simulazione sia definita realistica. L'immersione, infatti, non è libera da problemi. Come citato da Stanney *et al.* (1999)[17], in quasi tutti i simulatori di volo ad uso militare sono stati segnalati diversi gradi di sintomi da chinetosi o malattia del movimento (Kennedy et al, 1989). Simili sintomi, talvolta noti come *cybersickness*, vengono ora riportati con una maggiore regolarità dagli utenti di VE(Kennedy et al, 1995). Si tratta di sintomi che sono una estensione della chinetosi o malattia del movimento.

La malattia del movimento o, più correttamente, la sindrome del mal adattamento al movimento, è una condizione che si verifica quando le persone sono esposte a stimoli di movimento reali o apparenti a cui sono sconosciuti e quindi inadatti e impreparati. Il termine malattia è un errore, in realtà il suo manifestarsi indica solo il corretto funzionamento del sistema vestibolare e in quanto tale dovrebbe essere considerata come la norma piuttosto che l'eccezione. Il sistema vestibolare aiuta il corpo a mantenere l'equilibrio e funziona come un giroscopio, ma funge anche da meccanismo di difesa. Ci avvisa per esempio quando il nostro cervello percepisce il corpo come in movimento quando in realtà questo rimane fermo. L'esempio non è preso a caso poiché questo è proprio quello che succede quando si è immersi in un ambiente virtuale.

Quando si indossano HMD esistono numerose anomalie che potrebbero portare a cambiamenti nella propriocezione, incluse distorsioni visive, errori di posizionamento e scalabilità delle differenze tra il mondo reale e la versione VE. Il tocco e la

pertinenza consentono a una persona di concepire la dimensione, la forma e la posizione degli oggetti. Inoltre, prosegue Stanney, "Gibson (1966) ha suggerito che la locomozione coordinata in tutto un ambiente è il risultato di una correlazione tra il flusso ottico che indica le reazioni di auto-movimento e la risposta propriocettiva. Quando immerso in un VE, una persona utilizzerà i propri sensi propriocettivi per gestire l'interfaccia aptica (ad es. Guanto), joystick, mouse o un altro dispositivo che li sposta sul mondo virtuale". Sulla base di osservazioni nel nostro laboratorio, quando una persona interagisce inizialmente con un VE i loro movimenti sono relativamente rallentati e non coordinati. Stanney riferisce che, James e Caird (1995) attribuirono questa difficoltà a una mancanza di correlazione tra la scena visiva fornita dall'HMD e l'esperienza aptica. Questo può innescare come accennato in precedenza l'autodifesa del sistema vestibolare. Tuttavia, mano a mano che le persone si adattano e ricalibrano i loro movimenti a quelli che sono essenziali per manipolare efficacemente il VE, i loro comportamenti diventano più fluidi e controllati.

I sintomi principali della malattia del moto sono nausea e vomito, pallore e sudorazione fredda (Reason e Brand, 1975; Benson, 1984, 1988). Tuttavia, questi segni sono normalmente preceduti da alcuni (se non tutti) dei seguenti sintomi fisiologici: sensibilizzazione dello stomaco, vertigini, calore corporeo, mal di testa, sudorazione, aumento o diminuzione della salivazione, sonnolenza, e flatulenza[8].

6.2 Metodo

La condizione era che ciascun soggetto completasse l'esperimento con un solo metodo di locomozione, in modo da evitare l'effetto dell'autoapprendimento (*e-learning*). Le sessioni hanno avuto luogo a Torino lo stesso giorno in luoghi diversi. Con la pedana presso SiTI e con l'AS presso il laboratorio del GRAINS situato al Dipartimento di Automatica e Informatica (DAUIN) del Politecnico di Torino.

Per poter eseguire una valutazione dello scenario si è mirato a:

- eseguire osservazioni di carattere generale sulla qualità della simulazione;
- eseguire un confronto fra i due metodi di locomozione, Arm-Swinging e Pedana, per stabilire se i due metodi di locomozione fossero identici, o se impattassero direttamente la simulazione.

I dati sono stati raccolti mediante questionario, consultabile in Appendice A.

Contemporaneamente, si è deciso di catturare la risposta dell'utente durante la simulazione per darne una valutazione comportamentale. I dati sono stati raccolti sotto forma di:

- resoconto (*log*) della simulazione, contenente azioni e tempi;
- registrazione a campione della sessione allegata con riprese dell'utente durante la stessa.

6.3 Soggetti

Le 30 persone volontarie che si sono prestate erano maschi e femmine (Figura 6.1) in buona salute tra i 20 e i 40 anni di età. Erano tutti o dipendenti SiTI o studenti del Politecnico. Nessuno aveva conoscenze consolidate sulla tecnologia che sarebbe andato a sperimentare (HTC Vive), né sul serious gaming, né tanto meno era mai stato al Tunnel del Fréjus. Possedevano tuttavia conoscenze generali di gaming, VR e misure di sicurezza stradale (Figura 6.2).

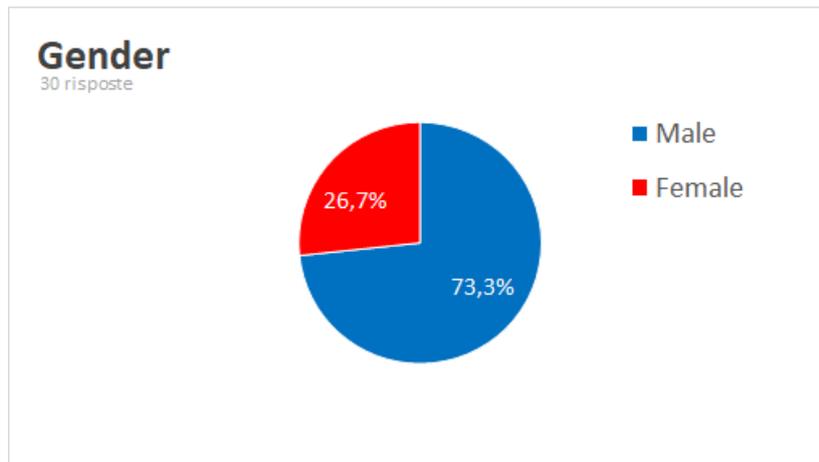


Figura 6.1: Distribuzione dei partecipanti

6.4 Supporti

6.4.1 Presentazioni

Al fine di introdurre il soggetto alla simulazione e alle tecnologie che sarebbe andato ad utilizzare è stato necessario preparare diverse presentazioni, una per metodo di locomozione. Le presentazioni avevano lo scopo di dare una prima infarinatura generale sull'utilizzo dei controller e dei metodi di camminata, nonché sullo scopo della simulazione. L'utente doveva prendere coscienza che sarebbe stato inserito in una situazione reale con conseguenze reali e allo stesso tempo prendere dimestichezza con i mezzi di interazione.

6.4.2 Questionario VRUSE

Il VRUSE [9] rappresenta un metodo standard per valutare l'usabilità di interfacce VR. Gli obiettivi dello strumento diagnostico sono quelli di fornire un aiuto per assistere nelle valutazioni di usabilità nelle interfacce virtuali e un metodo strutturato per catturare risposte utente sui problemi di utilizzabilità di un sistema VR. È un indicatore sensibile delle aree problematiche dell'interfaccia utente VR. Utilizza una scala di opinione a 5 punti¹. Nel questionario i fattori di usabilità sono suddivisi in

¹per nulla d'accordo, non d'accordo, indeciso, d'accordo, assolutamente d'accordo

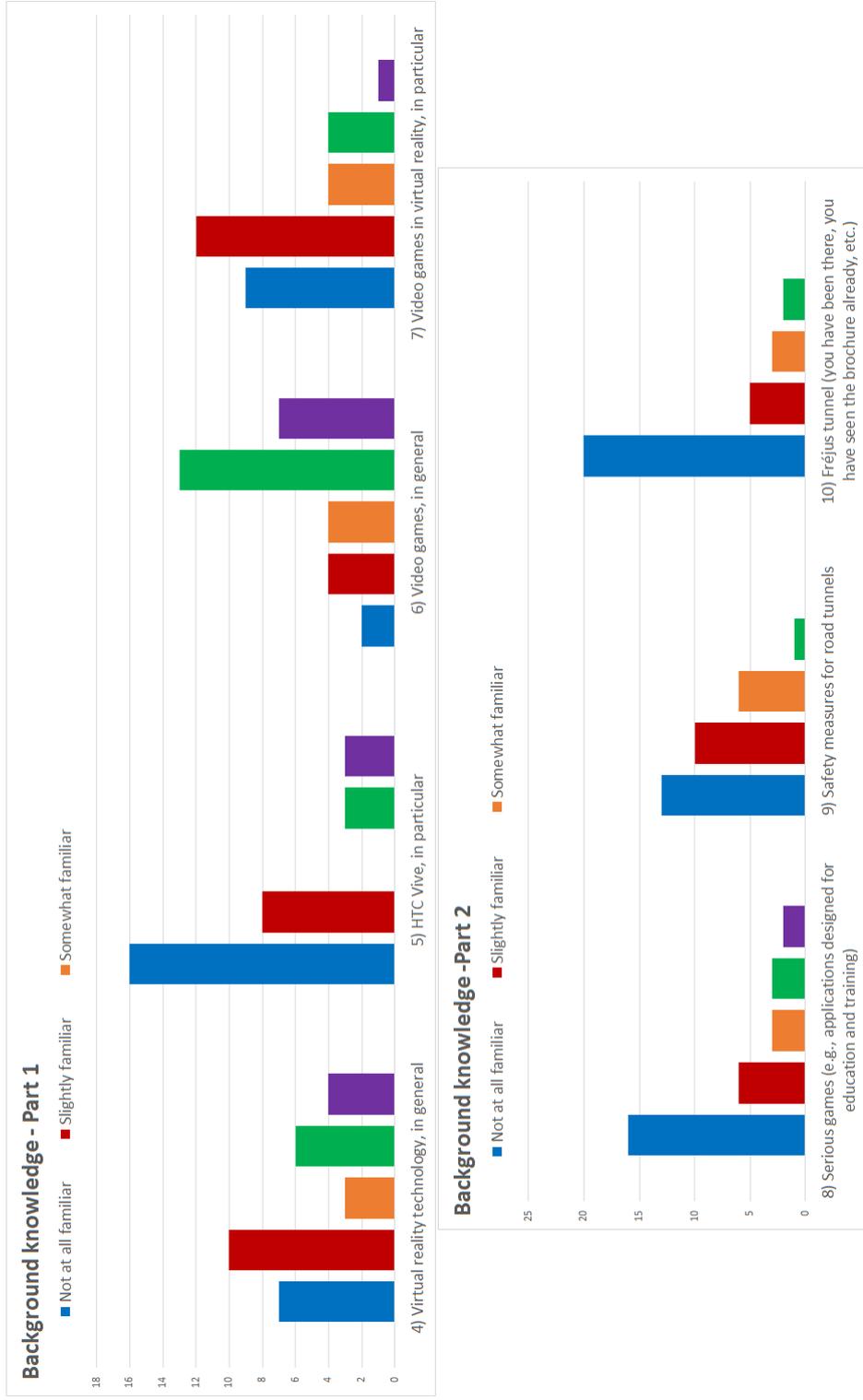


Figura 6.2: Conoscenze pregresse degli utenti

Tabella 6.1: Fattori chiave di usabilità e obiettivi

Fattori di usabilità	Obiettivo
Funzionalità	L'interfaccia deve essere in grado di fornire il livello di funzionalità (controllo) che l'utente si aspetta per completare un'attività.
Locomozione	L'utente deve essere in grado di muoversi in modo naturale nell'ambiente virtuale.
Interazione con gli oggetti	L'utente deve essere in grado di interagire e controllare in modo naturale l'ambiente virtuale.
Flessibilità	Il sistema VR non deve limitare l'utente che deve essere in grado di interagire con il sistema in modo flessibile.
Fedeltà di simulazione	Per essere utile un sistema VR necessita di un modello o simulazione sottostante che controlli l'ambiente virtuale.
Senso di immersione e Presenza	Un sistema VR deve consentire ad un utente di sentirsi parte (o immerso) di un ambiente virtuale.
Usabilità complessivo del sistema	Nel complesso un sistema VR deve essere intuitivo e facile da usare.

categorie specifiche. Per questo esperimento, questionario non è stato preso nel suo insieme ed è stato rielaborato in vari punti in modo che comprendesse anche una valutazione del metodo di locomozione oltre a quello di interazione, già previsto. La Tabella 6.1 riassume gli aspetti chiave analizzati dal questionario.

6.4.3 Questionario per la malattia da simulazione (SSQ)

Al fine di misurare la cybersickness sperimentata a seguito dell'esposizione al VE, i partecipanti hanno compilato prima e dopo la simulazione il *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ)[10]. Il SSQ è costituito da una lista di 16 sintomi, ognuno dei quali è correlato in termini di livelli di gravità², con il massimo punteggio totale possibile pari a 235. Viene utilizzata una procedura di punteggio diagnostico per ottenere un punteggio globale riflettendo il livello generale di disagio noto come il punteggio totale di gravità (TS). Il SSQ fornisce anche punteggi su tre sotto scale che rappresentano dimensioni distinte della malattia da simulazione (vale a dire nausea, disturbi oculomotori e disorientamento). I calcoli per la determinazione dei punteggi è descritta in Appendice B.

²nessuno, leggero, moderato, grave

6.5 Procedura

I partecipanti venivano fatti accomodare uno alla volta nel laboratorio e li si introduceva all'esperimento. Con l'ausilio della presentazione venivano indicati contesto e obiettivi della prova. Veniva loro mostrato e spiegato l'opuscolo ufficiale. Si chiedeva poi di compilare la parte introduttiva del questionario comprendente:

- dati personali (1-3);
- verifica di conoscenze pregresse (4-10);
- verifica di eventuali sintomi di chinetosi prima della simulazione (11-26)

Successivamente venivano mostrate le attrezzature. Ad esempio per introdurre all'utilizzo del controller ne veniva consegnato uno direttamente all'utente e gli si indicava la presentazione che mostrava quali erano i pulsanti per interagire con gli oggetti e quali i risultati che si sarebbe dovuto aspettare (es. quando è possibile interagire con un oggetto questo si illumina se entra in contatto con il controller). Veniva poi il momento di spiegare il metodo di locomozione. Nel caso del AS si spiegava che stando fermo sul posto bisognava oscillare le braccia tenendo premuti i grip del controller, il rilascio dei pulsanti disabilitava il movimento.

Quelli invece che avrebbero testato la pedana erano invitati ad indossare l'imbragatura e ad entrarvi. Ne venivano successivamente mostrati i sensori che avrebbero catturato il comando di camminata veicolato del movimento dei piedi, movimento che doveva essere quanto più naturale possibile.

Visto il grande numero di persone che non aveva mai avuto a che fare con tecnologie VR, in generale si tranquillizzava il partecipante comunicando che prima di iniziare la simulazione vera e propria ci sarebbe stata una fase introduttiva in cui avrebbe potuto prendere dimestichezza con i mezzi. Si procedeva quindi ad aiutare l'utente ad indossare il visore e gli venivano assicurati i controller alle mani, dopodiché si avviava il programma.

Il soggetto si sarebbe quindi trovato all'interno di una riproduzione del luogo sicuro presente nel tunnel del Fréjus e guidandolo all'interno della stanza si cercava di aiutarlo a prendere confidenza con le interazioni e la camminata. Una volta che il partecipante comunicava di essere pronto venivano collegate le cuffie al casco, che avrebbero consentito al soggetto di immergersi completamente nello scenario, e veniva avviata la simulazione (Figure 6.3).



Figura 6.3: un utente mentre prende dimestichezza con le iterazioni dello scenario

Al termine della simulazione si aiutava l'utente a liberarsi dell'attrezzatura, e dopo una breve raccolta di impressioni dirette gli si indicava di compilare la parte finale della valutazione.

- funzionalità (27-33)
- locomozione (34-43)
- interazioni con oggetti (44-54)
- chinetosi dopo la simulazione (SSQ) (55-70)
- flessibilità del sistema (71-74)
- fedeltà della simulazione (75-84)
- senso di immersione e presenza (85-94)
- usabilità complessiva del sistema (95-106)
- resoconto della simulazione (107-115)

6.6 Risultati

Una volta in possesso dei dati si è proceduto con una loro lettura.

6.6.1 Osservazioni Generali

Si può notare come il sistema abbia risposto in maniera positiva alla richiesta di controllo da parte dell'utente. Infatti domande come la 27, 29, 31 (Figura 6.4) che riguardano rispettivamente la qualità, la facilità di accesso e la comprensione delle funzionalità mostrano valori tendenti verso destra ("d'accordo"). Mentre domande in merito all'ambiguità, alla difficoltà di memorizzazione e alla poca chiarezza (28, 30, 33) sono più spostate verso sinistra ("non d'accordo").



Figura 6.4: Risposte sulla Funzionalità

Per la chinetosi (Figure 6.7 e 6.8) è stato eseguito il calcolo precedentemente accennato per ottenere i punteggi relativi a nausea, disturbi oculomotori e disorientamento, insieme al punteggio totale di gravità. È immediatamente evidente come in media i partecipanti non abbiano registrato una significativa differenza tra il loro stato di salute precedente alla simulazione e quello successivo, che sono rimasti su valori estremamente bassi (Figura 6.5). Tra le cause di questo fenomeno potrebbe aver giocato un ruolo chiave il poco tempo mediamente impiegato per portare a termine l'esperimento (Figura 6.6). È chiaro che se non si possono individuare soggetti che sperimentano conseguenze, questo problema non può essere effettivamente gestito.

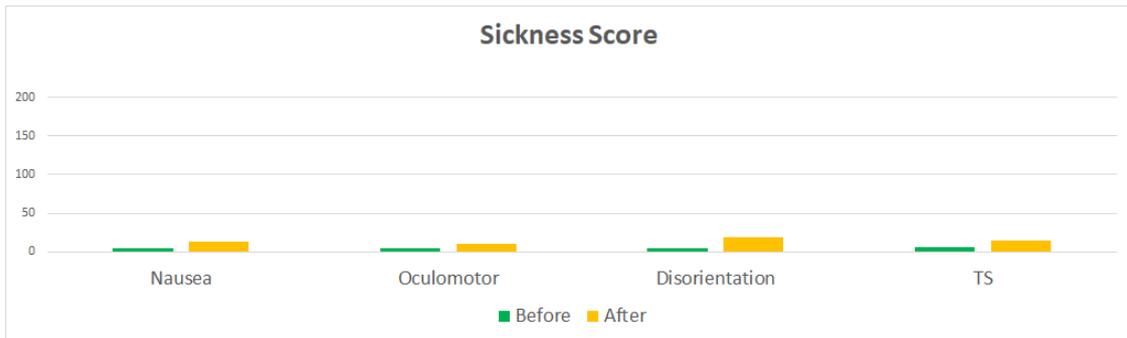


Figura 6.5: Confronto Punteggi Chinetosi Prima e Dopo la Simulazione

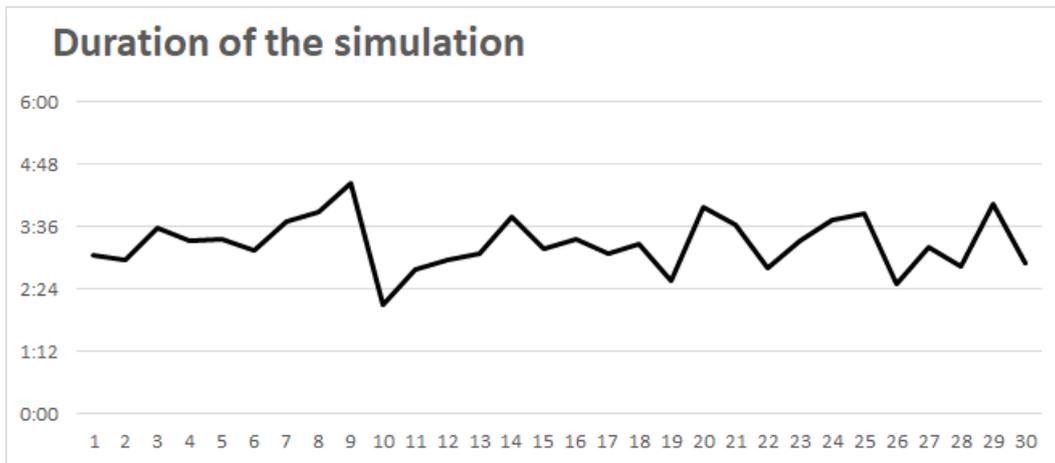


Figura 6.6: Durata della simulazione per singolo utente

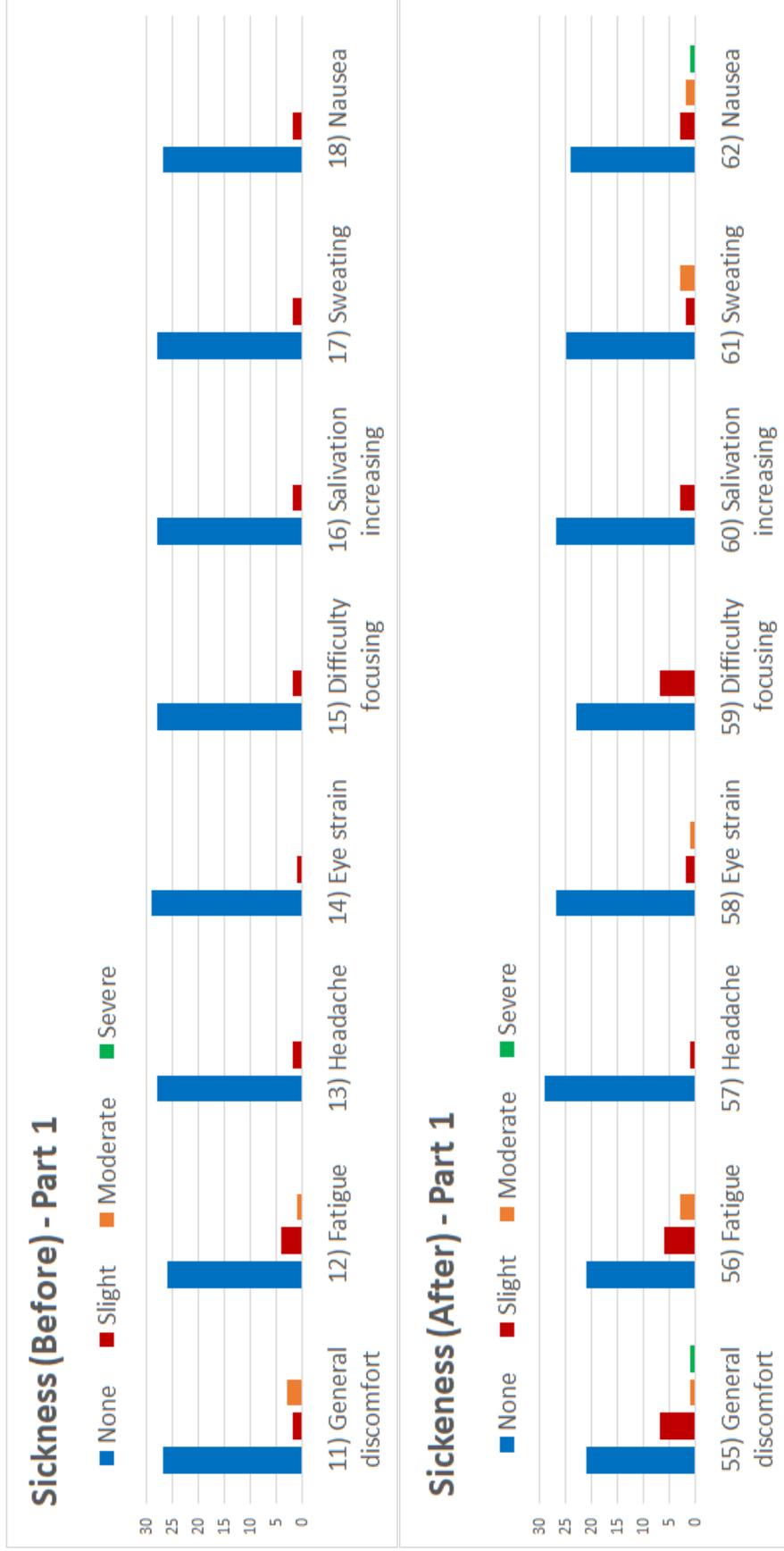


Figura 6.7: Confronto risposte sulla Chinetosi prima e dopo la simulazione (parte 1)



Figura 6.8: Confronto risposte sulla Chinetosi prima e dopo la simulazione (parte 2)

Siccome le valutazioni sono state fatte su due diversi metodi avvalendosi di due diversi gruppo di utenti, i dati su questa sezione presentano una maggiore eterogeneità. Nonostante questo possiamo dire che entrambi i metodi non si sono rivelati particolarmente adeguati allo scopo e non eccessivamente complicati da usare (domande 39 e 42, Figura 6.9).

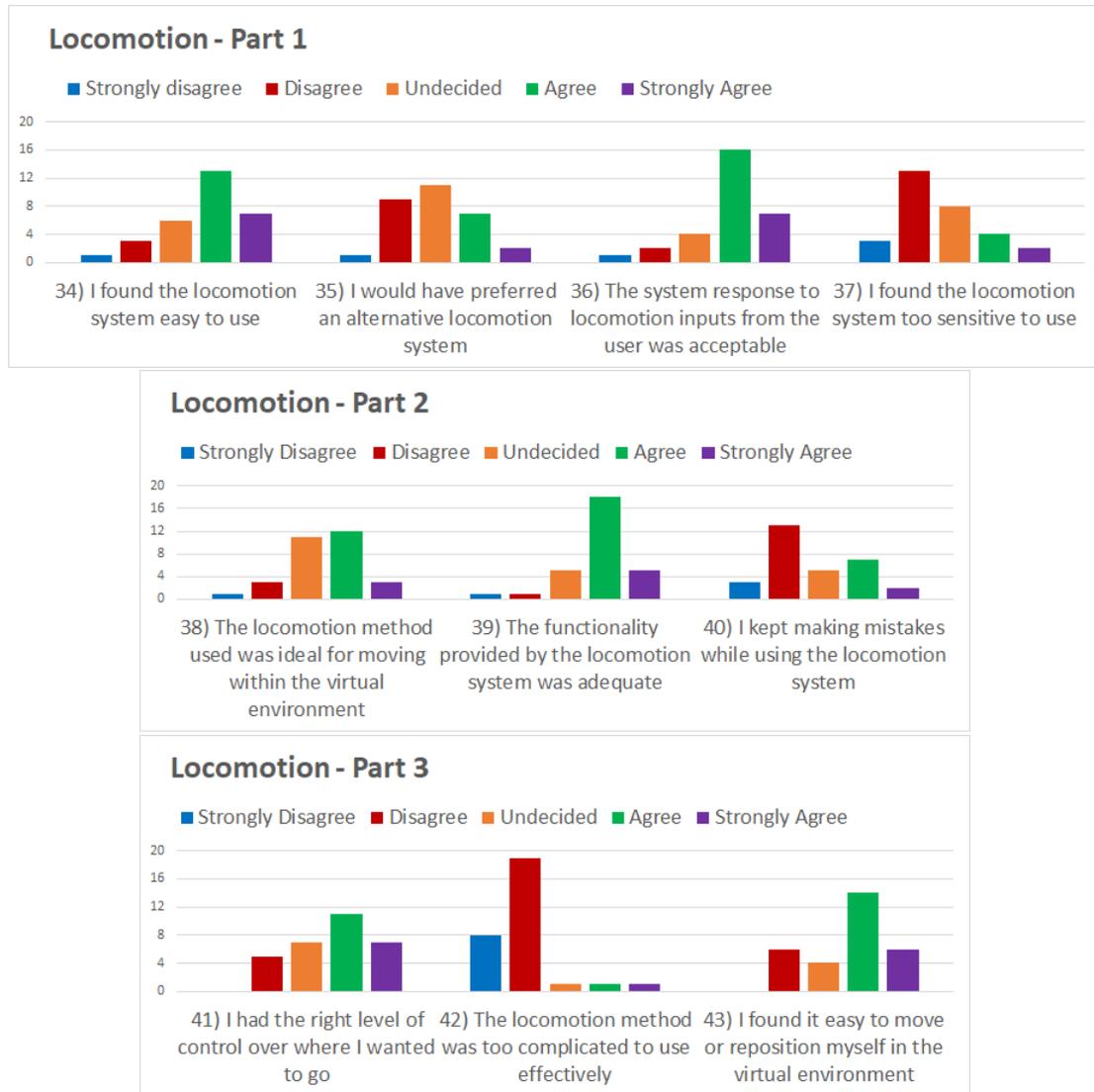


Figura 6.9: Risposte sulla Locomozione

A proposito delle interazioni l'andamento mostra (Figura 6.10) come il sistema sia stato considerato di buona qualità. Gli utenti si sentivano in controllo sugli oggetti. Questo può essere legato agli strumenti utilizzati i controller ViveTM che sono strumenti già consolidato negli anni, e alla qualità della della logica di interazione sviluppata.

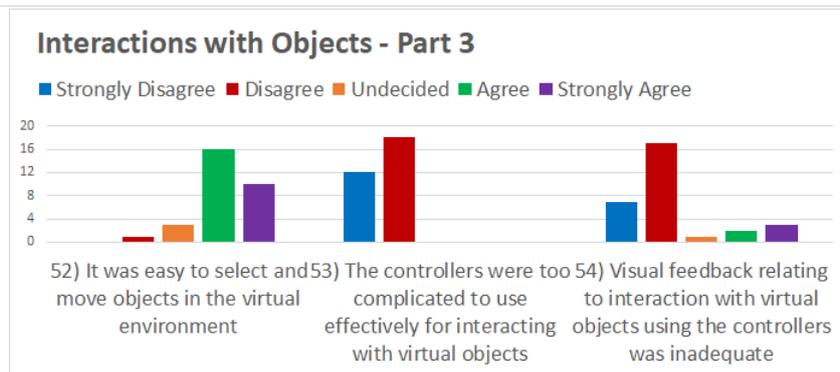
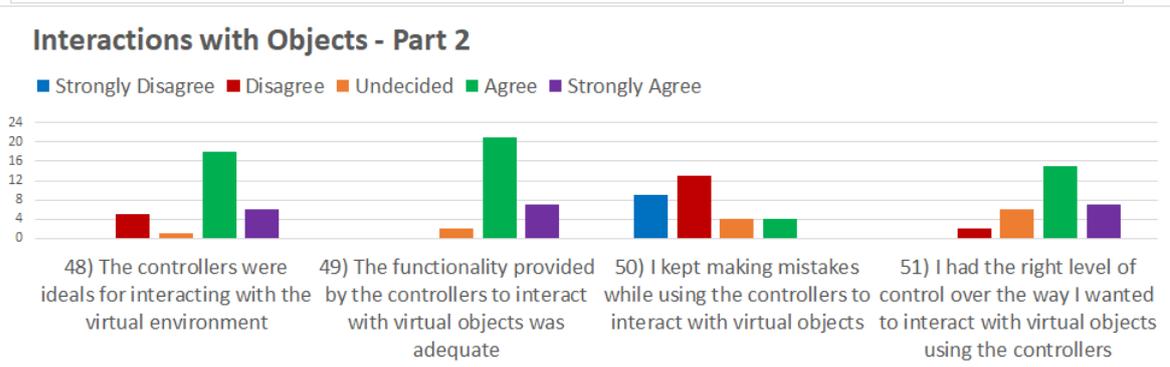
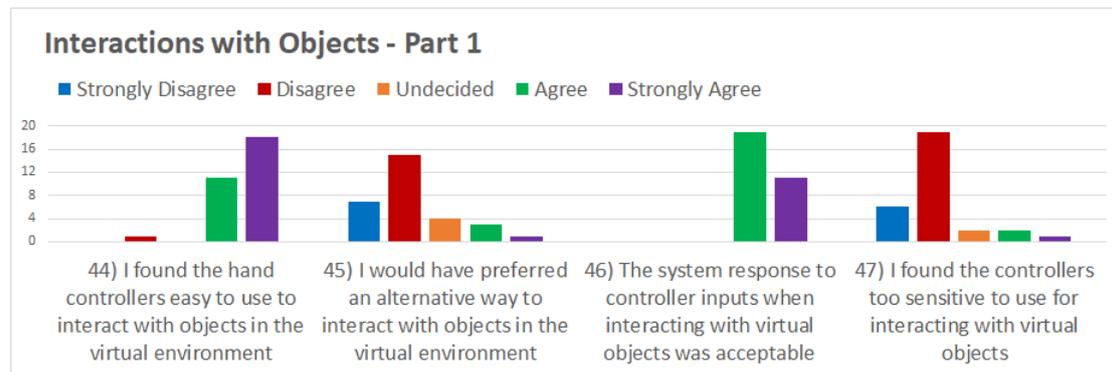


Figura 6.10: Risposte sulle Interazioni con Oggetti

Il sistema si è mediamente dimostrato in grado di adattarsi ai bisogni dell'utente (Figura 6.11).

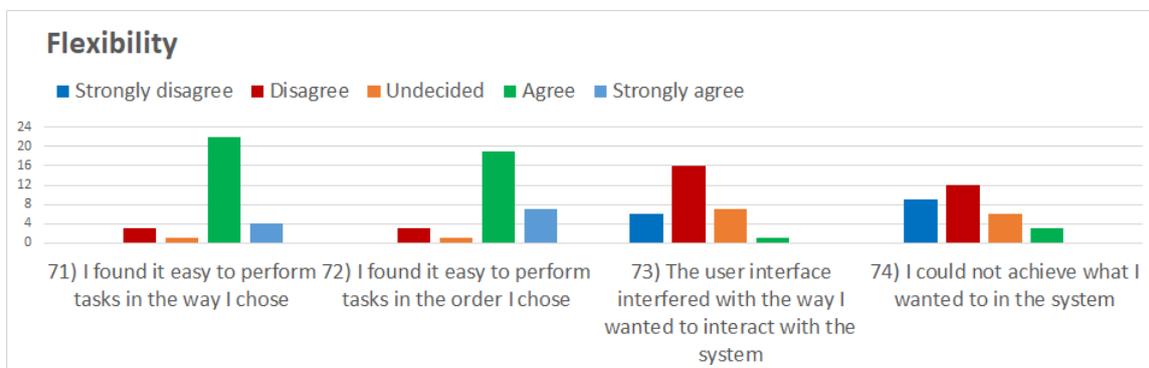


Figura 6.11: Risposte sulla Flessibilità

La fedeltà della simulazione era tra i risultati più attesi dalla valutazione. Questa si è dimostrata di alto livello (Figura 6.12), dotata di una dinamica di interazione efficace

(77) e che consentiva un certo livello di controllo(81). Allo stesso tempo era dotata di una logica altamente realistica (non soggetta comportamenti imprevisi, 78) e priva di qualsivoglia latenza (84), e questo a volte ha portato ad un miglioramento della qualità delle prestazioni utente (83). È inoltre emerso che gli oggetti si integravano bene con l'ambiente (79).



Figura 6.12: Risposte sulla Fedeltà della Simulazione

Altrettanto attesi, i risultati sulla presenza e l'immersività. Figura L'andamento del grafico in Figura 6.13 mostra come l'utente si sia sentito immerso (85) e allo stesso tempo parte integrante (87) della simulazione e come queste sensazioni fossero necessarie per completare i compiti (86). Anche qui emerge come gli oggetti si integrassero bene con l'ambiente e offrissero un buon livello di realismo (93)

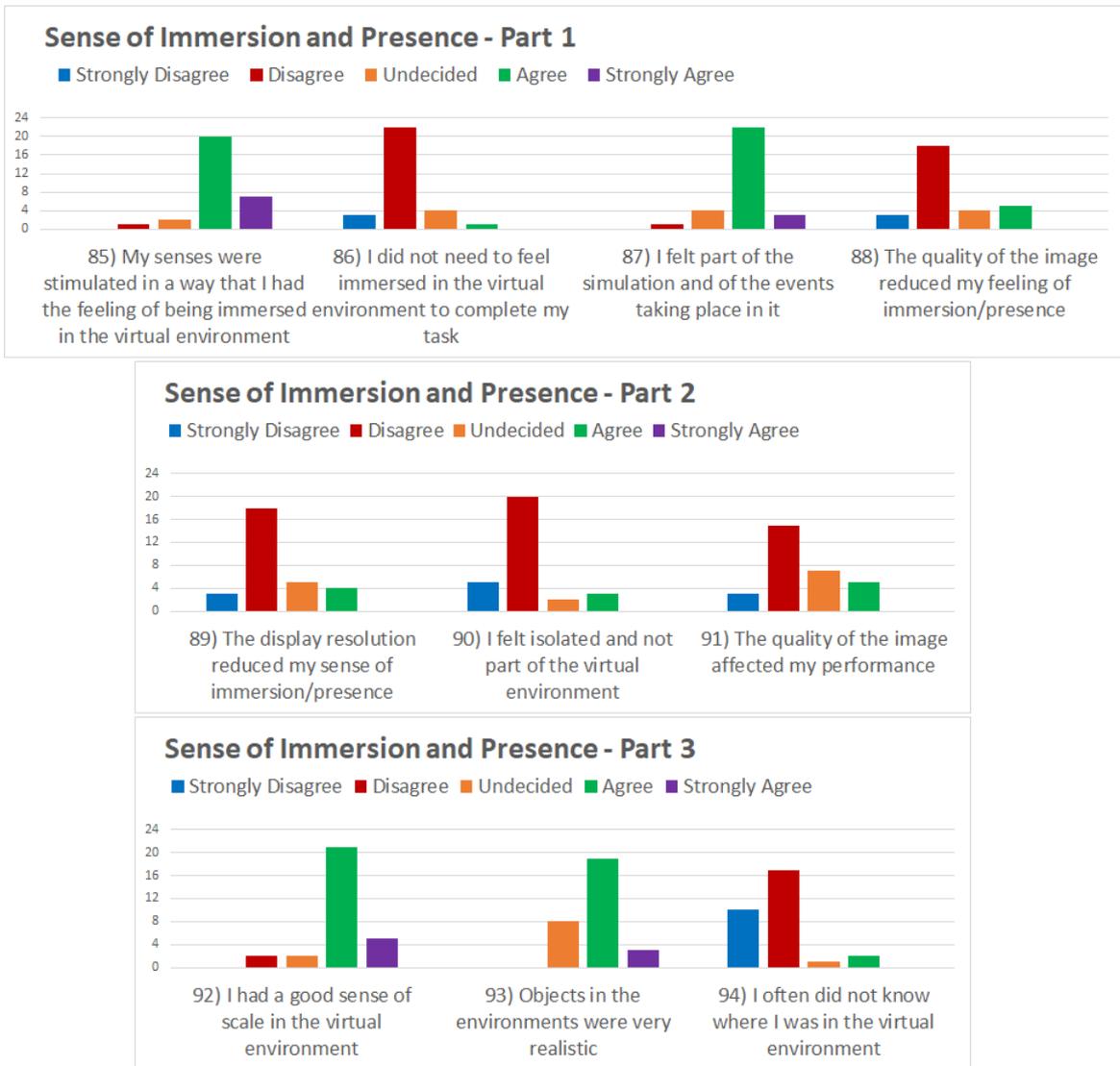


Figura 6.13: Risposte sul Senso di Immersione e Presenza

Infine, le risposte in merito all'usabilità generale riassumo quanto detto fin'ora; il tempo di risposta del sistema era da considerarsi come accettabile (98), lo strumento era facile da usare (99), privo di comportamenti imprevisti (102) e di come l'utente si sia divertito nell'usarlo (106).

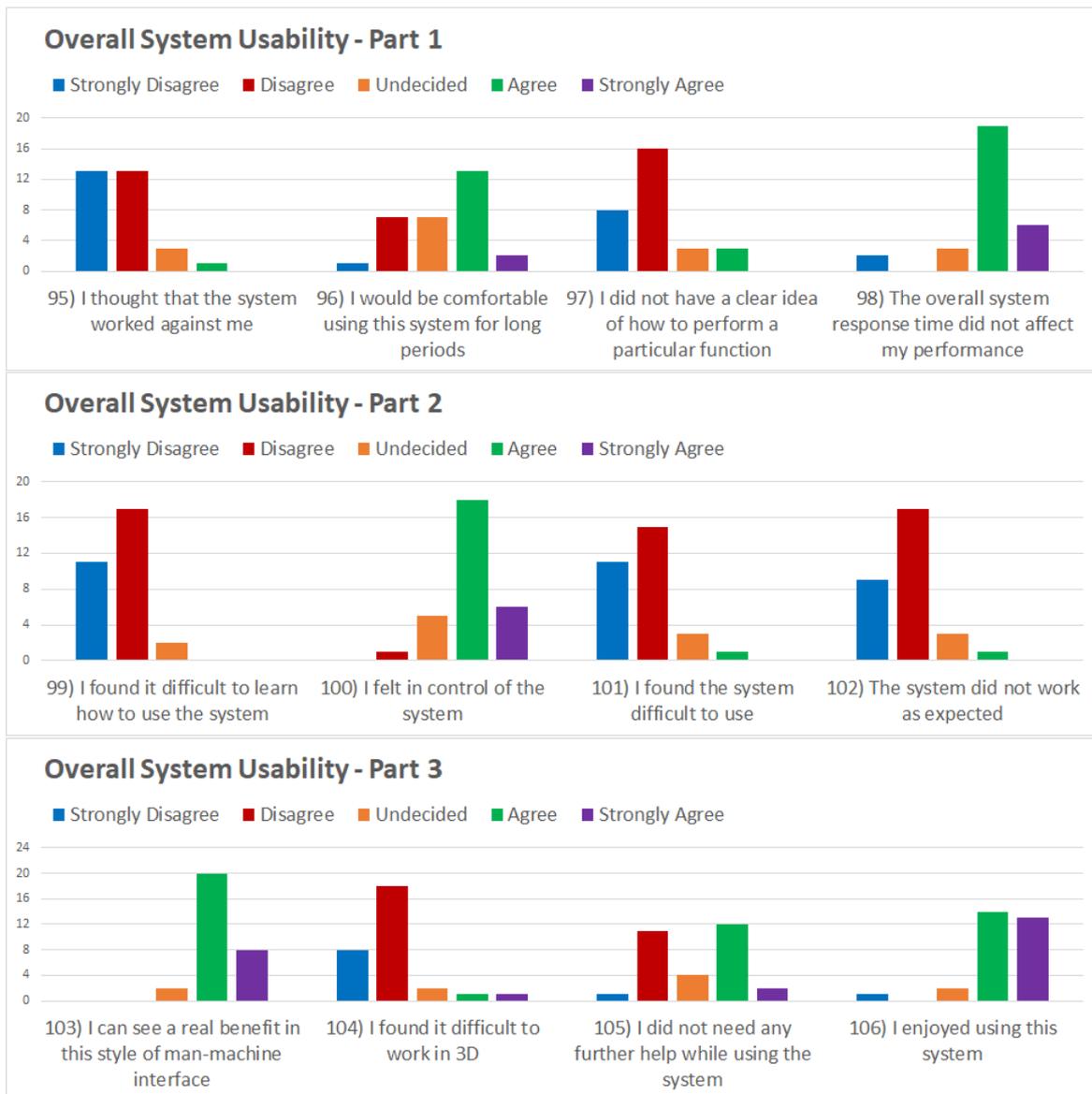


Figura 6.14: Risposte sull'Usabilità generale del Sistema

6.6.2 Analisi dei dati sulla locomozione

Una ulteriore indagine è stata effettuata suddividendo gli utenti in due gruppi in base sistema di locomozione utilizzato durante il test.

Per valutare il significato della risposta raccolta, è stato eseguito sui dati un calcolo del T-test di Student³ (disaccoppiato, a due lati). Quindi è stato possibile stabilire se le differenze tra i valori medi tra i due gruppi (Arm-Swing e Virtualizer) fossero o meno dovuti al caso e, più precisamente, se i due metodi di locomozione fossero equivalenti o meno.

Per poter dare un valore alle risposte sono state loro assegnate delle scale numeriche. Per il VRUSE:

- Per nulla d'accordo = 0

³è un test statistico di tipo parametrico con lo scopo di verificare se il valore medio di una distribuzione si discosta significativamente da un certo valore di riferimento

- Non d'accordo = 1
- Indeciso = 2
- D'accordo = 3
- Assolutamente d'accordo = 4

Per l'SSQ, invece:

- Nessuno = 0
- Leggero = 1
- Moderato = 2
- Grave = 3

Quindi, il T-test, a partire dai valori delle risposte di due gruppi separati, calcola un valore p che viene di solito confrontato con la soglia standard di 0,05; se il valore è inferiore, il divario tra le medie dei due gruppi è significativo, mentre se supera il valore allora i dati raccolti non possono essere utilizzati per validare ipotesi. Ci sono poi un paio di sotto-livelli di valenza:

- $p \geq 0.05$ non significativo
- $p < 0.05$ significativo
- $p \leq 0.01$ molto significativo
- $p \leq 0.001$ estremamente significativo

Per poter meglio evidenziare la significatività dei risultati in seguito ai calcoli eseguiti col T-test i grafici che seguono saranno dotati di diversa colorazione dei dati a seconda dei casi; in presenza di un valore significativo di p le colonne corrispondenti dell'istogramma saranno colorate in maniera a netta rispetto a quelle colonne rappresentati dati non significativi secondo T-test.

L'equivalenza dei due metodi di locomozione rappresenta l'ipotesi nulla di questa analisi.

Per quanto riguarda la sezione del VRUSE (Appendice A) sulla **Funzionalità** (Figure 6.15) non sono state registrate valori di p significativi, ad eccezione della domanda 29 ($p = 0,023$). Questa ha mostrato come l'AS sia, con poco scarto rispetto alla pedana (3,47 contro 3), il metodo che consente maggiore accesso e con più facilità a tutte le funzionalità del sistema. Il fatto che in generale non ci siano differenze significative nelle medie ci suggerisce che i due sistemi possono essere considerati come equivalenti dal punto di vista delle funzionalità.

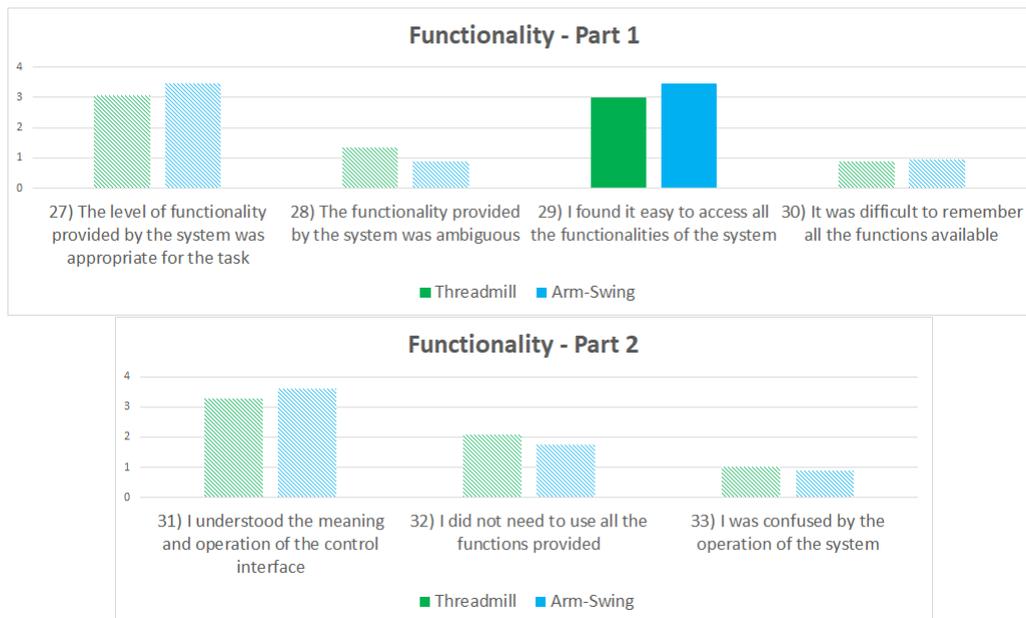


Figura 6.15: Valutazione medie relative alla Funzionalità confrontando i metodi di Locomozione

I risultati relativi alla valutazione sulla **Locomozione** (Figure 6.16) hanno registrato medie a favore della tecnica AS. Questo maggior gradimento della tecnica rispetto alla pedana è risultato significativo ($p < 0.05$, con valori anche molto bassi). Dalla domanda 34 ($p = 0.0001$) si può leggere come il sistema AS si sia rivelato mediamente più facile da usare rispetto alla pedana (3,4 contro 2,1), mentre la domanda 36 ($p = 0.0003$) ha dimostrato come, sempre l'AS, fosse più performante in termini di risposta ai comandi utente (3,5 contro 2,3). I dati sulla domanda 38 ($p=0,0012$) affermano come l'AS venga ritenuto più ideale per muoversi nel VE in (2,9 contro 1,9); la domanda 39 ($p=0,019$) mostra come sia stato di poco ritenuto come più adeguato (3,2 contro 2,46). Come sottolineato dai dati della domanda 40 ($p=0,0001$), gli utenti che hanno provato la pedana erano maggiormente soggetti ad errori (2,5 contro 1), mentre dalla domanda 41 ($p=0,0005$), come lamentassero uno scarso controllo sulla direzione del movimento (2,1 contro 3,3), una maggiore complessità (1,3 contro 0,5) dalla domanda 42($p=0,009$), ed infine una maggiore difficoltà a riposizionarsi nell'ambiente virtuale (2,2 contro 3,1) mostrata dalla domanda 43 ($p=0,01$).

Da segnalare, non sono risultate significative le medie sulla preferenza di un altro metodo rispetto a quello usato, domanda 35 ($p= 0,062$). Questo dato potrebbe essere causato dall'impossibilità per molti utenti di avere un metro di paragone, essendo all'oscuro degli altri metodi sperimentati. Di conseguenza si sono trovati limitati nell'esprimere una preferenza alternativa. Discorso simile può essere fatto nell'esprimere un giudizio sull'eccessiva sensibilità del sistema, domanda 37 ($p= 0,058$).



Figura 6.16: Valutazione medie relative alla Locomozione

Nelle **Interazioni con Oggetti** (Figure 6.17) non ci riscontrano differenze significative. In linea di massima, ce lo si poteva aspettare in quanto si sono utilizzati strumenti già studiati in passato e che si sono consolidati nel tempo. Poteva essere interessante tuttavia sapere se, nel caso del AS, ci si potesse trovare intralciati nel camminare muovendo le braccia con un oggetto in mano, ma i casi in cui si è verificata questa condizione sono stati quasi nulli.



Figura 6.17: Valutazione medie relative all'Interazione con Oggetti confrontando i metodi di Locomozione

Interessante notare che i due sistemi sembrano essere confrontabili dal punto di vista della **Chinetosi** (Figure 6.18). Nonostante in media chi ha sperimentato con la pedana abbia registrato un leggero peggioramento dei sintomi questa differenza non è stata ritenuta, dal T-test, come statisticamente significativa né tanto meno correlata al sistema di locomozione utilizzato.

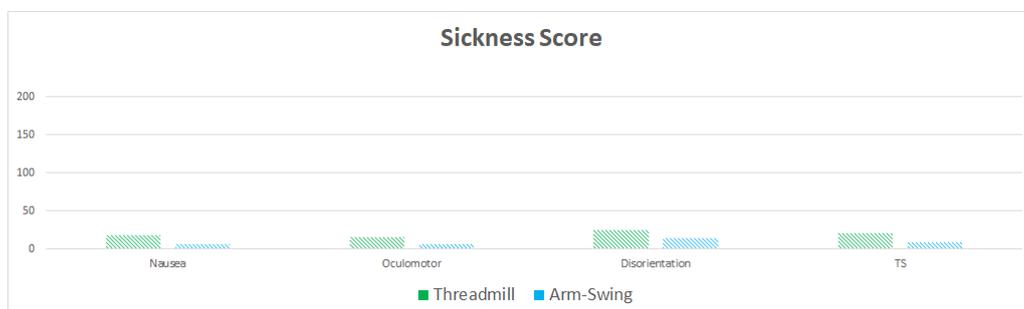


Figura 6.18: Valutazione medie relative alla Chinetosi confrontando i metodi di Locomozione

Per quanto riguarda la **Flessibilità** (Figure 6.19), si osserva ad esempio dalla domanda 72 ($p=0,025$) che con una media di 3,3 è stato più facile eseguire le azioni nell'ordine deciso dall'utente muovendosi nell'ambiente mediante AS contro il 2,67

della pedana. Con la pedana era più probabile (1,53 contro 0,67 del AS) che l'utente non riuscisse ad eseguire ciò che voleva, domanda 74 ($p=0,012$). La domanda 73 ($p=0,28$) rivela come ci fosse l'impressione da parte dell'utente che il sistema interferisse nelle interazioni (1,4 contro 0,8). Non è significativo ($p=0,092$) che con l'AS fosse più facile eseguire compiti nella maniera scelta dall'utente.

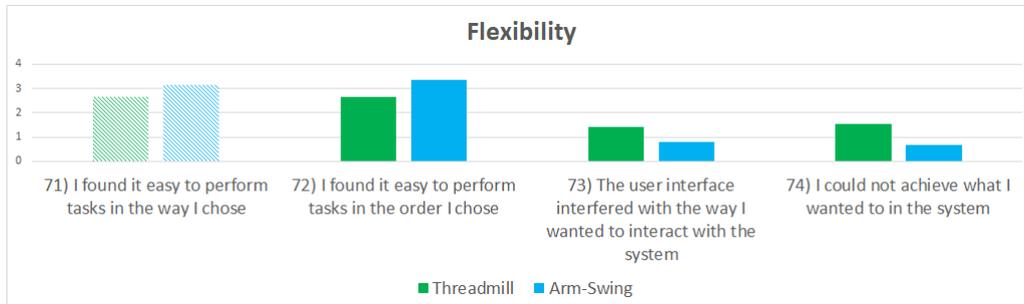


Figura 6.19: Valutazione medie relative alla Flessibilità confrontando i metodi di Locomozione

Nella Fedeltà di **Simulazione** (Figure 6.20), la tecnica di AS ha significativamente ($p=0,007$) impattato in un miglior rapporto qualità/prestazioni rispetto alla pedana (2,6 vs 1,73) e a causa di ciò si aveva l'impressione che la simulazione fosse più fluida (0,007 vs 0,7; $p=0,015$) e non procedesse a scatti, a conferma delle teorie enunciate ad inizio capitolo sulla latenza (domande 83 e 84).



Figura 6.20: Valutazione medie relative alla Fedeltà di Simulazione confrontando i metodi di Locomozione

Si è riscontrata una correlazione anche tra locomozione e **Senso di Presenza** (Figure 6.21, domande 93 e 94). Con l'AS c'era maggiore consapevolezza di dove l'utente si trovasse in ogni istante (0,53 vs 1,13; $p=0,038$). Curioso inoltre che gli oggetti sembrassero meno realistici muovendosi tramite pedana (2,6 vs 3,07; $p=0,029$).



Figura 6.21: Valutazione medie relative al Senso di Immersione e Presenza confrontando i metodi di Locomozione

In merito all'**Usabilità complessiva del sistema** (Figure ??), usando la pedana c'era la sensazione che il sistema remasse contro l'utente (1,13 vs 0,33; $p=0,0034$) e funzionasse in maniera imprevista (1,17 vs 0,47; $p=0,0014$)(domande 95 e 102).



Figura 6.22: Valutazione medie relative all'Usabilità complessiva del sistema confrontando i metodi di Locomozione

In conclusione, il metodo più performante e preferibile risulta essere l'Arm-Swinging. Il fallimento nell'ottenere una relazione tra tecnica locomozione e chinetosi è deludente perché è chiaro che se non si possono individuare soggetti che sperimentano conseguenze, questo problema non può essere effettivamente gestito.

6.6.3 Analisi dei dati per partecipanti

Anche nel caso in cui dovessi dividere il campione in base al sesso i due metodi sono rimasti confrontabili sull'impatto che hanno sulla chinetosi dell'utente. (Figure 6.23).

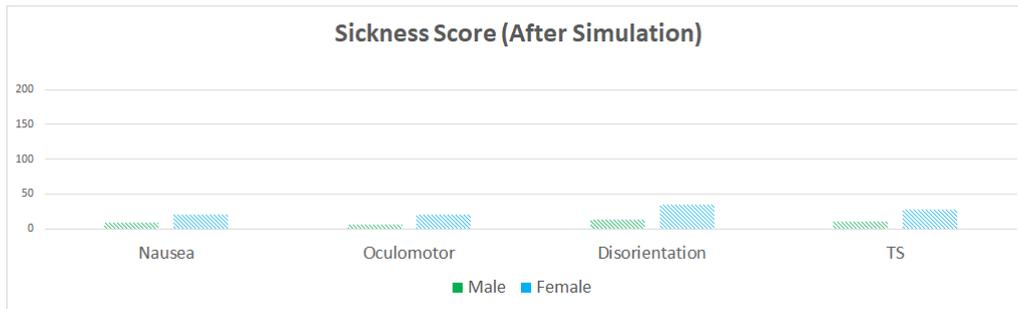


Figura 6.23: Valutazione medie relative alla Chinetosi confrontando i partecipanti

La differente suddivisione mostra come i soggetti femminili richiedessero una maggiore Immersione (Figura 6.24) per poter completare gli obbiettivi richiesto rispetto ai soggetti maschili (1.23 vs 0.75, $p = 0.036$).

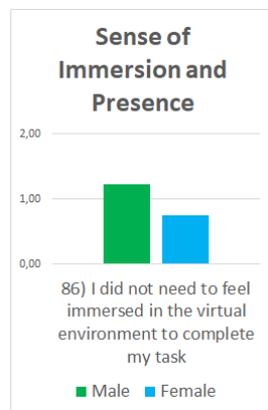


Figura 6.24: Valutazione medie relative al Senso di Immersione e Presenza confrontando i partecipanti

Inoltre, il campione femminile necessitava di maggiore assistenza (Figura 6.25) nel completare la simulazione rispetto ai colleghi maschi (2.45 vs 1.125, $p = 0.002$).

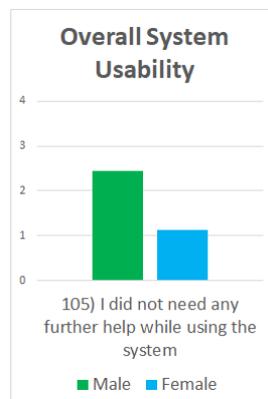


Figura 6.25: Valutazione medie relative all'Usabilità complessiva del sistema confrontando i partecipanti

6.6.4 Comportamento Utente

Come si evince da Figura 6.26 e Figura 6.27 maggior parte degli utenti (26) ha attivato l'allarme, solo 19 hanno chiesto soccorso, in 18 hanno raggiunto il luogo sicuro, in 16 hanno spento il motore e in 14 hanno attivato le 4 frecce.

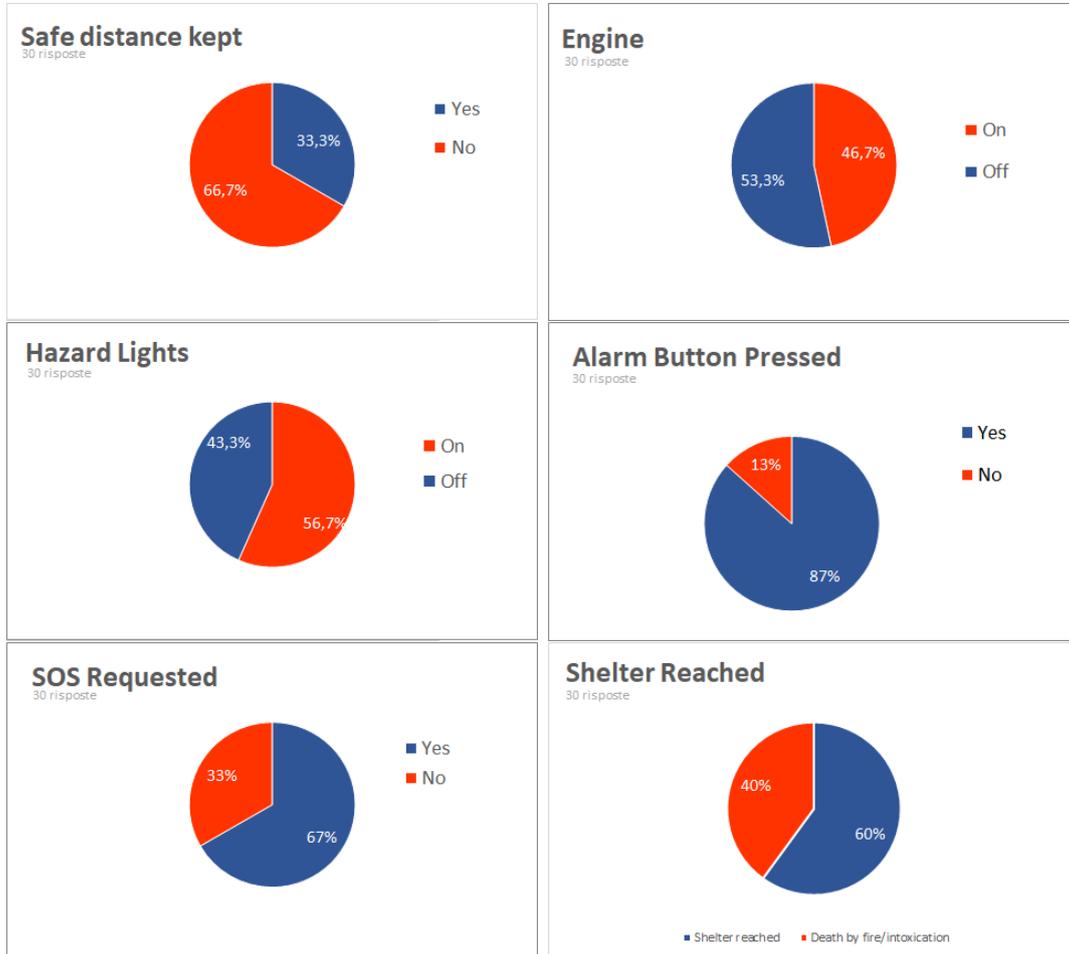


Figura 6.26: Comportamento Utente

Alcuni utenti, forse non consci del fatto di poter muovere la testa avevano difficoltà a localizzare le chiavi nel cruscotto del veicolo.

Nonostante la spiegazione iniziale nessuno visualizzava la brochure nella simulazione. Ci sono stati casi di utenti deceduti in macchina perché non sapevano come comportarsi o di utenti che scendevano dalla macchina e sono morti vagando nel tunnel spaesati.

C'è stato un caso di un utente morto tentando di accedere ad una sala tecnica, interdetta al pubblico, nelle vicinanze del luogo sicuro. Questo perché, immerso nel fumo, aveva mancato il rifugio.

Ci sono stati casi di persone rientrate in macchina perché, ormai scese, si erano ricordate di eseguire delle azioni all'interno del veicolo. Purtroppo poi sono morte poiché nel frattempo l'incendio e il fumo si era ormai inesorabilmente propagato.

Si è registrato che, in base al punto di arresto del veicolo capitava che il rifugio più vicino fosse quello oltre il camion, di conseguenza molti utenti lo preferivano

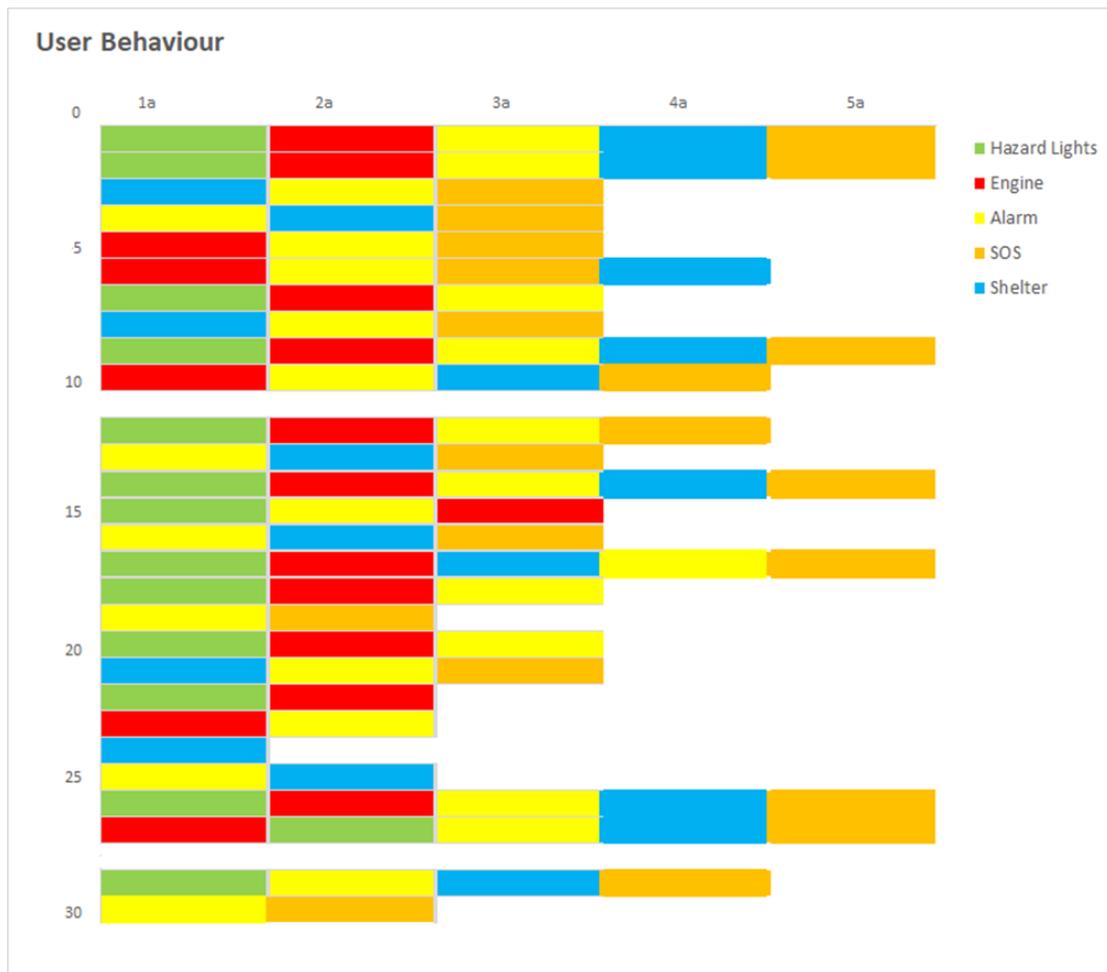


Figura 6.27: Andamento Utente

all'opposto nonostante il raggiungimento di quest'ultimo rappresentasse la soluzione più sicura.

Il metodo di locomozione non ha influito sul **Comportamento Utente** (Figure 6.28) durante la simulazione. Vi è stata una correlazione nel raggiungimento del rifugio ($p=0,025$) e la pressione del pulsante di allarme ($p = 0,04$). Infatti queste azioni sono state svolte un numero di volte maggiore dagli utenti che si muovevano tramite AS, addirittura il pulsante di allarme è stato premuto dal 100% dei soggetti, contro il 73% della pedana (il rifugio è stato raggiunto dall'80% degli AS contro il 40% della pedana).

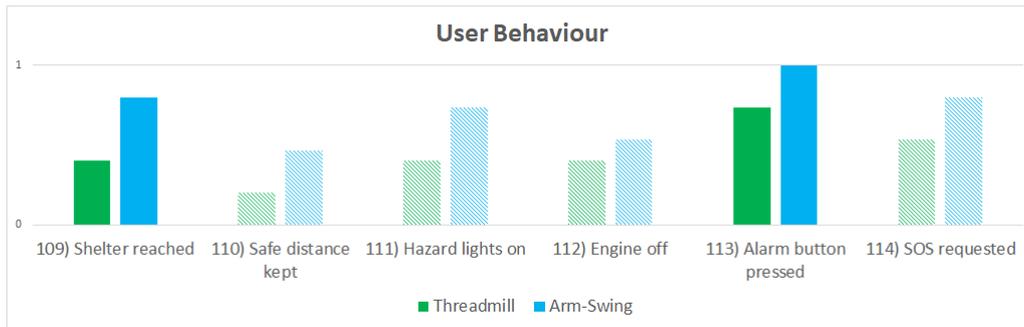


Figura 6.28: Valutazione medie relative al Comportamento utente confrontando i metodi di Locomozione

Suddividendo i partecipanti emergono nuove considerazioni sul **Comportamento Utente** (Figure 6.29) Il pubblico femminile aveva maggiore difficoltà a raggiungere il rifugio (25% vs 73%; $p= 0,027$) e ed era drasticamente meno incline a chiedere aiuto (12,5% vs 86%; $p= 0,00025$)

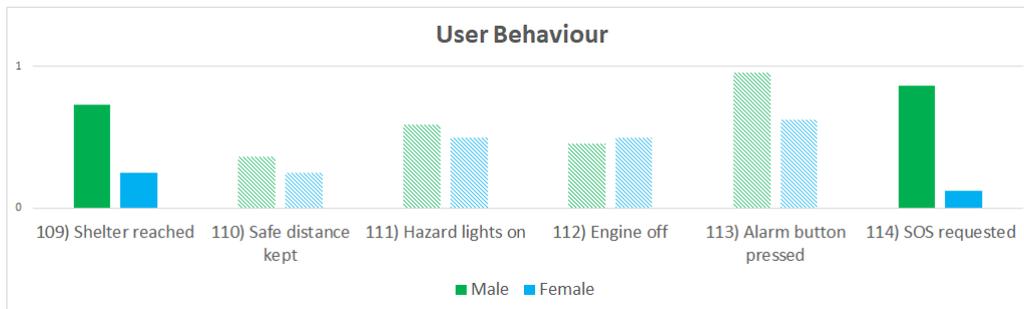


Figura 6.29: Valutazione medie relative al Comportamento utente confrontando i partecipanti

Capitolo 7

Conclusioni e Sviluppi Futuri

7.1 Conclusioni

Il lavoro di tesi ha portato ad uno strumento di formazione che potrebbe essere utilizzato per un ampio spettro di scopi utili dalla comunicazione delle procedure di emergenza al civile alla valutazione del livello di sicurezza dello scenario selezionato. Per esempio, SITAF ne ha intravisto delle potenzialità nell'ampliamento dei corsi che già si tengono presso il lato francese indirizzati ai guidatori di mezzi pesanti.

L'analisi dei dati ottenuti attraverso l'attività di sperimentazione si è dimostrata essenziale per dimostrare la qualità del lavoro e l'adesione ai requisiti iniziali.

Come risultato secondario della sperimentazione, la simulazione ha anche evidenziato una qualche debolezza inerente allo strumento e alle procedure di sicurezza del tunnel ufficiale, ad esempio:

- molti partecipanti non erano in grado di localizzare le nicchie SOS, e perciò impossibilitati nel chiedere aiuto tramite l'apposito telefono; quando chiesto, hanno lamentato una mancanza di segnaletica chiara, a differenza dei luoghi sicuri.
- l'opuscolo veniva largamente ignorato dalla maggior parte dei soggetti, nonostante venisse indicato come strumento essenziale durante la fase introduttiva alla simulazione.
- alcuni utenti, nell'arrestare l'auto al di sotto della distanza minima di sicurezza dal fuoco, essendo il veicolo in fiamme relativamente vicino ad un semaforo rosso, lamentavano il fatto che fosse stata la comunicazione via radio a consigliare di fermarsi al semaforo;
- in alcuni casi, nel confondere il pulsante SOS con il telefono SOS, alcuni utenti in attesa di una risposta che non arrivava sono stati indotti a premerlo più volte sprestando secondi preziosi all'interno del tunnel.
- è interessante notare come il pulsante SOS diventasse di maggiore interesse per quegli utenti disorientati da un tunnel ormai invaso dal fumo e prossimi a

morire per intossicazione. Negli attimi finali della simulazione, lo strumento sopra citato viene visto come ultima ultima speranza di essere notati e salvati.

Detto questo, le risposte degli utenti hanno anche richiamato l'attenzione su una serie di problemi che ancora incidono sull'applicazione; in particolare, la parte iniziale all'interno dell'auto sembrava non fornire lo stesso livello di immersione rispetto al resto della simulazione; ciò si basa principalmente sulla mancanza di controllo sul veicolo, sotto forma di:

- accelerazione
- sterzo
- possibilità di eseguire una inversione
- possibilità di sperare l'incidente

L'essere già all'interno della vettura ad inizio della simulazione e il fatto che questa si muovesse in modo autonomo con poche o nessuna interazione disponibile induceva in alcuni utenti a credere di essere utenti passivi in un video a 360°. A sostegno di questo, molti dei soggetti hanno giustificato il non aver svolto nel veicolo le operazioni richieste dalle procedure affermando che non pensavano fossero interazioni disponibili. Tra le operazioni più controverse in questa fase è risultato lo spegnimento nel motore. Gli utenti che ci provavano faticavano a trovare le chiavi. Probabilmente un maggiore feedback visivo e sonoro potrebbero aiutare a localizzarle più agevolmente.

Inoltre, si è evidenziato un enorme inconveniente dell'attuale progettazione che potrebbe aver portato ad un impatto negativo in termini di chinetosi. Bloccando il tracciamento dei movimenti della testa lungo l'asse X e Z per impedire di attraversare pareti questo ha causato disorientamento negli utenti che cercavano di muoversi troppo con la testa; per fortuna, il problema diventa irrilevante non appena l'utente comincia a camminare.

Come soluzione, si potrebbe sostituire il blocco delle teste (o forse solo nascondere) con un dissolvenza al nero che dovrebbe indurre nell'utente di riposizionarsi in modo appropriato riducendo la sensazione di fastidio.

Un singolo utente ha anche sperimentato un aumento di battito cardiaco, ma non è stato registrato in quanto non è un sintomo associato alla chinetosi, e quindi non incluso nella SSQ.

Per quanto riguarda la qualità e la fedeltà di simulazione, dalle valutazioni è possibile registrare un riscontro per lo più positivo o estremamente positivo, e lo stesso si può dire per la logica di interazione a parte la locomozione. Una singola critica è stata fatta per quanto riguarda la fedeltà e l'immersione, e riguardava la mancanza di ulteriori personaggi non giocabili nella simulazione. Molti utenti erano in difficoltà non vedendo altro macchine, quindi altre persone. Nonostante possa capitare di essere i primi a sopraggiungere sul luogo di un incidente, tale mancanza disorientava l'utente che non sapeva come comportarsi. Sicuramente l'aggiunta di traffico, insieme ad altre vetture ferme e altri personaggi non giocabile che scappano dal fuoco, rappresenterebbe un enorme miglioramento in termini dell'immersione.

Le attività hanno anche messo in evidenza i limiti delle tecnologie e dei dispositivi attualmente disponibili; la risoluzione limitata dell'HMD, per esempio, ha avuto un impatto negativo sulla percezione degli oggetti più lontani all'interno del tunnel, rendendo necessario trovare soluzioni non realistiche per ottenere il risultato desiderato.

La valutazione dei metodi di locomozione ha mostrato la loro debolezza intrinseca, essendo il principale motivo di disagio, chinetosi e mancanza di immersione.

7.2 Sviluppi Futuri

Il primo passo potrebbe essere mettere alla prova del terzo meccanismo di locomozione realizzato, il Foot-Swing, e metterlo a confronto con l'Arm.Swinging e la Pedana. Parallelamente, potrebbero essere studiate e validate nuove modalità di locomozione per trovare la più adatta allo scopo.

Un altro possibile sviluppo potrebbe essere una sessione di test che coinvolge gli utenti regolari del tunnel, al fine di valutare le differenze nei risultati confrontando i nuovi dati con l'analisi già eseguita.

Infine, lo strumento di formazione potrebbe essere raffinato al fine di supportare:

- Nuovi casi d'uso (un catalogo di emergenza, una zona diversa del tunnel coinvolto)
- Nuovi scenari (un tunnel diverso)
- Nuovi interlocutori (utenti regolari, operatori, ecc.)
- Nuove modalità di addestramento (possibilità di far simulare l'esperienza a più utenti in contemporanea, una modalità sala di controllo utile per modificare dinamicamente lo scenario)
- Nuove interazioni (es. evacuazione di altri civili coinvolti).
- Nuove procedure (le procedure per i vigili del fuoco, le procedure di protezione civile, ecc.).

Sicuramente l'integrazione dell'addestramento per gli operatori preposti all'intervento rappresenta un momento significativo per poter misurare i miglioramenti riscontrati nell'esecuzione delle operazioni a seguito di un corretto comportamento da parte degli utenti.

Sarà compito delle parti coinvolte di impostare la direzione per lo sviluppo futuro dello strumento in questione.

Appendice A

Simulation Questionnaire

A.1 Personal Data

1. Age
2. Gender
3. Company

A.2 Before simulation

A.2.1 Background Knowledge

How familiar are you with these subjects? (Not at all familiar, slightly familiar, somewhat familiar, moderately familiar, extremely familiar)

4. Virtual reality technology, in general
5. HTC Vive, in particular
6. Video games, in general
7. Video games in virtual reality, in particular
8. Serious games (e.g., applications designed for education and training)
9. Safety measures for road tunnels
10. Fréjus tunnel (you have been there, you have seen the brochure already, etc.)

A.2.2 Sickness

Right now, are you affected by any of these symptoms? (None, Slight, Moderate, Severe)

11. General discomfort
12. Fatigue
13. Headache
14. Eye strain
15. Difficulty focusing
16. Salivation increasing
17. Sweating
18. Nausea
19. Difficulty concentrating
20. "Fullness of the head"
21. Blurred vision
22. Dizziness with eyes open
23. Dizziness with eyes closed
24. Vertigo
25. Stomach awareness
26. Burping

A.3 After simulation

A.3.1 Functionality

How would you judge the functionality (control) provided by the system? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

27. The level of functionality provided by the system was appropriate for the task
28. The functionality provided by the system was ambiguous
29. I found it easy to access all the functionalities of the system
30. It was difficult to remember all the functions available
31. I understood the meaning and operation of the control interface
32. I did not need to use all the functions provided
33. I was confused by the operation of the system

A.3.2 Locomotion

How would you judge the locomotion method (the method used to move in the virtual environment)? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

34. I found the locomotion system easy to use
35. I would have preferred an alternative locomotion system
36. The system response to locomotion inputs from the user was acceptable
37. I found the locomotion system too sensitive to use
38. The locomotion method used was ideal for moving within the virtual environment
39. The functionality provided by the locomotion system was adequate
40. I kept making mistakes while using the locomotion system
41. I had the right level of control over where I wanted to go
42. The locomotion method was too complicated to use effectively
43. I found it easy to move or reposition myself in the virtual environment

A.3.3 Interaction with objects

How would you judge the use of controllers for interacting with virtual objects? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

44. I found the hand controllers easy to use to interact with objects in the virtual environment
45. I would have preferred an alternative way to interact with objects in the virtual environment
46. The system response to controller inputs when interacting with virtual objects was acceptable
47. I found the controllers too sensitive to use for interacting with virtual objects
48. The controllers were ideals for interacting with the virtual environment
49. The functionality provided by the controllers to interact with virtual objects was adequate
50. I kept making mistakes while using the controllers to interact with virtual objects
51. I had the right level of control over the way I wanted to interact with virtual objects using the controllers

52. It was easy to select and move objects in the virtual environment
53. The controllers were too complicated to use effectively for interacting with virtual objects
54. Visual feedback relating to interaction with virtual objects using the controllers (e.g., buttons highlighting) was inadequate

A.3.4 Sickness

How do you feel after the simulation (right now, are you affected by any of these symptoms)? (None, Slight, Moderate, Severe)

55. General discomfort
56. Fatigue
57. Headache
58. Eye strain
59. Difficulty focusing
60. Salivation increasing
61. Sweating
62. Nausea
63. Difficulty concentrating
64. "Fullness of the head"
65. Blurred vision
66. Dizziness with eyes open
67. Dizziness with eyes closed
68. Vertigo
69. Stomach awareness
70. Burping

A.3.5 Flexibility

How would you judge the flexibility provided by the system? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

71. I found it easy to perform tasks in the way I chose
72. I found it easy to perform tasks in the order I chose

73. The user interface interfered with the way I wanted to interact with the system
74. I could not achieve what I wanted to in the system

A.3.6 Simulation fidelity

How would you judge the fidelity of the simulation? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

75. The simulation was accurate
76. The simulation was too simplistic to be of use
77. I was impressed with the way I could interact with the simulation
78. The simulation behaved in a very unusual manner
79. Objects in the virtual environment moved in a natural manner
80. I felt disorientated in the virtual environment
81. I had the right level of control over the simulation
82. The virtual environment was too complicated
83. I thought that the quality of the simulation enhanced my performance
84. The simulation appeared to freeze or pause at intervals

A.3.7 Sense of immersion and presence

How would you judge your sense of immersion and presence in the virtual environment? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

85. My senses were stimulated in a way that I had the feeling of being immersed in the virtual environment (being there, not at SiTI)
86. I did not need to feel immersed in the virtual environment to complete my task
87. I got a sense of presence (i.e., part of the simulation and of the events taking place in it)
88. The quality of the image reduced my feeling of immersion/presence
89. The display resolution reduced my sense of immersion/presence
90. I felt isolated and not part of the virtual environment
91. The quality of the image affected my performance
92. I had a good sense of scale in the virtual environment
93. Objects in the environments were very realistic
94. I often did not know where I was in the virtual environment

A.3.8 Overall system usability

How would you judge the system usability? (strongly disagree, disagree, undecided, agree, strongly agree)

95. I thought that the system worked against me
96. I would be comfortable using this system for long periods
97. I did not have a clear idea of how to perform a particular function
98. The overall system response time did not affect my performance
99. I found it difficult to learn how to use the system
100. I felt in control of the system
101. I found the system difficult to use
102. The system did not work as expected
103. I can see a real benefit in this style of man-machine interface
104. I found it difficult to work in 3D
105. I did not need any further help while using the system
106. I enjoyed using this system

A.3.9 Simulation report

107. Which locomotion system has been tested? (Virtualizer treadmill, Arm-Swinging, Foot-Swinging)
108. Duration of the simulation (time)
109. What caused the end of the simulation? (death by fire/intoxication, shelter reached)
110. Safe distance kept (yes, no)
111. Hazard lights on (time)
112. Engine off (time)
113. Alarm button pressed (time)
114. SOS requested (time)
115. Shelter reached (time)

Appendice B

SSQ Evaluation

B.1 The calculations in the SSQ

None = 0; Slight = 1; Moderate = 2; Severe = 3

B.1.1 Weights for Symptoms

Symptoms	Nausea	Oculomotor	Disorientation
General discomfort	1	1	
Fatigue		1	
Headache		1	
Eye Strain		1	
Difficulty focusing		1	1
Increased salivation	1		
Sweating	1		
Nausea	1		1
Difficulty concentrating	1	1	
Fullness of head			1
Blurred vision		1	1
Dizzy (eyes open)			1
Dizzy (eyes closed)			1
Vertigo			1
Stomach awareness	1		
Burping	1		
Total	[1]	[2]	[3]

1

B.1.2 Score

Nausea = [1] * 9.54 Oculomotor = [2] * 7.58 Disorientation = [3] * 13.92

Total Score = ([1] + [2] + [3]) * 3.74

¹Total is the sum obtained by adding the symptoms scores. Omitted scores are zero

Bibliografia

- [1] Stefano Torresani Bernardo Magrì Massimo Berti. “La galleria di sicurezza del Frejus. La variante del progetto definitivo per l’apertura al traffico della galleria al termine dei lavori”. In: *Strade & Autostrade* (2013). URL: <http://www.stradeeautostrade.it/infrastrutture/gallerie-e-tunnelling/2013-12-03/la-galleria-di-sicurezza-del-frejus-3786/>.
- [2] M. Boere. *The Simple Fire Engine*. 2014. URL: <https://www.assetstore.unity3d.com/en/#!/content/23064>.
- [3] Moohyun Cha et al. “A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data”. In: *Fire Safety Journal* 50.Supplement C (2012), pp. 12–24. ISSN: 0379-7112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.01.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711212000136>.
- [4] Frederic Font, Gerard Roma e Xavier Serra. “Freesound Technical Demo”. In: *ACM International Conference on Multimedia (MM’13)*. ACM. Barcelona, Spain: ACM, 21/10/2013 2013, pp. 411–412. ISBN: 978-1-4503-2404-5. DOI: 10.1145/2502081.2502245.
- [5] *free3d.com*. URL: <https://free3d.com>.
- [6] “Frejus, bruciano 5 mezzi: un inferno Due morti, venti persone intossicate”. In: *La Repubblica* (apr. 2005). URL: <http://www.repubblica.it/2005/f/sezioni/cronaca/tunnelfrej/tunnelfrej/tunnelfrej.html>.
- [7] “Gottardo: incendio nel tunnel, almeno 14 morti”. In: *La Stampa* (25 October 2001). URL: http://www.corriere.it/Primo_Piano/Cronache/10_Ottobre/24/gottardo.shtml.
- [8] Peter Howarth e M Finch. “The nauseogenicity of two methods of navigating within a virtual environment”. In: 30 (mar. 1999), pp. 39–45.
- [9] Roy S. Kalawsky. “VRUSE—a computerised diagnostic tool: for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems”. In: *Applied Ergonomics* 30.1 (1999), pp. 11–25. ISSN: 0003-6870. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00047-7). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687098000477>.
- [10] Robert S. Kennedy et al. “Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness”. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 3.3 (1993), pp. 203–220. DOI: 10.1207/s15327108ijap0303_3. eprint: http://dx.doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3. URL: http://dx.doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.

- [11] Marco Carlo Masoero. *Fontamenti di Acustica*. Lezione Univeristaria. 220172.
- [12] Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco - Servizio Tecnico Centrale Ispettorato per la Formazione Professionale Ministero dell'Interno. *Attrezzature di Protezione Individuale dei VV.F.* 2010. URL: <http://www.vigilfuoco.it/sitiVVF/ascolipiceno/downloadFile.aspx?s=85&f=27266>.
- [13] Sarah Nichols. "Physical ergonomics of virtual environment use". In: *Applied Ergonomics* 30.1 (1999), pp. 79–90. ISSN: 0003-6870. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00045-3). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687098000453>.
- [14] Groupement d'Exploitation du Fréjus Protezione Civile Prefettura di Torino Protection Civile Prefecture de la Savoie. *Piano di Soccorso Binazionale Traforo Autostradale del Frejus*. 2008. URL: http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/protciv/dwd/prevenzione_pianificazione/pppp_ppe/integrazioni_pppp/04_PPPP2014_ALL_09_4_PIANO_FREJUS.pdf.
- [15] Ultra Real. *Ultra Real Fire Effects Volume 1 : Static Fire Props*. 2014. URL: <https://www.assetstore.unity3d.com/en/#!/content/20923>.
- [16] B. Shackel. "The Concept of Usability". In: *Proc IBM Software and Information Usability Symposium*. Poughkeepsie, NY: IBM, 15-18 September 1981, pp. 1–30.
- [17] Kay Stanney et al. "Motion sickness and proprioceptive aftereffects following virtual environment exposure". In: 30 (mar. 1999), pp. 27–38.
- [18] "Tir in fiamme nel tunnel del Frejus". In: *La Stampa* (29 November 2010). URL: <http://www.lastampa.it/2010/11/29/cronaca/tir-in-fiamme-nel-tunnel-del-frejus-nzqhaSAotLapc2ggYgcDgM/pagina.html>.
- [19] "Un errore italiano ha aggravato il rogo". In: *La Repubblica* (lug. 1999). URL: <http://www.repubblica.it/online/fatti/bianco/rapporto/rapporto.html>.
- [20] V. Verda et al. "L'Approccio multidisciplinare per la gestione dell'emergenza degli incendi boschivi. L'esperienza del Politecnico di Torino nel progetto europeo AF3 "Advanced Forest Fire Fighting"". In: Turin, Italy, 20 March 2017.
- [21] Wikipedia. *HTC Vive* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 16-October-2017]. 2017. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HTC_Vive&oldid=805583971.
- [22] Wikipedia. *Oculus Rift* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 16-October-2017]. 2017. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oculus_Rift&oldid=805634982.
- [23] Z. Xu et al. "A virtual reality based fire training simulator with smoke hazard assessment capacity". In: *Advances in Engineering Software* 68.Supplement C (2014), pp. 1–8. ISSN: 0965-9978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.10.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096599781300166X>.