

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento in Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



Valutazione sperimentale in Realtà Virtuale dell'effetto
combinato di elementi verdi e illuminazione sulla
percezione visiva degli utenti nelle aule universitarie

*Experimental evaluation in Virtual Reality of the combined effect of green
elements and lighting on the visual perception of users in university
classrooms*

Relatore

Prof. Ing. Marco D'Orazio

Correlatore

Dott. Arianna Latini

Tesi di Laurea di

Sofia Bianconi

A.A. 2022/2023

Indice

1. Introduzione	4
2. Stato dell'arte	6
2.1 Il comfort visivo	7
2.2 Metodi di indagine di comfort visivo in ambienti reali	8
2.3 Metodi di indagine di comfort visivo in ambienti virtuali	16
2.4 Conclusioni stato dell'arte	19
3. FASI E METODI	21
3.1 Fasi operative	21
3.2 Metodi	23
3.2.1 Questionario pre-sperimentale	23
3.2.2 Questionario post-sperimentale	25
3.2.3 Selezione del campione	28
3.2.4 Procedura sperimentale	30
3.3 Realizzazione del modello in Relux	34
3.4 Realizzazione modello della stanza virtuale	36
3.4.1 Definizione del modello	36
3.4.2 Costruzione del modello 3D	37
3.5 Allestimento della stanza per lo svolgimento delle prove	42
3.6 Analisi dei dati e test statistici	44
3.6.1 Friedman test	44
3.6.2 Wilcoxon Signed-Rank test	45
4. RISULTATI	48
4.1 Descrizione del campione	48
4.2 Ecological Validity del modello	51
4.2.1 Analisi del senso di presenza e analisi dei risultati dell'indagine di immersività	51
4.2.2 Analisi del Virtual Reality Sickness Questionnaire	58
4.3 Valutazione dell'impatto degli scenari sul comfort visivo	59
5. CONCLUSIONE	69
6. BIBLIOGRAFIA	72
7. ALLEGATI

1. Introduzione

Studi recenti affermano che la maggior parte della popolazione mondiale passa il 90% del tempo in ambienti indoor, quali soprattutto i luoghi di lavoro e aule scolastiche. Questi ambienti sono caratterizzati da diverse condizioni ambientali a livello termico, visivo, acustico e di qualità dell'aria. È stato dimostrato che la combinazione di queste ultime ha un impatto significativo delle varie condizioni ambientali e può significativamente impattare sul comfort, sul benessere e sulla produttività degli occupanti e quindi sui consumi energetici degli edifici.

L'ambiente fisico in cui si svolgono le attività accademiche è cruciale per il benessere e il rendimento degli studenti. Il comfort visivo all'interno delle aule universitarie è un elemento determinante, e la ricerca scientifica ha dimostrato l'influenza significativa che l'illuminazione e gli elementi architettonici possono avere sulla concentrazione e sulla percezione degli studenti.

In un'epoca in cui il design ambientale e la tecnologia si fondono sempre più nell'ambiente educativo, questo studio si propone di gettare nuova luce sulle dinamiche complesse del comfort visivo in aule universitarie e fornire informazioni preziose per la progettazione di spazi di apprendimento ottimizzati.

L'utilizzo di elementi verdi, come le piante e le pareti verdi, vengono sempre più utilizzati negli ambienti interni per diversi motivi e offrono una serie di benefici significativi. Questi elementi non solo aggiungono un tocco estetico piacevole, ma anche contribuiscono a migliorare la qualità dell'ambiente interno e il benessere degli occupanti. I benefici includono il miglioramento della qualità dell'aria, la riduzione dello stress, l'ottimizzazione del comfort visivo e termico, nonché la promozione di un'atmosfera più rilassante e produttiva. La presenza di elementi verdi può anche favorire la connessione con la natura, migliorare la concentrazione e contribuire a un ambiente più sano e sostenibile.

In questo contesto, la continua evoluzione delle tecnologie digitali ha offerto nuove opportunità per esplorare e ottimizzare l'ambiente di apprendimento. Questa tesi si

propone di esaminare in dettaglio il ruolo delle pareti verdi, arricchite da elementi vegetali, nell'ottimizzazione del comfort visivo all'interno delle aule universitarie. In particolare, si concentra sull'uso di scenari immersivi basati su realismo virtuale (VR) per condurre esperimenti controllati. Il potenziale dell'ambiente virtuale immersivo (IVE) è sempre più diffuso negli ultimi due decenni per facilitare l'ingegneria, la costruzione e la gestione dell'ambiente costruito. Questo si integra alla perfezione con le nuove tecnologie nel campo della progettazione che prevedono l'utilizzo congiunto di vari mezzi per far sì che si abbiano informazioni in tempo reale su ogni aspetto progettuale.

La novità di questa ricerca risiede nella combinazione di elementi architettonici "verdi" con l'uso di tecnologie VR, che consente di esplorare in modo dettagliato e realistico l'impatto di queste caratteristiche sulla percezione visiva degli studenti. Tre scenari VR verranno presentati in questo studio, ciascuno caratterizzato da specifiche condizioni di illuminazione, in particolare da un particolare livello di illuminazione misurato in lux.

Un aspetto cruciale di questa indagine è l'analisi del possibile comfort visivo causato dagli elementi verdi e dall'illuminazione associata, e l'effetto di tali condizioni sul comfort visivo degli studenti. Inoltre, è importante considerare il concetto di percezione della luce e come queste variabili possano influenzare l'apprendimento e la percezione degli studenti in situazioni controllate. Per valutare perciò questi aspetti, verrà elaborato un questionario di prova, il quale darà modi di valutare il comfort visivo degli utenti all'interno dell'ambiente virtuale.

La tesi si articola in un capitolo iniziale sull'analisi dello stato dell'arte riguardante il comfort visivo, seguito dalla descrizione della metodologia di ricerca, dai risultati e dalla conclusione.

2. Stato dell'arte

Il comfort visivo, come verrà ampiamente discusso successivamente, è essenziale per favorire un ambiente di lavoro, o di apprendimento, ottimale. Inteso come la soddisfazione delle esigenze visive in un determinato ambiente, il comfort visivo dipende da fattori quali l'illuminazione, il design degli spazi e l'uso di elementi architettonici variabili che possono promuovere o inibire il benessere e l'efficienza da parte degli occupanti.

La variabile più rilevante di quelle appena descritte risulta l'illuminazione che agisce su livelli di energia individuali. Scegliere il tipo di illuminazione sbagliata per un ambiente ne influenza negativamente la vivibilità. La progettazione illuminotecnica si impegna nella resa più funzionale degli ambienti, rispondendo alle esigenze sia ergonomiche che emotive degli occupanti, riuscendo quindi, a minimizzare gli effetti negativi dell'affaticamento visivo sulla salute delle persone e migliorando la loro efficienza nelle attività quotidiane.

Due normative vigenti di riferimento (non contemplano metriche di valutazione soggettive) che svolgono un ruolo chiave nella definizione dei requisiti illuminotecnici per ambienti interni sono:

- EN 12464-1 (norma europea che stabilisce i requisiti illuminotecnici per luoghi di lavoro e spazi pubblici al chiuso);
- UNI 11528 (normativa italiana che fornisce indicazioni specifiche per la progettazione illuminotecnica degli ambienti interni)

Nei seguenti paragrafi verranno esaminati testi di letteratura che approfondiscono lo studio del comfort visivo in ambienti reali (paragrafo 2.1) e in ambienti virtuali immersivi (IVE) (paragrafo 2.2), analizzando in che modo le diverse condizioni di illuminazione possano influenzare in maniera differenziata il comfort visivo, offrendo così una panoramica esaustiva delle ricerche condotte in questo ambito, evidenziandone metodologia, risultati e limiti.

2.1 Il comfort visivo

Come già accennato in precedenza, l'indice di comfort visivo è fondamentale nella nostra esperienza quotidiana poiché influenza il nostro benessere e rendimento nell'ambiente lavorativo e scolastico.

Non si tratta quindi di mera percezione estetica ma della combinazione di tre elementi che vanno a determinare la qualità del comfort visivo:

- Luminosità, rappresenta l'intensità della luce nell'ambiente;
- Contrasto, si riferisce alla differenza di luminosità tra oggetti o aree nell'ambiente;
- Qualità del colore, dove la scelta e la distribuzione dei colori nell'ambiente possono influenzare il benessere visivo, con determinati colori che possono avere effetti calmanti o stimolanti.

Per analizzare l'indice di comfort visivo all'interno di un ambiente si usa un approccio quantitativo che consente di raccogliere dati concreti ed oggettivi, che includono misurazioni strumentali, le quali forniscono una valutazione sistematica dei parametri di riferimento.

Eppure, la sola indagine quantitativa non è sufficiente in quanto non riesce a descrivere completamente la percezione dell'occupante nello spazio vissuto.

Viene perciò, insieme all'analisi quantitativa, combinata anche quella qualitativa che, espressa in questionari, risulta essere efficace poiché facilita l'interazione diretta tra il ricercatore e i partecipanti, agevolando quest'ultimi nella valutazione soggettiva delle proprie sensazioni percepite all'interno di un ambiente, sia esso reale o virtuale.

Dunque, questo approccio integrato rappresenta un metodo completo e approfondito per valutare il comfort visivo e le condizioni luminose in un ambiente.

Esplorare i diversi aspetti di questa dinamica può portare a scelte più consapevoli per ottimizzare la nostra esperienza visiva e il nostro benessere complessivo.

2.2 Metodi di indagine di comfort visivo in ambienti reali

Lo studio del comfort visivo in ambienti reali coinvolge l'analisi di diversi fattori che possono influire sulla percezione visiva e sul benessere degli individui. Alcuni dei metodi di indagine comunemente utilizzati includono: l'analisi dell'illuminazione attraverso misurazioni luminose ed analisi dello spettro luminoso; valutazione soggettiva attraverso questionari ed interviste; rilevamento del rumore; misurazione fisiologiche ed infine misurazione di temperatura e umidità.

L'analisi dell'illuminazione è un aspetto fondamentale dello studio del comfort visivo. Questa analisi implica l'utilizzo di strumenti di misurazione della luce per quantificare l'intensità luminosa, la distribuzione e la qualità della luce nell'ambiente. L'illuminazione, sia essa naturale o artificiale, ha un impatto significativo sull'esperienza umana. Questo impatto va oltre la semplice visibilità, influenzando vari aspetti del benessere umano, tra cui le prestazioni lavorative, il comfort visivo e termico, e persino l'umore.

L'importanza dell'integrazione della luce naturale con l'illuminazione artificiale è un tema ricorrente nella ricerca sul comfort visivo. Ad esempio, lo studio (Basurto et al., 2022) mira a migliorare il comfort degli occupanti e l'efficienza energetica in un'ottimizzazione quasi in tempo reale dell'ambiente interno. Utilizzando l'abbagliamento fastidioso e l'illuminamento del piano di lavoro come indicatori chiave delle prestazioni (KPI), i risultati indicano che il sistema offre un ambiente confortevole e riduzioni energetiche significative. L'accettazione degli occupanti è elevata, ma si suggerisce che un controllo più personalizzato potrebbe migliorare ulteriormente le prestazioni. La metodologia coinvolge la regolazione automatica delle persiane e dell'illuminazione in base alle condizioni esterne, seguita da questionari sulla personalità, sentimenti, comfort visivo e preferenze degli occupanti. La partecipazione comprende 1 donna e 4 uomini, con esperimenti che variano tra diverse temperature di colore (CCT) e livelli di illuminamento.

Nel campo dell'illuminazione, la percezione del comfort visivo e le preferenze degli

occupanti sono temi di grande interesse. La comprensione delle complesse interazioni legate al controllo dell'ambiente visivo è fondamentale, poiché evidenzia l'importanza di personalizzare l'ambiente visivo per migliorare il comfort e la soddisfazione.

L'effetto dell'illuminazione a LED sull'affaticamento visivo è un tema comune che emerge da vari studi. Ad esempio, l'articolo (Wang et al., 2015) ha coinvolto 12 partecipanti in esperimenti condotti in una stanza buia, dove le condizioni di illuminazione, tra cui la temperatura di colore correlata (CCT) da 3000 a 6000 e i livelli di illuminazione da 150 a 1000 lux, sono state variate. I risultati hanno indicato che l'illuminazione a LED riduceva in modo più efficace l'affaticamento visivo rispetto a quella fluorescente, senza influenzare negativamente la prestazione nei compiti di lettura.

Nello studio invece di (Hawes et al., 2012) ha esaminato gli effetti di diverse tecnologie di illuminazione, tra cui fluorescente e LED con varie CCT, sui lavoratori in rifugi militari temporanei. I risultati hanno mostrato che le tecnologie LED, specialmente con temperature di colore più elevate, influenzano positivamente le prestazioni visive, lo stato d'animo e le prestazioni cognitive dei partecipanti rispetto alle soluzioni fluorescenti tradizionali. L'esperimento coinvolgeva 24 volontari (20 maschi e 4 femmine) per cinque giorni consecutivi.

Questi studi evidenziano l'importanza dell'illuminazione a LED nel ridurre l'affaticamento visivo e migliorare le prestazioni visive e cognitive, sottolineando il potenziale delle tecnologie di illuminazione a LED nel migliorare il comfort visivo in vari ambienti di lavoro.

Altro aspetto fondamentale dell'analisi dell'illuminazione è quello della valutazione dello spettro luminoso, essa si basa sulla comprensione di come le diverse lunghezze d'onda influenzano la percezione visiva

Nella progettazione illuminotecnica è un elemento chiave per ottenere l'effetto di illuminazione desiderato il correlated colour temperature (CCT). La Temperatura di Colore Correlata (CCT) è una misura della tonalità del colore di una sorgente di luce, espressa in gradi Kelvin (K): un valore di CCT inferiore, come 2700K, sarà associato a

una luce più calda, simile al colore della luce di una lampadina tradizionale. Al contrario, un valore di CCT più elevato, come 6500K, sarà associato a una luce più fredda, simile al colore della luce diurna. La CCT è un parametro importante nella scelta delle sorgenti di luce, poiché influenza l'aspetto visivo degli oggetti e degli ambienti illuminati.

L'argomento è stato trattato in molteplici studi quali quello di (Toftum et al., 2018) dove viene rilevato che CCT influenza aspetti come la sensazione termica, la luminosità percepita, la qualità dell'aria percepita e l'attenzione soggettiva, con implicazioni sull'efficienza energetica degli edifici. Nelle ricerche di Wei et al. (15) si osserva come un flusso luminoso maggiore di CCT venga recepito come troppo luminoso e disagiata, influenzando negativamente la produttività e le prestazioni lavorative.

Altro studio di (Korsavi et al., 2022) esplora i fattori che influenzano l'operazione di tende e luci nelle aule delle scuole primarie. Inoltre, si suggerisce che 730 lux rappresentino un livello di luce ottimale per gli studenti, con un'80% di soddisfazione. Questi risultati evidenziano l'importanza di gestire attentamente l'ambiente visivo nelle scuole primarie per garantire il benessere e l'apprendimento ottimali dei bambini.

Per citare un ultimo esempio in materia analizziamo lo studio di (Hoffmann et al., 2008), dove sono stati esaminati gli impatti di diverse condizioni di illuminazione su sulfatoxymelatonin (aMT6-s) e umore soggettivo in un ufficio sperimentale. Questo studio ha rivelato che l'illuminazione variabile può avere vantaggi sull'umore soggettivo negli uffici interni, sebbene non ci siano differenze chiare nei profili di aMT6-s rispetto all'illuminazione regolare.

Un altro metodo d'indagine fondamentale è la valutazione soggettiva, che si realizza attraverso l'uso di questionari. Questi strumenti permettono agli utenti di esprimere il proprio livello di comfort rispondendo a domande specifiche. Le risposte raccolte forniscono dati preziosi sulla soddisfazione visiva e sul benessere generale degli individui.

Prendiamo ad esempio lo studio di (De Korte et al., 2015), che ha esplorato la

gestione personale dell'ambiente lavorativo. In questo studio, i partecipanti hanno sperimentato come le condizioni preimpostate di temperatura e illuminazione potessero influenzare il comfort visivo e la luminosità sulla scrivania. La metodologia comprende compiti di lettura e attività informatica, monitorando le preferenze, l'esperienza di comfort e le prestazioni lavorative in una postazione di lavoro individualizzata in una stanza climatica. Questo studio utilizza questionari per esplorare le preferenze di illuminazione, la soddisfazione e la percezione del comfort luminoso in vari contesti ambientali. È stato osservato un miglioramento del comfort visivo dopo la regolazione, suggerendo l'importanza di un ambiente di lavoro individualizzato.

In un altro studio condotto da (Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, 1862), gli effetti della variazione dell'illuminazione sulla percezione visiva sono stati esaminati. La metodologia comprende tre fasi alle quali partecipano 33 persone, coinvolte in attività di lettura cartacea, con questionari generici e specifici, e l'illuminazione varia tra 500 lux, 650 lux e 800 lux, con cinque intervalli di fluttuazione. Concentrandosi su tre categorie di questionari, questo studio esamina la sensazione visiva, la soddisfazione per l'illuminazione e la percezione visiva in risposta a cambiamenti di luce sotto illuminazione costante e variabile.

Ulteriore studio di (Sadeghi et al., 2016), somministra quattro questionari via web in orari specifici durante la giornata. La partecipazione coinvolge 98 maschi e 49 femmine, con la durata complessiva dello studio protratta per 40 giorni. Utilizzando due tipi di questionari online, questo studio si concentra sulle interazioni uomo-edificio e sulla soddisfazione degli occupanti per l'ambiente interno, oltre a esplorare le caratteristiche e gli attributi personali degli utenti.

Infine, lo studio di (Sadeghi et al., 2018) ha cercato di comprendere le complesse interazioni legate al controllo dell'ambiente visivo negli uffici privati delle zone perimetrali. L'esperimento coinvolge 80 impiegati in uffici perimetrali per 42 giorni, utilizza due questionari dove mira ad evidenziare le preferenze visive le quali sono influenzate da fattori come la posizione delle ombre e l'utilizzo delle luci elettriche. Questo studio ha portato alla creazione di un nuovo metodo per apprendere le

preferenze visive degli occupanti, sottolineando l'importanza di personalizzare l'ambiente visivo negli uffici per migliorare il comfort e la soddisfazione.

Questi studi insieme evidenziano l'importanza di una comprensione approfondita delle preferenze visive degli occupanti e della personalizzazione dell'ambiente visivo per migliorare il comfort e la soddisfazione. Questa comprensione può guidare la progettazione di spazi di lavoro più confortevoli e accoglienti.

Vengono studiati ulteriori articoli tra cui, lo studio di (Kwong, 2020) che esamina le prestazioni visive e le percezioni degli inquilini in un edificio verde altamente vetrato. I partecipanti sono stati sottoposti a un questionario post-esperimento sotto il controllo della luce naturale fornita da grandi finestre. Hanno valutato aspetti come la luminosità, la qualità della luce e la soddisfazione complessiva in diverse situazioni di illuminazione naturale.

In un contesto diverso, l'articolo di (Fakhari et al., 2021) analizza l'intervallo di soddisfazione per l'illuminamento in edifici ufficio, identificando parametri chiave. La metodologia coinvolge questionari suddivisi in due fasi: ricercatori sui parametri fisici nello spazio e utenti su parametri individuali. Partecipano 509 persone in periodi estivi e invernali. L'autore sostiene che la valutazione del comfort luminoso negli uffici può essere effettuata attraverso sondaggi soggettivi, cercando di correlare le risposte degli occupanti alle misurazioni fisiche delle condizioni di illuminazione negli edifici.

Questi studi forniscono intuizioni preziose sull'importanza dell'illuminazione nell'ambiente costruito e sul suo impatto sul benessere umano.

Come ultimo studio si esamina quello di (Gou et al., 2014), il quale esplora il divario tra le preferenze soggettive per l'illuminamento a bassa intensità per il comfort e la potenziale discrepanza nella generazione di ambienti produttivi. Gli esperimenti coinvolgono partecipanti sottoposti a diverse condizioni di illuminamento (da meno di 200 Lux a oltre 900 Lux) mentre svolgono compiti visivi e rispondono a questionari. La metodologia prevede l'assegnazione casuale di partecipanti a postazioni di lavoro, svolgendo attività e questionari in sessioni di 20 minuti, ripetute cinque volte con pause.

La rilevazione del rumore rappresenta un altro aspetto cruciale nello studio del comfort visivo, in quanto il livello di rumore nell'ambiente può influenzare notevolmente tale comfort.

Uno studio condotto da (Ricciardi & Buratti, 2018) presso l'Università di Pavia, Italia, ha esaminato le condizioni termiche, acustiche e visive nelle aule universitarie attraverso misurazioni sia soggettive che oggettive. In questo studio, sono stati sviluppati nuovi questionari specifici per valutare la percezione degli studenti sul comfort acustico e luminoso.

Le misurazioni del comfort termico non hanno mostrato differenze significative tra scale di 7 e 13 valori. Nel comfort acustico, il rumore di fondo è risultato essere significativamente correlato. Dal questionario illuminotecnico, l'illuminamento medio è risultato essere fortemente correlato al comfort visivo.

Sono stati proposti dieci indici per descrivere le condizioni di comfort, selezionati dalle domande che meglio correlano con i risultati sperimentali.

Durante una campagna sperimentale, sono stati distribuiti tre questionari per valutare il comfort termoigrometrico, acustico e visivo. Il questionario illuminotecnico includeva domande sulla percezione individuale dell'illuminazione artificiale e naturale su una scala da 0 a 10. Questo studio evidenzia l'importanza di considerare vari aspetti, tra cui il rumore, nell'analisi del comfort visivo.

Ulteriore metodo di indagine per il comfort visivo è il monitoraggio fisiologico. Questo metodo implica il monitoraggio di parametri fisiologici come la frequenza cardiaca o la risposta galvanica della pelle.

Un esempio di questo approccio è lo studio condotto da (Deng et al., 2021), che ha coinvolto 12 partecipanti per esaminare l'effetto del livello di illuminazione sull'impegno lavorativo. L'esperimento, della durata di 30 minuti, era suddiviso in sessioni di rilassamento, attività e riposo, e le condizioni luminose variavano tra tre livelli: 200 lux, 500 lux e 1000 lux.

La metodologia dello studio impiegava l'indice di asimmetria frontale (FAI), misurato tramite elettroencefalografia (EEG), per valutare il coinvolgimento dei partecipanti.

Inoltre, venivano monitorati altri parametri fisiologici, come la risposta galvanica cutanea (GSR), la frequenza cardiaca (HR) e la temperatura cutanea (ST).

L'analisi statistica dei risultati ha evidenziato variazioni individuali nell'effetto del livello di illuminazione sull'impegno lavorativo. Questo studio dimostra l'importanza del monitoraggio fisiologico nel fornire indicazioni oggettive sullo stato di comfort in relazione all'illuminazione dell'ambiente.

L'ultimo metodo di indagine da valutare riguarda le misurazioni di temperatura e umidità. Questo metodo considera fattori ambientali come la temperatura e l'umidità, che possono influenzare il comfort generale.

Un esempio di applicazione di questo metodo è lo studio condotto da (Wu et al., 2022) in un ambiente di lavoro sotterraneo. Gli autori hanno analizzato l'impatto della temperatura dell'aria e dell'illuminazione, conducendo esperimenti in un ambiente climatico artificiale e coinvolgendo 10 uomini e 9 donne. Hanno scoperto che la temperatura dell'aria influenzava significativamente i parametri soggettivi e oggettivi, mentre l'illuminazione aveva un effetto più debole. I parametri ambientali raccomandati erano una temperatura dell'aria compresa tra 22,0 e 27,3 °C e un'illuminazione tra 545 e 1000 lx.

L'interazione tra la temperatura del colore e la temperatura dell'aria influiva su vari parametri. Gli autori hanno monitorato le risposte fisiologiche e le prestazioni lavorative, scoprendo che la temperatura dell'aria influenzava la frequenza cardiaca, mentre l'illuminazione aveva impatti limitati. La temperatura dell'aria influenzava anche gli indicatori di salute vascolare, suggerendo potenziali risparmi energetici tramite un sistema di controllo automatico. L'uso combinato di diversi metodi, tra cui le misurazioni di temperatura e umidità, può fornire una visione più completa del comfort visivo in ambienti reali. Questo consente agli esperti di progettazione e agli scienziati di comprendere meglio come migliorare l'esperienza e la percezione visiva delle persone.

In termini di reazioni individuali alle impressioni luminose e agli stati dell'umore, lo studio di (Kong et al., 2022) esamina approfonditamente l'influenza dell'illuminazione artificiale e diurna. Attraverso la sua revisione di 64 articoli (1973-luglio 2022), non vi

è consenso sugli effetti della luce sull'impressione soggettiva e gli stati d'animo. Gli studi evidenziano che i parametri di design e le misure di progettazione delle luci artificiali impattano valutazioni oggettive e soggettive. L'illuminazione naturale interna richiede ulteriori esplorazioni, con una crescente attenzione negli ultimi cinque anni. Lo studio categorizza e analizza i risultati, sottolineando la necessità di ulteriori ricerche e identificando limiti, come la mancanza di informazioni complete sull'analisi dei dati.

Di seguito si riportano in tabella (*Tabella 1*) gli studi di letteratura condotti in RE, specificando per ognuno la tipologia di studio il numero di partecipanti, e quali caratteristiche sono state indagate:

Riferimenti	Anno	Questionari	Test	Percezione e luminosa	Variabili della luce	Esposizione temporale	N° pers	Single/ Multi domain	Independent /Repeated measure	Static/ Floating light
(Basurto et al., 2022)	2022	pre-questionario/ daily/post-questionario			CCT: DA 2700 A 6500 K LUX: DA 150 A 300		5	s	I	
(Wang et al., 2015)	2015	questionario per affaticamento agli occhi			CCT: da 3000 a 6000 K LUX: 150- 500-1000	2 ore	12	s	I	F
(Kwong, 2020)	2020	questionario sensazione-percezione-soddisfazione della luce			LUX: da 44018 a 82105	30 min	42	s	I	
(Deng et al., 2021)	2021		test di lettura e matematico		CCT: 5000 K LUX:200-500-1000	50 min	12	s	I	
(Toftum et al., 2018)	2018	questionario sulla percezione visiva			CCT: da 2700 a 6300 K LUX: 1000	1,5	44	m	I	
(De Korte et al., 2015)	2015	questionario con scala VAS	test di memoria		CCT: 3000 K	90 min	20	m	I	
(Gou et al., 2014)	2014	questionario sulla percezione visiva	test di visualizzazione		LUX: da 100 a 1000	1:40 ore	69			
(Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, 1862)		questionario sulle condizioni della luce			LUX: 500- 650-800		33	s	R	F-S
(Fakhari et al., 2021)	2021					40 giorni	509	s	I	
(Sadeghi et al., 2016)	2015						147	s	I	
(Zeng et al., 2022)	2022		test di memoria				22	s	I	
(Wu et al., 2022)	2022	questionario sulla percezione luminosa		x	LUX: 200-300-500-750 -1000 CCT: 4000, 5000 e 6000 K	2 ore	19	m		
(Kong et al., 2022)	2022					2,5 ore				
(Ricciardi & Buratti, 2018)	2018	pre - questionario/ questionario comfort visivo		x			331	m		

(Wei et al., 2014)	2014	questionario EMAs / questionario comfort visivo		x	CCT 3500 - 5000 K LUX: 2300 3000		26	s		F
(Hawes et al., 2012)	2012	questionario POMS	test di visualizzazione	x	CCT: 3345 K LED 1 4175 K LED 2 5448 K LED 3 6029 K		24	s	R	
(Sadeghi et al., 2018)	2018	questionario comfort visivo			CCT: 4100 K		80	s		
(Korsavi et al., 2022)	2022		test di prove				24	s	I	
(Hoffmann et al., 2008)	2008	questionario comfort visivo			CCT: 6500 K in stanza con luce variabile; CCT: 4000 K in stanza con luce regolare		11	s		F-S

Tabella 1

2.3 Metodi di indagine di comfort visivo in ambienti virtuali

La ricerca nell'ambito della percezione visiva e cognitiva ha visto un crescente interesse nell'utilizzo della realtà virtuale (VR) e dell'illuminazione come strumenti per valutare e comprendere i processi visivi e cognitivi umani.

L'utilità della VR a supporto della ricerca è ben nota da decenni. Diversi studi hanno condotto prove sperimentali di validazione confrontando l'ambiente virtuale con l'analogo reale per dimostrare la sua efficacia.

Quanto descritto sopra è verificabile negli studi di (Fathy et al., 2023) e (Abd-Alhamid et al., 2019) i quali hanno validato l'uso della VR nelle ricerche di progettazione illuminotecnica.

Nell'esperimento di (Fathy et al., 2023) si osserva l'utilizzo di algoritmi di realtà virtuale e machine learning per prevedere l'attenzione visiva con un'accuratezza del 71%. Con invece (Abd-Alhamid et al., 2019) si sono valutate le differenze nella percezione visiva tra un ufficio fisico e uno virtuale tridimensionale (PBVE), scoprendo che i partecipanti impiegavano più tempo nelle attività visive nella realtà virtuale (VR) rispetto all'ambiente reale. La metodologia comprendeva misurazioni di luminanza, fotografie panoramiche, compiti visivi nella VR, questionari sulla presenza e post-sperimentali. I questionari vengono somministrati dopo il completamento dei compiti visivi con la rimozione del visore, il quale poteva essere riutilizzato in caso di necessità

per rispondere alle domande.

Le ricerche di (Bellazzi et al., 2022) al contrario dei due studi precedenti affermano che sono necessarie ulteriori ricerche per stabilire un protocollo comune e consolidare la VR come strumento valido per gli studi illuminotecnici, offrendo una panoramica sull'uso della VR nella valutazione della qualità visiva e della percezione della luce nell'illuminotecnica. La ricerca analizza studi precedenti suddividendoli in tre categorie principali: comparazioni tra condizioni di illuminazione in VR e ambienti reali, percezione degli utenti in scenari luminosi virtuali e utilizzo della VR nella progettazione illuminotecnica. La metodologia di raccolta dati coinvolge diverse stanze con variazioni di luce, concentrandosi sull'esperienza sentimentale e il comfort visivo tramite l'utilizzo di questionari inviato via mail alla fine dell'esperimento.

La realtà virtuale (VR) viene utilizzata anche per apprendere diversi campi di studio, tra cui la percezione visiva e l'illuminotecnica. Diversi studi hanno esplorato l'uso della VR per analizzare e migliorare la nostra comprensione di questi campi.

Gli studi di (Ma et al., 2022) e (Liu et al., 2021) hanno utilizzato questionari per raccogliere dati. (Ma et al., 2022) hanno esaminato gli effetti della temperatura del colore (CCT) e dell'illuminazione su percezione visiva e prestazioni in ambienti virtuali immersivi (IVE). L'esperimento è stato condotto con 36 partecipanti (21 maschi e 15 femmine) in una sala senza finestre. Le condizioni testate includevano tre livelli di illuminamento (200, 500, 750 lux) e tre temperature del colore (2000 K, 4000 K, 6500 K). I partecipanti hanno risposto a tre questionari sulla percezione visiva, che includevano comfort, naturalezza, penombra e calore. I risultati hanno mostrato miglioramenti nelle IVE all'aumentare dell'illuminamento, con differenze significative tra le diverse condizioni di illuminamento. Tuttavia, la relazione tra la temperatura del colore e le prestazioni delle attività non è risultata chiara.

(Liu et al., 2021) hanno proposto un nuovo indice, il contrasto quadratico medio della luminanza ambientale (RMS), per valutare gli ambienti luminosi nelle aule universitarie. L'esperimento coinvolgeva la valutazione del compito visivo e fisiologica per rappresentare le caratteristiche della salute visiva. La valutazione del compito visivo utilizzava test di attenzione, memoria a breve termine e capacità

lavorativa tramite il software E-prime3 e la fotocamera Sony A7M3. La ricerca proponeva una zona di comfort luminoso come riferimento prezioso per la progettazione degli ambienti luminosi interni.

Infine, un ultimo contributo nello studio dell'illuminazione in contesti virtuali è di (Nolé Fajardo et al., 2023) i quali hanno esaminato l'influenza di illuminazione, colore e geometria sulle funzioni cognitive degli studenti. L'esperimento, svolto in quattro aule virtuali con diverse condizioni ambientali, includeva test cognitivi e misurazioni di memoria e attenzione. I risultati suggeriscono modifiche pratiche nella progettazione delle aule per migliorare l'apprendimento degli studenti.

In conclusione, l'analisi dei sei articoli sottolinea l'applicabilità e rilevanza della realtà virtuale e dell'illuminazione come strumenti per comprendere la percezione visiva e cognitiva, nonché per valutare l'effetto di fattori come l'illuminazione, il colore e la geometria sulla percezione e sulla memoria. È importante notare che la maggior parte degli studi ha somministrato i questionari fuori dalla realtà virtuale. Questi studi evidenziano il potenziale della realtà virtuale per migliorare la comprensione di questi campi e per guidare la progettazione di ambienti più efficaci e confortevoli.

Di seguito si riportano in tabella (*Tabella 2*) gli studi di letteratura condotti in IVE, specificando per ognuno la tipologia di studio, il numero di partecipanti, e quali caratteristiche sono state indagate:

Riferimenti	Anno	Questionari	Test	Variabili della luce	Esposizione temporale	N° pers	Single/ Multi domain	Indipendent/ Repeated measure
(Fathy et al., 2023)	2022		test con immagini		24 ore	41	s	I
(Bellazzi et al., 2022)	2022		test di produttività		12 ore			
(Nolé Fajardo et al., 2023)	2023	questionario su elementi architettonici	test di memoria	CCT: 4000 K LUX: 300	30 min	200	s	I
(Liu et al., 2021)	2021	questionario su percezione visiva					m	
(Ma et al., 2022)	2022	pre-questionario/questionario comfort visivo/ questionario senso di presenza e immersività		LUX: 200 - 500 -750 CCT: 2000 K, 4000 K e 6500 K	30 min	36		I
(Abd-Alhamid et al., 2019)	2019	questionario di percezione			40 min	20	s	

Tabella 2

2.4 Conclusioni stato dell'arte

In seguito all'analisi approfondita di ricerche, studi e le loro metodologie è possibile delineare la definizione del questionario per il comfort visivo di prova, obiettivo centrale di questa tesi. Riguardo proprio al comfort, la letteratura esaminata conferma l'utilizzo della realtà immersiva come mezzo valido per valutare il comfort visivo.

Negli studi che impiegano modelli di realtà virtuale immersiva, l'illuminazione è il parametro più frequentemente variato. Alcuni aggiungono stimoli visivi, come la variazione del colore delle pareti, e acustici per ampliare la gamma di percezioni degli occupanti. Interessante notare che nessuno degli studi analizzati ha approfondito l'IAQ (Indoor Air Quality), parametro cruciale per la salute e il comfort degli occupanti degli edifici. La valutazione di questo fattore potrebbe ridurre il rischio di problemi di salute e di comfort. Inoltre, la modalità online e quella manuale dei questionari sono state entrambe adottate per la somministrazione.

Negli articoli riportati nei precedenti paragrafi è significativo analizzare la modalità d'analisi dell'esperienza virtuale e reale. Infatti, la valutazione tramite la somministrazione di questionari avviene per la maggior parte successivamente alla sperimentazione. In pochi casi è stata sfruttata la realtà virtuale per visualizzare le domande del sondaggio, evitando di compromettere il senso di presenza dei partecipanti.

Infine, la ricerca ha focalizzato l'attenzione sul metodo di indagine più efficace per valutare il senso di presenza e immersività nella realtà virtuale. L'analisi ha concluso che il questionario è il metodo più efficiente, consentendo al partecipante di esprimere la propria sensazione in modo ottimale e immediato, mantenendo un canale di comunicazione diretto con l'operatore. L'uso di questionari come strumento di raccolta dati offre un modo efficace per raccogliere informazioni sia oggettive che soggettive, fornendo una valutazione completa del comfort visivo.

Tuttavia, è importante riconoscere i limiti dei questionari e interpretare i risultati con cautela, poiché viene compromessa una qualità fondamentale: l'obiettività.

I questionari presi in esame rappresentano indagini qualitative che rischiano di riportare difficoltà nelle misurazioni (alcuni ricercatori ritengono che la mancanza di misurazioni quantitative rigorose nelle indagini qualitative possa essere uno svantaggio, poiché la precisione e la comparabilità possono essere ridotte rispetto a studi quantitativi).

L'analisi degli articoli ha evidenziato una diversità nei questionari di indagine per la valutazione soggettiva dell'illuminazione negli ambienti interni. Pur mancando una standardizzazione, emergono approcci comuni, tra cui l'uso di scale Likert, domande aperte, valutazioni di aggettivi, modelli emotivi e questionari online. Questa varietà sottolinea la flessibilità degli approcci, con gli autori che progettano questionari adatti ai loro obiettivi specifici di ricerca e alle caratteristiche degli ambienti esaminati. La scelta del questionario dipende spesso dalla natura dello studio e dagli aspetti specifici dell'illuminazione indagati.

In sintesi, questi studi forniscono una preziosa intuizione su come progettare spazi di lavoro che non solo siano efficienti dal punto di vista energetico, ma che offrano anche un ambiente confortevole e accogliente per gli occupanti. Questi risultati possono essere utilizzati per sviluppare un questionario per la determinazione del comfort visivo, tenendo conto di vari fattori come l'abbagliamento, l'illuminamento del piano di lavoro, la temperatura di colore e il livello di illuminazione, nonché le caratteristiche individuali dei partecipanti. Questo questionario potrebbe quindi essere utilizzato per raccogliere dati sia oggettivi che soggettivi, fornendo una valutazione completa del comfort visivo.

3. FASI E METODI

L'obiettivo di questa tesi è quello di indagare quale sia l'impatto combinato di scenari visivi con elementi verdi e diversi livelli di illuminazione sugli occupanti nelle aule universitarie.

3.1 Fasi operative

Nel paragrafo seguente, vengono delineati i metodi impiegati per organizzare la ricerca e raccogliere dati, articolati in sei fasi.

- La prima fase mira a garantire che le domande e i test siano validi, affidabili e pertinenti per gli obiettivi dello studio. A questo scopo, sono stati sviluppati questionari pre e post sperimentali.
- La seconda fase si propone di strutturare il processo di ricerca in modo organizzato e controllato, attraverso la definizione di una procedura sperimentale articolata in fase pre-sperimentale, fase operativa e fase post-sperimentale.
- La terza fase è finalizzata alla creazione di un contesto controllato per le prove sperimentali, ottenuto attraverso la realizzazione del modello tridimensionale dell'ambiente di prova.
- La quarta fase si concentra sulla garanzia di una sufficiente potenza della ricerca mediante l'attività di selezione del campione di popolazione partecipante alle prove sperimentali.
- La quinta fase riguarda la predisposizione dell'attrezzatura e delle condizioni ambientali controllate per le prove, con l'obiettivo di ridurre possibili errori sistematici.
- Infine, la sesta fase verifica se le domande di ricerca sono state risolte, identificando correlazioni o relazioni tra le variabili e valutando la significatività statistica dei risultati. Si procede all'analisi dei dati raccolti, verificando l'Ecological Validity del modello creato e valutando l'impatto delle

condizioni ambientali interne (presenza di elementi verdi e livelli di illuminazione) sul comfort visivo degli utenti in ambienti immersivi.

In sintesi, vengono riportate le sei fasi seguenti:

- a) Preliminari per la prova:
 - Questionario introduttivo;
 - Questionario post-sperimentali per esplorare il comfort visivo;
 - Questionario post-sperimentale per valutare il senso di presenza e immersività e i disturbi legati alla cinetosi.
- b) Progettazione della procedura sperimentale: fase pre-sperimentale, fase operativa, fase post-sperimentale.
- c) Creazione del modello tridimensionale dell'ambiente di prova utilizzando i programmi Rhino e Unity3D, con la creazione di 3 scenari visivi:
 - Ambiente virtuale di base (B);
 - Ambiente virtuale Green, caratterizzato dalla presenza di elementi verdi alle pareti;
 - Ambiente virtuale Green+ Illuminazione con elementi verdi illuminati adeguatamente
- d) Selezione del campione di popolazione partecipante alle prove sperimentali sulla base della potenza statistica della ricerca
- e) Organizzazione della stanza per lo svolgimento delle prove: allestimento e settaggio dei sistemi di monitoraggio ambientale interno
- f) Risultati:
 - Verifica dell'Ecological Validity del modello creato: Analisi dei disturbi legati all'uso del visore e al senso di presenza e immersività vissuto dai soggetti.
 - Valutazione dell'effetto integrato di elementi verdi e illuminazione sulla percezione visiva degli utenti nelle aule universitarie.

3.2 Metodi

Le variabili sperimentali hanno portato a sviluppare tre diversi scenari visivi.

Nello specifico, le connessioni visive con la natura saranno rappresentate da:

- Vista “Base”, aula realmente esistente, caratterizzata da illuminazione reale;
- Vista “Green”, aula con elementi verdi alle pareti, caratterizzata dall’utilizzo di pareti verdi ed un’illuminazione reale;
- Vista “Green+Illuminazione”, aula con elementi verdi alle pareti, caratterizzata dall’utilizzo di pareti verdi ed illuminazione reale con l’aggiunta di led appropriati per i pannelli verdi.

I capitoli successivi esporranno nel dettaglio la selezione del campione, le fasi operative di cui lo studio si compone, gli strumenti utilizzati per l’organizzazione delle prove e la procedura per lo svolgimento dei test.

3.2.1 Questionario pre-sperimentale

Il questionario pre-sperimentale di indagine è uno strumento di misura utilizzato, non solo, per raccogliere dati di tipo qualitativo e quantitativo, ma anche di comunicazione per consentire l’interazione fra il ricercatore e il rispondente alla prova.

Poiché il questionario consente la standardizzazione dell’osservazione, è necessario che domande e comunicazione siano identiche per tutti i partecipanti per rendere le informazioni confrontabili tra loro. Esistono tre forme diverse di questionari basati su risposte date a: domande aperte, chiuse o entrambe. Per questo studio, si è utilizzata una tipologia di questionario mista, sia con domande a risposta aperta che chiusa, organizzato sulla base della vigente normativa.

Il questionario iniziale comprende domande riguardanti le informazioni personali dei partecipanti, come il sesso, l’età, eventuali problemi visivi e il livello di istruzione.

Inoltre, vengono raccolti dati sulle abitudini legate all'utilizzo dei media, come la frequenza delle attività sedentarie, la visione di programmi televisivi e l'utilizzo di videogiochi. Poi, viene chiesto se i partecipanti hanno avuto esperienze precedenti in ambienti virtuali immersivi. Infine, viene richiesto il livello di sensibilità visiva dell'utente. L'adozione di Google Form ha permesso di raccogliere i dati in modo più efficiente e preciso.

Nella seguente tabella (*Tabella 3*) sono riportati i voti per valutare le domande del pre-questionario:

Construct	Domanda	Risposta
Generalità	Sesso	<i>Scelta multipla</i> Maschio Femmina Preferisco non dichiararlo
	Età	<i>Testo a risposta breve</i>
	Sei affetto da difetti visivi?	<i>Scelta multipla</i> No Miopia Presbiopia Astigmatismo
	Seleziona il tuo livello di istruzione	<i>Scelta multipla</i> Scuola secondaria di primo grado Scuola secondaria di secondo grado Laurea Master/Scuola specialistica/Dottorato di Ricerca/Assegno di ricerca
Rapporto con i medium	Con quale frequenza svolgi attività sedentarie quali studio, lavoro di ufficio, etc.?	<i>Scelta multipla</i> Mai Raramente Spesso Tutti i giorni lavorativi
	Con quale frequenza giochi ai videogiochi?	<i>Scelta multipla</i> Mai Raramente Spesso Tutti i giorni
	Hai avuto precedenti esperienze di utilizzo di un visore per la realtà virtuale?	<i>Scelta multipla</i> Mai Una volta Più di una volta
Rapporto con la luce	In generale, quanto sei sensibile alla luminosità?	<i>Scelta multipla</i> Molto sensibile Sensibile Indifferente Poco sensibile Per niente sensibile

Tabella 3

3.2.2 Questionario post-sperimentale

Durante la fase sperimentale nel modello virtuale, è stato somministrato un questionario post-sperimentale ai partecipanti, composto da venti domande. Durante questa fase, le domande e le relative risposte sono state visualizzate sullo schermo del computer all'interno dell'ambiente virtuale. I partecipanti hanno fornito le risposte verbalmente, mentre un operatore ha compilato il questionario corrispondente su Google Form. Questo approccio è stato adottato per garantire un'esperienza completamente immersiva all'utente, evitando qualsiasi interruzione che potrebbe influenzare la presenza nel contesto virtuale (nota come "break in presence"). Inoltre, ha consentito di ottenere una raccolta dati immediata e precisa.

Il questionario prevede quattro sezioni: comfort visivo, valutazione dell'illuminazione, cinetosi e senso di presenza e immersività.

Per il comfort visivo, sono stati valutati il giudizio sul colore della luce artificiale, la percezione ambientale dell'illuminazione, le sensazioni visive nell'ambiente ed infine le preferenze luminose e di ambientazione. Ad ogni parametro corrisponde una o più quesiti con scala di valutazione come indicate nella tabella (*Tabella 4*) successiva.

Domanda	Risposta	Riferimento
Come giudichi il colore della luce artificiale?	Molto freddo Freddo Leggermente freddo Neutro Leggermente caldo Caldo Molto caldo	(Latini, Di Giuseppe, et al., 2023a; Latini, Giuseppe, et al., 2023)(Latini et al., 2021) (Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu; Kim, 1862; Ma et al., 2022; Wei et al., 2014)
Come percepisci l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione?	Molto buio Buio Leggermente buio Neutrale Leggermente luminoso Luminoso Molto luminoso/abbagliante	(Kwong, 2020) (Fakhari et al., 2021) (Wei et al., 2014) (Sadeghi et al., 2018) (Sadeghi et al., 2016) (Abd-Alhamid et al., 2019; Kwong, 2020) (Ma et al., 2022)
Come ti senti in questo ambiente a livello visivo?	A mio agio Leggermente a disagio A disagio Molto a disagio Estremamente a disagio	(Latini, Di Giuseppe, et al., 2023a; Latini, Giuseppe, et al., 2023)(Latini et al., 2021) (Kwong, 2020) (S. Y. Kim & Kim, 2007) (Sadeghi et al., 2016) (Wu et al., 2022)
In questo momento	Molto più freddo Più freddo	(Latini, Di Giuseppe, et al., 2023a; Latini, Giuseppe, et al., 2023)(Latini et al., 2021)

preferiresti che il colore della luce artificiale fosse	Leggermente più freddo Senza cambiamenti Leggermente più caldo Più caldo Molto più caldo	(Wei et al., 2014)
Come preferiresti che fosse l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione?	Molto più buio Più Buio Leggermente più buio Neutrale Leggermente più luminoso Più Luminoso Molto più luminoso	(Kwong, 2020)
La luce è distribuita uniformemente	totalmente in disaccordo - totalmente d'accordo (7 pp)	(Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, 1862; Kim & Kim, 2007; Wei et al., 2014) (Abd-Alhamid et al., 2019)
La condizione di illuminazione mi causa affaticamento agli occhi	totalmente in disaccordo - totalmente d'accordo (7pp)	(Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, 1862; Liu et al., 2021) (Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, 1862)
La condizione di illuminazione mi causa abbagliamento	totalmente in disaccordo - totalmente d'accordo (7pp)	(Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, 1862; Wei et al., 2014; Wu et al., 2022) (Borisuit et al., 2015)
L'illuminazione dell'ambiente rende l'ufficio realistico	totalmente in disaccordo - totalmente d'accordo (7pp)	(Ma et al., 2022)
L'illuminazione dell'ambiente sarebbe gradevole per lavorare	totalmente in disaccordo - totalmente d'accordo (7pp)	(Wei et al., 2014) (Borisuit et al., 2015)
La configurazione dell'ambiente sarebbe gradevole per lavorare	totalmente in disaccordo - totalmente d'accordo (7pp)	

Tabella 4

La parte di questionario riguardante la cinetosi riporta sei disturbi, valutabili su una scala da "0", per niente, a "4", moltissimo.

L'ultima sezione è composta da 4 categorie: apprezzamento grafico con una domanda, presenza spaziale con tre domande, coinvolgimento con una domanda e realismo sperimentato con gli ultimi tre quesiti. La quarta sezione ha come scala di

valutazione, per ogni domanda, un range di valori da “1”, totalmente in disaccordo, a “7”, totalmente d’accordo (H. K. Kim et al., 2018) con eccezione dell’ultima che va da “1”, totalmente non reale, a “7”, totalmente reale.

In (Tabella 5) e in (Tabella 6) si riportano tutte le domande riguardanti la cinetosi e il senso di presenza e immersività, con le relative possibilità di risposta e scale di valutazione:

Costrutt	Domanda	Risposta
Cinetosi	Valuta i seguenti disturbi legati all'utilizzo del visore nell'ambiente virtuale <ul style="list-style-type: none"> • Disagio generale • Stanchezza • Affaticamento agli occhi • Difficoltà di messa a fuoco • Mal di testa • Vertigini 	Scelta multipla Per niente Leggermente Moderatamente Molto Moltissimo

Tabella 5

Construct	Domande	Risposta	Riferimento
	Ho apprezzato la grafica e le immagini del modello virtuale	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	(Jennett et al., 2008)
Spatial presence	Ho percepito lo SPAZIO AULA come un luogo realmente visitato piuttosto che come un’immagine		(Hong et al., 2019a) (Schubert et al., 2001)
	Durante la prova, mi sono sentito presente nello SPAZIO AULA		(Hong et al., 2019a) (Schubert et al., 2001)
	Ho percepito il modello virtuale dello SPAZIO AULA come immersivo ovvero come adeguata illusione della realtà		(Hong et al., 2019a) (Schubert et al., 2001)
Involvement	Durante la prova, non ero consapevole del mondo reale circostante		(Hong et al., 2019a) (Schubert et al., 2001)
Experienced realism	Ho percepito gli oggetti dello SPAZIO AULA come proporzionalmente corretti (cioè, avevano circa la giusta dimensione e distanza in relazione a me e ad altri oggetti virtuali)		(Hendrix, 1994)
	Ho avuto la sensazione di poter interagire con lo SPAZIO AULA (ad esempio per afferrare degli oggetti)		(Hendrix, 1994)
	Quanto ti è sembrato realistico il modello virtuale dello SPAZIO AULA?	(Hong et al., 2019a) (Schubert et al., 2001)	

Tabella 6

3.2.3 Selezione del campione

Nelle fasi sperimentali, a causa delle limitate risorse e dell'impossibilità di esaminare l'intera popolazione, si procede ad effettuare un "campionamento", selezionando una porzione rappresentativa di essa.

Un elemento cruciale nelle sperimentazioni è la determinazione della dimensione adeguata del campione, necessaria per ottenere una stima dell'intervallo di confidenza con una precisione specificata o garantire allo studio un numero sufficiente di partecipanti per affrontare in modo adeguato la questione di ricerca. Per conseguire ciò, di solito vengono fissati i seguenti parametri:

- L'effect size, fissato a 0,5 (medio), che misura la forza di una relazione tra due variabili, fornendo informazioni su come la variabile indipendente predice la variabile dipendente. Un valore maggiore indica una migliore capacità predittiva delle variabili indipendenti, essendo fortemente correlate alle variabili dipendenti.
- Il livello di significatività (α), stabilito a 0,05 (intervallo di confidenza del 95%), corrispondente alla probabilità di respingere erroneamente l'ipotesi nulla anche se è vera. Un α minore aumenta la probabilità di evitare falsi positivi, richiedendo un campione più ampio.
- La potenza statistica ($1-\beta$), fissata all'80%, rappresenta la probabilità di respingere correttamente l'ipotesi nulla se è falsa. Una potenza statistica maggiore facilita la rilevazione di effetti reali e richiede un campione più ampio.

Utilizzando questi parametri e il software RStudio, si ottiene un numero minimo di partecipanti pari a 36 soggetti.

Per garantire un'elevata validità interna, è necessario adottare un design a misure ripetute. Il termine "repeated-measure design" si riferisce a un tipo di progettazione di ricerca che comporta la misurazione ripetuta della stessa variabile su uno stesso soggetto o su soggetti abbinati. In questa tipologia di progettazione, le misurazioni sono effettuate in diverse condizioni o momenti temporali per valutare eventuali

cambiamenti o effetti nel tempo. Il concetto di repeated-measure design implica la raccolta di molteplici misurazioni della stessa variabile su soggetti identici o abbinati in diverse condizioni o su più periodi temporali, ossia un gruppo di individui partecipa a tutte le diverse condizioni di trattamento. Pertanto, se ci sono differenze medie tra i trattamenti, tali differenze non possono essere attribuite alle variazioni individuali. Nel corso di questo studio, ogni partecipante prenderà parte a una sessione per due o tre set point di illuminazione.

Il repeated-measure design presenta come principale vantaggio la riduzione dei problemi derivanti dalle differenze individuali (come età, QI, sesso e personalità) che potrebbero influenzare l'esito del test. Tuttavia, è essenziale considerare alcune limitazioni:

- Ogni individuo partecipa alle prove in momenti diversi, con il rischio di influenze da fattori esterni come la salute o l'umore (fattori correlati al tempo) che possono variare nel tempo.
- La partecipazione al primo scenario potrebbe influenzare la persona negli altri due scenari (effetto di ordine), poiché i partecipanti possono acquisire esperienza durante il primo scenario, il che potrebbe beneficiarli negli altri due.

È cruciale considerare queste limitazioni nel repeated-measure design e implementare adeguate strategie di controllo, come bilanciare l'ordine delle scene o considerare le fluttuazioni dei fattori correlati al tempo, per garantire risultati affidabili e accurati.

Di conseguenza, è necessario controbilanciare questi fattori gestendo l'ordine delle scene. I partecipanti saranno casualmente assegnati a diversi gruppi, ciascuno con una distribuzione diversa degli scenari in realtà virtuale, per un massimo di 6 combinazioni di scenari differenti.

Nella fase di contro-bilanciamento, è altresì fondamentale garantire una comparabilità tra il numero di partecipanti di sesso maschile e femminile nelle sperimentazioni. Pertanto, è opportuno avere almeno 36 soggetti, con percentuali simili tra donne e uomini.

Nel presente studio è stato coinvolto un campione di 41 soggetti, di cui 22 donne e 19 uomini.

3.2.4 Procedura sperimentale

Il seguente studio mira a raccogliere dati sul comfort visivo, sulle interazioni dei partecipanti con le componenti verdi atte a modificare la condizione visiva in un ambiente virtuale con tre scenari distinti.

Nel giorno della prova, durante la fase pre- sperimentale, ossia nei primi dieci minuti, ai soggetti partecipanti è stato somministrato, in un primo momento, un questionario introduttivo, tramite l'uso di Google Form e letto le istruzioni per svolgere l'intera prova, come mostrato in *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*

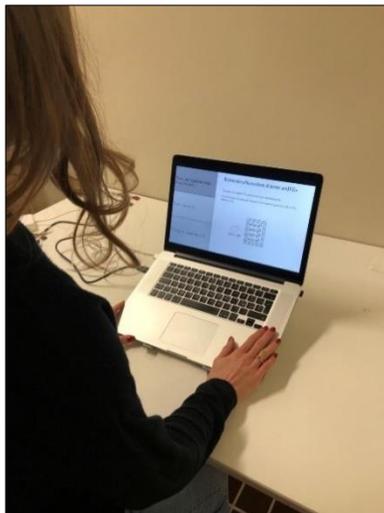


Figura 1

Contemporaneamente, lo staff contrassegna l'orario di inizio della prova e fa indossare un orologio (Empatica EmbracePlus) per il rilevamento dei parametri fisiologici, quali: attività elettrodermica (EDA), frequenza cardiaca (HR) e temperatura cutanea (ST).



Figura 2

A questionario concluso inizia la fase operativa vera e propria facendo indossare al partecipante il visore VIVE PRO Eye dell'HTC, con l'aiuto di un operatore dello staff e settando la distanza tra le lenti per ottimizzare la visualizzazione del modello.



Figura 3

Al soggetto è stato consigliato, in questo momento, di tenere gli occhi chiusi per circa 30 secondi per evitare effetti indesiderati dovuti alla cinetosi da visore. Trascorso questo tempo, viene proiettato all'interno dell'ambiente virtuale immersivo ad uso aula universitaria e ha la possibilità di osservare l'intera scena seduto in una posizione che permette di avere una visuale completa dello spazio modellato. Trascorsi circa tre minuti, tempo necessario per l'adattamento all'ambiente virtuale (Goto et al., 2006), il soggetto viene proiettato in corrispondenza del banco universitario su cui è posizionato un computer, in cui saranno visualizzate le domande del questionario post-sperimentale e altri elementi come penne e libri. Quando il partecipante si è sentito pronto e a suo agio è iniziata la fase operativa della sperimentazione. I tre

scenari sono stati sottoposti, ad ogni soggetto, in maniera randomizzata per validare ulteriormente il contro bilanciamento necessario per il time- related factor e l'order effect, spiegati in precedenza nel capitolo "Selezione del campione".



Figura 4



Figura 5



Figura 6



Figura 7

Durante la prova immersiva, in ogni tipo di scenario, visualizzerà sullo schermo del computer in realtà virtuale, delle domande volte a registrare il comfort visivo e cinetosi, dandone risposta a voce allo staff che procederà con la registrazione delle stesse. L'intera prova ha la durata di circa mezz'ora.

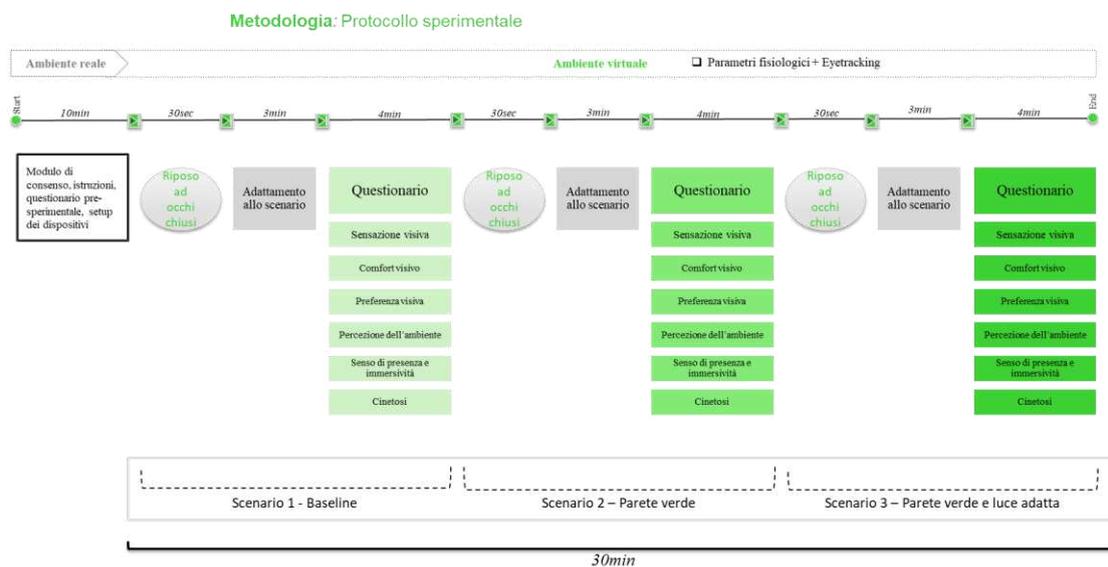


Figura 8

La sequenza di prova illustrata è stata ripetuta dai soggetti per ogni set di scenari oggetto di studio.

3.3 Realizzazione del modello in Relux

L'illuminazione all'interno di un'aula universitaria riveste un ruolo cruciale nel garantire un ambiente di apprendimento ottimale. Nel contesto di questa tesi, si è scelto di utilizzare il software Relux per esaminare e visualizzare in modo dettagliato la distribuzione della luce all'interno dell'aula universitaria (155/D1) presso l'Università politecnica delle Marche.

Relux è un software specializzato nell'illuminotecnica, progettato per supportare la progettazione dell'illuminazione in ambienti diversi. La sua interfaccia e le funzionalità consentono di modellare in dettaglio la distribuzione della luce negli spazi, assicurando soluzioni illuminotecniche efficaci e personalizzate. Relux offre strumenti avanzati per simulare la distribuzione luminosa, analizzando parametri come l'intensità, la temperatura del colore e la copertura luminosa.

La decisione di utilizzare Relux è stata motivata dalla necessità di ottenere una visione dettagliata della distribuzione della luce nell'aula universitaria. L'obiettivo principale di questa ricerca è quello di mostrare come la luce si diffonda e influisca sugli spazi di apprendimento, fornendo informazioni utili per eventuali miglioramenti e ottimizzazioni. La configurazione dei parametri in Relux ha richiesto un approccio completo che coinvolgesse la raccolta di misure reali dei neon presenti nell'aula. Le specifiche delle sorgenti luminose, così come le superfici riflettenti e assorbenti, sono state attentamente modellate per garantire una simulazione accurata della distribuzione della luce. Inoltre, durante la configurazione, sono state considerate attentamente altre caratteristiche dell'ambiente, quali finestre, pilastri, porte e anche i banchi di lavoro presenti nell'aula, i quali sono stati progettati seguendo le caratteristiche reali dell'aula universitaria (155/D1) ed a ognuno dei quali è stato assegnato un grado di riflessione (50% per pareti, soffitto e parete finestrata mentre il 60% per la pavimentazione). L'inclusione di questi elementi nell'analisi ha contribuito a una rappresentazione più dettagliata e realistica della situazione luminosa all'interno dello spazio universitario. Questa approfondita modellazione ha consentito di valutare in modo preciso l'impatto di ogni elemento sull'illuminazione complessiva e di identificare possibili aree di miglioramento.

L'analisi dell'illuminazione nelle diverse postazioni di lavoro nell'aula universitaria è condotta conformemente alla normativa EN 12464-1. I risultati indicano valori specifici

per ciascuna area di compito visivo, prendendo in considerazione il profilo utente che include attività come scrittura, dattilografia, lettura e elaborazione dati.

Per ogni area di compito visivo (dalla 1 alla 8), sono forniti dati dettagliati, tra cui illuminamento medio \bar{E} , illuminamento minimo E_{min} , rapporto E_{min}/\bar{E} , posizione delle postazioni di lavoro e valori specifici rispetto alle normative EN 12464-1.

In particolare, per l'area di valutazione 1, che comprende la superficie utile 1.1, sono presenti dettagli sulle superfici principali, le posizioni delle luci, e il tipo di neon utilizzato (Philips SP530P L1130_830/SP530P L1130 1 xLED15S/830 OC). I risultati riflettono un approccio accurato alla progettazione dell'illuminazione, garantendo che ogni postazione di lavoro abbia un illuminamento adeguato a svolgere attività di scrittura, lettura e elaborazione dati.

In conclusione, l'analisi illuminotecnica condotta attraverso Relux e la valutazione conforme alla normativa EN 12464-1 ed ha permesso di impostare il livello di illuminazione ottimale per la sperimentazione nel modello VR, confermando l'efficacia delle soluzioni adottate nell'aula universitaria, evidenziando un ambiente luminoso ottimizzato che promuove un apprendimento confortevole e produttivo.

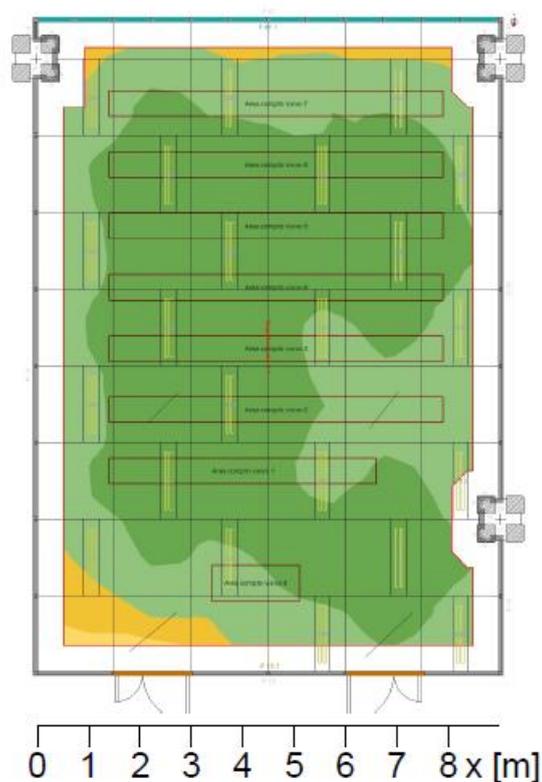


Figura 9



Figura 10

In allegato **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si riporta il documento contenente i calcoli effettuati nel software Relux.

3.4 Realizzazione modello della stanza virtuale

La fase di modellazione è stata realizzata come parte integrante della tesi di Laurea di Elisa Santarelli, intitolata "Valutazione dell'efficacia dei sistemi multi-agente nell'ambito delle pareti verdi per la qualità dell'aria interna in ambiente universitario".

3.4.1 Definizione del modello

L'ambiente nel quale si sviluppa lo studio è quindi un ambiente universitario, porzione del polo Monte Dago, Univpm. Tale ambiente sarà quindi costituito da una concentrazione di CO₂ di base, che può quindi essere assunta pari a quella esterna, ipotizzando di trovarci in una condizione iniziale per la quale l'ambiente è stato totalmente arieggiato. Inoltre, l'ambiente sarà formato da finestre, pertanto possiamo ipotizzare di assegnare un input che definisca il numero di ricambi d'aria. Oltre ai ricambi d'aria, dovuti all'apertura delle finestre, si dovrà aggiungere la quantità di ricambi d'aria dovuti alla ventilazione presente all'interno dell'edificio.

Inoltre, l'ambiente è formato da aule, ognuna delle quali rappresenta uno spazio confinato. Per semplicità, infatti, si ipotizza che non ci sia scambio di flussi fra un'aula e l'altra. Ogni aula avrà ulteriori dati di input fissi quali volume ed area.

3.4.2 Costruzione del modello 3D

A tal fine, si è ricostruito il modello di un'aula rappresentativa, l'aula 155/d1. Partendo dalla planimetria fornita dall'ateneo, gestita attraverso il software Autocad (2020), in primo luogo si è operato attraverso la riproduzione in 3D con il massimo livello di dettaglio possibile con il software Rhinoceros (versione 7.0) e infine si sono applicati materiali, luci e Capsule Camera, la quale consente il firstperson player control, in Unity (versione 2020.3.21f1), una piattaforma per lo sviluppo di elementi 3D realistici.

Il modello 3D è stato quindi restituito con attenzione affinché fosse più realistico possibile. In particolare, sono stati ricostruiti i banchi a seguito di un rilievo del mobilio presente all'interno dell'aula.

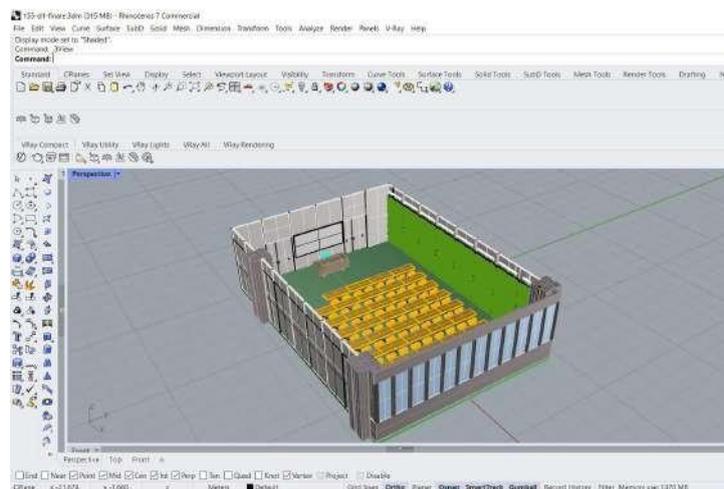


Figura 11

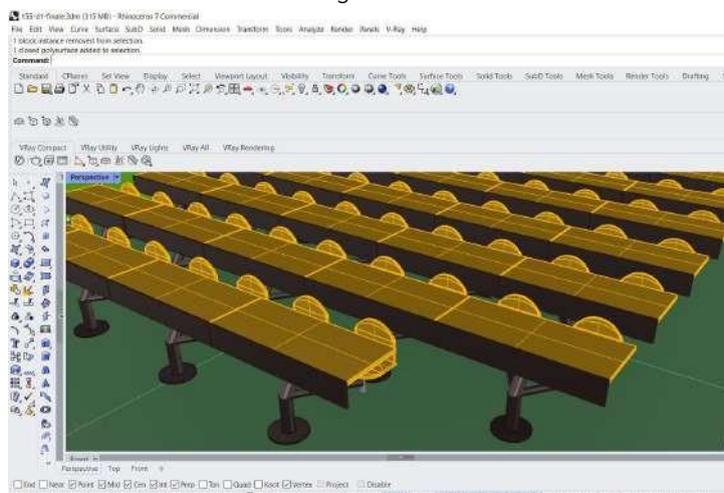


Figura 12

A tale modello sono state poi ovviamente aggiunte delle pareti verdi modellate appositamente. Si sono inserite delle foglie rappresentative della tipologia di pianta selezionata inizialmente per condurre l'analisi. Ovvero la specie con maggior capacità di ridurre CO2 da dati sperimentali provenienti in letteratura. Le dimensioni sono state definite in modo tale che si ottenesse un modulo di dimensioni pari a quelle del modulo prefabbricato di tramezzo presente all'interno dell'aula.

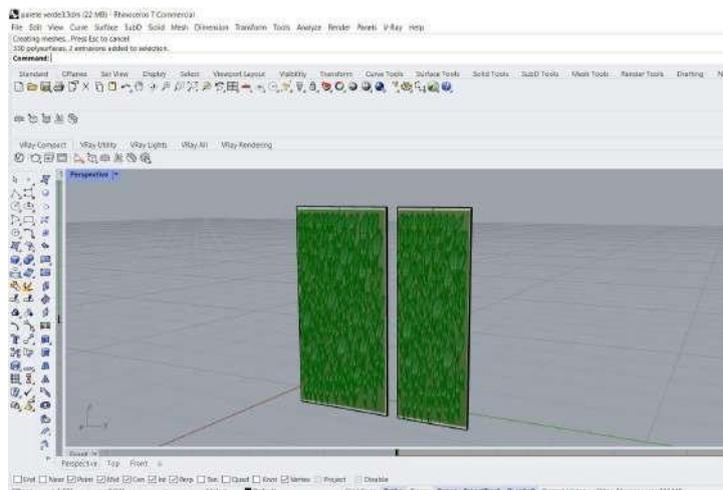


Figura 13

In secondo luogo, si è passati alla ricostruzione dell'ambiente attraverso adeguati materiali e textures, che fossero il più possibile realistici. Come già definito, il programma utilizzato è Unity (versione 2020.3.21f1). Con lo scopo di avere una fedele trasposizione della stanza presa come esempio nell'ambiente virtuale, è stato necessario inserire all'interno del modello la corretta colorazione delle pareti, dei pilastri e dei controsoffitti. Per farlo si sono utilizzate colorazioni e textures già acquisite dal dipartimento DICEA, Università Politecnica delle Marche. Inoltre, sono stati aggiunti elementi di dettaglio per ricreare un ambiente quanto più vicino a quello reale. Di seguito si riportano alcune foto rappresentative del modello ricostruito.



Figura 14

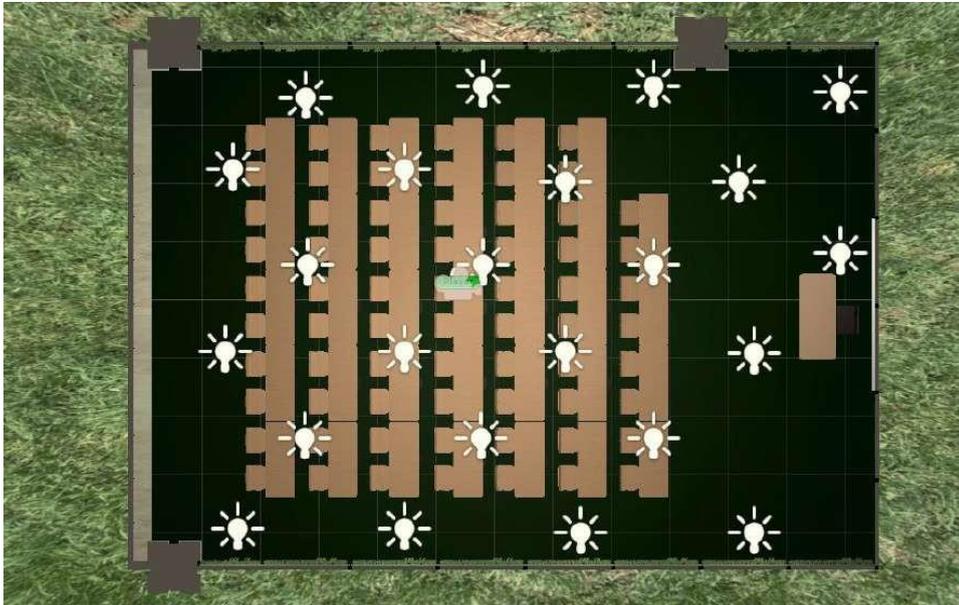


Figura 15



Figura 16

3.4.3 Studio illuminotecnico sperimentale

In questa seconda fase si è tentato di comprendere la corrispondenza in termini di luminanza, fra i due ambienti: l'ambiente reale e l'ambiente virtuale. Questo studio ha l'obiettivo di validare l'utilizzo della realtà immersiva per la sua capacità di rappresentare l'ambiente reale in termini di comfort visivo al fine di poter ottenere dei risultati, derivanti dalle prove di comfort condotte, che possano essere significativi per eventuali indicazioni progettuali sul componente edilizio studiato.

In primo luogo, si è operato andando ad condurre delle misurazioni in aula tramite l'utilizzo del luxmetro. Le misurazioni sono state prese all'altezza dei piani di lavoro (banchi) in cinque differenti postazioni.

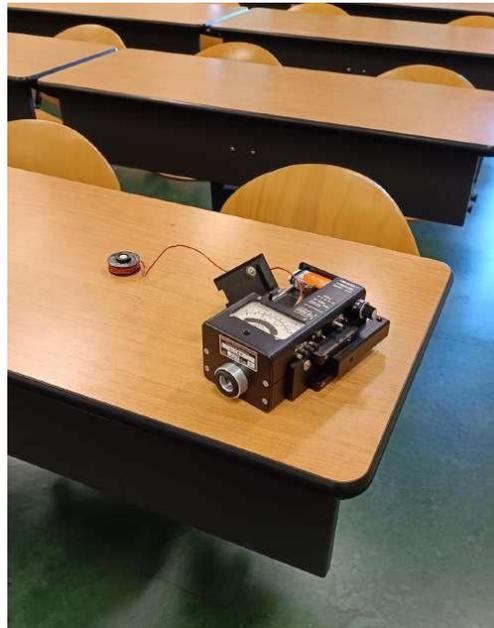


Figura 17

In secondo luogo, si sono condotte equivalenti misurazioni in ambiente virtuale. Per farlo, si sono inserite Capsule Camera nelle medesime posizioni reali, all'altezza dei banchi. Si è poi predisposta la stanza in modo tale che non ci fossero altre fonti di luce oltre a quella proveniente dal visore VIVE PRO.

Il visore è stato posizionato in modo tale da riprodurre lo stesso scenario ideale, ovvero diretto verso l'alto. Il sensore, collegato al luxmetro, a questo punto è stato predisposto al di sotto del visore in modo tale da poter quindi ottenere le misurazioni necessarie,

nelle cinque posizioni prese in considerazione.

Inoltre, si è operato un confronto, dal quale si evidenzia una differenza di scala dei due differenti scenari.

Infatti, l'ordine di grandezza dei lux, come si ipotizzava, in ambiente reale è compreso fra i 300 ed i 500 lux, mentre l'ordine di grandezza dell'ambiente virtuale risulta compreso fra i 30 e i 50 lux.

Si attesta pertanto una differenza fra i due scenari confrontati. Si valuta però la percentuale di incremento di lux, fatta rispetto al minimo, in entrambi i casi. Scoprendo così che si ha un'omogeneità dei risultati dei due ambienti. Pertanto, lo strumento è validato e si ha conoscenza della scala con cui si rapportano i due differenti ambienti. Di seguito si riporta uno schema in cui si inseriscono le misurazioni osservate nei due ambienti.

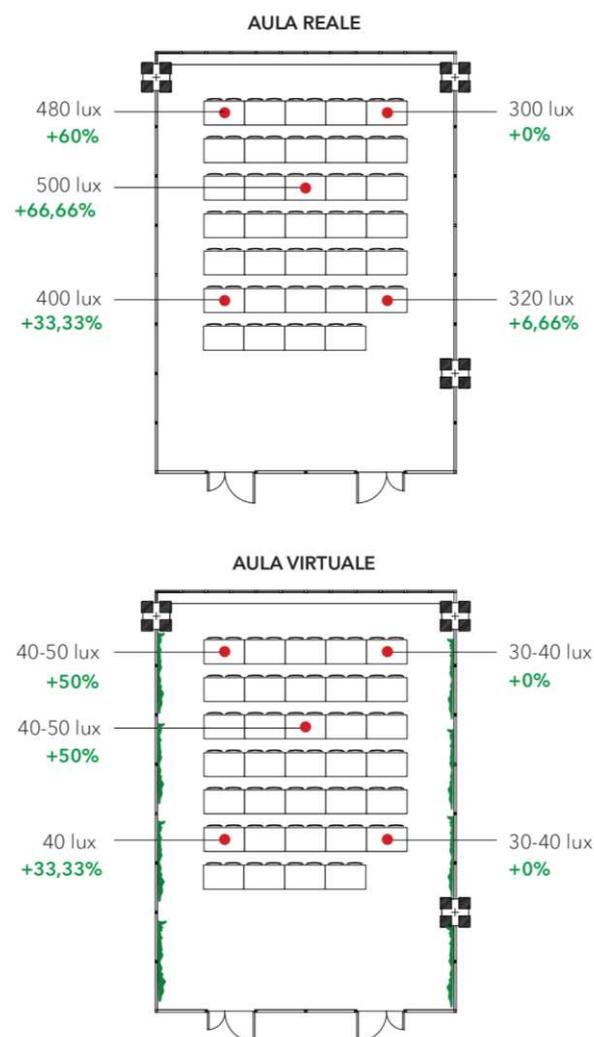


Figura 18

3.5 Allestimento della stanza per lo svolgimento delle prove

L'ambiente di prova (Figura 19) è stato allestito in una stanza del dipartimento DICEA, nell'edificio di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche con sede in Polo Monte Dago, Ancona. Le dimensioni interne della stanza sono 5,93 m × 4,38 m e la sua altezza fino al controsoffitto è di 3,0 m.

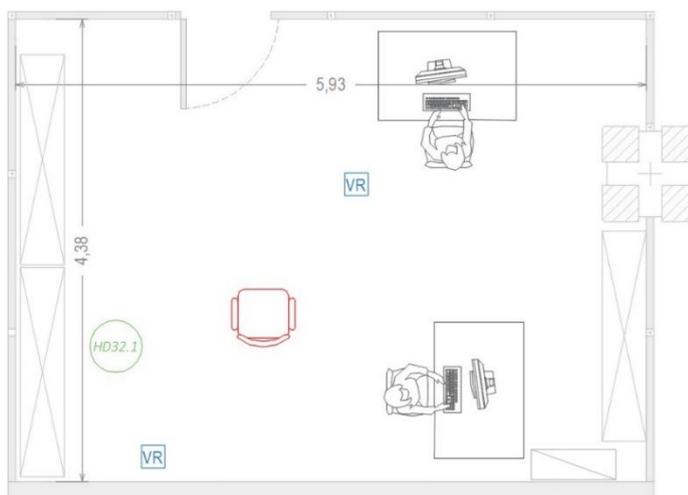


Figura 19

L'ambiente sperimentale è stato dotato di due postazioni computer gestite dallo staff operativo durante lo svolgimento delle prove. Al centro della stanza è stata collocata la seduta in rosso assegnata al soggetto per lo svolgimento della prova, e ai suoi lati sono state posizionate le stazioni base per la definizione del campo d'azione del visore.



Figura 20

Inoltre, affianco alla postazione del soggetto è stata installata una stazione microclimatica

HD32.1 Thermal Microclimate della ditta DeltaOHM [55] (Figura 21), per consentire la misurazione dei parametri ambientali in tempo reale e il loro controllo immediato.



Figura 21

Tramite questo strumento sono stati gestiti due diversi programmi operativi:

Programma A “Analisi Microclimatiche” in grado di rilevare contemporaneamente Temperatura ambiente (T_a , °C), Umidità relativa (RH, %), Velocità dell’aria (V_a , m/s), Temperatura media radiante (T_r , C°).

Programma B “Analisi di discomfort” in grado di rilevare contemporaneamente le seguenti grandezze: Temperatura dell’aria all’altezza della testa (T_h , °C) misurata a 1,7m, 1,1 m per soggetto seduto; Temperatura dell’aria all’altezza dell’addome (T_b , °C) misurata a 0,6 m per soggetto seduto; Temperatura dell’aria rilevata all’altezza delle caviglie (T_k , °C) misurata a 0,1 m; Temperatura a livello del pavimento (T_f , °C). Il programma operativo B è utilizzato per calcolare gli indici di discomfort locale dovuti a gradienti di temperatura verticali o ad asimmetria radiante.

Le sonde della stazione microclimatica utilizzate per tale scopo sono: AP 3203, HP 3217R, TP 3275, TP 3227PC, TP 3227K.

3.6 Analisi dei dati e test statistici

L'analisi dei dati è stata prima condotta in modo qualitativo con, ad esempio, istogrammi. Per confermare o smentire le ipotesi scaturite dall'analisi qualitativa, sono stati condotti dei test statistici descrittivi tramite utilizzo di software quali Excel e RStudio (versione 4.1.2). Sono stati eseguiti sia test parametrici che non parametrici per verificare differenze significative tra i gruppi di dati e cercare correlazioni. Il livello di significatività utilizzato è pari a $\alpha=0.05$.

La scelta di utilizzare un test parametrico piuttosto che un non parametrico sta nel fatto che i primi lavorano con punteggi numerici, mentre i secondi richiedono come input dei dati ordinali o nominali classificati in categorie.

Nei seguenti sottoparagrafi, si riportano i test statistici utilizzati e i parametri a cui sono stati applicati.

3.6.1 Friedman test

Il test di Friedman viene utilizzato per valutare le differenze tra tre o più condizioni di trattamento utilizzando dati provenienti da un disegno con misurazioni ripetute. Questo test rappresenta un'alternativa all'ANOVA a misure ripetute. Tuttavia, l'ANOVA richiede punteggi numerici che possono essere utilizzati per calcolare medie e varianze. Il test di Friedman richiede semplicemente dati ordinali. Il test di Friedman è utilizzato per confrontare tre o più trattamenti.

Questo test richiede solo un campione, con ciascun individuo che partecipa a tutte le diverse condizioni di trattamento. Le condizioni di trattamento devono essere ordinate per rango per ciascun partecipante individuale.

Inoltre, può essere utilizzato se i dati originali consistono in punteggi numerici, i quali però devono essere convertiti in ranghi prima di utilizzare il test.

In termini generali, l'ipotesi nulla per il test di Friedman afferma che non ci sono differenze tra le condizioni di trattamento confrontate, quindi i ranghi in un trattamento non dovrebbero essere sistematicamente più alti (o più bassi) dei ranghi in qualsiasi altra condizione di trattamento. Pertanto, le ipotesi possono essere formulate come segue:

- H0: Non ci sono differenze tra i trattamenti. Di conseguenza, i ranghi in una condizione di trattamento non sono sistematicamente più alti o più bassi dei ranghi in qualsiasi altra condizione di trattamento.
- H1: Ci sono differenze tra i trattamenti. Di conseguenza, i ranghi in almeno una condizione di trattamento sono sistematicamente più alti o più bassi dei ranghi in un'altra condizione di trattamento.

Il test di Friedman valuta le differenze tra i trattamenti calcolando la seguente statistica del test:

$$\chi_r^2 = \frac{12}{nk(k+1)} \sum R^2 - 3n(k-1)$$

Si noti che la statistica è identificata come chi-quadro (χ_r^2) con un pedice r, e corrisponde a una statistica del chi-quadro per i ranghi. Questa statistica del chi-quadro ha gradi di libertà determinati da $df = k - 1$ ed è valutata utilizzando i valori critici nella distribuzione del chi-quadro.

Come per la maggior parte dei test per dati ordinali, non esiste un formato standard per riportare i risultati di un test di Friedman. Tuttavia, il report dovrebbe fornire il valore ottenuto per la statistica del chi-quadro, così come i valori per df, n, e p.

3.6.2 Wilcoxon Signed-Rank test

Il test di Wilcoxon dei ranghi con segno è simile al test di Friedman, introdotto in precedenza in questo capitolo, e si utilizza per campioni correlati o abbinati, ovvero che provengono da osservazioni ripetute dello stesso soggetto (“repeated-measure design”). Tuttavia, il test di Wilcoxon è limitato a confrontare solo due trattamenti, mentre il test di Friedman è utilizzato per confrontare tre o più trattamenti.

Il test prevede:

- H0 (ipotesi nulla) $\mu_D=0$: la variazione della condizione sperimentale non provoca cambiamenti nei voti dei soggetti.
- H1 (ipotesi alternativa) $\mu_D \neq 0$: la variazione della condizione sperimentale provoca cambiamenti nei voti dei soggetti.

Non si assegnano ranghi a differenze nulle.

I passaggi per eseguire il test di Wilcoxon sono i seguenti:

- Si riportano i punteggi per i due tre scenari;
- Si esegue la differenza tra i punteggi e se ne calcola il valore assoluto;
- Si calcola il rango, escludendo le differenze pari a 0. Il test non prevede l'assegnazione del rango a differenze nulle;
- Si dividono i ranghi in positivi e negativi e se ne calcolano le somme ottenendo il Tvalue T-value calcolato, pari al minimo tra la somma dei ranghi positivi e quella dei ranghi negativi;
- In funzione della dimensione del campione (numero dei soggetti a cui è associato un rango non nullo) e del livello di significatività è stato estratto dai valori tabellati il T- critico
- Si compara il Tvalue T-value con il T- critico. Se Tvalue T-value < T- critico si rifiuta H0 e si accetta H1 (la differenza tra i due trattamenti è significativa). Altrimenti se Tvalue T-value > di T- critico, si accetta H0 (non c'è differenza significativa tra i due trattamenti).
- Si calcola successivamente il Pvalue p-value per supportare ulteriormente l'ipotesi di significatività/non significatività tramite il confronto con il livello di significatività pari a $\alpha = 0.05$. Se Pvalue p-value ≤ 0.05 , ci sono differenze statisticamente significative.

TABLE B.10 CRITICAL VALUES OF T FOR THE WILCOXON SIGNED-RANKS TEST*

*To be significant, the obtained *T* must be equal to or less than the critical value. Dashes (—) in the columns indicate that no decision is possible for the stated α and *n*.

<i>n</i>	Level of Significance for One-Tailed Test				<i>n</i>	Level of Significance for One-Tailed Test			
	.05	.025	.01	.005		.05	.025	.01	.005
	Level of Significance for Two-Tailed Test					Level of Significance for Two-Tailed Test			
<i>n</i>	.10	.05	.02	.01	<i>n</i>	.10	.05	.02	.01
5	0	—	—	—	30	151	137	120	109
6	2	0	—	—	31	163	147	130	118
7	3	2	0	—	32	175	159	140	128
8	5	3	1	0	33	187	170	151	138
9	8	5	3	1	34	200	182	162	148
10	10	8	5	3	35	213	195	173	159
11	13	10	7	5	36	227	208	185	171
12	17	13	9	7	37	241	221	198	182
13	21	17	12	9	38	256	235	211	194
14	25	21	15	12	39	271	249	224	207
15	30	25	19	15	40	286	264	238	220
16	35	29	23	19	41	302	279	252	233
17	41	34	27	23	42	319	294	266	247
18	47	40	32	27	43	336	310	281	261
19	53	46	37	32	44	353	327	296	276
20	60	52	43	37	45	371	343	312	291
21	67	58	49	42	46	389	361	328	307
22	75	65	55	48	47	407	378	345	322
23	83	73	62	54	48	426	396	362	339
24	91	81	69	61	49	446	415	379	355
25	100	89	76	68	50	466	434	397	373
26	110	98	84	75					
27	119	107	92	83					
28	130	116	101	91					
29	140	126	110	100					

Figura 22

Quando il campione è sufficientemente grande ($n > 20$), il Wilcoxon test tende ad approssimare una distribuzione normale, in questo caso è possibile condurre il test usando la z-statistica. La normalizzazione del Wilcoxon test si usa anche quando il numero di ties, ovvero numero di casi in cui la differenza tra i voti nei due trattamenti è 0, è troppo elevato riducendo la n. In questo caso i ranghi con differenze nulle non vengono eliminati ma vengono distribuiti maniera simmetrica tra i ranghi positivi e negativi, eliminandone uno se il totale di ranghi nulli è dispari.

Per effettuare questa procedura il primo passaggio è trovare la somma dei ranghi positivi e negativi, tra questi il valore Wilcoxon T è il minore e calcolare la media (μ) e la deviazione standard (σ).

$$\mu = \frac{n(n+1)}{4}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}$$

Il T-value calcolato tramite le somme dei ranghi corrisponde ad un z-score pari a:

$$z = \frac{T - \mu}{\sigma}$$

che viene confrontato con z-critico pari a 1,96 per $\alpha = 0.05$. Se:

- z-value > z-critico si accetta H0.
- z-value < z-critico si rifiuta H0 e si accetta H1

Poiché, la tabella di Wilcoxon non fornisce valori di T-critico per campioni maggiori di 50 soggetti, si deve obbligatoriamente usare l'approssimazione normale; mentre per campioni compresi tra 20 e 50 si può far riferimento a entrambi i criteri di valutazione, sia T che z, poiché forniranno risultati analoghi.

4.RISULTATI

Con la presente tesi verranno indagati l'*Ecological validity* del modello virtuale e l'impatto dell'esposizione a elementi verdi sul comfort visivo degli utenti in ambiente virtuale.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione saranno di seguito analizzati in tre sottoparagrafi. In primo luogo, nel *paragrafo 4.1*, verranno riportate le informazioni demografiche e una panoramica generale dei dati acquisiti dai soggetti tramite il questionario pre-sperimentale. Successivamente, nel *paragrafo 4.2*, verrà effettuata la validazione del modello virtuale tramite l'analisi dei voti sul senso di presenza e immersività e dei disturbi legati all'uso del visore (*Ecological validity*). Infine, nel terzo sottoparagrafo (*paragrafo 4.3*), verranno esplorati gli effetti dei vari scenari visivi all'interno dell'ambiente virtuale sul comfort visivo percepito dagli utenti.

4.1 Descrizione del campione

Come esplicitato nel *paragrafo 3.2.3*, il campione preso in esame per la sperimentazione è composto da un totale di 41 soggetti.

Il campione è caratterizzato da un rapporto uomo-donna non perfettamente equilibrato, essendo il 46% di soggetti di sesso maschile e il restante 54% di sesso femminile.

Analizzando la distribuzione per fasce di età, si osserva inoltre che il 41% dei soggetti ha un'età compresa tra i 20 e i 25 anni (media =23.41), il 46% tra 26 e i 30 anni (media =27.47), il 5% tra i 31 e i 39 anni (media =34.50), il 2% tra i 40 e i 49 anni (media =42.00), il 2% tra i 50 e i 59 anni (media =55.00) ed infine il 2% ha una età compresa tra i 60 e 65 anni (media =61.00).

La maggior parte del campione è rappresentato da studenti universitari con diploma di scuola superiore di secondo grado (39%), seguito da laureati (54%), e infine una piccola porzione di soggetti ha dichiarato di possedere un livello di istruzione superiore alla laurea (7%) quale dottorato, master, o scuola di specializzazione.

Ai fini della sperimentazione è stato chiesto ai partecipanti di riportare eventuali difetti visivi, e nel caso di esplicitare l'eventuale uso di lenti correttive durante la prova. A tal

proposito il 37% dei soggetti ha riportato di non avere difetti visivi, mentre il 32% dichiara di essere miope o astigmatico.

I seguenti grafici (*Figura 23*) riportano la panoramica generale del campione partecipante.

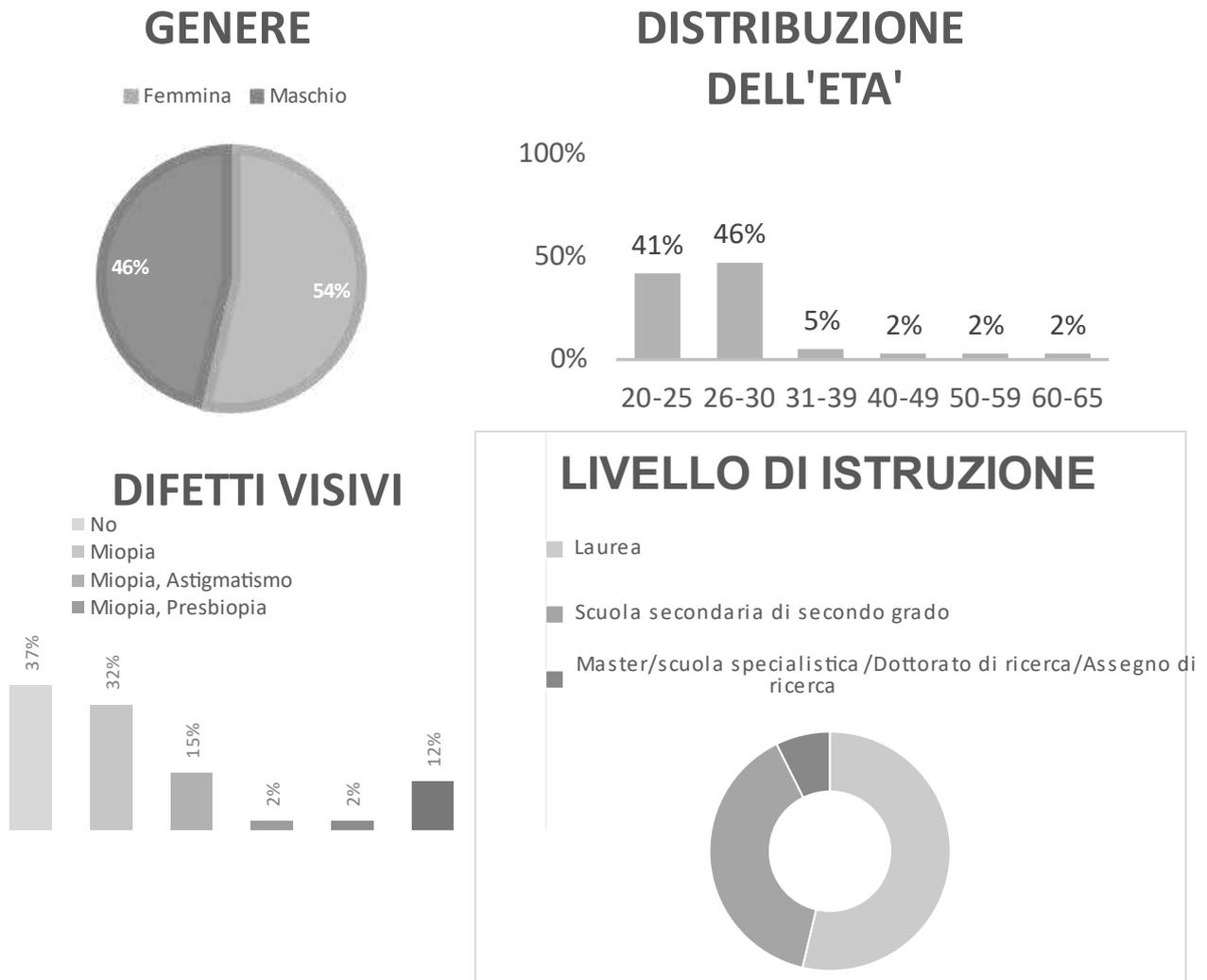


Figura 23

Tramite il questionario pre-sperimentale sono state raccolte anche informazioni riguardo abitudini o fattori che avrebbero potuto influenzare i risultati della prova. È stato quindi indagato se il soggetto avesse avuto esperienze precedenti con il visore per la realtà virtuale; ed è stato chiesto con quale frequenza il soggetto è solito guardare programmi televisivi e/o giocare ai videogiochi. Questi dati sono interessanti per valutare l'esperienza del soggetto con gli ambienti virtuali immersivi.

Dunque, è stato riscontrato che il 41% dei partecipanti aveva avuto già precedenti

esperienze di utilizzo della realtà virtuale.

La maggior parte dei partecipanti ha dichiarato di giocare raramente ai videogiochi (49%); mentre il 76% dei soggetti ha riportato di svolgere attività sedentarie tutti i giorni lavorativi.

Ultima domanda posta è stata relativa alla sensibilità alla luce. Le percentuali che descrivono il quesito offrono uno sguardo dettagliato sulla varietà di risposte di fronte a stimoli luminosi. La maggioranza, pari al 51%, è classificata come “sensibile”, indicando una reazione moderata e bilanciata alla luce ambientale. Tuttavia, il 7% ha dichiarato di essere “molto sensibile” alle variazioni luminose.

Un altro segmento significativo, costituito dal 29%, è classificato come “indifferente”, indicando una risposta neutra alla luce. Questa categoria potrebbe includere coloro che non sono eccessivamente influenzati dalla luminosità ambientale nella loro percezione o stato d’animo.

I seguenti grafici (Figura 24) riportano gli ulteriori dati utili all’analisi del campione visti precedentemente.



Figura 24

4.2 Ecological Validity del modello

Per indagare la capacità dell'IVE di rappresentare adeguatamente gli ambienti reali, nei seguenti sottoparagrafi l'*Ecological Validity* dell'ambiente virtuale creato per condurre lo studio verrà valutata tramite l'analisi dei voti del Senso di Presenza e Immersività (IPQ) e dei disturbi legati all'uso del visore (*Virtual Reality Sickness Questionnaire, VRSQ*).

4.2.1 Analisi del senso di presenza e analisi dei risultati dell'indagine di immersività

Per analizzare il livello di immersività nell'IVE, e quindi verificare se il modello possa essere ritenuto come adeguata rappresentazione della realtà e quindi come strumento efficace per valutare comfort e produttività, senza confronto con la sua controparte reale, sono stati esaminati i voti del questionario IPQ. Questa prima analisi è essenziale poiché se non è verificato che i soggetti siano stati adeguatamente immersi all'interno del modello non sarà possibile garantire l'attendibilità dei risultati, ad esempio, in termini di relazioni causa-effetto.

In particolare, sono stati analizzati i voti espressi dai partecipanti per ogni fattore indagato nell'IPQ riportato di seguito:

- Apprezzamento grafico (GA): l'apprezzamento della grafica del modello;
- Presenza spaziale (SP): si intende il senso di presenza nell'ambiente fisico;
- Coinvolgimento (INV): si intende il coinvolgimento all'interno del modello;
- Realismo sperimentato (REAL): si intende il senso di realtà.

In generale, più alti sono i valori dei quattro attributi, più i partecipanti si sono sentiti presenti e immersivi all'interno dell'ambiente virtuale, verificando così l'efficacia dello studio.

Nella *Tabella 7* si riportano le medie (η) e le deviazioni standard (σ) dei punteggi ottenuti

tramite i voti espressi da ogni soggetto relativi ai quattro fattori sondati:

	Domanda	Scala di riferimento	η (σ)
GA	<i>Ho apprezzato la grafica e le immagini del modello virtuale</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	6.05 (1.17)
SP	<i>Ho percepito lo SPAZIO AULA come un luogo realmente visitato piuttosto che come un'immagine</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	5.87 (1.21)
	<i>Durante la prova, mi sono sentito presente nello SPAZIO AULA</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	5.98 (1.06)
	<i>Ho percepito il modello virtuale dello SPAZIO AULA come immersivo ovvero come adeguata illusione della realtà</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	5.97 (1.12)
INV	<i>Durante la prova, non ero consapevole del mondo reale circostante</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	5.61 (1.48)
REAL	<i>Ho percepito gli oggetti dello SPAZIO AULA come proporzionalmente corretti (cioè, avevano circa la giusta dimensione e distanza in relazione a me e ad altri oggetti virtuali)</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	5.58 (1.13)
	<i>Ho avuto la sensazione di poter interagire con lo SPAZIO AULA (ad esempio per afferrare degli oggetti)</i>	1 =totalmente in disaccordo 7 = totalmente d'accordo	6.32 (0.93)
	<i>Quanto ti è sembrato realistico il modello virtuale dello SPAZIO AULA?</i>	1 = totalmente non reale 7 = totalmente reale	6.05 (0.80)

Tabella 7

I punteggi ottenuti dal presente studio sono stati confrontati con la letteratura esistente che si è occupata di applicare la tecnologia VR e l'IPQ per la ricerca sul comfort e sulla produttività. A questo scopo sono stati presi a riferimento un totale di sei studi precedenti [(Tawil et al., 2021; Abd-Alhamid et al., 2019; Hong et al., 2019b; Latini, Di Giuseppe, et al., 2023b; Yeom et al., 2020)]. Tuttavia, a seconda della sperimentazione e della volontà dei ricercatori, i fattori misurati con dati ordinali differiscono in termini di *scala Likert* a 5 o 7punti. Pertanto, le valutazioni medie sono state ridimensionate su una scala a 5 punti per consentirne il confronto, in quanto risulta più efficace passare da un test con più informazioni ad uno con meno.

La formula utilizzata è la seguente:

$$y_{5pt} = (x_{7pt} - 1) \cdot (4/6) + 1$$

La prima parte della formula $(x_{7pt} - 1)$ consente di regolare la scala per avere come unico polo 0. La moltiplicazione per $4/6$ (il valore massimo di una scala di 0-6 punti diviso per il

valore massimo di una scala di 0-4 punti) serve per allungare la scala. Infine, si deve aggiungere di nuovo 1 per regolare nuovamente la scala, avendo 1 come polo iniziale.

Tramite questo processo di *re-scaling* si altera la scala in modo tale possa essere direttamente confrontabile con le altre.

La **Tabella 8** riassume il confronto tra le medie dei quattro fattori dell'indagine IPQ, opportunamente scalate ove necessario:

		GS	SP	INV	REAL
Questo studio	7 pt.	6,05	5.94	5.61	5.82
	5 pt.	4.37	4.29	4,07	4,21
<i>Latini et al.</i> [48]	5 pt.	4,58	4,21	4,15	4,47
<i>Tawil et al.</i> [36]	5 pt.	3,93	3,44	3,27	2,68
<i>Hong et al.</i> [42]	7 pt.	4,98	4,58	4,35	3,59
	5 pt.	3,65	3,39	3,23	2,73
<i>Yeom et al.</i> [56]	5 pt.	-	4,24	4,11	3,54
<i>Abd-Alhamid et a</i> [58]	5 pt.	-	3.74	-	3.21
<i>Chimalothori et al.</i> [57]	5 pt.	-	3.68	-	3.75

Tabella 8

In generale, i risultati mostrano come i punteggi medi dell'IPQ del presente studio sono superiori al livello moderato, pari a 4 su una *scala Likert* a 5 punti, per tutti e quattro i fattori indagati. In particolare, l'apprezzamento grafico (GA = 4.37) presenta il valore più elevato, seguito dalla presenza spaziale (SP = 4.29). Inoltre, dai risultati si evince che i partecipanti si sono sentiti coinvolti (INV = 4.07) e dal realismo vissuto (REAL = 4.21) nell'ambiente.

Dal confronto emerge che i punteggi in *scala Likert* a 5 punti ottenuti dal presente studio sono leggermente inferiori allo studio condotto da (Latini, Di Giuseppe, et al., 2023) . Tuttavia, le differenze sono trascurabili (0.21 per GS, 0.08 per SP, 0.08 per INV e 0.26 per REAL), quindi si conclude che il modello virtuale ha permesso agli utenti di sperimentare un ottimo senso di presenza e immersività.

Si specifica che nello studio condotto da (Yeom et al., 2020) l'apprezzamento grafico non è stato indagato non essendo stata somministrata nessuna domanda a riguardo, per cui risulta mancante il punteggio di riferimento per il confronto del GS con tale studio. Allo

stesso modo (Abd-Alhamid et al., 2019) e (Chamilothori et al., 2019) hanno scelto di non indagare la grafica (GP) e il coinvolgimento (INV) all'interno del modello.

Di seguito (*Figura 25*) si riporta il grafico di confronto tra i punteggi IPQ, opportunamente scalati in *scala Likert* a 5, ottenuti dai vari studi precedentemente analizzati:

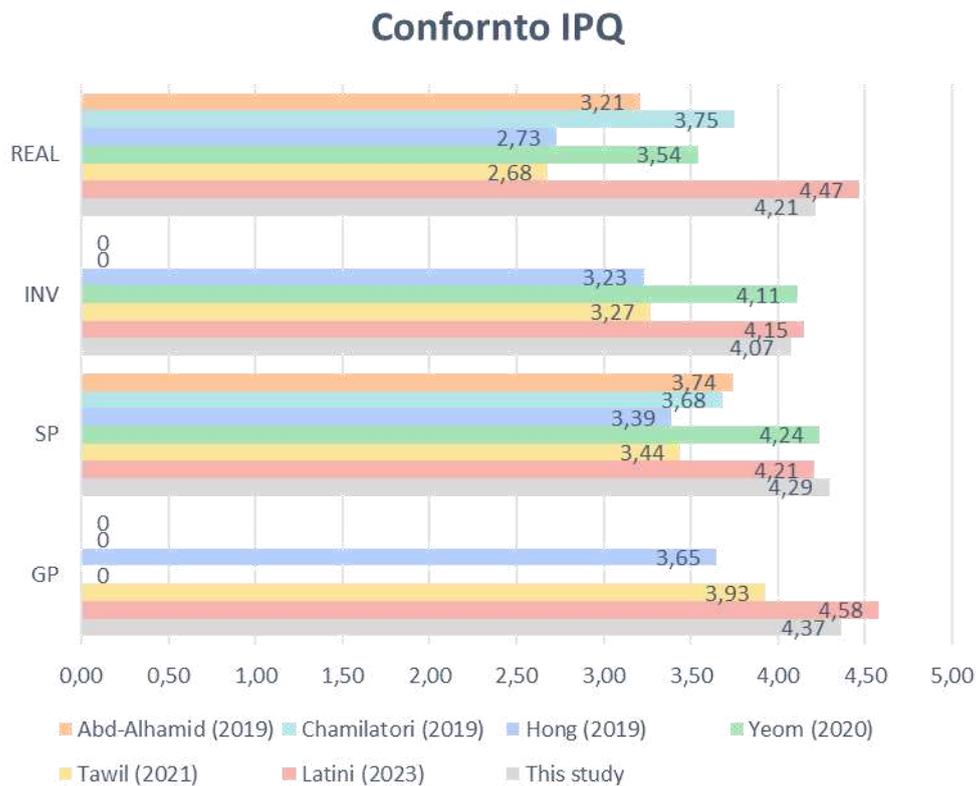


Figura 25

È stato elaborato anche un confronto tra i tre scenari per quanto riguarda i quesiti GS, SP e REAL, di quest'ultima è stata considerata solo la prima domanda. Le restanti domande relative al costrutto REAL e al quesito INV non sono state considerate nell'analisi comparativa. Questa omissione è dovuta al fatto che il quesito INV è stato posto solamente una volta, esclusivamente nell'ultimo dei tre scenari assegnati casualmente ai partecipanti, analogamente, le domande rimanenti sul costrutto REAL.

L'analisi dei dati relativi agli indicatori GP, SP e REAL 1 suggerisce che non ci siano differenze significative tra gli scenari considerati per quanto riguarda il realismo (REAL), la presenza spaziale (SP) e l'apprezzamento grafico (GP). Le differenze percentuali tra i

diversi scenari indicano una coerenza generale nelle valutazioni.

Per quanto riguarda l'indicatore GP, la differenza percentuale tra i diversi scenari è minima (5,5% tra gli scenari G e GL), suggerendo una sostanziale uniformità nelle valutazioni legate all'apprezzamento grafico tra i tre scenari testati.

Analogamente, per l'indicatore SP, le differenze percentuali sono contenute, la differenza più elevata risiede tra lo scenario B e quello GL con una percentuale del 6,6%, indicando una coerenza nelle valutazioni della presenza spaziale.

Infine, per l'indicatore REAL, le differenze percentuali (9,3% tra B e GL) confermano la tendenza generale di uniformità nelle valutazioni del realismo.

In sintesi, i dati analizzati indicano una coerenza e uniformità nelle valutazioni degli scenari considerati, suggerendo una relativa omogeneità nelle percezioni legate al realismo, alla presenza spaziale e all'apprezzamento grafico.

Di seguito (*Figura 26*) si riporta il grafico di confronto tra gli scenari, vengono analizzate le differenze

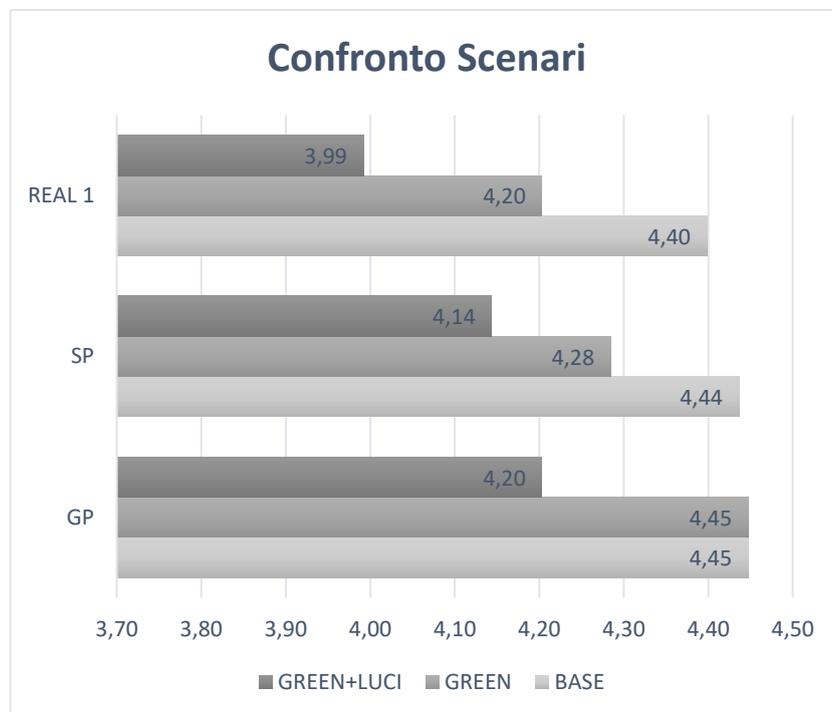


Figura 26

Le domande sul senso di presenza e immersività sono poi state analizzate statisticamente con il test Friedman, introdotto nel *paragrafo 3.6.1*.

Nell'analisi statistica condotta, è stato riscontrato che sia la variabile 'GS' che la variabile 'SP' non mostrano differenze significative, suggerendo una distribuzione simile tra i gruppi. Tuttavia, la variabile 'REAL' ha mostrato differenze significative, come indicato da un p-value inferiore a 0,05. Questo suggerisce che la distribuzione dei dati per 'REAL' differisce significativamente tra i gruppi.

Di seguito (Tabella 9) si riporta la tabella contenente i valori di p-value per le tre variabili considerate.

FRIEDMAN TEST			
	N	χ^2_r	P-value
GS	41	1,5488	0,46098
SP1	41	1,6220	0,44442
SP2	41	2,7871	0,24901
SP3	41	4,9146	0,08566
REAL	41	9,5976	0,00824

Tabella 9

Questo risultato è oggetto di ulteriori analisi per comprendere meglio la natura di tali differenze e le relazioni tra le variabili coinvolte.

L'analisi post-hoc con il test di Wilcoxon è stata condotta per determinare la significatività tra le categorie B, G e GL. Questa analisi ha permesso di attribuire i livelli di significatività, che sono stati poi rappresentati graficamente tramite un boxplot.

POST HOC_WILCOXON						
	CONFRONTO		χ^2_r - Statistics	P-value	P- valueAdj	P- value_significatività
REAL	B	G	929.5	0.380	1.000	ns
	B	GL	1090.5	0.014	0.043	*
	G	GL	1002.0	0.111	0.333	ns

Tabella 10

Da questo test emerge che il gruppo B mostra differenze significative rispetto al gruppo GL, mentre il confronto tra il gruppo G e GL non è significativo.

Questi risultati vengono mostrati graficamente nei boxplot, dove la differenza maggiore si verifica tra gli scenari B e GL (*), indicando come la presenza della parete verde e della luce forte abbiano influito negativamente sulla percezione del realismo nello scenario.

Di seguito (*Figura 27*) si riporta il boxplot della domanda "REAL".

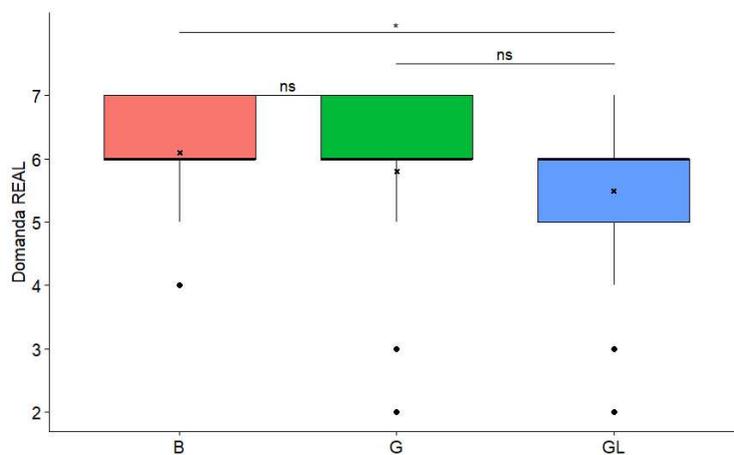


Figura 27

In conclusione, l'analisi statistica ha rivelato che non ci sono differenze significative tra i vari scenari per quanto riguarda la presenza spaziale e l'apprezzamento grafico. Tuttavia, la variabile 'REAL' ha mostrato differenze significative, indicando una variazione tra gli scenari. Questi risultati, insieme all'analisi qualitativa, indicano un alto livello di presenza e immersività per gli utenti nell'ambiente ad uso aula universitaria.

4.2.2 Analisi del Virtual Reality Sickness Questionnaire

L'altro aspetto di cui si è tenuto conto per valutare l'*Ecological validity* è la *Cybersickness*, ovvero l'insieme di disturbi relativi alla cinetosi che si verifica quando non c'è coerenza tra ciò che vediamo e le percezioni provenienti dagli altri sensi. È stata quindi condotta una analisi qualitativa basata sui voti assegnati dai soggetti ai vari sintomi nel *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ).

Osservando gli istogrammi (*Figura 28*) si nota che la maggior parte dei soggetti (94%) ha sofferto di vertigini durante la prova, infatti, questa è stata svolta in condizioni statiche e quindi senza differenza tra movimento percepito e sperimentato. Per quanto riguarda i disturbi quali disagio generale, stanchezza e mal di testa, gli utenti hanno assegnato maggiormente (tra il 70% e l'85%) voti pari a "0 = per niente" e "1 = leggermente". Per quanto riguarda i restanti sintomi, il 19% dei soggetti ha riportato almeno un moderato affaticamento degli occhi (da "2 = moderatamente" a "3 = molto"), mentre una percentuale più elevata di soggetti (21%) ha riportato almeno una moderata difficoltà di messa a fuoco (da "2 = moderatamente" a "3 = molto") causata dalle immagini leggermente sfocate proiettate dal visore.

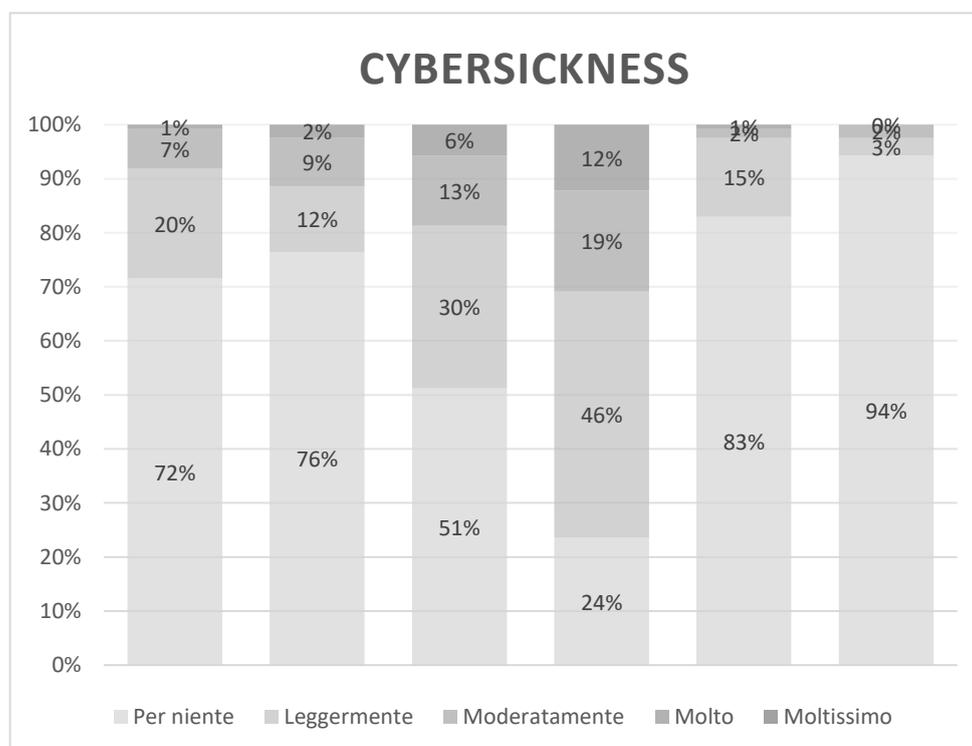


Figura 28

4.3 Valutazione dell’impatto degli scenari sul comfort visivo

Per la valutazione dell’influenza dei tre scenari sul *comfort visivo* percepito dai soggetti è stata prima condotta un'analisi qualitativa dell'andamento complessivo dei punteggi in percentuale espressi dai partecipanti, e poi ne è stata effettuata un'analisi statistica per supportare le ipotesi.

I punteggi dei questionari sul comfort sono riferibili a una *scala Likert* a 7 punti.

Di seguito vengono riportati e analizzati i grafici che mostrano le percentuali dei voti assegnati alle 11 domande sul *comfort visivo* per ognuno dei tre scenari (B, G, GL), con il fine di valutarne il *comfort* percepito.

Per verificare se effettivamente vi è una differenza significativa tra i voti manifestati, è stata condotta un’analisi statistica tramite test di Friedman, il quale è un test non parametrico che viene utilizzato per valori non numerici, effettuata all’interno dell’ambiente software RStudio, comparando le seguenti situazioni:

- a) Confronto scenario visivo “Base” (B) con “Green” (G);
- b) Confronto scenario visivo “Base” (B) con “Green+Luci” (GL);
- c) Confronto scenario visivo “Green” (G) con “Green+Luci” (GL).

L’analisi post-hoc, invece, con il test di Wilcoxon è stata condotta per determinare la significatività tra le categorie B, G e GL. Questa analisi ha permesso di attribuire i livelli di significatività, che sono stati poi rappresentati graficamente tramite un boxplot.

Di seguito si riportano le osservazioni sui confronti tra gli scenari.

Nella prima domanda (*Come giudichi il colore della luce artificiale*), in tutti e tre gli scenari, le persone hanno generalmente valutato il colore della luce come freddo. Dopo aver condotto l’analisi statistica sulla domanda, i risultati (p-value > 0,353) hanno mostrato che non esistono differenze significative tra gli scenari considerati. Questo suggerisce che, indipendentemente dallo scenario, le percezioni degli utenti sul colore della luce artificiale rimangono coerenti con la condizione reale dei neon. L’ambiente VR ha permesso agli utenti di percepire il reale colore della luce.

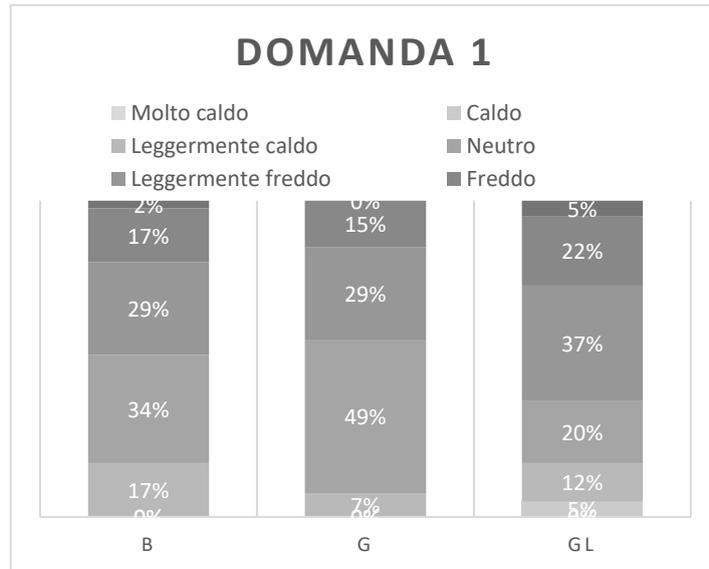


Figura 29

Nella seconda domanda (*Come percepisci l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione*), lo scenario GL è stato percepito come l'ambiente più luminoso, con una percentuale del 76%.

Dall'analisi statistica condotta sulla domanda, è emerso che esiste una differenza significativa ($p\text{-value} = 0,004$) tra gli scenari B e GL. Questo suggerisce che la percezione dell'illuminazione da parte degli utenti varia notevolmente tra questi due scenari. In particolare, lo scenario GL è percepito come il più luminoso rispetto agli altri scenari, come indicato dal valore mediano più basso nel box plot. Inoltre, l'analisi ha rivelato che gli scenari B e G sono equivalenti poiché hanno lo stesso livello di illuminazione, mentre lo scenario GL è differente da entrambi ed è valutato come quello più luminoso. Questo indica che la presenza della parete verde e della luce forte ha un effetto positivo sulla percezione dello scenario da parte degli utenti.

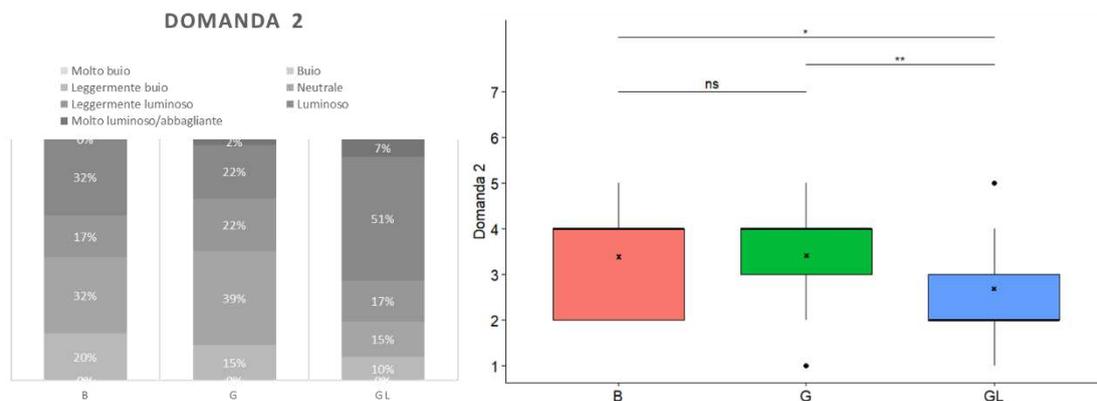


Figura 30

Per quanto riguarda la domanda “Come ti senti in questo ambiente a livello visivo”, i risultati mostrano che, in generale, le persone si sono sentite a loro agio in tutti e tre gli scenari. In particolare, lo scenario G è stato valutato come il più confortevole, con un’percentuale dell’85%, mentre il 39% degli utenti ha valutato lo scenario GL come quello meno confortevole dichiarandosi a disagio poiché la massima illuminazione era un risultato atteso. Nonostante queste differenze nelle percentuali di comfort riportate, l’analisi statistica non ha rilevato differenze significative tra i vari scenari, indicando lo scenario GL è quello meno confortevole.

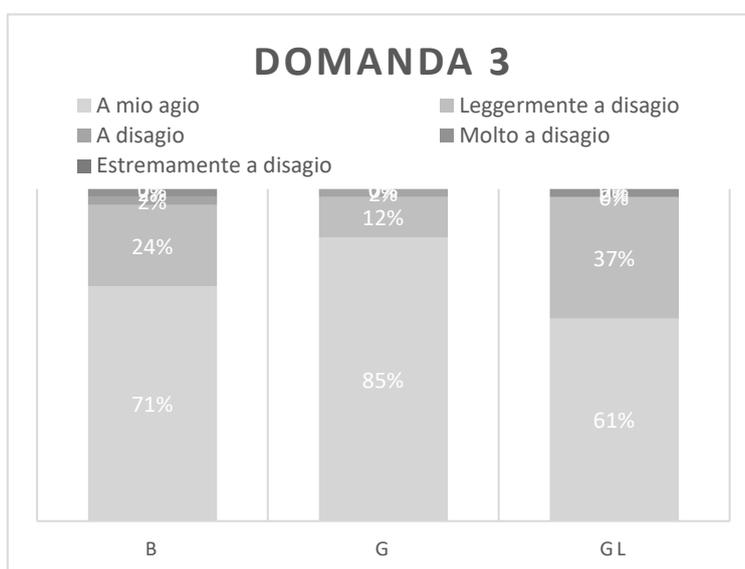


Figura 31

Nella risposta alla quarta domanda, “In questo momento preferiresti che il colore della luce artificiale fosse”, si è osservato che, in generale, i partecipanti avrebbero preferito un colore di luce più caldo in tutti e tre gli scenari. Questo risultato è coerente con la tendenza osservata nella Valutazione Soggettiva della Visione (VSV) della prima domanda. Inoltre, l’analisi statistica non ha rilevato differenze significative tra gli scenari in termini di preferenze per il colore della luce, indicando una compattezza nelle risposte dei partecipanti indipendentemente dallo scenario.

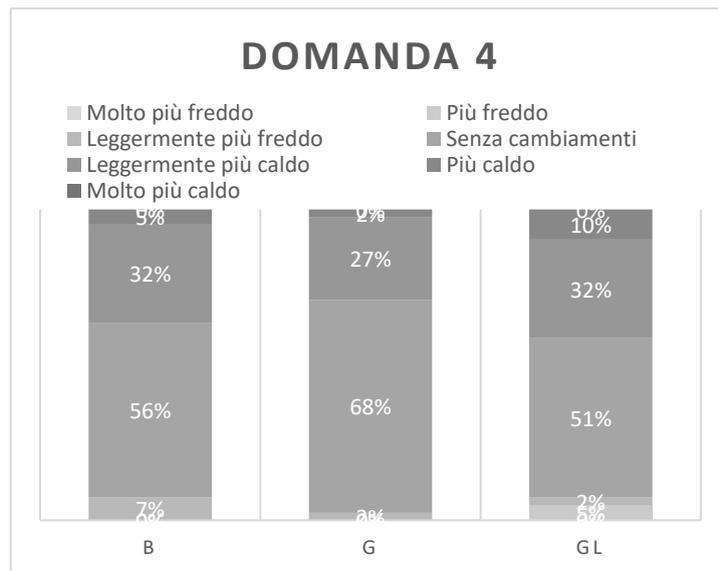


Figura 32

Nella risposta alla quinta domanda, (Come preferiresti che fosse l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione?), è emerso che gli utenti, per gli scenari B e G gli utenti preferirebbero non modificare l'attuale condizione di illuminazione, mentre per lo scenario GL, il 29% degli utenti vorrebbe un ambiente leggermente più buio. Dall'analisi statistica è emerso che esiste una differenza significativa (p-value = 0,015) sia per confronto tra i gruppi B e GL che tra i gruppi G e GL.

L'analisi del box plot per la domanda 5 mostra che non ci sono differenze tra gli scenari B e G. Tuttavia, per lo scenario GL, che è stato valutato come il più luminoso, le persone hanno votato per leggermente più buio. Per B e G, valutati come neutri, la preferenza neutra è stata confermata.

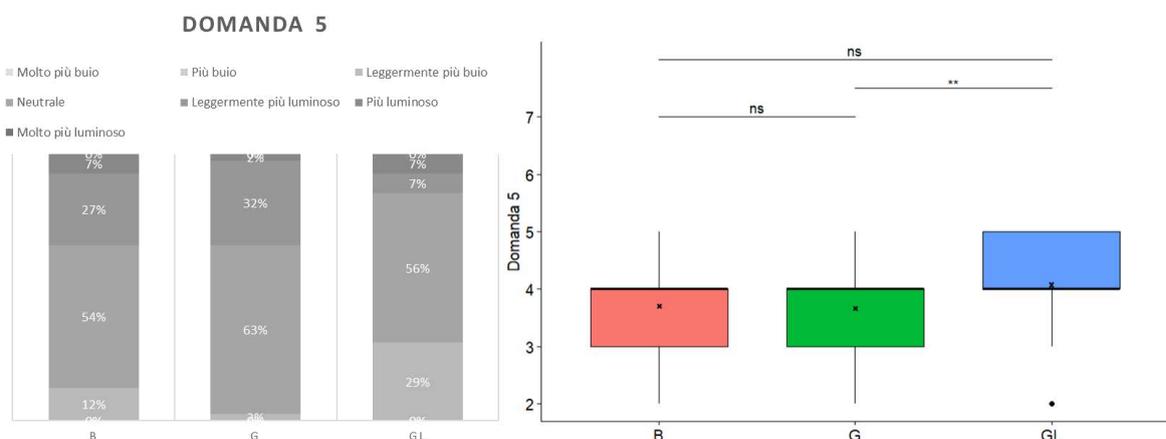


Figura 33

Nella risposta alla sesta domanda, (*La luce è distribuita uniformemente*), è emerso che la maggior parte degli utenti, in tutti e tre gli scenari, ritiene che la luce sia distribuita uniformemente, con percentuali che variano tra il 61% e il 73%. Di queste percentuali il 20%, nei tre scenari, dichiara di essere totalmente d'accordo con la distribuzione della luce. In particolare, la condizione G presentava un'illuminazione più uniforme. Questo risultato indica una buona modellazione dell'IVE che ha permesso ai partecipanti di avere un'impressione più realistica dell'ambiente, come da modello Relux, dove i LUX sono uniformi.

Nonostante queste differenze nelle percezioni individuali, l'analisi statistica non ha rilevato differenze significative tra gli scenari. Questo implica che, indipendentemente dallo scenario, la distribuzione della luce non ha avuto un impatto significativo sulla soddisfazione generale degli utenti. In altre parole, gli utenti si sono generalmente trovati a proprio agio con la distribuzione della luce in ciascuno scenario.

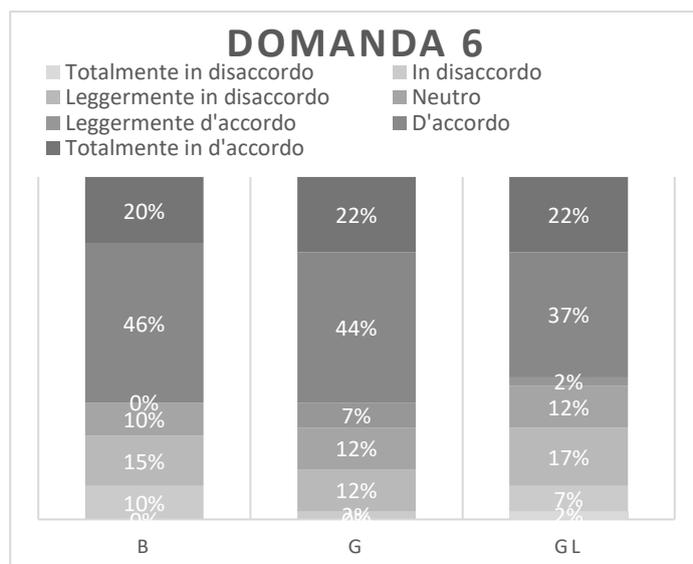


Figura 34

Nella settima domanda (*La condizione di illuminazione mi causa affaticamento agli occhi*), si nota una leggera differenza (32%) nello scenario GL, dove gli utenti hanno dichiarato modesto affaticamento agli occhi.

L'analisi statistica ha rivelato che non esistono differenze significative tra gli scenari in termini di affaticamento oculare. Questo suggerisce che, indipendentemente dallo scenario, le condizioni di illuminazione non causano affaticamento agli occhi per la maggior parte degli utenti. Questo è un risultato importante, poiché l'affaticamento oculare può influenzare negativamente l'esperienza dell'utente in un ambiente virtuale.

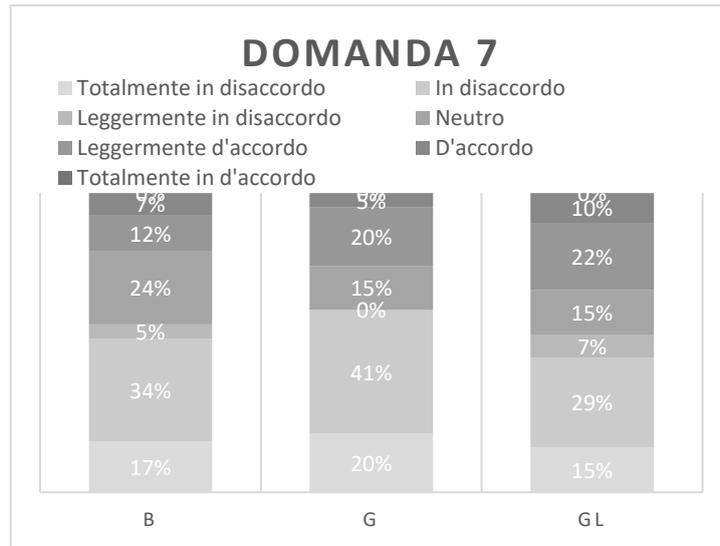


Figura 35

Nella risposta alla domanda 8 (*La condizione dell'illuminazione mi causa abbagliamento*), è emerso che nello scenario GL, un numero maggiore di persone (20% in più) ha ritenuto che la condizione di illuminazione causasse abbagliamento rispetto agli altri scenari.

Dall'analisi statistica è emerso che esiste una differenza significativa ($p\text{-value} = 0,006$) sia nel confronto tra gli scenari B e GL che tra G e GL, indicando che entrambi i gruppi differiscono notevolmente dal gruppo GL in termini di percezione dell'abbagliamento.

Inoltre, l'analisi del box plot, mostra che lo scenario GL ha il valore mediano più alto, suggerendo che gli utenti hanno percepito questo scenario come il più abbagliante. La differenza più marcata si verifica tra lo scenario B e GL, così come tra lo scenario G e GL, indicando che la presenza di una luce più forte in questi scenari ha influenzato la percezione dell'abbagliamento da parte degli utenti.

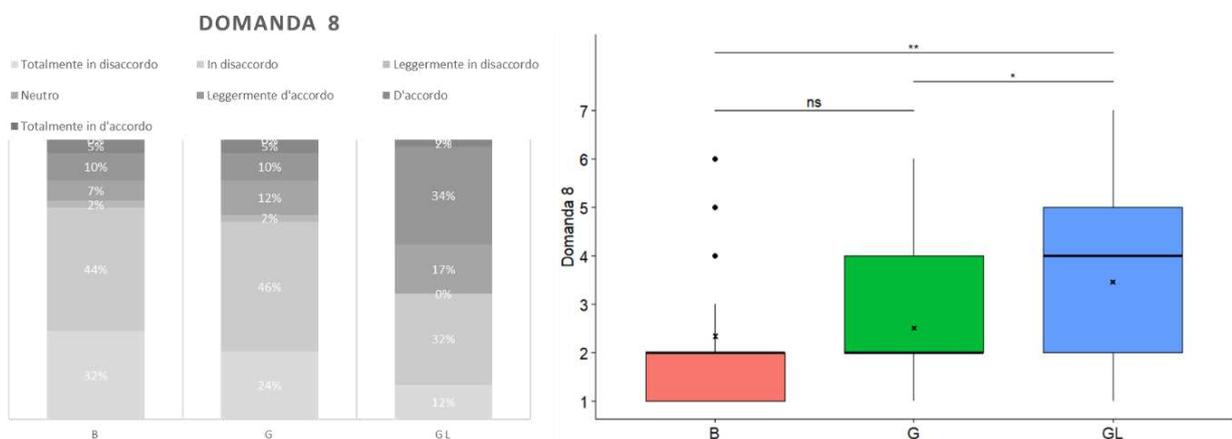


Figura 36

Nella risposta alla domanda 9 (*L'illuminazione dell'ambiente rende l'ufficio realistico?*), è emerso che nello scenario GL, un numero maggiore di partecipanti ha ritenuto che la condizione di illuminazione rendesse l'ambiente meno realistico. Questo è evidenziato da un aumento del 27% nei voti in disaccordo rispetto agli altri scenari.

Dall'analisi statistica è emerso che esiste una differenza significativa ($p\text{-value} = 0,002$) sia nel confronto tra i gruppi B e GL che tra i gruppi G e GL. Questo indica che sia il gruppo B che il gruppo G differiscono notevolmente dal gruppo GL in termini di percezione del realismo dell'illuminazione.

Inoltre, l'analisi del box plot, ha confermato i risultati precedentemente esposti, mostrando che lo scenario GL ha il valore mediano più basso, confermando quindi che gli utenti abbiano percepito l'ambiente come quello meno realistico.

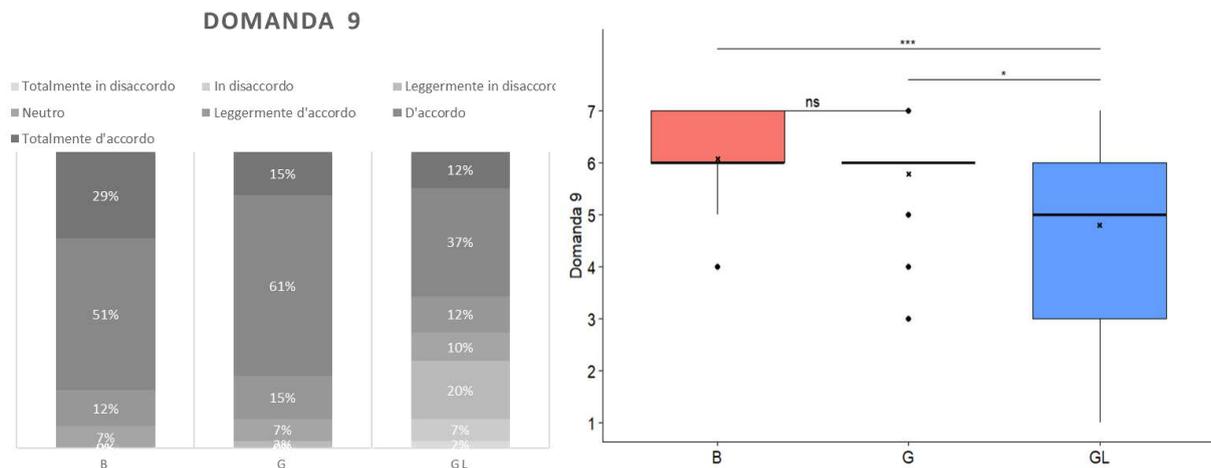


Figura 37

Nella decima domanda (*L'illuminazione dell'ambiente sarebbe gradevole per lavorare*) le persone hanno trovato l'illuminazione gradevole in tutti gli scenari, dichiarando tra il 17% e il 22% di essere totalmente d'accordo. Lo scenario G ha ottenuto la valutazione più alta, con l'95% di gradimento, mentre lo scenario GL ha ottenuto il 24% dei voti per leggermente in disaccordo e totalmente in disaccordo. Nonostante ciò, l'analisi statistica non ha evidenziato differenze significative tra gli scenari. Quindi dall'analisi è emerso che lo scenario G è lo scenario migliore per lavorare, mentre GL per alcuni utenti è risultato quello meno gradevole.

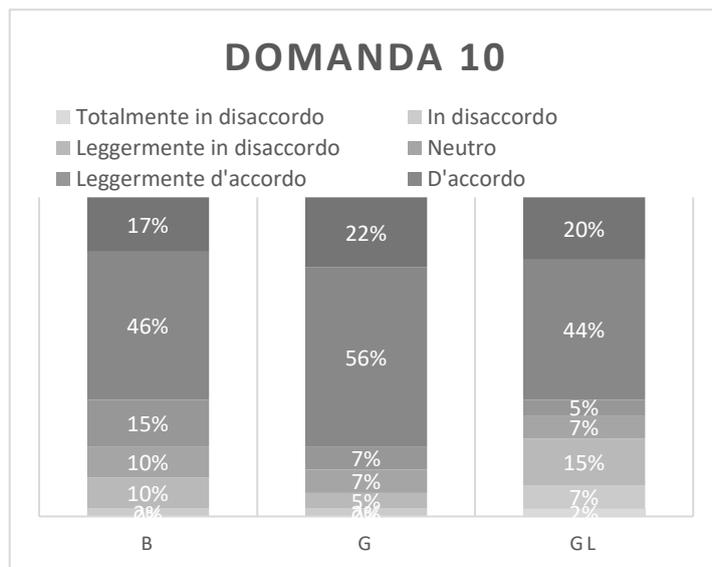


Figura 38

Nella undicesima domanda riguardante la configurazione dell'ambiente di lavoro, le persone hanno generalmente trovato la configurazione gradevole in tutti gli scenari. Lo scenario G ha ottenuto la valutazione più alta, con l'86% di gradimento. Al contrario, lo scenario B, senza elementi verdi, è stato il meno apprezzato, con un votazione inferiore del 15% rispetto allo scenario G. Tuttavia, l'analisi statistica non ha evidenziato differenze significative tra gli scenari.

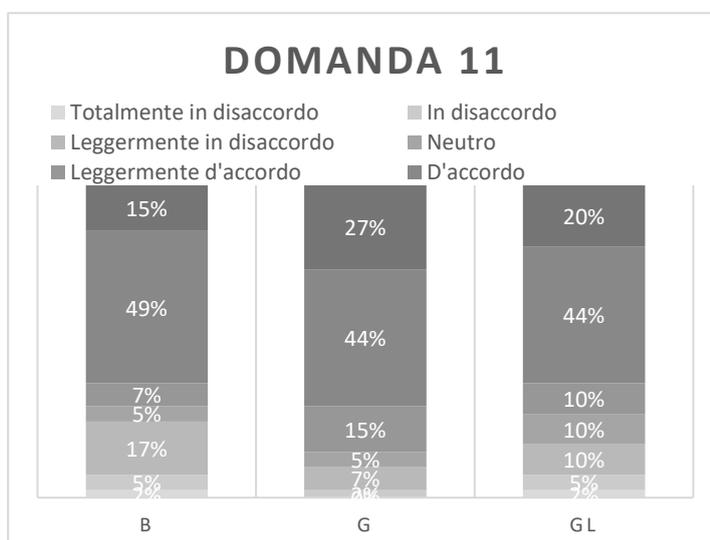


Figura 39

In sintesi, si riportano le tabelle (Tabella 11 e Tabella 12) dell'analisi statistica con il test Friedman, del post hoc con il test Wilcoxon condotti su tutte le domande, in rosso vengono indicate le domande con differenze significative tra gli scenari.

FRIEDMAN TEST			
	N	χ^2_r	P-value
Q1	41	2,0854	0,353
Q2	41	11,2317	0,004
Q3	41	3,2683	0,195
Q4	41	0,6341	0,728
Q5	41	8,4268	0,015
Q6	41	1,3537	0,508
Q7	41	2,2317	0,328
Q8	41	10,3537	0,006
Q9	41	12,6341	0,002
Q10	41	2,0854	0,353
Q11	41	3,1585	0,206

Tabella 11

POST HOC_WILCOXON						
	CONFRONTO		χ^2_r - Statistics	P-value	P-valueAdj	P-value_significatività
Q2	B	G	828.0	0.908	1.000	ns
	B	GL	1122.0	0.006	0.019	*
	G	GL	1148.5	0.003	0.009	**
Q5	B	G	880.5	0.677	1.000	ns
	B	GL	614.0	0.021	0.062	ns
	G	GL	550.0	0.002	0.007	**
Q8	B	G	771	0.496	1.000	ns
	B	GL	529	0.003	0.008	**
	G	GL	576	0.011	0.032	*
Q9	B	G	1002.0	0.09700	0.29100	ns
	B	GL	1215.0	0.00026	0.00078	***
	G	GL	1104.5	0.00900	0.02700	*

Tabella 12

In sintesi, i risultati di questo studio hanno messo in evidenza il ruolo fondamentale che l'illuminazione e la disposizione dell'ambiente di lavoro giocano nel determinare la percezione e il comfort degli utenti. Nonostante alcune differenze nelle preferenze individuali, come la predilezione per lo scenario G e una minore predilezione per lo scenario B, tutti gli scenari sono stati generalmente considerati adeguati a lavorare. Questo indica che, indipendentemente dallo scenario, sia l'illuminazione che la disposizione dell'ambiente sono elementi chiave per creare un ambiente di lavoro

confortevole.

Inoltre, l'analisi ha rivelato che non esistono differenze significative tra gli scenari in termini di affaticamento oculare, indicando che le condizioni di illuminazione non causano affaticamento agli occhi per la maggior parte degli utenti. Questo è un risultato importante, poiché l'affaticamento oculare può influenzare negativamente l'esperienza dell'utente in un ambiente virtuale.

Tuttavia, è emerso che la presenza di una luce più forte in alcuni scenari ha influenzato la percezione dell'abbagliamento e del realismo dell'ambiente da parte degli utenti. Questo indica che l'intensità della luce è un fattore importante da considerare nella progettazione di un ambiente di lavoro.

In conclusione, questa ricerca sottolinea l'importanza di considerare sia l'illuminazione che la disposizione dell'ambiente nella progettazione di spazi di lavoro confortevoli e produttivi.

5. CONCLUSIONE

L'obiettivo della sperimentazione, è quello di valutare la percezione visiva e, di conseguenza, il comfort degli utenti in relazione all'impatto dei vari scenari immersivi.

I dati raccolti sono stati analizzati in relazione a due obiettivi: *Ecological Validity* e la valutazione dell'influenza dei tre scenari sul *comfort visivo* percepito dai soggetti.

In particolare, è stata indagata la percezione visiva degli utenti, sperimentando le variabili visive per un'aula universitaria. I vantaggi dell'uso di ambienti virtuali per queste applicazioni sono: i costi ridotti e l'elevata ripetibilità e velocità di esecuzione, nonché la raccolta di dati complessi in un ambiente che consente un controllo facile delle variabili desiderate.

Le variabili sperimentali hanno portato a modellare tre diversi scenari visivi virtuali (B – scenario base, senza utilizzo di elementi verdi; G – scenario con elementi verdi e luce standard; GL - scenario con pareti verdi ed adeguata illuminazione).

Per studiare l'obiettivo di ricerca è stata organizzata un'attività sperimentale composta da una sessione di prova in ambiente virtuale immersivo caratterizzata da tre differenti scenari visivi. Un totale di 41 partecipanti è stato reclutato per eseguire la sessione di prova, sperimentando i tre scenari visivi, i quali sono stati somministrati in maniera casuale, realizzando così uno studio *repeated measure design*. Affinché non si incorresse nella manifestazione dei sintomi legati alla cinetosi, si è stabilito un tempo di esposizione all'IVE limitato, concludendo la prova in un massimo di 25/30 minuti.

La fase operativa è stata preceduta dalla compilazione di un pre-questionario, per raccogliere le generalità dei soggetti, frequenza di attività sedentarie, esperienze pregresse con il visore per VR ed infine si è posta l'attenzione sui problemi visivi. Durante la fase operativa i soggetti hanno completato un questionario di comfort visivo con domande specifiche sul colore della luce artificiale, la percezione ambientale dell'illuminazione, le sensazioni visive nell'ambiente ed infine le preferenze luminose e di ambientazione.

Nella fase post sperimentale, invece, gli utenti sono stati sottoposti a questionari sulla cinetosi e sul senso di presenza e immersività. Tutte le domande poste sono state integrate nel modello così da garantire un'esperienza completamente immersiva

all'utente, evitando qualsiasi interruzione che potesse influenzare la presenza nel contesto virtuale. Inoltre, la VR ha consentito di ottenere una raccolta dati immediata e precisa.

Per quanto riguarda lo studio dell'*Ecological Validity* grazie al confronto con precedenti studi simili, dei quattro attributi (apprezzamento grafico (GA), presenza spaziale (SP), coinvolgimento (INV) e realismo sperimentato (REAL)), è stato possibile rilevare che l'IVE ha permesso agli utenti di avere un buon livello di presenza e immersività, dato che sono stati raggiunti punteggi di 4 su una scala di 5 punti per tutti gli attributi.

Dall'analisi statistica è emerso che la presenza della parete verde e di una forte illuminazione hanno avuto un impatto negativo sulla percezione dello scenario.

Inoltre, l'analisi condotta con il questionario sulla Cybersickness (VRSQ) non ha rivelato nessun disturbo elevato, ad eccezione di una moderata difficoltà di messa a fuoco, riportata dal 21% dei soggetti, causata dalle immagini leggermente sfocate proiettate dal visore, che hanno portato anche a un moderato affaticamento degli occhi nell'19% dei soggetti. Tuttavia, l'analisi della letteratura ha rilevato la stessa tendenza a sviluppare questi sintomi. Pertanto, tramite le analisi delle risposte date nell'IPQ e nel VRSQ, si può affermare la validità ecologica del modello virtuale creato.

In relazione al secondo obiettivo per valutare l'effetto degli scenari sulla percezione visiva degli utenti, è stata condotta l'analisi statistica sui voti di comfort, per individuare differenze nei giudizi forniti ai soggetti.

Per l'indagine del comfort visivo sono stati analizzati i dati ottenuti dal post-questionario, somministrato durante la prova in IVE. I risultati ottenuti hanno evidenziato come lo scenario G è stato valutato come quello più confortevole con il 95% di gradimento, ottenendo anche la valutazione più alta per il comfort visivo ed apprezzamento maggiore per la distribuzione della luce. Mentre per lo scenario GL, il quale è stato valutato come il più luminoso (76%) e quindi lo scenario che ha riportato il maggior disagio (39%) a causa della massima illuminazione che ha portato ad un affaticamento agli occhi ed abbagliamento. Infine, è emerso che in questo scenario molti utenti hanno ritenuto che la condizione di illuminazione rendesse l'ambiente meno realistico.

I quesiti sono stati successivamente studiati tramite l'analisi statistica, la quale ha indicato come l'illuminazione e la presenza di elementi come la parete verde, giocano un ruolo chiave nella percezione complessiva degli utenti rispetto agli scenari esaminati.

In generale, nonostante alcune differenze nelle preferenze individuali, è emerso che la maggior parte degli utenti, in tutti e tre gli scenari, ritenessero che la luce fosse distribuita uniformemente ed è emerso che la presenza di una luce più forte in alcuni scenari influenzasse la percezione dell'abbagliamento e del realismo dell'ambiente da parte degli utenti. Questo indica che l'intensità della luce è un fattore importante da considerare nella progettazione di un ambiente di studio.

Nonostante i vantaggi dell'esperimento con la realtà virtuale, vi sono anche dei limiti, ad esempio il campione di soggetti potrebbe non essere rappresentativo di tutte le popolazioni, limitando così la possibilità di generalizzare i risultati.

Tuttavia, nella sperimentazione svolta in questa tesi, la VR si è rivelata uno strumento efficace per la valutazione del comfort visivo nei diversi scenari di prova, permettendo di valutare la percezione visiva dell'utente a seconda dello scenario, ottenendo un elevato senso di presenza e immersività grazie alla precisione della modellazione.

Nella ricerca per la tesi, la letteratura consultata e i risultati ottenuti, consentono di individuare diverse prospettive promettenti per futuri studi.

Un'area potrebbe essere l'esplorazione di scenari immersivi più diversificati per comprendere meglio come vari elementi, come l'illuminazione e la presenza di specifici oggetti o colori, influenzino la percezione e il comfort dell'utente. Infine, sarebbe interessante esaminare come queste scoperte possano essere applicate per migliorare la progettazione di ambienti VR, con l'obiettivo di massimizzare il comfort dell'utente e minimizzare gli effetti indesiderati come la cinetosi.

6. BIBLIOGRAFIA

- Abd-Alhamid, F., Kent, M., Bennett, C., Calautit, J., & Wu, Y. (2019). Developing an Innovative Method for Visual Perception Evaluation in a Physical-Based Virtual Environment. *Building and Environment*, 162(June), 106278. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106278>
- Basurto, C., Papinutto, M., Colombo, M., Boghetti, R., Reutter, K., Nembrini, J., & Kämpf, J. H. (2022). Integrating daylight with general and task lighting: A longitudinal in-the-wild study in individual and open space working areas. *Solar Energy Advances*, 2(October). <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100027>
- Bellazzi, A., Bellia, L., Chinazzo, G., Corbisiero, F., D'Agostino, P., Devitofrancesco, A., Fragliasso, F., Ghellere, M., Megale, V., & Salamone, F. (2022). Virtual reality for assessing visual quality and lighting perception: A systematic review. *Building and Environment*, 209(August 2021), 108674. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108674>
- Borisuit, A., Linhart, F., Scartezzini, J. L., & Münch, M. (2015). Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood. *Lighting Research and Technology*, 47(2), 192–209. <https://doi.org/10.1177/1477153514531518>
- Chamilothori, K., Wienold, J., & Andersen, M. (2019). Adequacy of Immersive Virtual Reality for the Perception of Daylit Spaces: Comparison of Real and Virtual Environments. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 15(2–3), 203–226. <https://doi.org/10.1080/15502724.2017.1404918>
- De Korte, E. M., Spiekman, M., Hoes-van Oeffelen, L., van der Zande, B., Vissenberg, G., Huiskes, G., & Kuijt-Evers, L. F. M. (2015). Personal environmental control: Effects of pre-set conditions for heating and lighting on personal settings, task performance and comfort experience. *Building and Environment*, 86, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.002>
- Deng, M., Wang, X., & Menassa, C. C. (2021). Measurement and prediction of work engagement under different indoor lighting conditions using physiological sensing. *Building and Environment*, 203(June), 108098. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108098>
- Fakhari, M., Fayaz, R., & Asadi, S. (2021). Lighting preferences in office spaces concerning the indoor thermal environment. *Frontiers of Architectural Research*, 10(3), 639–651. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.03.003>
- Fathy, F., Mansour, Y., Sabry, H., Refat, M., & Wagdy, A. (2023). Virtual reality and machine learning for predicting visual attention in a daylit exhibition space: A proof of concept. *Ain Shams Engineering Journal*, xxx, 102098. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102098>
- Goto, T., Toftum, J., De Dear, R., & Fanger, P. O. (2006). Thermal sensation and thermophysiological responses to metabolic step-changes. *International Journal of Biometeorology*, 50(5), 323–332. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0016-5>
- Gou, Z., Lau, S. S. Y., & Ye, H. (2014). Visual alliesthesia: The gap between comfortable and stimulating illuminance settings. *Building and Environment*, 82, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.001>
- Hawes, B. K., Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., Sullivan, J. M., & Aall, C. D. (2012). Effects of four workplace lighting technologies on perception, cognition and affective state. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(1), 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.09.004>
- Hendrix, C. M. (1994). Exploratory Studies on the Sense of Presence in Virtual Environments as a Function of Visual and Auditory Display Parameters. *University of Washington*.
- Hoffmann, G., Gufler, V., Griesmacher, A., Bartenbach, C., Canazei, M., Staggl, S., & Schobersberger, W. (2008). Effects of variable lighting intensities and colour temperatures on sulphatoxymelatonin and subjective mood in an experimental office workplace. *Applied Ergonomics*, 39(6), 719–728. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2007.11.005>
- Hong, T., Lee, M., Yeom, S., & Jeong, K. (2019a). Occupant responses on satisfaction with window size in

- physical and virtual built environments. *Building and Environment*, 166(April).
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106409>
- Hong, T., Lee, M., Yeom, S., & Jeong, K. (2019b). Occupant responses on satisfaction with window size in physical and virtual built environments. *Building and Environment*, 166, 106409.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106409>
- Jang, Seoyeon; Baik, Yong-Kyu ; Kim, S. (1862). *Analyzing the Effects of Illuminance Variations on Visual Perception for User-Friendly Dimming Controls in Office Space*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4474169>
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human Computer Studies*, 66(9), 641–661. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.04.004>
- Kim, H. K., Park, J., Choi, Y., & Choe, M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 69(October 2017), 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>
- Kim, S. Y., & Kim, J. J. (2007). Influence of light fluctuation on occupant visual perception. *Building and Environment*, 42(8), 2888–2899. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.033>
- Kong, Z., Liu, Q., Li, X., Hou, K., & Xing, Q. (2022). Indoor lighting effects on subjective impressions and mood states: A critical review. *Building and Environment*, 224(2), 109591.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109591>
- Korsavi, S. S., Jones, R. V., & Fuertes, A. (2022). Factors influencing the state of blinds and lights in primary schools: Behavioural models and opportunities to improve children’s visual environment. *Journal of Building Engineering*, 61(September), 105303. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105303>
- Kwong, Q. J. (2020). Light level, visual comfort and lighting energy savings potential in a green-certified high-rise building. *Journal of Building Engineering*, 29(October 2019), 101198.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101198>
- Latini, A., Di Giuseppe, E., & D’Orazio, M. (2023a). Immersive virtual vs real office environments: A validation study for productivity, comfort and behavioural research. *Building and Environment*, 109996.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.109996>
- Latini, A., Di Giuseppe, E., & D’Orazio, M. (2023b). Immersive virtual vs real office environments: A validation study for productivity, comfort and behavioural research. *Building and Environment*, 109996.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.109996>
- Latini, A., Di Giuseppe, E., D’Orazio, M., & Di Perna, C. (2021). Exploring the use of immersive virtual reality to assess occupants’ productivity and comfort in workplaces: an experimental study on the role of walls colour. *Energy and Buildings*, 253, 111508. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111508>
- Latini, A., Giuseppe, E. Di, & Orazio, M. D. (2023). Development and application of an experimental framework for the use of virtual reality to assess building users’ productivity. *Journal of Building Engineering*, 70(March), 106280. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106280>
- Liu, Y., Zhang, S., Wu, Y., & Yang, D. (2021). Studies on visual health features of luminous environment in college classrooms. *Building and Environment*, 205(July), 108184.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108184>
- Ma, J. H., Lee, J. K., & Cha, S. H. (2022). Effects of lighting CCT and illuminance on visual perception and task performance in immersive virtual environments. *Building and Environment*, 209(December 2021), 108678. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108678>
- Nolé Fajardo, M. L., Higuera-Trujillo, J. L., & Llinares, C. (2023). Lighting, colour and geometry: Which has the greatest influence on students’ cognitive processes? *Frontiers of Architectural Research*, 12(4), 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.02.003>
- Ricciardi, P., & Buratti, C. (2018). Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. *Building and Environment*, 127(October 2017), 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>
- Sadeghi, S. A., Karava, P., Konstantzos, I., & Tzempelikos, A. (2016). Occupant interactions with shading and lighting systems using different control interfaces: A pilot field study. *Building and Environment*, 97, 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.008>
- Sadeghi, S. A., Lee, S., Karava, P., Bilionis, I., & Tzempelikos, A. (2018). Bayesian classification and inference

- of occupant visual preferences in daylight perimeter private offices. *Energy and Buildings*, 166, 505–524. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.010>
- Schubert, T., Regenbrecht, H., & Friedmann, F. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. Presence: Teleoperators and Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266–281.
- Tawil, N., Sztuka, I. M., Pohlmann, K., Sudimac, S., & Kühn, S. (2021). The living space: psychological well-being and mental health in response to interiors presented in virtual reality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph182312510>
- Toftum, J., Thorseth, A., Markvart, J., & Logadóttir, Á. (2018). Occupant response to different correlated colour temperatures of white LED lighting. *Building and Environment*, 143(July), 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.013>
- Wang, Q., Xu, H., Gong, R., & Cai, J. (2015). Investigation of visual fatigue under LED lighting based on reading task. *Optik*, 126(15–16), 1433–1438. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.04.033>
- Wei, M., Houser, K. W., Orland, B., Lang, D. H., Ram, N., Sliwinski, M. J., & Bose, M. (2014). Field study of office worker responses to fluorescent lighting of different CCT and lumen output. *Journal of Environmental Psychology*, 39, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.04.009>
- Wu, Y., Chen, X., Li, H., Zhang, X., Yan, X., Dong, X., Li, X., & Cao, B. (2022). Influence of thermal and lighting factors on human perception and work performance in simulated underground environment. *Science of the Total Environment*, 828, 154455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154455>
- Yeom, S., Kim, H., Hong, T., & Lee, M. (2020). Determining the optimal window size of office buildings considering the workers' task performance and the building's energy consumption. *Building and Environment*, 177(March), 106872. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106872>
- Zeng, Y., Sun, H., Yu, J., & Lin, B. (2022). Effects of correlated color temperature of office light on subjective perception, mood and task performance. *Building and Environment*, 224(July), 109508. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109508>

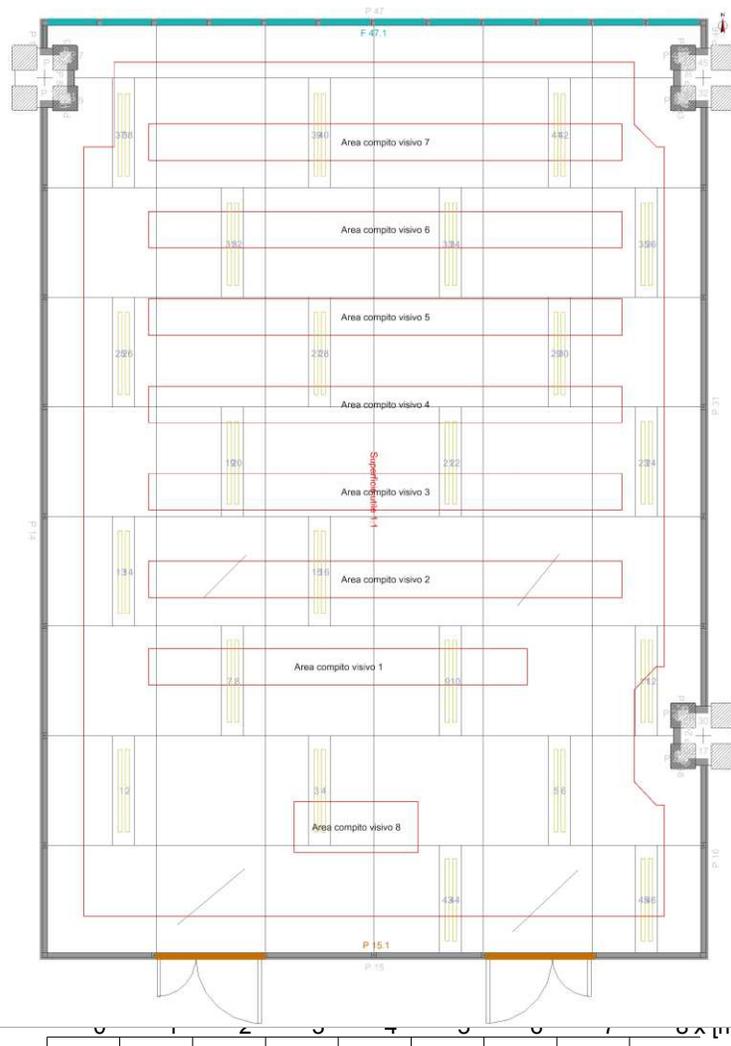
7. ALLEGATI

Interno 1

Riepilogo, Interno 1

Panoramica risultato, Area di valutazione 1

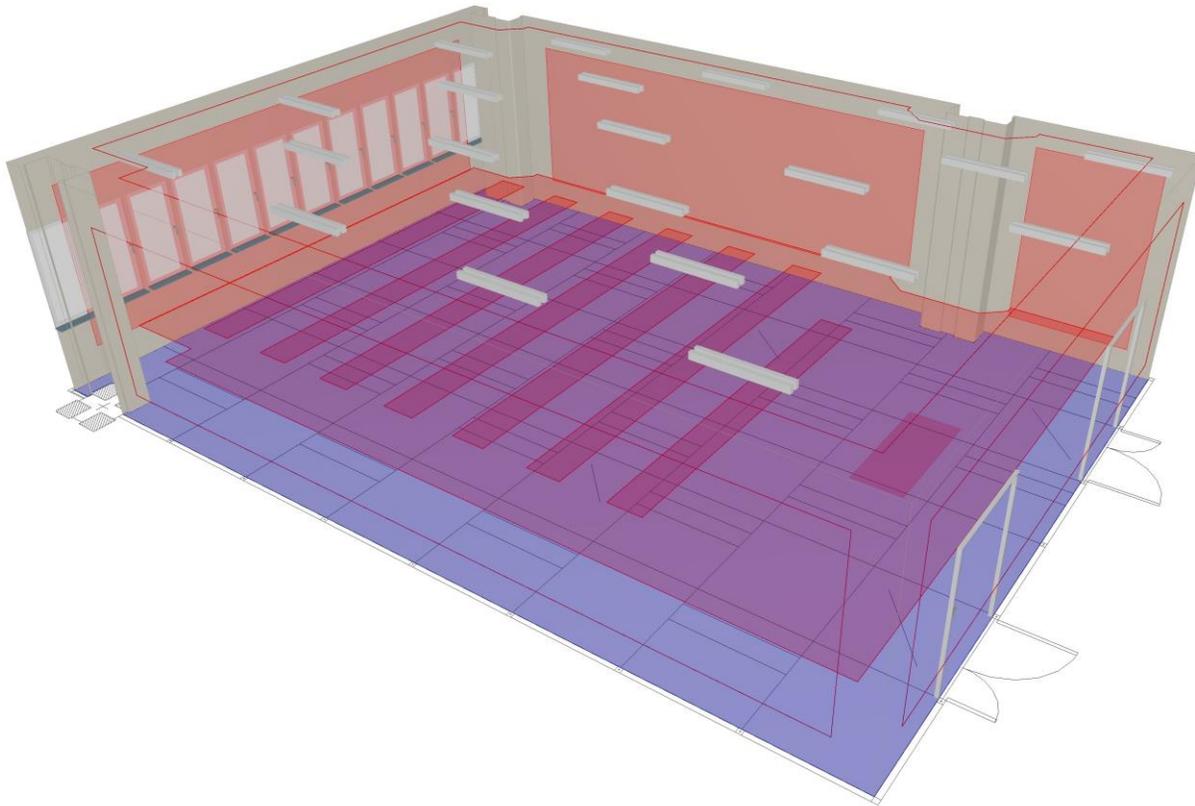
y
[
m
]
-
1



Parete	x	y	Lunghezza	Grado di riflessione
1	0.49 m	13.39 m	0.31 m	50.0 %
2	0.56 m	13.39 m	0.08 m	50.0 %
3	0.56 m	13.43 m	0.04 m	50.0 %
4	0.88 m	13.43 m	0.32 m	50.0 %
5	0.90 m	13.41 m	0.03 m	50.0 %
6	0.90 m	13.09 m	0.32 m	50.0 %
7	0.86 m	13.09 m	0.04 m	50.0 %
8	0.86 m	12.87 m	0.22 m	50.0 %
9	0.90 m	12.87 m	0.04 m	50.0 %
10	0.90 m	12.53 m	0.34 m	50.0 %
11	0.56 m	12.53 m	0.34 m	50.0 %
12	0.56 m	12.57 m	0.04 m	50.0 %
13	0.49 m	12.57 m	0.08 m	50.0 %
14	0.49 m	0.97 m	11.60 m	50.0 %
15	9.46 m	0.97 m	8.97 m	50.0 %
16	9.46 m	3.54 m	2.57 m	50.0 %
17	9.38 m	3.54 m	0.08 m	50.0 %
18	9.38 m	3.50 m	0.04 m	50.0 %
19	9.06 m	3.50 m	0.32 m	50.0 %
20	9.04 m	3.52 m	0.03 m	50.0 %
21	9.04 m	3.81 m	0.29 m	50.0 %
22	9.07 m	3.84 m	0.04 m	50.0 %
23	9.08 m	3.84 m	0.02 m	50.0 %
24	9.08 m	4.06 m	0.22 m	50.0 %
25	9.04 m	4.06 m	0.04 m	50.0 %
26	9.04 m	4.38 m	0.32 m	50.0 %
27	9.06 m	4.40 m	0.03 m	50.0 %
28	9.38 m	4.40 m	0.32 m	50.0 %
29	9.38 m	4.36 m	0.04 m	50.0 %
30	9.46 m	4.36 m	0.08 m	50.0 %
31	9.46 m	12.57 m	8.22 m	50.0 %
32	9.38 m	12.57 m	0.08 m	50.0 %
33	9.38 m	12.53 m	0.04 m	50.0 %
34	9.06 m	12.53 m	0.32 m	50.0 %
35	9.04 m	12.55 m	0.03 m	50.0 %
36	9.04 m	12.84 m	0.29 m	50.0 %
37	9.07 m	12.87 m	0.04 m	50.0 %
38	9.08 m	12.87 m	0.02 m	50.0 %
39	9.08 m	13.09 m	0.22 m	50.0 %
40	9.04 m	13.09 m	0.04 m	50.0 %
41	9.04 m	13.41 m	0.32 m	50.0 %
42	9.06 m	13.43 m	0.03 m	50.0 %
43	9.38 m	13.43 m	0.32 m	50.0 %
44	9.38 m	13.39 m	0.04 m	50.0 %
45	9.46 m	13.39 m	0.08 m	50.0 %
46	9.46 m	13.70 m	0.31 m	50.0 %
47	0.49 m	13.70 m	8.97 m	50.0 %
Suol				60.0 %
Soffitto				50.0 %
Altezza interno		3.50 m		
Altezza superficie utile		0.80 m		

Descrizione, Interno 1

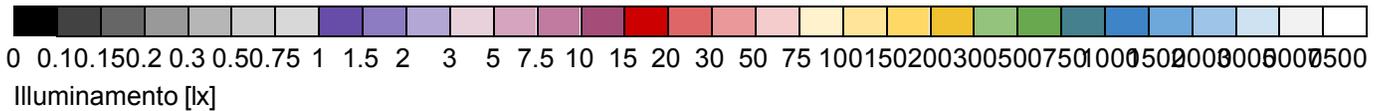
Rappresentazione 3D, Vista 1



Interno 1

Riepilogo, Interno 1

Panoramica risultato, Area di valutazione 1



Generale

Algoritmo di calcolo utilizzato: Percentuale indiretta media
 Altezza piano punti luce: 3.50 m
 Fattore di manut.: 0.80

Flusso Totale: 66000.00 lm
 Potenza totale: 466.4 W
 Potenza totale per superficie (113.05 m²): 4.13 W/m² (0.81 W/m²/100lx)

Postazione di lavoro	Area compito visivo	Ambiente	Sfondo
Area compito visivo 1			
Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	561 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	423 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.75 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Interno 1

Riepilogo, Interno 1

Panoramica risultato, Area di valutazione 1

Postazione di lavoro	Area compito visivo	Ambiente	Sfondo
Area compito visivo 2	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
Profilo utente	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	535 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	391 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.73 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Area compito visivo 3

Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	547 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	399 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.73 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Area compito visivo 4

Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	590 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	512 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.87 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Area compito visivo 5

Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	601 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	524 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.87 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Area compito visivo 6

Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	586 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	490 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.84 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Area compito visivo 7

Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati		
	34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	464 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	390 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.84 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Interno 1

Riepilogo, Interno 1

Panoramica risultato, Area di valutazione 1

Postazione di lavoro	Area compito visivo	Ambiente	Sfondo
Area compito visivo 8			
Profilo utente	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati 34.2 (EN 12464-1, 11.2021)		
	banco aula		
\bar{E}_m	460 lx (≥ 500 lx)	-nan(ind) lx (≥ 300 lx)	510 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	356 lx	3.4e+38 lx	238 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.77 (≥ 0.60)	---	0.47 (≥ 0.10)
Posizione	0.80 m		0.80 m

Area di valutazione 1

Superficie utile 1.1

	Orizzontale	Cilindrico
\bar{E}_m	510 lx	212 lx (≥ 150 lx)
E_{min}	238 lx	121 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_b)$	0.47	0.57
$E_{min}/E_{max} (U_d)$	0.35	
E_z/E_h		0.40
Posizione	0.80 m	1.20 m
RUG (5.6H 4.0H)	≤ 15.4	
Punto luce:		
(TrueLine, suspended, SP530P L1130_830)		

Superfici principali

	\bar{E}_m	U_o
M 1.6 (Soffitto)	180 lx (≥ 100 lx)	0.60 (≥ 0.10)
M 1.1 (Parete)	213 lx (≥ 150 lx)	0.39 (≥ 0.10)
M 1.2 (Parete)	200 lx (≥ 150 lx)	0.43 (≥ 0.10)
M 1.3 (Parete)	239 lx (≥ 150 lx)	0.48 (≥ 0.10)
M 1.4 (Parete)	250 lx (≥ 150 lx)	0.46 (≥ 0.10)
M 1.5 (Parete)	173 lx (≥ 150 lx)	0.49 (≥ 0.10)

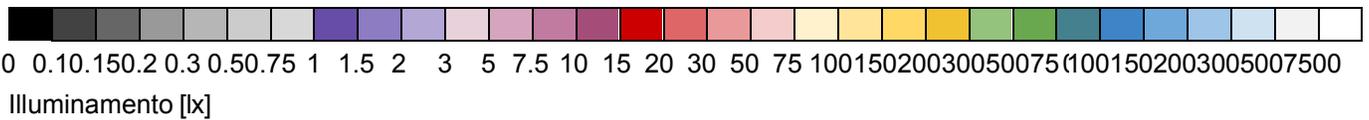
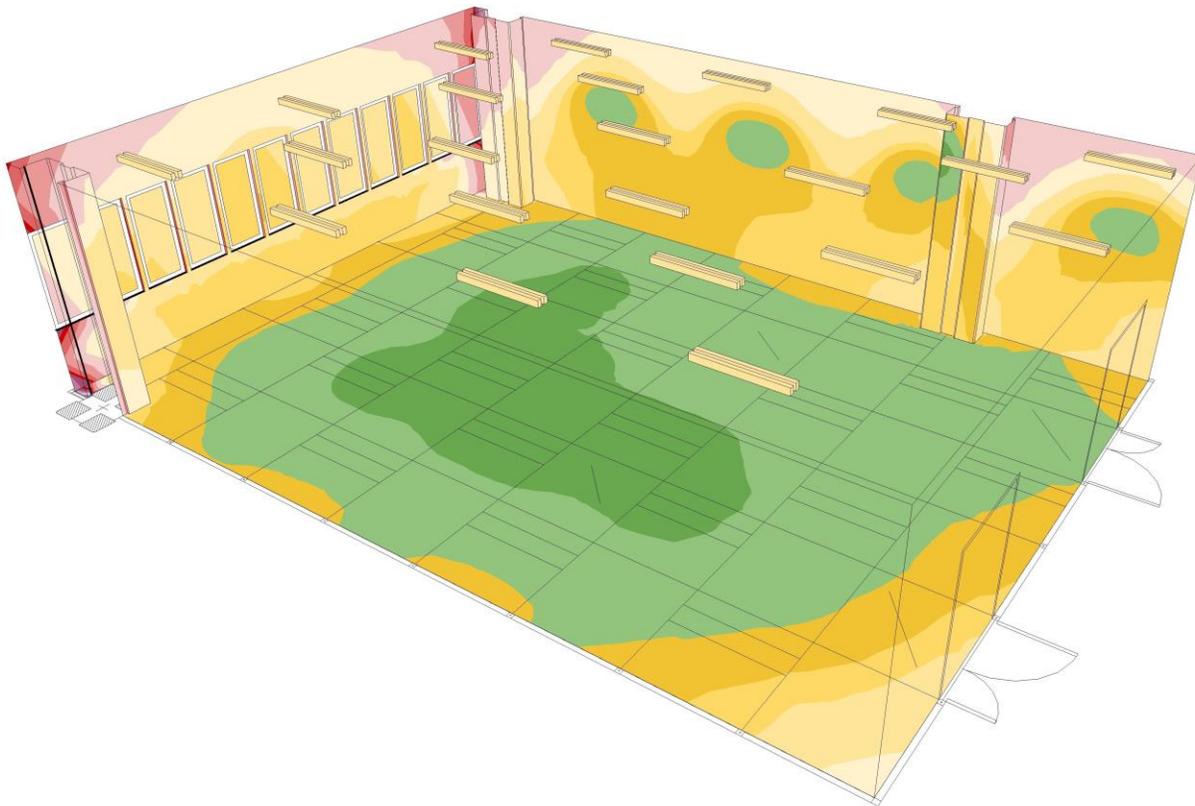
Tipo Num. Marca

1	44 x	Philips	
		Codice	: SP530P L1130_830/SP530P L1130 1 xLED15S/830 OC
		Nome punto luce	: TrueLine, suspended
		Sorgenti	: 1 x LED15S/830 10.6 W / 1500 lm

Interno 1

Risultati calcolo, Interno 1

Colori falsati 3D, Vista 1 (E)



Risultati calcolo, Interno 1

Luminanza 3D Vista 1

