

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

Corso di laurea triennale in
OTTICA E OPTOMETRIA

TESI DI LAUREA

ABERRAZIONI E VISIONE NOTTURNA:
CORRELAZIONI E IMPLICAZIONI

RELATORE: Prof. Anto Rossetti

CORRELATORE: Prof. Gianluca Ruffato

LAUREANDA: Sanda Candiba

MATRICOLA: 2025304

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

“Non permettere mai a nessuno di dirti che non sai fare qualcosa.

Se hai un sogno tu lo devi proteggere. Quando le persone non
sanno fare qualcosa lo dicono a te che non la sai fare.

Se vuoi qualcosa, vai e inseguila. Punto.”

La ricerca della felicità

INDICE

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
1. ABERRAZIONI.....	3
1.1 CAMMINO OTTICO DELLA LUCE	3
1.2 LA PIRAMIDE DI ZERNIKE.....	5
1.3 ABERROMETRO DI SHACK-HARTMANN	11
2. VISIONE NOTTURNA.....	13
2.1 I FOTORECETTORI.....	13
2.2 DISTURBI PIÙ COMUNI DURANTE LA VISIONE NOTTURNA	16
2.3 GUIDA NOTTURNA.....	17
3. SCOPO DELLO STUDIO.....	18
4. MATERIALI E METODI.....	19
4.1 CRITERI DI INCLUSIONE ED ESCLUSIONE DEI SOGGETTI	19
4.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	19
4.3 PROTOCOLLO.....	20
4.4 ANALISI STATISTICA	27
5. RISULTATI.....	28
5.1 CORRELAZIONI	32
6. DISCUSSIONE.....	46
6.1 ANALISI DELLE CORRELAZIONI.....	47
6.2 CRITICITÀ E LIMITI DELLO STUDIO	51
7. CONCLUSIONE	52
BIBLIOGRAFIA.....	53
APPENDICE	59

ABSTRACT

Questo studio si propone di analizzare e confrontare le aberrazioni oculari (prendendo in considerazione l'indice globale RMS) con i disturbi della visione notturna, indagati attraverso due questionari soggettivi (QoV e VND-Q) e una scala Likert. Lo studio è stato condotto su un campione di 54 soggetti di età compresa tra i 19 e i 28 anni. Per ogni partecipante, oltre le aberrazioni, sono state misurate l'acuità visiva e la sensibilità al contrasto alla luce e al buio e la stereopsi. Inoltre, ci si è focalizzati sullo studio delle aberrazioni misurate senza e con correzione oftalmica indossata dai soggetti durante l'esame aberrometrico, dal momento che ad oggi non esiste descritta questa pratica in letteratura.

Dall'analisi delle correlazioni calcolate non sono emerse correlazioni significative tra l'indice globale delle aberrazioni RMS e la visione notturna. È stata dimostrata, tuttavia, la concreta possibilità di fare una sovra-refrazione con un aberrometro misurando le aberrazioni corneali e totali con gli occhiali in posizione. I dati ottenuti dimostrano che tale esame è affidabile e non risulta precedentemente descritto in letteratura.

INTRODUZIONE

Scopo: questo studio si propone di ricercare e analizzare una serie di correlazioni tra l'indice globale RMS delle aberrazioni oculari e vari dati, tra cui l'età dei partecipanti, due questionari relativi alla visione notturna (QoV e VND-Q) e una scala Likert, l'acuità visiva, la sensibilità al contrasto. Inoltre, ci si è focalizzati sullo studio delle aberrazioni misurate senza e con correzione oftalmica indossata dai soggetti durante l'esame aberrometrico, dal momento che ad oggi non esiste descritta questa pratica in letteratura.

Materiali e metodi: lo studio ha coinvolto 54 soggetti volontari, studenti dell'Università degli Studi di Padova, per un totale di 108 occhi analizzati. Sulla base della strumentazione e degli spazi disponibili è stato creato un protocollo a cui sono stati sottoposti tutti i partecipanti:

1. Misurazione dell'acuità visiva monoculare con correzione abituale in condizione di luce e di buio (utilizzo del software FrACT)
2. Misurazione della sensibilità al contrasto monoculare con correzione abituale in condizione di luce e di buio (utilizzo del software FrACT)
3. Stereopsi (utilizzo del test di Lang II)
4. Aberrometria (utilizzo dell'aberrometro Shack-Hartmann i.Profiler prodotto da Carl Zeiss)
5. Questionari sulla visione notturna (QoV e VND-Q) e scala Likert

Risultati: tra tutte le correlazioni studiate sono risultate significative: (1) le correlazioni tra RMS corneale 3mm e RMS corneale 5mm e tra RMS totale 3mm e RMS totale 5mm sia senza ($r = 0,9551$ e $r = 0,9914$) che con correzione ($r = 0,8870$ e $r = 0,6919$), (2) le correlazioni tra RMS corneale (con diametro invariato) con e senza correzione ($r = 0,7160$ e $r = 0,6740$), (3) la correlazione tra acuità visiva alla luce e al buio ($r = 0,7863$) e (4) le correlazioni tra i questionari sulla visione notturna QoV e VND-Q e la scala Likert ($r = 0,5880$ e $r = 0,6236$).

Conclusioni: in questo studio non sono state trovate correlazioni significative tra l'indice globale delle aberrazioni RMS e la visione notturna. È stata dimostrata, tuttavia, la concreta possibilità (con accorgimenti) di fare una sovra-refrazione con un aberrometro commerciale misurando le aberrazioni oculari e corneali con gli occhiali in posizione. I dati ottenuti dimostrano che tale esame è affidabile e non risulta precedentemente descritto in letteratura.

1. ABERRAZIONI

I raggi luminosi che attraversano un sistema ottico perfetto esente da aberrazioni convergono tutti nello stesso punto. L'occhio umano, tuttavia, non è un sistema ottico perfetto, pertanto presenta diversi tipi di aberrazioni, delle deviazioni dei raggi luminosi rispetto alla direzione ideale generata da un sistema ottico perfetto. La presenza di aberrazioni si traduce in una degradazione più o meno significativa della qualità delle immagini che dipende sia dal tipo di aberrazione presente che dall'entità della stessa.

I difetti di vista della miopia e ipermetropia (defocus) e dell'astigmatismo sono aberrazioni di secondo ordine, pur differenziate. Queste aberrazioni provocano un'inadeguata focalizzazione delle immagini sulla retina. Nella miopia i raggi luminosi che entrano nell'occhio focalizzano davanti alla retina. Al contrario, nell'ipermetropia focalizzerebbero dietro la retina in assenza della struttura opaca dell'occhio. L'astigmatismo (regolare), invece, è determinato solitamente da un profilo corneale irregolare, e determina una focalizzazione dei raggi luminosi in punti diversi lungo il percorso verso la retina, con potere che varia secondo una funzione di \sin^2 tra un massimo e un minimo, in due sezioni ortogonali. [1]

1.1 Cammino ottico della luce

In fisica, descriviamo la luce (radiazione visibile) o generalmente una radiazione, come energia che viene trasmessa sotto forma di onde elettromagnetiche. In particolare, si può semplificare e considerare che la luce si propaga per raggi rettilinei perpendicolari al fronte d'onda. Il fronte d'onda ha una forma sferica in prossimità della sorgente luminosa (radiazioni divergenti o con vergenza negativa), mentre diventa via via più piatto man mano che ci si allontana dalla sorgente. Ad una distanza teoricamente infinita dalla sorgente si parla di fronte d'onda piano (vergenza zero o nulla).

Quando un'onda incontra uno schermo opaco all'onda stessa nel quale sia stata praticata un'apertura, l'onda che ne emerge può subire delle deviazioni. Se l'apertura ha dimensioni molto maggiori rispetto alla lunghezza d'onda, l'onda

che ne emerge conserva la forma del fronte d'onda incidente e possiamo dire che la propagazione è rettilinea (se si escludono gli effetti al bordo). Se, invece, la dimensione dell'apertura è dell'ordine della lunghezza d'onda o inferiore ad essa, l'onda uscente tenderà a formare un nuovo fronte d'onda divergente. Questo fenomeno è chiamato diffrazione (Fig. 1). [2]

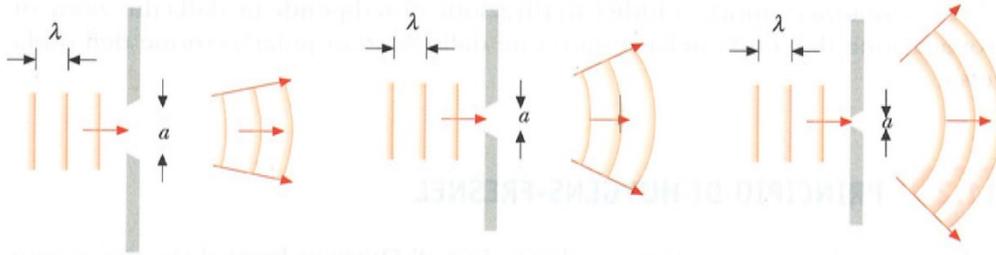


Figura 1: diffrazione di un'onda piana nell'attraversamento di fenditure rettilinee di varie grandezze. [2]

I raggi luminosi subiscono delle modifiche anche quando passano da un mezzo di propagazione ad un altro caratterizzati da diversi indici di rifrazione. Questo fenomeno, chiamato rifrazione, determina un cambiamento sia della velocità di propagazione dei raggi sia della loro direzione di propagazione.

$$n = \frac{c}{v}$$

n = indice di rifrazione
 c = velocità della luce nel vuoto
 v = velocità della luce nel mezzo di propagazione

Passando da un mezzo di propagazione con indice di rifrazione più basso a un mezzo con indice più alto si verifica una diminuzione della velocità di propagazione e la direzione di propagazione dell'onda si avvicina alla normale alla superficie di separazione dei due mezzi secondo la legge di Snell (Fig. 2). [2]

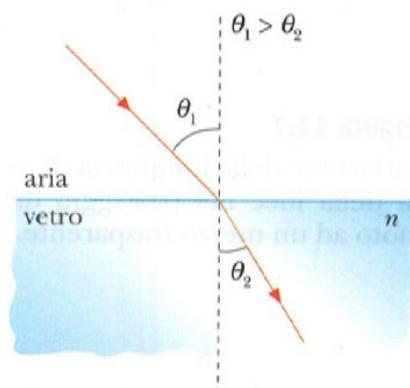


Figura 2: rifrazione della luce nel passaggio dall'aria al vetro, secondo la legge di Snell. [2]

Quanto appena descritto si verifica anche a livello oculare, infatti come possiamo vedere dalla tabella I gli indici di rifrazione delle varie strutture che compongono l'occhio sono maggiori rispetto a quello dell'aria (come si nota, il cristallino ha una struttura a gradiente di indice: lente graded index GRIN). [3] Ciò si traduce in un rallentamento della velocità della radiazione e una deviazione verso la normale al punto di incidenza ovvero una variazione in senso convergente o divergente se la superficie è curva nel momento in cui entra nell'occhio.

Tabella I: *indici di rifrazione dell'aria e delle strutture che compongono l'occhio.* [3]

n = 1,00029 aria	n = 1,375 cristallino corteccia periferica e zona centrale anteriore
n = 1,376 cornea	n = 1,385 cristallino corteccia posteriore
n = 1,3375 film e umor acqueo	n = 1,386 cristallino nucleo, parte esterna
n = 1,3349 umor vitreo	n = 1,406 cristallino nucleo, parte centrale

Viene chiamato cammino ottico il percorso effettuato da un raggio luminoso attraverso un sistema ottico (Optical Path Length OPL). La differenza di cammino ottico (Optical Path Difference OPD), invece, indica la differenza di cammino ottico che sussiste tra un raggio luminoso che attraversa un sistema ottico non aberrato e un raggio che attraversa un sistema ottico aberrato. Se l'occhio (sistema ottico positivo) fosse un sistema ottico perfetto trasformerebbe il fronte d'onda piano incidente in un fronte d'onda sferico convergente sulla fovea, come abbiamo visto però l'occhio è un sistema ottico aberrato pertanto si verificherà una differenza di cammino ottico tra il fronte d'onda ideale e quello reale. Si parla quindi di errore del fronte d'onda o fronte d'onda aberrato. [4] [5]

1.2 La piramide di Zernike

L'interesse per lo studio delle aberrazioni, in particolare quelle di alto ordine, si è sviluppato in seguito alla diffusione della chirurgia refrattiva. Si è visto, infatti, che in seguito all'intervento per correggere i difetti refrattivi quali miopia, ipermetropia e astigmatismo, i pazienti, pur raggiungendo buona se non addirittura ottima acuità visiva centrale ad alto contrasto, si lamentavano spesso di

abbagliamento, aloni, immagini fantasma, scarso contrasto e scarsa visione notturna, sintomi dovuti alle aberrazioni di alto ordine indotte dalla chirurgia stessa. [1] [6] [7]

Le aberrazioni possono essere suddividere in due grandi categorie:

- Aberrazioni monocromatiche: sono difetti dell'immagine causati dalla natura delle lenti e si riferiscono ad una sola lunghezza d'onda; si suddividono convenzionalmente in aberrazioni di basso ($\leq 2^\circ$) e di alto ordine ($\geq 3^\circ$). [1] [8]
- Aberrazioni cromatiche: si verificano per l'incapacità di una lente di focalizzare tutti i colori di una luce policromatica in un singolo punto. Queste aberrazioni si verificano perché l'indice di rifrazione del mezzo di propagazione non è lo stesso per tutte le lunghezze d'onda, [1] [9] in altre parole l'indice di rifrazione è una funzione della lunghezza d'onda. La conseguenza immediata è che la radiazione che ha lunghezza d'onda più corta (ad es. luce che appare "viola" o "blu") viene rifratta maggiormente della luce con lunghezza d'onda più lunga ("rossa"). [8] Le aberrazioni cromatiche si possono suddividere in aberrazioni longitudinali (è la distanza lungo l'asse ottico tra il punto in cui il raggio aberrato interseca l'asse ottico e il punto in cui un raggio non aberrato interseca lo stesso asse) e trasversali (è la distanza tra il punto in cui il raggio aberrato interseca la perpendicolare all'asse ottico e il punto in cui un raggio non aberrato interseca la stessa perpendicolare) (Fig. 3). [4]

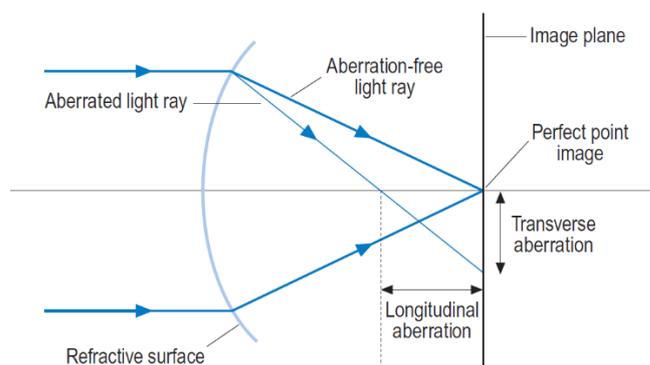


Figura 3: aberrazione longitudinale e trasversale di un raggio di luce. [4]

Il fronte d'onda è una superficie complessa che può essere scomposta in diverse componenti che descrivono visivamente e/o matematicamente l'aberrazione totale dell'occhio. Per esprimere tali componenti ci si avvale dei cosiddetti polinomi di

Zernike. I polinomi di Zernike sono una combinazione di funzioni radiali e trigonometriche indipendenti che si prestano a descrivere in modo completo le varie componenti grazie alla loro ortogonalità sul disco unitario. [5]

In generale la funzione che descrive un fronte d'onda arbitrario mediante le coordinate polari (r, θ) (θ angolo azimutale tra 0 e 2π , r coordinata radiale limitata al range tra 0 e 1) è indicata con $W(r, \theta)$ e può essere espansa in termini di una sequenza di polinomi di Zernike Z_n^m : [10]

$$W(r, \theta) = \sum_{n,m} C_n^m Z_n^m(r, \theta)$$

dove C_n^m rappresenta il coefficiente di aberrazione relativo al polinomio di Zernike Z_n^m . Gli indici n e m descrivono la posizione precisa del polinomio nella cosiddetta piramide di Zernike.

L'indice n rappresenta l'ordine radiale del polinomio, può assumere solo valori interi positivi maggiori o uguali a zero ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) e indica il numero di zeri del polinomio radiale.

L'indice m rappresenta la frequenza azimutale del polinomio e può assumere sia valori interi positivi che negativi. Per convenzione avrà valori positivi se la frequenza del polinomio è descritta dalla funzione *coseno* (polinomi pari) e negativi se descritta dalla funzione *seno* (polinomi dispari). Una frequenza uguale a zero è caratteristica delle aberrazioni a simmetria rotazionale. L'indice m indica il numero di volte in cui il profilo radiale si ripete in un angolo giro. [10]

Riscrivendo i polinomi di Zernike in coordinate polari si trova: [10]

$$\begin{aligned} Z_n^m(r, \theta) &= R_n^m(r) \cos m\theta \quad \text{for } m \geq 0 \\ Z_n^{-m}(r, \theta) &= R_n^m(r) \sin m\theta \quad \text{for } m < 0 \end{aligned}$$

I primi 3 ordini radiali, $n = 0, 1, 2$, sono chiamati aberrazioni di basso ordine (LOAs, Lower-Order Aberrations). Comunemente, durante l'analisi aberrometrica degli occhi, i primi due ordini radiali non vengono considerati.

Nella tabella II sono riportati le espansioni algebriche dei primi 4 ordini dei polinomi di Zernike.

Tabella II: espansioni algebriche dei primi 4 ordini dei polinomi di Zernike. [10]

	n	m	Z_n^m	RMS	Forma polare
	0	0	Z_0^0	$\sqrt{2}$	1
	1	-1	Z_1^{-1}	2	$r\sin\theta$
	1	1	Z_1^1	2	$r\cos\theta$
	2	-2	Z_2^{-2}	$\sqrt{6}$	$r^2\sin 2\theta$
	2	0	Z_2^0	$\sqrt{3}$	$2r^2-1$
	2	2	Z_2^2	$\sqrt{6}$	$r^2\cos 2\theta$
	3	-3	Z_3^{-3}	$2\sqrt{2}$	$r^3\sin 3\theta$
	3	-1	Z_3^{-1}	$2\sqrt{2}$	$(3r^3-2r)\sin\theta$
	3	1	Z_3^1	$2\sqrt{2}$	$(3r^3-2r)\cos\theta$
	3	3	Z_3^3	$2\sqrt{2}$	$r^3\sin 3\theta$

L'ordine radiale zero, chiamato pistone, trasla semplicemente il fronte d'onda, mentre il primo ordine radiale, dove troviamo il tilt e il tip, inclinano il fronte d'onda. In entrambi i casi non vi è nessuna alterazione o degradazione nella qualità dell'immagine. [11]

Il secondo ordine radiale include il defocus positivo (miopia), il defocus negativo (ipermetropia) e l'astigmatismo regolare. [12]

A partire dal terzo ordine le aberrazioni sono dette di alto ordine (HOAs, Higher-Order Aberrations). Nel terzo ordine troviamo le aberrazioni di coma e trifoglio, nel quarto quelle di tetrafoglio, astigmatismo a quattro punte e aberrazione sferica. [12]

Al crescere dell'ordine radiale le aberrazioni diventano sempre più complesse e difficili da correggere, [11] se non sostituendo la superficie ottica, come accade ad esempio con le lenti a contatto rigide.

Nella figura 4 sono rappresentati i polinomi fino al decimo ordine con indicati i nomi delle relative aberrazioni.

Il parametro che ci permette di avere un quadro generale dell'aberrazione totale presente in un occhio è l'RMS (Root Mean Square) che fornisce l'errore del fronte d'onda totale ed è dato dalla radice quadrata della somma dei quadrati dei coefficienti di Zernike. [13]

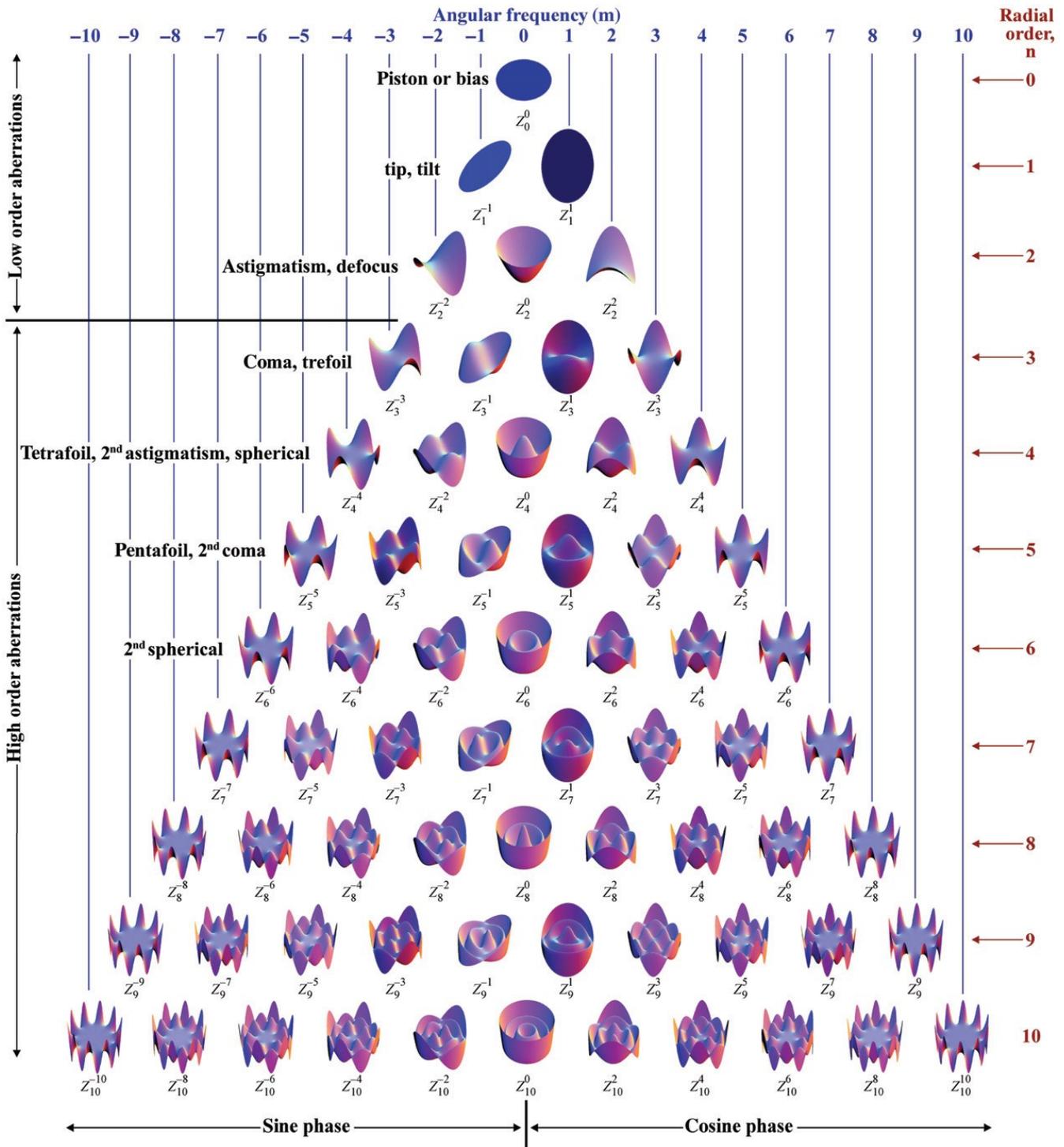


Figura 4: rappresentazione dei polinomi di Zernike fino al decimo ordine. [10]

1.3 Aberrometro di Shack-Hartmann

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecnologie per misurare le aberrazioni, di seguito ci focalizzeremo sull'aberrometro di Shack-Hartmann dal momento che è la tecnologia presente nell'aberrometro utilizzato in questo studio (aberrometro wave front iProfiler®, produttore Carl Zeiss, Germania).

Lo scopo dell'aberrometro di Shack-Hartmann è quello di misurare la funzione di un fronte d'onda aberrato, che equivale a dire misurare la forma del fronte d'onda di una luce uscente dall'occhio. [14]

Lo strumento prevede la proiezione di un raggio luminoso nel punto di fissazione retinica che diventa in questo modo una sorgente luminosa puntiforme, per effetto del fenomeno di retro-illuminazione, e che irradia quindi luce verso l'esterno dell'occhio attraversando i vari mezzi diottrici dell'occhio stesso.

Uscendo dall'occhio la luce attraversa una matrice di microlenti positive che la suddivide in tanti singoli raggi luminosi. Ognuna delle microlenti focalizza i raggi che l'attraversano in uno specifico punto di un video-sensore CCD e mantiene la configurazione topologica all'interno della pupilla.

In caso di un occhio perfetto senza aberrazioni la luce uscente formerebbe sul sensore CCD un cerchio delle dimensioni della pupilla e i punti immagine, focalizzati da ciascuna microlente, si posizionerebbero sulle precise intersezioni della griglia del sensore CCD. In questo caso l'aberrometro ci restituirà l'immagine di un fronte d'onda piano ideale (Fig. 5). [14]

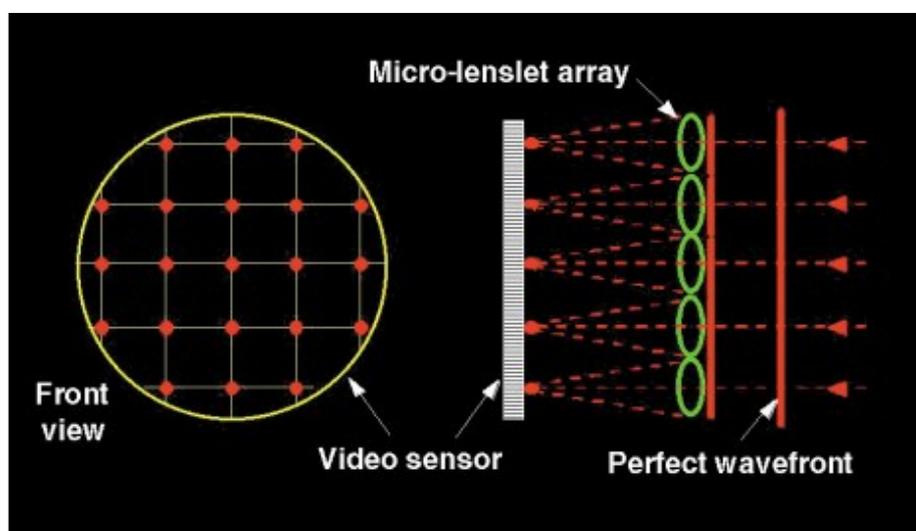


Figura 5: fronte d'onda piano ideale. [14]

Nel caso di un occhio reale, affetto da aberrazioni, le microlenti non focalizzeranno più i punti immagine esattamente nelle intersezzioni della griglia del sensore CCD, ma essi risulteranno spostati rispetto ai corrispondenti punti immagine prodotti dal fronte d'onda ideale (Fig. 6).

Tramite opportuni calcoli matematici, lo strumento è in grado di stimare l'aberrazione oculare, per punti e nel complesso, basandosi proprio su questi spostamenti dei punti immagine. [14]

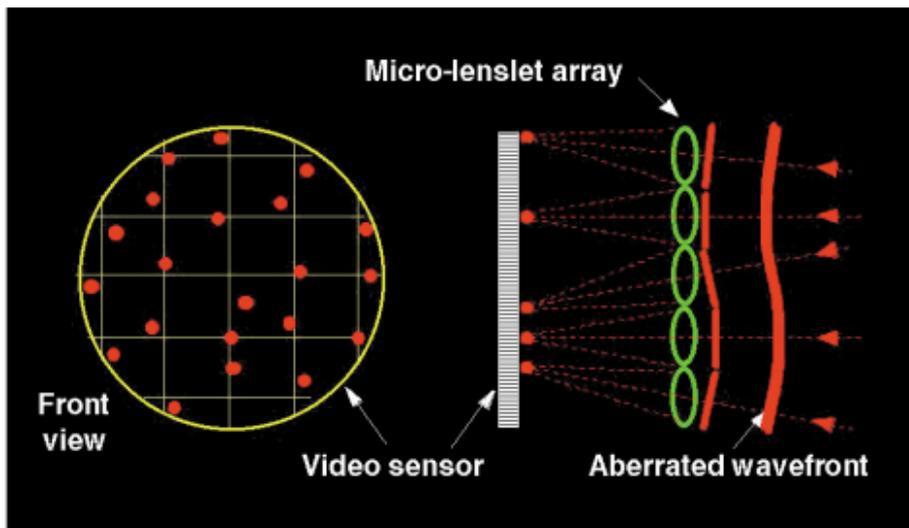


Figura 6: fronte d'onda aberrato. [14]

2. VISIONE NOTTURNA

2.1 I fotorecettori

La retina è la membrana sensibile alla luce dove avviene la conversione dell'energia luminosa in segnale elettrico (fototrasduzione). I fotorecettori, coni e bastoncelli, sono gli elementi nervosi deputati alla trasformazione dello stimolo luminoso in impulso elettrico. Si calcola che nella retina umana siano presenti circa 7 milioni di coni e 120 milioni di bastoncelli. La concentrazione dei primi è massima nella fovea mentre i bastoncelli raggiungono la maggiore densità a circa 20 gradi dalla fovea (Fig. 7). [15]

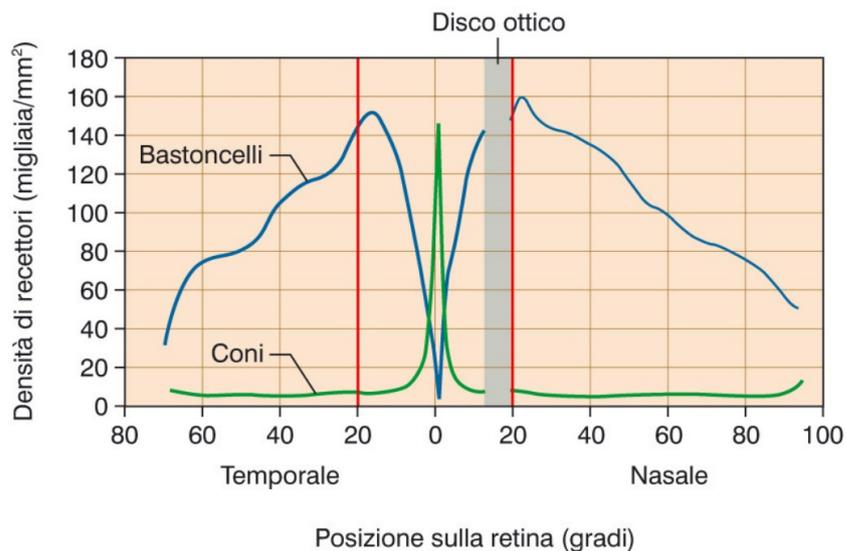


Figura 7: distribuzione di coni e bastoncelli nella retina.

I fotorecettori, sia coni che bastoncelli, sono costituiti da un segmento esterno che contiene i pigmenti fotosensibili (mantenuti in una posizione che garantisce l'assorbimento più efficace della luce) e un segmento interno che contiene mitocondri ed altri organuli e costituisce pertanto l'apparato metabolico del fotorecettore. I due segmenti sono collegati da una zona ristretta contenente nove paia di microtubuli. Alla base del fotorecettore si trova il corpo cellulare che contiene il nucleo e ha processi che contraggono sinapsi con i neuroni retinici nello strato sottostante (Fig. 8). [16]

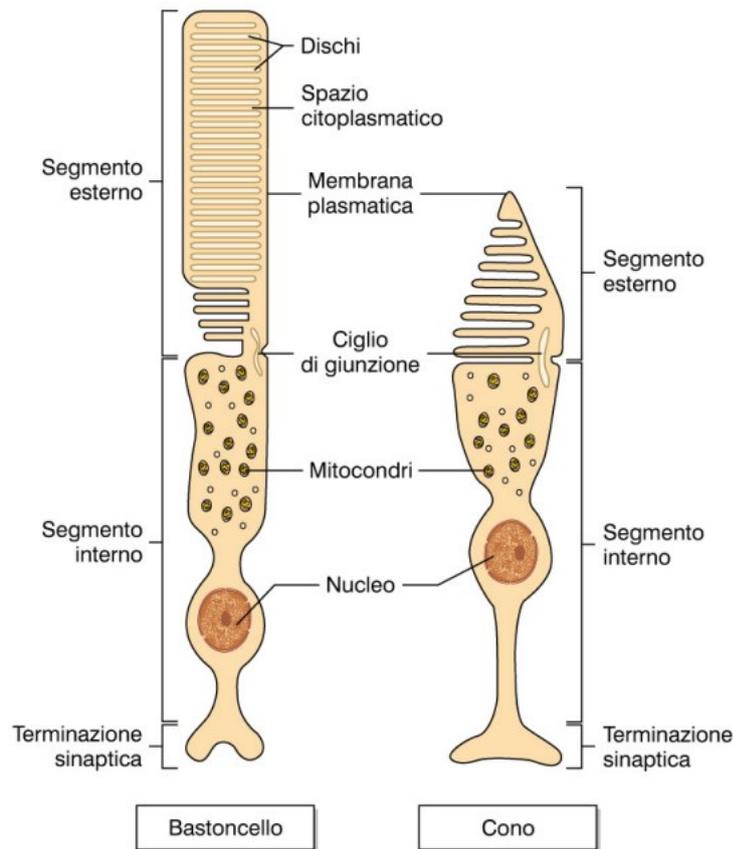


Figura 8: struttura dei coni e dei bastoncelli.

I coni sono responsabili della visione diurna (fotopica). Nel loro segmento esterno sono presenti tre tipi diversi di pigmenti fotosensibili chiamati fotopsine responsabili della visione a colori (visione tricromica). I picchi di assorbimento delle fotopsine sono: 420 nm (blu), 531 nm (verde) e 558 nm (arancio-giallo). Ogni cono esprime un unico tipo di fotopsina. Tutti i colori che vediamo sono il risultato di varie miscele di questi tre tipi di coni. Le principali caratteristiche dei coni sono una buona risoluzione (tra coni e cellule bipolari è presente un rapporto di 1:1), ma una bassa sensibilità (Fig. 9). [16]

I bastoncelli sono responsabili della visione notturna (scotopica). Nel loro segmento esterno è presente un unico tipo di pigmento fotosensibile chiamato rodopsina responsabile della produzione di immagini solo in gradazioni di grigio (visione monocromatica). La rodopsina è una proteina integrale di membrana formata da una glicoproteina, l'opsina (a sette segmenti transmembranari) e dall'aldeide della vitamina A, il retinale. Il retinale può esistere in due forme: al buio si trova nella forma *11-cis*, ma in seguito all'assorbimento di un fotone isomerizza nella forma *tutto-trans*. Questa isomerizzazione, promuovendo

l'attivazione della rodopsina a metarodopsina, è alla base del processo di fototrasduzione. Il picco di assorbimento per la rodopsina è a circa 500 nm (Fig. 9). [15]

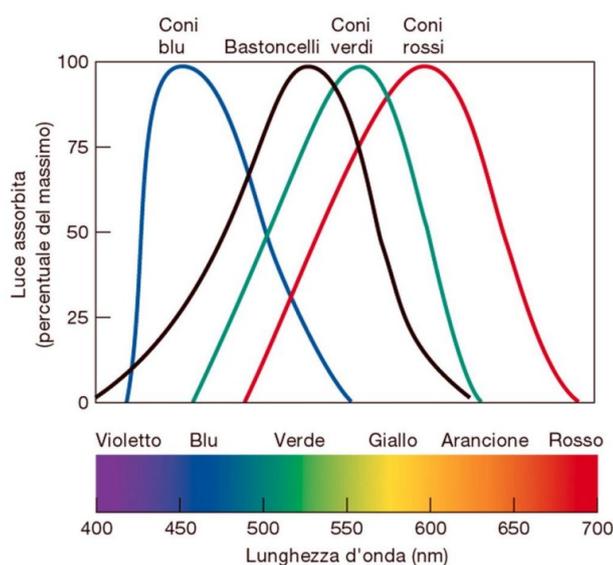


Figura 9: picchi di assorbimento di conici e bastoncelli.

Le principali caratteristiche dei bastoncelli, a differenza dei conici, sono una buona sensibilità, ma una scarsa risoluzione; infatti, fino a 600 bastoncelli possono convergere su un'unica cellula bipolare e quindi su una ganglionare. Dunque, i campi recettivi periferici risultano più ampi di quelli centrali (definiamo campo recettivo retinico l'area retinica corrispondente ai fotorecettori che scaricano su un'unica cellula ganglionare ottica). Ne segue che l'acuità visiva decresce rapidamente man mano che l'immagine cade in una zona che si allontana da quella della fovea centrale. [16] [17]

Le diverse condizioni di luminanza influenzano l'attività dei differenti tipi di campo recettivo. Quando la luminanza è scarsa la quantità di luce non è sufficiente a stimolare un singolo fotorecettore; per effetto di sommazione spaziale, tuttavia, la convergenza di numerosi bastoncelli con un'unica cellula bipolare rende possibile l'eccitazione di un campo recettivo periferico. In condizioni invece di elevata luminanza (visione fotopica) gli stimoli luminosi sono in grado di eccitare i campi recettivi formati da una sola cellula come quelli dei conici. In queste condizioni i bastoncelli risultano essere "saturi" (stimolati eccessivamente) e quindi non funzionanti. [17]

2.2 Disturbi più comuni durante la visione notturna

I disturbi della visione in condizioni di ridotta luminosità includono abbagliamento, aloni, luci a raggiera, immagini fantasma, diminuzione della sensibilità al contrasto che comportano una degradazione più o meno significativa della qualità dell'immagine osservata. In condizioni di scarsa luminosità si verifica un aumento del diametro pupillare, l'immediata conseguenza è un aumento della quantità di luce che entra nell'occhio e della superficie attraversata degli elementi oculari con conseguente aumento delle aberrazioni. [18] [19]

Questi disturbi sono maggiormente comuni in coloro che presentano livelli elevati di aberrazioni specialmente di alto ordine dovuti ad interventi di chirurgia refrattiva (PK, PRK, LASIK) [20] [21] [22] oppure che presentano patologie oculari quali degenerazione maculare relativa all'età [23] o retinite pigmentosa (tipicamente caratterizzata dalla cecità notturna). [24]

Comune, anche alle persone che non presentano alcuna anomalia oculare è, invece, la miopia notturna. [25] Per la prima volta descritta nel 1789 da Maskelyne [26], la miopia notturna è caratterizzata da una diminuzione dell'acuità visiva dovuta ad uno shift miopico di circa 1 diottria in condizioni scotopiche. [27] È dovuta a diversi fattori tra cui:

- Aberrazione sferica: negli occhi in cui c'è una aberrazione sferica positiva sotto-corretta, per la quale i raggi periferici focalizzano prima di quelli parassiali, l'intera refrazione subisce uno shift miopico in condizioni di pupilla dilatata fino a 1 diottria. [28]
- L'effetto Purkinje: si tratta dello slittamento della sensibilità retinica da lunghezze d'onda lunghe (rosso) verso lunghezze d'onda più corte (blu) in condizioni di bassa luminosità. In combinazione con l'aberrazione cromatica è stato calcolato uno shift miopico di 0.4 diottrie. [29] [30]
- Accomodazione: non essendoci, in condizioni scotopiche, una mira di fissazione ben definita, l'accomodazione del cristallino tende a stabilizzarsi su una distanza prossimale e ad assumere un valore costante, che, pur presentando ampie fluttuazioni, può introdurre fino a 1.5 diottrie di miopia. [31]

2.3 Guida notturna

Guidare di notte può presentare maggiori fattori di rischio, come dimostrano le statistiche sugli incidenti stradali che stimano tassi di mortalità più alti di notte che non di giorno. [32] [33]

Sebbene vi siano molteplici fattori che contribuiscono, è stato dimostrato che il basso livello di luminosità nell'ambiente stradale notturno è un fattore causale primario negli incidenti stradali che coinvolgono pedoni, ciclisti e altri ostacoli a basso contrasto, molto probabilmente a causa della loro ridotta visibilità, in misura maggiore rispetto alla stanchezza del conducente e al consumo di alcol. [34] [35]

Perfino i bassi livelli di luminosità dovuti alla luna piena contribuiscono a ridurre gli incidenti mortali dei pedoni: i tassi di mortalità sono inferiori del 22% nelle notti di luna piena rispetto alle notti senza luna. [36]

Le luci e l'abbagliamento dovuto alle luci stradali (lampioni, fari delle altre macchine, segnali stradali e insegne luminose) hanno un impatto significativo sulla visione e conseguentemente sulla guida notturna. Questi effetti sono, tuttavia, in perenne mutamento dal momento che vi è una costante evoluzione delle tecnologie che coinvolgono la produzione di lampioni, fari, LED. È, dunque, necessario un costante monitoraggio delle nuove tecnologie per capire il loro impatto sulla visione. [37]

Nel corso degli anni sono stati testati specifici occhiali per migliorare la visione notturna, con lo scopo di aumentare il confort visivo riducendo l'abbagliamento e aumentando il contrasto. Questi tipi di dispositivi sono stati pensati in particolar modo per le situazioni di disturbi visivi notturni più gravi dovuti a patologie. [38] [39]

Per coloro, invece, che non presentano patologie oculari, ma sperimentano ugualmente una ridotta visione notturna, sono presenti in commercio le lenti con tecnologia i.Scription di Zeiss che migliorano la percezione visiva in condizioni di scarsa luminosità offrendo una visione più chiara e nitida. Le lenti, infatti, riducono l'abbagliamento e aumentano la saturazione dei colori migliorando la percezione dei contrasti. Questo tipo di tecnologia tiene in considerazione sia le aberrazioni di basso ordine che quelle di alto ordine, oltre all'aumento del diametro pupillare in condizioni di bassa luminosità. [40]

3. SCOPO DELLO STUDIO

Questo studio si propone di ricercare e analizzare una serie di correlazioni tra l'indice RMS delle aberrazioni oculari e vari dati, tra cui l'età dei partecipanti, due questionari relativi alla visione notturna (QoV e VND-Q) e una scala Likert, l'acuità visiva e la sensibilità al contrasto.

L'obiettivo è quello di comprendere se e in quale modo l'indice RMS è legato ai diversi fattori sopra citati e capire se può avere un qualche tipo di influenza in quei soggetti che lamentano disturbi visivi di notte, periodo della giornata in cui naturalmente le pupille si dilatano facendo, dunque, entrare una maggior quantità di aberrazioni che potrebbero influire sulla qualità visiva durante queste condizioni di scarsa luminosità. [41]

Inoltre, ci si è focalizzati sullo studio delle aberrazioni misurate senza e con correzione oftalmica indossata dai soggetti durante l'esame aberrometrico, poiché ad oggi non esiste descritta questa pratica in letteratura.

4. MATERIALI E METODI

4.1 Criteri di inclusione ed esclusione dei soggetti

È stato condotto uno studio presso il complesso Paolotti sede delle attività del corso di laurea in Ottica e Optometria dell'Università degli Studi di Padova. Hanno partecipato allo studio 54 soggetti volontari per un totale di 108 occhi analizzati.

Sono stati inclusi nello studio :

- Soltanto studenti dell'Università di Padova;
- Sia soggetti con difetti refrattivi che senza;
- Soggetti che presentavano patologie o anomalie oculari o che hanno subito interventi oculari.

Sono, invece stati esclusi dallo studio:

- I soggetti i cui dati raccolti risultavano incompleti o palesemente non veritieri per cause quali artefatti della strumentazione utilizzata;
- Soggetti che non hanno firmato il modulo privacy.

Il campione è composto da soggetti giovani e in condizioni medie, con correzione ottica se necessaria, con un quadro aberrazionale naturale e non alterato da tecniche quali chirurgia refrattiva o ortocheratologia. Pertanto, è comprensibile non risultino elevate variazioni di vari parametri come RMS o acuità.

4.2 Strumentazione utilizzata

Per questo studio è stata utilizzata la strumentazione disponibile nei laboratori del corso di laurea in Ottica e Optometria dell'Università degli studi di Padova.

In particolare, sono stati utilizzati:

- Un computer su cui è stato precedentemente installato il software FrACT utilizzato per prendere le misure dell'acuità visiva e della sensibilità al contrasto;

- Un occlusore;
- Stereotest Lang II;
- Aberrometro Carl Zeiss i.Profiler con integrata tecnologia Shack-Hartmann;
- Un frontofocometro automatico per la rilevazione della correzione abituale utilizzata dai soggetti coinvolti nello studio.

4.3 Protocollo

Tutti i soggetti hanno seguito un ben preciso protocollo precedentemente creato appositamente per il presente studio sulla base della strumentazione e degli spazi disponibili oltre che delle condizioni generali del laboratorio utilizzato durante tutto il periodo di raccolta dati.

Il protocollo a cui sono stati sottoposti tutti i partecipanti è il seguente:

1. Misurazione dell'acuità visiva monoculare con correzione abituale in condizione di luce e di buio
2. Misurazione della sensibilità al contrasto monoculare con correzione abituale in condizione di luce e di buio
3. Stereopsi
4. Aberrometria
5. Questionario sull'anamnesi e sulla visione notturna (*Appendice*)

Inoltre, è stato chiesto a tutti i soggetti di firmare il modulo privacy con il quale venivano anche informati sull'intera procedura appena esposta. (*Appendice*)

Descriviamo di seguito nel dettaglio i vari step seguiti per la raccolta dati di ciascun soggetto:

1. Acuità visiva (AV)

Per l'acquisizione dell'acuità visiva è stato impiegato il software FrACT (Fig. 10). Il software implementa un test psicofisico ottimizzato per convergere rapidamente ad una stima dell'acuità visiva e della sensibilità al contrasto del soggetto. La progressione degli ottotipi si basa su un approccio bayesiano ed è determinata da una strategia Best-PEST opportunamente modificata. [42]

Prima di iniziare ad utilizzare il software è stata fatta la linearizzazione della luminanza (gamma del monitor) e regolata la grandezza delle mire tramite le impostazioni del programma perché fossero in linea con lo schermo del computer che è stato utilizzato per tutto il periodo della raccolta dati. È stata, inoltre, disabilitata la funzionalità del feedback sonoro che è attiva di default a meno di cambiare le impostazioni manualmente.

Sono state scelte le mire alfabetiche per rilevare l'acutezza visiva, in particolare veniva mostrato al partecipante una riga alla volta composta da 5 lettere, il soggetto doveva determinare soltanto la lettera centrale ignorando le altre che avevano un ruolo di affollamento.

Ogni misurazione prevedeva la proposta della mira test in 15 tentativi, al termine dei quali il software forniva automaticamente il valore dell'acutezza visiva, sia in valore decimale che in logMAR.

Ad ogni partecipante veniva dato un occlusore da tenere alternativamente tra i due occhi per permettere la rilevazione delle misurazioni monocularmente.

Le misurazioni sono state fatte ad una distanza di 3 m prima in condizioni di buio e successivamente in condizioni di luce e sempre facendo indossare al soggetto, quando presenti, la correzione abituale o le lenti a contatto.

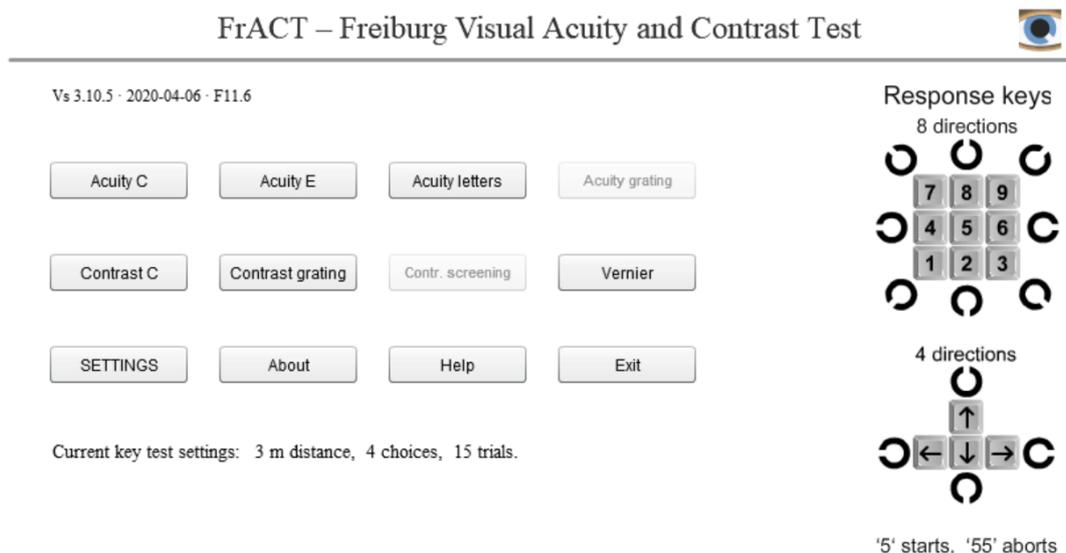


Figura 10: schermata principale del software FrACT utilizzato in questo studio.

2. Sensibilità al contrasto (SC)

Per l'acquisizione della sensibilità al contrasto è stato utilizzato nuovamente il software FrACT, in particolare è stata utilizzata la funzione "Contrast C". La dimensione della mira utilizzata è di 50 primi d'arco come vediamo indicato nelle impostazioni del software (fig. 11).

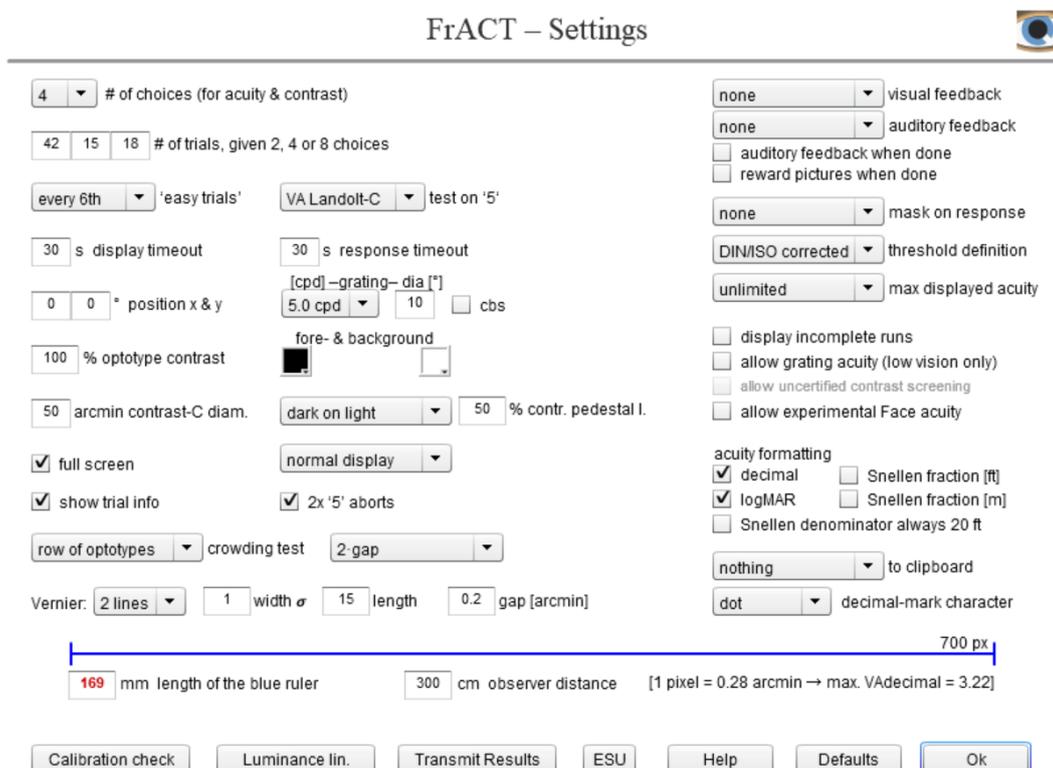


Figura 11: impostazioni del software FrACT.

Ai soggetti veniva proposta la C di Landolt in 4 diverse posizioni, ovvero con l'apertura in alto, in basso, a destra o a sinistra. (Fig. 12) Anche in questo caso sono stati fatti 15 tentativi per ciascuna misurazione, al termine dei quali il software forniva automaticamente il valore della sensibilità al contrasto in percentuale.

Come per l'acquisizione dell'acuità visiva anche in questo caso ad ogni partecipante veniva fornito un occlusore da tenere alternativamente tra i due occhi per permettere la rilevazione delle misurazioni monocularmente.

Le misurazioni sono state fatte ad una distanza di 3 m prima in condizioni di buio e successivamente in condizioni di luce e sempre facendo indossare al soggetto, quando presenti, la correzione abituale o le lenti a contatto.



Figura 12: C di Landolt per la misurazione della SC di dimensioni 50 primi d'arco. In questo caso l'apertura è verso destra.

3. Stereopsi

Il test della stereopsi va ad indagare la capacità di visione binoculare dei soggetti. In questo studio è stato utilizzato un test a immagini randomizzate, in particolare il test di Lang II (1983). Questo test si basa su una presentazione panografica di un “random dots stereogram” (stereogrammi con punti distribuiti casualmente). Ciascun occhio vede parallaticamente due immagini diverse disegnate in cilindretti laminati nella faccia del cartoncino.

La stereopsi viene misurata in secondi d'arco, più è basso tale valore più è elevata la stereopsi. Nel Lang II vengono presentate 4 immagini: la stella (è un'immagine di controllo che può essere vista anche monocolarmente), l'elefante (600 secondi d'arco), l'automobile (400 secondi d'arco) e la luna (200 secondi d'arco). Escludendo la stella, le altre tre immagini non possono essere percepite se guardate monocolarmente; invece, in visione binoculare con entrambi gli occhi aperti le immagini appaiono in rilievo rispetto al piano del cartoncino. [43]

Il test è stato somministrato ai partecipanti del presente studio per escludere dal campione i soggetti con visione binoculare anomala che avrebbero potuto alterare la relazione con la valutazione dei sintomi dal momento che hanno un'anomala percezione della profondità dello spazio.

Il test è stato eseguito con la correzione abituale indossata dai soggetti, se presente (Fig. 13).



Figura 13: stereotest Lang II

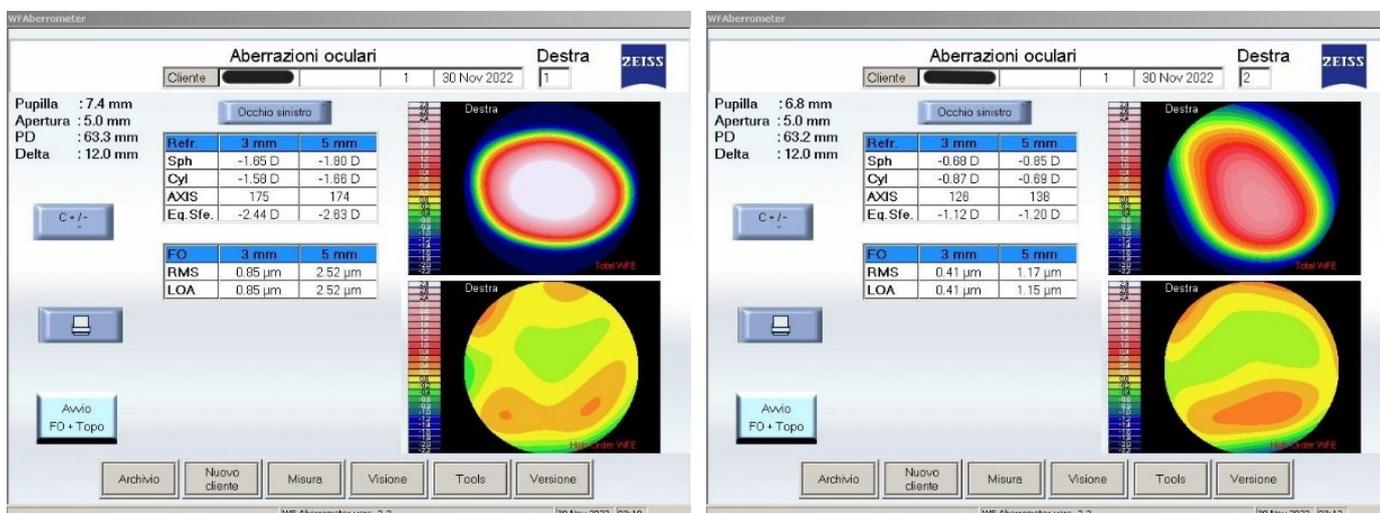
4. Aberrometria

L'acquisizione dell'aberrometria è stata fatta in condizioni di semi oscurità.

Per i soggetti che portavano la correzione abituale, è stata presa prima la misurazione senza correzione, e successivamente una seconda misurazione con la correzione indossata.

Tra i vari dati che ci fornisce l'aberrometria è di nostro interesse il parametro RMS corneale e totale, sono state prese le misure sia per i 3 mm che per i 5 mm.

I dati sono stati raccolti sotto forma di immagini Jpeg, ne vediamo alcuni esempi nella figura 14.



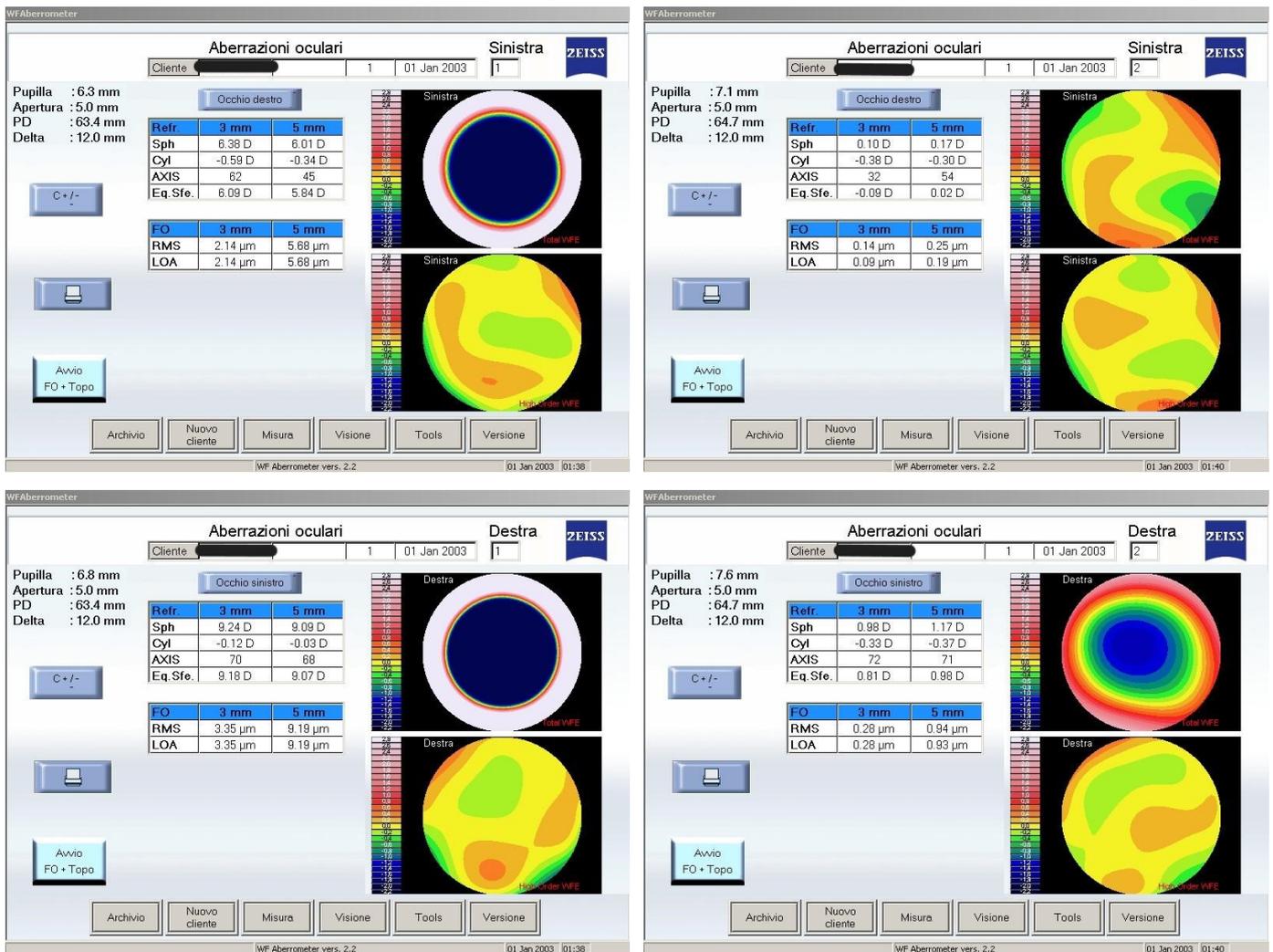


Figura 14: a sinistra aberrometrie totali di 3 occhi senza correzione, a destra aberrometrie totali degli stessi occhi con correzione oftalmica indossata.

5. Questionario sull'anamnesi e sulla visione notturna

È stato chiesto a tutti i partecipanti di compilare un questionario suddiviso in 4 parti:

1. Anamnesi
2. Questionario QoV (Quality of Vision Questionnaire) [44]

È stata fornita ad ogni partecipante anche una scheda con le immagini dei primi 7 sintomi indagati dal questionario QoV.

I sintomi indagati sono 10, li elenchiamo di seguito:

- Abbagliamento
- Aloni
- Luci a raggiera
- Visione annebbiata
- Visione sfuocata
- Deformazione
- Visione doppia
- Fluttuazioni
- Difficoltà di messa a fuoco
- Difficoltà nella percezione della distanza o profondità

Per ciascuno di essi i partecipanti dovevano valutare 3 parametri: la frequenza, la gravità e il fastidio in condizioni notturne. Nella tabella III sono indicati i punteggi attribuiti per ciascun parametro.

Il punteggio finale è stato calcolato sommando tutti i punti del questionario. Il punteggio, quindi, va da un minimo di 30 ad un massimo di 120 punti.

Tabella III: punteggi attribuiti per i parametri indagati nel questionario QoV.

FREQUENZA				GRAVITÀ				FASTIDIO			
Mai	Qualche volta	Abbastanza spesso	Molto spesso	Nessuna	Lieve	Moderata	Severa	Nessuno	Poco	Abbastanza	Molto
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

3. VND-Q (Vision and Night Driving Questionnaire) [45]

Questo secondo questionario proponeva ai partecipanti 11 situazioni da valutare nel contesto della guida notturna. Li riportiamo di seguito:

- Vedere le macchine di colore nero
- Vedere pedoni o animali sul lato della strada
- Vedere il marciapiede o le buche della strada
- Leggere i segnali stradali
- Vedere la strada malgrado i fari delle altre macchine in arrivo
- Vedere malgrado l'abbagliamento al tramonto o all'alba
- Vedere malgrado l'abbagliamento causato dai fari delle macchine in arrivo
- Adattamento visivo dopo aver superato i fari delle auto in arrivo
- Giudicare la distanza fino alla curva della strada
- Giudicare la distanza tra la propria macchina e le altre in arrivo
- Vedere la strada in condizioni di pioggia o di maltempo

In questo caso veniva chiesto ai partecipanti di indicare il grado di difficoltà di ciascuna situazione durante la guida notturna.

Nella tabella IV sono indicati i punteggi attribuiti rispettivamente ai diversi gradi di difficoltà. Per ottenere il punteggio finale del questionario sono stati sommati tutti i punti indicati dai partecipanti. Il punteggio, quindi, va da un minimo di 11 ad un massimo di 55 punti.

Tabella IV: punteggi attribuiti ai vari gradi di difficoltà del questionario VND-Q.

Nessuna difficoltà	Lieve difficoltà	Moderata difficoltà	Tanta difficoltà	Estrema difficoltà
1	2	3	4	5

4. Scala Likert

A conclusione del questionario è stato chiesto ai partecipanti di valutare complessivamente il disturbo causato dalla visione durante il crepuscolo o la sera. È stata fornita, quindi, una scala Likert dove i partecipanti dovevano apporre una crocetta **x**. (Fig. 15)

È stata successivamente misurata, con un righello millimetrato, a quale distanza è stata segnata la **x**. Il punteggio in questo caso va da 0 a 95, dove ogni unità corrisponde ad 1 millimetro. [46]

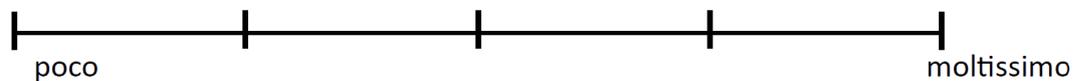


Figura 15: scala Likert. [46]

4.4 Analisi statistica

Per l'analisi statistica è stato utilizzato il software Excel.

Le funzioni che sono state utilizzate per analizzare i dati raccolti sono state:

- Somma
- Media
- Deviazione standard
- Minimo
- Massimo
- Percentuale
- Correlazione

5. RISULTATI

Hanno partecipato a questo studio 54 studenti volontari dell'Università degli Studi di Padova, 19 (35%) maschi e 35 (65%) femmine, per un totale di 108 occhi presi in esame. L'età media del campione è di $21,89 \pm 2,07$ anni (intervallo: 19-28 anni).

Riportiamo di seguito gli errori refrattivi dei 68 occhi su 108 (63%) che presentano una qualsiasi ametropia (Fig. 16):

- 44 (65%) astigmatismo miopico composto
- 13 (19%) miopia
- 5 (7%) astigmatismo ipermetropico composto
- 3 (4%) ipermetropia
- 2 (3%) astigmatismo miopico semplice
- 1 (1%) astigmatismo misto

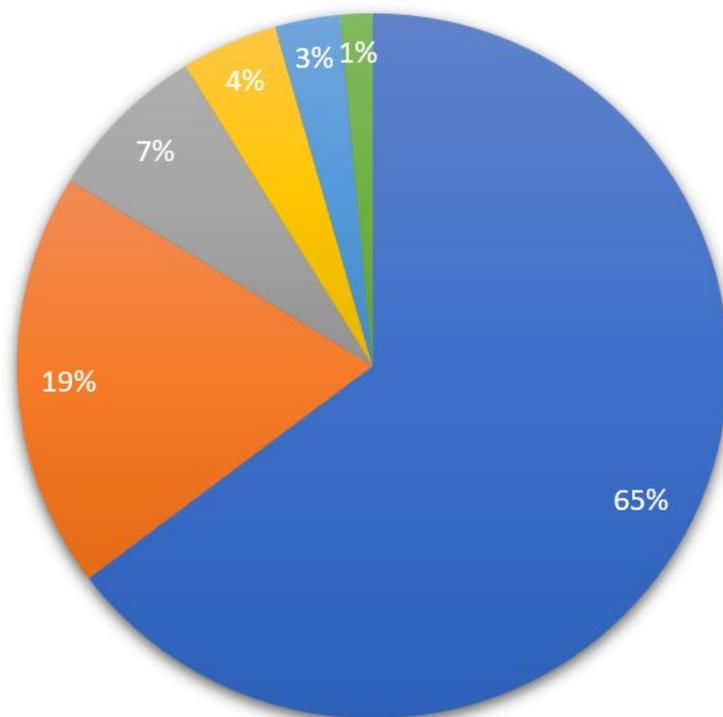


Figura 16: grafico a torta delle ametropie del campione.

Nelle tabelle V e VI sono riportate medie, deviazioni standard, minimi e massimi dei diversi parametri indagati nei punti 1, 2, 4 e 5 del protocollo (rispettivamente acuità visiva, sensibilità al contrasto, RMS, i questionari QoV e VND-Q e la scala Likert).

La stereopsi, terzo punto del protocollo, è risultata essere presente in tutti i soggetti.

Tabella V: media, deviazione standard, minimo e massimo dei vari parametri indagati nel protocollo.

	Media	Dev. standard	Minimo	Massimo
AV buio (decimi)	1,17	0,34	0,22	1,96
AV luce (decimi)	1,29	0,34	0,39	2,07
SC buio	2,18%	0,74	0,62%	4,86%
SC luce	1,86%	0,46	0,75%	3,71%
QoV	46,11	12,18	30	78
VND-Q	20,51	7,11	12	41
Likert	33,67	25,14	0	83

Tabella VI: media, deviazione standard, minimo e massimo dell'indice RMS (sc=senza correzione; cc= con correzione).

		Media	Dev. Standard	Minimo	Massimo
RMS corneale Ø 3mm	sc	0,29	0,15	0,09	0,88
	cc	0,47	0,34	0,11	1,67
RMS corneale Ø 5mm	sc	0,87	0,39	0,34	2,41
	cc	1,57	1,03	0,33	4,50
RMS totale Ø 3mm	sc	0,71	0,60	0,06	3,35
	cc	0,24	0,13	0,08	0,74
RMS totale Ø 5mm	sc	1,93	1,66	0,19	9,19
	cc	0,62	0,36	0,16	1,58

Nella figura 17 sono riportati gli istogrammi delle medie di acuità visiva e sensibilità al contrasto, in particolare vengono messe a confronto le medie ottenute per le misurazioni prese al buio e alla luce.

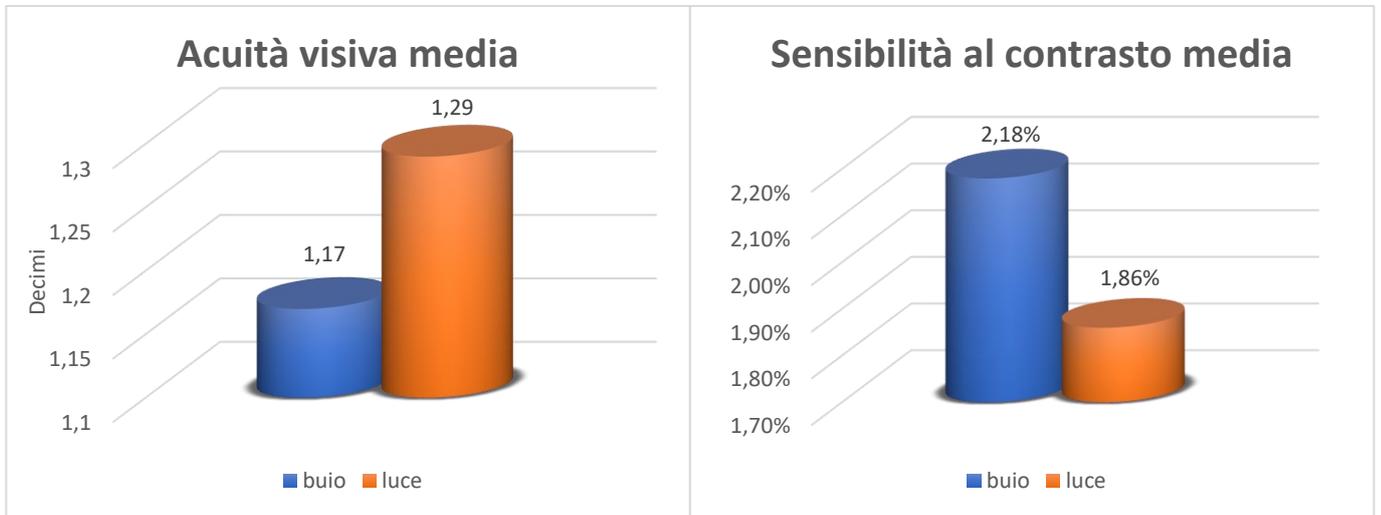


Figura 17: istogrammi delle medie di acuità visiva e sensibilità al contrasto, al buio e alla luce.

Nella figura 18 sono riportate, invece, le medie degli indici RMS, in particolare sono messi a confronto gli RMS presi senza correzione oftalmica e gli RMS presi con correzione.

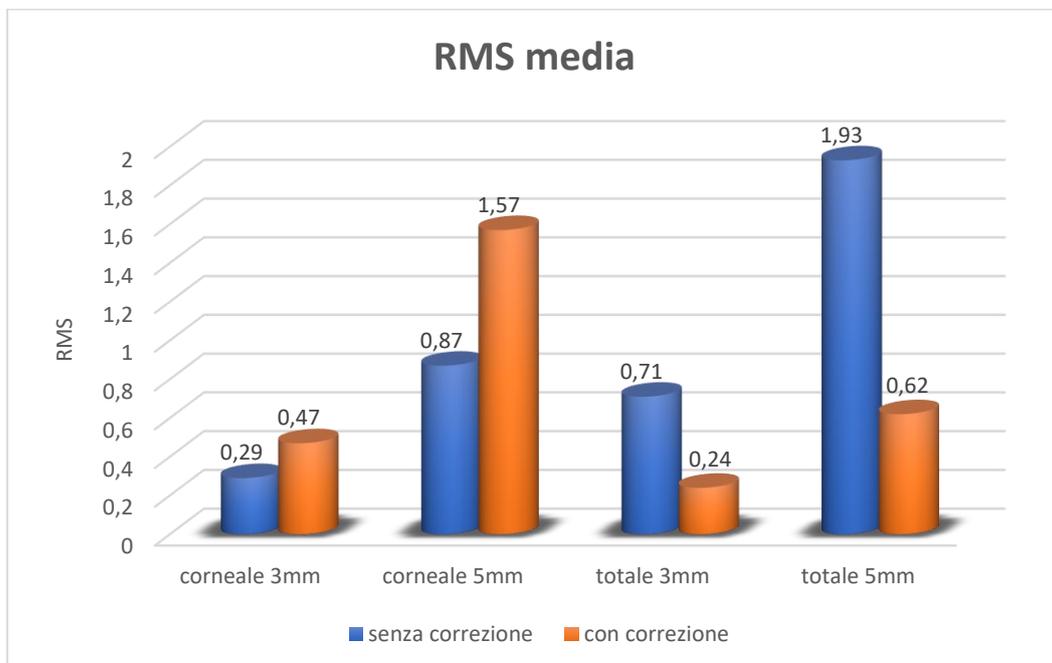


Figura 18: medie degli RMS senza e con correzione oftalmica indossata.

Le risposte date dai soggetti alle domande di anamnesi sono state espresse in percentuali e, per una più facile lettura, sono state organizzate in 3 diagrammi riportati nella figura 19.

Specifichiamo che due soggetti hanno riportato anomalie oculari, in entrambi i casi si trattava di esotropia. Entrambi i soggetti sono, inoltre stati operati di strabismo in passato.

Altri due soggetti hanno riportato interventi oculari:

- Un partecipante ha subito un intervento di chirurgia refrattiva (SMILE)
- Un partecipante ha subito un intervento agli epicanti oculari

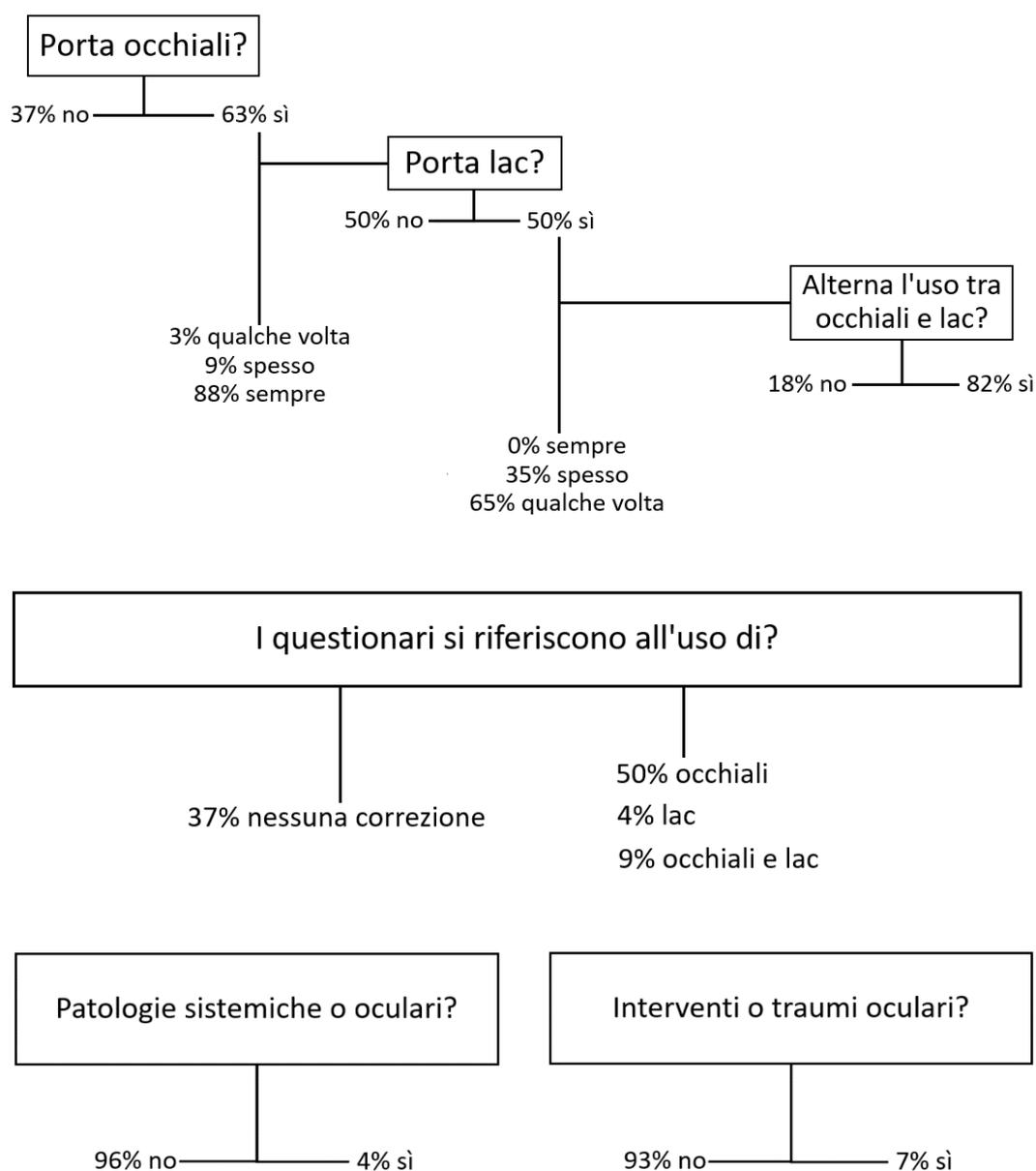


Figura 19: risultati dell'anamnesi espressi in percentuali.

5.1 Correlazioni

Il coefficiente di correlazione di Pearson tra due variabili statistiche è un indice che esprime un'eventuale relazione di linearità tra esse. Può assumere un valore compreso tra -1 e +1, dove -1 corrisponde a una perfetta correlazione lineare negativa (variabili inversamente correlate), 0 corrisponde a un'assenza di correlazione lineare (variabili non correlate) e +1 corrisponde a una perfetta correlazione lineare positiva (variabili direttamente correlate). In caso di correlazione positiva (con valore compreso tra 0 e +1) si potrà osservare che le due variabili tendono ad aumentare in parallelo; invece, in caso di correlazione negativa (con valore compreso tra 0 e -1) si osserverà che all'aumentare di una variabile ci sarà una tendenza a diminuire dell'altra.

Gli intervalli comunemente assunti per discutere la correlazione sulla base del modulo del coefficiente di correlazione sono: 0-0.3 correlazione debole, 0.3-0.7 correlazione moderata, 0.7-1 correlazione forte. [47]

A partire dai diversi dati raccolti per il presente studio sono state fatte numerose correlazioni di Pearson allo scopo di indagare eventuali correlazioni lineari tra le variabili che di volta in volta sono state prese in esame. Riportiamo in questo capitolo i risultati delle correlazioni indagate, mentre l'interpretazione e la discussione degli stessi verrà affrontata nel capitolo successivo.

Si è voluto indagare innanzitutto se c'è correlazione tra gli indici RMS delle aberrazioni con i diversi parametri misurati. Di seguito sono riportate alcune tabelle dove è esplicitato il coefficiente di correlazione tra i fattori presi in esame e l'RMS (tabelle dalla VII alla XII).

Per calcolare le varie correlazioni sono stati utilizzati i seguenti indici RMS:

- RMS corneale, Ø 3 mm
- RMS corneale, Ø 5 mm
- RMS totale, Ø 3 mm
- RMS totale, Ø 5 mm

Dal momento che sono state prese le misure dell'indice RMS sia senza correzione oftalmica che con, è stata mantenuta questa distinzione anche nel ricercare le correlazioni. Pertanto, le correlazioni in cui sono stati considerati

gli RMS presi con correzione si riferiscono esclusivamente al 63% dei soggetti (68 occhi in totale) che portano abitualmente la correzione.

Specifichiamo, inoltre, che 3 partecipanti non hanno compilato il questionario VND-Q perché non guidano, in questo caso i 3 partecipanti sono stati esclusi dallo studio di questa specifica correlazione.

Tabella VII: correlazione tra RMS ed età.

	Età	
	Senza correzione	Con correzione
RMS corneale, Ø 3mm	0,1932	0,0529
RMS corneale, Ø 5mm	0,2384	0,0713
RMS totale, Ø 3mm	0,0341	-0,1663
RMS totale, Ø 5mm	0,0888	0,0246

Tabella VIII: correlazione tra RMS e questionario QoV.

	QoV	
	Senza correzione	Con correzione
RMS corneale, Ø 3mm	-0,2052	-0,1120
RMS corneale, Ø 5mm	-0,1781	0,0030
RMS totale, Ø 3mm	0,0008	0,0858
RMS totale, Ø 5mm	-0,0007	0,0564

Tabella IX: correlazione tra RMS e questionario VND-Q.

	VND-Q	
	Senza correzione	Con correzione
RMS corneale, Ø 3mm	-0,1806	-0,1409
RMS corneale, Ø 5mm	-0,1657	-0,0993
RMS totale, Ø 3mm	0,2343	0,0551
RMS totale, Ø 5mm	0,2297	0,0329

Tabella X: correlazione tra RMS e scala Likert.

	Likert	
	Senza correzione	Con correzione
RMS corneale, Ø 3mm	-0,1226	-0,0314
RMS corneale, Ø 5mm	-0,1146	0,0755
RMS totale, Ø 3mm	0,1852	-0,0517
RMS totale, Ø 5mm	0,1912	0,1441

Tabella XI: correlazione tra RMS e acuità visiva (misurata in decimi).

	AV (decimi)			
	Senza correzione		Con correzione	
	Buio	Luce	Buio	Luce
RMS corneale, Ø 3mm	-0,1291	-0,1233	-0,3205	-0,2873
RMS corneale, Ø 5mm	-0,1486	-0,1267	-0,3610	-0,2727
RMS totale, Ø 3mm	-0,1179	-0,1213	-0,3534	-0,2298
RMS totale, Ø 5mm	-0,1108	-0,1122	-0,3827	-0,2975

Tabella XII: correlazione tra RMS e sensibilità al contrasto.

	SC			
	Senza correzione		Con correzione	
	Buio	Luce	Buio	Luce
RMS corneale, Ø 3mm	-0,0146	-0,0651	-0,1704	-0,0243
RMS corneale, Ø 5mm	-0,0745	-0,0787	-0,2179	-0,0697
RMS totale, Ø 3mm	-0,1271	-0,1567	-0,0073	-0,0902
RMS totale, Ø 5mm	-0,1126	-0,1588	-0,1112	-0,1550

Altre correlazioni che sono state fatte vanno ad indagare l'eventuale esistenza di una correlazione tra il diametro pupillare e l'entità dell'indice RMS con e senza correzione oftalmica. Riportiamo i risultati nelle figure 20 e 21 con i relativi grafici di dispersione.

SENZA CORREZIONE	RMS corneale Ø 5mm	RMS totale Ø 5mm
RMS corneale Ø 3mm	0,9551	
RMS totale Ø 3mm		0,9914

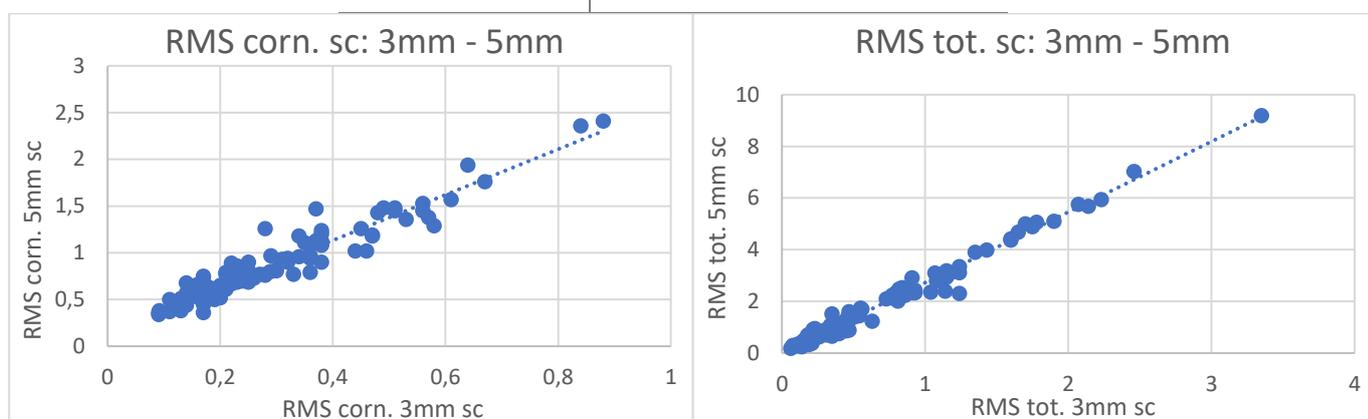


Figura 20: correlazione tra gli RMS all'aumentare della pupilla da 3mm a 5mm, corneali e totali, senza correzione e relativi grafici di dispersione (corn. = corneale; sc = senza correzione).

CON CORREZIONE	RMS corneale Ø 5mm	RMS totale Ø 5mm
RMS corneale Ø 3mm	0,8870	
RMS totale Ø 3mm		0,6919

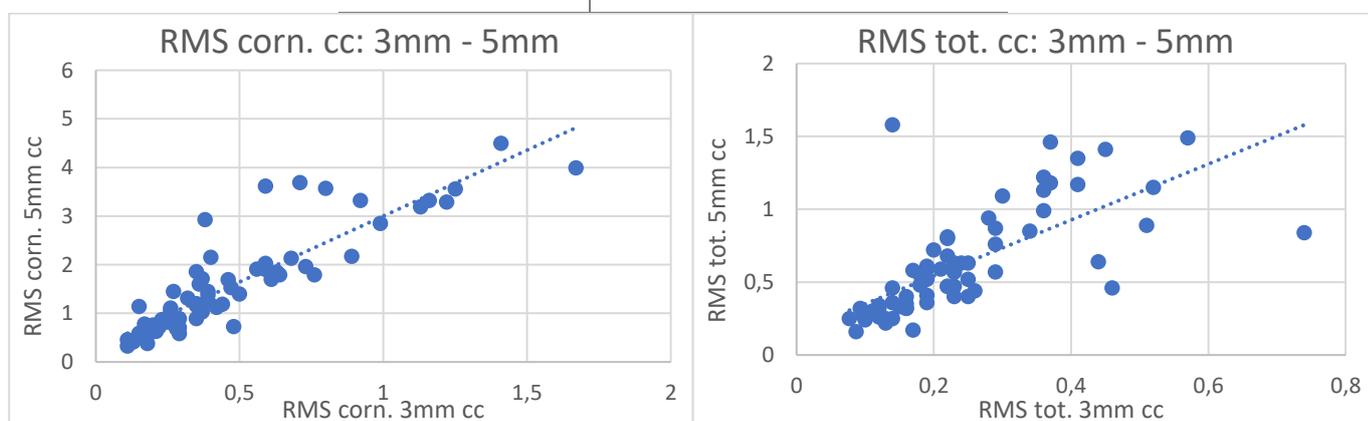


Figura 21: correlazione tra gli RMS all'aumentare della pupilla da 3mm a 5mm, corneali e totali, con correzione e relativi grafici di dispersione (corn. = corneale; cc = con correzione).

Sono state indagate le correlazioni tra gli RMS con pupilla dello stesso diametro (3mm e 5mm) con e senza correzione oftalmica. Riportiamo i risultati nella tabella XIII, mentre nella figura 22 sono riportati i relativi grafici di dispersione.

Tabella XIII: correlazione tra gli RMS con e senza correzione oftalmica indossata.

		Senza correzione			
		RMS corneale Ø 3mm	RMS corneale Ø 5mm	RMS totale Ø 3mm	RMS totale Ø 5mm
Con correzione	RMS corneale Ø 3mm	0,7160			
	RMS corneale Ø 5mm	0,6740			
	RMS totale Ø 3mm	0,2278			
	RMS totale Ø 5mm	0,3277			

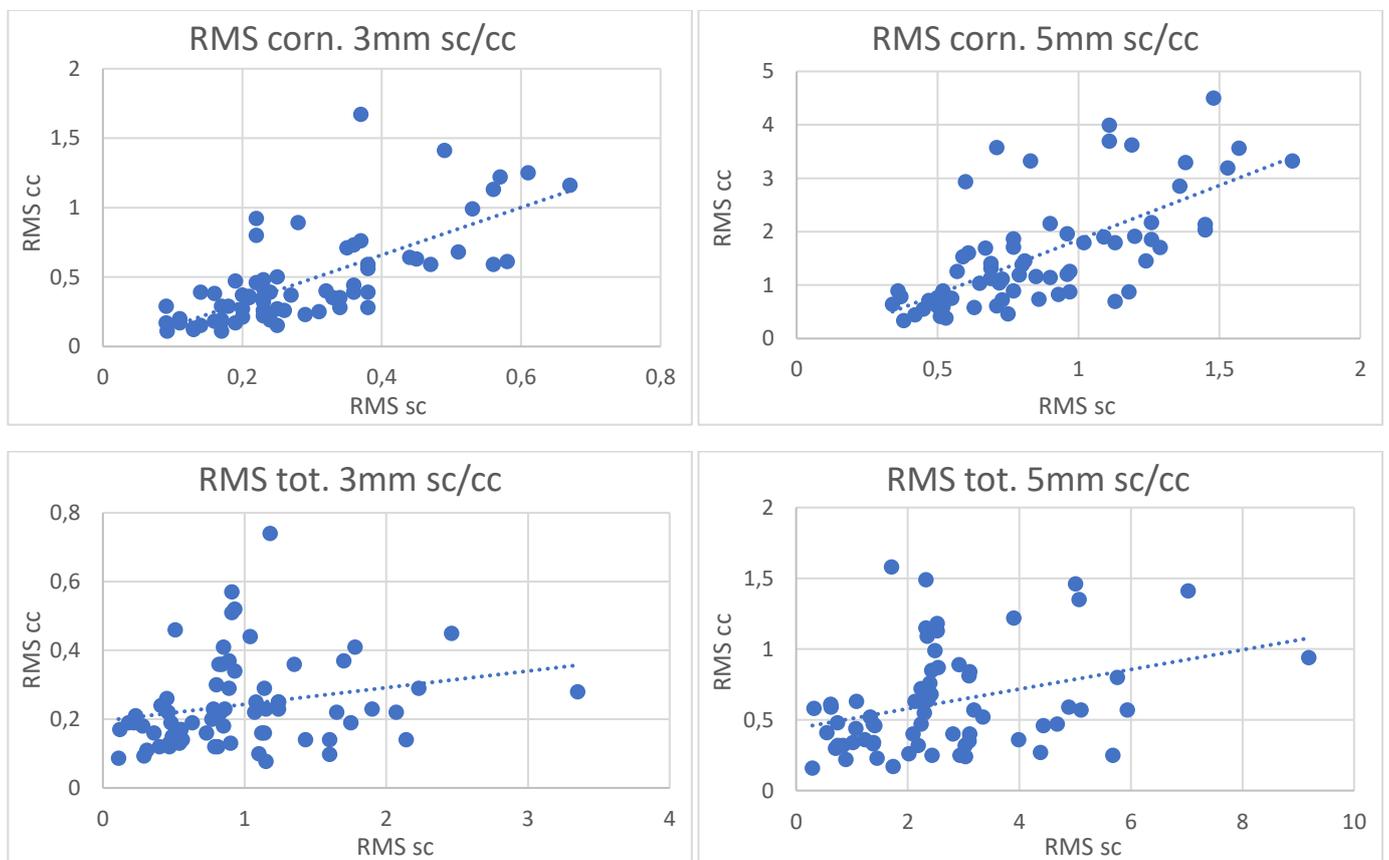


Figura 22: grafici di dispersione relativi alle correlazioni tra tra gli RMS con e senza correzione oftalmica indossata (sc = senza correzione; cc = con correzione; cor. = corneale; tot. = totale).

Nella figura 23 è stata riportata la variazione dell'indice RMS misurato con e senza correzione oftalmica per i 68 occhi che portano abitualmente la correzione, sia nel caso delle aberrazioni corneali (con diametro 3mm e 5mm) sia nel caso delle aberrazioni totali (con diametro 3mm e 5mm).

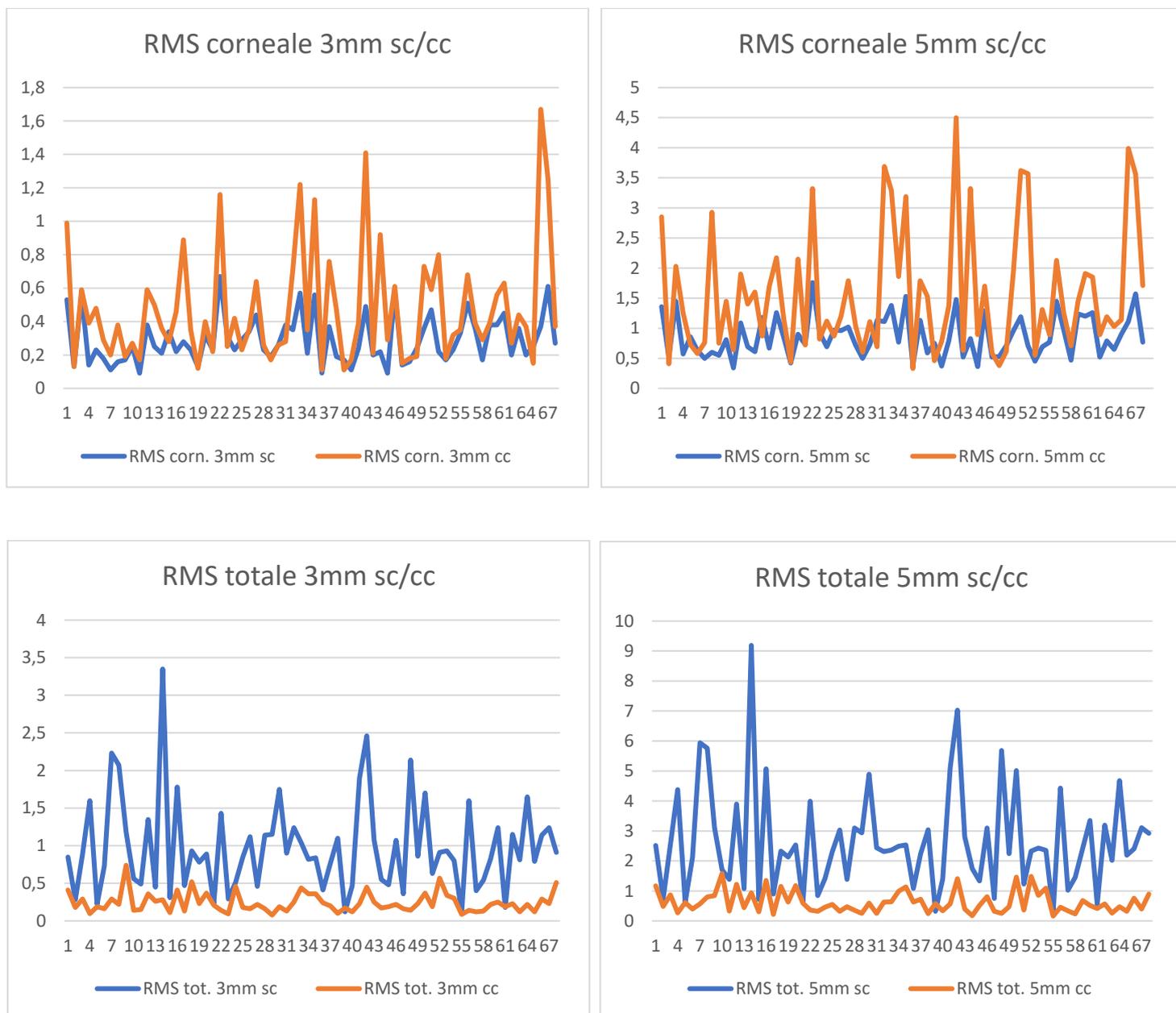


Figura 23: variazione dell'RMS con e senza correzione. Sull'asse delle ordinate è stato posto l'indice RMS, mentre sull'asse delle ascisse tutti gli occhi valutati sia senza correzione che con (68 occhi in totale). La linea blu indica l'RMS preso senza correzione, la linea arancione indica l'RMS preso con correzione indossata (sc = senza correzione; cc = con correzione; cor. = corneale; tot. = totale).

Si è voluto indagare successivamente l'eventuale esistenza di correlazioni tra i vari parametri misurati (età, questionari sulla visione notturna, acuità visiva, sensibilità al contrasto) e il Δ RMS.

Con la terminologia Δ RMS intendiamo la differenza, in valore assoluto, tra gli indici RMS calcolata per ciascun occhio. Si è calcolata la differenza tra i seguenti indici RMS:

- RMS corneali 3mm e RMS corneali 5mm (senza e con correzione)
- RMS totali 3mm e RMS totali 5mm (senza e con correzione)
- RMS 3mm corneali e RMS 3mm totali (senza e con correzione)
- RMS 5mm corneali e RMS 5mm totali (senza e con correzione)

Nella tabella XIV sono riportate medie, deviazioni standard, minimi e massimi dei diversi Δ RMS calcolati.

Tabella XIV: medie, deviazioni standard, minimi e massimi dei Δ RMS.

		Media	Dev. Standard	Minimo	Massimo
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	sc	0,58	0,25	0,19	1,53
	cc	1,10	0,75	0,20	3,09
ΔRMS totale 3mm - 5mm	sc	1,22	1,07	0,11	5,84
	cc	0,38	0,29	0,00	1,44
ΔRMS 3mm corneale - totale	sc	0,50	0,55	0,00	3,14
	cc	0,28	0,29	0,01	1,38
ΔRMS 5mm corneale -totale	sc	1,31	1,50	0,03	8,58
	cc	0,98	0,93	0,01	3,26

Nella figura 24 è riportato l'istogramma che illustra le medie dei Δ RMS, sono messe a confronto le medie senza correzione oftalmica con quelle con correzione.

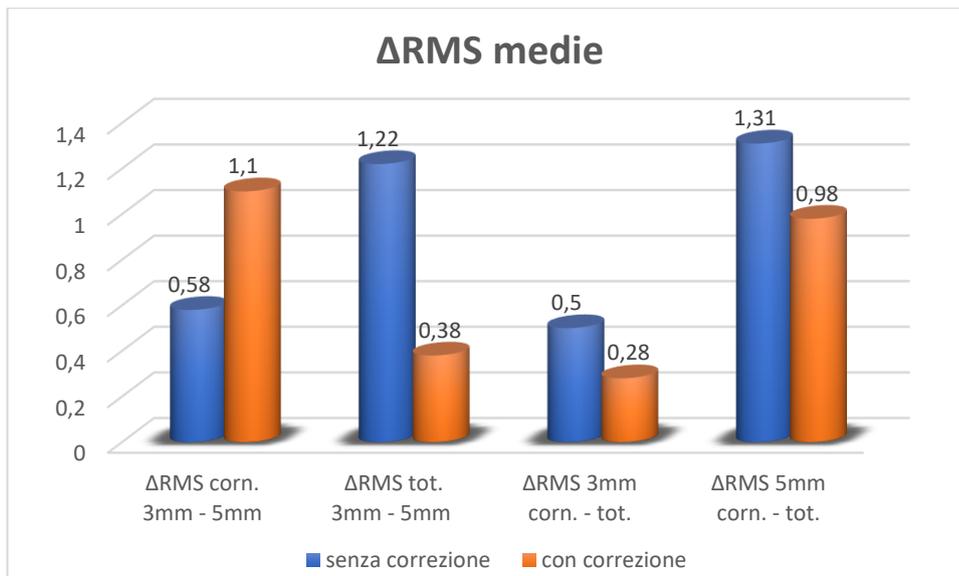


Figura 24: istogramma relativo alle medie dei ΔRMS senza e con correzione oftalmica.

Nelle seguenti tabelle (dalla XV alla XX) riportiamo i coefficienti di correlazione tra i ΔRMS e i parametri man mano presi in considerazione (rispettivamente età, questionario QoV, questionario VND-Q, scala Likert, acuità visiva e sensibilità al contrasto).

Tabella XV: correlazione tra i ΔRMS e l'età.

	Età	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	0,2556	0,0744
ΔRMS totale 3mm - 5mm	0,1190	0,1065
ΔRMS 3mm corneale - totale	0,0444	0,0717
ΔRMS 5mm corneale - totale	0,0695	0,0677

Tabella XVI: correlazione tra i Δ RMS e il questionario QoV.

	QoV	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	-0,1535	0,0546
ΔRMS totale 3mm - 5mm	-0,002	0,0321
ΔRMS 3mm corneale - totale	0,0510	-0,1708
ΔRMS 5mm corneale - totale	0,0528	-0,0416

Tabella XVII: correlazione tra i Δ RMS e il questionario VND-Q.

	VND-Q	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	-0,1497	-0,0735
ΔRMS totale 3mm - 5mm	0,2252	0,0150
ΔRMS 3mm corneale - totale	0,2514	-0,1975
ΔRMS 5mm corneale - totale	0,2651	-0,1438

Tabella XVIII: correlazione tra i Δ RMS e la scala Likert.

	Likert	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	-0,1046	0,1182
ΔRMS totale 3mm - 5mm	0,1931	0,2048
ΔRMS 3mm corneale - totale	0,2157	-0,1279
ΔRMS 5mm corneale - totale	0,2196	0,0012

Tabella XIX: correlazione tra i Δ RMS e l'acuità visiva (misurata in decimi).

	AV (decimi)			
	Senza correzione		Con correzione	
	Buio	Luce	Buio	Luce
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	-0,1540	-0,1232	-0,3530	-0,2463
ΔRMS totale 3mm - 5mm	-0,1060	-0,1061	-0,3214	-0,2702
ΔRMS 3mm corneale - totale	-0,0812	-0,1091	-0,2206	-0,2276
ΔRMS 5mm corneale -totale	-0,0632	-0,0890	-0,2558	-0,2129

Tabella XX: correlazione tra i Δ RMS e la sensibilità al contrasto.

	SC			
	Senza correzione		Con correzione	
	Buio	Luce	Buio	Luce
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	-0,1081	-0,0836	-0,2234	-0,0851
ΔRMS totale 3mm - 5mm	-0,1036	-0,1588	-0,3214	-0,1542
ΔRMS 3mm corneale - totale	-0,1056	-0,1266	-0,2206	-0,0120
ΔRMS 5mm corneale -totale	-0,0938	-0,1381	-0,2558	-0,0216

Si sono poi cercate eventuali correlazioni tra i diversi Δ RMS (con e senza correzione oftalmica indossata) e le seguenti variazioni:

- Δ AV: differenza, in valore assoluto, tra l'acuità visiva al buio e alla luce
- Δ SC: differenza, in valore assoluto, tra la sensibilità al contrasto al buio e alla luce
- Δ (Likert-QoV): differenza, in valore assoluto, tra il punteggio della scala likert e il punteggio del questionario QoV
- Δ (Likert-VND-Q): differenza, in valore assoluto, tra il punteggio della scala Likert e il punteggio del questionario VND-Q

Nella tabella XXI sono riportate medie, deviazioni standard, minimi e massimi delle variazioni appena definite, mentre nella figura 25 troviamo gli istogrammi relativi alle medie.

Tabella XXI: medie, deviazioni standard, minimi e massimi di Δ AV, Δ SC, Δ (Likert-QoV) e Δ (Likert-VND-Q).

	Media	Dev. standard	Minimo	Massimo
Δ AV	0,20	0,16	0	0,71
Δ SC	0,55	0,53	0,01	2,75
Δ (Likert-QoV)	19,85	13,37	1	52
Δ (Likert-VND-Q)	20,76	14,35	1	56

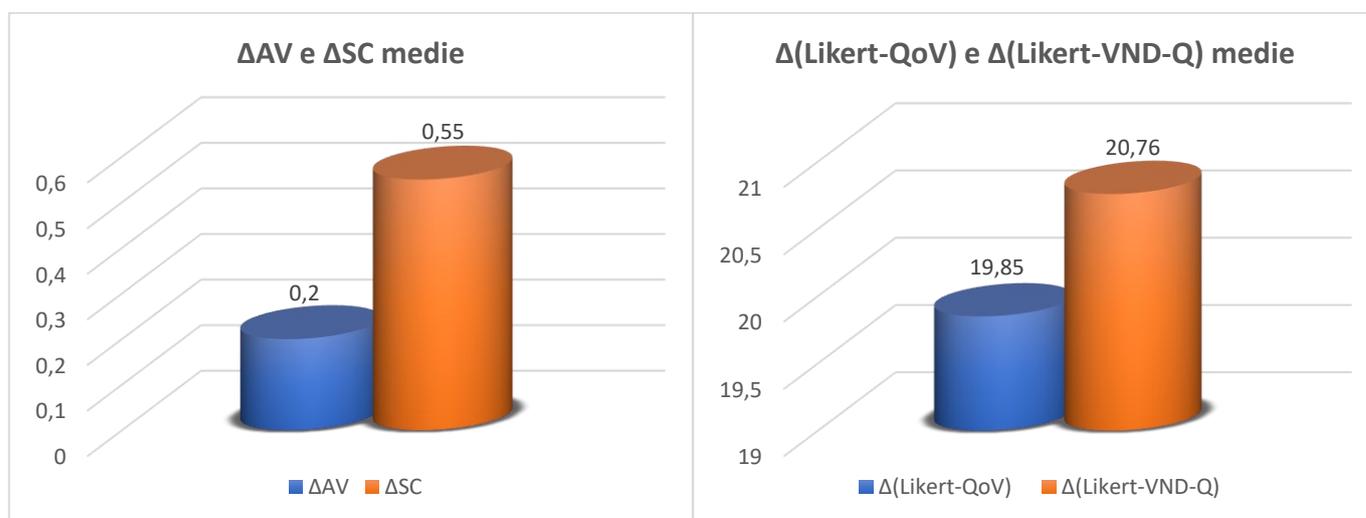


Figura 25: istogrammi che mettono a confronto le medie di Δ AV e Δ SC e le medie di Δ (Likert-QoV) e Δ (Likert-VND-Q).

I risultati delle correlazioni calcolate sono riportati nelle tabelle dalla XXII alla XXV.

Tabella XXII: correlazione tra ΔRMS e ΔAV .

	ΔAV	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	0,2101	0,1212
ΔRMS totale 3mm - 5mm	-0,0563	0,0825
ΔRMS 3mm corneale - totale	-0,1103	0,0684
ΔRMS 5mm corneale - totale	-0,1105	0,0838

Tabella XXIII: correlazione tra ΔRMS e ΔSC .

	ΔSC	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	0,2101	-0,1705
ΔRMS totale 3mm - 5mm	-0,0563	-0,0988
ΔRMS 3mm corneale - totale	-0,1103	-0,1480
ΔRMS 5mm corneale - totale	-0,1105	-0,1578

Tabella XXIV: correlazione tra ΔRMS e Δ (Likert-QoV).

	Δ (Likert-QoV)	
	Senza correzione	Con correzione
ΔRMS corneale 3mm – 5mm	-0,0100	-0,0445
ΔRMS totale 3mm - 5mm	-0,1444	-0,1752
ΔRMS 3mm corneale - totale	-0,1382	0,0084
ΔRMS 5mm corneale - totale	-0,1365	-0,0055

Tabella XXV: correlazione tra Δ RMS e Δ (Likert-VND-Q).

	Δ (Likert-VND-Q)	
	Senza correzione	Con correzione
Δ RMS corneale 3mm – 5mm	-0,1768	0,0487
Δ RMS totale 3mm - 5mm	0,2000	0,3105
Δ RMS 3mm corneale - totale	0,2224	-0,2295
Δ RMS 5mm corneale - totale	0,2354	-0,1195

Infine, si è voluto indagare le correlazioni tra:

- L'acuità visiva al buio e alla luce
- La sensibilità al contrasto al buio e alla luce
- I due questionari sulla visione notturna QoV e VND-Q con la scala Likert

I risultati sono riportati nelle figure 26, 27 e 28 dove, oltre alle correlazioni, sono stati riportati anche i relativi grafici a dispersione.

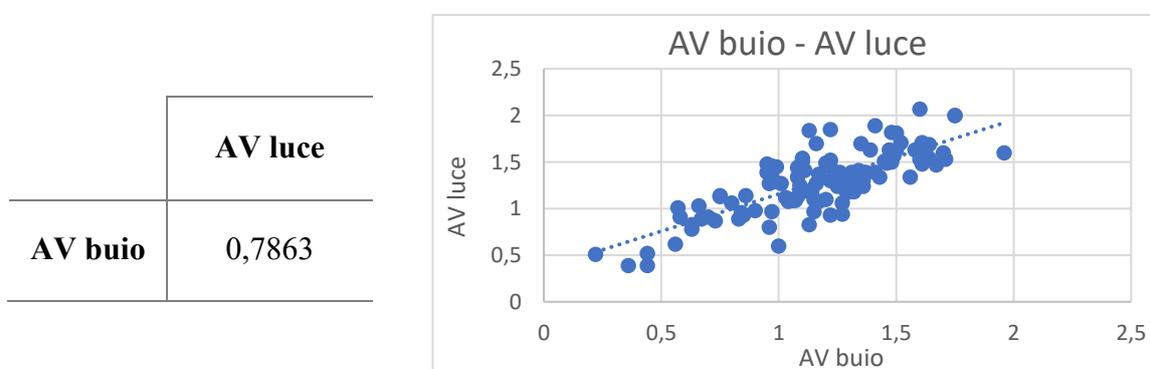


Figura 26 : correlazione tra l'acuità visiva al buio e alla luce e relativo grafico a dispersione.

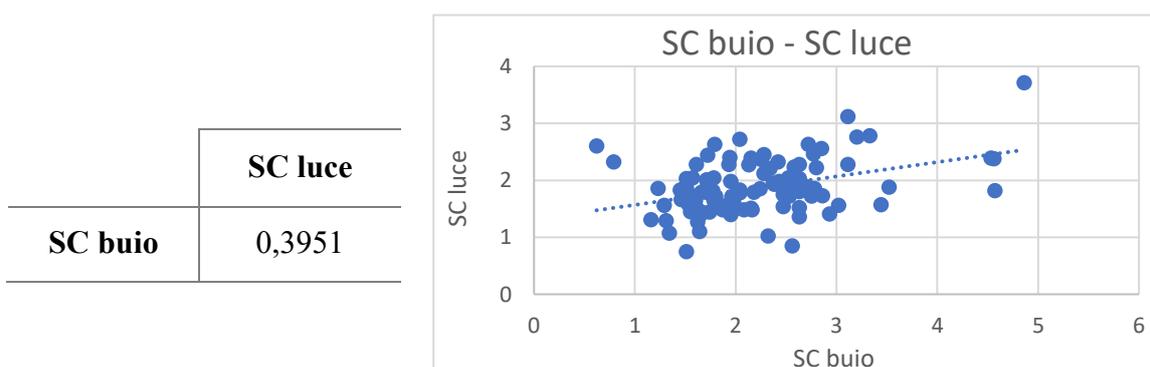


Figura 27: correlazione tra la sensibilità al contrasto al buio e alla luce e relativo grafico a dispersione.

	Likert
QoV	0,5880
VND-Q	0,6236

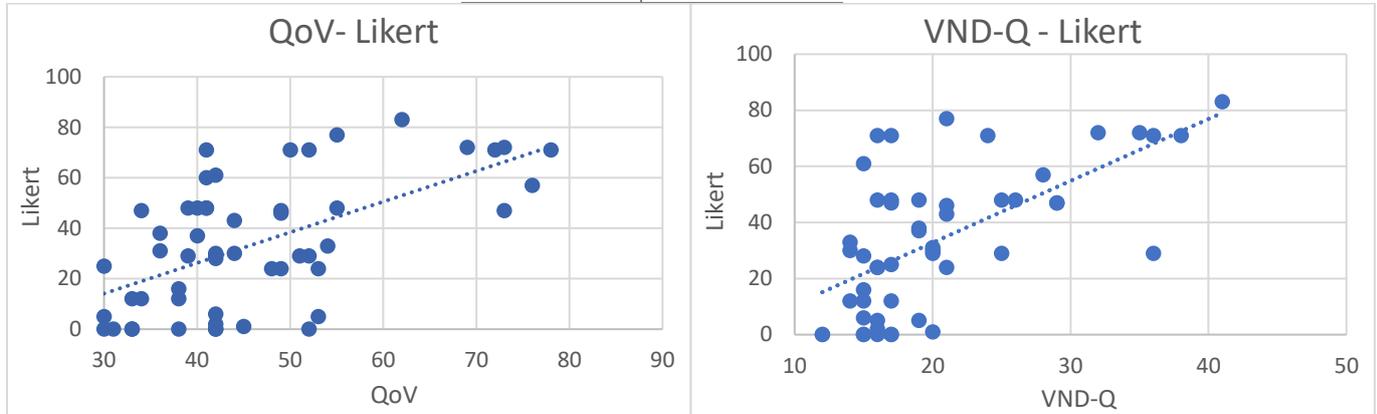


Figura 28: correlazione tra i questionari QoV e VND-Q con la scala Likert, sotto i relativi grafici a dispersione.

Per poter confrontare tra loro i risultati dei due questionari e della scala likert, si è deciso di esprimere in percentuali le relative medie (figura 29).

Ricordiamo qui i punteggi massimi e le medie di ciascun questionario:

- QoV: massimo 120 punti, media 46,11 punti (38,40%)
- VND-Q: massimo 55 punti, media 20,51 punti (37,30%)
- Scala Likert: massimo 95 punti, media 33,67 punti (35,44%)

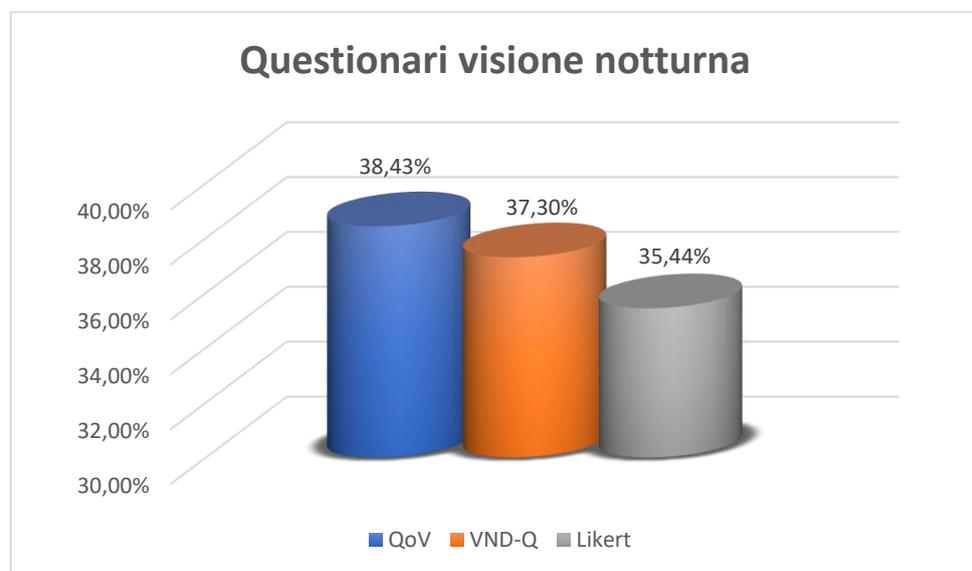


Figura 29: istogramma con le medie dei questionari sulla visione notturna e della scala Likert espresse in percentuali.

6. DISCUSSIONE

Le aberrazioni sono fenomeni complessi ancor oggi non del tutto compresi. Le aberrazioni di basso ordine sono conosciute e compensate da molti secoli ormai. Si stima che le prime lenti oftalmiche siano state inventate nel XIII secolo in Italia e a partire dal XVIII secolo gli occhiali sono diventati, e rimangono tutt'oggi, il più usato sistema di compensazione delle anomalie refrattive, grazie alla comodità, l'assenza di effetti collaterali, l'approfondita conoscenza degli effetti ottico refrattivi, le varie possibilità offerte dalle lenti (per es. lenti multifocali) e dalle forme delle montature. [48]

Le aberrazioni di alto ordine invece, sono ancor'oggi oggetto di studio poiché risultano essere di difficile compensazione con le tecnologie attuali. Questo tipo di aberrazioni si manifestano solitamente in soggetti sottoposti a chirurgia refrattiva o che presentano patologie oculari (per es. cheratocono [49] [50]).

Esiste una stretta relazione tra le aberrazioni e la qualità visiva dei soggetti. Una grande quantità di aberrazioni comporta una degradazione della qualità dell'immagine, degradazione che dipende sia dal tipo di aberrazioni presenti che dalla loro quantità.

Abbiamo voluto indagare in questo studio le possibili relazioni esistenti tra le aberrazioni e la visione notturna perché la notte è il periodo della giornata in cui le aberrazioni tipicamente aumentano a causa della dilatazione della pupilla. Inoltre, ci si è focalizzati sullo studio delle aberrazioni misurate senza e con correzione oftalmica indossata dai soggetti durante l'esame aberrometrico poiché ad oggi non esiste descritta questa procedura in letteratura.

Lo studio ha coinvolto 54 soggetti volontari, tutti studenti dell'Università degli Studi di Padova, per un totale di 108 occhi analizzati. La raccolta dati ha avuto luogo nei laboratori del corso di laurea in Ottica e Optometria dell'Università degli Studi di Padova. Sulla base della strumentazione e degli spazi disponibili è stato creato un protocollo ad hoc a cui sono stati sottoposti tutti i partecipanti.

Il protocollo è il seguente:

1. Misurazione dell'acuità visiva monoculare con correzione abituale in condizione di luce e di buio
2. Misurazione della sensibilità al contrasto monoculare con correzione abituale in condizione di luce e di buio
3. Stereopsi
4. Aberrometria
5. Questionario sull'anamnesi e sulla visione notturna (*Appendice*)

6.1 Analisi delle correlazioni

In questo studio sono state calcolate e analizzate diverse correlazioni, per l'analisi delle stesse è stato utilizzato il coefficiente di correlazione di Pearson (r). Gli intervalli utilizzati per discutere le correlazioni, sulla base del modulo dei coefficienti di correlazione, sono: 0-0.3 correlazione debole, 0.3-0.7 correlazione moderata, 0.7-1 correlazione forte.

Discutiamo di seguito tutte le correlazioni che sono state calcolate, nello stesso ordine in cui sono state presentate nel precedente capitolo dei risultati.

Correlazione tra RMS (con e senza correzione) ed età: tutte le correlazioni risultano essere correlazioni deboli ($|r| < 0.3$). Il risultato è atteso in quanto il campione del presente studio è composto da giovani adulti (età media: 21.89 ± 2.07 anni; intervallo 19-28 anni), mentre si osserva un aumento dell'RMS nelle persone anziane soprattutto a causa di un aumento del coma e dell'aberrazione sferica. [51] Teniamo presente, inoltre, che le aberrazioni in relazione all'età sono estremamente variabili a livello individuale (Tabella VII).

Correlazioni tra RMS (con e senza correzione) e questionari notturni (QoV e VND-Q) e scala Likert: tutte le correlazioni sono correlazioni deboli ($|r| < 0.3$). In questo caso ci si sarebbe potuto aspettare una correlazione lineare moderata o forte con i questionari, ipotizzando che i soggetti con un elevato indice RMS facessero anche un punteggio alto nei questionari lamentando un discomfort visivo notturno. Il fatto di non aver trovato questa correlazione si può spiegare osservando meglio il campione in esame, in quanto si tratta di un gruppo di giovani adulti che non presenta in generale alcun quadro aberrazionale

problematico. Inoltre, mediamente i punteggi dei questionari e della scala Likert non sono alti, infatti, in tutti e tre i casi il punteggio medio si attesta tra il 35% e il 40% dei punteggi massimi possibili (Tabelle VIII, IX e X).

Correlazione tra RMS (con e senza correzione) e acuità visiva (in decimi):

risultano deboli tutte le correlazioni ($|r| < 0.3$), tranne che per gli RMS, presi con correzione, e l'acuità visiva al buio per cui esiste una, seppur moderata, correlazione negativa (il coefficiente di correlazione è, in modulo, di poco al di sopra lo 0.3). All'aumentare dell'indice RMS c'è dunque una tendenza a diminuire dell'acuità visiva al buio. Essendo, tuttavia, il coefficiente di correlazione poco al di sopra, in modulo, la soglia dello 0.3, si rendono necessari ulteriori studi che possano confermare o smentire questo dato (Tabella XI).

Correlazione tra RMS (con e senza correzione) e sensibilità al contrasto:

tutte le correlazioni risultano deboli ($|r| < 0.3$). Anche in questo caso il dato è atteso essendo il campione composto da soggetti giovani senza quadri aberrazionali problematici (Tabella XII).

Correlazione tra RMS corneale 3mm e RMS corneale 5mm e tra RMS totale

3mm e RMS totale 5mm: in questo caso si fa riferimento esclusivamente agli RMS presi senza correzione. I coefficienti di correlazione, in entrambi i casi, individuano delle forti correlazioni positive (rispettivamente si ha $r = 0,9551$ e $r = 0,9914$). In altre parole, all'aumentare del diametro pupillare aumentano le aberrazioni sia quelle corneali che quelle totali. Questi dati sono attesi e coerenti con la letteratura [52], inoltre dimostrano l'affidabilità dello strumento utilizzato (Fig. 20).

Correlazione tra RMS corneale 3mm e RMS corneale 5mm e tra RMS totale

3mm e RMS totale 5mm: in questo caso si fa riferimento esclusivamente agli RMS presi con correzione. Anche in questa circostanza i coefficienti di correlazione denotano delle forti correlazioni positive in entrambi i casi anche se più deboli delle precedenti (rispettivamente si ha $r = 0,8870$ e $r = 0,6919$). Era un risultato atteso sia il coefficiente di correlazione tra gli RMS corneali molto simile al precedente, sia il coefficiente di correlazione tra gli RMS totali, invece, più basso. Per quest'ultimo caso dobbiamo tener conto del fatto che le lenti oftalmiche influiscono sulle aberrazioni totali diminuendole; pertanto, all'aumentare del diametro pupillare ci sarà un aumento meno significativo delle

aberrazioni rispetto alle aberrazioni prese senza correzione oftalmica davanti all'occhio (Fig. 21).

Da queste ultime due correlazioni analizzate possiamo affermare che la cornea è la causa prima delle aberrazioni, risultato coerente con la letteratura.

Correlazione tra RMS corneale e totale (con diametro invariato) con e senza correzione: tra gli RMS corneali vi sono delle correlazioni moderate, in particolare il coefficiente di correlazione tra gli RMS corneali di Ø 3mm con e senza correzione è di 0,7160, mentre quello tra gli RMS corneali di Ø 5mm con e senza correzione è di 0,6740. C'è, invece, una debole correlazione sia tra gli RMS totali di Ø 3mm con e senza correzione sia tra gli RMS totali di Ø 5mm con e senza correzione ($|r| < 0.3$) (Tabella XIII).

Queste correlazioni ci portano a ipotizzare che le aberrazioni corneali misurate con o senza correzione oftalmica indossata siano simili tra loro, mentre osserviamo una differenza significativa tra le aberrazioni totali prese con e senza correzione oftalmica. Lo figura 23 ci aiuta a visualizzare a colpo d'occhio quanto appena descritto: gli RMS corneali presi senza correzione e con correzione cambiano poco (c'è una lieve tendenza degli RMS presi con correzione ad essere maggiori di quelli presi senza); mentre gli RMS totali sono drasticamente più bassi se vengono misurati con la correzione oftalmica indossata.

Risulta coerente con il quadro appena delineato anche la figura 18 dove vediamo messe a confronto le medie degli RMS con e senza correzione oftalmica.

Correlazione tra ΔRMS (con e senza correzione) ed età: come ci si aspettava le correlazioni sono deboli ($|r| < 0.3$) poiché, come già suggerito altre volte, il campione è formato da giovani adulti senza quadri aberrazionali complessi (Tabella XV).

Correlazioni tra ΔRMS (con e senza correzione) e questionari notturni (QoV e VND-Q) e scala Likert: le correlazioni risultano deboli ($|r| < 0.3$). Questo dato si spiega, come prima, osservando che il campione in esame (un gruppo di giovani adulti) non presenta in generale alcun quadro aberrazionale problematico. Inoltre, mediamente i punteggi dei questionari e della scala Likert non sono alti, infatti, in tutti e tre i casi il punteggio medio si attesta tra il 35% e il 40% dei punteggi massimi possibili (Tabelle XVI, XVII e XVIII).

Correlazione tra Δ RMS (con e senza correzione) e acuità visiva (in decimi): le correlazioni risultano deboli ($|r| < 0.3$) tranne che per i Δ RMS sia corneale che totale 3mm - 5mm con correzione al buio. Vi è in questi due casi una moderata correlazione negativa poco al di sopra, in modulo, della soglia dello 0.3. Come per le correlazioni viste precedentemente tra gli RMS e l'acuità visiva, anche in questo caso sono necessarie ulteriori valutazioni per poter confermare o smentire un dato al limite della soglia (Tabella XIX).

Correlazione tra Δ RMS (con e senza correzione) e sensibilità al contrasto: anche in questo caso le correlazioni sono deboli ($|r| < 0.3$) e attese poiché il campione è formato da giovani adulti senza quadri aberrazionali problematici (Tabella XX).

Correlazione tra Δ RMS e Δ AV e tra Δ RMS e Δ SC (con e senza correzione oftalmica): le correlazioni calcolate risultano deboli ($|r| < 0.3$), sempre per via delle caratteristiche del campione preso in esame (giovani adulti senza quadri aberrazionali complessi) (tabelle XXII e XXIII).

Correlazione tra Δ RMS e Δ (likert-QoV) e tra Δ RMS e Δ (Likert-VND-Q) (con e senza correzione oftalmica): anche in questo caso le correlazioni sono deboli ($|r| < 0.3$) per il medesimo motivo (giovani adulti senza quadri aberrazionali problematici) (Tabelle XXIV e XXV).

Correlazione tra acuità visiva alla luce e al buio: l'indice di correlazione avvalora una correlazione forte ($r = 0,7863$), pertanto una buona acuità visiva alla luce comporterà una buona acuità visiva anche al buio (Fig. 26). Osservando le medie delle acuità visive prese alla luce e al buio, possiamo notare una migliore acuità visiva alla luce (12,9/10) rispetto al buio (11,7/10) (Fig. 17).

Correlazione tra la sensibilità al contrasto alla luce e al buio: l'indice di correlazione avvalora una correlazione moderata ($r = 0,3951$). Dai valori nel grafico si può notare che vi è un leggero peggioramento della sensibilità al contrasto con una luminosità ridotta (Fig. 27). Risulta coerente anche il confronto tra le medie delle sensibilità al contrasto al buio e alla luce (Fig. 17).

Correlazione tra i questionari sulla visione notturna QoV e VND-Q e la scala Likert: si è trovata una moderata (quasi forte) correlazione in entrambi i casi (rispettivamente $r = 0,5880$ e $r = 0,6236$). Questo dimostra l'affidabilità e la coerenza dei questionari utilizzati nello studio (Fig. 28).

Ad ulteriore conferma di questo, osserviamo che la media dei punteggi dei questionari e della scala Likert sono simili tra loro e si attestano tra il 35% e il 40% dei punteggi massimi possibili (Fig. 29).

6.2 Criticità e limiti dello studio

Questo studio presenta alcune criticità che elenchiamo di seguito:

- Non è stato possibile controllare a piacimento la luminanza del laboratorio dove sono state prese le varie misure; pertanto, non è stato possibile garantire ai soggetti le stesse esatte condizioni di luminosità alla luce e al buio durante lo svolgimento dei test.
- Non è stato rispettato il tempo di adattamento al buio prima dello svolgimento dei test da fare in condizioni scotopiche.
- La misura delle aberrazioni con correzione oftalmica indossata è risultata essere laboriosa in quanto l'aberrometro tende a focalizzare sulla lente dell'occhiale invece che sulla pupilla; pertanto, per la gran parte dei soggetti si è resa necessaria la focalizzazione manuale resa, tuttavia, problematica dai numerosi riflessi generati dalle lenti oftalmiche. Per alcuni partecipanti, infatti, si è dovuta ripetere l'operazione due o anche tre volte poiché i dati risultavano fortemente artefatti, probabilmente a causa di tutti i riflessi.

Tra i limiti dello studio, invece, vi sono:

- Mancanza di un gruppo di controllo con cui confrontare i risultati ottenuti.
- Mancanza di variabilità nell'età dei soggetti (l'intervallo dell'età è di 19-28 anni).
- Non sono stati coinvolti soggetti con condizioni o patologie oculari che avrebbero potuto presentare aberrazioni di alto ordine, quelle maggiormente responsabili dei disturbi visivi notturni. È stato coinvolto un unico partecipante sottoposto alla chirurgia refrattiva (SMILE).
- Nell'analisi dei dati non si è fatta differenza alcuna tra aberrazioni di basso e di alto ordine, ma si è sempre considerato l'indice globale RMS nelle sue varie sfaccettature (corneale, totale, con Ø 3mm o Ø 5mm).

7. CONCLUSIONE

In questo studio non sono state trovate correlazioni significative tra l'indice globale delle aberrazioni RMS e la visione notturna (valutata tramite due questionari soggettivi e una scala Likert), tuttavia bisogna tener presente che il campione coinvolto era formato da giovani adulti senza particolari quadri aberrometrici; pertanto, non possiamo concludere in via definitiva che non vi sia alcuna correlazione tra questi fattori. Sono necessari ulteriori studi che vadano ad indagare tali aspetti in soggetti che presentano effettivamente dei quadri aberrometrici significativi.

È stato dimostrato nel presente studio la concreta possibilità di poter fare una sovra-refrazione con un aberrometro misurando le aberrazioni con gli occhiali in posizione. I dati ottenuti dimostrano l'affidabilità della procedura che al giorno d'oggi non è ancora mai stata descritta in letteratura. Naturalmente sono necessari ulteriori valutazioni per confermare tale procedura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Levin LA Adler FH.; Optical aberrations and Wavefront Sensing; in: Adler's Physiology of the Eye; 11th ed. Edingburg; Saunders/Elsevier; 2011; pp 28.
- [2] Mazzoldi P., Nigro M., Voci C.,; Riflessione e rifrazione della luce; in: Elementi di Fisica – Elettromagnetismo e Onde; Seconda edizione; EdiSES; 2017; pp 315-318.
- [3] Rossetti A. Gheller P.; La visione e l'ottica fisiologica; in: Manuale di optometria e contattologia; seconda edizione; 2003; Zanichelli; pag. 12-13.
- [4] Douthwaite W. A.; Wavefront aberrations; in: Contact Lens Optics and Lens Design; 3rd ed. Elsevier; 2006; pp 113-114.
- [5] Maeda N. Clinical applications of wavefront aberrometry - a review. Clin Exp Ophthalmol. 2009;37(1):118-129. doi:10.1111/j.1442-9071.2009.02005.x.
- [6] Oliver KM, Hemenger RP, Corbett MC, et al. Corneal optical aberrations induced by photorefractive keratectomy. J Refract Surg. 1997;13(3):246-254. doi:10.3928/1081-597X-19970501-10.
- [7] Yoon G, Macrae S, Williams DR, Cox IG. Causes of spherical aberration induced by laser refractive surgery. J Cataract Refract Surg. 2005;31(1):127-135. doi:10.1016/j.jcrs.2004.10.046.
- [8] McAlinden C, McCartney M, Moore J. Mathematics of Zernike polynomials: a review. Clin Exp Ophthalmol. 2011;39(8):820-827. doi:10.1111/j.1442-9071.2011.02562.x.
- [9] Schwartz S. H.; Aberrations; in: Geometrical and Visual Optics – A Clinical Introduction; 2nd ed.; McGraw-Hill Education; 2013; pp 257.
- [10] Vasudevan Lakshminarayanan & Andre Fleck (2011) Zernike polynomials: a guide, Journal of Modern Optics, 58:7, 545-561, DOI:

10.1080/09500340.2011.554896.

- [11] Vacalebri M, Frison R, Corsaro C, et al. Advanced Optical Wavefront Technologies to Improve Patient Quality of Vision and Meet Clinical Requests. *Polymers (Basel)*. 2022;14(23):5321. Published 2022 Dec 5. doi:10.3390/polym14235321.
- [12] Kligman BE, Baartman BJ, Dupps WJ Jr. Errors in Treatment of Lower-order Aberrations and Induction of Higher-order Aberrations in Laser Refractive Surgery. *Int Ophthalmol Clin*. 2016;56(2):19-45. doi:10.1097/HIO.000000000000113.
- [13] Marsack JD, Thibos LN, Applegate RA. Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance. *J Vis*. 2004;4(4):322-328. Published 2004 Apr 23. doi:10.1167/4.4.8.
- [14] Thibos LN. Principles of Hartmann-Shack aberrometry. *J Refract Surg*. 2000;16(5):S563-S565. doi:10.3928/1081-597X-20000901-14.
- [15] Bucci M. G.; *Retina*; in : *Oftalmologia*; Società Editrice Universo; Roma; 1993; pp 268-273.
- [16] Saladin K. S.; *Organi di senso*; in: *Anatomia umana*; De Caro R.; Piccin; seconda edizione; Padova; 2017; pp 480-493.
- [17] Meduri R. A. et al; *Anatomia dell'occhio*; in: *Fondamenti di clinica oculistica*; Edizioni Martina; Bologna; 2006; pp 14-16.
- [18] Pepose J, Brigell M, Lazar E, et al. A randomized phase 2 clinical trial of phentolamine mesylate eye drops in patients with severe night vision disturbances. *BMC Ophthalmol*. 2022;22(1):402. Published 2022 Oct 8. doi:10.1186/s12886-022-02621-6.
- [19] Rosen ES. Night vision disturbance. *J Cataract Refract Surg*. 2005;31(2):247-249. doi:10.1016/j.jcrs.2004.12.036.
- [20] Fan-Paul NI, Li J, Miller JS, Florakis GJ. Night vision disturbances after corneal refractive surgery. *Surv Ophthalmol*. 2002;47(6):533-546. doi:10.1016/s0039-6257(02)00350-8.

- [21] Villa C, Gutiérrez R, Jiménez JR, González-Méijome JM. Night vision disturbances after successful LASIK surgery. *Br J Ophthalmol.* 2007;91(8):1031-1037. doi:10.1136/bjo.2006.110874.
- [22] Jabbur NS, Sakatani K, O'Brien TP. Survey of complications and recommendations for management in dissatisfied patients seeking a consultation after refractive surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2004;30(9):1867-1874. doi:10.1016/j.jcrs.2004.01.020.
- [23] Ying GS, Maguire MG, Liu C, Antoszyk AN; Complications of Age-related Macular Degeneration Prevention Trial Research Group. Night vision symptoms and progression of age-related macular degeneration in the Complications of Age-related Macular Degeneration.
- [24] Ikeda Y, Nakatake S, Funatsu J, et al. Night-vision aid using see-through display for patients with retinitis pigmentosa. *Jpn J Ophthalmol.* 2019;63(2):181-185. doi:10.1007/s10384-018-00644-5.
- [25] Hope GM, Rubin ML. Night myopia. *Surv Ophthalmol.* 1984;29(2):129-136. doi:10.1016/0039-6257(84)90169-3.
- [26] Levene, J. R.; Nevil Maskelyne, F.R.S., and the discovery of night myopia. *Notes and records of the Royal Society of London*; 1965; 20(1); 100-108.
- [27] Artal P, Schwarz C, Cánovas C, Mira-Agudelo A. Night myopia studied with an adaptive optics visual analyzer. *PLoS One.* 2012;7(7):e40239. doi:10.1371/journal.pone.0040239.
- [28] Le Grand, Y. (1942). *Etudes sur la vision nocturne.* *Revue Opt. rhe'or. insfrum.* 21, 71.-87..
- [29] Wald, G. and Griffin, D. R. (1947). The change in refractive power of the eye in bright and dim light. *J. Opt. Soc. Am.* 37, 321-336.
- [30] Koomen, M., Scolnik, R. and Tousey, R. (1951). A study of night myopia. *J. opt. SOL-. Am.* 41, 80..
- [31] Mellerio J. Ocular refraction at low illuminations. *Vision Res.* 1966;6(3):217-237. doi:10.1016/0042-6989(66)90043-5.

- [32] Johansson O, Wanvik PO, Elvik R. A new method for assessing the risk of accident associated with darkness. *Accid Anal Prev.* 2009;41(4):809-815. doi:10.1016/j.aap.2009.04.003.
- [33] Thoma T. Passenger vehicle occupant fatalities by day and night--a contrast. *Ann Emerg Med.* 2008;51(4):443-445. doi:10.1016/j.annemergmed.2008.02.005.
- [34] Sullivan JM, Flannagan MJ. The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions. *Accid Anal Prev.* 2002;34(4):487-498. doi:10.1016/s0001-4575(01)00046-x.
- [35] Owens DA, Sivak M. Differentiation of visibility and alcohol as contributors to twilight road fatalities. *Hum Factors.* 1996;38(4):680-689. doi:10.1518/001872096778827233.
- [36] Sivak, Michael & Schoettle, Brandon & Tsimhoni, Omer. (2013). Moon Phases and Nighttime Road Crashes Involving Pedestrians. *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America.* 4. 129-131. 10.1582/LEUKOS.2007.04.02.004..
- [37] Fotios, S., & Gibbons, R. (2018). Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations. *Lighting Research & Technology,* 50(1), 154–186. doi:10.1177/1477153517739055.
- [38] Thomas RS, Wright ST, Clark PJ, Thompson WT, Gooch JM. Optical filter effects on night vision goggle acuity and preservation of dark adaptation. *Aviat Space Environ Med.* 2010;81(9):869-872. doi:10.3357/ asem.2644.2010.
- [39] Friedburg C, Serey L, Sharpe LT, Trauzettel-Klosinski S, Zrenner E. Evaluation of the Night Vision Spectacles on patients with impaired night vision. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 1999;237(2):125-136. doi:10.1007/s004170050207.
- [40] <https://www.zeiss.it/vision-care/esplora-migliore-visione/guida-mobilita-/e-all-improvviso-tutto-e-piu-nitido-anche-di-notte-e-con-luce->

soffusa.html#:~:text=Una%20possibile%20soluzione%20sono%20le,in%20condizioni%20di%20scarsa%20luminosit%C3%A0..

- [41] Tuan KM, Chernyak D, Feldman ST. Predicting patients' night vision complaints with wavefront technology. *Am J Ophthalmol*. 2006;141(1):1-6. doi:10.1016/j.ajo.2005.08.065.
- [42] <https://michaelbach.de/fract/>.
- [43] Lang J. A new stereotest. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 1983;20(2):72-74. doi:10.3928/0191-3913-19830301-08.
- [44] McAlinden C, Pesudovs K, Moore JE. The development of an instrument to measure quality of vision: the Quality of Vision (QoV) questionnaire. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2010;51(11):5537-5545. doi:10.1167/iovs.10-5341.
- [45] Kimlin JA, Black AA, Djaja N, Wood JM. Development and validation of a vision and night driving questionnaire. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2016;36(4):465-476. doi:10.1111/opo.12307.
- [46] Jamieson S. Likert scales: how to (ab)use them. *Med Educ*. 2004;38(12):1217-1218. doi:10.1111/j.1365-2929.2004.02012.x.
- [47] https://it.wikipedia.org/wiki/Indice_di_correlazione_di_Pearson.
- [48] Rossetti A. Gheller P.; Lenti e occhiali; in: *Manuale di optometria e contattologia*; seconda edizione; 2003; Zanichelli; pag. 337.
- [49] Shneor E, Piñero DP, Doron R. Contrast sensitivity and higher-order aberrations in Keratoconus subjects. *Sci Rep*. 2021;11(1):12971. Published 2021 Jun 21. doi:10.1038/s41598-021-92396-5.
- [50] Koh S, Inoue R, Maeno S, et al. Characteristics of Higher-Order Aberrations in Different Stages of Keratoconus. *Eye Contact Lens*. 2022;48(6):256-260. doi:10.1097/ICL.0000000000000897.
- [51] Amano S, Amano Y, Yamagami S, et al. Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol*. 2004;137(6):988-992. doi:10.1016/j.ajo.2004.01.005.

- [52] Liao X, Wang MJ, Tan QQ, Lan CJ. Repeatability of i.Profiler for measuring wavefront aberrations in healthy eyes. *Int Ophthalmol.* 2022;42(8):2525-2531. doi:10.1007/s10792-022-02300-x.

APPENDICE

QUESTIONARIO ANAMNESI E VISIONE NOTTURNA

Nome e cognome _____ Data ____/____/____

ANAMNESI

Porta occhiali? <input type="radio"/> sì <input type="radio"/> no	Se sì, con quale frequenza? <input type="radio"/> sempre <input type="radio"/> spesso <input type="radio"/> qualche volta
Porta lac? <input type="radio"/> sì <input type="radio"/> no	Se sì, con quale frequenza? <input type="radio"/> sempre <input type="radio"/> spesso <input type="radio"/> qualche volta
Alterna l'uso tra occhiali e lac? <input type="radio"/> sì <input type="radio"/> no	Il questionario si riferisce all'uso di: <input type="radio"/> occhiali <input type="radio"/> lac <input type="radio"/> entrambi
Patologie sistemiche o oculari? <input type="radio"/> sì <input type="radio"/> no	Se sì, specificare quale/i _____
Interventi o traumi oculari? <input type="radio"/> sì <input type="radio"/> no	Se sì, specificare quale/i _____

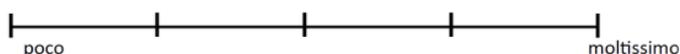
QUESTIONARIO QoV (Quality of Vision Questionnaire)

Valutare le seguenti situazioni visive in condizioni notturne	FREQUENZA				GRAVITÀ				FASTIDIO			
	Mai	Qualche volta	Abbastanza spesso	Molto spesso	Nessuna	Lieve	Moderata	Severa	Nessuno	Poco	Abbastanza	Molto
1. Abbagliamento												
2. Aloni												
3. Luci a raggiera												
4. Visione annerita												
5. Visione sfuocata												
6. Deformazione												
7. Visione doppia												
8. Fluttuazioni												
9. Difficoltà di messa a fuoco												
10. Difficoltà nella percezione della distanza o profondità												

VND-Q (Vision and Night Driving Questionnaire)

Indicare il livello di difficoltà riscontrato durante le seguenti condizioni di guida notturna	Nessuna difficoltà	Lieve difficoltà	Moderata difficoltà	Tanta difficoltà	Estrema difficoltà
1. Vedere le macchine di colore nero					
2. Vedere pedoni o animali sul lato della strada					
3. Vedere il marciapiede o le buche della strada					
4. Leggere i segnali stradali					
5. Vedere la strada malgrado i fari delle altre macchine in arrivo					
6. Vedere malgrado l'abbagliamento al tramonto o all'alba					
7. Vedere malgrado l'abbagliamento causato dai fari delle macchine in arrivo					
8. Adattamento visivo dopo aver superato i fari delle auto in arrivo					
9. Giudicare la distanza fino alla curva della strada					
10. Giudicare la distanza tra la propria macchina e le altre in arrivo					
11. Vedere la strada in condizioni di pioggia o di maltempo					

Nell'insieme, quanto la disturba la sua visione durante il crepuscolo o la sera? (Indicare con una crocetta x sulla scala)

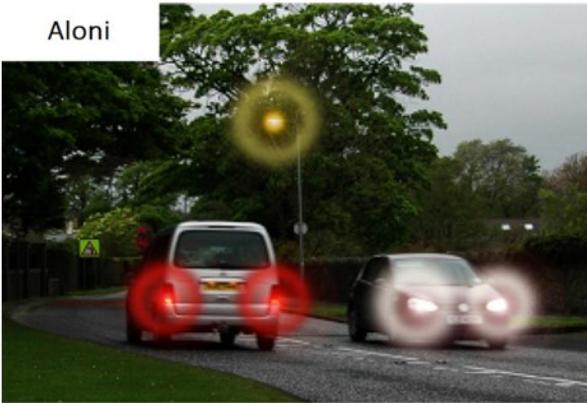


QoV Immagini

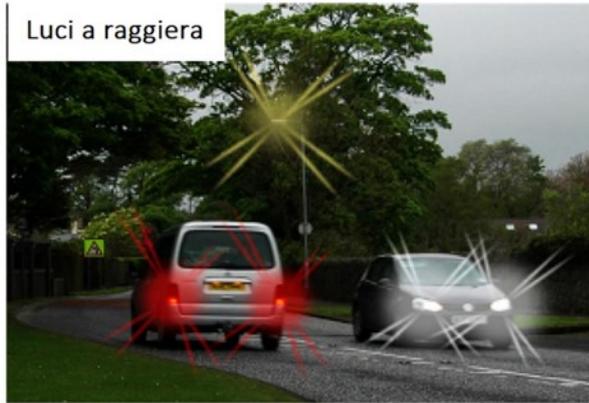
Abbagliamento



Aloni



Luci a raggiera



Visione annebbiata



Visione sfuocata



Deformazione



Visione doppia



CONSENSO AL TRATTAMENTO DEI DATI PERSONALI

Tesi sperimentale di laurea di Sanda Candiba

Relatore: Anto Rossetti

Correlatore: Gianluca Ruffato

Il/la sottoscritto/a _____ n° di matricola _____

ACCONSENTE

ai sensi e per gli effetti degli artt. 13 e 23 del D. Lgs. n. 196/2003, con la sottoscrizione del presente modulo, al trattamento dei dati personali secondo le modalità e nei limiti di cui all'informativa che segue.

Letto, confermato e sottoscritto

Data e luogo _____

Firma del dichiarante (per esteso e leggibile)

INFORMATIVA EX ART. 13 DEL D.LGS. N. 196/2003

Gentile Signore/a,

Desideriamo informarla che il D.Lgs. n. 196 del 30 giugno 2003 ("Codice in materia di protezione dei dati personali") prevede la tutela delle persone e di altri soggetti rispetto al trattamento dei dati personali.

Secondo la normativa indicata, tale trattamento sarà improntato ai principi di correttezza, liceità e trasparenza e di tutela della Sua riservatezza e dei Suoi diritti.

Ai sensi dell'articolo 13 del D.Lgs. n. 196/2003, pertanto, Le forniamo le seguenti informazioni:

1. I dati da Lei forniti verranno trattati per le seguenti finalità: tesi di laurea sperimentale, Università di Padova.
2. Il trattamento sarà effettuato con le seguenti modalità: manuale. I dati saranno accorpati in forma anonima.
3. Il conferimento dei dati è obbligatorio ai fini della partecipazione allo studio, l'eventuale rifiuto di fornire tali dati comporta l'esclusione dallo studio.
4. Soltanto le persone che conducono o partecipano alla ricerca avranno accesso ai dati raccolti. I dati non saranno comunicati ad altri soggetti, né saranno oggetto di diffusione.

PROTOCOLLO:

Premesso che:

- La partecipazione è volontaria
- Avrete la possibilità di ritirarvi dallo studio in qualsiasi momento e per qualsiasi motivo comunicandolo alla sottoscritta
- Per qualsiasi domanda relativa lo studio potrete contattare la sottoscritta tramite l'e-mail o il cellulare qui sotto riportati
- Avete diritto di richiedere e conservare una copia del consenso informato

Ogni partecipante verrà sottoposto ai seguenti test non invasivi:

1. Misurazione dell'acuità visiva monoculare con correzione abituale in condizioni di luce e di buio
2. Misurazione della sensibilità al contrasto monoculare con correzione abituale in condizioni di luce e di buio
3. Stereopsi
4. Aberrometria
5. Questionario sull'anamnesi e visione notturna

Contatti:

Laureanda Sanda Candiba:

e-mail: sanda.candiba@studenti.unipd.it

cellulare: 340 8058137

Professor. Anto Rossetti:

e-mail: anto.rossetti@unipd.it