

Approfondimento 10.1

Fluidodinamica della camera anteriore dell'occhio

Nel pannello di sinistra della Figura 10.A1 è mostrato uno schizzo della parte anteriore dell'occhio che mostra come esistano due camere, denominate camera posteriore e anteriore, connesse tra di loro attraverso la pupilla. La camera anteriore è delimitata dalla cornea e dall'iride, quella posteriore dall'iride e dal cristallino. All'interno di tali camere è presente un fluido con caratteristiche meccaniche prossime a quelle dell'acqua, denominato umor acqueo. L'umor acqueo viene prodotto, con una portata di circa $3 \mu\text{l}/\text{min}$, in corrispondenza del corpo ciliare, fluisce all'interno della camera posteriore, entra nella camera anteriore attraverso la pupilla e

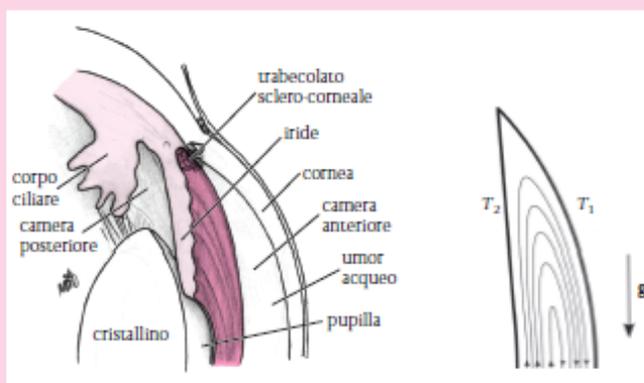
viene infine drenato perifericamente, in corrispondenza del trabecolato corneo-sclerale.

Il moto dell'umor acqueo ha importanti funzioni fisiologiche. In particolare: 1) la pressione intraoculare è regolata da un delicato bilancio tra produzione e resistenza al drenaggio dell'umor acqueo; 2) la cornea e il cristallino, essendo tessuti non vascolarizzati, ricevono apporto di ossigeno e nutrienti principalmente da parte dell'umor acqueo.

Oltre al processo di produzione e drenaggio esistono vari altri meccanismi che generano moto nell'umor acqueo, tra cui le rotazioni dell'occhio e la contrazione/espansione della pupilla. È infine no-

Figura 10.A1

A sinistra: schizzo della parte anteriore dell'occhio, in cui sono visibili la camera posteriore e quella anteriore. A destra: sezione verticale della camera anteriore e linee di corrente relative al moto indotto da effetti di galleggiamento. La temperatura della cornea, T_1 , è minore di quella della parte posteriore del dominio, T_2 . La freccia indica la direzione della gravità.



to che, in normali condizioni e quando il soggetto è in posizione eretta, si genera all'interno della camera anteriore un moto indotto da effetti termici. La parte interna della cornea è, infatti, tipicamente a temperatura inferiore rispetto all'iride, che è circa a temperatura corporea. Questa differenza di temperatura fa sì che l'umor acqueo in prossimità della cornea, essendo più freddo e conseguentemente a maggiore densità, tenda a muoversi verso il basso e che, per continuità, la velocità in prossimità dell'iride sia rivolta verso l'alto.

La difficoltà di effettuare misure in-vivo del moto dell'umor acqueo ha indotto diversi ricercatori a modellare la fluidodinamica della camera anteriore teoricamente (si veda Siggers ed Ethier, 2012 per una descrizione dello stato dell'arte della ricerca in questo campo). Dal punto di vista fluidodinamico il moto dell'umor acqueo si presta a essere studiato utilizzando soluzioni approssimate delle equazioni del moto. In particolare, diversi autori (per esempio Fitt e Gonzalez, 2006) hanno modellato il moto nella camera anteriore analiticamente utilizzando la teoria della lubrificazione, sulla base dell'osservazione che il dominio in considerazione è sottile, ovvero che la distanza media tra iride e cornea è sensibilmente minore del diametro della camera anteriore. Definita una dimensione spaziale caratteristica dello spessore del dominio e la sua lunghezza caratteristica, la teoria della lubrificazione si basa sulle ipotesi che $\varepsilon = h/L \ll 1$ e $\varepsilon^2 Re \ll 1$, dove Re rappresenta il numero di Reynolds del moto, valutato facendo uso della lunghezza L . Il parametro piccolo $\varepsilon^2 Re$ viene detto numero di Reynolds ridotto. Utilizzando

queste ipotesi è facile mostrare che le equazioni del moto si semplificano notevolmente e, in particolare, si linearizzano (i termini convettivi risultano proporzionali a $\varepsilon^2 Re$). Nel caso dello studio del moto indotto da effetti termici le equazioni del moto devono essere accoppiate a un'equazione di convezione-diffusione per il trasporto di calore e una legge di stato, che definisca il valore della densità in funzione della temperatura.

I risultati ottenuti con gli approcci semplificati menzionati risultano in ottimo accordo con soluzioni numeriche del sistema completo di equazioni che governano il problema e osservazioni sperimentali. A titolo di esempio, nel pannello di destra della figura vengono mostrate le linee di corrente generate in una sezione della camera anteriore da un gradiente termico tra la cornea e l'iride. La velocità massima associata a questo moto è, in normali condizioni, dell'ordine di $\approx 2 \cdot 10^{-4} \Delta T \text{ ms}^{-1} \text{K}^{-1}$, dove ΔT è la differenza di temperatura tra le due superfici.

Rodolfo Repetto e Jan O. Pralits
Dipartimento di Ingegneria Civile,
Chimica e Ambientale, Università di Genova

Bibliografia

- SIGGERS, J.H., ETHIER, C.R., Fluid Mechanics of the Eye. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 44 (2012), Nr. 1, S. 347-372.
FITT, A.D., GONZALEZ, G., Fluid Mechanics Of The Human Eye: Aqueous Humour Flow In The Anterior Chamber. In: *Bulletin of Mathematical Biology* 68 (2006), Nr. 1, S. 53-71.