



Determinação da Habilidade da Célula Vermelha do Sangue para Transpor Dois Poros Cilíndricos

J.J.Rossetto¹, P.J. Abatti²

RESUMO

São deduzidas expressões relacionando a área da superfície da membrana e o volume das células vermelhas do sangue (cvs) com os raios e comprimentos (mínimos e máximos) dos poros e da distância entre eles, na qual a célula é capaz de transpor dois poros cilíndricos conjuntamente. As aplicações decorrentes destes modelos analíticos para a especificação de filtros mecânicos para avaliar algumas características das cvs são apresentadas. Como principal novidade, tem-se a distância entre os dois poros, que permite ajustar a seletividade do filtro sem alterar as dimensões dos poros.

Palavras chave: *célula vermelha do sangue, cvs, filtros mecânicos de poros cilíndricos.*

Determination of the Red Blood Cell Ability to Traverse Two Cylindrical Pores

ABSTRACT

Expressions relating the red blood cell volume and membrane surface area to the pore minimum radius/maximum length and the distance between pores, which the cell is able to traverse simultaneously, are derived. The applications of these analytical models to design/specification of mechanics filters for evaluation red blood cell features are presented. As major innovation, we have a distance between two pores, which allow to adjust the selectivity of the filter without modified the pores dimensions.

Key words: *red blood cell, cvs, mechanics filter of the cylindrical pores.*

¹ UFPR–Centro Politécnico, Caixa Postal 19081, 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil.

e-mail: jiross@mat.ufpr.br, Fax: (0055) (41) 266-0040, Tel: (0055) (41) 361-3399

² CPGEI-CEFET-PR, Av. Sete de Setembro, 3165, 80230-901 – Curitiba – Paraná – Brasil. e-mail:

abatti@cpgei.cefetpr.br, Fax: (0055) (41) 310-4683, Tel: (0055)(41) 310-4681

1. INTRODUÇÃO

Recentemente foi apresentado um trabalho sobre a determinação da habilidade das cvs para transpor um poro cilíndrico [1]. A forma física que a cvs assume ao atravessar poros cilíndricos, introduz novos problemas em engenharia, onde análises físicas e matemáticas são utilizadas para se derivar fórmulas que relacionam o volume e a área da superfície da membrana da cvs com o raio mínimo do poro, para um dado comprimento, e/ou comprimento máximo, para um dado raio, na qual a célula é capaz de transpor.

O principal objetivo deste artigo é apresentar as análises e respectivos resultados para o caso da travessia de uma cvs por dois poros cilíndricos (curtos e/ou longos) conjuntamente.

2. METODOLOGIA

A célula vermelha do sangue.

A cvs humana sobre condições normais em repouso se apresenta, em um corte transversal, na forma de disco bicôncavo com diâmetro médio de aproximadamente $8\mu\text{m}$ e espessura aproximada de $2\mu\text{m}$, fig.1.

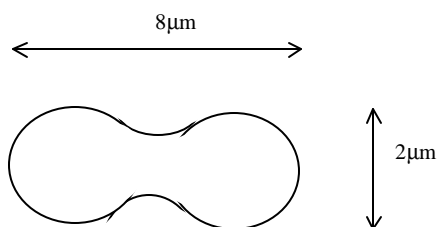


Fig.1. Esboço de uma célula vermelha do sangue

A medida que a cvs se torna mais idosa ela sofre um decréscimo no tamanho (perda de volume e de área da superfície da membrana). No entanto, esse processo é lento, permitindo considerar o tamanho dessas células estável durante um curto período de tempo (um dia, por exemplo). Na tabela I, se indica a área e o volume das cvs em três estágios da sua vida.

Tabela I
Dimensões de cvs classificada por idade, [3]

Tipo de cvs quanto à idade	Área μm^2	Volume μm^3
cvs jovem	148	98.1
cvs típica	134	89.8
cvs idosa	118	78

A cvs é formada de um volume (V) líquido, contendo principalmente água, eletrólitos e hemoglobina, sendo livre de núcleo e organelas. A sua membrana possui características de um líquido bidimensional (pode assumir em princípio qualquer forma, mas preserva a área de superfície (A)), pois possui uma forte resistência para dilatação de área (módulo de expansão da área da membrana de aproximadamente 450mN/m) e apresenta uma pequena resistência a deformação da membrana para área constante (aproximadamente 69mN/m) e módulo de curvatura estimada em $2 \cdot 10^{-19}\text{N/m}$. Deste modo, a cvs pode ser modelada como um envólucro maleável preenchido parcialmente de volume constante envolvido por uma membrana de área da superfície constante com alta deformabilidade [1-3].

Passagem da cvs por um só poro cilíndrico.

Das características citadas acima a respeito da cvs pode-se inferir que, para um dado poro de raio r e comprimento L , esta vem a assumir na oclusão um formato de halteres assimétrico (figura geométrica que apresenta a menor área de superfície para um dado volume, nestas condições, fig.2).

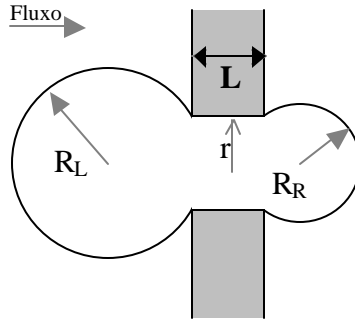


Fig.2. Ilustração de uma cvs atravessando um poro curto.

Assim, é possível expressar a área de superfície e o volume da cvs, assumindo que esta é constituída de um cilindro de raio r e comprimento L e duas esferas de raios R_L e R_R (subtraídas as calotas esféricas sobrepostas).

$$A = 2\pi rL + 4\pi R_L^2 - 2\pi R_L h_L + 4\pi R_R^2 - 2\pi R_R h_R \quad (1)$$

$$V = \pi r^2 L + \frac{4}{3}\pi R_L^3 - \frac{1}{3}\pi h_L^2 (3R_L - h_L) + \frac{4}{3}\pi R_R^3 - \frac{1}{3}\pi h_R^2 (3R_R - h_R) \quad (2)$$

onde $h_{L,R}$ denotam as alturas das entradas das esferas no poro, respectivamente do lado esquerdo e direito. Da fig.2 destaca-se o triângulo retângulo fig.3. Deduz-se que,

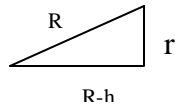


Fig.3 Relação geométrica entre R , r e h .

$R_{L,R} = (r^2 + h_{L,R}^2)/(2h_{L,R})$, que permite escrever

$$A = 2\pi rL + \pi r^2 \left(\frac{r^2}{h_L^2} + \frac{r^2}{h_R^2} + 2 \right) \quad (3)$$

$$V = \pi r^2 L + \frac{\pi r^4}{6} \left(\frac{r^2 + 3h_L^2}{h_L^3} + \frac{r^2 + 3h_R^2}{h_R^3} \right) \quad (4)$$

As condições de contorno para a cvs transpor os poros deduzidas em [1] são, $h=h_L=h_R \leq r$. Isto é, a cvs somente transpõe os poros se atingir uma forma de halteres simétrico. Substituindo $h=h_L=h_R < r$ em (3) e (4), após eliminar h encontra-se,

$$L = r \left(\frac{A}{2\pi r^2} - 1 - \left(3 \left(\frac{V}{\pi r^3} - \frac{A}{2\pi r^2} \right) + 2 + 1 \right)^2 \right) \quad (5)$$

que relaciona o raio mínimo do poro/comprimento máximo na qual a cvs é capaz de atravessar, indicando que, para poros curtos ($r > h$), ambos, raio e comprimento são mutuamente dependentes. Para poros longos ($r = h$), r independe de L , pois obtém-se simplesmente,

$$r^3 - \frac{3Ar}{4\pi} + \frac{3V}{2\pi} = 0 \quad (6)$$

A aplicação desses resultados para projeto e especificação de filtros é direta, e a fig.4 fornece valores de L e r para os quais uma cvs típica atravessa ou não um dado poro curto, [1].



Fig.4. L em função de r para uma cvs típica.

Passagem da cvs por dois poros.

Tomando-se o caso de dois poros de raios distintos, separados por uma distância d , de comprimentos e raios (L_1, r_1) , (L_2, r_2) , respectivamente fig.5 e considerando-se os poros paralelos e coaxiais, assegura-se, por razões geométricas, que a cvs toma na parte central um formato esférico (a esfera gerada por revolução sobre o eixo coaxial pela circunferência circunscrita a um trapézio isósceles). Assim, a célula se constitui de três esferas e dois cilindros (subtraídas as calotas esféricas sobrepostas). Devido a unicidade da esfera central, tem-se que esse formato esférico permanece constante durante o fluxo da célula, enquanto existe área e volume suficiente entre os dois poros. Denotando os raios das esferas por R_L , R_M e R_R , escreve-se as fórmulas da área e do volume da cvs. Tem-se,

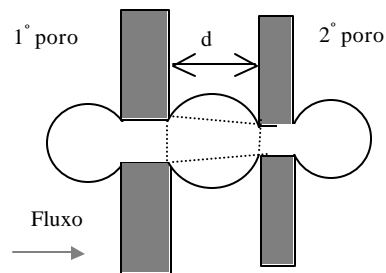


Fig.5. Uma cvs transpondo dois poros

$$A = 2\pi L_1 r_1 + 2\pi L_2 r_2 + 4\pi R_L^2 - 2\pi R_L h_L + 4\pi R_R^2 - 2\pi R_R h_R + 4\pi R_M^2 - 2\pi R_M h_1 - 2\pi R_M h_2 \quad (7)$$

$$V = \pi L_1 r_1^2 + \pi L_2 r_2^2 + \frac{4}{3}\pi R_L^3 - \frac{1}{3}\pi R_L^2 (3R_L - h_L) + \frac{4}{3}\pi R_R^3 - \frac{1}{3}\pi R_R^2 (3R_R - h_R) + \frac{4}{3}\pi R_M^3 - \frac{1}{3}\pi R_M^2 (3R_M - h_1) - \frac{1}{3}\pi R_M^2 (3R_M - h_2) \quad (8)$$

onde h_1 e h_2 são as alturas das entradas da esfera central no 1º e no 2º poro, respectivamente (os raios das calotas esféricas sobrepostas). Outras relações geométricas úteis que destacam-se da fig.5 envolvendo os diversos parâmetros, R , r e h , são,

$$R_L = (r_1^2 + h_L^2)/2h_L \quad R_R = (r_2^2 + h_R^2)/2h_R \quad (9)$$

$$R_M = (r_1^2 + h_1^2)/2h_1 \quad R_M = (r_2^2 + h_2^2)/2h_2 \quad (10)$$

$$R_M = (d + h_1 + h_2)/2 \quad (11)$$

Substituindo as equações (9) e as equações (10) adequadamente em (7) e (8), obtém-se,

$$A = p[2L_1r_1 + 2L_2r_2 + \frac{r_1^4}{h_L} + \frac{r_2^4}{h_R} + \frac{r_1^4}{h_1} + 2r_1^2 - h_2^2] \quad (12)$$

$$V = p[L_1r_1^2 + L_2r_2^2 + \frac{1}{6}(\frac{r_1^6}{h_L^3} + \frac{3r_1^4}{h_L} + \frac{r_2^6}{h_R^3} + \frac{3r_2^4}{h_R} + \frac{r_1^6}{h_1^3} + \frac{3r_1^4}{h_1} - 3r_2^2h_2 - h_2^3)] \quad (13)$$

Para determinar as condições de contorno que garantem a travessia da cvs pelos dois poros, observe-se, primeiramente, que os pares de valores (L_1, r_1) devem pertencer à faixa de valores que permite a célula transpor um só poro isoladamente. Evita-se assim, possíveis oclusões já no primeiro poro, conforme ilustra a fig.6.

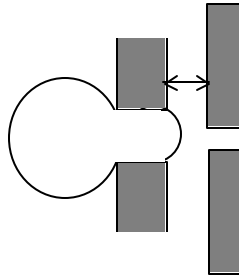


Fig.6. Exemplo de uma oclusão da cvs no 1° poro.

Em seguida, nota-se que para a célula transpor os dois poros, esta deverá realizar uma travessia isolada pelo segundo poro. De fato, como a célula segue o fluxo esquerda-direita e durante a travessia a parte esférica central permanece constante, haverá transferência de área e volume do extremo esquerdo para o extremo direito e isso se segue até o momento em que a cvs atinja a situação limite de desprender-se do 1° poro. Daí, para concluir a travessia a cvs realizará uma passagem isolada pelo segundo poro (fig.7).

Portanto, faz-se necessário também que os pares de valores (L_2, r_2) pertençam à faixa de valores que permite a célula transpor um só poro isoladamente.

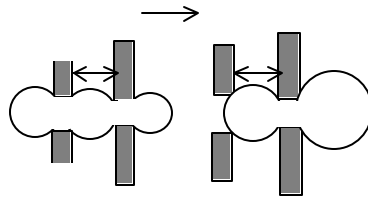


Fig.7. A cvs realizará uma travessia isolada pelo 2° poro.

Se a distância d entre os poros é grande, como ilustrado na fig.8, em que o corpo da célula pode ser justaposto entre os poros durante a travessia, apenas iniciando o enchimento nos poros, tem-se que a cvs transpõe os dois poros isoladamente e a condição de que os pares de valores (L_1, r_1) , (L_2, r_2) pertençam à faixa de passagem por um só poro é também suficiente para garantir a travessia da célula. Observa-se que o caso se reduz ao da passagem por um só poro (duas vezes).

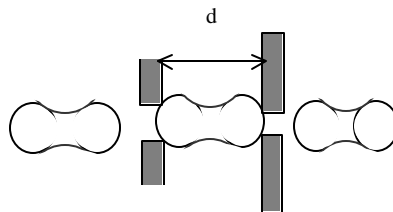


Fig.8. A distância d é tal que a cvs transpõe os dois poros isoladamente.

Portanto, para valores de d como o da fig.8 ou para valores ainda maiores o problema já está resolvido. Para tratar da travessia conjunta, garantindo enchimento considerável em ambos os poros, d deve ser ainda menor. Considere o caso em que o 1º poro possui medidas que permitem a célula atingir a situação limite de um halteres simétrico em relação a esse poro. Em seguida “tangencia-se” a célula à direita pelo 2º poro, fig.9.

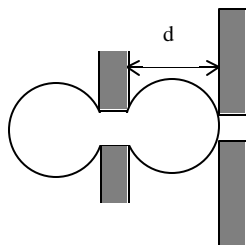


Fig.9. Indica um valor máximo para d .

Determina-se assim um valor máximo para d . De fato, qualquer incremento adicional ao valor de d ocasionará uma sobra de área para o volume dado, “murchando” a célula e impedindo que esta atinja o formato esférico entre os poros como deseja-se para se considerar o caso da travessia conjunta. Esse é o valor máximo que será usado para d . Estima-se d observando-se que este é aproximadamente $2R$ (pela equação (11), desprezando-se os pequenos valores de h_1 e h_2), onde R é o raio da esfera entre os poros, sendo esta de volume igual a metade do volume da célula (devido à simetria) já subtraído o volume do cilindro (1º poro). Usando estas relações, pode-se escrever,

$$d = \sqrt[3]{\frac{3}{\pi} (V_{cvs} - \pi r^2 L)}$$

onde V_{cvs} , indica o volume da cvs tomada e (r, L) as medidas do 1º poro.

Tomando-se o 1º poro maior possível, quase no limite de um poro longo ($r=1.4$, $L=7.8$), e o volume de uma cvs idosa (menor possível, para abranger aplicações com células de todas as idades, tabela I), encontra-se $d \leq 3.05 \mu m$. Este valor é uma boa estimativa de d , pois as calotas consideradas acima (com raios h_1 e h_2), para se colocar $d=2R$, são compensadas pela exclusão das calotas de raios h_L e h_1 , ao se subtrair o primeiro cilindro (1º poro e este com medidas maiores possíveis). Enfim, o valor de d , juntamente com as condições dos valores de cada poro dentro da faixa de passagem por um só poro, devem ser tomados de tal forma a garantir uma travessia conjunta da célula. Será suficiente tomar d com valores até $2 \mu m$ para as análises e aplicações desejadas. Na verdade, as considerações que se apresentou a respeito da distância de entre os poros, baseou-se em poros curtos. Para poros longos a distância d deixa de ter significado prático conforme discute-se adiante.

Portanto, já estabeleceu-se as condições para se tratar da travessia conjunta por dois poros sem que haja oclusões em um dos poros individualmente. Porém, as condições acima não são suficientes. Observe-se na fig.10, um caso de oclusão da célula ($R_L > R_R$).

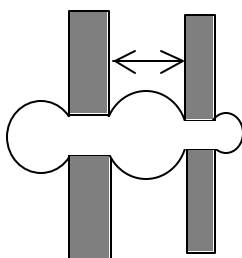


Fig.10 Exemplo de uma oclusão no caso da travessia conjunta da célula por dois poros.

Sabe-se que durante a travessia o enchimento esférico entre os poros permanece constante, variando-se apenas as esferas dos extremos dos lados de fora dos poros. Então, pelo mesmo argumento do caso de um só poro, a célula somente

conseguirá transpor os poros se atingir a situação limite $R_R=R_L$, ou seja, formas esféricas simétricas dos lados extremos de fora dos poros, fig.11.

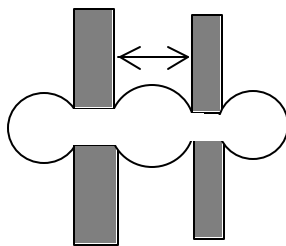


Fig.11. A cvs atinge simetria esférica nos lados extremos que é uma condição crucial para transpor os poros.

A última das três condições acima, $R_L=R_R$, juntamente com as demais citadas acima, é também suficiente. De fato, as condições $d \leq 2m$ e as medidas de cada poro dentro da faixa de passagem por um só poro, garantem que não haverá oclusão individual num dos poros e enchimento considerável garantindo tratar-se de travessia simultânea. Daí se a célula atinge a situação limite $R_R=R_L$, ela continua o fluxo esquerda-direita transferindo área e volume do extremo esquerdo para o extremo direito, permanecendo a esfera central constante, até o limite da cvs desprender-se do 1º poro (fig.7). A partir daí, a célula conclui a travessia com uma passagem individual pelo 2º poro.

Portanto as condições de contorno gerais que garantem a passagem da célula por dois poros cilíndricos conjuntamente são:

- (a) Os pares de valores (L_1, r_1) , (L_2, r_2) devem pertencer à faixa de valores que permitem a cvs transpor um só poro isoladamente;
- (b) $d \leq 2m$;
- (c) $R_L = R_R$.

3. RESULTADOS

Passagem da cvs por dois poros curtos.

Com o enchimento entre os poros permanecendo constante durante a travessia da célula as condições para se manter no caso de dois poros curtos são dadas por $h_1 < r_1$ e $h_2 < r_2$. Manipulando-se as equações (10) e (11), tira-se,

$$h_1 = \frac{-(d^2 + r_2^2 - r_1^2) + \sqrt{(d^2 + r_2^2 - r_1^2)^2 + 4d^2 r_1^2}}{2d} \quad (14)$$

$$h_2 = \frac{-(d^2 + r_1^2 - r_2^2) + \sqrt{(d^2 + r_1^2 - r_2^2)^2 + 4d^2 r_2^2}}{2d} \quad (15)$$

Impondo as condições de poro curto, obtém-se,

$$r_2^2 - d^2 < r_1^2 < r_2^2 + d^2 \quad (16)$$

Assim, dadas as constantes A , V , d , r_2 , L_2 , deseja-se obter as curvas limite de passagem da célula, de L_1 em função de r_1 . No entanto, a condição $R_R=R_L$, com os raios distintos, não dá $h_L=h_R$ como no caso de um só poro, e aí não se obtém uma fórmula explícita de L_1 em função de r_1 , nem sequer uma equação implícita. Mas, com as equações $R_L=R_R$, (12) e (13), deduz-se que

$$L_1 = \frac{1}{2r_1} \left[\frac{A}{P} - 2r_2 \frac{L_2}{2} - \frac{4r_1^4 h_R^2}{(r_2^2 + h_R^2 - \sqrt{(r_2^2 + h_R^2)^2 - 4r_1^2 h_R^2})^2} - \frac{r_2^4}{\frac{2}{h_R} - \frac{r_1^4}{h_1^2} - 2r_1^2 + h_2^2} \right] \quad (17)$$

onde h_R fica determinado implicitamente por,

$$6\left(\frac{V}{P_1^3} - \frac{A}{2P_1^2}\right) = \frac{6r_2^2 L_2}{r_1^3} - \frac{6r_2 L_2}{r_1^2} + \left(\frac{2r_1 h_R}{r_2^2 + h_R^2 - \sqrt{(r_2^2 + h_R^2)^2 - 4r_1^2 h_R^2}} - 1\right)^3 + \frac{r_2^6}{r_1^3 h_R^3} - \frac{3r_2^4}{r_1^2 h_R^2} + \frac{3r_2^4}{r_1^3 h_R} + \left(\frac{r_1}{h_1} - 1\right)^3 - \frac{3r_2^2 h_2}{r_1^3} + \frac{3h_2^2}{r_1^2} - \frac{h_2^3}{r_1^3} - 4 \quad (18)$$

sem a presença de L_1 e então pode-se encontrar um conjunto de pares de valores (r_1, L_1) , uma vez dadas as demais constantes. O radicando que surge nas equações acima, impõe a restrição adicional $r_1 \leq r_2$ que restringe o domínio de r_1 uma vez dado r_2 .

Na fig.12, esboça-se as curvas limite de passagem de uma cvs típica (tabela I), por dois poros curtos distintos, com $r_2=1$ e $L_2=3$, para três valores de d . Observa-se que aumentando-se o valor de d a faixa de passagem da cvs diminui (aqui, como no caso de um só poro, a cvs transpõe os poros para pares de pontos (r_1, L_1) abaixo da curva e sobre ela e oclui em caso contrário).

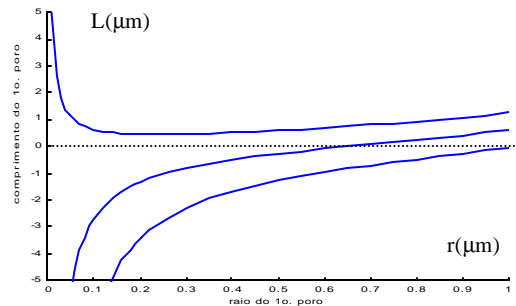


Fig.12 Curvas limite de passagem da cvs típica por dois poros curtos com $r_2 = 1$, $L_2 = 3$, variando-se o valor de d . De cima para baixo $d=1$, $d=1.5$, $d=2$ (μm).

Pode-se também manter d e r_2 fixo e variar-se o valor de L_2 . Obtém-se que a medida em que se aumenta o valor de L_2 , se restringe a passagem da célula, como no caso do aumento da distância d entre os poros. Mantendo-se d e L_2 fixos e variando-se o valor de r_2 , obtém-se com um aumento de r_2 um aumento na faixa de passagem da cvs. Além disso, a escolha de dois desses parâmetros como fixos, influi na sensibilidade da influência do terceiro.

Portanto, a análise da passagem de uma cvs por dois poros cilíndricos, indica a construção de um novo tipo de filtro onde apenas com o ajuste de um parâmetro pode-se modificar a sua seletividade. Esse tipo de ajuste também é encontrado no caso de um só poro, na qual a seletividade pode ser alterada modificando-se o raio ou o comprimento do poro (mas que implica na construção de um novo poro). No entanto, se o parâmetro aqui modificado for a distância d entre os poros, isso altera a seletividade do filtro sem a necessidade de se construir novos poros, ou seja, apenas com ajuste da distância entre os poros (por exemplo, com um micromanipulador), pode-se selecionar as cvs sem precisar alterar as dimensões dos poros.

Passagem da cvs por poros longos.

Quando um dos poros é longo, a presença da distância d entre os poros não dá um significado físico ao sistema, fig.13.

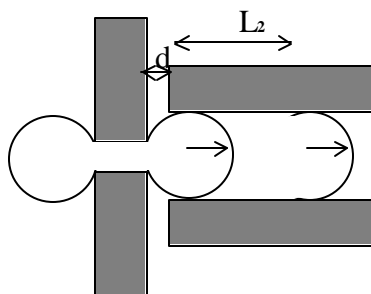


Fig.13. Passagem da cvs por dois poros, sendo o segundo longo com distância d entre os poros.

Nota-se que se a distância fosse maior ou menor a forma assumida pela cvs seria a mesma. Sua forma tangencia internamente o 2º poro. Assim pode-se representar esta situação conforme a fig.14.

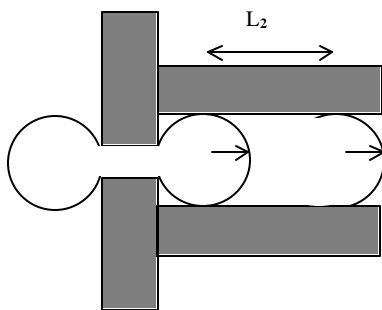


Fig.14. Passagem da cvs por dois poros (sendo o 2º longo).

$$\text{Aqui } R_M = r_2 = (r_1^2 + h_1^2)/2h_1 \quad (19)$$

onde r_2 se encontra dentro do domínio de passagem por um só poro longo, dado pela equação (6), enquanto que os pares (r_1, L_1) já satisfazem a equação (5). Estas condições, juntamente com a fundamental $R_L = R_R$, que aqui é equivalente a $h_L = h_1$, formam o conjunto de condições necessárias e suficientes para a cvs transpor os poros. Destacando-se a área e o volume da cvs, pelos elementos diferenciados da fig.14, já substituídas as condições de contorno acima, encontra-se,

$$A = \pi l \left[\frac{r_1^4}{h_1^2} + r_1^2 + 2r_1 L_1 + 2r_2 L_2 + 4r_2^2 - 2r_2 h_1 \right] \quad (20)$$

$$V = \pi l \left[\frac{r_1^6}{6h_1^3} + \frac{r_1^4}{2h_1} + r_1^2 L_1 + r_2^2 L_2 + \frac{4r_2^3}{3} - h_1^2 r_2 + \frac{h_1^3}{3} \right] \quad (21)$$

donde, obtém-se uma fórmula explícita,

$$L_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{r_1^2 - r_1 r_2} \left[\frac{2V}{p} - \frac{r_2 A}{p} - \frac{r_1^6}{3h_1^3} + \frac{r_1^4 r_2}{h_1^2} - \frac{r_1^4}{h_1} \right. \\ \left. + r_1^2 r_2 + \frac{4r_2^3}{3} + 2h_1^2 r_2 - 2r_2^2 h_1 - \frac{2h_1^3}{3} \right] \quad (22)$$

com $h_1 = r_2 - \sqrt{r_2^2 - r_1^2}$ e, por razões de significado físico, $1.42 < r_2 < 2$.

Pela fig.15, observa-se que um aumento no valor do raio do poro longo acarreta um aumento na faixa de passagem da cvs. Daí, a seletividade do filtro (que lembra uma pipeta de sucção), pode ser alterada pelo ajuste de r_2 .

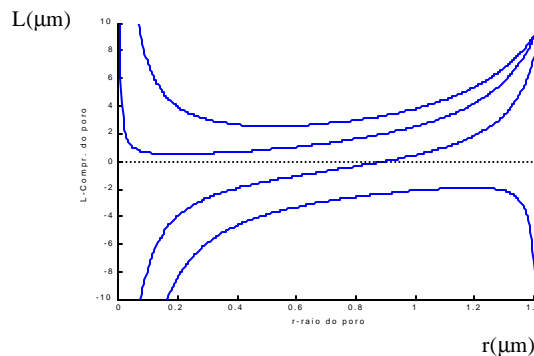


Fig.15. Curvas limite de passagem de uma cvs típica por dois poros (um curto e outro longo), variando-se o valor de r_2 . De baixo para cima: 1.42, 1.5, 1.6, 1.7 (μm).

No entanto, isso requer a construção de um novo cilindro pois, a distância entre os poros deixou de ter significado prático.

Os demais casos de poros longos: (i) os dois poros são longos. Neste a passagem da célula se dá sem restrições adicionais, bastando que os raios dos poros atendam a equação (6) e (ii): o primeiro poro longo com o segundo poro curto. Essa situação é a mesma que a descrita acima, bastando observar o fluxo no sentido contrário (direita-esquerda) e portanto a análise é similar.

Passagem de uma cvs por dois poros de raios e comprimentos iguais.

Essa situação particular é muito interessante, não só pelas aplicações mais práticas indicadas a seguir, mas também porque permite mostrar que a fórmula obtida aqui,

$$L = \frac{r}{2} \left[\frac{A}{2\pi r^2} - 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{h_1} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{r} \right)^2 - \right. \\ \left. \sqrt{3 \left(\frac{V}{\pi r^3} - \frac{A}{2\pi r^2} \right) + 2 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{h_1} - 1 \right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{r} - 1 \right)^3 + 1} \right]^2 \quad \text{onde,} \\ h_1 = -\frac{d}{2} + \sqrt{r^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2}$$

generaliza a equação (5). De fato, fazendo-se $d=0$, obtém-se $h_1=r_1$ e substituindo na equação (23), encontra-se exatamente a equação (5) com $2L$ no lugar de L .

Um esboço das curvas para os três tipos de célula, jovem, típica e idosa (tabela I), com dois valores de d entre os poros, $d=1$ e $d=2$ (μm), mostra que para os pares de valores (r , L) na faixa $0 < r < 0.5$ e $0 < L < 0.5$, os três tipos de células transpõem os poros para $d=1$ (μm), enquanto que para $d=2$ (μm) a célula idosa deixa de poder atravessar os poros, fig.16, indicando um exemplo de como se pode selecionar-se células com o simples ajuste do parâmetro d .

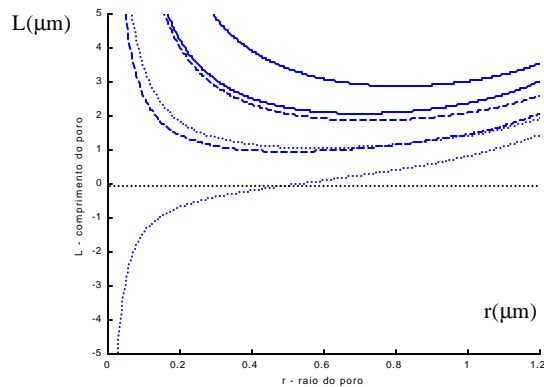


Fig.16. Curvas limite de passagem de uma cvs jovem (curva contínua), típica (curva tracejada) e idosa (curva pontilhada), para dois valores de d . De cima para baixo: $d=1$ e $d=2$ (μm).

No exemplo, o ajuste de d impede a passagem da célula idosa. A mesma aplicação pode ser feita para impedir a passagem de uma célula defeituosa (por exemplo, com área menor ou volume maior quando comparada à célula típica) com o ajuste da distância entre os poros.

4. CONCLUSÕES

As análises da passagem de uma cvs por dois poros cilíndricos, indicam, como principal novidade, no caso de poros curtos, a construção de um novo tipo de filtro, útil no processo de seleção de cvs de acordo com suas características (por exemplo, idade), onde com o simples ajuste da distância d entre os poros, pode-se modificar a sua seletividade, sem a necessidade de se alterar as dimensões dos poros. A aplicação se torna mais prática e barata no caso de poros iguais e, nesse caso, deduziu-se que as novas relações entre os diversos parâmetros, generalizam aquelas do caso de um só poro. Para o caso de um poro longo e outro curto, o ajuste do raio do poro longo altera a seletividade do filtro, mas isso requer sempre a construção do poro longo. Neste caso, como também no caso de dois poros longos, a distância d entre os poros deixa de ter significado prático.

REFERÊNCIAS

- [1] P. J. Abatti, "Determination of the red blood cell ability to traverse cylindrical pores", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 44, n.3, pp. 209-212, 1997.
- [2] E. A. Evans, "Membrane mechanics and cell adhesion", *Frontiers in Biomechanics*, New York: Springer-Verlag, pp. 3-17, 1986.
- [3] R. Hochmuth, "Properties of red blood cells", *Handbook of Bioengineering*, New York: McGraw Hill, 1987.