

EXPRESSÕES ANALÍTICAS PARA FUNÇÕES CARDÍACAS CORRESPONDENTES A DIFERENTES CONDIÇÕES DE EXERCÍCIO FÍSICO

Simone A Bertolotti¹, Kumiko K Sakane², Mituo Uehara³

¹Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento / Engenharia Biomédica – Universidade do Vale do Paraíba
Av.: Shishima Hifumi, 2911– Urbanova – São José dos Campos – SP, e-mail¹: simone@univap.br

^{2,3}Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento / Biofísica Teórica – Universidade do Vale do Paraíba
Av.: Shishima Hifumi, 2911 – Urbanova – São José dos Campos – SP, e-mail²: mituo@univap.br

Resumo: A avaliação clínica da capacidade de bombeamento do coração é melhor realizada com base na função cardíaca, que relaciona o volume de sangue bombeado pelo coração em cada contração sistólica com o volume diastólico no final da fase diastólica e com outros parâmetros hemodinâmicos. A realização de exercício físico causa alteração na função cardíaca. Neste trabalho utilizamos dados experimentais publicados na literatura para determinarmos, na aproximação linear, funções cardíacas para diferentes níveis de exercícios físicos.

Palavras-chave: Funções cardíacas; exercício físico; contratilidade miocárdica.

Área de Conhecimento: Ciências Biológicas.

Introdução

Otto Frank (1895) observou em experimento com coração de rã que quanto maior o volume de sangue acumulado no ventrículo, no final de uma fase diastólica, maior é o volume de sangue ejetado pelo ventrículo na sístole seguinte. A mesma relação foi confirmada por Ernest Starling e colaboradores (PATTERSON *et al.*, 1914), em experimentos com preparações coração-pulmão caninas. Essas observações podem ser expressas matematicamente pela função $S = S(v_D)$, onde S é o volume de ejeção e v_D é o volume de sangue no ventrículo no final de uma fase diastólica. A função é conhecida como *relação de Frank-Starling* (KATZ, 1977).

No caso do sistema cardiovascular intacto, i.e., *in vivo*, é preciso considerar o fato de que o ventrículo bombeia o sangue para o sistema vascular que já contém sangue à pressão não nula (pressão arterial na aorta) o que representa uma resistência a ser vencida pelo fluxo sangüíneo. Matematicamente esse fato pode ser expresso escrevendo-se a relação $S = S(v_D; p_a)$, que diz depender o volume de ejeção não apenas do volume diastólico final v_D , conhecido como pré-carga (*preload*), mas também da pressão arterial p_a , que aqui representa a pós-carga (*afterload*). Há ainda outros fatores que podem alterar o volume de ejeção, como substâncias que alteram a contratilidade do músculo cardíaco. Tais substâncias são chamadas substâncias *inotrópicas* (KATZ, 1977; MILNOR, 1990). A influência dessas substâncias poderia ser descrita matematicamente escrevendo-se $S = S(v_D; p_a; i)$, onde i representaria o estado inotrópico do músculo cardíaco. Chamaremos a função $S = S(v_D; p_a; i)$ de *função cardíaca* ou *função ventricular*, reservando o termo “relação de Frank-Starling” para a função $S = S(v_D)$ que descreve a

dependência do volume de ejeção S apenas em relação ao volume diastólico final v_D .

A realização de exercícios físicos impõem ao sistema cardiovascular uma sobre carga decorrente de um aumento das necessidades metabólicas dos músculos que exercem uma atividade mais intensa, ao mesmo tempo que deve ser mantido o atendimento de outros órgãos. O sistema responde a essas exigências por um aumento da ventilação pulmonar, um aumento do débito cardíaco, em aumento da pressão arterial e uma redistribuição do fluxo de sangue, com um aumento do fluxo em direção aos músculos mais ativos. O aumento do débito cardíaco pode se conseguido com o aumento da pulsação cardíaca ou aumento da contratilidade do músculo cardíaco, ou do aumento de ambos os fatores. Esse aumento do débito cardíaco significa, portanto, que as funções cardíacas são alteradas pela realização de exercícios físicos.

A investigação da alteração da função cardíaca em consequência da realização de exercícios físicos exige uma formulação matemática do problema, pois, a função cardíaca depende de vários fatores, o que torna difícil seu estudo sem um modelamento matemático, enquanto que, matematicamente, ela pode ser melhor estudada como uma função de várias variáveis. A importância da análise matemática do problema da resposta cardiovascular a exercícios físicos reside: 1. nas conclusões quantitativas e qualitativas que se podem inferir de dados experimentais; 2. nas sugestões para o planejamento de experimentos.

Neste trabalho utilizamos dados experimentais de Poliner *et al.* (1980) para determinar as funções cardíacas correspondentes a diferentes níveis de exercícios físicos, e através de uma análise matemática, discutimos a questão da alteração da contratilidade miocárdica decorrente da realização de exercícios.

Materiais e Métodos

Dados experimentais de Poliner et al. (1980)

Poliner *et al.* (1980) realizaram experimentos com sete pessoas normais (seis homens e uma mulher), com idade média de 26 anos, que se

submeteram a exercícios físicos de diferentes níveis de intensidade.

Os exercícios foram realizados nas posturas supina (deitada) e sentada, em bicicletas ergométricas. A Tabela 1 contém alguns dados obtidos por aqueles autores.

Tabela 1 – Dados experimentais de Poliner *et al.* (1980).

| Condição | Repouso | | Exercício 1 | | Exercício 2 | | Exercício Máximo | |
|----------------|----------|----------|-------------|----------|-------------|----------|------------------|----------|
| Postura | Sentada | Supina | Sentada | Supina | Sentada | Supina | Sentada | Supina |
| EDV (ml) | 85 | 107 | 113 | 123 | 117 | 137 | 116 | 135 |
| ESV (ml) | 32 | 34 | 28 | 31 | 24 | 32 | 19 | 29 |
| S (ml) | 55 | 76 | 85 | 92 | 92 | 105 | 99 | 106 |
| HR (beats/min) | 89 | 71 | 124 | 100 | 165 | 133 | 182 | 172 |
| BP (mmHg) | 125 / 84 | 125 / 76 | 161 / 86 | 152 / 81 | 190 / 89 | 169 / 91 | 204 / 91 | 206 / 96 |
| CO (l/min) | 4.8 | 5.4 | 10.4 | 9.1 | 15.1 | 13.8 | 18.0 | 18.3 |

EDV: volume diastólico final; ESV: volume sistólico final; S: volume de ejeção; HR: frequência cardíaca; BP: pressões sistólica e diastólica; CO: débito cardíaco.

Volume médio de sangue no ventrículo

Os dados acima não são suficientes para se determinar a função cardíaca completa $S = S(v_D; p_a; i)$, mas podemos determinar aproximadamente a dependência de S com a v_D supondo uma relação linear entre as duas variáveis. Por razões teóricas é mais interessante escrever a função cardíaca na forma $S = S(v)$, onde v designa o volume médio de sangue no ventrículo dado por:

$$v = \frac{\int_t^{t+T} v_i(t) dt}{T} \quad (1),$$

onde $v_i(t)$ é o volume de sangue no ventrículo no instante t e T o período cardíaco.

Segundo os dados experimentais de Little and Downer *et al.* (1990) a maior parte do aumento do volume de sangue no ventrículo ocorre no primeiro terço da diástole. Considerando ainda que a duração da diástole é aproximadamente o dobro da duração da sístole, o resultado da integral na Equação (1) é aproximadamente:

$$v \cong \frac{(2EDV + ESV)}{3} \quad (2),$$

onde EDV (*end diastolic volume*) é o volume diastólico final e ESV (*end systolic volume*) o volume sistólico final.

Utilizando a Equação (2) e os dados da Tabela 1, obtemos os valores de v que estão na Tabela 2.

Pressão arterial média

A pressão arterial média, num período cardíaco, é dado por:

$$p_a = \frac{\int_t^{t+T} p_{ai}(t) dt}{T} \quad (3),$$

onde $p_{ai}(t)$ é a pressão arterial no instante t .

Para a condição de estado estacionário a Equação (3) dá aproximadamente o resultado:

$$p_a \cong \frac{2p_D + p_S}{3} \quad (4),$$

onde p_D é a pressão diastólica e p_S a pressão sistólica.

A Equação (4) e os dados da Tabela 1 dão, para a pressão arterial média p_a os resultados que estão na Tabela 2.

Relação entre o volume diastólico final (EDV) e o volume sistólico final (ESV)

A razão EDV/ESV pode ser útil na busca de um parâmetro que indique a contratilidade do miocárdio. Com os dados da Tabela 1 obtemos os valores da razão EDV/ESV que estão na Tabela 2. Indicamos por $\langle \text{EDV/ESV} \rangle$ a média dos valores de EDV/ESV para as posturas sentada e supina, correspondentes a cada condição de exercício físico.

Definamos o parâmetro u por:

$$u = \frac{\langle \text{EDV/ESV} \rangle}{\langle \text{EDV/ESV} \rangle_0} \quad (5),$$

onde $\langle \text{EDV/ESV} \rangle_0$ é o valor da razão $\langle \text{EDV/ESV} \rangle$ correspondente ao repouso.

O parâmetro u indica a intensidade relativa do nível de exercício, em relação à condição de repouso.

Tabela 2 – Volume médio de sangue v ; pressão arterial média p_a ; razão <EDV/ESV>; parâmetro u .

| Condição | Repouso | | Exercício 1 | | Exercício 2 | | Exercício Máximo | |
|--------------|---------|--------|-------------|--------|-------------|--------|------------------|--------|
| Postura | Sentada | Supina | Sentada | Supina | Sentada | Supina | Sentada | Supina |
| v (mL) | 67 | 83 | 85 | 92 | 86 | 102 | 84 | 100 |
| p_a (mmHg) | 98 | 92 | 136 | 128 | 156 | 143 | 166 | 169 |
| EDV/ESV | 2.7 | 3.1 | 4.0 | 4.0 | 4.9 | 4.3 | 6.1 | 4.7 |
| <EDV/ESV> | 2.9 | | 4.0 | | 4.6 | | 5.4 | |
| u | 1 | | 1.4 | | 1.6 | | 1.9 | |

Funções cardíacas

Suponhamos a relação linear:

$$S = a + bv \quad (6),$$

onde a e b são constantes a serem determinadas.

Dos valores de S que se encontram na Tabela 1 e dos valores de v na Tabela 2, obtemos para a e b os resultados que estão na Tabela 3.

Vamos indicar por:

$$S_0 = a_0 + b_0v \quad (7),$$

a função cardíaca correspondente à condição de repouso. Para uma condição de exercício escrevemos:

$$S = a + bv = a_0 + b_0v + x + yv \quad (8),$$

onde $x = a - a_0$ e $y = b - b_0$, sendo que os valores de x e y estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes a e b da função linear (6).

| Condição | Repouso | Exercício 1 | Exercício 2 | Exercício Máximo |
|----------|---------|-------------|-------------|------------------|
| a (ml) | - 32 | 0.0 | 23 | 66 |
| b | 1.3 | 1.0 | 0.8 | 0.4 |
| x (ml) | 0.0 | 32 | 55 | 98 |
| y | 0.0 | - 0.3 | - 0.5 | - 0.9 |

Resultados

Com os resultados da Tabela 3 escrevemos para as funções cardíacas:

$$S_0 = a_0 + b_0v = - 32ml + 1.3v \quad (9),$$

$$S_1 = a_1 + b_1v = 1.0v \quad (10),$$

$$S_2 = a_2 + b_2v = 23ml + 0.8v \quad (11),$$

$$S_m = a_m + b_mv = 66ml + 0.4v \quad (12),$$

respectivamente, para as condições de repouso, nível 1 de exercício, nível 2 de exercício e nível máximo de exercício.

Definir um índice de contratilidade é ainda um problema aberto. Muitos índices têm sido propostos, porém nenhum é inteiramente satisfatório (MILNOR, 1990). Como uma tentativa de definir um índice que seja empiricamente útil, consideremos a relação EDV/ESV que deve aumentar com o aumento da capacidade de contração do miocárdio.

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que o parâmetro u aumenta com o aumento do nível de exercício.

Das Equações (7) e (8) obtemos:

$$S = S_0 + \Delta S \quad (13),$$

onde:

$$\Delta S = x + yv \quad (14),$$

representa a variação do volume de ejeção em consequência dos exercícios.

Podemos determinar a relação entre ΔS e u na aproximação linear. Com os valores de x , da Tabela 3, e com os valores de u da Tabela 2, indicamos num gráfico cartesiano os pontos experimentais $(u;x)$, como mostra a Figura 1. Na aproximação linear, a relação entre x e u é dada por:

$$x \cong 100(u - 1) \quad (15),$$

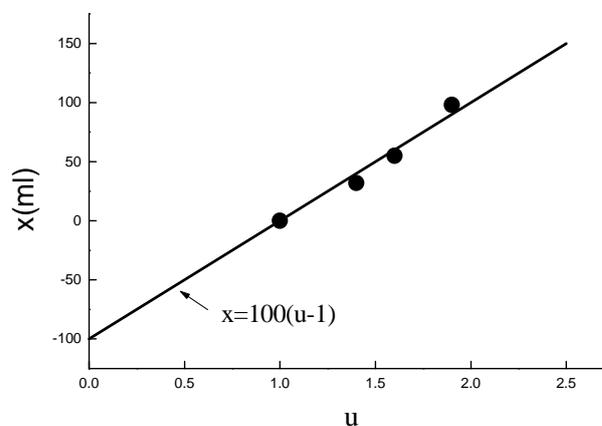


Figura 1 – x em função de u . A reta representa a Equação (15).

Analogamente, indicamos num gráfico cartesiano os pontos experimentais $(u; y)$, como mostra a Figura 2. Na aproximação linear a relação entre y e u é dada por:

$$y \cong 0.9(1 - u) \quad (16),$$

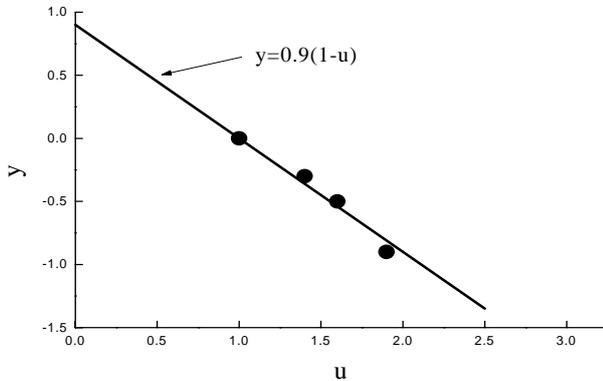


Figura 2 – y em função de u . A reta representa a Equação (16).

Das Equações (13) – (16) resulta:

$$S = S_0 + 100(u - 1) + 0.9(1 - u)v \quad (17),$$

A Equação (17) mostra que $S = S_0$ quando $u=1$.

Pela Tabela 3 temos $a_0 \cong -32ml$ e $b_0 \cong 1.3$, de modo que as Equações (7) e (17) dão:

$$S = -32ml + 1.3v + 100(u-1)ml + 0.9(1-u)v \quad (18).$$

Segundo os dados da Tabela 2, o volume médio de sangue, v , no coração, variou de $67ml$ a $102ml$. Para esta faixa de valores de v , a Figura 3 mostra que a reta que representa S_0 situa-se abaixo das retas que representam as funções cardíacas na condição de exercício.

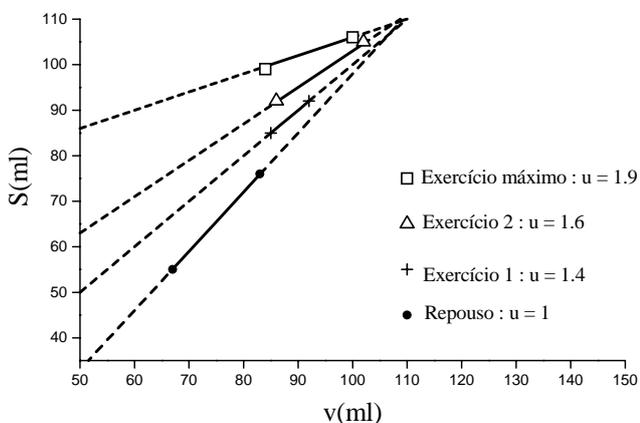


Figura 3 – Funções cardíacas $S = S(v; u)$, para os diferentes níveis de exercício, como uma família de curvas parametrizada em u .

Discussão e Conclusão

A análise matemática do problema da resposta cardiovascular a exercícios físicos mostrou a importância de se determinar a função cardíaca basal, correspondente à condição de repouso, pois é em relação a ela que se pode analisar as variações causadas pela realização de exercícios. Para uma determinação mais completa das funções cardíacas são necessários mais dados experimentais do que os apresentados por Poliner *et al.* (1980).

O aumento do volume de ejeção com o aumento do nível de exercício pode resultar do aumento da contratilidade do músculo cardíaco e/ou diminuição da resistência ao fluxo sanguíneo, de modo que o parâmetro u pode incluir a influência dos dois fatores. Por essa razão não identificamos u com o índice inotrópico i que indica o estado de contratilidade do músculo cardíaco. Com os dados de Poliner *et al.* (1980) não é possível calcular a importância relativa de cada um dos dois fatores no aumento do volume de ejeção.

As Equações (12) – (14), assim como a Figura 3, mostram que o aumento do volume de ejeção, ΔS , com o aumento do nível de exercício depende do volume médio de sangue no coração (pré-carga). Essa dependência pode significar que a contratilidade miocárdica depende da pré-carga, o que nos faz lembrar a afirmação de Milnor (1990) de que talvez não seja possível definir um índice de contratilidade miocárdica independente da pré-carga.

Referências

FRANK, O. Zur Dynamik des Herzmuskels. **Zeitschrift für Biologie**. n. 32, p. 370-447, 1895.

KATZ, A M. Physiology of the Heart. **Raven Press**. p. 203-205; 224-227. New York, 1977.

LITTLE, W. C. and DOWNES, T. R. Clinical evaluation of left ventricular diastolic performance. **Progress in Cardiovascular Diseases**. n. 32, p. 273-290, 1990.

MILNOR, W.R. Cardiovascular Physiology. **Oxford University Press**, New York, p. 100-103, 1990.

PATTERSON, S. W; PIPER, H; STARLING, E. H. The regulation of the heart beat. **J. Physiol**. n. 48, p. 465-513, 1914.

POLINER, L.R; DEHMER, G.J; LEWIS, S.E; PARKEY, R.W; BLOMQUIST, C.G; WILLERSON, J.T. Left ventricular performances in normal

subjects: a comparison of the responses to exercise in the upright and supine positions.
Circulation. n. 62, p. 528-534, 1980.