

DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DA VARIABILIDADE DA FREQUÊNCIA CARDÍACA EM CORREDORES

Felipe Person Malta, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, Universidade de São Paulo, fperson.malta@gmail.com

Tiago Lazzaretti Fernandes, Instituto de Ortopedia e Traumatologia, Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, tiago.lazzaretti@hc.fm.usp.br

Cyro Albuquerque Neto, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, cyroan@fei.edu.br

Arnaldo José Hernandez, Instituto de Ortopedia e Traumatologia, Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, ajhernandez@uol.com.br

Resumo. O objetivo deste trabalho é comparar métodos de determinação do limiar aeróbio, a partir da variabilidade da frequência cardíaca, com um protocolo de teste incremental em esteira. Foram comparados métodos encontrados na literatura em 23 corredores. O gráfico de Poincaré não se mostrou adequado para a determinação do limiar, ao contrário do observado por outros autores. Já a análise do desvio padrão se mostrou mais adequada, tendo uma forte correlação com o limiar respiratório.

Palavras chave: variabilidade da frequência cardíaca, limiar aeróbio, teste funcional, sistema nervoso autônomo, frequência cardíaca

1. INTRODUÇÃO

O estudo da variabilidade da frequência cardíaca (VFC) está atualmente relacionado a diversas aplicações como o estudo do sistema nervoso autônomo, fenômenos fisiológicos e psicológicos, fatores de riscos cardiovasculares e exercício físico. O eletrocardiograma é composto pelas ondas P, Q, R, S e T, que representa a polarização e despolarização das aurículas e dos ventrículos. A variabilidade da frequência cardíaca é obtida a partir da sequência de intervalos R-R. Frente a um estímulo externo como o exercício físico, observa-se que a resposta parassimpática é mais precoce e rápida do que a simpática, porém, posteriormente verifica-se que, de acordo com a continuidade da atividade e incremento de carga, a resposta simpática predomina. A modulação vagal da frequência cardíaca geralmente desaparece em 50-60% do consumo máximo de O_2 . Esse é o ponto em que o acúmulo de lactato também pode ser observado, causando aumento na ventilação e na excreção de CO_2 . (Karapetian et al., 2008, Cambri et al., 2008, Tulppo et al., 1998)

Para escolher a forma de análise da variabilidade da frequência cardíaca a ser utilizada em determinada condição fisiológica, deve-se considerar o tipo de registro que foi realizado. Estes podem ser de curta (5 a 30 minutos) ou de longa duração (24 horas) e realizados durante o repouso ou durante um estímulo, como as manobras respiratórias ou exercícios físicos. Para a análise linear são necessários 256 intervalos R-R, enquanto que para a análise não-linear é recomendado um número maior, em torno de 1000 intervalos R-R (Cambri et al., 2008, Marães, 2010, Bilchick e Berger, 2006).

A análise no domínio do tempo é a mais simples e rápida (Camm et al., 1996), baseada em cálculos estatísticos realizados nas séries de intervalos R-R em relação à variabilidade da frequência cardíaca respectiva. Dentre as análises disponíveis para estudos temporais, existem as que são baseadas nos intervalos entre os batimentos como média, desvio-padrão, mediana, extremos, quartis inferior e superior e diferença entre o intervalo R-R máximo e o intervalo R-R mínimo. Existem também as análises baseadas em comparações dos intervalos de tempo entre ciclos adjacentes, tais como RMSSD, RMSM e pNN50 (Cambri et al., 2008, Marães, 2010, Camm et al., 1996).

O SDNN avalia o desvio-padrão de todos os intervalos R-R do traçado de 24 horas (intervalo R-R24) e apresenta uma correspondência com a potência total do espectro de frequência, ou seja, a variabilidade total. Entretanto, pNN50 e RMSSD quantificam variações rápidas da frequência cardíaca, correlacionando-se com o componente de alta frequência do espectro de potência (Bilchick e Berger, 2006, Camm et al., 1996). Essas análises são classificadas como métodos lineares e não descrevem adequadamente os sistemas humanos, em razão principalmente de sua natureza dinâmica.

O gráfico de Poincaré é um método não-linear muito utilizado para o estudo da VFC. Ele pode ser analisado de forma visual ou através de aproximações matemáticas, por meio da observação da figura formada pelos intervalos R-R 24 e análise quantitativa por meio do ajuste de curvas que derivam três índices: o SD1 representa o registro instantâneo da frequência cardíaca batimento a batimento; o SD2 representa o registro a longo prazo; enquanto o SD1/SD2 mostra a razão entre as variações curta e longa dos intervalos R-R (Tulppo et al., 1998, Marães, 2010, Camm et al., 1996).

Por outro lado, a análise no domínio da frequência não é obtida diretamente como as análises temporais, sendo necessário transformar os ritmos do domínio do tempo para o da frequência através de vários procedimentos matemáticos. Dentre os métodos disponíveis no domínio da frequência, o mais utilizado, por ser simples e muito

eficiente, é a transformada rápida de Fourier, que permite obter a densidade espectral de potência. A análise espectral consiste na decomposição de um sinal numa soma de ondas sinusais de diferentes amplitudes e frequências. Esta pode ser obtida por meio da análise de sucessivas séries de intervalos R-R, obtidos a partir do sinal eletrocariográfico. A análise do espectro de potência da variabilidade da frequência cardíaca tem sido extensamente usada para mensurar a função autonômica na prática clínica e em estudos científicos (Cambri et al., 2008, Marães, 2010, Camm et al., 1996).

1.1. Variabilidade da frequência cardíaca em exercícios físicos

O exercício físico é um comportamento que provoca importantes modificações no funcionamento do sistema cardiovascular e em seus mecanismos de ajustes autonômicos. Assim, o estudo da VFC durante o exercício físico pode permitir uma análise adicional e não-invasiva do controle neural da frequência cardíaca durante esse comportamento. No decorrer do teste progressivo, a VFC diminui progressivamente até cerca de 50% da carga máxima e, a partir desse ponto, tende a estabilizar. Essa tendência deve ocorrer, possivelmente, devido à intensa relação entre a redução da VFC e de retirada da influência vagal sobre o nodo sinoatrial (Cambri et al., 2008, Marães, 2010).

Alonso (1998) e Lima (2012) utilizaram diferentes protocolos como testes e diversos métodos de identificação que mostraram essa tendência de comportamento da VFC durante exercícios. Apesar da VFC diminuir desde os instantes iniciais, ela somente atinge níveis expressivos em 60% do VO_2 de pico, estabilizando-se logo após.

Uma grande aplicação da VFC em exercícios físicos é a possível determinação do limiar anaeróbio do indivíduo. Tradicionalmente, o limiar anaeróbio é determinado pela detecção do aumento da concentração sanguínea de ácido láctico acima de uma determinada potência de esforço (limiar do lactato), ou a partir da análise da concentração de O_2 e CO_2 no ar expirado (limiares respiratórios). Porém, com o estudo do sistema autonômico durante exercícios físicos, foi constatado que esse poderia ser um método não-invasivo e de baixo custo na identificação do limiar anaeróbio. Bunc et al. (1995) e Marães et al. (2010) mostraram que existe um aumento não-linear da frequência cardíaca em relação à potência aplicada durante o exercício físico. Conconi et al. (1982) foi pioneiro na determinação da não-linearidade da frequência cardíaca, com exercícios físicos de protocolo incremental de rampa em mais de quatrocentos indivíduos.

1.2. Limiar da variabilidade da frequência cardíaca

Assim como o limiar anaeróbio está sendo muito estudado a partir da VFC, vários outros limiares metabólicos podem ser estudados e identificados pelo limiar da variabilidade da frequência cardíaca (LiVFC), como o lactato, a ventilação e a frequência cardíaca (FC) (Tulppo et al., 1998, Alonso et al. 1998, Lima e Kiss, 2012). O LiVFC pode ser considerado um indicador de capacidade aeróbia, ou seja, pode ser utilizado como parâmetro fisiológico na prescrição de exercícios (Cambri et al., 2008).

Lima e Kiss (2012) estudaram o LiVFC de diversos indivíduos em testes progressivos de bicicletas ergométricas e, através do plot de Poincaré, encontraram resultados significativos (correlação de Pearson com $r = 0,76$) na comparação entre o LiVFC e o limiar de lactato sanguíneo, quando o SD1 for inferior a 3 ms na curva de decréscimo da VFC em função da intensidade do exercício. Tulppo et al. (1998) consideraram como LiVFC o primeiro estágio no decréscimo da curva VFC em função da intensidade, sendo que a diferença entre o SD1 de dois estágios consecutivos não pode ser maior que 1 ms. Alguns métodos de regressão linear podem ser utilizados também como critério de determinação da LiVFC, porém, é necessária adaptação dos métodos para o estudo conduzido (Cambri et al., 2008).

A grande vantagem na mensuração da VFC durante o exercício físico está no fato de que a mesma é determinada pelo equilíbrio entre atividade vagal e simpática do SNA. Sua análise possibilita quantificar a modulação do SNA na frequência de disparo do nodo sinoatrial (Camm, 1996). Sendo assim, durante o exercício físico, além da mensuração da FC para avaliação do treinamento, o LiVFC pode ser utilizado como parâmetro para prescrição de exercícios em pessoas saudáveis ou com doenças cardíacas (Cambri et al., 2008).

2. METODOLOGIA

A amostra é constituída de 23 indivíduos jovens, do sexo masculino, saudáveis, praticantes de exercícios físicos (Silva, 2012). Para o teste foi utilizado um cardiofrequencímetro Polar® que permite o registro da VFC e um ergo-espírometro (TrueMax 2400 Metabolic Measurement System, Consentius Technologies) para obtenção do limiar respiratório. Para análise dos dados foi usado um programa computacional próprio desenvolvido para análise, na linguagem C++.

O protocolo do teste incremental é baseado na velocidade média em que cada indivíduo alega correr, sendo que ele inicia o teste com 70% da velocidade expressa. A partir disso, a cada 4 minutos a velocidade é aumentada em 1 km/h até a exaustão, com um período de repouso de 5 minutos antes do início dos testes e um tempo para recuperação logo após o exercício. O procedimento experimental foi aprovado pelo comitê de ética da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (CAPPesq).

A partir dos dados coletados, média, desvio-padrão, RMSSD, SD1 e SD2 foram calculados para 6 intervalos de tempo, variando de 15 a 240 s antes do aumento de velocidade. Esses valores são arbitrários, sendo possível alterá-los

de maneira a representar melhor a condição do exercício físico. Entretanto, é visto na literatura que durante testes incrementais, o tamanho das amostras é muito pequeno (entre 1 e 2 minutos), fazendo com que seja necessário intervalos pequenos (10 a 30 segundos), anteriores a mudança de velocidade, para análise temporal. Lima e Kiss (2012) realizaram testes com incremento a cada 1 minuto, sendo que a análise dos resultados foram 10 s antes da mudança de potência. Para interpretação no domínio da frequência, é recomendado o mínimo de 256 intervalos RR, pois é a quantidade mínima necessária para realizar a transformada rápida de Fourier e gerar o espectro de potências.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. (1) indica os corredores que ocorreram alteração no limiar anaeróbio, sendo que a primeira análise foi feita com os valores de SD1, enquanto a segunda feita a partir do desvio padrão. Para alguns deles, os valores de SD1 não ultrapassavam em nenhum momento 3 ms, ou seja, aparentemente não chegaram no limiar anaeróbio, porém com o desvio padrão foi possível determinar esse valor.

Tabela 1. Corredores que sofreram (ou não) alterações no limiar anaeróbio.

Corredores com alteração	1, 2, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
Corredores sem alteração	3, 5, 14
Corredores com novos valores de limiar anaeróbio	9, 10, 16

A Fig. (1) mostra o comportamento do SD1 para o corredor 1 e para o corredor 16. É possível observar dois pontos principais:

- i) O corredor 1 tem seu valor SD1 abaixo de 3 ms após os 24 minutos de exercício, enquanto o corredor 16 não chega em nenhum momento abaixo desse platô enquanto está realizando o teste. Ele atinge somente quando está na recuperação.
- ii) Para o corredor 1, as diferenças nos valores de SD1 para 15 até 240 s foram muito pequenos, desconsiderando a descontinuidade ocorrida aos 28 minutos. Já para o corredor 16, essa diferença é mais acentuada, porém continua sendo desnecessário a utilização de um intervalo de tempo grande (240s) para análise, pois pode causar erros para interpretação dos resultados.

Além do ocorrido com o corredor 16, em alguns indivíduos os valores de SD1 eram todos abaixo de 3 ms, que seria já considerado LiVFC se for utilizado o critério de Lima e Kiss (2012), mas não será se for utilizado o critério proposto por Tulppo (1998). Esses dois critérios são os mais utilizados quando se trata de testes incrementais, porém nos dois casos os testes eram realizados em bicicletas ergonômicas e não em esteiras, além do incremento ser na potência gerada no exercício, e não na velocidade do indivíduo diretamente. Esses critérios apresentam correlações muito boas ($r > 0,76$) para o tipo de teste que é proposto, mas é possível que, em testes diferentes, o comportamento da VFC seja diferente, assim como sua análise precisa ser diferenciada.

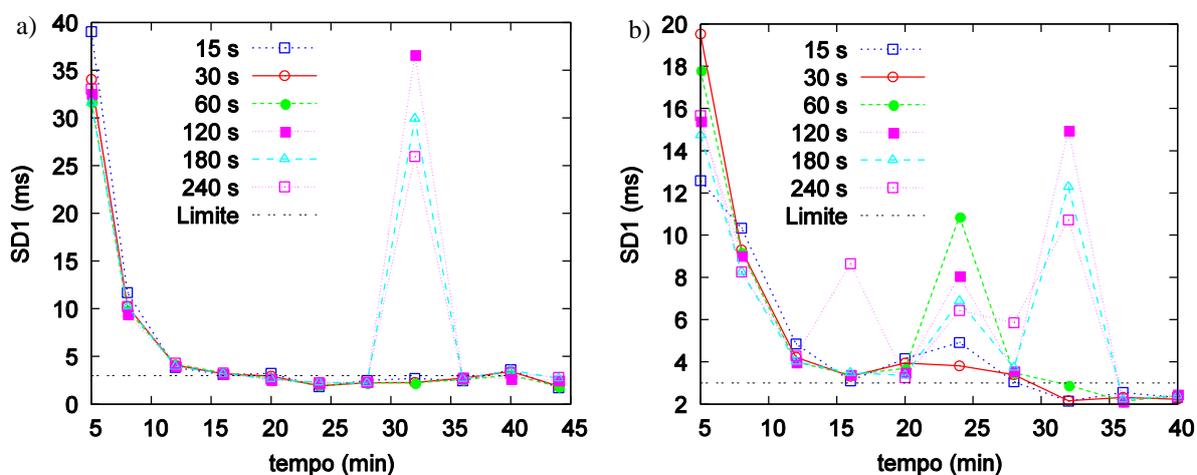


Figura 1. Variação de SD1 ao longo do tempo com amostragens anteriores a mudança de velocidade, para o corredor 1 (a) e 16 (b).

Fronchetti et al. (2006) relacionou os altos valores de pNN50, RMSSD, SD1 e HF em condição de repouso com a ação prolongada da atividade parassimpática durante exercício progressivo, apresentando melhor aptidão aeróbia. Mourot et al. (2004) apresentou uma relação entre atletas de *endurance* com sintomas de *overtraining* a um valor menor de HF e SD1 em repouso, em comparação aos treinados sem *overtraining*, que mostra a relação entre a atividade parassimpática prolongada e os altos índices. Esse é um relato importante, pois dentre os corredores, vários apresentaram valores altos de SD1 em repouso e, como consequência, ficaram muito tempo abaixo do platô de 3 ms durante o exercício.

A análise do desvio padrão dos intervalos R-R mostrou-se ser um método adequado para a determinação do limiar da variabilidade da frequência cardíaca. A Fig. (2) mostra o resultado para um dos atletas. A velocidade onde ocorre o valor mínimo do desvio padrão tem relação com o 2º limiar respiratório usando uma amostra de 60 s antes do incremento de velocidade (coeficiente de correlação 0,78). Foi possível concluir que com uma amostragem muito pequena não é possível determinar o limiar anaeróbio do corredor. Porém em amostragens um pouco maiores (30 e 60 s) fica mais fácil essa determinação. Em 60 s de amostra, fica bem clara a identificação do limiar anaeróbio, mas para uma amostragem maior (120, 180 e 240 s) os resultados são incoerentes, provavelmente porque o corredor estaria na transição para adaptação da nova velocidade de corrida.

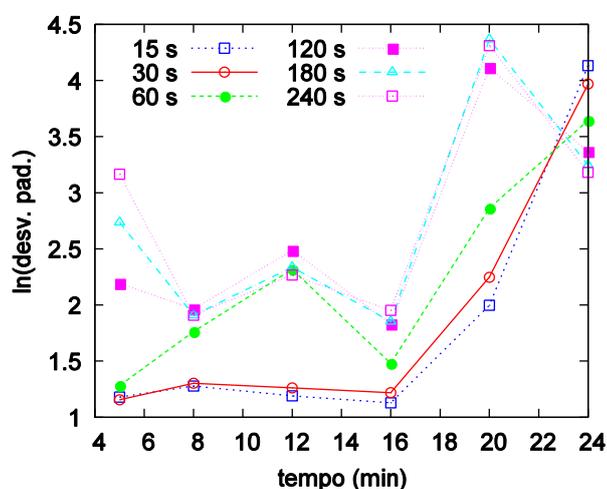


Figura 2. Variação do desvio padrão ao longo do tempo com amostragens anteriores a mudança de velocidade, para o corredor 11.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas metodologias para determinação do limiar da variabilidade da frequência cardíaca encontradas na literatura, e aplicadas para teste com corredores em esteira. Os resultados foram diferentes dos observados por alguns autores, quando comparados com dados obtidos pelo gráfico de Poincaré, pois seu principal valor (SD1) esteve sempre abaixo de 3 ms, fazendo com que os dois critérios mais empregados (Lima & Kiss e Tulppo) entrassem em conflito. Esse fato pode ser explicado pelas diferenças entre os testes propostos por eles e o utilizado nesse estudo. Já pela análise do desvio padrão, a identificação do limiar foi melhor, mostrando uma boa correlação com o limiar respiratório. Foram comparados diferentes tamanhos da amostra antes da variação da velocidade, mostrando que 60 s é um valor adequado para este tipo de teste.

5. REFERÊNCIAS

- Almeida, M.B., Araújo, C.G.S., 2003, "Efeitos do treinamento aeróbico sobre a frequência cardíaca", Revista Brasileira de Medicina do Esporte, Vol.9, pp. 104-112.
- Alonso, D.O. et al., 1998, "Comportamento da frequência cardíaca e da sua variabilidade durante as diferentes fases do exercício físico progressivo máximo", Arquivos Brasileiros de Cardiologia, Vol.71, pp. 787-792.
- Bilchick, K.C., Berger, R.D., 2006, "Heart rate variability", Journal of Cardiovascular Electrophysiology, Vol.17, pp. 691-694.
- Bunc, V. et al., 1995, "Verification of the heart rate threshold", European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, Vol.70, pp. 263-269.
- Cambri, L.T. et al., 2008, "Variabilidade da frequência cardíaca e controle metabólico", Arquivos Sanny de Pesquisa em Saúde, Vol.1, pp. 72-82.

Camm, A. et al., 1996, “Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. task force of the european society of cardiology and the north american society of pacing and electrophysiology”, *Circulation*, Vol.93, pp. 1043-1065.

Conconi, F. et al., 1982, “Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners”, *Journal of Applied Physiology*, Vol.52, pp. 869-873.

Fronchetti, L. et al., 2006, “Indicadores de regulação autonômica cardíaca em repouso e durante exercício progressivo: aplicação do limiar de variabilidade da frequência cardíaca”, *Revista Portuguesa de Ciências do Desporto*, Vol. 6, pp. 21-28.

Karapetian, G.K., Engels, H.J., Gretebeck, R.J., 2008, “Use of heart rate variability to estimate LT and VT”, *International Journal of Sports Medicine*, Vol 29, pp. 652-657.

Lima, J.R.P.; Kiss, M.A.P.D., 2012, “Limiar de variabilidade da frequência cardíaca”, *Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde*, Vol.4, pp. 29-38.

Loimaala, A. et al., 2000, “Controlled 5-mo aerobic training improves heart rate but not heart rate variability or baroreflex sensitivity”, *Journal of Applied Physiology*, Vol.89, pp. 1825-1829.

Marães, V.R.F.S., 2010, “Frequência cardíaca e sua variabilidade: análises e aplicações”, *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, Vol.3, pp. 33-42.

Marães, V.R.F.S. et al., 2005, “Identification of anaerobic threshold using heart rate response during dynamic exercise”, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, Vol.38, pp. 731-735.

Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Cappelle, S., Henriot, M.T., Wolf, J.P., Rouillon, J.D., Regnard, J., 2004, “Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincaré plot analysis”, *Clinical Physiology and Functional Imaging*, Vol.24, pp. 10-18.

Novais, L. et al., 2004, “Avaliação da variabilidade da frequência cardíaca em repouso de homens saudáveis sedentários e de hipertensos e coronariopatas em treinamento físico”, *Revista Brasileira de Fisioterapia*, Vol.8, pp. 207-213.

Silva, A.C.B., 2012, “Comparação entre a capacidade funcional mensurada pelo protocolo de lactato e ergoespirometria em corredores com treinamento regular e irregular”, *Iniciação Científica. Instituto de Ortopedia e Traumatologia. Faculdade de Medicina. Universidade de São Paulo*.

Tulppo, M.P. et al., 1998, “Vagal modulation of heart rate during exercise: effects of age and physical fitness”, *American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology*, Vol.274, pp. H424-H429.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio à pesquisa.

7. ABSTRACT

The aim of this work is the comparison of methods for the determination of the aerobic threshold from the heart rate variability, with an incremental treadmill test. Methods found in the literatures were compared for 23 runners. The Poincaré plot was not suitable for determining the threshold, unlike that observed by others. However, the standard deviation analysis was more appropriate, with a strong correlation with the respiratory threshold.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.