



# TÍTULO: CARACTERÍSTICA SIGMÓIDE DA FC DURANTE TESTE PROGRESSIVO E APLICAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS LIMIARES DE FC

Flávio de Oliveira Pires<sup>1</sup>

Ítalo Márcio Lourenço do Carmo<sup>1</sup>

Francine Nogueira Arroyo<sup>1</sup>

Fernando Roberto De-Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo – Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Lavras – Brasil

**Resumo:** Este estudo caracterizou a curva da FC em teste progressivo, e comparou diferentes métodos de identificação do limiar de FC. Oito homens executaram teste com carga inicial de 45 W, e incrementos de 15 W a cada minuto, até exaustão. A FC, medida em cada minuto, foi plotada em função da intensidade e ajustada pelas equações sigmóide (SIGM) e quadrática (QUAD). Os métodos visual, D<sub>máx</sub>, logarítmico e 2° derivada foram aplicados sobre os dados de FC ajustados pela melhor equação, para a identificação do PIFC e PDFC. A função SIGM produziu o melhor ajuste, com menores valores de SRQ e EQM. Quando expressos em valores absolutos ou em percentual da potência máxima, diferenças foram observadas entre os métodos de identificação de PIFC e PDFC, principalmente entre os métodos logarítmico e 2° derivada.

**Palavras chave:** Equação de Boltzmann; Equação quadrática; Teste progressivo; Pontos de deflexão; Ponto de inflexão;

## SIGMOID CHARACTERISTIC OF HR DURING INCREMENTAL TEST AND UTILIZATION OF THE DIFFERENT METHODS FOR DETERMINATION OF HR THRESHOLDS

**Abstract:** This study verified the increasing pattern of HR in incremental test and compared different methods to identification of HR deflection (HRDP) and inflection (HRIP) points. Eight men were underwent to incremental test beginning at 45 W and increasing 15 W.min<sup>-1</sup> until exhaustion. The HR was measured to each minute and was plotted against the W to be fitted by sigmoid (SIGM) and quadratic (QUAD) equations. The visual, D<sub>máx</sub>, logarithmic and second derivative were employed on the HR data obtained by the best equation to determine the HRIP and HRDP. The SIGM equation provided the best fitting with smallest RSS and MSE. When absolute and percentage intensity values were utilized, differences among identification methods of HRIP and HRDP were observed, mainly between logarithmic and 2° derivative methods.

**Key words:** Boltzmann equation; Quadratic equation; Incremental test; Deflection point; Inflection point.

## ABREVIações

FC: frequência cardíaca.

DFC: ponto de deflexão da FC.

PDFCDER: ponto de deflexão da FC identificado pelo método da 2ª derivada.

PDFCDmáx: ponto de deflexão da FC identificado pelo método Dmáx.

PDFCLOG: ponto de deflexão da FC identificado pelo método logarítmico.

PDFCVISUAL: ponto de deflexão da FC identificado pelo método visual.

PIFC: ponto de inflexão da FC.

PIFCDER: ponto de inflexão da FC identificado pelo método da 2ª derivada.

PIFCDmáx: ponto de inflexão da FC identificado pelo método Dmáx.

PIFCLOG: ponto de inflexão da FC identificado pelo método logarítmico.

PIFCVISUAL: ponto de inflexão da FC identificado pelo método visual.

PSE: percepção subjetiva de esforço.

QUAD: ajuste quadrático.

SIGM: ajuste sigmóide.

WMÁX: carga máxima absoluta de trabalho.

%WMÁX: carga máxima relativa de trabalho.

%FCPICO: FC relativa.

## INTRODUÇÃO

O comportamento da frequência cardíaca (FC) durante exercício é objeto de estudo desde o século passado, quando modelos lineares foram formulados para a caracterização da relação FC-carga de trabalho crescente (FC-CTC) (WAHLUND, 1948). Desde então, devido à forte associação com o consumo de oxigênio submáximo ou máximo ( $VO_{2máx}$ ), tanto quanto à facilidade de mensuração, modelos preditivos do  $VO_{2máx}$  baseados na regressão linear sobre os valores de FC contidos na parte central da curva FC-CTC foram desenvolvidos (ASTRAND e RYHMING, 1954; ACHTEN e JEUKENDRUP, 2003).

No entanto, a partir da proposição do limiar de FC (LFC) por Conconi et al. (1982), a característica linear da relação FC-CTC tem sido extensivamente refutada, abrindo espaço para uma descrição curvilinear desta relação, principalmente em cargas elevadas (ACHTEN e JEUKENDRUP, 2003). De fato, os estudos iniciais que propuseram o modelo linear já tinham deixado a ressalva de que nem todos os sujeitos apresentavam tal comportamento (WAHLUND, 1948; DAVIS 1968).

Lima (1997) propôs um modelo sigmóide para a relação FC-CTC em cicloergômetro, após comparação com o modelo linear. Neste estudo, verificou-se que a curva da FC poderia ser desdobrada em três fases distintas: I) característica curvilinear côncava, com valores de FC iguais ou inferiores 120-130 bpm; II) ponto de transição entre as parábolas côncava e convexa; III) característica curvilinear convexa, construída com valores superiores à 170 bpm. Neste caso, o comportamento curvilíneo em forma de “S”, durante exercício, estaria associado às alterações no controle autonômico da FC, padrão neuromuscular e acúmulo de metabólitos, os quais também foram descritos como curvilineares, com áreas de transição.

Inúmeros estudos têm descrito uma característica curvilínea com apenas um ponto de mudança na curva FC-CTC, comumente denominado ponto de deflexão da FC (PDFC), durante exercício em cicloergômetro de membros inferiores (WYATT et al., 2005), esteira (LUCÍA et al., 2000) ou remoergômetro (ÇELIK et al., 2005), lançando dúvida sobre um possível

comportamento sigmóide protocolo-dependente. Embora Lima (1997) tenha oferecido uma sustentação teórica para a primeira fase descrita na curva sigmóide, não está descartado o fato de que esta fase possa ser apenas um evento dependente do protocolo utilizado, já que nenhum outro ajuste curvilíneo, além do próprio ajuste sigmóide (SIGM), foi testado neste estudo.

As justificativas para que a relação FC-CTC possa ser um fenômeno curvilíneo com apenas um ponto de mudança são encontradas quando assumimos a existência de forte associação entre  $VO_2$  e FC, durante testes progressivos. Lima-Silva et al. (2003) e Lima (1997) observaram um melhor ajuste quadrático (QUAD) na curva  $VO_2$ -CTC em comparação ao ajuste linear. A tradicional relação entre  $VO_2$  e FC durante protocolo progressivo, e o entendimento de que estas variáveis sejam respostas de um mesmo mecanismo fisiológico subjacente, durante exercício, seriam razões para sugerir um comportamento quadrático na curva FC-CTC, como o observado na curva  $VO_2$ -CTC (LIMA, 1997; LIMA-SILVA et al., 2003). Desta forma, como o ajuste QUAD empregado nestes estudos descreve uma função parabólica em forma de “U” invertido, apenas um ponto de mudança na relação FC-CTC poderia ser identificado. Nesta mesma linha, Pfeiffer e Steyer (1984) notaram que a carga de trabalho em FC de 170 bpm era melhor predita com equação quadrática do que com equação linear.

Independentemente da característica do aumento da FC em função da intensidade de exercício, um LFC determinado no PDFC tem sido encontrado em diferentes grupos, protocolos e ergômetros, o qual está freqüentemente associado ao segundo limiar de transição metabólica (LUCÍA et al., 2000; WYATT et al., 2005; ÇELIK et al., 2005; DEBRAY e DEY, 2007). Contudo, a presença de um PDFC em todos os sujeitos nem sempre é observada em estudos que utilizam o método de inspeção visual para a sua identificação (VACHON et al., 1999; CAREY et al., 2002), podendo isto, ser resultado da subjetividade e variabilidade do método (ACHTEN e JEUKENDRUP, 2003; ROECKE et al., 2003).

Modelos matemáticos como o método  $D_{max}$  (KARA et al., 1996) e a regressão logarítmica (WYATT et al., 2005) foram sugeridos com o propósito de aumentar o poder de precisão e a sensibilidade da determinação do PDFC. No entanto, quando muito, estes métodos foram comparados ao método de inspeção visual, não havendo estudos que tenham investigado a concordância destes métodos na identificação do PDFC. Desta maneira, os objetivos deste estudo foram: 1) verificar se o comportamento da curva FC-CT em cicloergômetro é melhor descrito por função sigmóide ou função quadrática; 2) comparar diferentes métodos de identificação do LFC (matemáticos *versus* visual), a partir da relação FC-CTC ajustada pela melhor função matemática. Nesta linha, caso a curva FC-CTC apresentasse característica sigmóide, poderia ser sugerida a identificação de dois pontos de mudança.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### AMOSTRA

Oito homens fisicamente ativos ( $26,0 \pm 5,6$  anos;  $77,9 \pm 6,3$  kg;  $175,9 \pm 6,4$  cm;  $11,0 \pm 2,6$  % gordura corporal), sem qualquer restrição clínica que pudesse interferir na análise das variáveis estudadas, fizeram parte do estudo. Na primeira visita, todos os sujeitos assinaram um termo de consentimento informado contendo detalhes sobre os riscos contidos no estudo, o qual foi conduzido em acordo com o código de ética da Associação Médica Internacional (Declaração de Helsinki, 1964).

Após esclarecimentos sobre os procedimentos e medidas experimentais, como por exemplo, privação da ingestão de substâncias estimulantes antes do teste progressivo, foi realizada uma avaliação morfológica com medidas de peso corporal, estatura e dobras cutâneas do peito, abdômen e coxa, em forma de rodízio (3 medidas para cada dobra), segundo padronização da ISAK (MARFELL-JONES, 2006). Para a estimativa da densidade corporal foi empregada equação de Jackson e Pollock (1985),

e para a estimativa do percentual de gordura foi utilizada equação de Brozek et al. (1963) (HEYWARD e STOLARCZYK, 2000).

## TESTE INCREMENTAL

Foi recomendado que os indivíduos não realizassem exercícios extenuantes 24 horas antes do teste. Os sujeitos executaram teste incremental em cicloergômetro de membros inferiores (Life Cycle® - modelo 8500), após aquecimento de 3 minutos em carga de 45 W. O teste iniciou-se com carga igual a 45 W, com incrementos de 15 W a cada minuto, até exaustão. A cadência do pedal foi mantida entre 60 e 70 rpm, sendo que a falta de sustentação da cadência neste intervalo foi o critério adotado para a interrupção do teste. A FC foi medida durante todo o teste (Polar® - modelo Vantage XL), sendo registrada a média dos 5 segundos finais de cada minuto. A percepção subjetiva de esforço (PSE) foi medida ao final de cada minuto através da escala de Borg (15 pontos). Enquanto a carga máxima de trabalho ( $W_{máx}$ ) foi identificada na maior carga sustentada com cadência do pedal entre 60 e 70 rpm, a FC de pico ( $FC_{PICO}$ ) foi assumida no mais alto valor observado ao longo do teste. Os testes foram conduzidos com temperatura situada entre 20° e 22° C, e umidade relativa do ar entre 25% e 40%.

## AJUSTES DE CURVA

Os dados de FC foram plotados em função da carga de trabalho e ajustados segundo as funções matemáticas sigmóide de Boltzmann (SIGM), e Quadrática (QUAD). A função SIGM descreve o comportamento em forma de “S” (Figura 1 A), de uma dada variável  $y$  em função de  $x$ , segundo a seguinte equação:

$$y = A1 + (A2 - A1) / (1 + e^{(x0 - x) / dx})$$

onde  $y$  é o valor predito de FC,  $x$  é o valor da carga de trabalho (W),  $A1$  e  $A2$  são os valores inicial e final de FC, respectivamente,  $x0$  é valor central da curva obtido pela 1° derivada da função, e  $dx$  é a constante de crescimento da curva.

De outro lado, a função quadrática descreve o comportamento em forma de “∩” (parábola) (Figura 1 B), de uma dada variável  $y$  em função de  $x$ , segundo a seguinte equação:

$$y = a (x^2) + b (x) + c$$

onde  $y$  é o valor predito de FC,  $x$  é o valor da carga de trabalho (W),  $a$  e  $b$  são coeficientes angulares da curva, e  $c$  é o coeficiente linear da curva.

## ANÁLISE RESIDUAL

Para análise da qualidade dos ajustes de curva foi utilizada a somatória dos resíduos quadrados (SRQ) e o erro quadrado médio (EQM) dos resíduos. Enquanto a SRQ foi obtida pela soma do quadrado da diferença entre os valores medidos e preditos de FC, o EQM foi obtido pela SRQ corrigida pela diferença entre o número de pontos contidos na curva e os graus de liberdade de cada função matemática (HUGHSON et al., 1987).

O coeficiente linear ( $\alpha$ ) e o coeficiente angular ( $\beta$ ) de um ajuste linear dos resíduos brutos em função dos valores medidos de FC foram calculados para fornecer uma idéia geral da distribuição dos resíduos para cada ajuste matemático. Neste caso, foi assumido que, quando  $\alpha$  e  $\beta$  fossem diferentes de zero, haveria tendência à superestimação ou subestimação dos valores medidos no início (parâmetro  $\alpha$ ) ou ao longo (parâmetro  $\beta$ ) da curva FC-CTC.

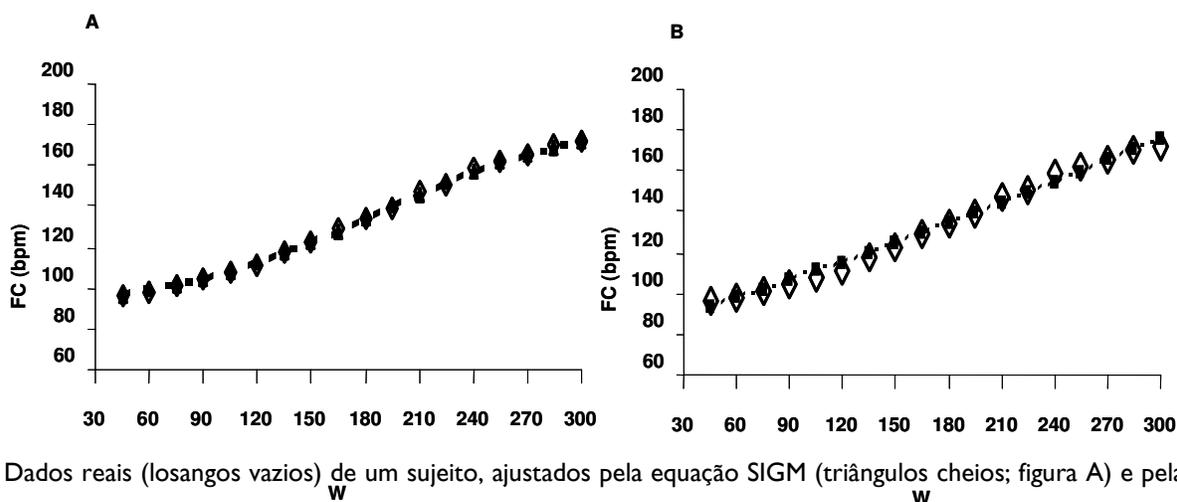


Figura 1. Dados reais (losangos vazios) de um sujeito, ajustados pela equação SIGM (triângulos cheios; figura A) e pela equação QUAD (quadrados cheios; figura B).

## IDENTIFICAÇÃO DO LFC

Após determinar a melhor função matemática que descreveu o comportamento da relação FC-CTC, três diferentes métodos foram empregados nos valores de FC ajustados, para a identificação do LFC: 1) Visual: identificado pela mediana entre três avaliadores no ponto de desaceleração da relação FC-CTC, ou mais pontualmente, no último ponto da curva onde a partir deste houve redução do incremento nos valores de FC (BALLARIN et al., 1996); 2) Dmáx: o ponto de desaceleração foi obtido após ajuste de regressão linear sobre os valores da relação FC-CTC, utilizando o primeiro e o último ponto da curva construída com valores de  $FC \geq 140$  bpm (KARA et al., 1996). A diferença entre os valores gerados pelo melhor ajuste e os valores obtidos pelo ajuste linear foi calculada, e a maior distância perpendicular entre estes (Dmáx) foi assumida como o ponto de desaceleração; 3) Logarítmico: semelhante ao método empregado por WYATT et al. (2005), uma regressão logarítmica foi calculada sobre a curva da FC, e o ponto de desaceleração foi determinado no segundo ponto de cruzamento entre os valores de FC gerados pelo melhor ajuste e os valores originados pela regressão logarítmica.

Considerando que as funções QUAD e SIGM descrevem um comportamento da relação FC-CTC em forma de “ $\cap$ ” e “S”, respectivamente, assumiu-se *a priori* que, enquanto seria possível identificar apenas um ponto de mudança de direção na curva ajustada pela função QUAD, seria possível identificar dois pontos de mudança de direção na curva ajustada pela função SIGM. Conseqüentemente, caso fosse encontrado um melhor ajuste SIGM na relação FC-CTC, um ponto de aceleração na parte inferior da curva poderia ser identificado. Para a determinação deste ponto, propusemos a aplicação dos mesmos métodos descritos acima, utilizando entretanto, as seguintes adequações: 1) Visual: último ponto da curva onde a partir deste, houve elevação do incremento nos valores de FC; 2) Dmáx: maior distância perpendicular entre os valores primários e os preditos pela regressão linear, utilizando-se valores de  $FC \leq 140$  bpm; 3) Logarítmico: primeiro ponto de cruzamento entre os valores de FC gerados pelo melhor ajuste e os valores originados pela regressão logarítmica. Neste caso, assumindo que a relação FC-CTC seja descrita por função SIGM, propusemos também, a aplicação de derivadas para a determinação destes pontos de

mudança de direção, sendo os pontos de máxima aceleração e máxima desaceleração, determinados matematicamente pela 2ª derivada da função sigmoideal da relação FC-CTC.

Para facilitar a interpretação dos métodos empregados, o ponto de desaceleração da FC, comumente chamado de PDFC, será tratado por  $PDFC_{VISUAL}$ ,  $PDFC_{Dmáx}$ ,  $PDFC_{LOG}$  e  $PDFC_{DER}$ , quando determinado pelos métodos visual,  $Dmáx$ , logarítmico e 2ª derivada, respectivamente. De outro lado, caso um ponto de aceleração fosse identificado, este seria chamado de ponto de inflexão da FC (PIFC), tratado por  $PIFC_{VISUAL}$ ,  $PIFC_{Dmáx}$ ,  $PIFC_{LOG}$  e  $PIFC_{DER}$ , quando determinado pelos métodos visual,  $Dmáx$ , logarítmico e 2ª derivada, respectivamente. A figura 1 ilustra os PIFC e PDFC identificados por cada método. Todos os LFC foram expressos na carga de trabalho (W), com seus respectivos valores em FC (bpm),  $\%W_{Máx}$ ,  $\%FC_{PICO}$  e em PSE.

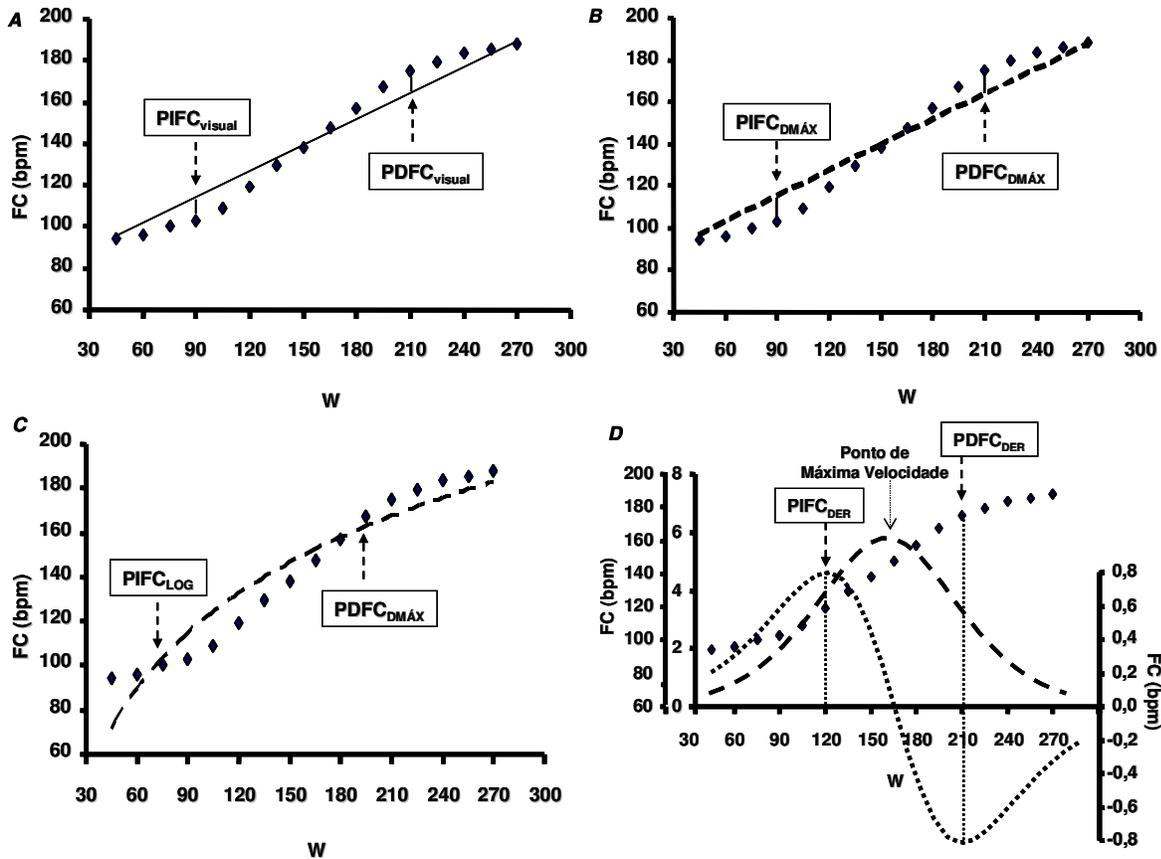


Figura 2. Representação gráfica da identificação dos PIFC e PDFC pelos métodos: A) visual ( $PIFC_{VISUAL}$  e  $PDFC_{VISUAL}$ ); B)  $Dmáx$  ( $PIFC_{Dmáx}$  e  $PDFC_{Dmáx}$ ); C) logarítmico ( $PIFC_{LOG}$  e  $PDFC_{LOG}$ ); E) 2ª derivada ( $PIFC_{DER}$  e  $PDFC_{DER}$ ). Dados reais de um sujeito.

### ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise descritiva é apresentada em média  $\pm$  desvio padrão, após a distribuição dos dados ter sido verificada pelo teste de Shapiro Wilk's. A significância das diferenças na SRQ e no EQM entre os ajustes de curva (SIGM x QUAD) foi verificada com teste T para medidas dependentes. A significância das diferenças entre os métodos de identificação dos LFC foi verificada com Anova (one way), e *post hoc* de Bonferroni ou Dunnett's III, conforme o comportamento da variância. Quando necessário, o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado. As análises foram executadas em software Origin® (6,0), Matlab® (7,0) e SPSS® (15,0), adotando-se um nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ).

## RESULTADOS

Os valores alcançados de  $W_{MÁX}$  e  $FC_{PICO}$  foram  $247,5 \pm 32,1$  W e  $181,0 \pm 8,5$  bpm, respectivamente. A  $FC_{PICO}$  atingiu  $93,4 \pm 5,0$  % da FC máxima prevista para a idade ( $FC_{máxima} = 220 - idade$ ).

## AJUSTES DE CURVA

O ajuste SIGM foi significativamente melhor do que o ajuste QUAD, apresentando a menor SRQ e o menor EQM (Tabela I). Com relação à distribuição dos resíduos de cada ajuste, os valores estimados pelo SIGM e QUAD não mostraram tendência a superestimar ou subestimar os valores medidos ao longo da curva FC-CTC (parâmetro  $\beta$ ), tão pouco os valores iniciais da curva (parâmetro  $\alpha$ ) (Tabela I e Figura 3).

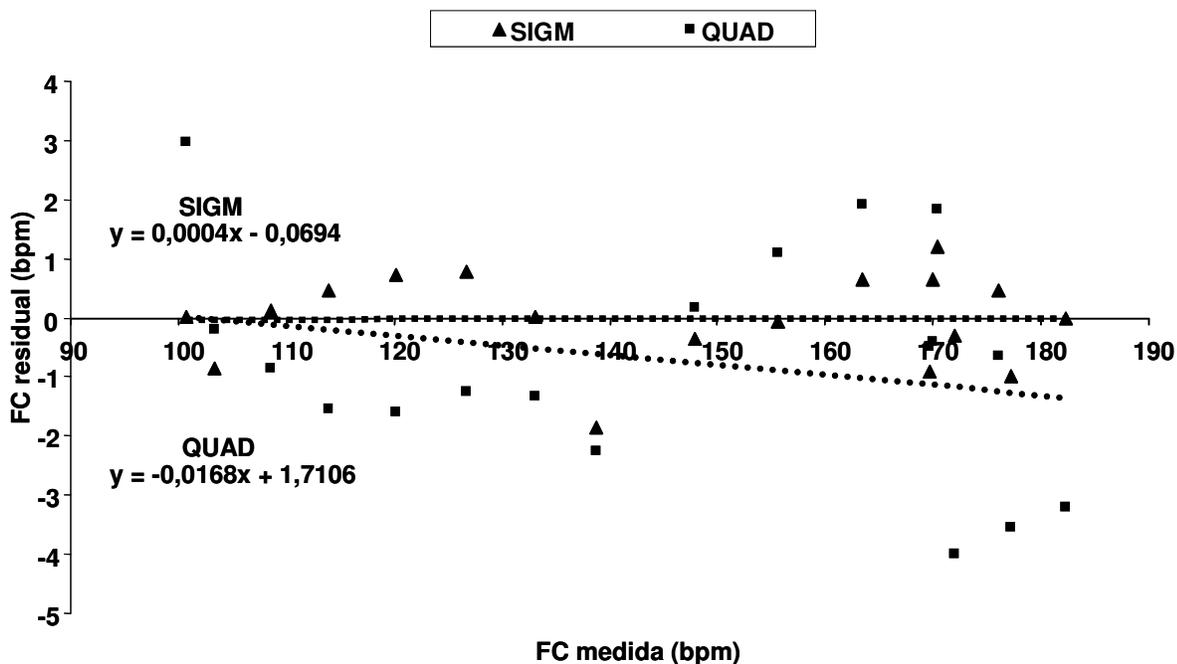


Figura 3. Dispersão residual dos ajustes SIGM e QUAD, e seus respectivos valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , obtidos pela equação de regressão linear.

Tabela I. Média e desvio padrão (bpm) dos parâmetros SRQ, EQM,  $\alpha$  e  $\beta$ , dos ajustes SIGM e QUAD.

	SRQ	EQM	$\alpha$	$\beta$
SIGM	$52,5 \pm 37,8$	$4,9 \pm 3,2$	-0,0694	0,0004
QUAD	$130,9 \pm 57,3‡$	$11,0 \pm 4,8‡$	1,7106	-0,0168

‡: diferente de SIGM ( $p < 0,01$ )

## MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS LFC

Com relação ao PIFC, de maneira geral, diferenças significantes foram observadas entre  $PIFC_{DER}$  e  $PIFC_{LOG}$  expressos na carga absoluta de trabalho (W) ou em valores de FC (bpm), tanto quanto em percentual da  $W_{MÁX}$  e da  $FC_{PICO}$  (Tabela 2). No PDFC, os mesmos métodos ( $PDFC_{DER}$  e  $PDFC_{LOG}$ ) também foram significativamente diferentes quando expressos na carga absoluta de trabalho (W) ou em valores de FC (bpm), tanto quanto em percentual da  $W_{MÁX}$  e da  $FC_{PICO}$ . Entretanto, em valores percentuais da  $W_{MÁX}$  e da  $FC_{PICO}$ , diferenças foram observadas entre outros métodos (Tabela 3).

Tabela 2. Médias e desvios padrão dos PIFC identificados pelos métodos  $PIFC_{VISUAL}$ ,  $PIFC_{DER}$ ,  $PIFC_{DMÁX}$  e  $PIFC_{LOG}$ , expressos em valores absolutos (W e FC), e relativos (%  $W_{MÁX}$  e %  $FC_{PICO}$ ).

	$PIFC_{VISUAL}$	$PIFC_{DER}$	$PIFC_{DMÁX}$	$PIFC_{LOG}$
<b>W</b>	84,4 ± 13,7	105,0 ± 22,9*	88,1 ± 14,9	70,0 ± 4,6*
<b>%<math>W_{MÁX}</math></b>	34,3 ± 5,6	41,9 ± 10,4*	35,9 ± 6,5	28,5 ± 2,7*
<b>FC (bpm)</b>	111,5 ± 5,9	117,6 ± 3,5*	112,4 ± 5,3	103,5 ± 8,4*
<b>%<math>FC_{PICO}</math></b>	61,6 ± 2,3	65,2 ± 3,6*	62,1 ± 2,6	57,1 ± 3,2*

\* ( $p < 0,05$ )

Tabela 3. Médias e desvios padrão dos PDFC identificados pelos métodos  $PDFC_{VISUAL}$ ,  $PDFC_{DER}$ ,  $PDFC_{DMÁX}$  e  $PDFC_{LOG}$ , expressos em valores absolutos (W e FC), e relativos (%  $W_{MÁX}$  e %  $FC_{PICO}$ ).

	$PDFC_{VISUAL}$	$PDFC_{DER}$	$PDFC_{DMÁX}$	$PDFC_{LOG}$
<b>W</b>	198,8 ± 33,8	237,5 ± 41,8*	208,1 ± 27,1	183,8 ± 22,0*
<b>%<math>W_{MÁX}</math></b>	80,1 ± 7,3†	91,7 ± 7,3**†	84,2 ± 5,0#	74,4 ± 5,2**#
<b>FC (bpm)</b>	165,1 ± 10,9	178,0 ± 7,7*	168,9 ± 5,4	157,7 ± 9,5*
<b>%<math>FC_{PICO}</math></b>	91,3 ± 5,4†	97,5 ± 3,1**†	93,4 ± 2,6‡	87,1 ± 2,0**‡

\*, †, # ( $p < 0,05$ ); \*\*, ‡ ( $p < 0,01$ )

## DISCUSSÃO

O presente estudo testou duas funções matemáticas que descrevem um comportamento curvilíneo na curva FC-CTC, e comparou alguns métodos matemáticos de determinação do PDFC ao método de inspeção visual. Ao menos em nosso conhecimento, nenhum outro estudo testou a hipótese da FC apresentar comportamento quadrático durante protocolo

incremental. De outro lado, um dos principais achados foi a possível identificação de dois pontos de mudança de direção na curva da FC, considerando um comportamento sigmóide na relação FC-CTC.

## AJUSTE SIGMÓIDE VERSUS QUADRÁTICO

Estudos anteriores propuseram um comportamento sigmóide da FC durante teste incremental, após comparação com o ajuste linear (LIMA, 1997; PIOVEZANA e DE-OLIVEIRA, 2005). Nestes estudos, observou-se que os valores de FC estimados pela equação linear superestimavam os valores da porção inferior da curva, freqüentemente  $\leq$  a 130-140 bpm, tanto quanto os valores da porção superior, geralmente  $\geq$  a 170 bpm. No presente estudo, baseado na tradicional associação sugerida entre FC e  $VO_2$  (ACHTEN e JEUKENDRUP, 2003) e no melhor ajuste QUAD observado na curva  $VO_2$ -CTC, em comparação ao ajuste linear (LIMA, 1997; LIMA-SILVA et al., 2003), aventamos a possibilidade de que a relação FC-CTC pudesse descrever um crescimento parabólico. No entanto, semelhantemente ao encontrado nos estudos de Lima (1997) e Piovezana e De-Oliveira (2005), notamos um melhor ajuste SIGM, com menores SRQ e EQM.

Quando analisamos a parte inferior da curva da FC, notamos que o ajuste QUAD apresenta maior dispersão residual em valores de FC  $\leq$  140 bpm, em comparação ao SIGM. Como pode ser observado na figura 3, o ajuste QUAD tende a superestimar os valores de FC em torno de 1,5 bpm, nesta porção da curva. Na porção superior da curva ( $\geq$  170 bpm), o ajuste QUAD também mostrou maior dispersão residual do que o SIGM, porém, com maior tendência à superestimar os valores de FC do que na parte inferior ( $\pm$  3,5 bpm). Na parte central da curva, a função QUAD apresentou distribuição razoavelmente aleatória (Figura 3). Os resíduos do ajuste QUAD parecem se concentrar de maneira semelhante à distribuição residual do ajuste linear executado em outros estudos (LIMA, 1997; PIOVEZANA e DE-OLIVEIRA, 2005), mostrando que a adição de mais um coeficiente angular e a inclusão de uma potenciação sobre os valores de “x” não melhoram, substancialmente, o poder descritivo do ajuste linear de 1º grau. Provavelmente, isto seja devido às propriedades dos ajustes lineares e quadráticos, mostrando que parâmetros como coeficientes lineares e angulares sejam insuficientes para descrever, matematicamente, os mecanismos que controlam a FC durante teste incremental.

O ajuste SIGM mostrou dispersão residual muito próxima aos valores medidos, fazendo com que a linha de regressão dos resíduos brutos se posicionasse muito próximo ao valor zero ( $\alpha = -0,0694$  e  $\beta = 0,0004$ ), no início e ao longo de toda a curva. Quando analisamos a curva FC-CTC de forma fragmentada, notamos que o ajuste SIGM concentrou os valores estimados de FC ligeiramente abaixo dos valores medidos, durante a porção inferior da curva. Contudo, a dispersão neste trecho da curva foi freqüentemente inferior a 0,7 bpm (Figura 3). Nas porções intermediária e superior, a distribuição residual se apresentou razoavelmente aleatória, com dispersão freqüentemente menor do que 0,7 bpm no trecho intermediário, e 1,0 bpm no trecho superior.

Vale destacar aqui, alguns aspectos da estratégia utilizada para oferecer uma idéia geral da distribuição residual de cada ajuste: 1) a regressão sobre os resíduos do ajuste SIGM corrobora os menores SRQ e EQM encontrados para esta função, já que os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  foram muito próximos de zero, evidenciando que os valores estimados se concentraram muito perto dos valores medidos, no início e ao longo de toda a curva; 2) o parâmetro  $\beta$  dos resíduos brutos do ajuste QUAD demonstrou tendência de maior superestimativa, quão maiores eram os valores de FC ( $\beta = -0,0168$ ). Neste caso, devemos enfatizar que o parâmetro  $\alpha$  ( $\alpha = 1,7106$ ) não contradiz a tendência de superestimativa observada na parte inferior da curva;  $\alpha$  é calculado a partir de  $\beta$ , fazendo com que os valores negativos deste último tenham gerado valores positivos de  $\alpha$  (Thomas e Nelson, 2002);  $\alpha$  pode ser definido como o valor que a FC estimada assume quando a FC medida é igual a zero (THOMAS e NELSON, 2002), estando distante dos valores de FC no início do teste (FC de repouso =  $76,8 \pm 6,6$  bpm).

## AJUSTE SIGMÓIDE DA RELAÇÃO FC-CTC E SIGNIFICADO FISIOLÓGICO

O ajuste sigmóide de Boltzmann, descreve o comportamento de uma dada variável “y” em função de “x”, sendo possível observar duas fases de saturação entremeadas com um ponto de transição. O cálculo da 1ª derivada da equação sigmóide (ponto de máxima velocidade), denominado ponto de inflexão nos estudos de Lima (1997) e Piovezana e De-Oliveira (2005), permite identificar, matematicamente, o ponto exato onde ocorre a transição entre as fases de saturação. No presente estudo, este ponto ocorreu em torno de 63%  $W_{MÁX}$  ( $\pm 160$  W e  $\pm 140$  bpm), muito próximo ao encontrado por Lima (1997), e abaixo do observado por Piovezana e De-Oliveira (2005), aproximadamente 60%  $W_{MÁX}$  (aproximadamente 137 W) e 78%  $W_{MÁX}$  (aproximadamente 220 W), respectivamente. Contudo, como os mecanismos fisiológicos são processos contínuos, é possível sugerir que as fases de saturação ocorram meio a uma fase de transição, e não, meio a um ponto específico de transição. Neste caso, os pontos de máxima e mínima aceleração obtidos pelo cálculo da 2ª derivada da função SIGM poderiam fornecer faixas de transição dentro de limites fisiológicos (Figura 2D).

Utilizando o ponto de máxima aceleração da curva SIGM, observamos uma fase de saturação inicial entre a transição do repouso até, aproximadamente, 40% da  $W_{MÁX}$  (entre  $76,8 \pm 6,6$  bpm e  $117,6 \pm 3,5$  bpm). Nesta fase é possível notar que a FC apresenta pouca alteração, mesmo com incrementos lineares na carga de trabalho. A retirada do tônus vagal em intensidades de exercício  $\leq 40\%$   $W_{MÁX}$  (TULPPO et al., 1996; ALONSO et al., 1998), caracterizada pela redução dos componentes de baixa frequência, alta frequência, e da razão baixa/alta frequência do espectro de energia da variabilidade da FC (CASTIES et al., 2006), parece ser um dos fatores preponderantes para o comportamento da FC neste trecho inicial da curva sigmóide (LIMA, 1997; BUCHHEIT et al., 2007).

De outro lado, o ponto de mínima aceleração identificou a fase de saturação final em torno de 90% da  $W_{MÁX}$ , ou mais especificamente, a partir da FC de 178 ( $\pm 7,7$  bpm). Os mecanismos envolvidos no controle da FC neste trecho da curva sigmóide podem estar relacionados, principalmente, às concentrações de potássio extracelular, tanto quanto à eficiência da função cardíaca em indivíduos com maior espessura da parede do miocárdio (HOFMANN et al., 1994; LUCÍA et al., 1999; LUCÍA et al., 2002), embora mecanismos ligados à ação da adrenalina e pH não estejam descartados (HOFMANN et al., 1999; HOFMANN et al., 2005).

A partir desta proposta, identificamos uma fase de transição entre os trechos de saturação inicial e final, compreendendo uma faixa entre, aproximadamente, 120 e 180 bpm (40% e 90% da  $W_{MÁX}$ ). De certa maneira, esta proposta corrobora alguns resultados e sugestões implícitas de estudos anteriores (LIMA, 1997; LUCÍA et al., 2002), os quais mencionaram uma zona de saturação inicial com valores de FC  $\leq$  a 130 bpm, e uma zona de saturação superior, com valores de FC  $\geq$  a 170 bpm. O incremento do tônus simpático, associado ao comportamento das concentrações de adrenalina e noradrenalina, nesta faixa de intensidade (POKAN et al., 1995; CASTIES et al., 2006), poderia estar envolvido no controle da FC neste trecho de transição. Contudo, embora os mecanismos responsáveis pelo controle da relação FC-CTC pareçam envolver fatores autonômicos e humorais (LIMA, 1997), como não realizamos nenhuma medida indicativa destes mecanismos, as sugestões supramencionadas devem ser interpretadas com cautela.

## MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS LFC

Ainda que alguns métodos matemáticos de identificação do PDFC tenham sido sugeridos (KARA et al., 1996; WYATT et al., 2005), nenhum estudo comparou estes diferentes métodos. Na presente investigação, observamos que o PDFC foi

determinado numa mesma intensidade absoluta pelos métodos  $PDFC_{VISUAL}$ ,  $PDFC_{DER}$ ,  $PDFC_{Dmáx}$  e  $PDFC_{LOG}$ , embora  $PDFC_{DER}$  tenha sido diferente de  $PDFC_{LOG}$ , com valores mais baixos para o primeiro, e mais altos para o segundo. Estas diferenças podem ser devidas às características do ajuste SIGM, levando a curva logarítmica a cruzar a parte inferior e superior da curva sigmóide, antes que esta tenha alcançado seus pontos de máxima e mínima aceleração ( $PDFC_{DER}$ ). Possivelmente, isto explique, também, a alta intensidade ( $\pm 90\% VO_{2máx}$ ) identificada por este método em seu estudo original (WYATT et al. 2005), já que naquela ocasião foi empregado um ajuste linear antes da aplicação de  $PDFC_{LOG}$ .

Interessantemente, quando o PDFC foi expresso em valores percentuais da  $W_{MÁX}$ , outras diferenças foram detectadas entre os diferentes métodos. De fato, diferenças entre métodos de identificação de um mesmo limiar fisiológico são freqüentemente encontradas na literatura (CAREY et al., 2002; PIRES et al., 2006), as quais podem estar associadas à “preparação matemática” dos dados, antes da aplicação dos métodos de identificação. Neste caso, como a utilização de variáveis corrigidas por seus valores máximos ( $W_{MÁX}$ ) ou de pico ( $FC_{PICO}$ ) mostrou diferenças entre os pontos determinados, recomenda-se cautela quando da aplicação destes métodos para a determinação do PDFC.

Métodos matemáticos foram sugeridos como alternativa para reduzir a subjetividade e melhorar a sensibilidade do método visual (KARA et al., 1996; CAREY et al., 2002; WYATT et al., 2005), ainda que o nível de sensibilidade e até mesmo a objetividade deste último, sejam contraditórios entre alguns estudos (CAREY et al., 2002; PIRES et al., 2003). De maneira geral, embora o PDFC seja entendido como um indicador do 2º limiar de transição fisiológica (RIBEIRO et al., 1985; ACHTEN e JEUKENDRUP, 2003), esta suposição deve ser vista com cuidado, pois enquanto há diversas evidências de validade do PDFC identificado matematicamente (BUNC et al., 1995; LUCÍA et al., 2002; WYATT et al., 2005), a validade do PDFC identificado visualmente tem sido extensivamente questionada (VACHON et al., 1999; BOURGOIS et al., 2004). Fatores metodológicos como a carga de aquecimento, tipo (velocidade  $\times$  carga) e magnitude de incremento, podem ser os responsáveis pelos resultados contraditórios (GRAZZI et al., 2005).

Com a caracterização sigmóide da relação FC-CTC observada em nossos dados, foi possível identificar, também, um ponto de inflexão. Semelhantemente ao PDFC, notamos que o PIFC foi identificado, exceto entre  $PIFC_{DER}$  e  $PIFC_{LOG}$ , numa mesma intensidade absoluta e relativa ( $W_{MÁX}$  e  $\%W_{MÁX}$ ) entre os diferentes métodos. Entretanto, a ausência de medidas diretas de marcadores metabólicos é uma das principais limitações desta investigação. Assim, mesmo que deixemos a sugestão implícita de que o PDFC encontrado possa ser indicador do 2º limiar de transição fisiológica, já que este foi identificado dentro de uma faixa de intensidade freqüentemente encontrada em outros estudos (74,4% e 91,7%  $W_{MÁX}$ ) (BUNC et al., 1995; LUCÍA et al., 2002; WYATT et al., 2005), não é possível determinar o real significado fisiológico do PIFC identificado no presente estudo.

Enquanto o PIFC foi encontrado entre 28,5% e 41,9% da  $W_{MÁX}$ , de acordo com os diferentes métodos utilizados, Lima (1997) identificou um PIFC a 60% da  $W_{MÁX}$ , o qual foi significativamente maior do que o limiar de lactato identificado pela menor razão lactato/carga. Como era de se esperar, o PIFC identificado por Lima (1997) difere dos PIFC determinados aqui, pois Lima (1997) determinou o PIFC no ponto de máxima velocidade na curva sigmóide pelo cálculo da 1ª derivada, enquanto nós utilizamos o ponto de máxima aceleração. Neste caso, observamos a possibilidade de acessar o PIFC pelo cálculo da 2ª derivada, visualmente, ou com a aplicação do método  $Dmáx$  adaptado, visto que os métodos  $PIFC_{DER}$ ,  $PIFC_{VISUAL}$  e  $PIFC_{Dmáx}$  não foram diferentes. No entanto, se este LFC, aproximado pelo PIFC, possui associação com algum mecanismo fisiológico de controle da FC, estudos com medidas diretas de variáveis autonômicas ou humorais deverão ser conduzidos para responder esta pergunta.

## CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo corroboram evidências anteriores, sugerindo um comportamento sigmóide na relação FC-CTC. Desta maneira, a hipótese de que a relação FC-CTC pudesse apresentar característica quadrática, baseada na tradicional relação entre  $VO_2$  e FC durante protocolo progressivo, foi refutada, abrindo espaço para futuros estudos verificarem a possibilidade de haver um comportamento sigmóide semelhante na relação  $VO_2$ -CTC. Recomenda-se cautela quando da utilização de diferentes métodos para a identificação dos LFC, pois quando estes são expressos em relação à  $W_{MAX}$  ou  $FC_{PICO}$ , diferentes intensidades podem ser determinadas. Contudo, quando expressos na carga absoluta de trabalho, métodos visuais ou matemáticos tendem a identificar intensidades próximas.

## REFERÊNCIAS

- ACHTEN, J; JEUKENDRUP, A.E. Heart Rate Monitoring: Applications and Limitations. *Sports Medicine*, v. 33 (7): 517-538, 2003.
- ALONSO, D.O, FORJAZ, C.L, REZENDE, L.O, BRAGA, A.M, BARRETTO, A.C, NEGRÃO, C.E, RONDON, M.U.P.B. Heart rate response and its variability during different phases of maximal graded exercise. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, v. 71: 787-92, 1998.
- ASTRAND, P.O; RYHMING I. A monogram for calculation of aerobic capacity from pulse rate during submaximal work. *Journal of Applied Physiology*, v.7, p.218-221, 1954.
- BALLARIN, E; SUDHUES, U; BORSETTO, C; CASONI, I; GRAZZI, G; GUGLIELMINI; MANFREDINI, F; MAZZONI, G; CONCONI, F. Reproducibility of the Conconi test: test repeatability and observers variations. *International Journal of Sports and Medicine*, v. 17; 520-524, 1996.
- BOURGOIS, J; COOREVITS, P; DANNEELS, L; WITVROUW, E; CAMBIER, D; VRIJENS, J. Validity of heart rate deflection point as a predictor of lactate thresholds concepts during cycling. *Journal of Strength and Conditioning Research*, v.18 (3); 498-503, 2004.
- BUCHHEIT, M; SOLANO, R; MILLET, G.P. Heart-Rate Deflection Point and the Second Heart-Rate Variability Threshold During Running Exercise in Trained Boys. *Pediatric Exercise Science*, v. 19, 192-204, 2007.
- BUNC, V; HOLFMAN, P; LEITNER, H; GAISL, G. Verification of the heart rate threshold. *European Journal of Applied Physiology*, v. 70:263-269, 1995.
- CAREY, D.G; RAYMOND, R..L; DUOOS, BA. Intra- and inter-observer reliability in selection of the heart rate deflection point during incremental exercise: comparison to a computer generated deflection point. *Journal of Sports Science and Medicine*, v. 1; 115-121, 2002.
- CASTIES, J.F; MOTTET, D; LE GALLAIS, D. Non-linear analyses of heart rate variability during heavy exercise and recovery in cyclists. *International Journal of Sports and Medicine*, v 27 (10); 780-785, 2006.
- ÇELIK, Ö; KOSAR, S.N; KORKUSUZ, F; BOZKURT, M. Reliability and validity of the modified Conconi test on concept II rowing ergometers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, v. 19 (4); 871-877, 2005.
- CONCONI, F; BORSETTO, C; ZIGLIO, P.G.; DROGUETTI, P; CODEGA, L. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *Journal of Applied Physiology*, v.4:869-873, 1982.
- DAVIS, C.T.M. Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *Journal of Applied Physiology*, 24 (5); 700-706, 1968.

- DEBRAY, P; DEY, S.K. A comparison of the point of deflection from linearity of heart rate and the ventilatory threshold in the determination of the anaerobic threshold in indian boys. *Journal of Physiology Anthropology*, 26 (1): 31–37, 2007.
- GRAZZI, G; CASONI, I; MAZZONI, G; ULIARI, S; CONCONI, F. Protocol for the Conconi Test and Determination of the Heart Rate Deflection Point. *Physiology Research*. v. 54; 473-475, 2005.,
- HEYWARD, V.H; STOLARCZYK, L. M. *Avaliação da composição corporal aplicada*. São Paulo, Manole, 2000.
- HOFMANN, P; POKAN, R; PREIDLER, K; LEITNER, H; SZOLAR, D; EBER, B; SCHWABERGER, G. Relationship between heart rate threshold, lactate turn point and myocardial function. *International Journal of Sports and Medicine*, v. 15, n.5, p. 232 - 237, 1994.
- HOFMANN P; SEIBERT, F.J; POKAN, R; GOLDA, M; WALLNER, D; VON DUVILLARD, S.P. Relationship between blood ph, potassium and the heart performance curve (abstract). *Medicine and Science in Sports & Exercise*, v. 31, Supl. 628, 1999.
- HOFMANN, P; WONISCH, M; POKAN, R; SCHWABERGER, G; SMEKAL G; VON DUVILLARD, S.P. Beta1-adrenoceptor mediated origin of the heart rate performance curve deflection. *Medicine and Science in Sports & Exercise*, v.37, n. 10, p. 1704-1709, 2005.
- HUGHSON, R.L; WEISIGER, K.H; SWANSON, G.D. Blood lactate concentration increases as a continuous function in progressive exercise. *Journal of Applied Physiology*, v. 62, n 5, p. 1975 – 1981. 1987.
- KARA, M; GOKBEL, H; BEDIZ, C. Determination of the heart rate deflection point by the D<sub>máx</sub> method. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, n.36, p. 31- 34, 1996.
- LIMA, J.R.P. *Frequência cardíaca em cargas crescentes de trabalho: Ajuste sigmóide, ponte de inflexão e limiar de variabilidade da frequência cardíaca*. Tese de Doutorado apresentada à Escola de Educação Física e Esporte da Universidade de São Paulo, 1997.
- LIMA-SILVA A.E; GAGLIARDI J.F.L; LOTUFO R.F; KISS, M.A.P.D.M. Ajustes lineares vs quadráticos da curva de consumo de oxigênio em testes progressivos. *Revista Brasileira de Ciência e Movimento*, v. 11: 13-18, 2003.
- LUCÍA, A; CARVAJAL, A; BORAITA, A; SERRATOSA, L; HOYOS, J; CHICHARRO, J. L. Heart dimensions may influence the occurrence of the heart rate deflection point in highly trained cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, v. 33, p. 387-392, 1999.
- LUCÍA, A; CARVAJAL, A; PEREZ M; BORAITA, A; SERRATOSA, L; CHICHARRO, J.L. Heart rate responses during incremental exercise in Mater Runners. *Japanese Journal of Physiology*, v. 50, 155-158, 2000.
- LUCÍA, A; HOYO, J; SANTALLA, A; PÉREZ, M; CARVAJAL, A; CHICARRO, J.L. Lactic acidosis, potassium, and the heart rate deflection point in professional road cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, v.36, p.113-117, 2002.
- MARFELL-JONES, M; OLDS, T; STEWART, A; CARTER, L. *International standards for anthropometric assessment*. ISAK: Potchefstroom, South Africa, 2006.
- PFEIFFER, KP; STEYER, GE. Determination of the physical working capacity in children using three different regression models. *International Journal of Sports Medicine*, v 5 (2); 83-88, 1984.
- PIOVEZANA, P.S; DE-OLIVEIRA, F.R. Reprodutibilidade das variáveis derivadas da curva de frequência cardíaca em teste progressivo. *Lecturas Educación Física y Deportes*, v. 90, 2005. PIRES, F.O; LIMA-SILVA, A.E; GAGLIARDI, J.F.L; BARROS, R.V; KISS, M.A.P.D.M. Caracterização da curva do lactato sanguíneo e aplicabilidade do modelo D<sub>máx</sub> durante protocolo progressivo em esteira rolante. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, v. 12, nº 2: 71-75, 2006.
- PIRES, F.O; LIMA-SILVA, A.E; De-OLIVEIRA, F.R. Objetividade da Identificação do Ponto de Deflexão da Frequência cardíaca. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, v. 9, n. 1, p. S62-S62, 2003.

- POKAN, R.; HOFMANN, P.; LHEMANN, M.; LEITNER, H.; EBER, B.; GASSER, R.; SCHWABERGER, G.; SCHMID, P.; KEUL, J.; KLEIN, W. Heart rate deflection related to lactate performance curve and plasma catecholamine response during incremental cycle ergometer exercise. *European Journal of Applied Physiology*, v 70, n.2, p. 175-179, 1995.
- RIBEIRO, J.P.; FIELDING R.A.; HUGHES, V; BLACK, A; BOCHESI, M.A; KNUTTGEN, H.G. Heart rate break point may coincide with the anaerobic and not the anaerobic threshold. *International Journal of Sports and Medicine*. v.6 (4): 220-224, 1985.
- ROECKER, K; STRIEGEL, H; DICKHUTH, H.H. Heart-rate recommendations: transfer between running and cycling exercise? *International Journal of Sports and Medicine*, 24: 173-178, 2003.
- THOMAS J.R; NELSON, J.K. *Métodos de Pesquisa em atividade física*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- TULPPO, M.P; MAKIKALLIO, T.H; TAKALA, T.E; SEPPANEN, T; HUIKURI, H.V. Quantitative beat-to-beat analysis of heart rate dynamics during exercise. *American Journal of Physiology*, 271(1 Pt 2): H244-52, 1996.
- VACHON, J.A; BASSETT, D.R; CLARKE, S. Validity of the heart rate deflection point as a predictor of lactate threshold during Running. *Journal of Applied Physiology*, v. 87, n.1, p 452-259, 1999.
- WAHLUND, H. Determination of physical capacity. *Acta Physiologica Scandinavica*, 215 (suppl):1-78, 1948.
- WAYTT, F; GODOY, S; AUTREY, L; MCCARTHY, J; HEIMDAL J. Using a logarithmic regression to identify the heart rate threshold in cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, v. 19 (4); 838-841, 2005.

#### Contatos

Universidade de São Paulo  
Fone: não fornecido pelo autor  
Endereço: Rua Acalanto de Bartira, 166 – Butantã; CEP: 05358160  
E-mail: [piresfo@usp.br](mailto:piresfo@usp.br)

#### Tramitação

Recebido em: 01/12/07  
Aceito em: 13/03/08