

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
FACULDADE DE MEDICINA
INSTITUTO DO CORAÇÃO EDSON SAAD**

HUGO VALVERDE REIS

**Validação da determinação do limiar de anaerobiose
pela resposta da frequência cardíaca: comparação com
teste cardiopulmonar**

RIO DE JANEIRO

Outubro de 2019

HUGO VALVERDE REIS

**Validação da determinação do limiar de anaerobiose
pela resposta da frequência cardíaca: comparação com
teste cardiopulmonar**

Qualificação de Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós Graduação em Cardiologia do
Departamento de Clínica Médica da Faculdade de
Medicina da Universidade Federal do Rio de Janeiro
como parte dos requisitos para a obtenção do título de
Doutor em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Michel Silva Reis

RIO DE JANEIRO

Outubro de 2019

Lista de abreviaturas:

VO₂ - Consumo de oxigênio

FC – Frequência cardíaca

MET – Equivalente metabólico

TECP – Teste de exercício Cardiopulmonar

VO₂ max – Consumo máximo de oxigênio

LAV – Limiar ventilatório de anaerobiose

PA - Pressão arterial

VCO₂ - Produção de gás carbônico

QCO₂ - Produção periférica de gás carbônico

QO₂ - Consumo periférico de oxigênio

R – Coeficiente de troca respiratória

VE – Ventilação minuto

FR – Frequência respiratória

VC – Volume corrente

VE/VO₂ - Equivalente ventilatório de oxigênio

VE/VCO₂ - Equivalente ventilatório de gás carbônico

PaCO₂ - Pressão parcial de gás carbônico

V-slope – Slope da curva da produção de gás carbônico pelo consumo de oxigênio

PETO₂ - Fração parcial de expiração de oxigênio

PETCO₂ - Fração parcial de expiração de gás carbônico

RPM – Rotações por minuto

Lista de quadros, tabelas e figuras:

Quadro 1. Atividades expressas por MET's-Equivalente Metabólico ($\text{mLO}_2/\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$); Kg: Kilograma; km/h: quilômetros por hora.

Quadro 2. Indicações clínicas do teste de exercício cardiopulmonar.

Quadro 3. Escala subjetiva de esforço.

Quadro 4. Características dos tipos de ergômetros utilizados para o teste de exercício cardiopulmonar.

Quadro 5. Critérios de interrupção do exercício durante o teste de exercício cardiopulmonar.

Figura 1: Tela do programa (aerograph®) utilizado em nosso trabalho com as variáveis cardiorrespiratórias e metabólicas obtidas durante o teste de exercício cardiopulmonar (Fonte: próprio autor).

Figura 2. Variáveis ventilatórias e metabólicas e eletrocardiograma sendo captadas e registradas durante todo o período do teste de exercício cardiopulmonar (Fonte: próprio autor)

Figura 3. Execução do teste de exercício cardiopulmonar (Fonte: próprio autor).

Figura 4. Ilustração do software *InflectionUFRJ* aos dados de FC. O ponto representando pela reta verde do gráfico foi considerado o tempo de ocorrência do LAV por este método. (Fonte: próprio autor).

Tabela 1. Características gerais da amostra.

Figura 5. Fluxograma do estudo

Tabela 2. Teste de confiabilidade das medidas para os três avaliadores independentes

Figura 6. Correlações de Pearson para as avaliações dos três avaliadores independentes.

Figura 7. Teste de concordância de Bland-Altman para as avaliações dos três avaliadores independentes.

Figura 8. Teste t para comparação das médias de tempo (s) e VO_2 (L/min) entre os diferentes métodos.

Sumário

Sumário

| | |
|---|----|
| RESUMO..... | 7 |
| FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 8 |
| Sedentarismo e exercício físico..... | 8 |
| Teste de Exercício Cardiopulmonar..... | 9 |
| Indicações e aplicabilidade..... | 10 |
| Técnicas e equipamentos..... | 11 |
| Ergômetros..... | 13 |
| Tipos de protocolo..... | 16 |
| Critérios e interrupção do teste..... | 17 |
| Variáveis do teste cardiopulmonar..... | 17 |
| Limiar anaeróbio ventilatório..... | 20 |
| Frequência cardíaca..... | 22 |
| INTRODUÇÃO..... | 24 |
| OBJETIVOS..... | 25 |
| MATERIAIS E MÉTODOS..... | 25 |
| Desenho do estudo..... | 25 |
| Amostra..... | 25 |
| Avaliação inicial..... | 26 |
| Teste de exercício cardiopulmonar máximo ou sintoma-limitado..... | 26 |
| MÉTODOS DE ANÁLISE..... | 29 |
| Método visual gráfico..... | 29 |
| Modelo estatístico heteroscedástico..... | 29 |
| Análise estatística..... | 31 |
| RESULTADOS PRELIMINARES..... | 31 |
| CONCLUSÃO..... | 35 |
| REFERÊNCIAS..... | 35 |

RESUMO

Validação da determinação do limiar de anaerobiose pela resposta da frequência cardíaca: comparação com teste cardiopulmonar

Hugo Valverde Reis

Orientador: Prof. Dr. Michel Silva Reis

Introdução: Estudos têm demonstrado que a prática regular de exercício físico está intimamente associada à redução significativa da morbidade e da mortalidade cardiovasculares. Porém é essencial que se realize avaliação minuciosa com objetivo de prescrever de maneira adequada, respeitando a individualidade biológica. O teste de exercício cardiopulmonar (TECP) é uma ferramenta útil na determinação da capacidade funcional. O limiar anaeróbio ventilatório (LAV) se mostra como um parâmetro importante para a prescrição de exercício. O método padrão ouro para obtenção do LAV é análise visual das curvas obtidas das variáveis ventilatórias do TECP. Entretanto, a análise do comportamento da frequência cardíaca (FC) aparece como estratégia promissora como ferramenta útil, simples e de baixo custo para determinar o LAV. **Objetivo:** Analisar a validade do modelo estatístico heteroscedástico e determinar o LAV através do comportamento da FC durante o TECP. **Métodos:** Foram utilizados todos os dados de TECP do Laboratório de Pesquisa em Avaliação e Intervenção Cardiorrespiratória (GECARE) de 2013 a 2019. A amostra consiste em testes de homens e mulheres com mais de 18 anos, saudáveis e com doenças crônicas ou com fator de risco para DAC. Todos os voluntários foram submetidos a uma avaliação clínica e ao TECP associado aos sistemas de ergoespirometria. O LA foi determinado pelo método visual gráfico e pelo modelo estatístico heteroscedástico através do software INFLECTION, onde foram analisadas as variáveis tempo, potência, FC e consumo de oxigênio. **Hipóteses:** Com a elaboração do projeto, nossa hipótese é que exista uma similaridade das variáveis do TECP determinado pela resposta da FC com o modelo visual gráfico na população estudada. **Resultados preliminares:** Não foi vista diferença significativa na avaliação inter-avaliador na obtenção do pelo método visual das variáveis ventilatórias, assim como correlações fortes e um bom índice de confiabilidade pelo método de Bland-Altman. No que se refere aos resultados preliminares da comparação entre o LAV e o LA pela resposta da FC, não foi vista diferença significativa na variável tempo pela análise das duas metodologias. **Conclusão:** Os resultados preliminares permitem inferir que a obtenção do LA pela resposta da FC pode ser um método alternativo com boa similaridade temporal ao método padrão ouro.

1.0 Fundamentação teórica

1.1 Sedentarismo e exercício físico

Os termos atividade física, exercício físico e esporte são correlatos, porém distintos. Atividade física pode ser definida como qualquer movimento corporal produzido pelos músculos esqueléticos que resulta em gasto energético, podendo ser classificada em ocupacional ou laboral, de transporte ou de lazer. A atividade física de lazer que engloba atividades voltadas para o condicionamento físico e promoção da saúde, mais estruturada e com propósito claramente definido de melhora de desempenho e/ou de saúde, convencionou-se denominar de exercício físico (I Diretriz de Prevenção Cardiovascular, 2013). Adicionalmente, para uma melhor definição de atividade física e exercício físico, é importante definir claramente a ampla variedade de intensidades associadas as atividades físicas. Métodos que quantificam a intensidade relativa do exercício físico incluem o consumo de oxigênio (VO_2), frequência cardíaca (FC) ou equivalentes metabólicos. Cada um desses métodos de descrever intensidade do exercício físico tem seus pontos fortes e limitações. O equivalente metabólico (MET) é uma medida de gasto de energia, além de ser uma maneira útil, conveniente e padronizada para descrever a intensidade absoluta de uma variedade de atividades físicas. Um MET é a taxa de gasto de energia enquanto está sentado em repouso, o que, para a maioria das pessoas, é uma absorção de oxigênio de aproximadamente 3,5 ml/(kg-min). O gasto de energia de outras atividades é expresso em múltiplos de METs (Quadro 1) (ACSM, 2000; POWELL *et al.*, 2011).

Quadro 1. Atividades expressas por MET's-Equivalente Metabólico ($mLO_2/kg * min^{-1}$); Kg: Kilograma; km/h: quilômetros por hora.

| Tipo de Atividade | MET's | Exemplo |
|-------------------------|-------|---|
| Atividades domésticas | 3,5 | Esfregar, passar pano |
| | 2,5 | Alimentar animais |
| | 2,5 | Molhar as plantas |
| | 7 | Carregar sacolas de compras |
| Atividades diversas | 1,5 | Reunião familiar envolvendo sentar, relaxar, falar, comer |
| | 2 | Passeio/ viagem/férias envolvendo caminhar e andar |
| Atividades ocupacionais | 3 | Andando, reunindo coisas no trabalho, pronto para sair |
| | 4 | Caminhar (velocidade moderada) carregando objetos leves |
| Atividades esportivas | 4 | Atletismo (tiro, lançamento de disco) |
| | 7 | Correr a 8 km/h |
| | 8 | Voleibol, jogo competitivo em um ginásio |

(Fonte: adaptado de AINSWORTH, *et al.*, 2000).

No que se refere à prescrição dos exercícios para indivíduos com fator de risco para DCV, podem ser realizadas tendo em consideração suas características como: tipo (aeróbico, resistência muscular, flexibilidade), modalidade (caminhada, corrida, bicicleta, dança), duração (tempo de execução), frequência semanal e sua intensidade. A realização de avaliações de aptidão física permite uma prescrição especificada dos exercícios físicos, com o objetivo de obter melhores resultados e minimizar os riscos da prática dos exercícios de maiores intensidades. Avaliações mais detalhadas deverão ser individualizadas, com avaliação antropométrica, força muscular, flexibilidade e realização do Teste de Exercício Cardiopulmonar (TECP). Com isso, podemos quantificar o déficit funcional frente ao desejável, bem como estabelecer metas a serem atingidas. Torna-se fundamental para o paciente a reavaliação, com o intuito de estimular o comprometimento, bem como mensurar a evolução ocorrida no período. Os benefícios são proporcionais aos ganhos obtidos (POWELL *et al.*, 2011; I Diretriz Brasileira de Prevenção Cardiovascular, 2013; Diretriz em Cardiologia do Esporte e do Exercício, 2013).

1.2 Teste de exercício cardiopulmonar

O TECP ou teste ergoespirométrico tem importância estabelecida como método de avaliação funcional tanto no Brasil quanto no mundo (HERDY *et al.*, 2016). O teste consiste em submeter o indivíduo a um exercício de intensidade gradativamente crescente até a exaustão ou o surgimento de sintomas e/ou sinais limitantes. Por meio desse exame é possível realizar análise das respostas clínicas, eletrocardiográficas, hemodinâmicas do indivíduo testado, além de uma gama importante de variáveis ventilatórias, que analisadas de forma integrada, permitem a completa avaliação dos sistemas cardiovascular, respiratório, muscular e metabólico no esforço, sendo considerado padrão-ouro na avaliação funcional cardiorrespiratória (STEIN *et al.*, 2006; III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010; HERDY *et al.*, 2016).

Uma das características mais importantes do TECP é a possibilidade de identificação não-invasiva de alguns parâmetros relevantes sob ponto de vista clínico ou para prescrição do exercício, como por exemplo, a obtenção do índice de consumo máximo de oxigênio (VO₂ max), padrão-ouro para avaliação da capacidade funcional.

Com a análise de curvas ventilatórias, o limiar ventilatório de anaerobiose (LAV) e o ponto de compensação respiratório também podem ser obtidos, dois importantes fenômenos fisiológicos para o ajuste da intensidade do exercício físico (ATS, 2003; NEDER & NERY, 2002; STEIN *et al.*, 2006; HERDY *et al.*, 2016).

1.2.1 Indicações e aplicabilidade

A análise do TECP deve ser sempre realizada à luz da indagação clínica subjacente à indicação do teste. A questão clínica imediata à solicitação do teste deve permear todo o processo de análise dos resultados (NEDER & NERY, 2002). Sua indicação é útil em um amplo espectro de configurações clínicas (Quadro 2). Sua relevância tem sido observada em fases de decisões clínicas que incluem diagnóstico, avaliação da severidade, prognóstico e evolução da doença. Na prática, a sua aplicação tem sido realizada em casos em que questões persistem mesmo após dados da anamnese, exame físico, exames de imagem, teste de função pulmonar e eletrocardiografia em repouso, uma vez que o exercício físico é capaz de exacerbar respostas fisiológicas que não acontecem no repouso (ATS, 2003). No âmbito da reabilitação, o TECP investiga mecanismos relacionados à baixa capacidade funcional, os quais podem ser causadores de sintomas como a dispneia, correlacionando-os com alterações dos sistemas cardiovascular, pulmonar e musculoesquelético. Além disso, possui grande aplicabilidade na avaliação prognóstica em indivíduos enfermos, além de ser a forma mais precisa, criteriosa e individualizada de exercício físico, em indivíduos normais, atletas ou em cardiopatas e pneumopatas (HERD *et al.*, 2016).

Quadro 2. Indicações clínicas do teste de exercício cardiopulmonar.

| |
|--|
| A. Avaliação da presença e etiologia da intolerância ao esforço Investigação da dispnéia crônica de origem indeterminada Discriminação dos mecanismos proponderantes em indivíduos com múltiplas causas possíveis |
| B. Quantificação da intolerância ao esforço na doença cardiorrespiratória |
| C. Avaliação da indicação e resposta a intervenções terapêuticas Drogas com ação cardiovascular e/ou pulmonar Oxigenioterapia |
| D. Análise prognóstica Insuficiência Cardíaca Crônica Doença Respiratória Crônica |
| E. Risco pré-operatório e avaliação pós-operatória Cirurgia torácica ressectiva Cirurgia redutora do volume pulmonar Cirurgia abdominal alta ou eletiva de grande porte |
| F. Transplante cardíaco Indicação Avaliação longitudinal pós-transplante |
| G. Transplante pulmonar e cardiopulmonar Avaliação da tolerância ao exercício pré- e pós-transplante Indicação |
| H. Prescrição e acompanhamento de treinamento físico Reabilitação Cardiovascular Reabilitação Pulmonar |
| I. Diagnóstico da broncoconstrição induzida pelo exercício |
| J. Quantificação da intolerância ao esforço na doença pulmonar ocupacional Avaliação da disfunção e incapacidade |

(NEDER & NERY, 2002).

1.2.2 Técnicas e equipamentos

O TECP é um procedimento não invasivo, que envolve o emprego de técnicas capazes de conferir informações diagnósticas e prognósticas, além de avaliar a capacidade individual para realização de exercícios. Os aparatos disponíveis para a realização do teste, que envolve o esforço físico, apresentam características distintas, podendo variar de sistemas mais simples a equipamentos com elevado grau de sofisticação tecnológico. Independentemente do local onde o teste seja realizado, é fundamental que algumas características devam ser respeitadas, como: ambiente adequado, equipamento básico, equipe treinada e preparo e orientação do paciente, de acordo com o objetivo do teste. É fundamental, ainda, que exista pessoal para atuar em situações de emergência. O ambiente para realização do teste deverá ser suficientemente amplo para acomodar todo o equipamento necessário à sua realização, permitir a circulação de pelo menos 3 pessoas, além de todo o material a ser usado durante eventuais emergências médicas. É indicado que o laboratório seja bem iluminado, limpo e com controle da temperatura ambiente

(entre 18 e 22°C) e umidade relativa do ar (entre 50 e 70%) (NEDER & NERY, 2002; STEIN *et al.*, 2006; HERDY *et al.*, 2016).

Durante a realização do TECP, a comunicação verbal do paciente com o examinador se torna impossível, sendo conveniente a utilização de um pôster apresentando a escala de Borg modificada, que variam com pontuação de 0 a 10, representando a sensação subjetiva do esforço que variam de baixo, moderado até exaustivo, (Quadro 3) (BORG, 1998), que deverá ser explicada ao paciente antes do início do teste. Devem ser consideradas a sensação subjetiva do esforço em cada estágio e no pico do exercício (III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010). Ainda durante o TECP, é realizada a verificação da pressão arterial (PA), sendo o método auscultatório o mais confiável durante o exercício. O manômetro de coluna de mercúrio é o aparelho recomendado, ao invés do aneróide, por ser mais acurado e de mais fácil manutenção. O manômetro deverá ser colocado na altura do coração do paciente. Monitores não invasivos de pressão podem ser utilizados desde que exista tecnologia validada para sua aplicação durante o exercício (GUIMARÃES, 2003). A equipe também deve estar sempre atenta ao aparecimento de sinais e sintomas, tais como palidez, tonturas, sudoreses, estafa física e dispneia, relacionando-os à condição hemodinâmica e à resposta eletrocardiográfica frente ao exercício. As auscultas cardíaca e pulmonar, além de obrigatórias no exame clínico inicial, devem ser repetidas no pós-esforço imediato (III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010).

Quadro 3. Escala subjetiva de esforço.

| | |
|------------|-----------------------------|
| 0 | NENHUMA |
| 0,5 | MUITO, MUITO LEVE |
| 1 | MUITO LEVE |
| 2 | LEVE |
| 3 | MODERADA |
| 4 | POUCO INTENSA |
| 5 | INTENSA |
| 6 | |
| 7 | MUITO INTENSA |
| 8 | |
| 9 | MUITO, MUITO INTENSA |
| 10 | MÁXIMA |

(BORG, 1998).

1.2.3 Ergômetros

Os ergômetros devem ser, preferencialmente, eletrônicos ou eletromagnéticos e dispor de interface de comunicação com o computador central, através de saída analógica ou digital, para onde deverão ser enviados dados de velocidade, inclinação, ciclos, variáveis ventilatórias e metabólicas e recebido os comandos de variação de carga (GUIMARÃES, 2003). Entre as diversas modalidades de ergometria disponíveis (cicloergômetro, esteira, escada, caiaque, ergometria de membros superiores) as duas primeiras são as mais comumente utilizadas para o TECP. Vale ressaltar que a escolha do “melhor” ergômetro é aquele no qual o indivíduo a ser testado sinta-se seguro e confortável, e que o investigador esteja familiarizado com o padrão de respostas esperado (NEDER & NERY, 2002; III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010).

Quando comparamos o cicloergômetro com a esteira, podemos identificar algumas características que tornam uma modalidade mais vantajosa e/ou desvantajosa em relação a outra (Quadro 4). O cicloergômetro, quando comparado à esteira, geralmente é mais barato, mais compacto, silencioso e seguro, além de ocasionar menor movimentação do tronco e membros superiores – aspecto de considerável importância na obtenção das variáveis, incluindo a medida da pressão arterial (PA) e um melhor traçado eletrocardiográfico (NEDER & NERY, 2002). Além disso, o cicloergômetro pode ser uma alternativa à esteira quando se realiza exame em paciente com limitações ortopédicas, neurológicas ou vasculares periféricas. Porém, devemos ressaltar que as respostas fisiológicas ao exercício em cicloergômetro diferem daquelas ao exercício em esteira, o que deverá ser levado em conta na interpretação do exame. Por exemplo, o consumo máximo de oxigênio é cerca de 5 a 20 % mais baixo, e a resposta pressórica por carga de trabalho é proporcionalmente maior do que na esteira (NEDER & NERY, 2002; GUIMARÃES, 2003; III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010; BALADY *et al.*, 2010). Existem dois tipos de cicloergômetro disponíveis no mercado: os com frenagem mecânica e os com frenagem eletromagnética. Os cicloergômetros com frenagem mecânica são mais baratos e leves, entretanto é necessário que o paciente mantenha uma velocidade fixa de pedaladas para manter o trabalho constante. Por outro lado, os cicloergômetros com frenagem eletromagnética são mais caros e menos portáteis, mas dispõem de ajuste interno de resistência, capaz de manter o trabalho de acordo com a velocidade de pedaladas. Independentemente do tipo

de frenagem, o cicloergômetro utilizado deverá apresentar a capacidade de incrementos no trabalho, seja de forma automática ou manual. O cicloergômetro deverá apresentar guidom e selim ajustáveis de acordo com a altura do paciente, devendo sempre, obviamente, confirmar com o paciente se a posição lhe é confortável (NEDER & NERY, 2002; GUIMARÃES, 2003; III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010).

As esteiras são mais caras e volumosas, e a mensuração metabólica (nível de variabilidade nos dados) é apreciavelmente maior do que o observado no cicloergômetro. Outra importante desvantagem da esteira em relação ao cicloergômetro é a mensuração da potência, que não pode ser acuradamente medida na esteira, já que esta, depende da estratégia da marcha (tamanho e frequência das passadas, equilíbrio, grau de movimentação dos membros) e do nível de suporte externo. A esteira ergométrica, entretanto, possui a vantagem de exigir maior demanda metabólica (o $\dot{V}O_2$ max é 6 a 11% maior do que na bicicleta) e, possivelmente, maior stress cardíaco (importante na detecção de isquemia) e ventilatório. Adicionalmente, pode-se argumentar que a marcha, e não o ciclismo, seja a atividade inerente aos seres humanos (NEDER & NERY, 2002; GUIMARÃES, 2003; III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010).

Quadro 4. Características dos tipos de ergômetros utilizados para o teste de exercício cardiopulmonar.

| Característica | Bicicleta ergométrica | Esteira ergométrica |
|---|-----------------------|---------------------|
| Maior $\dot{V}O_2$ máx | | + |
| Maior estresse ventilatório e cardiovascular | | ++ |
| Familiaridade com o tipo de exercício | | ++ |
| Quantificação exata da potência | ++ | |
| Segurança | ++ | |
| Menos artefatos e melhor qualidade dos sinais | ++ | |
| Facilidade na obtenção de amostras sanguíneas | + | |
| Mais compacto e silencioso | + | |
| Menos caro | + | |

* ++ = vantagem de importância relevante, + = vantagem de importância secundária.

(NEDER & NERY, 2002).

O aparelho para medida da ventilação deverá ter acurácia suficiente para medidas de diferentes volumes e velocidades de fluxos e baixas resistência e inércia. Além disso, é desejável que o aparelho permita sua conexão ao computador, para maior facilidade da

correlação dos dados obtidos (GUIMARÃES, 2003; BALADY et al., 2010). A medida da ventilação durante o exercício requer que o indivíduo testado tenha suas narinas fechadas por um clipe nasal e que o bocal não permita qualquer escape de ar. O espaço morto do equipamento também é importante (máximo =100 ml). Atualmente, a análise de gases é realizada de maneira *on-line*. Vários tipos de fluxômetros podem ser utilizados: transdutores de massa, pneumotacômetros de Fleish, anemômetros, entre outros. Esses sistemas permitem medidas das trocas gasosas a cada ciclo respiratório (respiração por respiração - do inglês “*breath by breath*”). Com estes sistemas, as respostas do paciente tornam-se disponíveis imediatamente, e, com o sistema acoplado ao computador, as medidas são continuamente disponibilizadas na tela (durante o exame) (GUIMARÃES, 2003).

Os dois tipos de analisadores de oxigênio comumente utilizados são: paramagnético e eletroquímico. Os analisadores eletroquímicos são os mais utilizados nos sistemas automatizados atualmente disponíveis. Geralmente, esses sistemas utilizam uma célula de óxido de zircônio aquecida a temperaturas extremas. Uma corrente será gerada proporcionalmente às diferenças na pressão parcial de oxigênio em qualquer dos lados da membrana semipermeável da célula (isto é, diferença entre o ar da sala e o ar dentro do sensor). Já os analisadores paramagnéticos medem alterações no campo magnético causadas por mudanças nas concentrações de oxigênio, porém seu tempo de resposta é lento, tornando-se não muito utilizado nos sistemas metabólicos de exercício. O dióxido de carbono, geralmente, é medido por um analisador infravermelho. Os sensores infravermelhos para medida do dióxido de carbono são sistemas bem validados e têm tempos de resposta rápidos. Desta forma, esse é o sistema utilizado em praticamente todos os analisadores metabólicos comercialmente disponíveis. Adequada estabilidade, linearidade e extrema rapidez de resposta são as características ideais de um analisador. (NEDER & NERY, 2002; GUIMARÃES, 2003).

Embora as recomendações dos fabricantes variem consideravelmente em relação à calibração, deve-se sempre seguir o protocolo de calibração indicado no manual do equipamento e todos os sistemas devem ser calibrados imediatamente antes de cada teste (NEDER & NERY, 2002; GUIMARÃES, 2003; BALADY et al., 2010). Para garantir a exatidão dos valores medidos, o analisador deve prover meios de executar sua calibração tanto por meios automáticos, quanto por meio de misturas de gases para calibração. Para prevenir a contaminação entre pacientes, as peças que entram em contato com o paciente

devem ser descartáveis ou serem adequadamente preparadas, com a utilização de soluções enzimáticas desinfetantes (GUIMARÃES, 2003).

1.2.5 Tipos de protocolos

A seleção do protocolo apropriado para a avaliação da capacidade funcional do indivíduo é muito importante. Sua escolha depende do objetivo do teste, ou seja, das perguntas a serem respondidas. Existem dois tipos básicos de protocolo: (a) incremental, com aumento progressivo da carga em períodos predeterminados e (b) de carga constante, em que a carga é mantida estável por um tempo fixo definido previamente, ou sustentada até o limite da tolerância (NEDER & NERY, 2002; BALADY et al., 2010).

Um protocolo incremental típico para pacientes deve ter: (i) uma fase de repouso (2-3 minutos ou mais), no qual verifica-se a ausência de hiperventilação antes de iniciarse o teste; (ii) um período de aquecimento em carga zero (2-3 minutos); (iii) um período de incrementação (8-12 minutos) e (iv) um período de recuperação ativa na carga zero (3-6 minutos, se possível). No caso da utilização de cicloergômetros, os incrementos podem ser do tipo rampa, ou seja, rápidos (a cada 1-3 minutos), ou do tipo degrau, incrementos mais lentos (a cada 3 minutos ou mais). Vale ressaltar, que nos protocolos do tipo rampa, nos quais a variação de carga é rápida e contínua, o valor de VO_2 estará sempre atrasado em relação à verdadeira demanda de VO_2 para determinada carga. Isto ocorre, porque leva tempo para o que está acontecendo no músculo ser representado na troca gasosa medida ao nível do ar expirado: quando isto eventualmente ocorre, a carga já aumentou para um valor mais alto. Felizmente, entretanto, este atraso é constante, logo a carga referente ao LAV é aquela que ocorre 45-60 segundos antes do limiar expresso em VO_2 . Os protocolos incrementais são particularmente úteis para: definir a tolerância máxima ao exercício e seus possíveis fatores limitantes, estimar não-invasivamente o limiar de anaerobiose, triar candidatos à reabilitação cardiovascular e pulmonar, e avaliar respostas pós-intervenção (NEDER & NERY, 2002).

Embora a estimativa da carga de incremento durante o protocolo de rampa possa ser realizada pela fórmula proposta pelo American College Sport of Medicine (ACSM), em 1980, onde a carga (watts) = $[(\text{altura-idade}) * 12] - [(150 + 6 * \text{peso})] / 100$, torna-se importante ressaltar que tal proposição se aplica de forma mais adequada a indivíduos saudáveis e ativos, sugerindo que a incrementação por meio da dedução da carga a partir

da capacidade funcional relatada previamente pelo indivíduo, somada a sensibilidade dos avaliadores, tem se mostrado mais adequada para exames em indivíduos sedentários e com disfunções.

1.2.6 Critérios de interrupção do teste

Geralmente, durante a realização dos TECP, os pacientes devem ser encorajados verbalmente antes e durante o teste, para realizarem seu esforço máximo com o objetivo de alcançar a limitação fisiológica. Em particular, deve-se ressaltar que exceder um critério de FC predefinido não é um critério útil para interromper o exercício. Os critérios mais aceitos para a interrupção do exercício antes da limitação de sintomas estão descritos no quadro 5 (ATS, 2003).

Quadro 5. Critérios de interrupção do exercício durante o teste de exercício cardiopulmonar.

| Indicações para interrupção do exercício |
|---|
| Dor no peito sugestiva de isquemia |
| Alterações no ECG |
| Bloqueio cardíaco de segundo ou terceiro grau |
| Queda na pressão sistólica <20 mm Hg do valor mais alto durante o teste |
| Hipertensão (250 mm Hg sistólica; 120 mm Hg diastólica) |
| Desaturação severa: SpO ₂ < 80% quando acompanhado de sintomas e sinais de hipoxemia grave |
| Palidez repentina |
| Perda de coordenação |
| Confusão mental |
| Tonturas ou fraqueza |
| Sinais de insuficiência respiratória |

(Adaptado de: ATS, 2003).

1.2.7 Variáveis do teste cardiopulmonar

Entre os diversos parâmetros obtidos através do TECP, destaca-se o VO₂ que constitui o volume de O₂ extraído do ar inspirado pela ventilação pulmonar em um dado período de tempo, calculado, portanto, como a diferença entre o volume de O₂ inspirado e expirado. Em condições de carga constante ou, após considerarmos o tempo de atraso músculo-pulmão (carga incremental), o VO₂ pode ser uma estimativa confiável da taxa periférica de troca de O₂. Geralmente expresso em mL/min ou L/min (STPD): correções para massa corporal total devem ser interpretadas com cautela, principalmente nos indivíduos em sobrepeso realizando atividade cicloergométrica. Além disso, vale ressaltar que o VO₂ depende da intensidade do exercício sendo realizado (NEDER & NERY, 2002; III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, 2010; HERDY *et al.*, 2016).

O VO_2 máximo (VO_2 máx) pode ser definido como o maior valor atingido, apesar do aumento progressivo da carga aplicada, com o desenvolvimento de um platô na curva do VO_2 em teste de exercício incremental (NEDER & NERY, 2002; HERDY *et al.*, 2016). É considerado o melhor índice de capacidade aeróbica e também padrão ouro para a avaliação da capacidade cardiorrespiratória, representando o nível máximo alcançável de metabolismo oxidativo envolvendo grandes grupos musculares (ATS, 2003; BALADY *et al.*, 2010). Na ausência da identificação de um platô, o maior valor obtido no final de um exercício exaustivo é caracterizado como VO_2 de pico que, na prática, é utilizado como o máximo VO_2 medido. A resposta é influenciada por mecanismo central (cardiovascular e/ou pulmonar) e função periférica (músculo esquelético). Os valores de normalidade dependem de diversos fatores, tais como: idade, sexo, peso, altura, nível de atividade física, variabilidade genética e etnia (NEDER & NERY, 2002; ATS, 2003; HERDY *et al.*, 2016). O VO_2 pico é considerado anormal quando abaixo de 85% do percentual do predito (WASSERMAN & WHIPP, 1975).

A liberação de dióxido de carbono (VCO_2) constitui o volume de CO_2 adicionado ao ar inspirado pela ventilação pulmonar em um dado período de tempo: calculado, portanto, como a diferença entre o volume de CO_2 expirado e inspirado, sendo geralmente expressa em mL/min ou L/min (STPD). Em situações de carga constante ou carga incremental, a VCO_2 pode ser uma estimativa confiável da taxa periférica de troca de CO_2 (QCO_2). Vale ressaltar, que devido ao CO_2 ser cerca de 20 vezes mais difusível do que o O_2 , uma dada mudança na produção periférica de CO_2 (QCO_2) demora mais tempo de ser refletida na VCO_2 do que variações no consumo periférico de O_2 (QO_2) modificam a VO_2 . Valores isolados de VCO_2 , tanto no exercício máximo como submáximo, apresentam escassa importância prática: estes dependem da intensidade do exercício e da taxa de incrementação da carga (NEDER & NERY, 2002; ATS, 2003). Na figura 1, encontra-se algumas dessas variáveis diretamente na tela do programa do analisador de gases.



Figura 1: Tela do programa (aerograph®) utilizado em nosso trabalho com as variáveis cardiorrespiratórias e metabólicas obtidas durante o teste de exercício cardiopulmonar (Fonte: próprio autor).

A razão entre a liberação de CO_2 e a captação de O_2 (VCO_2/VO_2) pulmonares medidos no ar expirado é denominada *taxa de troca respiratória* (R). Apesar do R ter sido tradicionalmente utilizado como um indicador de exercício máximo ($\text{R}_{\text{máx}} > 1.15$ ou 1.20), este conceito deve ser analisado de forma crítica, pois o $\text{R}_{\text{máx}}$ será maior quanto mais rápida for a incrementação da carga para o nível de aptidão do indivíduo e/ou maior for a utilização de carboidratos na mistura de substratos sendo metabolizada. Embora o R decline e posteriormente aumente com a progressão do exercício, o R per se não deve ser utilizado para a estimativa do limiar de lactato, muito menos seus valores isolados – como, por exemplo, $\text{R} > 1$. Entretanto, os valores de R podem ser informativos na identificação de hiperventilação voluntária ($\text{R} > 0,9$ no repouso, na ausência de hipoxemia), levando em consideração que nenhum TECP deve iniciar-se com evidências claras de hiperventilação pré-teste (NEDER & NERY, 2002; ATS, 2003).

O parâmetro denominado ventilação minuto (VE) representa o resultado, expresso em litros por minuto, do volume de ar que se move para dentro e para fora dos pulmões. É determinado pelo produto da frequência respiratória (FR) e o volume corrente (VC). A ventilação tem um incremento contínuo durante o esforço progressivo no TCPE e sofre aumentos adicionais influenciados pelo metabolismo anaeróbico resultante do acúmulo de ácido lático bem definido no primeiro e segundo limiares. Esse processo de incremento ventilatório serve como marcador de limitação ao esforço. Em repouso, são ventilados 7 a 9 ml/min, mas em atletas tal valor pode chegar a 200 ml/min no esforço máximo, sendo

normalmente encontrados valores mais baixos em indivíduos cardiopatas e pneumopatas (NEDER & NERY, 2002; HERDY et al., 2016).

Os equivalentes ventilatórios de oxigênio (VE/VO_2) e *dióxido de carbono* (VE/VCO_2) são as razões entre a taxa ventilatória instantânea e a taxa de captação de O_2 e liberação de CO_2 , respectivamente. Ambos os equivalentes declinam a partir do repouso até o ponto mais baixo, ao nível do limiar de lactato. A partir deste ponto, o VE/VO_2 aumenta inevitavelmente até seus valores máximos no pico do exercício. Por outro lado, o VE/VCO_2 só se eleva após o ponto de compensação respiratória, permanecendo estável no período de tamponamento isocápnico, porém se eleva resultante do aumento ventilatório (alcalose respiratória compensatória) em resposta à redução do pH sanguíneo pelo acúmulo progressivo do ácido láctico em nível muscular. O VE/VO_2 reflete a necessidade ventilatória para um dado nível de consumo de O_2 , portanto, apresenta-se como índice da eficiência ventilatória. Já o VE/VCO_2 representa a necessidade ventilatória de eliminar uma determinada quantidade de CO_2 produzido pelos tecidos em atividade, sendo influenciado pela pressão parcial de gás carbônico ($PaCO_2$). Além disso, os equivalentes são úteis para auxiliar na detecção não-invasiva do limiar ventilatório: o ponto mais baixo dos equivalentes (nadir), principalmente quando analisados com as pressões gasosas expiratórias finais, podem fornecer uma estimativa razoável do limiar ventilatório pelo método ventilatório (NEDER & NERY, 2002; HERDY et al., 2016;).

1.2.8 Limiar anaeróbio ventilatório

Em 1964, Wasserman & McIlroy introduziram o termo limiar de anaerobiose ventilatório identificado durante o exercício físico em indivíduos com diversas cardiopatias, permitindo efetivamente a solidificação e popularização da fisiologia clínica do exercício. O LAV, também conhecido como limiar de lactato, limiar de troca gasosa ou limiar ventilatório, tem sido definido como a intensidade de exercício físico na qual a produção de energia pelo metabolismo anaeróbio predomina em relação ao metabolismo aeróbio, caracterizando-se por marcar a aceleração da taxa de acúmulo sustentado de lactato na corrente sanguínea comparado com valores de repouso (WASSERMAN, 1964; NEDER & NERY, 2002; POZZI *et al.*, 2006). Além disso, representa a perda da linearidade entre VE e o VO_2 . Isso se traduz na prática pelo equivalente de oxigênio mais baixo (VE/VO_2) antes de seu aumento progressivo ou pelo início do aumento no VE/VO_2

em desproporção ao VE/VCO₂. Além disso, observa-se um aumento na razão de trocas respiratórias ($R = VCO_2/VO_2$) e um aumento progressivo da pressão expirada de oxigênio (PET O₂) (NEDER & NERY, 2002; STEIN et al., 2006). O LAV pode ser estimado indiretamente no TECP pelo método computadorizado do *V-slope*, no qual busca-se localizar diretamente o ponto de início da aceleração da VCO₂ em relação ao VO₂, devendo este sempre ser comparado àquele observado pela análise visual.

Embora persistam profundas discussões acerca do significado exato das modificações da lactacemia no exercício, é inegável que o acúmulo de lactato traz dramáticos efeitos na habilidade humana de tolerar o exercício dinâmico. Neste sentido, o grau de lactacemia para um dado dispêndio metabólico tem sido amplamente utilizado como marcador de aptidão cardiorrespiratória e delimitador da intensidade de exercício. Em adição, tal resposta é sensível ao treinamento, seja em pacientes como atletas, podendo apresentar valor clínico sugestivo de limitação cardiocirculatória/periférica e indicação prognóstica clinicamente útil (NEDER & NERY, 2002).

Inicialmente, o LAV era somente determinado, a partir de métodos invasivos, que detectavam o aumento da concentração sanguínea de ácido láctico, acima de uma determinada potência de esforço. Entretanto, com o passar do tempo, estudos demonstraram que o LAV, durante o exercício dinâmico, se constituía em um importante marcador fisiológico, possibilitando o surgimento de outros métodos de análise não-invasiva, como: método ventilatório (WASSERMAN, 1999; MARÃES et al., 2005; REIS et al., 2013), eletromiografia de superfície (NAGATA et al., 1981; LUCIA et al., 1997; MARÃES et al., 2005) e pelo comportamento da FC e sua variabilidade (RIBEIRO et al., 1985; BUNC et al., 1995; ALONSO et al., 1998; MARÃES et al., 2005; POZZI et al.; 2006; REIS et al., 2013).

Diferentemente do método ventilatório, que ainda se mostra de acesso restrito, mesmo em laboratórios de fisiologia, por envolver equipamentos relativamente caros, a determinação do LAV, através do comportamento da FC, utilizando modelos matemáticos, representam um método não-invasivo de análise, que parece ser sensível na identificação da mudança metabólica que ocorre no LAV. Tal método apresenta correlação com o método ventilatório (padrão-ouro), mostrando-se ser de fácil acesso e baixo custo, possibilitando também uma otimização no processo de detecção deste importante marcador fisiológico (RIBEIRO et al., 1985; BUNC et al., 1995; MARÃES et al., 2005; POZZI et al.; 2006; REIS et al., 2013). Estes modelos constituem análises de

regressão linear que determinam o ponto de mudança de uma série de dados. Para se obter um ajuste adequado, é necessário que as respostas das variáveis escolhidas apresentem apenas uma mudança de inclinação entre as retas, resultante dos respectivos comportamentos (POZZI *et al.*, 2006).

1.2.9 Frequência cardíaca

O coração, principal órgão responsável pelo transporte sanguíneo no organismo humano, recebe inervação dos sistemas nervoso simpático e parassimpático que são influenciadas por informações dos barorreceptores, quimiorreceptores, sistema respiratório, sistema vasomotor, sistema termorregulador e sistema renina-angiotensina-aldosterona. Portanto, o coração não funciona de forma regular em seus batimentos, e suas oscilações, dentro de um padrão de normalidade, decorrem em função de uma complexa interação, resultando em uma significativa variabilidade da FC. Vale ressaltar a importância do sistema nervoso autônomo cardíaco no que se refere à capacidade do sistema cardiovascular se ajustar a diversos estímulos fisiológicos e patológicos para manutenção da homeostasia (GUYTON, 2006; VANDERLEI *et al.*, 2009; MARÃES, 2010).

No que diz respeito ao componente neural desta regulação, está bem consolidado na literatura que o exercício induz a retirada do tônus vagal e a aumenta ativação simpática, em função da intensidade do exercício e da massa muscular recrutada. Tanto a retirada da atividade parassimpática, quanto o aumento da atividade simpática, visam aumentar a FC, aumentar a contratilidade miocárdica para aumentar o volume sistólico, induzir a vasoconstricção, melhorando o retorno venoso, aumentar a resistência vascular nas vísceras abdominais e nos músculos esqueléticos não ativos e na preservação no débito cardíaco para a perfusão dos músculos ativos, onde ocorre a vasodilatação mediada pelo metabolismo (GUYTON, 2006; POZZI *et al.*, 2006; NOBREGA *et al.*, 2014). O incremento da FC durante a execução de um exercício físico crescente, apresenta um crescimento linear quando o voluntário é submetido a um protocolo de exercício incremental, ou seja, com constante aumento de carga até o pico do exercício, como foi realizado no presente estudo (NEDER & NERY, 2003; GUYTON, 2006; VANDERLEI *et al.*, 2009; MARÃES, 2010).

Estas mudanças na modulação autonômica sobre o sistema cardiovascular envolvem mecanismos neurais que são necessários para uma resposta fisiológica normal: o mecanismo central e os mecanismos periféricos. No mecanismo central, comumente conhecido como "comando central", a ativação de regiões do cérebro responsáveis pelo recrutamento de unidades motoras também ativa as áreas de controle cardiovascular localizadas no bulbo, sendo esta ativação proporcional ao número de unidades motoras necessárias para o desempenho da atividade física. Estes sinais eferentes ao centro cardiovascular promovem respostas cardiovasculares rápidas, tais como a retirada vagal atuante no nódulo sinoatrial observada no início do exercício. O mecanismo neural reflexo periférico consiste em sinais aferentes enviados pelo mecanorreceptores e quimiorreceptores, localizados nas fibras musculares, e também pelos barorreceptores, localizados nos seios carotídeos e arco aórtico, aos centros respiratório e cardiovascular, promovendo também respostas cardiorrespiratórias necessárias para execução do exercício físico (MITCHELL, 1990; GUYTON, 2006; POZZI *et al.*, 2006; NOBREGA *et al.*, 2014).

A literatura refere um período de latência da FC no início do esforço, em torno de 0,5 segundo, seguido de um marcante aumento, devido quase que exclusivamente à diminuição da estimulação parassimpática sobre o nódulo sinoatrial, conhecido como componente rápido de elevação da FC, que independe da intensidade de potência aplicada. Após esse período, nos próximos 60 a 90 segundos, nota-se um crescimento mais lento da FC, correspondendo à retirada lenta do tônus vagal, o qual já é influenciado parcialmente pela atividade física. Em esforços de baixa potência, após o pico precoce de elevação da FC, ocorre uma redução de valores desta variável em direção à condição de equilíbrio dinâmico, entre 1,8 a 3,7 minutos. Já em níveis de potências mais elevadas, ocorre uma elevação da FC, que se deve ao predomínio da atividade simpática, denominado componente lento de elevação da FC, que impede a estabilização desta variável, enquanto durar o exercício físico. Vale ressaltar que quanto mais condicionado for o indivíduo, mais rápido será esse ajuste cardiovascular. (NEDER & NERY, 2003; GUYTON, 2006; MARÃES, 2010).

Em estudos prévios, tem-se observado que o LAV pode ser detectado indiretamente pela perda da linearidade da FC em relação ao incremento de potência, durante teste de exercício dinâmico em cicloergômetro (RIBEIRO *et al.*, 1985; BUNC *et al.*, 1995; MARÃES *et al.*, 2005; POZZI *et al.*, 2006; REIS *et al.*, 2013). O racional para

a utilização da FC como marcador do LAV pode ser explicado, principalmente, pela resposta mediada dos quimioceptores periféricos a concentração de lactato induzida pela predominância do metabolismo anaeróbio láctico para suportar a demanda metabólica imposta pelo exercício físico, levando a um marcado aumento da hiperatividade simpática a partir deste momento, com aumento abrupto da FC. (REIS *et al.*, 2013).

2.0 Introdução

O exercício físico tem papel fundamental na saúde e qualidade de vida de um indivíduo, assim como é um importante fator na abordagem de pacientes que vivem com doenças crônicas (POWELL *et al.*, 2011; NEGRÃO & BARRETO, 2005). É fundamental que seja criteriosa a avaliação e prescrição de exercício físico, sobretudo para indivíduos com doenças cardiovasculares e doenças crônicas (ACSM, 2000), uma vez que seus níveis de esforço devem ser bem controlados por já apresentarem baixa capacidade funcional e, por muitas vezes, anormalidades eletrocardiográficas que os tornam mais suscetíveis a intercorrências.

O TECP, através da análise visual dos gases exalados, nos fornece o padrão ouro para a obtenção do limiar de anaerobiose ventilatório (LAV), variável fundamental na prescrição de exercício físico aeróbico de diversas populações. (HERDY *et al.*, 2016; MENEGUELO *et al.*, 2010). Porém a ergoespirometria é uma ferramenta extremamente custosa que não está disponível na maioria dos centros de avaliação e reabilitação, não somente pelo custo, como também pela necessidade de avaliadores treinados a realizar e analisar os resultados dos testes.

Neste sentido, alguns trabalhos mostram que é possível analisar o LAV através de outros métodos com baixo custo e maior praticidade. Alguns autores têm descrito a possibilidade da obtenção do limiar de anaerobiose pela resposta da FC no exercício físico (POZZI *et al.*; 2006; REIS *et al.*, 2013), ainda que este método não esteja fundamentado e bem estabelecido na literatura. A partir da mudança do predomínio do metabolismo que marca o limiar de anaerobiose, há uma importante descarga simpática sobre o coração com marcado aumento da FC durante o exercício, porém os poucos estudos que investigaram a resposta destes modelos se limitaram a realizá-la de forma manual e com amostras específicas (POZZI *et al.*; 2006; REIS *et al.*, 2013). Dentre estes modelos, o heteroscedástico tem notada importância na literatura (POZZI *et al.*; 2006).

Diante do exposto, foi elaborado o presente estudo com o propósito de comparar a obtenção do limiar de anaerobiose pela resposta da frequência cardíaca com a obtenção pelo método visual dos gases exalados pela ergoespirometria do TECP. Para isso, foi criado um *software* em parceria com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) que analisa a resposta da FC durante o TECP pelo modelo heteroscedástico em amostras de diferentes características demográficas, funcionais e clínicas.

3.0 Objetivos

3.1 Objetivo geral

Avaliar a determinação do limiar de anaerobiose por meio da resposta da FC durante o TECP.

3.2 Objetivos específicos

- Comparar os valores de tempo, FC e VO₂ do limiar de anaerobiose determinado pelo método visual gráfico e pela resposta da FC;
- Correlacionar os valores de tempo, FC e VO₂ do LAV determinado pela resposta da FC com o obtido pelo método visual gráfico.
- Avaliar a concordância dos valores de tempo, FC e VO₂ do LAV determinado pela resposta da FC com o obtido pelo método visual gráfico.

4.0 Materiais e métodos

4.1 Desenho do estudo

Trata-se de um estudo observacional, experimental e transversal.

4.2 Amostra

Foram utilizados todos os dados de TECP do Laboratório de Pesquisa em Avaliação e Reabilitação Cardiorrespiratória (GECARE) de 2013 a 2019. Foram incluídos TECP de homens e mulheres com mais de 18 anos, saudáveis, com fatores de risco para doença arterial coronariana (HAS, DLP e DM) e com doenças crônicas – insuficiência cardíaca crônica e cirrose hepática de diferentes etiologias.

Foram excluídos os TECPs que não apresentavam boa qualidade gráfica para a análise do LAV (com presença de ruídos ou que caracterizasse vazamento dos gases exalados), os testes que os voluntários não atingiram o limiar de anaerobiose, assim como os TECPs de carga constante e os que foram realizados sem a coleta da FC batimento a batimento concomitante.

Este trabalho foi aprovado pelo Comitê de Ética do Hospital Clementino Fraga Filho/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (CAAE 47813415.8.0000.5257). Todos os voluntários assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido e a privacidade dos sujeitos da pesquisa e confidencialidade dos dados foram totalmente garantidas durante todas as etapas do estudo.

4.3 Avaliação inicial

A pesquisa foi realizada em um laboratório climatizado com temperatura entre 22°C e 24°C e umidade relativa do ar entre 50% e 60%, no mesmo período do dia (entre 8h e 12h). Para a véspera e no dia dos testes, cada voluntário recebeu orientações para evitar consumo de bebidas estimulantes, não realizar atividade física 24h antes dos testes e realizar refeições leves e ter uma noite de sono adequada (pelo menos 8 horas).

Inicialmente, os voluntários foram submetidos a uma avaliação clínica e fisioterapêutica composta por anamnese, exame físico e ausculta pulmonar e cardíaca, histórico de medicações em uso contínuo e ainda sobre uso de substâncias ilícitas, álcool e tabagismo. Foram ainda familiarizados com o ambiente experimental e com os pesquisadores envolvidos. Antes de iniciar os testes, os voluntários foram avaliados e examinados para certificar se as orientações dadas forma rigorosamente seguidas. Ainda, foi verificada a pressão arterial diastólica e sistólica, realizada ausculta pulmonar e checada a SpO₂.

4.4 Teste de exercício cardiopulmonar máximo ou sintoma-limitado

Em um segundo momento, os voluntários foram submetidos ao TECP associado ao sistema de ergoespirometria, que foi realizado com objetivo de avaliar a capacidade funcional dos voluntários e identificar o resultado das variáveis respiratórias e metabólicas. O TECP foi executado por meio do protocolo de potência incremental do

tipo rampa em cicloergômetro (Inbramed, Porto Alegre, Brasil). Inicialmente, os pacientes permaneceram um minuto em repouso sentado no cicloergômetro; na sequência, iniciaram o período de aquecimento por três minutos, pedalando no cicloergômetro com carga de 15W. Após esta etapa, o protocolo de exercício físico foi iniciado com incrementos de 5-20W de carga a cada minuto até a exaustão física, isto é, impossibilidade do voluntário em manter a cadência de 60 rotações por minuto. A distribuição da carga foi controlada pelo avaliador. Por fim, o período de recuperação pós-teste, consistiu de três minutos de recuperação ativa pedalando com a carga de 15W, seguidos de dois minutos de repouso, onde continuaram sentados no cicloergômetro enquanto a coleta eletrocardiográfica, da PA, das variáveis ventilatórias, metabólicas e subjetivas continuaram a ser obtidas. As variáveis ventilatórias e metabólicas e a FC foram captadas e registradas durante todo o período do teste (Figura 2). O eletrocardiograma ECG (Wincardio USB, Micromed, Brasília, Brasil.) - nas derivações MC5, DII, DIII, aVR, aVL e aVF modificadas e de V1 a V6 – foram monitoradas continuamente durante todo o procedimento experimental. A PA foi verificada de três em três minutos, com cuidados em evitar interferências na coleta das variáveis.

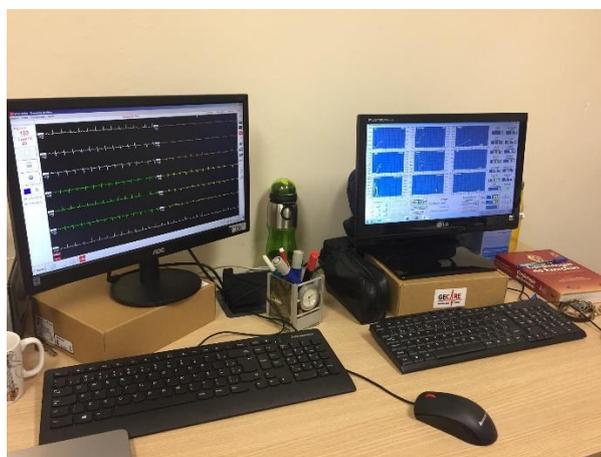


Figura 2. Variáveis ventilatórias e metabólicas e eletrocardiograma sendo captadas e registradas durante todo o período do teste de exercício cardiopulmonar (Fonte: próprio autor).

As variáveis ventilatórias e metabólicas foram obtidas por meio de um sistema computadorizado de análise ergoespirométrica (VO2000 – Portable Medical Graphics Corporation®). O volume corrente foi obtido por meio de um pneumotacômetro de Pitot de alto fluxo, conectado ao sistema VO2000 e acoplado a uma máscara facial, selecionada de acordo com o tamanho da face do voluntário, para ficar devidamente ajustada, evitando escapes de ar (Figura 3). Após o período de colocação da máscara, o voluntário foi

instruído a não se comunicar mais de forma verbal e sua comunicação a partir desse momento foi através do gestual das mãos, principalmente para informar a taxa de esforço percebido através da escala de Borg modificada, (CR-10) a cada 3 minutos no decorrer do teste; ou até mesmo para sinalizar a interrupção do protocolo. O teste foi iniciado quando R estivesse no valor de 0,8. O equipamento fornece em tempo real os valores de VO_2 , da VCO_2 e da VE. Os valores de VE/VO_2 , VE/VCO_2 , as variáveis metabólicas, o R, frações parciais ao final da expiração do O_2 ($PETO_2$), frações parciais ao final da expiração de CO_2 ($PETCO_2$), VC e a FR também foram calculados e armazenados.



Figura 3. Execução do teste de exercício cardiopulmonar (Fonte: próprio autor).

Os testes foram conduzidos por uma equipe de pesquisadores composta de fisioterapeutas e médicos, os quais estiveram atentos aos sinais e sintomas de resposta inadequada ao exercício. Foram utilizados os seguintes critérios de interrupção do teste (GIBBONS, 2002): não manter a cadência de 60-70 rotações por minuto; sudorese profusa, arritmias complexas, angina, palidez, FC máxima (Floriano et al., 2019), PA sistólica $> 220\text{mmHg}$, tontura, cianose e $R \geq 1.10$.

5.0 Métodos de Análise

5.1 Método visual gráfico

A análise visual das curvas da correlação VO_2 e VCO_2 , relação VE/VO_2 e VE/CO_2 , e das variáveis $PETCO_2$ e $PETCO_2$, foram plotadas respiração a respiração no software Excel. Na sequência, três observadores independentes realizaram a determinação do LAV na ocorrência das seguintes situações (WASSERMAN *et al.*, 1999):

- VE/VO_2 : ponto de mais baixo valor desta relação, certificando-se de que, a partir dele, ocorra aumento sistemático;
- $PETCO_2$: ponto de mais baixo valor desta variável, a partir do qual, tem início uma elevação sistemática.

O trecho de análise selecionado foi com base nas respostas das variáveis cardiorrespiratórias, ou seja, do momento onde as mesmas começam a responder ao incremento de potência até o momento de interrupção do exercício. A análise de cada observador foi realizada independentemente, no visor do monitor de 17 polegadas (AOC E970S) interfaceado ao sistema Aerograph. A partir do valor médio do tempo obtido foram verificados os valores de VO_2 (mL/min), VO_2 (mL/kg/min) e FC (bpm) correspondentes na planilha das variáveis geradas pelo sistema de ergoespirometria, interpolada segundo a segundo.

O controle qualitativo do experimento foi realizado por diversos critérios: velocidade de rotação constante (60 rotações por minuto - rpm) até a exaustão física; ocorrência de artefatos que pudessem prejudicar a qualidade do teste e a determinação do LA; a presença ou não de estado de equilíbrio na fase de aquecimento; se o início das respostas da FC e das variáveis ventilatórias coincidiu com o incremento de potência; e se as variáveis ventilatórias mostraram comportamento linear no início da rampa. Esse método foi utilizado como padrão ouro nas comparações com os demais métodos de determinação do LA.

5.2 Modelo estatístico heteroscedástico

O modelo estatístico heteroscedástico foi desenvolvido com a utilização de um software *MainInflectionUFRJ for Windows*®, que determina o ponto de mudança da série

de dados da FC. Esse modelo foi aplicado aos dados coletados batimento a batimento da FC, no qual, a partir da identificação do LA, foram estabelecidos os valores de tempo (segundos) e VO_2 ($mLO_2/kg/min$ e L/min).

O modelo de regressão segmentada linear simples heretoscedástico, considerando uma sequência de observações (y_i, x_i) , é dado da seguinte forma:

$$y_i = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 x_i + \varepsilon_{i1}, & \text{se } i = 1, \dots, k, \\ \alpha_2 + \beta_2 x_i + \varepsilon_{i2}, & \text{se } i = k + 1, \dots, n. \end{cases}$$

Onde y_i é a variável dependente, x_i é uma variável "fixa" independente (neste caso, tempo) e ε_{i1} e ε_{i2} são erros aleatórios da relação, que são independentes e geralmente distribuídos com média zero e variância σ_{i2} . Coeficientes α_1 , β_1 , α_2 e β_2 são desconhecidos e precisam ser estimados.

A figura 4 ilustra a aplicação do software desenvolvido aos dados de FC, batimento a batimento, em função do tempo. A reta vertical determina o ponto de mudança da FC e o tempo representando na parte inferior do gráfico, foi considerado o tempo de ocorrência do LAV por este método.

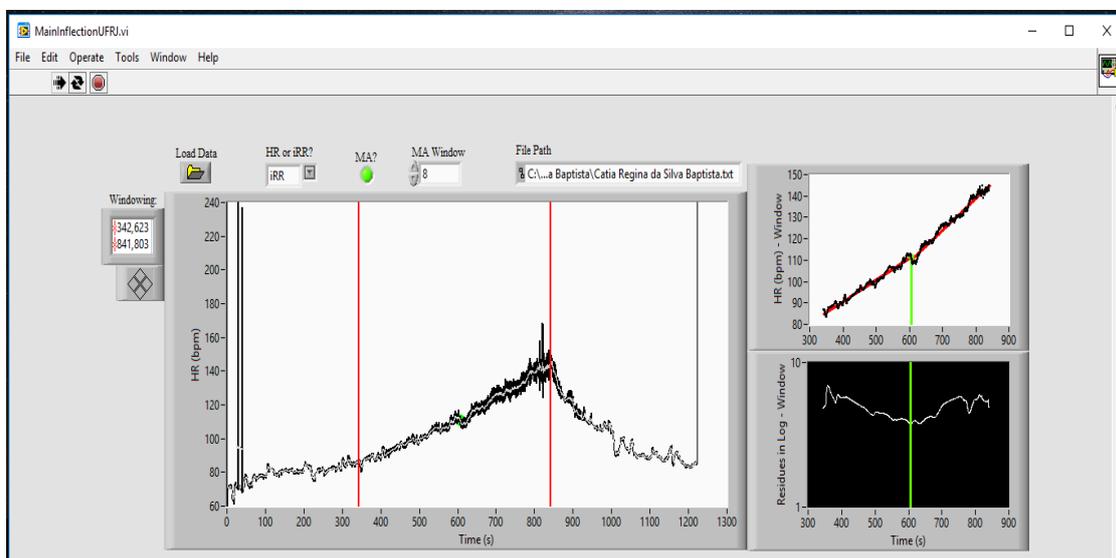


Figura 4. Ilustração do software *InflectionUFRJ* aos dados de FC. O ponto representando pela reta verde do gráfico foi considerado o tempo de ocorrência do LAV por este método. (Fonte: próprio autor).

Os trechos selecionados para aplicação deste modelo foram os mesmos utilizados no método visual, isto é, do momento de incrementação do protocolo até o pico do

exercício. Os dados de tempo, FC e VO₂ no LAV determinado por estes métodos, para cada uma das variáveis, foram então tabelados.

5.3 Análise estatística

Os dados foram analisados no programa estatístico Sigmaplot 11.0. Inicialmente, foram aplicados os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e homogeneidade das variâncias de Levene para a determinação da distribuição da amostra. Em seguida, foi aplicada Anova one-way para verificar a confiabilidade das análises inter-avaliador. Na sequência, foram realizadas Correlações de Pearson para avaliar a associação temporal e os valores de VO₂ relativo e absoluto, assim como o tempo da determinação do LA pelos três observadores. Também foi realizado o teste de Bland-Altman, para verificar a concordância das medidas. Por fim, a comparação entre os métodos foi feita através do teste t. Os dados foram apresentados em média e desvio padrão e o nível de significância estabelecido foi $p < 0,05$.

6.0 Resultados preliminares

A tabela 1 mostra as características dos sujeitos que fizeram parte dos testes que foram analisados do banco de dados.

Tabela 1. Características gerais da amostra.

| | n = 79 |
|---|---------------|
| Características demográficas | |
| Idade (anos) | 50,60 ± 16,39 |
| Sexo (masculino / %) | 55 / 69 |
| Características antropométricas | |
| Estatura (m) | 1,66 ± 0,10 |
| Massa Corporal (kg) | 81,34 ± 18,30 |
| IMC (kg/m ²) | 29,57 ± 5,49 |
| Características Clínicas | |
| Saudáveis (n / %) | 16 / 20 |
| Pacientes com fatores de risco para DAC (n / %) | 27 / 34 |
| Pacientes com Insuficiência Cardíaca (n / %) | 11 / 13 |
| Pacientes com Cirrose (n / %) | 25 / 31 |
| Teste Cardiopulmonar | |
| VO ₂ pico (L/min) | 1,57 ± 0,87 |
| VO ₂ pico (mL/kg/min) | 19,88 ± 11,23 |

Foram selecionados 200 TECPs do laboratório e devido a perdas amostrais visualizadas na Figura 5, a amostra final foi de 100 TECPs com seus respectivos dados analisados pelo método visual padrão ouro pelas variáveis ventilatórias e, até o momento, 30 TECPs analisados pela resposta da FC coletada simultaneamente, batimento a batimento.

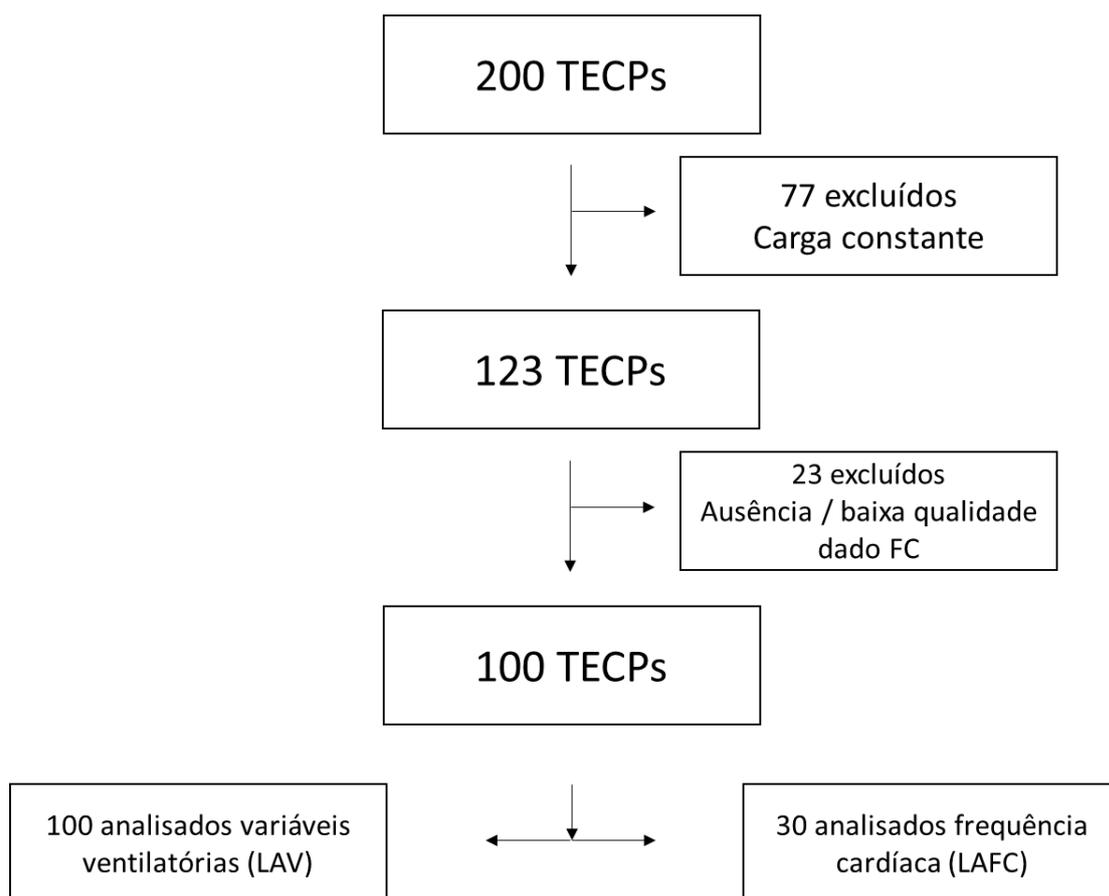


Figura 5. Fluxograma do estudo

Primeiramente foi verificado os TECPs analisados separadamente pelos 3 analisadores independentes estavam em concordância no que tange às variáveis tempo, VO_2 (L/min) e VO_2 (ml/kg/min) no LAV pela ANOVA one-way e não foi vista diferença significativa entre os resultados conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Teste de confiabilidade das medidas para os três avaliadores independentes

| Variável | Analisador 1 | Analisador 2 | Analisador 3 | P valor |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| VO_2 (L/min) | 1,1±0,5 | 1,1±0,5 | 1,1±0,5 | 0,99 |
| VO_2 (ml/kg/min) | 13,2±7,0 | 13,5±7,1 | 13,4±7,1 | 0,13 |
| Tempo (s) | 525,7±135,4 | 551,1±155,2 | 523,5±144,1 | 0,33 |

A Figura 6 mostra as correlações inter-avaliadores obtidas na determinação do LAV nas variáveis Tempo (s), VO_2 absoluto (L/min) e VO_2 relativo (ml/kg/min).

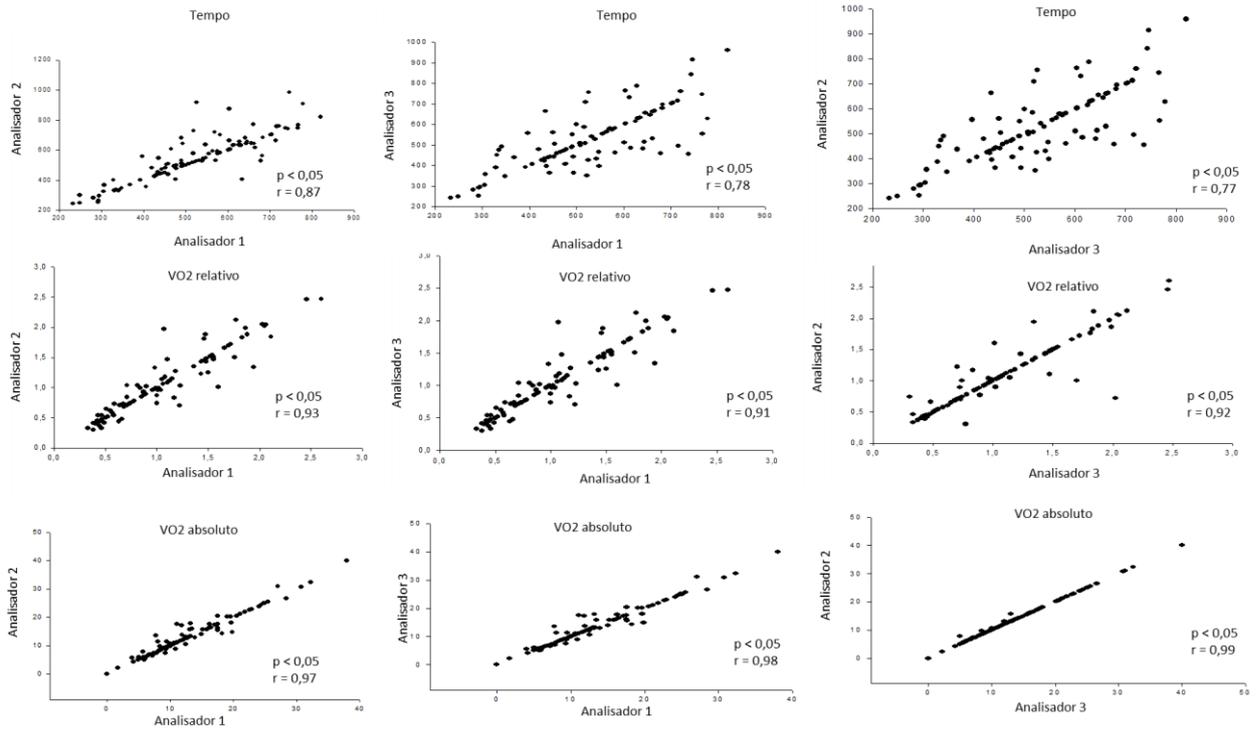


Figura 6. Correlações de Pearson para as avaliações dos três avaliadores independentes.

Por fim, foi realizada também a análise de Bland-Altman inter-avaliadores na determinação do LAV. Foi observado concordâncias de 94% para a variável tempo entre os avaliadores 1 e 2, 93% entre 1 e 3 e entre 2 e 3 (Figura 7). A análise do índice de correlação inter-classe (ICC) mostrou uma concordância quase máxima de 0,97 (0,96-0,98).

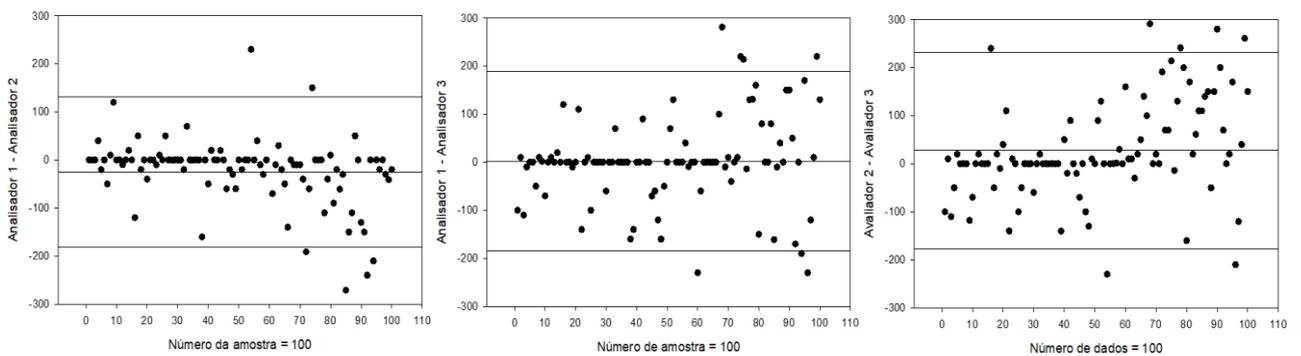


Figura 7. Teste de concordância de Bland-Altman para as avaliações dos três avaliadores independentes.

Na comparação preliminar entre as médias do tempo e VO₂ (L/min) no LA pelo método visual padrão ouro e pela resposta da FC, não foi vista diferença estatística entre os métodos através do teste-t como mostra a figura 8.

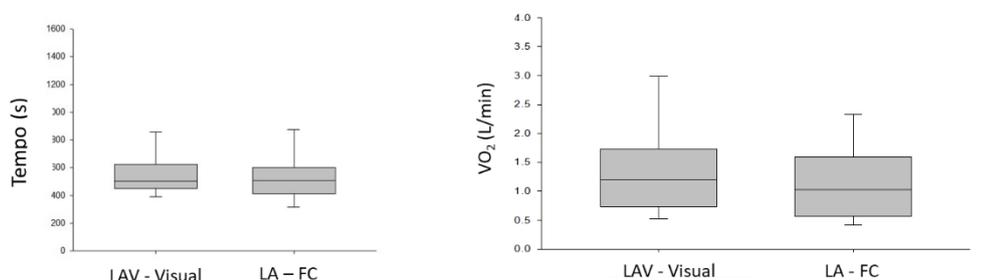


Figura 8. Teste t para comparação das médias de tempo (s) e VO₂ (L/min) entre os diferentes métodos.

7.0 Conclusão

Pela análise preliminar dos resultados, podemos concluir que a análise do LA pela resposta da FC é uma alternativa confiável e de fácil implementação através do software *MainInflectionUFRJ for Windows*®, ao método padrão ouro pela análise das variáveis ventilatórias obtidas no TECP.

8.0 Referências Bibliográficas:

1. I Diretriz Brasileira de Prevenção Cardiovascular. Sociedade Brasileira de Cardiologia • ISSN-0066-782X • Volume 101, Nº 6, Supl. 2, Dezembro 2013.
2. AM. COLL. SPORTS MED. (ACSM), Chapter 7. General principles of exercise prescription. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription, ed. BA Franklin, pp. 138–39. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins. 6th ed, 2000.
3. POWELL, K. E. et al., Physical Activity for Health: What Kind? How Much? How Intense? On Top of What? Annu. Rev. Public Health, 32:349–65, 2011. Diretriz em Cardiologia do Esporte e do Exercício, 2013
4. HERDY, AH et al. Teste Cardiopulmonar de Exercício: Fundamentos, Aplicabilidade e Interpretação. Arq Bras Cardiol. 2016; 107(5):467-481.
5. STEIN, Ricardo. Teste cardiopulmonar de exercício: noções básicas sobre o tema. Revista da Sociedade de Cardiologia do Rio Grande do Sul • Ano XV nº 09 Set/Out/Nov/Dez 2006.

6. III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre Teste Ergométrico, Departamento de Ergometria, Exercício e Reabilitação Cardiovascular da Sociedade Brasileira de Cardiologia, 2010.
7. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. American Thoracic Society/ American College of Chest Physicians. *Am J Respir Crit Care Med* Vol 167. pp 211–277, 2003.
8. NEDER, JA & NERY LE. Teste de Exercício Cardiopulmonar. *J Pneumol* 28(Supl 3) – outubro de 2002.
9. BORG, Gunnar. Borg's perceived exertion and pain scales. *Human kinetics*, 1998.
10. GUIMARÃES, J.I., Normatização de Técnicas e Equipamentos para Realização de Exames em Ergometria e Ergoespirometria. *Arq Bras Cardiol* 2003; 80: 458-64.
11. BALADY, GJ. Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adults. *Circulation*. 2010;122:191-225.
12. WASSERMAN K, Whipp BJ. Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Resp Dis*. 1975;112(2):219-49.
13. WASSERMAN, K. & MCILROY, M.B, Detecting the Threshold of Anaerobic Metabolism in Cardiac Patients During Exercise, *The American journal of Cardiology*, Volume 14, December, 1964.
14. POZZI, LG. Determinação do limiar de anaerobiose de idosos saudáveis: comparação entre diferentes métodos. *Rev. bras. fisioter.*, São Carlos, v. 10, n. 3, p. 333-338, jul./set. 2006.
15. WASSERMAN, Karlman; HANSEN, James E.; SUE, Darryl Y. Principles of exercise testing and interpretation: including pathophysiology and clinical applications. 3. ed. Philadelphia: Williams & Wilkins, 1999.
16. MARÃES V.R.F.S. et al., Identification of anaerobic threshold using heart rate response during dynamic exercise, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* (2005) 38: 731-735.
17. REIS, MS et al. Determination of anaerobic threshold through heart rate and near infrared spectroscopy in elderly healthy men. *Braz J Phys Ther*. 2013 Sept-Oct; 17(5):506-515.
18. RIBEIRO, J.P. et al., Heart Rate Break Point May Coincide with the Anaerobic and Not the Aerobic Threshold, *mt. J. Sports Med*. 6 (1985) 220—224.
19. BUNC, V. et al., Verification of the heart rate threshold, *Eur J Appl Physiol* (1995) 70:263-269.
20. ALONSO, D.A. et al., Comportamento da Frequência Cardíaca e da Sua Variabilidade Durante as Diferentes Fases do Exercício Físico Progressivo Máximo, *Arq Bras Cardiol* volume 71, (nº 6), 1998.
21. GUYTON, AC, Hall JE. *Tratado de Fisiologia Médica*. Elsevier edição 11, 2006.

22. VANDERLEI, L.C. et al., Noções básicas de variabilidade da frequência cardíaca e sua aplicabilidade clínica. *Rev Bras Cir Cardiovascular.* ;24(2):205-1, 2009.
23. MARÃES, V.R.F.S., Frequência cardíaca e sua variabilidade: análises e aplicações, *Rev Andal Med Deporte.* 2010;3(1):33-42.
24. NOBREGA, A.C.L. et al., Neural Regulation of Cardiovascular Response to Exercise: Role of Central Command and Peripheral Afferents, Hindawi Publishing Corporation, *BioMed Research International*, Volume 2014, Article ID 478965.
25. NEDER, José A.; NERY, Luiz E. *Fisiologia clínica do exercício: teoria e prática.* São Paulo: Artmed, v.1, 2003.
26. VANDERLEI, L.C. et al., Noções básicas de variabilidade da frequência cardíaca e sua aplicabilidade clínica. *Rev Bras Cir Cardiovascular.* ;24(2):205-1, 2009.
27. MITCHELL, J.H. Neural control of the circulation during exercise. *Medicine Science os Sports and Exercise*, 22(2): 141-154, 1990.
28. NEGRÃO, C.E & BARRETO, A.C.P, *Cardiologia do Exercício, Do atleta ao cardiopata*, 3ª edição, São Paulo: Manole, 2005.
29. MENEGHELO, Romeu S. et al. III Diretrizes da Sociedade Brasileira de Cardiologia sobre teste ergométrico. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, v. 95, n. 5, p. 1-26, 2010.
30. GIBBONS, R.J., et al. ACC/AHA 2002 Guideline Update for Exercise Testing. A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee on Exercise Testing). *Circulation*, v.106, n.14, p.1883 – 1892, out. 2002.