



ESCOLA DE COMANDO E ESTADO-MAIOR DA AERONÁUTICA
COORDENADORIA ACADÊMICA
CURSO DE COMANDO E ESTADO-MAIOR

FERNANDO SOUSA **HONORATO**, Ten Cel Av

Comportamento fisiológico dos tripulantes da Força Aérea Brasileira submetidos a treinamentos em câmara hipobárica: Uma análise da frequência cardíaca.

Rio de Janeiro

2024

ESCOLA DE COMANDO E ESTADO-MAIOR DA AERONÁUTICA
COORDENADORIA ACADÊMICA
CURSO DE COMANDO E ESTADO-MAIOR

FERNANDO SOUSA **HONORATO**, Ten Cel Av

Comportamento fisiológico dos tripulantes da Força Aérea Brasileira submetidos a treinamentos em câmara hipobárica: Uma análise da frequência cardíaca.

Trabalho de conclusão de curso apresentado, à Escola de Comando e Estado-Maior da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Comando e Estado-Maior.

Linha de Pesquisa: Operações Aéreas.

Orientadora: Ten Cel Dent Luciana da Silva Oliveira Gomes

Rio de Janeiro

2024

RESUMO

A hipóxia, caracterizada pela redução dos níveis de oxigênio nos tecidos corporais, é um desafio crítico para a segurança de voo. Treinamentos em câmara hipobárica são fundamentais para preparar tripulantes a enfrentar essas condições, permitindo-lhes reconhecer sintomas da hipóxia precocemente e adotar medidas de mitigação. O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento da frequência cardíaca (FC) durante as fases do voo simulado em tripulantes da Força Aérea Brasileira (FAB) submetidos a treinamentos em câmara hipobárica. A metodologia envolveu uma revisão de literatura descritiva e um estudo post hoc com dados brutos coletados em 2019 de 23 tripulantes durante o Estágio de Adaptação Fisiológica (EAF) no Instituto de Medicina Aeroespacial Brigadeiro Médico Roberto Teixeira (IMAE). Os dados da FC foram analisados estatisticamente usando o teste de Kruskal-Wallis e pós-teste de Dunn para identificar variações significativas. Os resultados mostraram um aumento significativo da FC durante a fase de hipóxia em comparação com a fase de repouso, seguido por uma redução progressiva durante a recuperação com oxigenação suplementar. A FC retornou aos níveis basais após 300 segundos de recuperação, indicando a eficácia das intervenções de oxigenação suplementar. Concluiu-se que a FC é um indicador sensível das respostas fisiológicas à hipóxia e à recuperação, fornecendo uma base científica para otimizar estratégias preventivas e educacionais no preparo operacional dos tripulantes da FAB, melhorando a segurança de voo e o desempenho humano.

Palavras-chave: Hipóxia hipobárica; frequência cardíaca; fisiologia aeroespacial; câmara hipobárica.

ABSTRACT

Hypoxia, characterized by the reduction of oxygen levels in body tissues, is a critical challenge for flight safety. Hypobaric chamber training is essential to prepare crew members to face these conditions, allowing them to recognize hypoxia symptoms early and adopt mitigation measures. The objective of this study was to analyze the behavior of heart rate (FC) during the simulated flight phases in Brazilian Air Force (FAB) crew members undergoing hypobaric chamber training. The methodology involved a descriptive literature review and a post hoc study with raw data collected in 2019 from 23 crew members during the Physiological Adaptation Stage (EAF) at the Brigadeiro Médico Roberto Teixeira Institute of Aerospace Medicine (IMAE). FC data were statistically analyzed using the Kruskal-Wallis test and Dunn's post-test to identify significant variations. The results showed a significant increase in FC during the hypoxia phase compared to the rest phase, followed by a progressive reduction during recovery with supplemental oxygen. FC returned to baseline levels after 300 seconds of recovery, indicating the effectiveness of supplemental oxygen interventions. It was concluded that FC is a sensitive indicator of physiological responses to hypoxia and recovery, providing a scientific basis to optimize preventive and educational strategies in the operational preparation of FAB crew members, improving flight safety and human performance.

Keywords: *Hypobaric hypoxia; heart rate; aerospace physiology; hypobaric chamber.*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bmp	Batidas por minuto
COMAER	Comando da Aeronáutica (da FAB)
COMGEP	Comando-Geral do Pessoal (da FAB)
EAF	Estágio de Adaptação Fisiológica
FAB	Força Aérea Brasileira
FC	Frequência Cardíaca
FC _{REC}	Média da Frequência Cardíaca na Recuperação
FC _{REC150}	Média da Frequência Cardíaca ao longo de 150 segundos de Recuperação
FC _{REC180}	Média da Frequência Cardíaca ao longo de 180 segundos de Recuperação
FC _{REC300}	Média da Frequência Cardíaca ao longo de 300 segundos de Recuperação
FC _{REP}	Média da Frequência Cardíaca no Repouso
FC _{HIP}	Média da Frequência Cardíaca na Hipóxia
HIP	Hipóxia
IMAE	Instituto de Medicina Aeroespacial Brigadeiro Médico Roberto Teixeira
O ₂	Oxigênio
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
REC	Recuperação
REP	Repouso
ROBD	Reduced Oxygen Breathing Device
RTO	Research and Technology Organization (Organização de Pesquisa e Tecnologia da OTAN)
SNA	Sistema Nervoso Autônomo
STANAG	Standardization Agreement (Acordo de Padronização da OTAN)
TAS	Tempo de Aparecimento dos Sintomas
UCB	Universidade Católica de Brasília

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1	O ESTADO DE REPOUSO	8
2.2	O ESTADO DE HIPÓXIA.....	9
2.3	O ESTADO DE RECUPERAÇÃO.....	12
2.4	TREINAMENTO NA CÂMARA HIPOBÁRICA	13
3	METODOLOGIA	15
4	APRESENTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	20
4.1	REVISÃO DE LITERATURA DESCRITIVA	20
4.2	ESTUDO POST HOC	23
4.2.1	FC _{REP} vs. FC _{CHIP}	26
4.2.2	FC _{REC} (FC _{REC150} / FC _{REC180} / FC _{REC300}) vs. FC _{CHIP}	26
4.2.3	FC _{REC} (FC _{REC150} / FC _{REC180} / FC _{REC300}) vs. FC _{REP}	27
5	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A hipóxia, caracterizada pela redução dos níveis de oxigênio (O₂) nos tecidos corporais, é um problema crítico, especialmente em ambientes de altitudes elevadas (Coppel, 2015; McMorris, 2017). A exposição à hipóxia representa um sério risco à segurança de voo, pois o cérebro, devido à uma elevada demanda metabólica voltada ao metabolismo oxidativo, é particularmente vulnerável aos efeitos da falta de O₂ (Bailey, 2019), podendo resultar comprometimento significativo das funções cognitivas (McMorris *et al.*, 2017).

Na aviação, a exposição à hipóxia é uma realidade frequente e configura um desafio constante à operação segura durante o voo (Rice *et al.*, 2019). A Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) reconhece a importância de treinamentos específicos em câmaras de hipóxia para preparar tripulantes a enfrentar os efeitos da altitude, permitindo-lhes reconhecer precocemente os sintomas e adotar medidas de mitigação (STANAG, 2018).

Durante os exercícios de treinamento em hipóxia, explora-se o conceito de Tempo de Aparecimento dos Sintomas (TAS). O TAS é o intervalo entre a exposição inicial a condições de baixa pressão parcial de O₂ e o reconhecimento dos primeiros sintomas da hipóxia. Estes sintomas podem incluir raciocínio lento e alterações na visão (Leinonen, 2022; Yoneda, 2000). Compreender estes sintomas torna-se fundamental, pois indica quando os tripulantes devem optar por medidas de segurança, como o uso de oxigênio suplementar (Honorato *et al.*, 2022).

O organismo responde à hipóxia com ajustes na frequência cardíaca (FC) para garantir um fornecimento adequado de O₂ aos tecidos vitais. Após o reconhecimento dos sintomas e a adoção de medidas mitigatórias, como a oxigenação suplementar, desencadeia-se um processo de recuperação e readaptação às condições normais, envolvendo modificações adicionais na FC para restaurar a homeostase (Davis, 2008; Temporal, 2005). A FC tem sido amplamente utilizada para investigar os impactos da hipóxia e para avaliar a eficácia de intervenções destinadas a mitigar esses efeitos (Guadagno, 2011; Honorato, 2022; Vigo, 2010; Yoneda, 2000).

Estudos indicam que os treinamentos em hipóxia resultam em alterações fisiológicas e cognitivas significativas (McMorris *et al.*, 2017), e que a recuperação desses efeitos não é imediata após a oxigenação suplementar (Blacker, 2021; Botek, 2015; Botek, 2018; Harshman, 2015; Malle, 2016; Najmanová, 2019). A manifestação dos ajustes fisiológicos varia entre indivíduos, dependendo da severidade da hipóxia, da duração da exposição e da altitude alcançada (Oliveira, 2017; Russomano, 2020).

No Brasil, o treinamento em câmara hipobárica para tripulantes da Força Aérea

Brasileira (FAB) é gerido pelo Instituto de Medicina Aeroespacial Brigadeiro Médico Roberto Teixeira (IMAE). Esse treinamento enfrenta desafios significativos, incluindo altos custos de manutenção e capacitação de pessoal (Brasil, 2017), resultando em estudos ainda incipientes sobre o tema (Honorato, 2022; Russomano, 2020).

Diante desse cenário, o presente estudo busca responder ao seguinte problema de pesquisa: Qual é o padrão de comportamento da frequência cardíaca (FC) em tripulantes da Força Aérea Brasileira (FAB) durante as diferentes fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica?

Portanto, o objetivo geral deste estudo é analisar o comportamento da frequência cardíaca (FC) durante as fases do voo simulado em tripulantes da Força Aérea Brasileira (FAB) submetidos a treinamentos em câmara hipobárica.

Este estudo tem como objetivos específicos (OE):

OE1 - Descrever o comportamento da FC em resposta a diferentes estímulos;

OE2 - Identificar as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica; e

OE3 - Comparar o comportamento da FC dos tripulantes da FAB ao longo das diferentes fases do voo simulado.

A análise dos resultados deste estudo será relevante para otimizar estratégias preventivas e educacionais no preparo operacional, aumentando a eficiência do desempenho humano e a segurança durante as operações da FAB. A utilização de tecnologias avançadas, como dispositivos móveis e *wearables*, permitirá monitoramento em tempo real das condições fisiológicas dos tripulantes, melhorando a resposta a situações de hipóxia. Investir em ciência e tecnologia garantirá que os recursos humanos estejam equipados com ferramentas e conhecimentos avançados para enfrentar desafios futuros com eficiência e segurança.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O ESTADO DE REPOUSO

O estado de repouso representa uma condição basal do organismo, caracterizada pela ausência de estressores externos significativos, permitindo que os sistemas fisiológicos operem em um nível de atividade mínima. A FC é o número de vezes que o coração bate por minuto. Ela é um indicador importante da função cardíaca e da saúde geral do sistema cardiovascular. Em repouso, a FC é regulada pelo sistema nervoso autônomo, com predominância da atividade parassimpática, mediada pelo nervo vago, que atua reduzindo a FC a níveis considerados

normais para cada indivíduo (Guyton, 2026; Wiyarta, 2022).

A FC em repouso varia entre indivíduos, com valores entre 50 e 90 batimentos por minuto em adultos saudáveis (Nanchen, 2018). Este valor é influenciado por diversos fatores, incluindo condicionamento físico, idade e fatores psicológicos, como estado emocional e nível de estresse. Por exemplo, atletas bem condicionados tendem a apresentar uma FC em repouso mais baixa devido ao aumento da eficiência cardíaca e à predominância do tônus parassimpático, resultantes do treinamento físico regular (Lundstrom; Foreman; Blits, 2023). A FC em repouso também tende a aumentar com a idade, em virtude da diminuição do tônus parassimpático e da maior rigidez arterial (Delorey, 2021). Além desses fatores fisiológicos, o estado emocional e o nível de estresse também influenciam a FC em repouso; situações de estresse tendem a elevar a FC através da ativação do sistema simpático, enquanto estados de relaxamento profundo podem reduzi-la (Sergerstrom; Miller, 2004).

No contexto do treinamento em câmara hipobárica, a fase de repouso é fundamental para estabelecer uma linha de base precisa para a avaliação das respostas cardiovasculares à hipóxia e a subsequente recuperação (Barak, 1999; Vigo, 2010; Yoneda, 2000; Yoneda, 1997).

Assim sendo, a FC em repouso não apenas fornece uma medida vital do estado basal do sistema cardiovascular, mas também serve como um parâmetro essencial para avaliar as respostas fisiológicas durante e após a exposição à hipóxia em treinamentos de câmara hipobárica.

2.2 O ESTADO DE HIPÓXIA

A hipóxia é definida como uma condição na qual os tecidos corporais recebem uma quantidade insuficiente de O₂ necessária para o metabolismo celular adequado (Guyton; Hall, 2006). Esta condição pode resultar de diversos fatores, como baixa concentração de oxigênio no ar inalado, insuficiência respiratória ou comprometimento da circulação sanguínea (Davis, 2008; Guyton, 2006). A hipóxia pode ser categorizada em diferentes tipos, incluindo hipóxia hipobárica, hipóxia hipóxica, hipóxia anêmica, hipóxia estagnante e hipóxia histotóxica (Davis, 2008; Temporal, 2005).

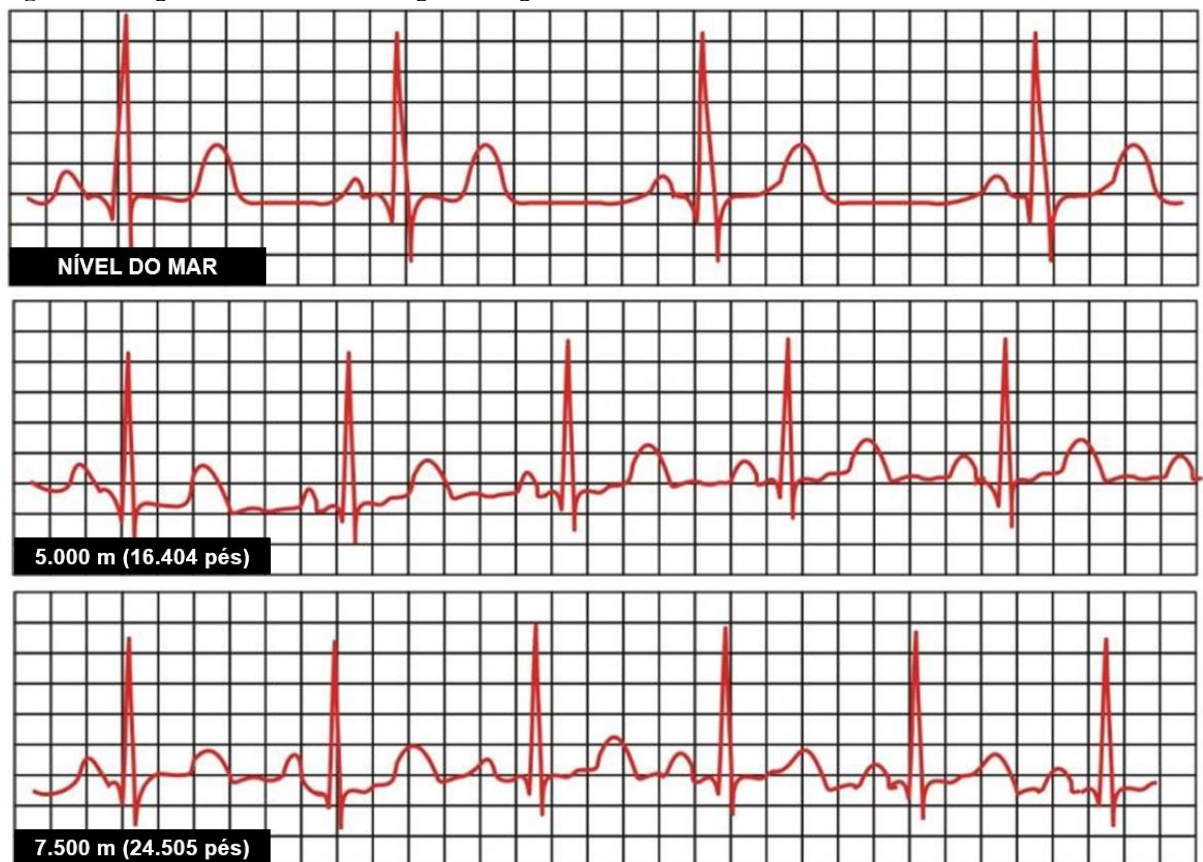
Este estudo concentra-se na hipóxia hipobárica, uma condição comum em altitudes elevadas onde a diminuição da pressão atmosférica resulta em menor disponibilidade de oxigênio. À medida que a altitude aumenta, essa pressão decresce, exacerbando o risco de hipóxia (Davis, 2008; Russomano, 2020; Temporal, 2005).

O organismo humano responde à hipóxia com diversas compensações fisiológicas

cardíacas, principalmente mediadas pelo sistema nervoso autônomo (SNA). A hipóxia provoca a ativação do sistema nervoso simpático, resultando em um aumento da FC (Barak, 1999; Toyoda, 2023; Vigo, 2010). Esse aumento é acompanhado por vasoconstrição periférica e liberação de hormônios como a adrenalina adequado (Guyton; Hall, 2006).

Para ilustrar melhor essas compensações fisiológicas cardíacas, a Figura 1 apresenta fragmentos de eletrocardiogramas registrados em diferentes altitudes, evidenciando as alterações na FC como resposta à intensidade da hipóxia. Conforme mostrado nos registros, a FC aumenta progressivamente à medida que a altitude se eleva. No nível do mar, os intervalos entre os picos dos eletrocardiogramas são maiores, indicando uma FC mais baixa. Em 5.000 m (aproximadamente 16.404 pés), esses intervalos são menores, e em 7500 m (aproximadamente 24.505 pés), são ainda mais curtos, demonstrando um aumento contínuo da FC. Esse aumento reflete a maior demanda do corpo por oxigênio em altitudes elevadas e a ativação compensatória do SNA, que busca manter a oxigenação adequada dos tecidos em condições de menor disponibilidade de oxigênio (Temporal, 2005).

Figura 1 - Fragmentos de Eletrocardiograma Registrados em Diferentes Altitudes

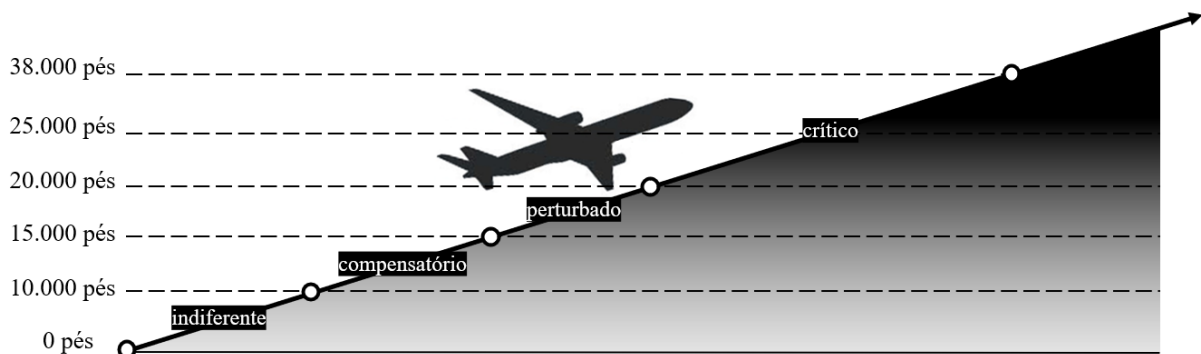


Fonte: Temporal (2005, p.97).

A eficácia destas respostas compensatórias é influenciada por diversos fatores já mencionados, como condicionamento físico, idade e aspectos psicológicos, além da altitude alcançada e do tempo de exposição à hipóxia (Davis, 2008; Oliveira, 2017; Russomano, 2020).

Quanto à altitude alcançada, a severidade da hipóxia pode manifestar-se em quatro estágios progressivos: indiferente, compensatório, perturbado e crítico. Como ilustrado na Figura 2, no estágio indiferente, que ocorre até cerca de 10.000 pés (aproximadamente 3.000 metros), o sistema cardiovascular adapta-se sem necessidade de intervenções adicionais. Nos estágios subsequentes, que se estendem até acima de 20.000 pés (6.000 metros), a capacidade de compensação do organismo diminui progressivamente, podendo resultar em danos significativos, incluindo o colapso dos sistemas cardiovascular e nervoso (Davis, 2008; Russomano, 2020; Temporal, 2005).

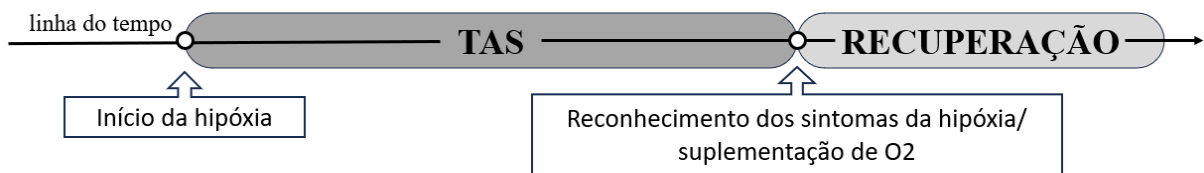
Figura 2 - Estágios da Hipóxia Hipobárica em Função da Altitude.



Fonte: Adaptado de Temporal (2005).

No contexto da exposição à hipóxia, o Tempo de Aparecimento dos Sintomas (TAS) é um termo comumente utilizado em treinamentos de câmara hipobárica, referindo-se ao intervalo entre a exposição inicial a condições de baixa pressão parcial de O₂ e o reconhecimento dos primeiros sinais sintomáticos da hipóxia (Leinonen, 2022; Yoneda, 2000). Conforme observado na Figura 3, este intervalo é importante nesses treinamentos, permitindo que os tripulantes identifiquem rapidamente os sinais de hipóxia e adotem medidas protetivas, como a suplementação de O₂ (Davis, 2008; Russomano, 2020; Temporal, 2005). Compreender esses sintomas é fundamental, pois indica quando os tripulantes devem optar por medidas de segurança. A habilidade de reconhecer e reagir prontamente aos primeiros sintomas de hipóxia é vital para a segurança operacional, permitindo que os tripulantes tomem ações protetivas antes que o comprometimento cognitivo se torne severo (Barak, 1999; Honorato, 2022; Vigo, 2010).

Figura 3 – Tempo de Aparecimento dos Sintomas (TAS).



Fonte: Adaptado de Vigo (2010).

Assim sendo, a FC é essencial na gestão da hipóxia, atuando como um indicador da resposta do corpo à baixa disponibilidade de oxigênio. Monitorá-la permite aos tripulantes detectar precocemente a hipóxia e implementar intervenções eficazes, como a suplementação de oxigênio, garantindo a segurança e o desempenho dos tripulantes em alta altitude.

2.3 O ESTADO DE RECUPERAÇÃO

O estado de recuperação pós-hipóxia é fundamental, pois envolve o esforço do organismo para retornar às suas condições basais após a exposição à hipóxia. No contexto do treinamento em câmara hipobárica, a avaliação detalhada da recuperação da FC é essencial para entender a eficiência das respostas fisiológicas e das intervenções aplicadas, como a suplementação de oxigênio (Davis, 2008; Guyton, 2006, Temporal, 2005).

A recuperação da FC após a exposição à hipóxia envolve uma série de adaptações mediadas pelo SNA. Imediatamente após o fim da exposição à hipóxia, com a administração da oxigenação suplementar, a atividade simpática, que inicialmente se eleva durante a hipóxia, começa a diminuir gradualmente. Simultaneamente, há um aumento na atividade parassimpática, mediada pelo nervo vago, que promove a redução da FC. Este equilíbrio autonômico é essencial para a restauração da homeostase cardiovascular (Barak, 1999; Ma, 2022; Vigo, 2010; Yoneda, 2000; Yoneda, 1997).

A eficácia da recuperação é influenciada não apenas pelos fatores previamente discutidos, como o condicionamento físico, a idade, os fatores psicológicos, a altitude alcançada e o tempo de exposição à hipóxia, mas também pela quantidade de oxigênio utilizado na suplementação (Blacker, 2021; Botek, 2015; Botek, 2018; Harshman, 2015; Najmanová, 2019).

Neste sentido, a recuperação da FC não apenas reflete a capacidade do organismo de restabelecer a homeostase, mas também serve como um indicador crítico da eficácia das intervenções aplicadas durante e após a exposição à hipóxia.

Assim, com base nas informações apresentadas nos estados fisiológicos de repouso,

hipóxia e recuperação pós-hipóxia, verifica-se que o OE1, que consistia em descrever o comportamento da FC em resposta a diferentes estímulos, foi alcançado. A escolha do comportamento da FC como variável dependente (VD) é justificada pela sua sensibilidade em refletir as alterações no ambiente.

2.4 TREINAMENTO NA CÂMARA HIPOBÁRICA

O treinamento na câmara hipobárica inclui uma variedade abrangente de testes destinados à preparação dos tripulantes, além da exposição à hipóxia. Estes testes englobam descompressão rápida, uso de respiradores de pressão positiva, avaliação e demonstração da perda de acuidade visual, simulação de queda livre e abertura automática de paraquedas, e treinamento para paraquedistas em alta altitude. No presente estudo, o foco principal será a exposição à hipóxia, onde os tripulantes são submetidos a condições simuladas de alta altitude para reconhecer os sintomas de falta de oxigênio e aplicar medidas protetivas. O procedimento segue um conjunto de fases bem definidas e regulamentadas, garantindo a eficácia do treinamento e a segurança dos tripulantes (RTO, 1999).

Inicialmente, antes da exposição à hipóxia na câmara hipobárica, é essencial realizar a desnitrogenização, ou "desnitro", para reduzir o nitrogênio dissolvido nos tecidos corporais dos tripulantes e minimizar o risco de doença descompressiva. Este procedimento previne a formação de bolhas de nitrogênio no sangue, que podem causar dores articulares e complicações neurológicas. Realizada ao nível do solo, a desnitrogenização envolve a respiração de oxigênio puro por 30 a 60 minutos. Instrutores treinados supervisionam o ajuste das máscaras, monitoram os tripulantes quanto a sinais de desconforto e verificam o funcionamento adequado dos equipamentos de oxigênio para garantir a máxima eficiência do processo (RTO, 1999).

Concluída a desnitrogenização, a câmara hipobárica inicia a ascensão até uma altitude predeterminada, conforme a especificidade do treinamento, como os tipos de aeronaves e perfis de missão, a experiência e condição dos tripulantes, além de protocolos de segurança e normas regulamentares aplicáveis. Durante a ascensão, a pressão atmosférica dentro da câmara é reduzida, simulando as condições encontradas em grandes altitudes. Os tripulantes permanecem sob constante monitoramento médico para detectar quaisquer sinais iniciais de desconforto ou anomalias fisiológicas, assegurando a detecção precoce de complicações e a manutenção da segurança durante o treinamento (Brasil, 2017; RTO, 1999).

Ao atingir a altitude predeterminada, inicia-se a exposição à hipóxia hipobárica. Neste momento, os tripulantes removem suas máscaras de oxigênio para experienciar os efeitos da

hipóxia de forma controlada, conforme descrito no TAS. Em uma condição de 25.000 pés, o TAS dura aproximadamente 2 a 3 minutos, suficiente para a manifestação dos principais sintomas de hipóxia sem comprometer a segurança. Conforme ilustrado na Fotografia 1, durante a simulação, os tripulantes são frequentemente solicitados a realizar tarefas simples, como escrever ou resolver problemas matemáticos, para ajudar a identificar a deterioração cognitiva causada pela hipóxia. Isto não apenas permite que os tripulantes reconheçam seus sintomas específicos, mas também demonstra o impacto da hipóxia em suas habilidades cognitivas e motoras (Brasil, 2017; RTO, 1999).

Fotografia 1 – Treinamento de Tripulantes da FAB em Câmara Hipobárica para avaliação do TAS no IMAE.



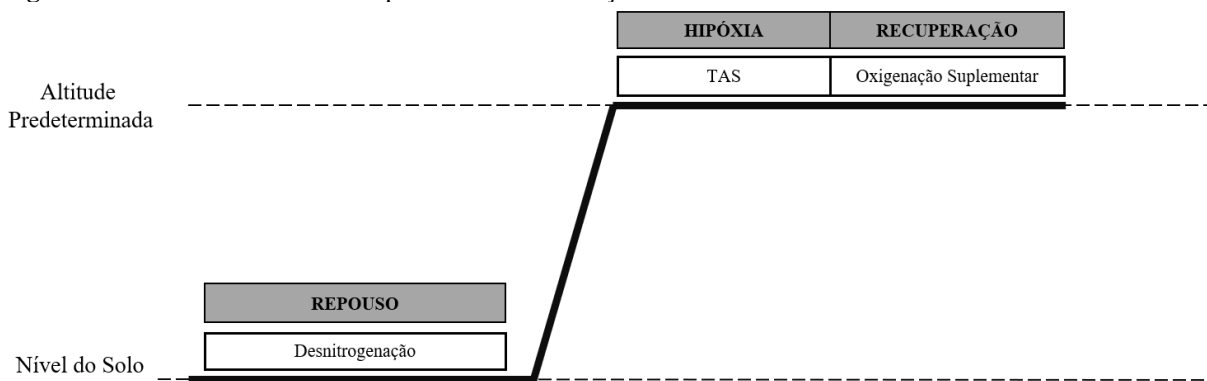
Fonte: O autor.

Quando os sintomas de hipóxia são claramente identificados, os tripulantes são orientados a recolocarem rapidamente suas máscaras de oxigênio, simulando uma resposta de emergência. Essa prática é essencial para que os tripulantes experimentem a recuperação imediata dos sintomas ao receber oxigênio suplementar. Após a colocação das máscaras, os tripulantes começam a respirar O₂, o que aumenta rapidamente a concentração de O₂ no sangue e reverte os sintomas de hipóxia. Esta intervenção resulta em uma melhoria na clareza mental, coordenação motora e percepção visual dos tripulantes (RTO, 1999).

Neste contexto, para obter parâmetros comparativos das respostas fisiológicas dos

indivíduos em treinamentos de exposição à hipóxia hipobárica, a comunidade científica tem delimitado o protocolo descrito acima em três fases: repouso, hipóxia e recuperação. Conforme ilustrado na Figura 4, a fase de repouso envolve o período de desnitrogenação com a inalação de oxigênio puro. A fase de hipóxia é caracterizada pelo TAS, durante a exposição dos tripulantes a uma condição de baixa pressão de O₂. A fase de recuperação ocorre imediatamente após a restauração do fluxo de oxigênio ou a reconexão das máscaras. As evidências demonstram variações significativas na FC dos tripulantes durante as três fases em um voo simulado (Barak, 1999; Ma, 2022; Self, 2011; Vigo, 2010).

Figura 4 – Protocolo da Câmara Hipobárica e Identificação das Fases.



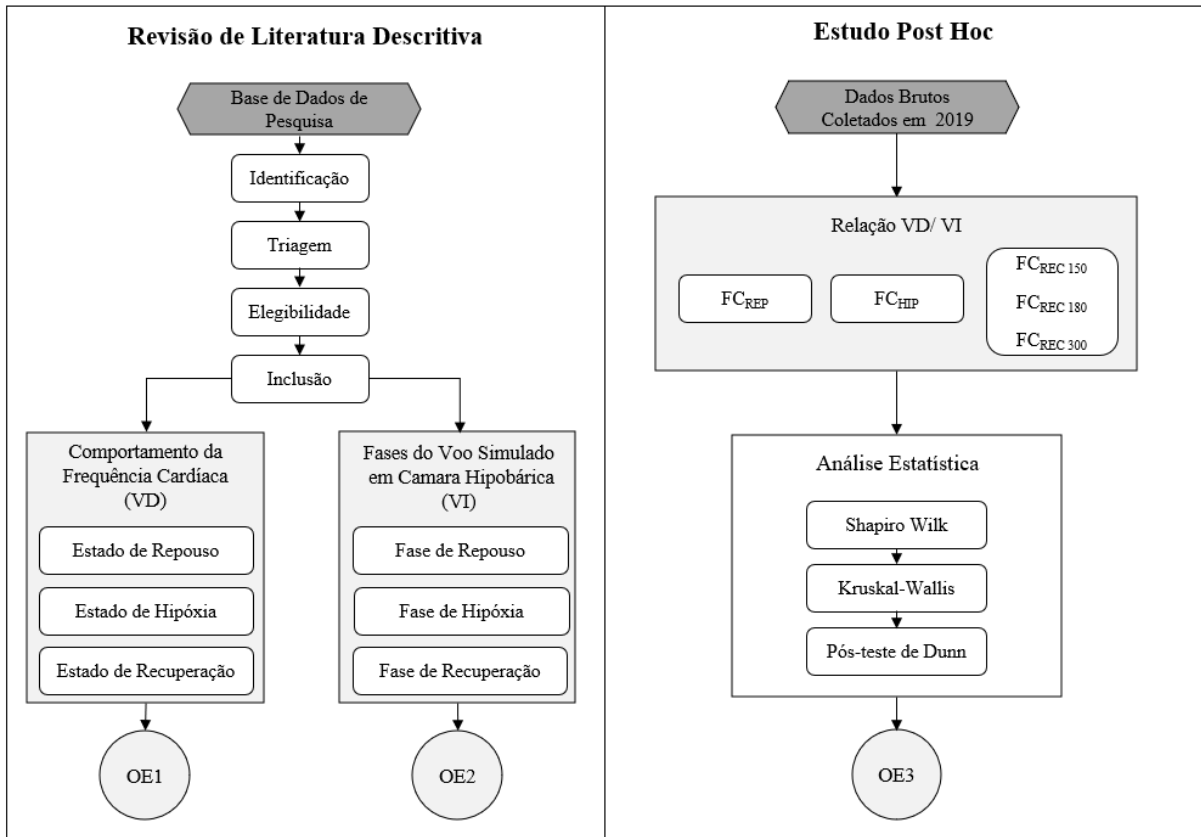
Fonte: Adaptado de RTO (1999).

Portanto, com base nas informações apresentadas sobre o protocolo de treinamento na câmara hipobárica, estruturado em três fases principais: repouso, hipóxia e recuperação, pode-se concluir que o OE2, que consistia em identificar as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica, foi alcançado. A escolha das fases do voo simulado como variável independente (VI) é justificada pela sua capacidade de proporcionar condições experimentais controladas que permitem a análise das respostas fisiológicas dos tripulantes.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da metodologia, foram necessários procedimentos estruturados, conforme o desenho metodológico descrito na Figura 5. Estes procedimentos foram fundamentais para a análise e as relações entre as variáveis dependente e independente, garantindo que os objetivos específicos fossem rigorosamente fundamentados em evidências sólidas. A metodologia foi executada em duas etapas complementares: uma revisão de literatura descritiva e um estudo post hoc.

Figura 5 – Desenho Metodológico.



Fonte: O autor.

A primeira etapa consistiu em uma revisão de literatura descritiva. O objetivo desta etapa foi fornecer o suporte teórico necessário para atingir os dois primeiros objetivos específicos: OE1) Descrever o comportamento FC em resposta a diferentes estímulos; e OE2) Identificar as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica. Esta etapa foi essencial para ampliar o escopo investigativo e minimizar a possibilidade de lacunas no conhecimento sobre o objeto de estudo.

Dos dados a coletar, a revisão de literatura descritiva considerou estudos em inglês, português e espanhol, disponíveis para acesso na íntegra, em humanos, com foco no comportamento fisiológico em hipóxia. Estudos envolvendo crianças, idosos, indivíduos com qualquer condição patológica, intervenções farmacológicas, transfusões sanguíneas e animais foram excluídos.

O processo foi iniciado utilizando diversas bases de dados, passando pelos processos de identificação, triagem e inclusão, por meio da ferramenta *Rayyan* (*Systematic Reviews*, Qatar, Arábia Saudita). Estudos repetidos foram excluídos com o auxílio do gerenciador de referências *Mendeley* (*Reference Management Software*, Londres, Reino Unido). A fase de identificação foi realizada mediante a aplicação de termos e operadores booleanos nas bases de dados Google

Academic, PubMed, Medline, Scopus, Science Direct, Web of Science, Embase, IEEE Xplore, Lilacs e Europe PMC, até junho de 2024. Em seguida, os estudos passaram por uma triagem inicial, na qual foram selecionados com base na leitura dos títulos e resumos. A elegibilidade dos estudos foi determinada após a leitura completa dos textos. Finalmente, os estudos incluídos na revisão foram aqueles que atenderam aos critérios de análise qualitativa.

Os achados desta etapa foram descritos com maiores detalhes no referencial teórico. A revisão de literatura descritiva demonstrou que a FC varia conforme os níveis de oxigenação dos estados de repouso, hipóxia e recuperação, com aumento durante a hipóxia e diminuição após a oxigenação suplementar pós-hipóxia. As fases do voo simulado foram identificadas como repouso, hipóxia e recuperação de acordo com o protocolo de treinamento em câmara hipobárica, cada uma essencial para avaliar as respostas fisiológicas dos tripulantes.

A segunda etapa envolveu um estudo post hoc para alcançar o terceiro objetivo específico: OE3) Comparar o comportamento da FC dos tripulantes da Força Aérea Brasileira (FAB) ao longo das diferentes fases do voo simulado. Estudos post hoc são análises realizadas após a conclusão de um estudo primário, reutilizando os dados brutos coletados para dar origem a estudos secundários, explorando novas hipóteses, identificando padrões e associações não previstos inicialmente, ou complementando os achados do estudo original (Curran-Everett; Milgrom, 2013).

Desse modo, cabe observar que os dados brutos foram coletados entre outubro e novembro de 2019, durante treinamentos realizados pelo IMAE na câmara hipobárica, além do TAS, e serviram de base para as análises subsequentes desta segunda etapa do estudo atual. Naquela ocasião, de forma complementar e visando permitir que a comunidade científica possa replicar a metodologia utilizada naquele ano com rigor e fidelidade, utilizou-se a ferramenta Polar Team 2®, com o cinto cardíaco do monitor umedecido e ajustado no tórax de cada tripulante, conforme as instruções do fabricante, para garantir consistência e precisão na obtenção dos dados. Quanto a garantia da legalidade, validade e integridade, a coleta dos dados naquela época foi aprovada pelo COMGEP (Protocolo COMAER nº 67400.013221/2019-24), pelo IMAE (Protocolo COMAER nº 67442.003040/2019-01) e pelo Comitê de Ética e Pesquisa da UCB (Protocolo CAAE nº 23003519.80000.0029).

A partir dos dados brutos, o presente estudo extraiu apenas as FC dos tripulantes dentro dos critérios de tempo específicos para repouso, hipóxia e recuperação, que serão detalhadas a seguir.

Na fase de repouso, foram considerados os índices de FC média registrados nos últimos 300 segundos (5 minutos) do período de aclimação (FC_{REP}), durante o qual ocorreu a

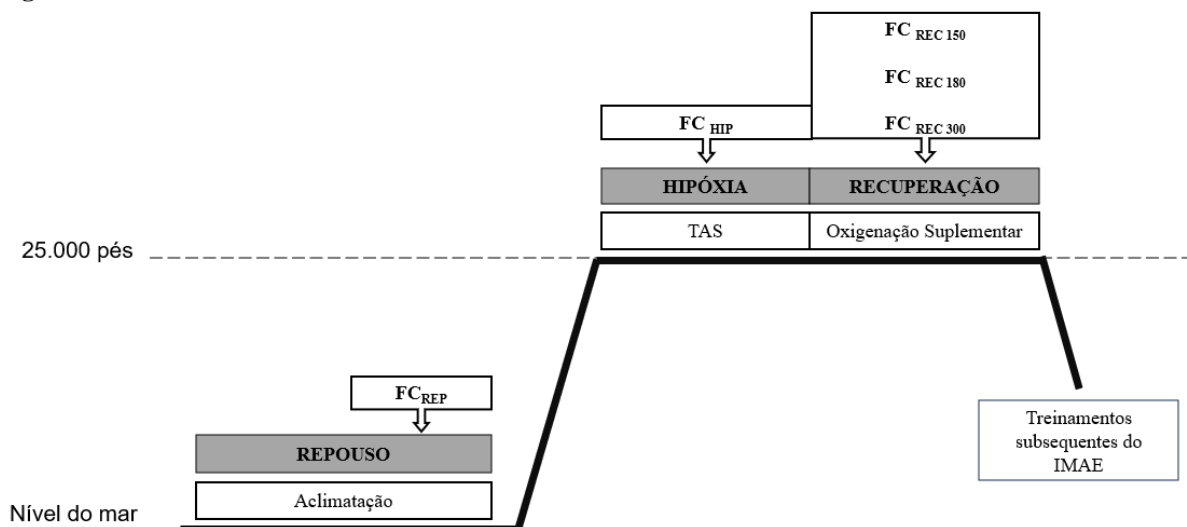
desnitrogenação com inalação de oxigênio puro. Esta linha de base permitiu a estabilização fisiológica dos tripulantes e minimizou ruídos nos resultados decorrentes das adaptações iniciais ao oxigênio. Além disso, serviu como controle, permitindo uma comparação mais precisa das alterações na FC ao longo das diferentes fases do voo simulado.

Na fase de hipóxia, foram considerados os índices de FC média registrados durante a média dos TAS dos tripulantes a 25.000 pés (FC_{HIP}), período no qual retiravam suas máscaras de O₂ até reconhecerem os primeiros sintomas de hipóxia, recolocando-as em seguida. A média dos tempos foi considerada devido à variabilidade individual entre os tripulantes.

Na fase de recuperação, foram considerados os índices de FC média durante os primeiros 300 segundos (5 minutos) do período de oxigenação suplementar (FC_{REC}), iniciado imediatamente quando os tripulantes recolocavam as máscaras de oxigênio para reverter os efeitos da hipóxia. Para uma análise mais detalhada e progressiva da recuperação fisiológica dos tripulantes, a FC_{REC} de recuperação foi segmentada em três subfases: recuperação ao longo de 150 segundos (FC_{REC150}), recuperação ao longo de 180 segundos (FC_{REC180}) e recuperação ao longo de 300 segundos (FC_{REC300}). É importante destacar que a fase de recuperação foi restrita a 300 segundos para evitar interferências nos treinamentos subsequentes do IMAE, permitindo a continuidade conforme a programação daquela instituição.

A Figura 6 apresenta uma visão geral das fases do voo simulado e os respectivos períodos de gravação dos índices de FC considerados para o estudo atual, fornecendo um quadro visual das diferentes etapas e suas especificidades.

Figura 6 – Visão das Fases do Voo Simulado e Análise dos Índices de FC no Estudo Atual.



Fonte: O autor.

Os dados considerados de FC foram então submetidos a uma análise estatística.

Inicialmente, a distribuição dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, apropriado para amostras pequenas e eficaz na avaliação da normalidade dos dados (Bussab; Morettin, 2010), revelando uma distribuição não paramétrica.

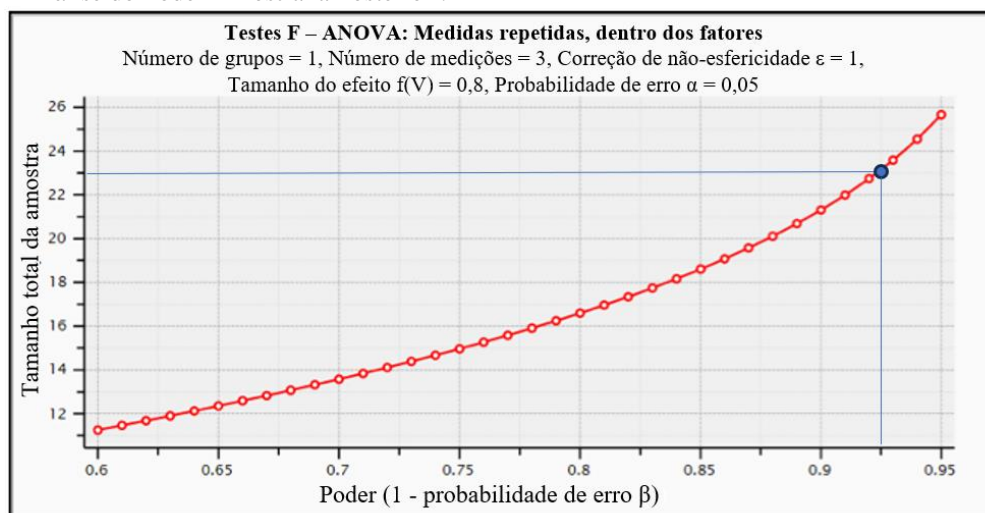
A seguir, para comparar as variações da FC durante as fases de repouso, hipóxia e recuperação com suas subfases, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis. Este teste foi escolhido por ser um método não paramétrico apropriado para comparar três ou mais grupos independentes, especialmente quando os dados não seguem uma distribuição normal. Além disso, o Kruskal-Wallis foi menos sensível a outliers e permitiu analisar dados contínuos transformados em ranks, sendo útil para lidar com a variabilidade individual (Bussab; Morettin, 2010).

Por fim, foi aplicado o pós-teste de Dunn para identificar em quais fases específicas a FC apresentou diferenças significativas, proporcionando uma análise detalhada das variações entre as diferentes fases do estudo (Bussab; Morettin, 2010).

Os achados desta segunda etapa estão descritos na seção de análise de dados e interpretação dos resultados, proporcionando uma compreensão detalhada do comportamento da FC dos tripulantes da FAB ao longo das diferentes fases do voo simulado.

Em relação a qualificação e quantificação do universo e da amostra, o tamanho amostral fornecido pelos dados brutos de 23 tripulantes proporcionou um poder estatístico de 92.5% ($1 - \beta = 0,925$) com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), conforme ilustrado na figura 7. O tamanho do efeito observado foi grande ($f = 0,80$), indicando que os efeitos encontrados são significativos.

Figura 7 - Análise do Poder Amostral a Posteriori.



Fonte: Extraído da Análise do Software GPower.

Nota: Correção de não-esfericidade (ϵ): Ajuste para desigualdade das variâncias das diferenças entre medições. Tamanho do efeito ($f(V)$): Medida da magnitude da diferença observada.

Probabilidade de erro (α): Nível de significância, com $\alpha = 0,05$ indicando 5% de chance de erro tipo I. Poder ($1 - \beta$): Probabilidade de detectar um efeito verdadeiro.

O presente estudo enfrentou algumas limitações que devem ser consideradas. Uma das principais foram os ajustes operacionais do IMAE que, ao longo do tempo, envolveu a necessidade de manutenção da câmara hipobárica e a implantação do Reduced Oxygen Breathing Device (ROBD), um equipamento de hipóxia normobárica. Como consequência, houve uma suspensão temporária dos treinamentos realizados exclusivamente em ambiente hipobárico, impactando a continuidade e a consistência dos dados coletados até então. Além disso, a aquisição do ROBD exigiu ajustes nos protocolos de pesquisa, a familiarização dos pesquisadores com os novos procedimentos e adaptações administrativas, cujo tempo necessário para normalização ultrapassaria o prazo de entrega deste estudo, levando à necessidade de utilizar os dados brutos coletados da câmara hipobárica em 2019 para um estudo post hoc.

Quanto aos dados coletados em 2019, considerando que as limitações identificadas naquele ano podem ter impactos diretos no presente estudo, torna-se pertinente incluí-los. O acesso ao ambiente hipobárico foi complexo, restrito e dispendioso. As variações na pressão durante os experimentos podem ter comprometido a precisão dos instrumentos de coleta, afetando a acurácia das medições e a consistência dos resultados. Além disso, a falta de controle sobre a dieta dos tripulantes antes dos testes pode ter influenciado o metabolismo e a eficácia da oxigenação, introduzindo variabilidades nos resultados da pesquisa. Essas limitações são justificadas pela natureza complexa do ambiente hipóxico e pelos rigorosos requisitos necessários operacionais e administrativos durante os experimentos.

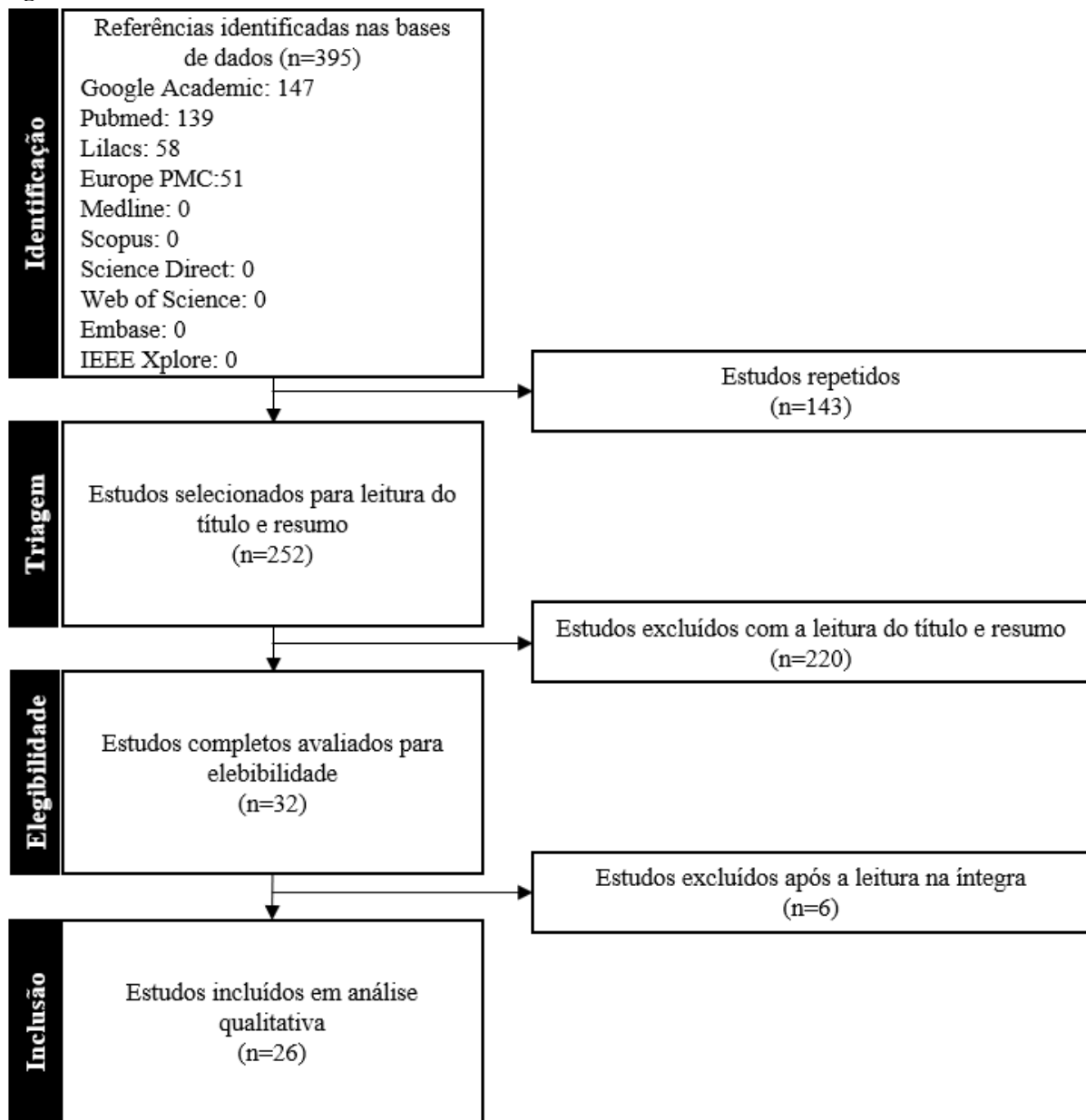
Por fim, a abordagem metodológica descrita acima proporcionou uma análise qualitativa e quantitativa que permitiu atingir o objetivo do estudo de analisar o comportamento da frequência cardíaca (FC) durante as fases do voo simulado em tripulantes da Força Aérea Brasileira (FAB) submetidos a treinamentos em câmara hipobárica.

4 APRESENTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 REVISÃO DE LITERATURA DESCRITIVA

A Figura 8 apresenta os resultados dos estudos observados no fluxo do processo de revisão de literatura descritiva realizado para balizar a primeira etapa, fornecendo o suporte teórico necessário para descrever o comportamento da FC em resposta a diferentes estímulos (OE1) e identificar as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica (OE2).

Figura 8 – Resultados do Processo de Revisão de Literatura Descritiva



Fonte: O autor.

Inicialmente, foram identificadas 395 referências nas bases de dados Google Academic (147), PubMed (139), Lilacs (58) e Europe PMC (51). Após a remoção de 143 estudos repetidos, 252 estudos foram selecionados para leitura dos títulos e resumos. Desses, 220 foram excluídos, resultando em 32 estudos completos avaliados para elegibilidade. Após a leitura na íntegra, mais 6 estudos foram excluídos. Finalmente, 26 estudos foram incluídos na análise qualitativa.

Conforme detalhado no referencial teórico deste estudo, observamos o comportamento da FC em três estados distintos: repouso, hipóxia e recuperação. No estado de repouso, a FC estabelece uma linha de base essencial, refletindo as condições basais do sistema

cardiovascular, o que permite uma avaliação comparativa eficaz das fases subsequentes (Guyton, 2006; Wiyarta, 2022). Durante o estado de hipóxia, verificou-se um aumento significativo da FC, o que indica a ativação do sistema nervoso simpático em resposta à diminuição dos níveis de oxigênio. Este aumento é um reflexo adaptativo que visa manter a oxigenação tecidual frente a condição adversa (Barak, 1999; Toyoda, 2023; Vigo, 2010). No estado de recuperação, a administração de oxigênio suplementar resultou em uma diminuição progressiva da FC, sugerindo uma normalização fisiológica à medida que os níveis de oxigênio se restabelecem (Ma, 2022; Vigo, 2010).

A descrição detalhada da FC em resposta a estes diferentes estímulos, sustentada pela revisão de literatura, demonstra que a resposta autonômica é eficaz e adaptativa. Além disso, a influência de fatores individuais como condicionamento físico e idade, sobre estas respostas sugere áreas promissoras para investigações futuras, que podem levar ao desenvolvimento de estratégias personalizadas de prevenção e recuperação em ambientes hipóxicos.

Com essas análises, o OE1 deste estudo, que visava descrever o comportamento da FC em resposta a diferentes estímulos, foi alcançado.

Conforme também explicado detalhadamente no referencial teórico, as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica incluem repouso, hipóxia e recuperação. Durante a fase de repouso, ocorre a desnitrogenização através da respiração de oxigênio puro ao nível do solo, preparando os tripulantes para a exposição à hipóxia e estabilizando suas condições fisiológicas. Na fase de hipóxia, os tripulantes são expostos a condições simuladas de alta altitude sem máscaras de oxigênio, o que permite a identificação dos sintomas de falta de oxigênio e a avaliação da deterioração cognitiva e motora. Na fase de recuperação, imediatamente após a reintrodução das máscaras de oxigênio, os tripulantes retomam a respiração de oxigênio puro, permitindo uma rápida reversão dos sintomas de hipóxia (Barak, 1999; Ma, 2022; RTO, 1999; Self, 2011; Vigo, 2010).

A identificação dessas fases no voo simulado demonstrou a importância da preparação adequada, da rápida identificação de sintomas durante a hipóxia, e da eficácia da oxigenação na recuperação. Essas informações são valiosas para melhorar os protocolos de treinamento e aumentar a segurança e o desempenho dos tripulantes. Além disso, fornecem dados importantes para a comunidade científica sobre a resposta humana em ambientes extremos e a eficácia da oxigenação suplementar.

Com essas análises, o OE2 deste estudo, que visava identificar as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica, foi alcançado.

4.2 ESTUDO POST HOC

A seguir, serão apresentados os dados do estudo post hoc, realizado para descrever a segunda etapa deste trabalho, cujo objetivo foi comparar o comportamento da FC dos tripulantes da Força Aérea Brasileira (FAB) ao longo das diferentes fases do voo simulado (OE3).

Os dados brutos observados proporcionaram a análise de 23 tripulantes elegíveis, com idade média de 30,81 ($\pm 6,73$) anos. A Tabela 1 registra a FC dos tripulantes nas diferentes fases do voo simulado: FC_{REP}, FC_{HIP} e FC_{REC}, dividida em três subfases: FC_{REC150}, FC_{REC180} e FC_{REC300}. Os valores médios, desvios padrão e medianas para cada fase e subfase estão detalhados na tabela, proporcionando uma visão clara das variações na FC ao longo do estudo.

Tabela 1 – FC em Diferentes Fases e Subfases do Voo Simulado.

Estatística Descritiva	FC _{REP}	FC _{HIP}	FC _{REC}		
			FC _{REC150}	FC _{REC180}	FC _{REC300}
Média	68,20	98,25	80,50	78,96	76,27
Desvio Padrão	7,89	14,45	10,87	10,61	10,10
Mediana	68,40	99,51	80,49	78,64	74,27

Fonte: O autor.

Nota: FC_{REP} – Média da Frequência Cardíaca em Repouso. FC_{HIP} – Média da Frequência Cardíaca em Hipóxia. FC_{REC150} – Média da Frequência Cardíaca ao longo de 150 segundos de Recuperação. FC_{REC180} – Média da Frequência Cardíaca ao longo de 180 segundos de Recuperação. FC_{REC300} – Média da Frequência Cardíaca ao longo de 300 segundos de Recuperação. Média – Soma dos valores dividida pelo número total de valores. Desvio padrão - medida que indica o quanto os valores de um conjunto de dados variam em relação à média desses valores. Mediana – Valor do meio em um conjunto ordenado.

Durante a fase de hipóxia, observou-se que o tempo médio para o aparecimento dos sintomas entre os tripulantes foi de aproximadamente 100,96 ($\pm 27,49$) segundos.

Os dados apresentados revelam variações na FC nas diferentes fases do voo simulado (Vigo *et al.*, 2010). Durante o repouso, a análise dos dados da FC_{REP} dos tripulantes revelou uma média de 68,20 bpm. Este valor indica que os tripulantes mantiveram uma FC dentro da faixa esperada no estado de repouso para adultos saudáveis, que varia entre 50 e 90 bpm (Nanchen, 2018). No contexto do treinamento em câmara hipobárica, a FC_{REP} foi fundamental para estabelecer uma linha de base para a avaliação das respostas cardiovasculares durante a exposição à hipóxia e a subsequente recuperação (Barak, 1999; Vigo, 2010; Yoneda, 2000; Yoneda, 1997).

A variação observada através do desvio padrão de 7,89 bpm na FC_{REP}, 14,45 bpm na FC_{HIP} e 10,87 bpm, 10,61 bpm e 10,10 bpm nas diferentes subfases na FC_{REC} é consistente com

as diferenças interindividuais esperadas. Essas variações podem estar atribuídas a fatores como condicionamento físico, por influenciar a capacidade aeróbica e a eficiência cardiovascular, o que pode resultar em diferentes respostas de FC em situações de hipóxia e recuperação (Lundstrom; Foreman; Blitz, 2023); idade, uma vez que o envelhecimento está associado a mudanças na função autonômica e na capacidade de recuperação cardiovascular (Delorey, 2021) e fatores emocionais, como o estresse e a ansiedade, por poderem modular a resposta autonômica, exacerbando ou atenuando as variações de FC (Segerstrom; Miller, 2004).

A variabilidade das respostas individuais foi significativamente maior durante a fase de hipóxia, como demonstrado pelo desvio padrão na FC_{HIP} de 14,45 bpm, em comparação com 7,89 bpm na FC_{REP} e 10,10 a 10,87 bpm nas FC_{REC} . Este aumento sugere que o tempo prolongado de exposição à hipóxia amplificou o estresse fisiológico e a necessidade de adaptação, uma observação apoiada por estudos que indicam que a duração da hipóxia influencia significativamente a severidade das respostas fisiológicas (Davis, 2008; Oliveira, 2017; Russomano, 2020). No presente estudo, a FC_{HIP} variou entre os tripulantes, demonstrada por um desvio padrão de 27,49 segundos nas durações de exposição, o que resultou em distintos níveis de severidade nas respostas da FC_{HIP} . Este fenômeno contribuiu para fundamentar uma variabilidade individual mais expressiva nas respostas individuais da FC_{HIP} em comparação com a FC_{REP} e a FC_{REC} (Davis, 2008; Russomano, 2020).

O desvio padrão relativamente constante nas três subfases de FC_{REC} (em torno de 10 bpm) sugere que, apesar da variabilidade individual, houve uma tendência geral de recuperação semelhante entre os tripulantes. O treinamento em câmara hipobárica seguiu um protocolo onde as condições de recuperação foram padronizadas, incluindo a administração controlada de oxigênio suplementar (100%). Isso garantiu que, diferente da fase da hipóxia, todos os tripulantes estivessem sob condições semelhantes durante a recuperação, reduzindo a variabilidade nas respostas da FC_{REC} ao longo do tempo, o que fundamenta o desvio padrão constante observado nas subfases de recuperação (Blacker, 2021; Botek, 2015; Botek, 2018; Harshman, 2015; Najmanová, 2019; RTO, 1999).

A seguir, apresentamos os dados comparativos da FC nas múltiplas fases e subfases do treinamento em câmara hipobárica. A Tabela 2 mostra as comparações entre as fases e subfases, incluindo as análises de significância estatística realizadas pelo teste de Kruskal-Wallis seguido pelo pós-teste de Dunn.

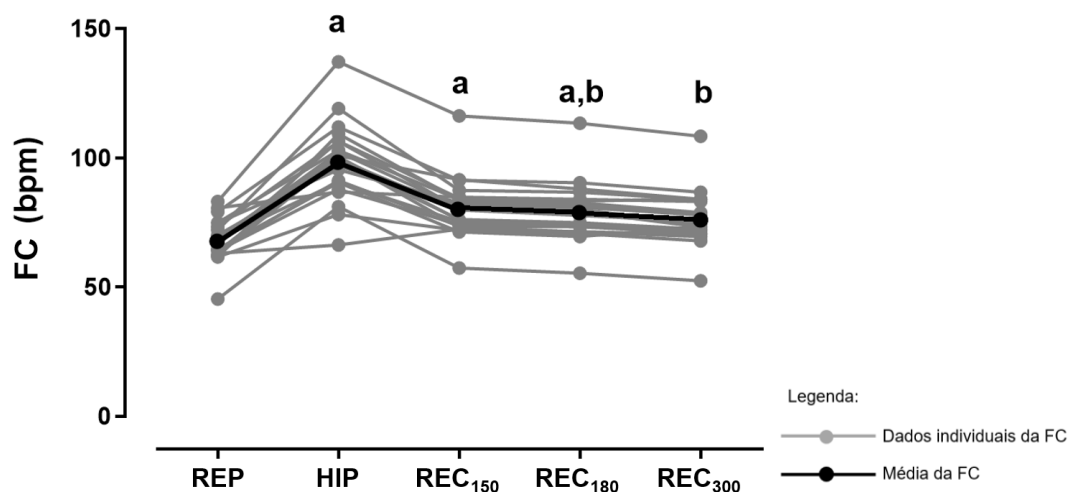
Tabela 2 – Teste e Kruskal-Wallis Seguido pelo Pós-Teste de Dunn para Comparações Múltiplas.

Comparações entre Fases e Subfases	Ranks	Z	Significativo?	Nível de Significância
FC _{REP} vs. FC _{HIP}	89,00	8,299	sim	****
FC _{REC150} vs. FC _{HIP}	21,00	1,958	não	ns
FC _{REC180} vs. FC _{HIP}	44,00	4,103	sim	***
FC _{REC300} vs. FC _{HIP}	61,00	5,688	sim	****
FC _{REC150} vs. FC _{REP}	-68,00	6,341	sim	****
FC _{REC180} vs. FC _{REP}	-45,00	4,196	sim	***
FC _{REC300} vs. FC _{REP}	-28,00	2,611	não	ns

Fonte: O autor.

Nota: FC_{REP} – Média da Frequência Cardíaca em Repouso. FC_{HIP} – Média da Frequência Cardíaca em Hipóxia. FC_{REC150} – Média da Frequência Cardíaca ao longo de 150 segundos de Recuperação. FC_{REC180} – Média da Frequência Cardíaca ao longo de 180 segundos de Recuperação. FC_{REC300} – Média da Frequência Cardíaca ao longo de 300 segundos de Recuperação. ns – não significativo. * - significância marginal: $p < 0,05$. ** - significância moderada: $p < 0,01$. *** - alta significância: $p < 0,001$. **** - muito alta significância: $p < 0,0001$. Ranks - Diferença na soma dos ranks entre dois grupos comparados. Z – Quantidade de desvios padrão que a diferença observada está distante da média esperada sob a hipótese nula.

Ademais, o gráfico na Figura 9 ilustra visualmente essas comparações, onde as linhas claras representam dados individuais dos tripulantes, e a linha escura representa a média, destacando as variações na FC dos tripulantes ao longo das diferentes fases do treinamento na câmara hipobárica.

Figura 9 – Gráfico Comparativo da FC entre Múltiplas Fases e Subfases.

Fonte: O autor.

Nota: FC (bpm)—frequência cardíaca média em batidas por minuto. REP – Repouso. HIP – Hipóxia. REC150 – Recuperação ao longo de 150 segundos. REC180 – Recuperação ao longo de 180 segundos. REC300 – Recuperação ao longo de 300 segundos. ap < 0,0001 vs. REP. bp < 0,0001 vs. HIP.

Os dados comparativos entre as fases e subfases também mostram que houve variações significativas da FC durante as diferentes fases e subfases do voo simulado (Vigo *et al.*, 2010).

4.2.1 FC_{REP} vs. FC_{HIP}

Os dados mostraram que houve um aumento significativo da FC_{HIP} em comparação com a FC_{REP} ($Z=8,299$, $p<0,0001$). A exposição à hipóxia provocou uma resposta fisiológica relevante, mediada pelo sistema nervoso simpático, que resulta em um aumento acentuado da FC (Vigo *et al.*, 2010).

No gráfico da Figura 9, a FC_{HIP} atinge o pico, marcado por “a”, confirmando a significância estatística em relação a FC_{REP}.

O aumento significativo da FC_{HIP} é consistente com as respostas fisiológicas esperadas em condições de hipóxia. Nesta situação, o corpo ativa mecanismos compensatórios para lidar com a baixa disponibilidade de oxigênio (Davi, 2008; Russomano, 2020; Temporal, 2005). A hipóxia desencadeia a liberação de hormônios como a adrenalina, pelo sistema nervoso simpático, resultando em um aumento da FC, conforme observado nos dados. Nesse contexto, a elevação da FC é um indicador sensível das demandas metabólicas aumentadas e do esforço do corpo para manter a homeostase durante a exposição à hipóxia hipobárica, reforçando a importância de monitorar a FC como um indicador importante da resposta do organismo à hipóxia e da eficácia das intervenções aplicadas durante o treinamento em câmara hipobárica (Barak, 1999; Davis, 2008; Ma, 2022; Russomano, 2020; Temporal, 2005; Toyoda, 2023; Vigo, 2010).

4.2.2 FC_{REC} (FC_{REC150}/ FC_{REC180} / FC_{REC300}) vs. FC_{HIP}

Os dados indicam que a FC_{REC} começa a reduzir gradualmente, conforme observado nas subfases FC_{REC150}, FC_{REC180} e FC_{REC300}. Em FC_{REC180} ($Z=4,103$, $p<0,001$) e FC_{REC300} ($Z=5,688$, $p<0,0001$), a FC está significativamente diferente da FC_{HIP}.

No gráfico da figura 9, observa-se que a FC começa a reduzir gradualmente durante as subfases FC_{REC150}, FC_{REC180} e FC_{REC300}. A partir da FC_{REC180}, as diferenças significativas em relação a FC_{HIP} estão presentes, como indicado pela marcação "b".

A redução progressiva da FC_{REC} é consistente com a resposta fisiológica esperada após a remoção do estressor hipóxico. Após a hipóxia, o sistema nervoso simpático, que estava altamente ativado, começa a diminuir sua atividade, enquanto a atividade parassimpática, mediada pelo nervo vago, aumenta, promovendo a redução da FC (Barak, 1999; Guyton, 2006; Ma, 2022). Este processo é essencial para restaurar a homeostase cardiovascular, refletindo a eficácia das intervenções aplicadas, como a oxigenação suplementar, durante a recuperação

(Vigo, 2010; Yoneda, 2000; Yoneda, 1997).

Na prática, nossos achados apontam que a redução da FC_{REC} não foi imediata, necessitando de 180 segundos para que o processo de recuperação fosse significativo em relação à fase de hipóxia. No entanto, esse tempo ainda não foi suficiente para que a FC retornasse aos níveis basais de repouso. A predominância da atividade parassimpática desencadeou um processo de redução da FC de maneira progressiva, refletindo a restauração gradual da homeostase cardiovascular (Blacker, 2021; Botek, 2015; Botek, 2018; Najmanová, 2019; Vigo, 2010).

4.2.3 FC_{REC} (FC_{REC150} / FC_{REC180} / FC_{REC300}) vs. FC_{REP}

Os dados mostraram que, nas subfases da FC_{REC150} e FC_{REC180} , a FC ainda não havia retornado aos níveis da FC_{REP} indicando que o corpo ainda estava em processo de recuperação da hipóxia. A diferença significativa em FC_{REC150} ($Z=6,341$, $p<0,0001$) e FC_{REC180} ($Z=4,196$, $p<0,001$) em relação à FC_{REP} sugere que a recuperação é progressiva, mas ainda incompleta nestas subfases.

Ao longo da recuperação, a diferença entre a FC_{REC300} em relação à FC_{REP} não foi significativa ($Z=2,611$, $p>0,05$), o que indica que, após 300 segundos de recuperação, a FC dos tripulantes estava próxima dos níveis basais, sugerindo que o processo de recuperação cardiovascular estava praticamente completo.

Os achados demonstraram que a redução da FC continuou progressivamente após 180 segundos, atingindo os níveis basais de repouso em 300 segundos, refletindo a ação do controle autônomo até restauração da homeostase cardiovascular durante a recuperação da pós-hipóxia (Blacker, 2021; Ma, 2022; Vigo, 2010; Yoneda, 2000; Yoneda, 1997). Esta continuidade da redução da FC reflete também a eficácia das intervenções aplicadas, como a oxigenação suplementar, na promoção do equilíbrio autônomo e na restauração gradual da homeostase cardiovascular, evidenciando que este processo não é imediato (Blacker, 2021; Botek, 2015; Botek, 2018; Harshman, 2015; Malle, 2016; Najmanová, 2019).

5 CONCLUSÃO

A Força Aérea Brasileira (FAB) empenha-se em manter suas equipagens preparadas para cumprir sua missão constitucional, enfatizando a importância de seus recursos humanos e da segurança operacional, especialmente em atividades aéreas. Este estudo teve como objetivo geral analisar o comportamento da frequência cardíaca (FC) durante as fases do voo simulado

em tripulantes da FAB submetidos a treinamentos em câmara hipobárica.

A estudo foi estruturado em torno de três objetivos específicos. O primeiro objetivo, descrever o comportamento da FC em resposta a diferentes estímulos, foi alcançado através de uma revisão de literatura descritiva ao observar a FC nos estados de repouso, hipóxia e recuperação. No estado de repouso, a FC estabelece uma linha de base essencial, refletindo as condições basais do sistema cardiovascular e servindo como um ponto de partida importante para a avaliação dos estados subsequentes. Durante o estado de hipóxia, há um aumento significativo na FC, evidenciando a ativação do sistema nervoso simpático em resposta à diminuição dos níveis de oxigênio. No estado de recuperação, com a administração de oxigênio suplementar, observa-se uma diminuição progressiva na FC, indicando uma normalização fisiológica à medida que os níveis de oxigênio se restabelecem.

O segundo objetivo específico, identificar as fases do voo simulado em treinamentos de câmara hipobárica, foi alcançado através de uma revisão de literatura descritiva, que observou que os treinamentos podem ser divididos em três fases principais: repouso, hipóxia e recuperação. A fase de repouso é caracterizada por um período de pré-oxigenação com inalação de oxigênio puro (100%) para eliminar o nitrogênio residual e reduzir o risco de Doença Descompressiva. Na fase de hipóxia, a câmara ascende a uma altura predeterminada, e os tripulantes removem suas máscaras para experimentar os sintomas da hipóxia de forma controlada, permitindo o reconhecimento pessoal desses sintomas. Por fim, na fase de recuperação, ocorre a recolocação das máscaras para oxigenação suplementar, revertendo os efeitos da hipóxia e restabelecendo os níveis normais de função fisiológica.

O terceiro objetivo específico, comparar o comportamento da FC ao longo das diferentes fases do voo simulado, foi alcançado através de um estudo post hoc. Este estudo revelou padrões significativos de variação, importantes para entender a resposta fisiológica em condições de hipóxia e recuperação. Durante a fase de repouso, a FC manteve-se estável, proporcionando uma linha de base para as comparações. Na fase de hipóxia, observou-se um aumento significativo na FC, refletindo a ativação intensa do sistema nervoso simpático em resposta à baixa disponibilidade de oxigênio. Durante a fase de recuperação, a FC diminuiu gradualmente, indicando a eficácia das intervenções de oxigenação suplementar. No entanto, a recuperação não foi imediata, levando cerca de 300 segundos para que a FC retornasse aos níveis de repouso.

Apesar das contribuições significativas deste estudo, algumas limitações devem ser reconhecidas. A manutenção da câmara hipobárica no IMAE causou a suspensão temporária dos treinamentos exclusivamente em ambiente hipobárico, limitando a frequência dos testes e levando à necessidade de utilizar dados de 2019 para um estudo post hoc. Esses dados de 2019

podem trazer limitações diretas ao presente estudo, das quais podemos destacar: o tamanho amostral de 23 tripulantes, embora adequado para o contexto deste estudo, pode não permitir a generalização dos resultados; as variações na pressão e a falta de controle dietético dos tripulantes podem ter comprometido a precisão dos dados; e as condições controladas da câmara hipobárica não refletem plenamente a complexidade dos voos reais, limitando a aplicabilidade dos achados em operações diversas. Essas limitações, embora justificadas pela natureza complexa do ambiente hipóxico e pelos rigorosos requisitos operacionais e administrativos, refletem os desafios inerentes à condução de estudos nesta área.

Ao concentrar-se na análise da FC dos tripulantes da Força Aérea Brasileira durante treinamentos em câmara hipobárica, o estudo possibilita o desenvolvimento de protocolos mais eficazes para monitorar e gerenciar as respostas fisiológicas dos tripulantes. A capacidade de monitorar a FC em tempo real durante as operações pode melhorar significativamente a segurança de voo e a eficácia das missões, auxiliando na prevenção de incidentes relacionados à hipóxia e assegurando que os tripulantes estejam em condições ideais para tomadas de decisão críticas.

Uma aplicação prática emergente destes achados é o desenvolvimento de dispositivos móveis, como smartwatches, que monitoram a FC e detectam situações de hipóxia ou recuperação pós-hipóxia em tempo real. Equipados com sensores de alta precisão e algoritmos avançados, esses dispositivos oferecem monitoramento contínuo e feedback imediato, incluindo alertas personalizados essenciais para a segurança de voo e o preparo operacional da FAB. A inclusão dessas tecnologias não apenas facilita a formação de um banco de dados robusto, capturando tendências de longo prazo e variações individuais, mas também melhora a consciência situacional dos tripulantes.

Futuras pesquisas sobre este tema poderiam se concentrar em expandir o tamanho da amostra para validar e expandir estes achados. Estudos adicionais que incluam simulações de voo mais realistas e considerem outros fatores fisiológicos, psicológicos, cognitivos e psicomotores podem enriquecer nosso entendimento das interações complexas durante voos reais. Investigar a eficácia de diferentes protocolos de oxigenação suplementar e diversas altitudes também poderia fornecer insights mais profundos. Além disso, seria benéfico explorar a viabilidade e a eficácia de dispositivos móveis para monitoramento contínuo da FC, visando sua plena integração com o voo real.

Sendo assim, o objetivo geral deste estudo, analisar o comportamento da FC durante as fases do voo simulado em tripulantes da FAB submetidos a treinamentos em câmara hipobárica, foi cumprido. Os dados sugerem que a FC é um indicador sensível das respostas fisiológicas à

hipóxia e à recuperação em comparação ao repouso. O estudo fornece uma base científica robusta para otimizar estratégias preventivas e educacionais no preparo operacional, promovendo a eficiência do desempenho humano e aumentando a segurança de voo durante operações militares. Portanto, pode-se afirmar que o objetivo geral deste estudo foi plenamente alcançado, oferecendo uma fundação sólida para melhorias contínuas na segurança e eficácia das operações aéreas da FAB.

Por fim, os resultados deste estudo podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de ciência, tecnologia e inovação no contexto da segurança e saúde operacional. Investir em pesquisas que aprimorem o entendimento da resposta fisiológica à hipóxia e na criação de tecnologias avançadas de monitoramento e intervenção pode transformar a capacidade da FAB de gerenciar riscos e otimizar o desempenho de seus tripulantes. A integração de ciência e tecnologia nas práticas operacionais fortalece a estratégia de desenvolvimento da FAB, assegurando que os recursos humanos estejam equipados com as melhores ferramentas e conhecimentos para enfrentar desafios futuros com eficiência e segurança.

REFERÊNCIAS

- BAILEY, D. M. Oxygen, evolution and redox signalling in the human brain; quantum in the quotidian. **J Physiol**, v. 597, n. 1, p. 15-28, Jan. 2019.
- BARAK, Y.; DAVID, D.; AKSELROD, S. Autonomic control of the cardiovascular system during acute hypobaric hypoxia, assessed by time-frequency decomposition of the heart rate. **IEEE**, p. 627-630, 1999.
- BLACKER, K. J.; MCHAIL, D. G. Time course of recovery from acute hypoxia exposure as measured by vigilance and event-related potentials. **Physiology & Behavior**, v. 239, p. 113508, 2021.
- BOTEK, M.; KREJČÍ, J.; DE SMET, S.; GÁBA, A.; MCKUNE, A. J. Heart rate variability and arterial oxygen saturation response during extreme normobaric hypoxia. **Autonomic Neuroscience**, v. 190, p. 40-45, 2015.
- BOTEK, M.; KREJČÍ, J.; MCKUNE, A. Sex differences in autonomic cardiac control and oxygen saturation response to short-term normobaric hypoxia and following recovery: Effect of aerobic fitness. **Frontiers in Endocrinology**, v. 9, p. 412441, 2018.
- BRASIL. **ICA 37-650 - Currículo mínimo do estágio de adaptação fisiológica**. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, 2017.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.
- COPPEL, J.; HENNIS, P.; GILBERT-KAWAI, E.; GROCCOTT, M. P. The physiological effects of hypobaric hypoxia versus normobaric hypoxia: a systematic review of crossover trials. **Extrem Physiol Med**, v. 4, p. 2, 2015.
- CURRAN-EVERETT, D.; MILGROM, H. Post-hoc data analysis: benefits and limitations. **Curr Opin Allergy Clin Immunol**, v. 13, n. 3, p. 223-224, Jun. 2013.
- DAVIS, J. R.; JOHNSON, R.; STEPANEK, J. **Fundamentals of aerospace medicine**. 4. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- DELOREY, D. S. Sympathetic vasoconstriction in skeletal muscle: modulatory effects of aging, exercise training, and sex. **Appl Physiol Nutr Metab**, v. 46, n. 12, p. 1437-1447, Dec. 2021.
- GUADAGNO, A. G.; MORGAGNI, F.; VICENZINI, E.; DAVI, L. et al. Cerebral vascular response in airmen exposed to hypobaric hypoxia. **Aviat Space Environ Med**, v. 82, n. 12, p. 1138-1142, Dec. 2011.
- GUYTON, A. C.; HALL, J. E. **Tratado de fisiologia médica**. 12. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2006.
- HARSHMAN, S. W.; GEIER, B. A.; FAN, M.; RINEHARDT, S. et al. The identification of hypoxia biomarkers from exhaled breath under normobaric conditions. **Journal of Breath Research**, v. 9, n. 4, p. 047103, 2015.

HONORATO, F. S.; DEUS, L. A. D.; REIS, A. L.; NEVES, R. V. P. et al. Could Cardiac Autonomic Modulation Be an Objective Method to Identify Hypobaric Hypoxia Symptoms at 25.00 ft among Brazilian military airmen? **Frontiers in Physiology**, p. 2339, 2022.

LEINONEN, A. M.; VARIS, N. O.; KOKKI, H. J.; LEINO, T. K. A New Method for Combined Hyperventilation and Hypoxia Training in a Tactical Fighter Simulator. **Aerosp Med Hum Perform**, v. 93, n. 9, p. 681-687, Sep. 2022.

LUNDSTROM, C. J.; FOREMAN, N. A.; BILTZ, G. Practices and Applications of Heart Rate Variability Monitoring in Endurance Athletes. **Int J Sports Med**, v. 44, n. 1, p. 9-19, Jan. 2023.

MA, C.; XU, H.; YAN, M.; HUANG, J. et al. Longitudinal changes and recovery in heart rate variability of young healthy subjects when exposure to a hypobaric hypoxic environment. **Frontiers in Physiology**, v. 12, p. 688921, 2022.

MALLE, C.; BOURRILHON, C.; QUINETTE, P.; LAISNEY, M. et al. Physiological and Cognitive Effects of Acute Normobaric Hypoxia and Modulations from Oxygen Breathing. **Aerosp Med Hum Perform**, v. 87, n. 1, p. 3-12, Jan. 2016.

MCMORRIS, T.; HALE, B. J.; BARWOOD, M.; COSTELLO, J.; CORBETT, J. Effect of acute hypoxia on cognition: A systematic review and meta-regression analysis. **Neurosci Biobehav Rev**, v. 74, n. Pt A, p. 225-232, Mar. 2017.

NAJMANOVÁ, E.; PLUHÁČEK, F.; BOTEK, M.; KREJČÍ, J.; JAROŠOVÁ, J. Intraocular pressure response to short-term extreme normobaric hypoxia exposure. **Frontiers in Endocrinology**, v. 9, p. 401842, 2019.

NANCHEN, D. Resting heart rate: what is normal? **Heart**, v. 104, n. 13, p. 1048-1049, Jul. 2018.

OLIVEIRA, A. L. M. B.; ROHAN, P. A.; GONÇALVES, T. R.; SOARES, P. P. S. Efeitos da hipóxia na variabilidade da frequência cardíaca em indivíduos saudáveis: uma revisão sistemática. **International Journal of Cardiovascular Sciences**, v. 30, p. 251-261, 2017.

RICE, G. M.; SNIDER, D.; DROLLINGER, S.; GREIL, C. et al. Dry-EEG manifestations of acute and insidious hypoxia during simulated flight. **Aerospace Medicine and Human Performance**, v. 90, n. 2, p. 92-100, 2019.

RTO. **RTO-MP-21 - Aeromedical Aspects of Aircrew Training**. San Diego, CL: Research and Technology Organization, 1999.

RUSSOMANO, T.; CASTRO, J. C. **A fisiologia humana no ambiente aeroespacial**. Rio de Janeiro: InnoSpace Books, 2020.

SEGERSTROM, S. C.; MILLER, G. E. Psychological stress and the human immune system: a meta-analytic study of 30 years of inquiry. **Psychol Bull**, v. 130, n. 4, p. 601-630, Jul. 2004.

SELF, D. A.; MANDELLA, J. G.; PRINZO, O. V.; FORSTER, E. M.; SHAFFSTALL, R. M. Physiological equivalence of normobaric and hypobaric exposures of humans to 25,000 feet

(7620 m). **Aviat Space Environ Med**, v. 82, n. 2, p. 97-103, Feb. 2011.

STANAG, N. **3114. Aeromedical training of flight personnel. AAMedP-1.2, Edition A, version 1**, 2018.

TEMPORAL, W. **Medicina aeroespacial**. In: *Medicina aeroespacial*. Rio de Janeiro: Editora Luzes, 2005. p. 471.

TOYODA, Y.; ZHU, A.; KONG, F.; SHAN, S. et al. Structural basis of α 1A-adrenergic receptor activation and recognition by an extracellular nanobody. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 3655, 2023

VIGO, D. E.; LLORET, S. P.; VIDELA, A. J.; CHADA, D. P. et al. Heart rate nonlinear dynamics during sudden hypoxia at 8230 m simulated altitude. **Wilderness & Environmental Medicine**, v. 21, n. 1, p. 4-10, 2010.

WIYARTA, E.; KARIMA, N. Heart autonomic nervous system: basic science and clinical implications. In: **Autonomic Nervous System-Special Interest Topics**. IntechOpen, 2022..

YONEDA, I.; TOMODA, M.; TOKUMARU, O.; SATO, T.; WATANABE, Y. Time of useful consciousness determination in aircrew members with reference to prior altitude chamber experience and age. **Aviat Space Environ Med**, v. 71, n. 1, p. 72-76, Jan. 2000.

YONEDA, I.; WATANABE, Y. Comparisons of altitude tolerance and hypoxia symptoms between nonsmokers and habitual smokers. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, v. 68, n. 9, p. 807-811, 1997.