

Função pulmonar em pilotos de combate: Quais os efeitos crônicos da exposição?

Pulmonary function of combat pilots: What are the chronic effects of exposure?

Resumo: Os efeitos inerentes ao trabalho em altitudes elevadas e sobrecarga da força de aceleração podem gerar mecanismos de compensação fisiológica e eventuais modificações da função pulmonar em curto, médio e longo prazo. Diante disso, o objetivo deste artigo foi descrever as modificações crônicas da função pulmonar em pilotos de combate da Força Aérea Brasileira (FAB). A amostra constou de 19 pilotos de combate pelo grupo exposto e 20 voluntários pelo grupo controle. Para as medidas de função pulmonar, observamos aumento dos valores médios de Capacidade Vital Forçada (CVF) e Volume Expiratório Forçado no Primeiro Segundo (VEF1), queda do volume pulmonar, aumento na resistência e trabalho respiratório. Já no grupo exposto, em comparação ao grupo controle, observamos modificações significativas para o Volume Residual (VR) pela Capacidade Pulmonar Total (CPT) em litros (L) e porcentagem (%), isto é, VR/CPT. Comportamentos semelhantes quando avaliados conforme as horas de voo, com aumento proporcional à elevação do tempo de exposição. As modificações sutis, consoante as observadas nesta pesquisa, podem ser reflexo de adaptações do sistema respiratório, trazendo um olhar complementar para as mudanças em condições crônicas.

Palavras-chave: piloto; militar; altitude elevada; força de aceleração; função pulmonar.

Abstract: The effects related to work at high altitudes and acceleration force overload can generate physiological compensation mechanisms and eventual short-, medium- and long-term changes in lung function. Therefore, the aim of this article was to describe the chronic changes in lung function in combat pilots of the Brazilian Air Force (FAB). The sample consisted of 19 combat pilots as the exposed group and 20 voluntaries as the control group. For pulmonary function measurements, we observed an increase in the mean values of Forced Vital Capacity (FVC) and Forced Expiratory Volume during the First Second (FEV1), a decrease in lung volume, an increase in resistance and work of breathing. In the exposed group, compared with the control group, we observed significant modifications to the Residual Volume (RV) by the Total Lung Capacity (TLC) in liters (L) and percentage (%), that is, RV/TLC. Similar behaviors when evaluated according to flight hours, with an increase proportional to the increase in exposure time. Discrete changes, in agreement with those observed in this research, may reflect adaptations of the respiratory system, bringing a complementary view to changes in chronic conditions.

Keywords: pilots; military; high altitude; acceleration force; lung function.

Maritza Fabiana Sepulveda Soares 

Força Aérea Brasileira. Universidade da Força Aérea Brasileira.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
mfsepulveda@hotmail.com

Pedro Lopes de Melo 

Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
plopes@uerj.br

Paula Morisco de Sá 

Força Aérea Brasileira. Universidade da Força Aérea Brasileira.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
paulamorisco@hotmail.com

Recebido: 30 ago. 2023

Aprovado: 14 mar. 2023

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833

<http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/index>



Creative Commons
Attribution Licence

1 INTRODUÇÃO

No exercício da atividade aérea, o piloto está exposto aos efeitos adversos do trabalho em altitude elevada. Vibrações extremas, disbarismo, hipóxia, ação das cargas de aceleração (Força G) e outros estressores ambientais são ocorrências frequentes, sobretudo, em voos acima de 15.000 pés (GÜL; SALMANOĞLU, 2012). Nesse segmento aéreo, o uso de oxigênio suplementar se faz necessário, além disso, o ambiente de cabine pode ocorrer com pressurização controlada e os efeitos relativos ao trabalho em altitude podem parecer mais evidentes (ALVES *et al.*, 2008; GÜL; SALMANOĞLU, 2012; PETRASSI *et al.*, 2012).

É descrito na literatura que a redução da pressão do ar com o aumento da altitude leva à hipóxia, denominada também por hipóxia hipobárica (ALVES *et al.*, 2008). A redução da pressão parcial de oxigênio alveolar reduz sua pressão no sangue arterial. Dessa forma, em resposta ventilatória aguda, o corpo trabalha para recuperar a homeostase da concentração de oxigênio, causando hipocapnia e alcalose respiratória (PETRASSI *et al.*, 2012). Essa compensação provoca fadiga dos músculos respiratórios (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019; POLLARD *et al.*, 1997), com possível comprometimento psicomotor em hipobáricos agudos, podendo afetar o controle postural da tripulação, aumentando, portanto, a oscilação postural proporcional conforme aumento da altitude (NORDAHL *et al.*, 1998).

Complementarmente, a tolerância à força de aceleração no contexto aeroespacial é considerada um fator particular e pode apresentar efeitos fisiológicos relacionados ao sistema respiratório, à visão (comumente chamado de *blackout* – completa perda da visão) e ao nível de consciência (com a perda da consciência, conhecido como *Induced Loss of Consciousness*, G-LOC) (RUSSOMANO; CASTRO, 2012).

Além desses, com a sobrecarga da Força G em ação sobre o tórax, pode haver colapso das vias aéreas do terço inferior do pulmão, evoluindo até 50% do pulmão, com a progressão da força de aceleração, gerando conseqüentes mudanças na distribuição do fluxo sanguíneo pulmonar (WEST, 2013). Para uma eficiente troca gasosa, os capilares pulmonares devem ser finos e expostos diretamente ao espaço alveolar. Assim, alterações na pressão ambiente são transmitidas aos capilares alveolares, causando impacto na circulação pulmonar tanto por deformação pulmonar quanto por alterações na distribuição da pressão hidrostática no pulmão (PRISK, 2011).

Junto a isso, fatores biopsicológicos individuais podem ser determinantes para o enfrentamento do combate aéreo. As tropas de aviadores devem ser capazes de lidar com essas condições, seja em situações de rotina, seja em alta carga de trabalho (GINDHART, 1999; GÜL; SALMANOĞLU, 2012; SAUVET *et al.*, 2009). No sujeito aclimatado pode haver menores efeitos deletérios ao corpo, o que torna possível o desenvolvimento do trabalho diário mesmo em altitudes muito elevadas (4400 a 5500 metros), com eficiência próxima ao do sujeito com trabalho ao nível do mar. Contudo, a possibilidade de desenvolvimento de doenças ou adaptações por consequência da exposição contínua devem ser consideradas (ARISTIZABAL *et al.*, 2019; DUISHOBAEV *et al.*, 2018).

Compensações externas podem ser utilizadas na aviação militar de alta performance para reduzir os efeitos deletérios da exposição ao voo. Além do treinamento personalizado e aclimação, pode ocorrer a suplementação de oxigênio entre 70 e 100%, a fim de solucionar os efeitos da hipóxia, podendo ocorrer a partir de 15.000 pés de altitude ou 4.572 metros (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ;

DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019). Medidas de assistência mecânica são utilizadas para manter o retorno venoso adequado. Sendo os trajes anti-G, a pressão positiva de respiração e as manobras anti-G de esforço, tais quais a *AGSM Anti G Strain Manouver* (AGSM), vistos como fundamentais meios para tolerar a aceleração (ÖZTÜRK; İLBASMIŞ; AKIN, 2012).

Com o propósito de estimar índices de avaliação da função pulmonar, estão disponíveis comercialmente alguns instrumentos, entre os quais, espirometria e pletismografia são os mais consagrados (MUNGOGE *et al.*, 2016; SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA, 2009; TRINDADE; SOUSA; ALBUQUERQUE, 2015). Além desses, a Técnica de Oscilações Forçadas (FOT), descrita por DuBois *et al.*, em 1956, destaca-se por ser complementar aos instrumentos tradicionais e ainda apresentar a vantagem de ser um método realizado na ventilação espontânea (OOSTVEEN *et al.*, 2003).

É possível que a análise mais detalhada da função pulmonar em condições de exposição, consoante as descritas anteriormente, possa contribuir para o melhor enfrentamento e aprimoramento da performance humana e da relação homem-máquina nas forças armadas brasileiras, fornecendo parâmetros de avaliação diagnóstica e para acompanhamento longitudinal desses sujeitos.

Assim, os objetivos deste artigo foram: (1) comparar as modificações de função pulmonar entre voluntários do grupo controle e pilotos de combate da Força Aérea Brasileira (FAB); (2) analisar os efeitos do período de exposição ao voo na função pulmonar de pilotos de combate; (3) analisar os efeitos do trabalho em altitudes elevadas considerando as particularidades da exposição com baixa e elevada exposição à carga G.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O protocolo proposto foi realizado no Laboratório de Instrumentação Biomédica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), a partir da aplicação do questionário sociodemográfico e testes de função pulmonar realizados por técnicos devidamente treinados. A sequência de realização dos exames seguiu-se de: FOT na versão multifrequência, espirometria e pletismografia de corpo inteiro.

A amostra foi selecionada por conveniência. Para o grupo de sujeitos expostos foram incluídos voluntários pilotos de caça do Primeiro Grupo de Aviação de Caça (1ºGavCa) e pilotos de Transporte de Esquadrões da Base Aérea de Santa Cruz e Base Aérea do Galeão. Todos encontravam-se aptos para o voo segundo os critérios propostos pela legislação militar vigente – ICA 160-6/2016 (BRASIL, 2016) e identificados para esta pesquisa conforme as abreviações: GCaça e GTransporte, respectivamente. Para o grupo controle, os sujeitos selecionados foram: não aeronavegantes, militares ou não, não sedentários e semelhantes ao grupo de expostos em idade, peso e altura. Para todos os grupos foram submetidos os seguintes critérios de exclusão: infecções respiratórias nos últimos 30 dias, doenças torácicas e tabagismo.

As medidas de fluxos e volumes pulmonares foram feitas pelo pletismógrafo de corpo inteiro BPd (*nSpire Health, Inc., 1830 Lefthand Circle, Longmont, CO 80501*). Os exames seguiram as orientações das diretrizes para os testes de função pulmonar (GRAHAM, 2019; NEDER *et al.*, 1999; PEREIRA; MOREIRA, 2002; SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA, 2009). A FOT foi descrita previamente em detalhes (MELO; WERNECK;

GIANNELLA-NETO, 2000) e segue os padrões internacionais (NAVAJAS e FARRÉ, 2001; OOSTVEEN *et al.*, 2003; SÁ *et al.*, 2013).

Os resultados foram apresentados por meio da média e do desvio padrão, ao passo que um *software* comercial foi utilizado para comparar as diferenças entre grupos (STATISTICA for Windows, release 5.0). Para análise entre dois grupos foi utilizado o teste t independente para amostra com distribuição normal e para não paramétricas, Mann-Whitney. Para comparações entre três grupos foi utilizado Análise de Variância (Anova) seguido de teste de Tukey quando a distribuição apresentou característica paramétrica; e de Kruskal Wallis Anova seguido de Mann Whitney quando a característica foi não paramétrica. Os resultados com $p < 0,05$ foram considerados estatisticamente significantes. Por fim, as análises de correlação foram determinadas pelos coeficientes de correlação de Pearson e/ou Spearman.

3 RESULTADOS

O estudo se deu com 37 voluntários, sendo 18 no GControle e 19 no GPilotos (6 pelo GTransporte; 13 pelo GCaça). A análise a partir dos parâmetros biométricos mostrou distribuição homogênea (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados antropométricos dos voluntários analisados – GControle x GTransporte X GCaça

Parâmetros	GControle N = 18	GTransporte N = 6	GCaça N = 13	P
Idade (anos)	33,27 ± 5,63	30,16 ± 2,31	31,46 ± 1,98	ns*
Peso (kg)	80,22 ± 8,62	82,61 ± 6,19	82,6 ± 8,32	ns*
Altura (cm)	175,16 ± 5,28	178,16 ± 7,67	177,25 ± 5,71	ns*
IMC (kg/m ²)	26,06 ± 2,13	26,60 ± 1,95	26,01 ± 2,14	ns*

Nota: Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey,

**Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. $P < 0,05$. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Na avaliação de função pulmonar a partir da espirometria, na comparação entre os grupos GControle, GTransporte e GCaça, observamos valores médios ligeiramente mais elevados para os parâmetros de Capacidade Vital Forçada (CVF); Volume Expiratório Forçado no Primeiro Segundo (VEF₁); e Fluxo Expiratório Forçado (FEF_{25-75%}) nos grupos de pilotos caça em comparação aos demais grupos, contudo, sem modificações significativas (Tabela 2).

Na Tabela 3, observamos os resultados de função pulmonar a partir dos parâmetros ple-tismográficos, em que Volume Residual (VR); Capacidade Pulmonar Total (CPT) e da VR/CPT apresentaram valores médios mais baixos no grupo de pilotos de caça em comparação com os demais grupos. Com modificações significativas para VR e VR/CPT na análise entre os grupos controle e caça. A resistência, seja medida por meio da pletismografia, seja por meio da FOT (Tabela 4), apresentou valores médios progressivamente mais elevados, com queda proporcional da condutância.

Além disso, vimos também aumento na carga de trabalho ventilatório medido por intermédio do Z4Hz, ainda que sem alterações estatisticamente significativas.

Tabela 2 – Medidas espirométricas dos grupos estudados – GControle x GTransporte x GCaça

Parâmetros	GControle	GTransporte	GCaça	p
CVF L	4,97 ± 0,22	5,11 ± 0,34	5,47 ± 0,61	ns*
CVF %	98,39 ± 7,24	96,46 ± 7,35	102,52 ± 7,44	ns*
VEF ₁ L	3,97 ± 0,49	4,36 ± 0,47	4,32 ± 0,55	ns*
VEF ₁ %	95,59 ± 10,70	98,76 ± 8,10	97,91 ± 9,55	ns*
VEF ₁ /CVF L	80,8 ± 5,87	85,48 ± 8,72	79,11 ± 5,39	ns*
VEF ₁ /CVF%	96,95 ± 7,37	102,46 ± 10,70	95,23 ± 6,70	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ % L	4,02 ± 1,20	4,69 ± 25,47	4,1 ± 0,97	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ %	86,84 ± 23,99	95,07 ± 25,47	85,96 ± 20,25	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ /CVF L	0,82 ± 0,24	0,92 ± 0,27	0,75 ± 0,17	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ /CVF %	88,27 ± 23,58	99,85 ± 31,30	84,17 ± 20,94	ns*

Legenda: CVF – Capacidade Vital Forçada; VEF₁ – Volume Expiratório Forçado no Primeiro Segundo; FEF – Fluxo Expiratório Forçado. Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey,

**Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Tabela 3 – Medidas de pletismografia dos grupos estudados – GControle x GTransporte x GCaça

Parâmetros	GControle (0)	GTransporte (1)	GCaça (2)	p
VR L	2,63 ± 0,98	1,91 ± 1,05	1,79 ± 0,82	ns*
VR %	147,3 ± 53,36	105,46 ± 61,81	100,16 ± 46,101	0-2*
CPT L	7,49 ± 1,29	6,65 ± 0,88	7,23 ± 0,99	ns*
CPT %	110,25 ± 15,79	93,46 ± 13,65	100,71 ± 12,55	ns**
VR/CPT L	33,96 ± 9,28	27,57 ± 11,42	24,2 ± 9,05	0-2*
VR/CPT %	130,2 ± 37,08	108,56 ± 46,75	93,96 ± 35,64	0-2*
Raw L	2,54 ± 1,25	2,61 ± 1,93	3,08 ± 1,27	ns*
Raw %	186,7 ± 94,28	190,4 ± 132,30	229,63 ± 93,70	ns*
Sgaw L	0,15 ± 0,08	0,14 ± 0,05	0,1 ± 0,03	ns**
Sgaw %	68,33 ± 39,30	64,05 ± 26,98	46,89 ± 14,81	ns**

Legenda: VR – Volume Residual; CPT – Capacidade Pulmonar Total; Raw, Resistência do sistema respiratório; Sgaw, Condutância do sistema respiratório. Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey. **Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Tabela 4 – Medidas de FOT dos grupos estudados – GControle x GTransporte x GCaça

Parâmetros	GControle (0)	GTransporte (1)	GCaça (2)	p
fr	12,80 ± 3,62	10,69 ± 2,91	11,13 ± 3,43	ns**
Xm	0,38 ± 0,33	0,53 ± 0,31	0,54 ± 0,36	ns*
R0	2,86 ± 0,74	2,33 ± 0,75	3,08 ± 0,82	ns*
S	2,83 ± 16,73	3,23 ± 18,41	10,44 ± 16,59	ns**
Rm	2,89 ± 0,77	2,37 ± 0,64	3,18 ± 0,81	ns*
Cdyn	0,02 ± 0,00549	0,025 ± 0,009	0,02 ± 0,005	ns*
Z4Hz	3,57 ± 0,99	2,93 ± 1,10	3,72 ± 0,98	ns*

Legenda: fr, Frequência de Ressonância; Xm, Reatância Média; R0, Resistência Total do Sistema Respiratório; S, Coeficiente de Inclinação da Curva de Resistência; Rm, Resistência média; Cdyn, Complacência Dinâmica do sistema Respiratório; Z4Hz, Módulo da Impedância do Sistema Respiratório. Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Buscando esclarecer se as modificações encontradas teriam relação com a exposição à carga G isoladamente ou com o tempo de exposição a altitude, analisamos os sujeitos a partir de subgrupos de horas de voo. Para tal caracterização, a amostra perdeu homogeneidade para os parâmetros antropométricos, com modificação significativa para a idade (Tabela 5). Ademais, identificamos correlação inversa significativa na comparação entre horas de voo e os parâmetros espirométricos VEF₁/CVF e FEF_{25-75%} em seus valores absolutos (Tabela 6). Para as correlações entre os parâmetros de pletismografia e FOT não houve modificações significativas.

Tabela 5 – Dados antropométricos a partir da caracterização por horas de voo

Parâmetros	GControle (N = 18) (0)	GPilotos			P
		Até 1000 h (N = 4) (1)	1000 a 1500 h (N = 10) (2)	> de 1500 h (N = 5) (3)	
Idade (anos)	33,27 ± 5,63	28,75 ± 0,5	30,77 ± 1,56	33 ± 1,78	1-2, 1-3, 2-3**
Peso (kg)	80,22 ± 8,62	80 ± 5,58	85,96 ± 7,10	79,31 ± 8,14	ns*
Altura (cm)	175,16 ± 5,28	178 ± 9,20	178,36 ± 5,46	176 ± 5,93	ns*
IMC (kg/m ²)	26,06 ± 2,13	25,94 ± 2,13	26,98 ± 1,40	25,2 ± 2,62	ns*

Nota: Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey. **Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Nas Tabelas 7, 8 e 9, observamos o comportamento da função pulmonar com a progressão do tempo de exposição à atividade aérea diante dos resultados dos parâmetros espirométricos, pletismográficos e da FOT, respectivamente.

De modo geral, observamos ligeiro incremento nos valores médios de CVF em litros (L) e em porcentagem (%) e VEF₁ (L e %) com a progressão das horas de voo. Incremento dos valores médios de VEF₁/CVF (L e %), FEF_{25-75%} (L e %), FEF/CVF (L e %) na comparação entre o GControle e sujeitos com até 1000 horas de voo, com decréscimo posterior nos sujeitos com 1000 a 1500, bem como naqueles com mais de 1500 horas de voo. Contudo, mantendo valores dentro dos limites de normalidade. Os parâmetros pletismográficos VR, CPT e VR/CPT (L e %) apresentaram decréscimo na comparação do GControle com o GPilotos, conforme a progressão da exposição em horas de voo. A resistência aumentou progressivamente em comparação ao GControle, com ligeiro decréscimo na condutância observado apenas nos grupos com mais de 1000 horas de voo. O aumento do trabalho respiratório foi visto na comparação entre o GControle e Pilotos, com incremento dos valores médios conforme a progressão da exposição em horas de voo.

Tabela 6 – Correlação entre horas de voo e parâmetros espirométricos

Horas de voo	CVF L	VEF ₁	VEF/CVF	FEF _{25-75%}	FEF/CVF
R	,042	-,318	-,498	-,468	-,476
p	,865*	,184*	,030*	,044*	,039*

Nota: Resultados apresentados em correlação. P < 0,05 foi considerado significativo.

* Correlação de Pearson, **correlação de Sperman.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Tabela 7 – Resultados espirométricos diante da caracterização por horas de voo

Parâmetros	G Controle	GPilotos			P
	(N = 18) (0)	Até 1000 h (N = 4) (1)	1000 a 1500 h (N = 10) (2)	> de 1500 h (N = 5) (3)	
CVF L	4,97 ± 0,22	5,08 ± 0,21	5,46 ± 0,62	5,37 ± 0,62	ns*
CVF %	98,39 ± 7,24	95,95 ± 8,58	102,08 ± 8,25	101,4 ± 5,91	ns*
VEF ₁ L	3,97 ± 0,49	4,53 ± 0,47	4,32 ± 0,57	4,21 ± 0,49	ns*
VEF ₁ %	95,59 ± 10,70	102,07 ± 7,85	97,47 ± 9,93	96,5 ± 8,28	ns*
VEF ₁ /CVF L	80,8 ± 5,87	89,20 ± 8,17	79,12 ± 5,22	78,67 ± 5,45	ns*
VEF ₁ /CVF %	96,95 ± 7,37	106,45 ± 11,17	95,25 ± 6,63	94,9 ± 6,17	ns*
FEF _{25-75%} % L	4,02 ± 1,20	5,275 ± 1,34	4,095 ± 0,97	3,89 ± 0,92	ns*
FEF _{25-75%} %	86,84 ± 23,99	104,25 ± 27,24	84,78 ± 19,99	84,64 ± 19,21	ns*
FEF _{25-75%} /CVF L	0,82 ± 0,24	1,03 ± 0,25	0,75 ± 0,16	0,73 ± 0,18	ns*
FEF _{25-75%} /CVF %	88,27 ± 23,58	110,32 ± 34,26	83,36 ± 20,78	83,7 ± 19,29	ns*

Legenda: CVF, Capacidade Vital Forçada; VEF₁, Volume Expiratório Forçado no Primeiro Segundo; FEF, Fluxo Expiratório Forçado. Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey,

**Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Tabela 8 – Resultados pletismográficos diante da caracterização por horas de voo

Parâmetros	G Controle	GPilotos			P
	(N = 18) (0)	Até 1000 h (N = 4) (1)	1000 a 1500 h (N = 10) (2)	> de 1500 h (N = 5) (3)	
VR L	2,63 ± 0,98	2,23 ± 1,19	1,76 ± 0,67	1,6 ± 1,07	ns*
VR %	147,39 ± 53,36	124,77 ± 69, 20	97,94 ± 33,82	91,3 ± 65,66	ns*
CPT L	7,49 ± 1,29	6,85 ± 1, 06	7,2 ± 0,98	6,91 ± 1,07	ns*
CPT %	110,25 ± 15,79	96,75 ± 16,31	99,71 ± 10,17	97,2 ± 17,84	ns**
VR/CPT L	33,96 ± 9,28	31,26 ± 12, 54	24,22 ± 7,13	22,57 ± 11,84	0-2, 0-3**
VR/CPT %	130,22 ± 37,08	124,47 ± 50, 38	93,88 ± 28,04	87,24 ± 46,95	0-2, 0-3**
Raw L	2,54 ± 1,25	2,60 ± 2, 32	3,01 ± 1,31	3,06 ± 1,32	ns*
Raw %	186,78 ± 94,28	183,65 ± 151, 24	223,92 ± 93,06	230,76 ± 108,12	ns*
Sgaw L	0,15 ± 0,08	0,15 ± 0,06	0,10 ± 0,03	0,10 ± 0,03	ns**
Sgaw %	68,33 ± 39,30	70,12 ± 31,34	46,86 ± 14,38	48,96 ± 16,08	ns**

Legenda: VR, Volume Residual; CPT, Capacidade Pulmonar Total; Raw, Resistência do sistema respiratório; Sgaw, Condutância do sistema respiratório. Resultados apresentados como média ± desvio padrão.

*Anova/teste de Tukey. **Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

Tabela 9 – Resultados de FOT diante da caracterização por horas de voo

Parâmetros	G Controle (0)	Até 1000 h (1)	1000 a 1500 h (2)	> de 1500 h (3)	P
fr	12,80 ± 3, 62	10,32 ± 2,48	11,45 ± 3, 96	10,74 ± 2,70	ns**
Xm	0,38 ± 0,33	0,56 ± 0,24	0,45 ± 0,36	0,65 ± 0,37	ns*
R0	2,86 ± 0,74	2,18 ± 0,92	2,98 ± 0, 76	2,96 ± 0,68	ns*
S	2,83 ± 16,73	0,97 ± 22, 70	11,57 ± 17,57	7,84 ± 13,29	ns**
Rm	2,89 ± 0,77	2,19 ± 0,75	3,09 ± 0,75	3,05 ± 0,61	ns*
Cdyn	0,02 ± 0,00549	0,029 ± 0,009	0,02 ± 0,003	0,01 ± 0007	ns*
Z4Hz	3,57 ± 0,99	2,75 ± 1, 12	3,62 ± 0,87	3,73 ± 1,23	ns*

Legenda: fr, Frequência de Ressonância; Xm, Reatância Média; R0, Resistência Total do Sistema Respiratório; S, Coeficiente de Inclinação da Curva de Resistência; Rm, Resistência média; Cdyn, Complacência Dinâmica do sistema Respiratório; Z4Hz, Módulo da Impedância do Sistema Respiratório. Resultados apresentados como média ± desvio padrão. *Anova/teste de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/e Mann Whitney. P < 0,05. Ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelos autores, Soares *et al.* (2022).

4 DISCUSSÃO

Iniciaremos a discussão considerando o primeiro e segundo objetivo deste artigo, em que buscamos comparar as modificações de função pulmonar entre voluntários do GControle e GPilotos e analisar a exposição ao voo em suas diferentes esferas, sendo o piloto de transporte, com baixa exposição à carga G, e o piloto de caça com elevada exposição.

Inicialmente, acreditávamos que a exposição do sistema respiratório a todos os efeitos indesejáveis da aviação poderia desencadear algum processo de dano pulmonar. Entretanto, isso não foi identificado neste estudo.

Apesar dos resultados não significativos, é preciso considerar que todos os sujeitos analisados são saudáveis e praticantes de atividade regular, sendo a aptidão física para o voo regulada pela ICA 54-1 (BRASIL, 2011) e inerente à prontidão militar. Com essas características, nossos resultados mostraram parâmetros com ponto de corte previsto para um comportamento de função pulmonar dentro dos limites de normalidade, conforme descrito na literatura (GRAHAM, 2002; NEDER *et al.*, 1999; SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E FISIOLOGIA, 2009).

Na amostra estudada, não foi monitorada a especificidade de treinamento físico. A aptidão para o trabalho foi baseada nas normas previamente dispostas para o serviço militar (BRASIL, 2011). Contudo, Bateman *et al.* (2006) relatam em artigo de revisão, que os efeitos do treinamento de força muscular, aptidão aeróbica e resistência à fadiga sobre a tolerância à força G ainda são um assunto complexo a ser discutido e sem resultados evidentes. Análises prévias descrevem que nem o treinamento aeróbico pode ser considerado sempre prejudicial, nem o treinamento de força pode ser considerado universalmente eficaz para melhorar a tolerância à força G (BULBULIAN, 1986). Para o sistema respiratório, há melhora na capacidade pulmonar e nas taxas de consumo de oxigênio por intermédio do aumento da rede vascular pulmonar com a prática de atividade física regular (MCKENZIE, 2012).

Modificações sutis como as observadas nesta pesquisa, com ligeiro incremento progressivo da função pulmonar na comparação entre GControle, GTransporte e GCaça, expressados com ajuda de parâmetros espirométricos, podem ser um reflexo de adaptações do sistema respiratório a exposição em pequenas doses e ao longo de muitos anos de trabalho e, portanto, devem ser consideradas. A redução do VR para as mesmas comparações pode estar associada ao aumento da CVF, otimizando o volume de ar disponível para as trocas ventilatórias. Apesar disso, os valores médios de CPT também reduziram, sendo um contraponto para essa analogia.

Contrariando nossos resultados, outros autores analisaram função pulmonar em atletas de diferentes modalidades e observaram volumes pulmonares estáticos maiores e maior capacidade de difusão pulmonar em nadadores de elite, quando comparados a atletas corredores. Esses autores creditaram seus achados a possíveis diferenças de idade entre os controles combinados além de características genéticas, sugerindo mais estudos para esclarecimentos (CORDAIN; STAGER, 1988).

As semelhanças entre a atividade aérea e a prática de natação vão de encontro a combinação dos gestos laborais, visto que o nadador combina períodos de imersão em água, exercícios e apneia, com evidências de mudanças sutis na permeabilidade dos pulmões (DROBNIC *et al.*, 2018). Para tais atletas de natação de alto rendimento, o treinamento físico em altitudes elevadas é frequentemente utilizado como forma de incremento as adaptações fisiológicas e, conseqüentemente, melhora da performance à atividade (LUNDBY; ROBACH, 2016; RODRÍGUEZ *et al.*, 2015). Essas reflexões,

no limite, trazem a luz a compreensão de que a exposição a altitudes elevadas pode funcionar como fator modificador da performance pulmonar ainda que na presença de adequado condicionamento físico, ou seja, análises alinhadas com os resultados apresentados em nosso estudo, uma vez que o GControle e GPilotos diferem apenas no critério de exposição ao voo, sendo a aptidão física comum a ambos.

Não há relatos na literatura sobre as adaptações tardias do sistema respiratório na exposição às altitudes elevadas e sobrecarga à força G em pilotos de combate. Já em atletas de alto rendimento, as adaptações previamente documentadas consideram a resposta pulmonar ao exercício de alcance muito maior que o sistema cardiovascular ou muscular periférico (WARBURTON, SHEEL; MCKENZIE, 2008). É possível que em condições de aclimação ao trabalho em altitudes elevadas e sobrecarga G o resultado seja semelhante.

Em estudos com atletas de elite, a ventilação por minuto pode aumentar cerca de 20 vezes em comparação com os valores de repouso, mostrando que o pulmão tem habilidade para lidar com as demandas de trabalho pesado (WARBURTON; SHEEL; MCKENZIE, 2008), ainda que sofra as consequências relativas à tal feito.

Todavia, no ambiente laboral aéreo não coexiste apenas conotações de glória, é visto na literatura que o voo em ambientes de elevada carga G impõe forte desgaste cardiometabólico ao organismo (TESCH, HJORT; BALLDIN, 1983).

Bustamante-Sánchez; Delgado-Terán; Clemente-Suárez (2019) realizaram um estudo com 23 aeronavegantes do sexo masculino em câmara hipobárica, incluindo medidas pré e pós exposição, sendo a amostra composta por: sete tripulantes da aviação de transporte, três pilotos de transporte, dez pilotos de helicóptero e três pilotos de Caça F-18, todos da Força Aérea Espanhola. Os autores relatam que exposição à hipóxia produziu aumento na percepção de estresse e esforço, assim como diminuição da função dos músculos respiratórios independentemente do grupo da tripulação, sendo mais afetada negativamente em pilotos de transporte do que em pilotos de helicóptero e tripulação aérea de transporte (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019). Uma vez que o piloto de Caça é levado a experimentar momentos de baixa de oxigênio, tal qual exercício de atividade aérea rotineira, possivelmente, estabelecem-se condições de aclimação, o que provoca uma melhor resposta fisiológica quando o piloto for exposto a isso novamente.

Nesse mesmo estudo de Bustamante-Sánchez; Delgado-Terán; Clemente-Suárez (2018), VEF₁ e PFE se apresentaram reduzidos na população estudada, sendo essa queda significativa para pilotos de helicóptero no PFE e para tripulantes de transporte no PFE e no VEF₁, sugerindo que estes podem ser associados a sintoma de fadiga dos músculos respiratórios após exposição hipóxica (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019; POLLARD *et al.*, 1997). Comparando os grupos, os pilotos de transporte apresentaram valores significativamente menores de VEF₁ nos pós-testes. Para o grupo de pilotos de caça, a CVF aumentou e VEF₁ e PFE reduziram, porém com mudanças não significativas para o pré e pós teste. Os autores associam o resultado ao diferente perfil de treinamento físico e preparação técnica dessas populações (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019).

Alinhavado com esses autores, Beer *et al.* (2017) observaram uma redução significativa dos valores médios de fluxos e capacidades pulmonares medidos com ajuda da espirometria em dez pilotos de caça da Força Aérea Americana em condições de confinamento e altas cargas de suplementação de oxigênio. As medidas foram feitas em pré-voo e pós-teste com 12 horas de término do voo.

Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez (2019) avaliaram a resposta psicofisiológica em 29 pilotos de caça da Força Aérea Espanhola em condições de exercício de combate e defesa aérea com duração aproximada de 30 minutos cada. As manobras de combate foram realizadas com altitude entre 8.000 e 18.000 pés (com suplementação de oxigênio) e com força G entre 0,5 e 5,9. As medidas de espirometria foram feitas duas horas antes e 30 minutos após os voos. Os resultados apresentados pelos autores mostraram ligeira redução da CVF e aumento do VEF₁ e PFE, sem modificações significativas, na condição de exercício de ataque. Resultado semelhante foi visto para o exercício de defesa, porém com modificação significativa para CVF (HORMEÑO-HOLGADO; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019).

A redução dos fluxos e volumes pulmonares em situações agudas como as narradas pelos estudos anteriormente citados, em condições de avaliação imediatas pós voo, são plausíveis as condições de fadiga dos músculos respiratórios. Öztürk; Ilbasmiş; Akin (2012) descrevem que as evidências de fadiga dos músculos respiratórios podem estar associadas às manobras musculares vigorosas realizadas durante todo o voo, com intuito de prover assistência mecânica para minimizar o efeito de distorção torácica, assim como, manter o retorno venoso adequado (ÖZTÜRK; İLBASMIŞ; AKIN, 2012). Contudo, em situações crônicas, tais quais as avaliadas nesta pesquisa, a exposição em baixas doses e a longo prazo parece desencadear incremento na performance respiratória.

É fato que a força e a resistência dos músculos respiratórios melhoram com o treinamento de forma semelhante ao músculo esquelético periférico, todavia as alterações celulares em humanos (WARBURTON; SHEEL; MCKENZIE, 2008) – ou ainda o impacto dessa resposta na função pulmonar de pilotos de combate – ainda não é documentado.

É admissível que a contínua exposição a deformações torácicas, alterações vasculares pulmonares, fechamentos de vias aéreas, além de outras repercussões peculiares ao ambiente da aviação de combate, leve a reprodução de adaptações de tecido, via aérea e parênquima pulmonar. Esses fatos foram observados nesta pesquisa por meio do aumento dos valores médios da resistência do sistema respiratório medidos com ajuda da pletismografia, assim como pela FOT, seja para comparação entre GControle e GPilotos, seja para o aumento médio progressivo nos grupos Controle, Transporte e Caça, conforme proporcional decréscimo da condutância, fornecendo uma medida de transferência de gás pulmonar.

Adicionalmente, a Xm medida por intermédio da FOT reflete as alterações de homogeneidade pulmonar a partir das características elásticas do sistema (MELO; WERNECK; GIANNELLA-NETO, 2000; OOSTVEEN *et al.*, 2003), e valores médios mais positivos foram observados nesta pesquisa tanto na análise entre os grupos Controle e Pilotos, como na comparação GControle, GTransporte e GCaça. Apesar do aumento da resistência e queda da condutância, uma possível melhora da elasticidade pulmonar pode ser associada ao ganho muscular a longo prazo, com melhor variação de pressão e assim melhor aproveitamento ventilatório.

Embora os efeitos descritos em estudos anteriores com pilotos de combate tenham sido observados em condições agudas e com número reduzido de sujeitos, é possível inferir que a singularidade de cada perfil de aviação possa criar diferentes padrões de respostas fisiológicas.

Somando a isso, nosso estudo destaca as modificações tardias da exposição aos efeitos deletérios da aviação, trazendo olhar complementar para o comportamento do sistema respiratório em condições crônicas. Considerando que é da rotina do caçador a utilização de manobras de proteção anti-G e contra os efeitos de G-LOC, ao longo da jornada ocupacional de voo (ÖZTÜRK; İLBASMIŞ; AKIN, 2012), seria relevante associar a melhora da função pulmonar observada pelo nosso estudo no GCaça em comparação com os demais grupos a essa especificidade.

É visto que, indivíduos saudáveis, que vivem nessas regiões de altitude elevada, apresentam função pulmonar ligeiramente melhor que sujeitos que vivem em altitudes mais baixas ou nível do mar (ARISTIZABAL *et al.*, 2019; DUISHOBAEV *et al.*, 2018).

Buscando esclarecer se as modificações encontradas teriam relação com o tempo de exposição a altitude ou a exposição à carga G isoladamente, analisamos os sujeitos a partir de subgrupos de horas de voo, sendo esse o nosso terceiro objetivo.

A alteração da homogeneidade da amostra a partir dos parâmetros antropométricos, com diferença significativa na idade dos subgrupos analisados, era esperada visto que os sujeitos recém ingressados na FAB ainda não tiveram oportunidade de vivenciarem maiores momentos de exposição ao voo. Contudo, o grupo com maior tempo de voo apresenta média de idade equivalente à do grupo controle.

A correlação inversa entre horas de voo e os parâmetros VEF_1/CVF e $FEF_{25-75\%}$ pode esclarecer a possível ocorrência de disfunção das pequenas vias aéreas com o aumento da exposição ao voo. Esses resultados podem ser reflexo de áreas de aprisionamento e limitação de fluxo expiratório (AZEVEDO; SANTOS, 2018), podendo ser associados às modificações da trama vascular pulmonar. Resultados alinhados com o comportamento de valores médios mais elevados de resistência e decréscimo da condutância do sistema respiratório, também observados neste artigo. Entretanto, parâmetros como VR/CPT (L e %) apresentaram valores decrescentes, contrariando esses achados (AZEVEDO; SANTOS, 2018). Dessa forma, é plausível que estejamos diante de modificações iniciais e que nem todos os marcadores de disfunção estejam alterados.

Para esta amostra, a exposição ao trabalho em altitudes elevadas, a partir da caracterização pelo acumulado de horas de voo, parece trazer mais efeitos danosos ao sistema respiratório nos pilotos de combate analisados. Sendo a ocorrência independente da presença de sobrecarga G.

A literatura é carente de artigos que descrevem as modificações de função pulmonar em populações semelhantes à analisada neste estudo. Existem relatos anteriores em populações que residem em ambientes de altitude elevada, considerando os efeitos temporários ou ainda a aclimação a longo prazo (TALAMINOS-BARROSO *et al.*, 2020). A adaptação vai ao encontro das mudanças nos mecanismos de controle respiratório (WEITZ; GARRUTO; CHIN, 2016), adaptações genéticas que são transferidas por gerações, como, desenvolvimento de maiores volumes pulmonares; alterações nos gradientes arterio-alveolares de oxigênio; e aumento do fluxo sanguíneo da artéria uterina durante a gravidez, sugerindo, portanto, uma melhor eficiência no transporte e consumo de oxigênio (TALAMINOS-BARROSO *et al.*, 2020). O aumento no VR também é relatado e justificado pelo aprimoramento da área alveolar e aumento moderado do número de

hemácias (FRISANCHO, 2013). Contudo, neste estudo observamos redução dos valores médios de VR com a progressão da exposição ao voo.

As alterações que ocorrem no sistema respiratório de sujeitos que vivem em regiões de altitude elevada visam melhorar a eficiência do consumo e transporte de oxigênio, mas essas parecem seguir diferentes vias de adaptação entre os povos (EICHSTAEDT *et al.*, 2014; LORENZO *et al.*, 2014).

Assim sendo, é possível inferir que há um somatório de ações que influenciam as adaptações do sistema respiratório dos pilotos de combate diante das atividades aéreas que eles exercem, desde fatores particulares, como, a exposição à altitudes elevadas até as demandas pertinentes à sobrecarga de Força G.

Certamente, mais estudos são necessários para esclarecer as modificações crônicas de função pulmonar na população de pilotos de combate, bem como se essas modificações permanecem a partir do término da exposição.

5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

No período das coletas de dados, os voluntários que se candidataram para este estudo sofreram remanejamento para outras bases do Brasil, tendo em vista a reforma na pista de voo da Base Aérea de Santa Cruz, no Rio de Janeiro, de onde eram provenientes grande parte dos pilotos desta amostra. Posteriormente a isso, em vias de retomada do fluxo de coleta, houve o início do *lockdown* por conta da pandemia da covid-19, permanecendo assim por quase dois anos. Esses fatos comprometeram as coletas de dados com esses indivíduos, levando a um reduzido número de sujeitos por grupo.

Complementarmente, é necessário sinalizar a complexidade de agendamento e escala de coleta para esse grupo de profissionais, uma vez que eles pertencem a um grupo de elite de aviadores entre os demais militares da FAB e, portanto, apresentam agenda assoberbada de compromissos e missões inerentes a essa função

A possível caracterização da prática de atividade física realizada como rotina por cada sujeito da amostra poderia fornecer maiores esclarecimentos acerca dos resultados, todavia, não foi objeto de estudo desta pesquisa.

Estudos futuros devem levar em conta essas questões e ainda a possibilidade de reavaliar esses grupos em situações de início, meio e fim de carreira militar, tal qual, pilotos de combate, com a possibilidade de trazer à tona informações complementares de análise.

6 CONCLUSÃO

Observamos um ligeiro incremento da função pulmonar de pilotos de transporte e caça na comparação com o grupo controle. Para esta análise, não foram observadas modificações indicativas de anormalidades ou distúrbios obstrutivos e restritivos.

Ao que se refere ao período de exposição em voo, notamos um ligeiro incremento da função pulmonar conforme a progressão da exposição, com possível dano inicial nas pequenas vias aéreas. No entanto, mantendo os parâmetros dentro dos limites de normalidade.

A exposição ao trabalho em altitudes elevadas a longo prazo parece trazer mais efeitos danosos ao sistema respiratório que a presença de sobrecarga G.

Este estudo destaca a necessidade de compreender melhor as modificações pulmonares crônicas em pilotos de combate, uma vez que não existem relatos na literatura sobre tais aspectos. Com efeito, a melhor elucidação das lacunas do respectivo conhecimento poderá fornecer estratégias de aprimoramento da performance humana e da relação homem-máquina.

Como perspectiva futura, apresentamos a proposta de investigação da exposição ao voo, analisando o aviador desde a escola até os níveis de formação mais avançados. Essa estratégia poderia fornecer dados relevantes para compreensão do comportamento pulmonar a longo prazo e complementar os resultados descritos nesta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio dos pilotos voluntários, assim como de seus comandantes, que não mediram esforços para o adequado desenvolvimento desta pesquisa.

AUTORIA E COLABORAÇÕES

Todos os autores participaram de modo equivalente na elaboração do artigo.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. F. A.; RIBEIRO, A. S. de A.; BRANDÃO, L. M.; TEIXEIRA, R. DE A.; BISOL, T. Avaliação dos efeitos da altitude sobre a visão. **Revista Brasileira de Oftalmologia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 5, p. 250–254, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbof/a/HdF64FQdndd3WSBH9SBkmGn/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

ARISTIZABAL-DUQUE, R.; CASTIBLANCO, E.; RODRIGUEZ, I.; SOSSA-BRICEÑO, M. P.; RODRIGUEZ-MARTINEZ, C. E. Reference values for spirometric parameters in healthy children living in a Colombian city located at 2640 m altitude. **Pediatric Pulmonology**, Bethesda, v. 54, n. 6, p. 886–893, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30957980/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

AZEVEDO, K. R. S.; SANTOS, M. I. V. Medidas dos volumes pulmonares e estratégias de interpretação. **Pulmão RJ**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 33-38, 2018. Disponível em: http://www.sopterj.com.br/wp-content/themes/_sopterj_redesign_2017/_revista/2018/n_01/6-medidas-dos-volumes-pulmonares-e-estrategias-de-interpretacao.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

BATEMAN, A.W.; JACOBS, I.; BUICK, F. Physical conditioning to enhance +Gz force tolerance: issues and current understanding. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 77, n. 6, p. 573–580, 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16780233>. Acesso em: 4 abr. 2023.

BEER, J.; DART, T. S.; FISCHER, J.; KISNER, J. Pulmonary Effects from a Simulated Long-Duration Mission in a Confined Cockpit. **Aerospace Medicine and Human Performance**, Bethesda, v. 88, n. 10, p. 952–957, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28923145/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Aeronáutica. **Portaria DEPENS nº 29/DE-6, de 19 de janeiro de 2011**. Aprova a reedição da Instrução do Comando da Aeronáutica “Teste de Avaliação do Condicionamento Físico no Comando da Aeronáutica (ICA 54-1)”. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2011. Disponível em: https://www2.fab.mil.br/ccise/images/ICA_54-1_TACF.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Aeronáutica. **Portaria DIRSA Nº 8/SECSDTEC, de 27 de janeiro de 2016**. Aprova a Reedição da Instrução que trata das Inspeções de Saúde na Aeronáutica. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2016. Disponível em: https://www.fab.mil.br/icas/ICA_160-6_REED_NOV_2016.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

BULBULIAN, R. Physical training and +Gz tolerance reevaluated. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 57, n. 7, p. 709–711, 1986. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3741295>. Acesso em: 4 abr. 2023.

BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, A.; DELGADO-TERÁN, M.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Psychophysiological response of different aircrew in normobaric hypoxia training. **Ergonomics**, London, v. 62, n. 2, p. 277–285, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00140139.2018.1510541>. Acesso em: 22 mar. 2023.

CORDAIN, L.; STAGER, J. Pulmonary structure and function in swimmers. **Sports Medicine**, Bethesda, v. 6, n. 5, p. 271–278, 1988. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3064235>. Acesso em: 4 abr. 2023.

DROBNIC, F.; GARCÍA-ALDAY, I.; BANQUELLS, M.; BELLVER, M. Interstitial Pulmonary Edema and Acetazolamide in High-Performance Sport: A Case Report. **Archivos de Bronconeumología**, Bethesda, v. 54, n. 11, p. 584–585, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29602623>. Acesso em: 4 abr. 2023.

DUBOIS, A. B.; BRODY, A. W.; LEWIS, D. H., BURGESS Jr, B. F. Oscillation mechanics of lungs and chest in mam. **Journal of Applied Physiology**, Bethesda, v. 8, n. 6, p. 587–94, 1956. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13331841/>. Acesso em: 4 abr. 2023.

DUISHOBAEV, M. *et al.* FEV1 and FVC changes at high altitude residents in Kyrgyzstan. **European Respiratory Journal**, Sheffield, v. 52, n. 62, p. 1404, 2018. Disponível em: <https://www.ers-education.org/lr/show-details/?idP=209579>. Acesso em: 22 mar. 2023.

EICHSTAEDT, C. A. *et al.* The Andean adaptive toolkit to counteract high altitude maladaptation: Genome-wide and phenotypic analysis of the collas. **PloS One**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. 1–12, 2014. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0093314>. Acesso em: 20 ago. 2022.

FRISANCHO, A. R. Developmental functional adaptation to high altitude: review. **American Journal of Human Biology**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 151–168, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24065360/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GINDHART, R. T. **The air force physical fitness program is it adequate?** Alabama: Air University, United States Air Force, 1999.

GRAHAM, B. *et al.* Standardization of Spirometry 2019 Update. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, Bethesda, v. 200, n. 8, p. 70–88, 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31613151/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GÜL, M.; SALMANOĞLU, M. Long-term high +Gz effects on cardiac functions in the pilots. **Anatolian Journal of Cardiology**, Bethesda, v. 12, n. 8, p. 675, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23018090/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

HORMEÑO-HOLGADO, A. J.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Effect of iferente combat jet manoeuvres in the psychophysiological response of professional pilots. **Physiology & Behavior**, Bethesda, v. 208, p. 1–5, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31128128/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

LORENZO, F. R. *et al.* A genetic mechanism for Tibetan high-altitude adaptation. **Nature Genetics**, Oklahoma, v. 46, n. 9, p. 951–956, 2014. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ng.3067>. Acesso em: 22 mar. 2023.

LUNDBY, C.; ROBACH, P. Does ‘altitude training’ increase exercise performance in elite athletes? **Experimental Physiology**, v. 101, n. 7, p. 783–788, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27173805>. Acesso em: 4 abr. 2023.

MCKENZIE, D. C. Respiratory physiology: adaptations to high-level exercise. **Brazilian Journal of Sports Medicine**, Bethesda, v. 46, p. 381–384, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22267571>. Acesso em: 4 abr. 2023.

MELO, P. L.; WERNECK, M. M.; GIANNELLA-NETO, A. Um novo espectrômetro de impedância para estudos científicos e clínicos do sistema respiratório. **Review of Scientific Instruments**, New York, v. 71, n. 7, p. 2867–2872, 2000. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1150705>. Acesso em: 22 mar. 2023.

MUNGOGE, W.; ANJOS, Z.; BARROS, R. Importância dos parâmetros caracterizadores da resistência das vias aéreas na avaliação funcional respiratória. **Revista de Ciências da Saúde da Escola Superior de Saúde da Cruz Vermelha Portuguesa**, Oliveira de Azeméis, v. 8, p. 27–36, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305703410/>. Acesso em: 4 abr. 2023.

NAVAJAS, D.; FARRÉ, R. Forced oscillation technique: from theory to clinical applications. **Monaldi Archives for Chest Disease**, Bethesda, v. 56, n. 6, p. 555–562, 2001. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11980289/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

NEDER, J. A.; ANDREONI, S.; CASTELO-FILHO, A.; NERY, L. E. Reference values for lung function tests. I. Static volumes. **Brazilian Journal Of Medical And Biological Research**, Ribeirão Preto, v. 32, n. 6, p. 719–727, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjmbr/a/dwWd5frrHDq5fkjZQ7BybDv/?format=pdf&lang=em>. Acesso em: 22 mar. 2023.

NORDAHL, S. H.; AASEN, T.; OWE, J. O.; MOLVAER, O. I. Effects of hypobaric hypoxia on postural control. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 69, n. 6, p. 590–595, 1998. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9641406/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

OOSTVEEN, E. *et al.* The forced oscillation technique in clinical practice: methodology, recommendations and future developments. **European Respiratory Journal**, Bethesda, v. 2, n. 6, p. 1026–1041, 2003. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14680096/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

ÖZTÜRK, C.; İLBASMIŞ, M. S.; AKIN, A. Cardiac responses to long duration and high magnitude +Gz exposure in pilots: an observational study. **Anatolian Journal of Cardiology**, Bethesda, v. 12, n. 8, p. 668–674, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22968302/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

PEREIRA, C. A. C.; MOREIRA, M. A. F. J. Pletismografia – resistência das vias aéreas. **Jornal de Pneumologia**, Brasília, DF, v. 28, n. 3, p. 139–150, 2002. Disponível em: https://cdn.publisher.gn1.link/jornaldepneumologia.com.br/pdf/Suple_142_45_66%20Pletismografia.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

PETRASSI, F. A.; HODKINSON, P. D.; WALTERS, P. L.; GAYDOS, S. J. Hypoxic hypoxia at moderate altitudes: review of the state of the science. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 83, n. 10, p. 975–984, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23066620/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

POLLARD, A. J. *et al.* Hypoxia, hypocapnia and spirometry at altitude. **Clinical Science**, Bethesda, v. 92, n. 6, p. 593–598, 1997. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9205420/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

PRISK, G. K. Pulmonary circulation in extreme environments. **Comprehensive Physiology**, Bethesda, v. 1 p. 319–338, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23737175/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

RODRÍGUEZ, F. A. *et al.* Altitude Training in Elite Swimmers for Sea Level Performance (Altitude Project). **Medicine & Science in Sports & Exercise**, Bethesda, v. 47, p. 1965–1978, 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25628173>. Acesso em: 4 abr. 2023.

RUSSOMANO, T.; CASTRO, J. C. **Fisiologia Aeroespacial**: conhecimentos Essenciais para voar com segurança. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2012.

SÁ, P. M.; LOPES, A. J.; JANSEN, J. M.; MELO, P. L. Oscillation mechanism of the respiratory system in never-smoking patients with silicosis: pathophysiological study and evaluation of diagnostic accuracy. **Clinical Science**, São Paulo, v. 68, n. 5, p. 644–651, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/clin/a/JXMZsRVfCM7MwdcJf8DYZ7f/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 22 mar. 2023.

SAUVET, F. *et al.* Heart rate variability in novice pilots during and after a multi-leg cross-country flight. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 80, n. 10, p. 862–869, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19817238/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA. Diretrizes para Testes de Função Pulmonar. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, Brasília, DF, v. 38, n. 2, 2009. Disponível em: <https://www.jornaldepneumologia.com.br/details-supp/45>. Acesso em: 22 mar. 2023.

TALAMINOS-BARROSO, A. *et al.* Effects of genetics and altitude on lung function. **The Clinical Respiratory Journal**, New Jersey, v. 15, n. 3, p. 247–256, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/crj.13300>. Acesso em: 22 mar. 2023.

TESCH, P. A.; HJORT, H.; BALLDIN, U. I. Effects of strength training on G tolerance. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 54, n. 8, p. 691–695, 1983. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6626076>. Acesso em: 4 abr. 2023.

TRINDADE, A. M.; SOUSA, T. L. F.; ALBUQUERQUE, A. L. P. A interpretação da espirometria na prática pneumológica: até onde podemos avançar com o uso dos seus parâmetros? **Pulmão RJ**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 3–7, 2015. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/porta1/resource/pt/lil-764757>. Acesso em: 22 mar. 2023.

WARBURTON, D. E. R.; SHEEL, W. A.; MCKENZIE, D. C. Cardiorespiratory adaptations to training. In: SCHWELLNUS, M. P. (ed.). **Olympic Textbook of Medicine in Sport**. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2008.

WEITZ, C. A.; GARRUTO, R. M.; CHIN, C-T. Larger FVC and FEV1 among Tibetans compared to Han born and raised at high altitude. **American Journal of Physical Anthropology**, Bethesda, v. 159, n. 2, p. 255–255, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26407532/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

WEST, J. B. A strategy for in-flight measurements of physiology of pilots of high-performance fighter aircraft. **Journal of Applied Physiology**, Bethesda, v. 115, p. 145–149, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23599400/>. Acesso em: 22 mar. 2023.