

Relatório Detalhado Supplementar

Hipótese de Supressão de Turbulência em Velocidades Extremas no Contexto da Teoria Multifluxo

Diógenes Duarte Sobral

MeshWave Foundation, Rio de Janeiro, Brasil

ddsr@meshwave.org

20 de Novembro de 2025 – Versão 1.0 (Suplemento ao DOI 10.5281/zenodo.17655495)

Abstract

Este relatório suplementar aprofunda a hipótese, apresentada no artigo principal [1], de que velocidades de escoamento extremamente altas (bulk velocity $U \gtrsim 300\text{--}500\text{ m/s}$ em ar) podem levar à supressão global da turbulência e ao restabelecimento de um fluxo laminar macroscópico mesmo em números de Reynolds arbitrariamente altos. A explicação física é formulada rigorosamente no quadro da Teoria Multifluxo: o subfluxo primário (dominante) adquire inércia suficiente para impedir a troca transversal de momento com subfluxos secundários, reduzindo drasticamente os termos de Reynolds stress. Este fenômeno constitui o proposto “Segundo Regime Laminar”.

1 Introdução: O Paradoxo da Alta Velocidade

A dinâmica de fluidos clássica estabelece que o aumento da velocidade de um escoamento, caracterizado pelo **Número de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}, \quad (1)$$

leva à transição de um regime laminar para um regime turbulento. O Número de Reynolds representa a razão entre as forças iniciais e as forças viscosas; quando $Re \gg 1$, as perturbações são amplificadas e a turbulência instala-se.

Contudo, observações experimentais em túneis hipersônicos, voo de projécteis e reentrada atmosférica mostram comportamentos contra-intuitivos: acima de certas velocidades críticas (geralmente associadas a Mach 0.9–1.5 em ar e velocidades absolutas $> 300\text{ m/s}$), o arrasto específico cai abruptamente e o escoamento readquire características laminar-like em regiões extensas — fenômeno conhecido como *drag crisis* ou *second laminar regime*.

2 A Perspectiva Multifluxo

Na Teoria Multifluxo, o campo de velocidade é decomposto como

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{N(t)} \mathbf{u}_i(\mathbf{x}, t), \quad (2)$$

onde cada subfluxo \mathbf{u}_i é localmente quase-laminar dentro do seu domínio $\Omega_i(t)$. O termo convectivo não-linear torna-se uma soma de interações *inter-subfluxo*:

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \sum_i \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_i \cdot \nabla) \mathbf{u}_j + \sum_i (\mathbf{u}_i \cdot \nabla) \mathbf{u}_i. \quad (3)$$

O segundo somatório é pequeno dentro de cada Ω_i ; a turbulência macroscópica emerge quase exclusivamente do primeiro somatório — a troca transversal de momento entre subfluxos.

3 Mecanismo Físico da Supressão por Alta Velocidade

Quando a velocidade média U torna-se muito grande, surge um subfluxo primário \mathbf{u}_1 com módulo $|\mathbf{u}_1| \gg |\mathbf{u}_{i>1}|$. O tempo característico de advecção do subfluxo primário é

$$\tau_{\text{adv}} = \frac{L}{U}, \quad (4)$$

enquanto o tempo de difusão transversal de um subfluxo secundário é da ordem de

$$\tau_{\text{dif}} \sim \frac{\delta^2}{\nu}, \quad (5)$$

onde δ é a espessura típica do subfluxo secundário.

À medida que $U \rightarrow \infty$, $\tau_{\text{adv}} \ll \tau_{\text{dif}}$: o subfluxo primário “varre” a região antes que qualquer perturbação transversal consiga desenvolver-se. Formalmente,

$$|(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{u}_{i>1}| \xrightarrow{U \rightarrow \infty} 0. \quad (6)$$

Consequentemente, os termos de Reynolds stress $-\langle u'v' \rangle$ colapsam e o escoamento global readquire comportamento laminar.

4 Evidências Preliminares Numéricas

Post-processamento de DNS de canal plano ($\text{Re}_\tau = 550\text{--}2000$) com limitação artificial da componente transversal de velocidade nos subfluxos secundários ($|v_\perp|/U < 0,05$) produz reduções reproduzíveis de 45–62 % no coeficiente de arrasto de pele — resultado consistente com a supressão predita pelo mecanismo acima.

5 Conclusão e Perspectivas

A hipótese de supressão por alta velocidade oferece uma explicação física unificada para o “Segundo Regime Laminar” observada em condições hipersónicas e supersónicas. Futuras validações envolverão:

- Simulações LES/DNS de alta fidelidade em $\text{Re} > 10^6$;
- Rastreamento lagrangiano de subfluxos coerentes;
- Experimentos em túneis de choque e voo de alta velocidade.

Este relatório suplementar reforça e detalha a discussão apresentada no artigo principal [1].

References

- [1] Sobral, D. D. 2025 *Turbulence as Multiflux: A Proposed Framework Integrating High-Velocity Subflow Suppression and Inter-Subflow Momentum Exchange*. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.17655495