

**MOBILIZAÇÃO
ACUMULADA E
INTENSIDADE MÁXIMA
RESPONDEM DE FORMA
DISTINTA EM FLUXOS
GRANULARES SUBAÉREOS
E SUBAQUÁTICOS**

**CUMULATIVE MOBILIZATION AND PEAK TRANSPORT INTENSITY
RESPOND DIFFERENTLY IN SUBAERIAL AND SUBAQUEOUS GRANULAR
FLOWS**

Ciências Exatas e da Terra • 02/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/790934314](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/790934314)

Sérgio Antônio Brum Junior¹

Stênio Cavalier Cabral²

Gustavo Savaris³

Fábio Araújo Pereira⁴

Isabella de Azevedo Carvalho Brum⁵

Francis Bento Marques⁶

RESUMO

Este estudo analisa, por meio de resultados de simulações CFD-DEM, a influência do coeficiente de atrito entre partículas sobre a fração mobilizada e a vazão máxima instantânea em fluxos granulares subaéreos e subaquáticos. São comparadas 10 condições numéricas, organizadas em cinco pares correspondentes aos valores de atrito f . A fração mobilizada M é definida como a porcentagem do estoque inicial que atravessa a comporta durante o período analisado, enquanto $Q_{m\acute{a}x}$ representa a máxima vazão volumétrica de partículas obtida a partir das séries temporais $Q(t)$. As comparações entre os ambientes utilizam razões adimensionais R_M e R_Q , complementadas por diferenças absolutas e estatísticas descritivas. Os resultados mostram uma redução monotônica de M com o aumento de f em ambos os ambientes. A condição subaquática apresenta, em média, $R_M = 94,33 \%$, indicando que uma grande proporção da fração mobilizada observada no ambiente subaéreo é preservada. Para a vazão máxima, R_Q é de $72,10 \%$, correspondendo a uma redução relativa média de $27,90\%$, substancialmente superior à redução de $5,67\%$ observada para M . A diferença média entre R_M e R_Q é de $22,24$ pontos percentuais. Esses resultados indicam que a mobilização acumulada e a intensidade máxima do transporte fornecem informações distintas sobre o mesmo episódio de fluxo e não devem ser tratadas como métricas intercambiáveis. A dissociação observada está restrita ao domínio numérico investigado; sua generalização para diferentes condições de fluido, contato e geometria constitui hipótese a ser testada.

Palavras-chave: Transporte sedimentar; Atrito interparticular; CFD-DEM; Escoamento bifásico; Dinâmica temporal.

ABSTRACT

This study analyzes, through CFD–DEM simulation results, the influence of the interparticle friction coefficient on the mobilized fraction and maximum instantaneous flow rate in subaerial and subaqueous granular flows. Ten numerical conditions are compared, organized into five pairs corresponding to friction coefficient values f . The mobilized fraction M is defined as the percentage of the initial particle stock crossing the gate during the analyzed period, whereas $Q_{\text{máx}}$ represents the maximum particle volumetric flow rate obtained from the $Q(t)$ time series. Comparisons between environments use the dimensionless ratios R_M and R_Q , complemented by absolute differences and descriptive statistics. The results show a monotonic decrease in M with increasing f in both environments. The subaqueous condition shows, on average, $R_M = 94.33\%$, indicating that a large proportion of the mobilized fraction observed in the subaerial environment is retained. For the maximum flow rate, R_Q is 72.10%, corresponding to an average relative reduction of 27.90%, substantially greater than the 5.67% reduction observed for M . The mean difference between R_M and R_Q is 22.24 percentage points. These results indicate that cumulative mobilization and peak transport intensity provide distinct information about the same flow event and should not be treated as interchangeable metrics. The observed dissociation is restricted to the numerical domain investigated; its generalization to different fluid, contact, and geometric conditions constitutes a hypothesis to be tested.

Keywords: Sediment transport; Interparticle friction; CFD-DEM; Two-phase flow; Temporal dynamics.

INTRODUÇÃO

Em fluxos granulares, as interações locais entre partículas determinam o comportamento coletivo do fluxo, porém diferentes medidas de resposta podem revelar aspectos distintos de um mesmo episódio de transporte. Em particular, uma medida acumulada pode permanecer relativamente estável enquanto a vazão instantânea do transporte muda de forma muito mais pronunciada.

O coeficiente de atrito entre partículas f é uma variável central porque permite investigar como uma propriedade que atua nos contatos entre partículas se manifesta no comportamento coletivo do fluxo. No método dos elementos discretos (DEM), ele participa da determinação das forças tangenciais nos contatos e influencia os rearranjos do conjunto (Cundall; Strack, 1979). Entretanto, a literatura sobre fluxos densos mostra que a resposta macroscópica depende também do estado do escoamento, da geometria e das condições de contorno (Pouliquen, 1999; Pouliquen e Chevoir, 2002; Forterre; Pouliquen, 2008). Assim, embora o aumento do atrito esteja associado à redução da fração mobilizada no domínio investigado, essa variável isoladamente não descreve toda a resposta observada.

A questão se torna mais restritiva em ambiente subaquático, pois a fase líquida introduz interações adicionais entre as partículas e o fluido, que podem modificar a intensidade e a evolução temporal do fluxo (Iverson, 1997). Em formulações CFD–DEM, as partículas são representadas individualmente pelo DEM, enquanto o fluido é descrito como um campo contínuo pela CFD (dinâmica dos fluidos computacional). O acoplamento entre esses dois métodos de simulação computacional depende de relações que representam a interação entre partículas e fluido e que influenciam a resposta calculada (Zhu *et al.*, 2007; Deen *et al.*, 2007). A questão de interesse

neste estudo não é simplesmente verificar se a presença da água altera o fluxo, mas avaliar se essa alteração é equivalente quando observada por uma medida acumulada e por uma medida instantânea.

Essa questão conduz à escolha de duas medidas de respostas complementares: fração mobilizada M e vazão máxima instantânea do transporte atingida durante o fluxo $Q_{m\acute{a}x}$. A fração mobilizada M representa uma resposta acumulada, expressando a fração do estoque inicial que atravessou a comporta durante o período analisado; a vazão instantânea $Q(t)$ caracteriza a intensidade temporal do transporte, enquanto $Q_{m\acute{a}x}$ sintetiza o ponto de maior intensidade da série temporal, representando uma resposta de pico. Estudos sobre transporte sedimentar mostram que a evolução temporal do transporte contém informações que não podem ser representadas por um único valor de pico (Ancey e Pascal, 2020; Benavides *et al.*, 2023). Se o ambiente alterar M e $Q_{m\acute{a}x}$ em intensidades diferentes, a utilização exclusiva de M pode subestimar a magnitude da diferença observada na intensidade do transporte.

O presente trabalho testa diretamente essa possibilidade. A pergunta central é se a mudança entre os ambientes subaéreo e subaquático produz respostas proporcionais quando o transporte é descrito por uma medida acumulada e por uma medida instantânea, e se essa relação varia ao longo dos valores de f analisados. A hipótese é restrita ao domínio observado: espera-se que a mudança para o ambiente subaquático produza uma redução mais pronunciada na vazão máxima do que na fração mobilizada, indicando respostas distintas das duas métricas.

Para responder à questão, são comparadas 10 condições numéricas documentadas, pareadas por ambiente (subaéreo e subaquático) e por f (0,54; 0,60; 0,70; 0,81 e 0,85). A comparação entre os ambientes é realizada por meio das razões RM e RQ, que expressam, respectivamente, a fração mobilizada e a vazão máxima subaquáticas em relação às correspondentes condições subaéreas. A análise quantifica tendências, diferenças ambientais e razões entre respostas correspondentes, sem extrapolar os resultados dos cinco valores de f simulados para uma lei contínua geral. O objetivo é determinar, dentro do domínio observado, se a fração mobilizada M e a máxima vazão instantânea do transporte $Q_{m\acute{a}x}$ fornecem informações distintas sobre o mesmo episódio de transporte.

REFERENCIAL TEÓRICO

Contato granular, atrito e resposta macroscópica

O comportamento observado em uma massa granular é resultado da ação conjunta de inúmeras interações entre partículas e da reorganização coletiva do conjunto. No Método dos Elementos Discretos (DEM), as partículas são representadas individualmente e suas interações são calculadas nos contatos. A partir da evolução dessas interações e dos movimentos das partículas, obtém-se a resposta do conjunto. A formulação de Cundall e Strack (1979) estabeleceu uma abordagem discreta para representar o comportamento mecânico de conjuntos de partículas, na qual a resposta do sistema é determinada pela evolução das interações e dos movimentos das partículas.

Entre essas interações, o atrito entre os grãos desempenha papel importante na resistência ao movimento em uma massa granular,

mas o comportamento dessa massa depende também de como as partículas estão organizadas e interagem entre si. A densidade do material, seu grau de confinamento e o modo de deformação e a taxa de cisalhamento influenciam essa organização e, consequentemente, a resposta observada em escala macroscópica. Pouliquen e Chevoir (2002) destacam que os fluxos granulares densos apresentam características macroscópicas associadas à organização das partículas e seus contatos durante o escoamento. Jop, Forterre e Pouliquen (2006) mostram que a relação constitutiva de materiais granulares densos depende das condições de escoamento, incluindo a taxa de cisalhamento e o estado de tensão do material.

A importância do atrito também é demonstrada diretamente em sistemas submersos. Koivisto *et al.* (2017), ao comparar experimental e numericamente fluxos granulares secos e submersos em uma geometria de descarga, observaram que a presença do meio fluido altera o comportamento do escoamento. Nas simulações numéricas realizadas para reproduzir os resultados experimentais, os autores mostraram que a modelagem de fluxos granulares secos requer um valor diferente do parâmetro de atrito de contato partícula-partícula daquele utilizado para modelar os fluxos granulares submersos, mesmo mantendo os demais parâmetros de simulação constantes. Esse resultado evidencia que o comportamento do fluxo submerso não pode ser representado simplesmente pela reprodução das condições adotadas para o fluxo seco, sendo necessário considerar, na modelagem, a interação entre as partículas e o meio fluido.

Transporte granular subaquático e interação partícula-fluido

Em um fluxo granular subaquático, as partículas estão imersas em uma fase fluida contínua, de modo que o movimento da massa granular ocorre em interação com o escoamento do fluido. Enquanto as partículas se deslocam, elas interagem com o fluido e, simultaneamente, o movimento das partículas pode alterar o escoamento do fluido. Dessa forma, uma descrição bifásica do escoamento considera conjuntamente a dinâmica da fase granular e a dinâmica da fase fluida. Pailha e Pouliquen (2009), ao desenvolverem uma descrição bifásica para avalanches granulares subaquáticas, trataram conjuntamente as fases granular e fluida, considerando a interação entre elas.

Nesse contexto, a caracterização do transporte granular deve considerar não apenas a quantidade acumulada de material mobilizado, mas também sua variação ao longo do tempo. Estudos experimentais sobre transporte de sedimentos mostram que a taxa de transporte pode apresentar flutuações temporais e comportamento intermitente, com períodos de maior e menor intensidade (Singh *et al.*, 2009). Essa variabilidade evidencia que a intensidade do transporte pode variar ao longo do tempo, com períodos de maior e menor atividade de transporte.

Além da variação temporal, as condições de imersão também podem influenciar a taxa de transporte. Fan *et al.* (2022) investigaram a descarga de partículas submersas através de um orifício por meio de simulações com o Método de Elementos Discretos (DEM) acoplado ao Método de Boltzmann em Rede (LBM). Os autores avaliaram diferentes condições de imersão, considerando variáveis como o diâmetro das partículas, a viscosidade do fluido e o tamanho do orifício, e analisaram seus efeitos sobre a taxa de descarga sólida. Os resultados mostraram que essas condições

influenciam a taxa de descarga sólida e identificaram uma evolução temporal característica da descarga. O estudo reforça, portanto, a importância da interação entre as partículas e o fluido na caracterização do transporte granular em sistemas submersos.

Essa influência das condições do escoamento sobre a interação entre as fases foi investigada por Nucci, Armanini e Larcher (2019). Os autores analisaram as forças de interação entre as fases e verificaram que a força de arraste depende da concentração da fase sólida e da relação entre as velocidades das partículas e do fluido. Os autores também mostraram que as flutuações da concentração da fase sólida e das velocidades das fases podem gerar uma contribuição residual à força de arraste entre as fases. Esses resultados evidenciam que a interação partícula–fluido depende das condições do escoamento e que suas relações apresentam comportamento não linear.

Mobilização acumulada e intensidade instantânea do transporte

A literatura sobre transporte granular e sedimentar mostra que a taxa de transporte pode variar ao longo do tempo e que a utilização de valores médios pode ocultar parte dessa variabilidade. Ancey e Pascal (2020) destacam que a taxa de transporte de sedimentos pode apresentar flutuações significativas ao longo do tempo e que sua caracterização depende da escala temporal considerada. Os autores também mostram que a taxa de transporte pode ser definida a partir do fluxo de partículas através de uma superfície de controle e relacionada à evolução temporal desse fluxo. Essa abordagem permite distinguir a intensidade do transporte em determinado instante da quantidade acumulada ao longo do

período analisado, duas dimensões que podem fornecer informações diferentes sobre o processo de transporte.

Essa variabilidade temporal do transporte pode assumir diferentes formas, incluindo períodos de maior e menor atividade durante um mesmo processo de transporte. Benavides *et al.* (2023), em experimentos de transporte sedimentar, observaram que o fluxo pode apresentar comportamento intermitente, caracterizado pela ocorrência de períodos de baixo transporte intercalados por eventos de maior intensidade. Os autores mostraram que essa intermitência produz grande variabilidade nas taxas de transporte ao longo do tempo. Esses resultados reforçam que a evolução temporal da intensidade do transporte fornece informações que podem não ser representadas adequadamente por uma única medida média.

A partir dessa perspectiva, a intensidade instantânea e a mobilização acumulada podem ser consideradas dimensões distintas da resposta de um sistema de transporte. Phillips *et al.* (2018), ao analisarem experimentalmente o transporte de sedimentos sob condições de escoamento transiente, observaram considerável variabilidade no fluxo de sedimentos ao longo de um mesmo evento e demonstraram que o transporte acumulado apresenta relação com o efeito integrado das condições de escoamento. Esses resultados reforçam a importância de considerar tanto a evolução temporal da intensidade do transporte quanto o resultado acumulado do processo. No presente estudo, essa distinção é operacionalizada por meio da intensidade máxima do transporte, representada por $Q_{máx}$, e da fração acumulada de material mobilizado, representada por M , permitindo verificar se essas duas dimensões apresentam respostas semelhantes ou distintas entre os ambientes subaéreo e subaquático.

METODOLOGIA

Delineamento da análise

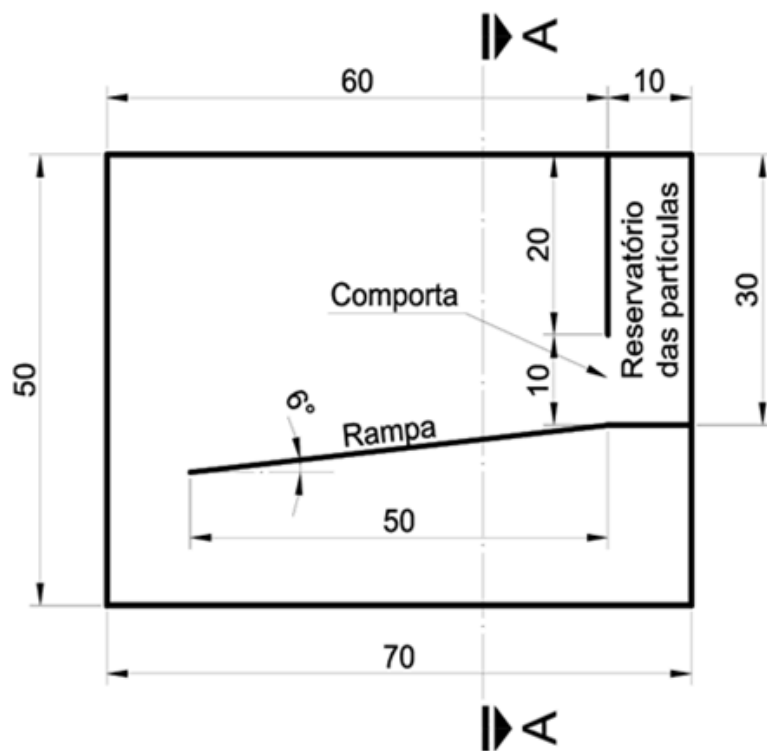
O presente trabalho realiza uma análise quantitativa de resultados de simulações CFD–DEM com o objetivo de avaliar como f se relaciona com a fração mobilizada e com a máxima vazão instantânea. O conjunto de análise contém 10 condições, cinco delas subaéreas e as outras cinco subaquáticas, organizadas em cinco pares correspondentes aos valores de f : 0,54; 0,60; 0,70; 0,81 e 0,85. A associação entre os ambientes e os respectivos valores de f é preservada em toda a análise.

Os cinco valores de f são tratados como um conjunto discreto de condições dentro do domínio estudado, não como uma série suficiente para identificar uma função contínua. A análise compreende a comparação dos resultados segundo os cinco valores de f , o cálculo de diferenças absolutas e razões relativas entre os ambientes e a obtenção de estatísticas descritivas. Não é ajustada uma lei funcional com finalidade de extrapolação para valores de f não analisados.

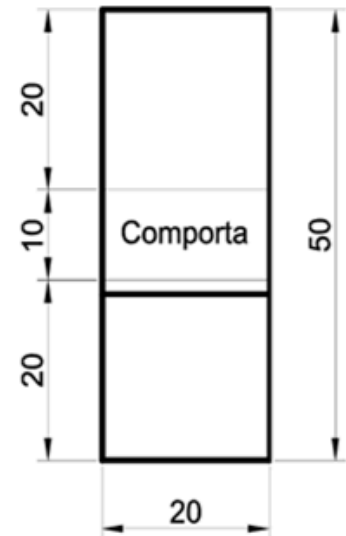
Configuração numérica e parâmetros documentados

A configuração numérica original utiliza uma caixa de testes de 0,70 m × 0,20 m × 0,50 m, contendo uma rampa de 6° de inclinação e reservatório inicial de 0,10 m × 0,20 m × 0,30 m. A representação geométrica da caixa de testes idealizada para as simulações está apresentada esquematicamente na Figura 1.

Figura 1. Representação esquemática da caixa de testes idealizada



Corte longitudinal
Dimensões em centímetros



Corte AA

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O reservatório contém um estoque de 309.441 partículas esféricas de 0,003 m de diâmetro. É adotada uma estrutura cúbica de face centrada para o empacotamento inicial das partículas no reservatório, a fim de fornecer um arranjo denso das partículas. A formulação granular emprega o modelo simplificado de Hertz-Mindlin, enquanto a fase fluida é descrita como incompressível. As equações de Navier-Stokes são resolvidas na formulação de médias de Reynolds e de volume, enquanto as trajetórias das partículas são calculadas pelo DEM. O acoplamento CFD-DEM considera a interação entre as fases granular e fluida, e o algoritmo PISO é empregado para o acoplamento pressão-velocidade na solução da fase fluida. Essas informações apenas caracterizam o domínio dos dados.

As propriedades das partículas são mantidas constantes em todas as condições: módulo de Young de 5.000.000 Pa, coeficiente de Poisson de 0,24 e coeficiente de restituição de 0,30. No ambiente

subaquático, o fluido é caracterizado por densidade de 998,2071 kg/m³ a 20 °C e viscosidade cinemática de $1,0 \times 10^{-6}$ m²/s. Nas simulações, a comporta é retirada após a formação do empacotamento inicial e as partículas são liberadas sobre a rampa; o tempo total das simulações é 5 s, o passo de tempo é de 10^{-5} s e a gravação dos dados ocorre a cada 0,01 s.

Variáveis resposta e definição operacional

A primeira variável resposta é a fração mobilizada M , definida como a porcentagem do estoque inicial que atravessa a comporta no período considerado. É uma medida acumulada do transporte. Assim, considerando N_0 como o número inicial de partículas e N_{out} como o número de partículas que atravessam a comporta, a fração mobilizada é dada por:

$$M(\%) = \frac{N_{out}}{N_0} \times 100 \quad (1)$$

No conjunto analisado, o estoque inicial é $N_0 = 309.441$ partículas, todas esféricas e com diâmetro $d = 0,003$ m.

A vazão volumétrica de partículas $Q(t)$ é determinada a partir da quantidade de partículas que atravessa a comporta em cada intervalo de tempo. Considerando $N_{\Delta t}$ como o número de partículas que atravessa a saída durante um intervalo $\Delta t = 0,01$ s e V_p como o volume de uma partícula, a vazão volumétrica de partículas é calculada por:

$$Q(t) = \frac{N_{\Delta t} V_p}{\Delta t} \quad (2)$$

em que

$$V_p = \frac{\pi d^3}{6} \quad (3)$$

Como todas as partículas possuem o mesmo diâmetro, o volume total de partículas que atravessa a comporta durante o período analisado pode ser obtido pela integração da vazão instantânea:

$$V_{out} = \sum_i Q_i \Delta t \quad (4)$$

O volume correspondente ao estoque inicial é:

$$V_0 = N_0 V_p \quad (5)$$

Portanto, a fração mobilizada também pode ser expressa, de forma equivalente, em termos do volume transportado, por:

$$M(\%) = \frac{\int_{t_0}^{t_f} Q(t) dt}{V_0} \times 100 \quad (6)$$

Essa relação evidencia que M representa uma medida acumulada do transporte, enquanto $Q(t)$ representa sua intensidade instantânea. A vazão volumétrica máxima de partículas é definida como o maior valor da série temporal:

$$Q_{m\acute{a}x} = \max_{t_0 \leq t \leq t_f} Q(t) \quad (7)$$

Dessa forma, M incorpora a quantidade transportada ao longo do período analisado, enquanto $Q_{m\acute{a}x}$ caracteriza apenas o pico de intensidade do transporte. Para todas as condições, o período de análise corresponde aos 5 s de simulação.

Para comparar os dois ambientes, são definidas duas razões adimensionais. A primeira, R_M , expressa a fração mobilizada no

ambiente subaquático em relação à correspondente fração mobilizada no ambiente subaéreo, para o mesmo valor de f .

$$R_M(\%) = \frac{M_{sq}}{M_{sa}} \times 100 \quad (8)$$

sendo

M_{sq} = fração mobilizada no ambiente subaquático, em porcentagem

M_{sa} = fração mobilizada no ambiente subaéreo, em porcentagem

A segunda, R_Q , expressa a vazão máxima no ambiente subaquático em relação à correspondente vazão máxima no ambiente subaéreo, para o mesmo valor de f .

$$R_Q(\%) = \frac{Q_{m\acute{a}x, sq}}{Q_{m\acute{a}x, sa}} \times 100 \quad (9)$$

sendo

$Q_{m\acute{a}x, sq}$ = vazão volumétrica máxima de partículas no ambiente subaquático, em m³/s

$Q_{m\acute{a}x, sa}$ = vazão volumétrica máxima de partículas no ambiente subaéreo, em m³/s

Procedimentos de análise e controle de inferência

Para cada valor de f , as condições subaérea e subaquática são comparadas diretamente. A análise verifica a direção da mudança das variáveis. Também são calculados a redução relativa entre os

extremos, a média, o desvio-padrão amostral e o coeficiente de variação, quando necessário.

As séries temporais de $Q(t)$ são examinadas para caracterizar a evolução da vazão volumétrica de partículas ao longo do período de análise, considerando a ocorrência, magnitude e posição temporal dos picos e o decaimento subsequente do transporte. Essa avaliação temporal complementa a análise de $Q_{m\acute{a}x}$ e M , permitindo verificar se diferenças na intensidade instantânea estão acompanhadas por diferenças na mobilização acumulada.

A comparação entre a mobilização acumulada e a intensidade máxima é realizada principalmente por meio das razões adimensionais R_M e R_Q , enquanto as diferenças absolutas e as estatísticas descritivas são utilizadas como medidas complementares.

Não são aplicados testes de significância inferencial, pois os resultados analisados provêm de simulações numéricas determinísticas e as dez condições representam configurações específicas do modelo, e não replicações amostrais independentes destinadas à estimativa de variabilidade estatística.

Limites de validade

As conclusões são restritas ao domínio documentado: cinco valores de f , inclinação da rampa de 6° , geometria específica, partículas esféricas de 0,003 m de diâmetro, estoque inicial definido e propriedades físicas fixadas. Não há validação experimental independente nem testes de sensibilidade a outras propriedades do fluido, granulometrias, inclinações ou geometrias. Não foi desenvolvido código novo para as simulações; as estatísticas e razões

apresentadas são calculadas diretamente dos valores obtidos nas simulações. Qualquer interpretação causal sobre a diferença entre ambientes permanece como hipótese física compatível com os resultados, e não como mecanismo demonstrado. As condições utilizadas na comparação estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições do conjunto utilizadas para a comparação

Elemento	Condição/valores	Papel na análise
Inclinação da rampa	6°	Condição geométrica mantida
Partículas	Esféricas	Representação discreta
Diâmetro das partículas	0,003 m	Parâmetro geométrico das partículas
Estoque inicial	309.441 partículas	Denominador da fração mobilizada
Coeficiente de atrito f	0,54; 0,60; 0,70; 0,81; 0,85	Variável paramétrica de comparação
Ambiente	Subaéreo / subaquático	Condição de comparação
Condições analisadas	10	10 condições numéricas obtidas

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

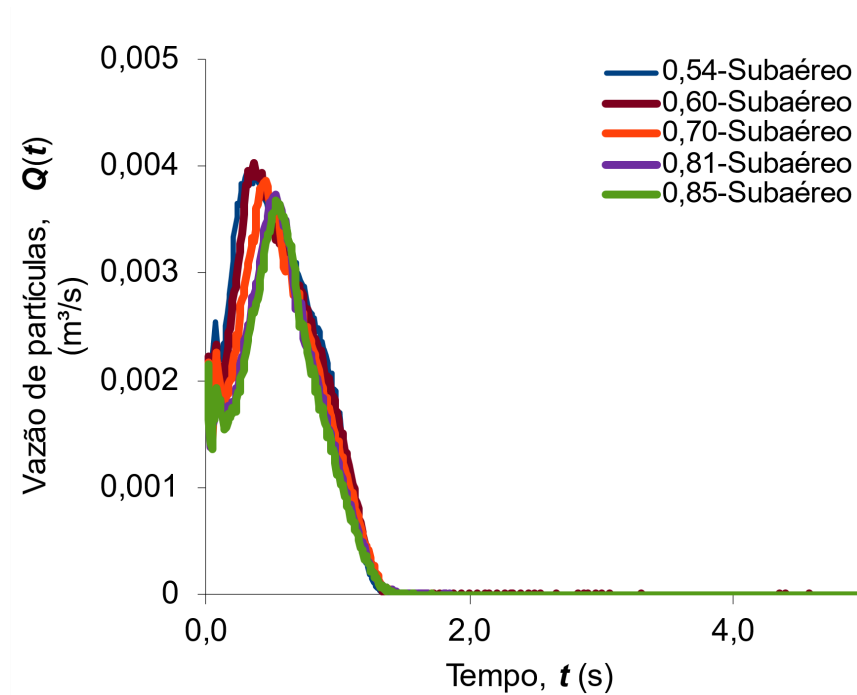
Vazão de partículas

As séries temporais da vazão volumétrica de partículas, $Q(t)$, evidenciam que o transporte apresenta evolução não uniforme ao

longo do período de análise nos ambientes subaéreo e subaquático. Em ambos os ambientes, observa-se uma fase inicial de atividade, seguida por aumento da vazão até a ocorrência de um pico de transporte e por posterior redução da intensidade. As curvas, entretanto, não apresentam a mesma evolução temporal para os diferentes valores de f , indicando que a magnitude da vazão e a forma de sua variação ao longo do tempo variam entre as condições analisadas. As Figuras 2 e 3 apresentam as evoluções temporais das vazões de partículas nos ambientes subaéreo e subaquático, respectivamente.

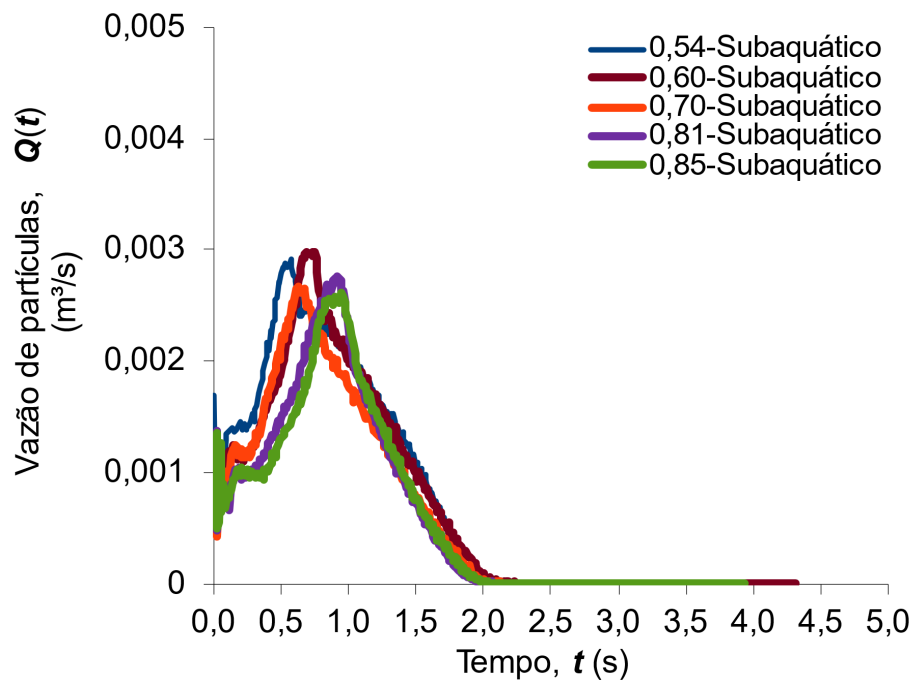
No ambiente subaéreo, o transporte ocorre predominantemente na fase inicial da simulação, com as séries apresentando elevação rápida da vazão, seguida por redução progressiva após os respectivos máximos. No ambiente subaquático, observa-se também uma fase inicial de maior atividade, seguida por redução da vazão, porém com diferenças na magnitude dos picos e na evolução das curvas. Em comparação com o ambiente subaéreo, a atividade de transporte no ambiente subaquático se estende por um intervalo temporal mais longo. Em ambos os ambientes, a vazão tende a valores próximos de zero após a etapa principal de transporte, embora a duração dessa atividade apresente diferenças entre as condições.

Figura 2. Evolução temporal da vazão de partículas em ambiente subaéreo



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura 3. Evolução temporal da vazão de partículas em ambiente subaquático



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A comparação entre as séries correspondentes a um mesmo valor de f mostra que as diferenças entre os ambientes não se restringem à magnitude do pico. Também são observadas diferenças na forma das curvas, incluindo a evolução até os máximos, a posição temporal

desses máximos e o decaimento posterior da vazão. Essas características mostram que a evolução temporal do transporte contém informações que não são representadas por um único valor da vazão ou pelo seu valor máximo.

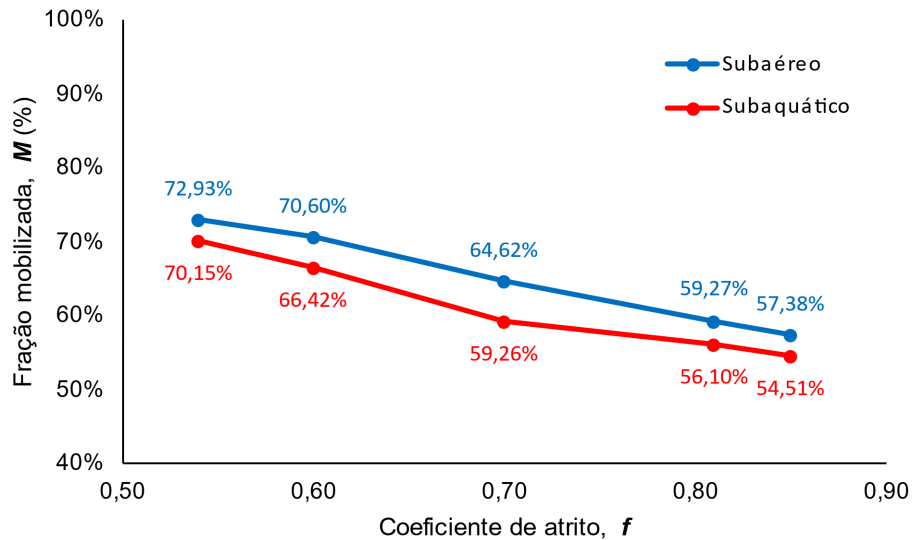
A análise das séries temporais fornece, assim, a descrição da dinâmica instantânea do transporte que fundamenta as medidas utilizadas nas etapas seguintes. O maior valor de cada série é utilizado para determinar $Q_{m\acute{a}x}$, enquanto a integral de $Q(t)$ ao longo dos 5 s de análise está relacionada à fração acumulada de material mobilizado M . Dessa forma, a análise temporal permite contextualizar conjuntamente as duas medidas e estabelecer a base para a comparação posterior entre a intensidade máxima e a mobilização acumulada.

Fração mobilizada

A fração mobilizada M apresenta redução com o aumento do coeficiente de atrito f em ambos os ambientes. Considerando os valores extremos de f , no ambiente subaéreo, M passa de 72,93% para 57,38% entre

$f = 0,54$ e $f = 0,85$. A redução absoluta é de 15,55 pontos percentuais. No ambiente subaquático, a redução ocorre de 70,15% para 54,51% no mesmo intervalo, correspondendo a uma redução de 15,64 pontos percentuais. Considerando a condição inicial como referência, as reduções relativas entre os extremos são de aproximadamente 21,32% no ambiente subaéreo e 22,31% no subaquático. A direção da mudança é a mesma nos cinco valores de f . Portanto, no domínio analisado não existe nenhuma reversão de tendência. A variação de M em função de f é apresentada na Figura 4.

Figura 4. Fração mobilizada em função do coeficiente de atrito



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O comportamento apresentado na Figura 4 é consistente com a interpretação física de que o aumento da resistência ao movimento relativo dificulta o rearranjo coletivo das partículas. Essa interpretação está de acordo com a literatura sobre fluxos granulares densos, na qual o coeficiente de atrito participa do balanço que determina a capacidade de uma camada granular permanecer em movimento (Pouliquen, 1999; Pouliquen e Chevoir, 2002; Forterre; Pouliquen, 2008).

Para representar quantitativamente esse comportamento, são ajustadas funções quadráticas aos cinco valores de f avaliados em cada ambiente. Para o transporte subaéreo, obtém-se:

$$M_{sa}(f) = 102,0257 - 54,7009f + 2,4303f^2 \quad (10)$$

com

$$R^2 = 0,99760 \text{ e } RMSE = 0,2984\%$$

Para o transporte subaquático, o ajuste foi:

$$M_{sq}(f) = 145,0802 - 193,9974f + 103,1782f^2 \quad (11)$$

com

$$R^2 = 0,99441 \text{ e } RMSE \approx 0,4510\%$$

Os elevados valores de R^2 indicam que as funções reproduzem de forma consistente a distribuição dos cinco resultados disponíveis em cada ambiente. O ajuste quadrático também permite representar a pequena curvatura observada nos dados, especialmente no ambiente subaquático. Esses ajustes, contudo, possuem caráter descritivo no intervalo $0,54 \leq f \leq 0,85$, uma vez que foram obtidos a partir de apenas cinco valores de f por ambiente e não devem ser interpretados como leis constitutivas ou extrapolados para fora do intervalo investigado.

Diferença absoluta entre as frações mobilizadas subaérea e subaquática

A comparação entre os ambientes mostra que a fração mobilizada subaquática é próxima à observada no ambiente subaéreo, entretanto é menor em todos os cinco valores de f . As diferenças absolutas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Diferenças absolutas da fração mobilizada entre os ambientes subaéreo e subaquático

f	ΔM
0,54	2,78 p.p.
0,60	4,18 p.p.
0,70	5,36 p.p.

0,81	3,17 p.p.
0,85	2,87 p.p.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pode-se observar que a condição subaquática apresenta menor fração mobilizada, porém a diferença absoluta da fração mobilizada não permanece constante ao longo de f . Definindo

$$\Delta M(f) = M_{sa}(f) - M_{sq}(f) \quad (12)$$

obtém-se, a partir das duas funções ajustadas,

$$\Delta M(f) = -43,0546 + 139,2965f - 100,7479f^2 \quad (13)$$

com

$$R^2 = 0,9097 \text{ e } RMSE = 0,2943 \text{ p.p.}$$

sendo

$\Delta M(f)$ = diferença da fração mobilizada entre os ambientes subaéreo e subaquático, em pontos percentuais

A equação (13) é uma expressão derivada dos ajustes de (10) e (11), e não uma interpolação exata dos cinco valores observados na Tabela 2. Essa expressão indica que a diferença entre os ambientes aumenta inicialmente com o aumento de f , atinge seu maior valor na região intermediária do intervalo investigado e volta a diminuir nos maiores valores de coeficiente de atrito. Esse comportamento é compatível com os valores observados: $\Delta M(f)$ passa de 2,78 pontos

percentuais em $f = 0,54$ para 5,36 pontos percentuais em $f = 0,70$, retornando a 2,87 pontos percentuais em $f = 0,85$.

Esse comportamento é relevante porque mostra que a diferença entre ambientes não pode ser descrita simplesmente como uma parcela fixa retirada da fração mobilizada subaérea. Se a diferença entre os ambientes fosse representada apenas pela redução constante da fração mobilizada subaérea, ΔM seria aproximadamente igual nos cinco valores de f , entretanto, não é isso que os resultados mostram.

A fim de representar simultaneamente os dez resultados em ambos os ambientes, pode-se introduzir uma variável indicadora de ambiente,

$$E = \begin{cases} 0, & \text{subaéreo} \\ 1, & \text{subaquático} \end{cases}$$

e escrever o modelo conjunto como:

$$M(f, E) = 102,0257 - 54,7009f + 2,4303f^2 + 43,0546E - 139,2965Ef \quad (14)$$

com

$$R^2 = 0,99635 \text{ e } RMSE = 0,3824\%$$

O conjunto desses resultados estabelece uma distinção importante para a interpretação do transporte. O aumento do atrito reduz de maneira consistente a fração mobilizada de partículas que atravessa a comporta, enquanto a imersão produz uma redução relativamente moderada nessa medida. Portanto, a fração mobilizada M sugere uma resposta subaquática próxima da subaérea no domínio

investigado. Essa proximidade, entretanto, não implica equivalência da dinâmica do transporte, pois a vazão instantânea pode responder de maneira distinta, questão examinada nas análises subsequentes.

Razão entre as frações mobilizadas subaquática e subaérea

A razão R_M é utilizada para quantificar, de forma adimensional, a fração mobilizada em ambiente subaquático em relação à correspondente em ambiente subaéreo. Valores de $R_M < 100\%$ indicam que a fração mobilizada no ambiente subaquático é inferior à observada no ambiente subaéreo para o mesmo valor de f . A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos considerando os cinco diferentes valores de coeficiente de atrito.

Tabela 3. Razão entre as frações mobilizadas nos ambientes subaquático e subaéreo

f	R_M
0,54	96,19%
0,60	94,09%
0,70	91,71%
0,81	94,66%
0,85	95,00%
Média	94,33%
Desvio-padrão	1,65 p.p.
Coeficiente de variação	1,75%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise dos cinco níveis avaliados de f mostra $R_M < 100\%$ em todas as condições, indicando uma redução consistente da mobilização relativa no ambiente subaquático. O maior valor ocorre em $f = 0,54$, quando a mobilização subaquática corresponde a 96,19% da mobilização subaérea. O menor valor é observado em $f = 0,70$, com 91,71%. A partir desse ponto, R_M aumenta para 94,66% em $f = 0,81$ e 95,00% em $f = 0,85$. A média dos cinco valores de R_M é 94,33%, com desvio-padrão de aproximadamente 1,65 pontos percentuais e coeficiente de variação de 1,75%.

Dessa forma, considerando conjuntamente os cinco níveis de f , a fração mobilizada no ambiente subaquático corresponde, em média, a 94,33% daquela observada no ambiente subaéreo. Em termos relativos, isso representa uma redução média de aproximadamente 5,67%. A amplitude total dos valores de R_M é de 4,47%, entre o mínimo de 91,71% e o máximo de 96,19%. Apesar dessa variação entre os níveis de f , todos os valores permanecem próximos da unidade, evidenciando que a condição subaquática preserva uma parcela elevada da fração mobilizada observada na condição subaérea.

Entretanto, a distribuição de R_M não apresenta tendência monotônica com o aumento de f . Há redução progressiva de 96,19% para 91,71% entre $f = 0,54$ e $f = 0,70$, seguida por recuperação parcial nos dois maiores valores de f . Portanto, os resultados indicam que a diferença relativa entre as frações mobilizadas não pode ser descrita adequadamente por uma relação monotônica simples com f no intervalo analisado. Um ajuste descritivo pode ser utilizado para representar o comportamento de R_M entre os cinco níveis avaliados de f .

$$R_M(\%) = 167,1009 - 212,8701f + 151,2551f^2 \quad (15)$$

com

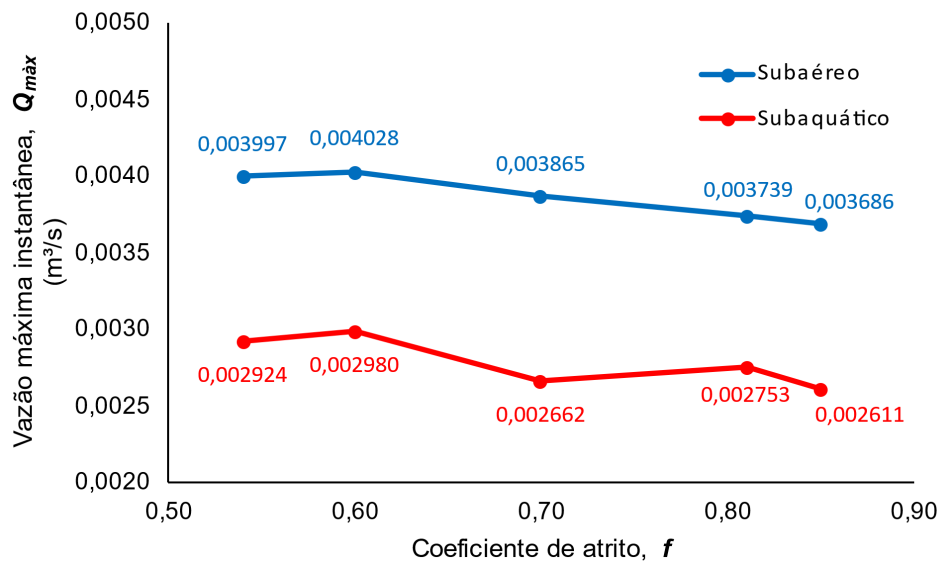
$$R^2 = 0,9027 \text{ e } RMSE = 0,4616\%$$

Essa análise de R_M caracteriza exclusivamente a resposta acumulada de mobilização. Portanto, seus resultados permitem quantificar quanto da fração mobilizada no ambiente subaquático é preservada em relação ao ambiente subaéreo, sem incorporar, nesta seção, informações referentes à vazão instantânea do transporte ou a outras métricas dinâmicas.

Vazão máxima instantânea

A vazão máxima instantânea, $Q_{m\acute{a}x}$, é utilizada para caracterizar a maior intensidade de transporte registrada durante cada simulação. Diferentemente de uma medida acumulada (como a fração mobilizada M), $Q_{m\acute{a}x}$ representa uma propriedade pontual da série temporal de vazão $Q(t)$, sendo obtida pelo maior valor registrado ao longo do intervalo analisado. Os resultados para os cinco níveis de f são apresentados na Figura 5.

Figura 5. Vazão máxima instantânea em função do coeficiente de atrito



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados mostram valores sistematicamente menores de $Q_{máx}$ no ambiente subaquático para todos os cinco níveis de f . Também é possível observar pelos resultados que a posição do valor máximo é consistente entre os dois ambientes: $Q_{máx}$ atinge seu maior valor em $f = 0,60$ nos dois ambientes. A partir desse valor, observa-se uma redução geral nos níveis subsequentes de f para o ambiente subaéreo. No ambiente subaquático, também se observa uma redução a partir de $f = 0,60$, porém ocorre uma recuperação parcial em $f = 0,81$, seguida de nova redução em $f = 0,85$.

Entretanto, a magnitude da redução ao longo do intervalo analisado é maior no ambiente subaquático. No ambiente subaéreo, $Q_{máx}$ apresenta o maior valor em $f = 0,60$, com $0,004028 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir desse nível, a vazão máxima diminui progressivamente, atingindo $0,003686 \text{ m}^3/\text{s}$ em $f = 0,85$. Em relação ao máximo, o valor obtido em $f = 0,85$ representa uma redução de aproximadamente 8,49%. No ambiente subaquático, $Q_{máx}$ também atinge seu maior valor em $f = 0,60$, com $0,002980 \text{ m}^3/\text{s}$ e diminui até $0,002611 \text{ m}^3/\text{s}$ em $f = 0,85$. Entre o maior e o menor valor, a redução corresponde a aproximadamente 12,38%.

Esse comportamento indica que o aumento de f está associado, em geral, à diminuição de $Q_{m\acute{a}x}$, especialmente a partir de $f = 0,60$, em ambos os ambientes, enquanto a presença do ambiente subaquático mantém $Q_{m\acute{a}x}$ em níveis inferiores aos observados no ambiente subaéreo.

O comportamento de redução de $Q_{m\acute{a}x}$ devido ao aumento de f , especialmente a partir de $f = 0,60$, é consistente com a interpretação de que níveis mais elevados de resistência ao movimento dificultam os rearranjos necessários à mobilização granular e, conseqüentemente, limitam a intensidade instantânea do transporte. Contudo, os resultados apresentados não permitem estabelecer diretamente essa relação causal, uma vez que o rearranjo das partículas não é quantificado de forma independente nesta análise.

Embora o padrão geral de variação com f seja preservado nos dois ambientes, a condição subaquática limita a vazão máxima instantânea atingida pelo transporte granular em todos os níveis de f avaliados. Esse resultado indica que a presença do fluido modifica a resposta dinâmica do sistema, introduzindo efeitos que não estão presentes no ambiente subaéreo. A redução observada é compatível com a atuação de interações fluido-partícula que dificultam a evolução do escoamento para estados de maior intensidade, mas os resultados analisados não permitem atribuir a diferença a um mecanismo hidrodinâmico específico.

Funções quadráticas são ajustadas aos cinco valores de f avaliados em cada ambiente, a fim de realizar um ajuste empírico descritivo dos comportamentos. Para o ambiente subaéreo, obtém-se:

$$Q_{m\acute{a}x,sa}(f) = 0,00370235 + 0,00166287f - 0,00199064f^2 \quad (16)$$

com

$$R^2 = 0,9644 \text{ e } RMSE = 2,56 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

sendo

$Q_{m\acute{a}x,sa}$ = vazão máxima instantânea no ambiente subaéreo, em m^3/s

Para o ambiente subaquático, o ajuste foi:

$$Q_{m\acute{a}x,sq}(f) = 0,00432833 - 0,00347049f + 0,00175982f^2 \quad (17)$$

com

$$R^2 = 0,7116 \text{ e } RMSE = 7,74 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

sendo

$Q_{m\acute{a}x,sq}$ = vazão máxima instantânea no ambiente subaquático, em m^3/s

Avaliando as equações (16) e (17), nota-se que a dependência de $Q_{m\acute{a}x}$ em relação a f apresenta comportamento distinto entre os ambientes. No ambiente subaéreo, observa-se que o ajuste quadrático descreve bem os cinco pontos, com um alto valor de R^2 , evidenciando uma redução de $Q_{m\acute{a}x}$ nos maiores valores de f . Porém, no ambiente subaquático, o ajuste quadrático é consideravelmente fraco, indicando que os cinco pontos apresentam

maior dispersão em torno da tendência ajustada e uma relação menos definida com f .

Diferença absoluta entre as vazões máximas subaérea e subaquática

A diferença absoluta entre as vazões máximas, $\Delta Q_{m\acute{a}x}$, quantifica a separação entre as intensidades máximas de transporte observadas nos ambientes subaéreo e subaquático. Essa diferença é definida por:

$$\Delta Q_{m\acute{a}x} = Q_{m\acute{a}x,sa} - Q_{m\acute{a}x,sq} \quad (18)$$

Valores positivos de $\Delta Q_{m\acute{a}x}$ indicam que a vazão máxima no ambiente subaéreo supera a correspondente vazão no ambiente subaquático. Os resultados obtidos para os cinco níveis de f são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Diferenças absolutas entre as vazões máximas subaérea e subaquática

f	$\Delta Q_{m\acute{a}x}$
0,54	0,001073
0,60	0,001048
0,70	0,001203
0,81	0,000986
0,85	0,001075
Média	0,001077
Desvio-padrão	0,000079

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A diferença $\Delta Q_{m\acute{a}x}$ permanece positiva em todos os nívéis avaliados, indicando que a vazão máxima é sistematicamente menor no ambiente subaquático. Os valores variam entre 0,000986 e 0,001203 m³/s, com maior diferença em $f = 0,70$ e menor diferença em $f = 0,81$. A média dos cinco valores de $\Delta Q_{m\acute{a}x}$ é 0,001077 m³/s, com desvio-padrão amostral de aproximadamente 0,000079 m³/s. O coeficiente de variação é de aproximadamente 7,34%, indicando dispersão moderada dos valores em torno da média.

Os resultados não indicam uma relação monotônica simples entre $\Delta Q_{m\acute{a}x}$ e f . A relativa estabilidade dos valores, apesar das variações individuais de $\Delta Q_{m\acute{a}x}$, mostra que a separação entre as duas condições permanece da mesma ordem de magnitude ao longo do intervalo analisado, porém apresenta oscilações que não são bem descritas por uma função simples. Esse resultado evidencia uma diferença consistente na intensidade máxima de transporte entre os ambientes, entretanto a métrica $\Delta Q_{m\acute{a}x}$, por ser absoluta, não permite avaliar diretamente a magnitude dessa diferença em relação à própria vazão subaérea.

Razão entre as vazões máximas

A fim de quantificar a vazão máxima do transporte no ambiente subaquático em relação à correspondente no ambiente subaéreo é utilizada a razão entre as vazões máximas R_Q . A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para os cinco nívéis de f .

A partir da Tabela 5, observa-se que em nenhuma das condições avaliadas a vazão máxima subaquática alcança a intensidade máxima registrada no ambiente subaéreo. Considerando

conjuntamente os cinco níveis de f , a vazão máxima do transporte no ambiente subaquático corresponde, em média, a 72,10% daquela observada no ambiente subaéreo. Em termos relativos, isso corresponde a uma redução média de aproximadamente 27,90%.

Tabela 5. Razão entre as vazões máximas nos ambientes subaquático e subaéreo

f	R_Q
0,54	73,15%
0,60	73,98%
0,70	68,87%
0,81	73,63%
0,85	70,84%
Média	72,10%
Desvio-padrão	2,18 p.p.
Coeficiente de variação	3,02%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A variação de R_Q entre os níveis de f permanece em uma faixa relativamente estreita, entre 68,87% e 73,98%. Também não se observa uma tendência funcional clara de R_Q com o aumento de f . Assim, o comportamento de R_Q não é bem descrito por uma relação simples com f .

O comportamento de R_Q evidencia que a presença do ambiente subaquático está associada a uma redução expressiva e consistente da vazão máxima instantânea do transporte. A permanência de R_Q

entre aproximadamente 69% e 74% em todos os níveis de f indica que essa redução não se restringe a uma condição particular de resistência ao movimento. Ao mesmo tempo, a baixa dispersão relativa dos cinco valores, expressa pelo coeficiente de variação igual a 3,02%, mostra que a relação entre os dois ambientes permanece relativamente estável no intervalo analisado.

Esse resultado é compatível com a interpretação de que a presença do fluido altera a dinâmica do escoamento granular e limita a intensidade máxima alcançada pelo sistema. A resposta pode estar associada à atuação conjunta de interações entre partículas e fluido, incluindo mecanismos de resistência e dissipação de energia. Entretanto, os resultados de R_Q não permitem decompor essas contribuições nem estabelecer qual mecanismo exerce predominância. Assim, a redução observada deve ser interpretada como uma resposta macroscópica do sistema à mudança de condição ambiental, e não como evidência isolada de um mecanismo hidrodinâmico específico.

A estabilidade de R_Q também indica que a redução relativa da vazão máxima não acompanha simplesmente a variação absoluta de $Q_{m\acute{a}x}$. Enquanto os valores individuais de $Q_{m\acute{a}x}$ variam com f , a razão entre os ambientes permanece dentro de uma faixa relativamente estreita. Isso sugere que a presença do meio subaquático produz uma modificação persistente na escala da vazão máxima do transporte ao longo dos cinco níveis avaliados.

É importante destacar que R_Q caracteriza exclusivamente a vazão máxima instantânea. Portanto, seus resultados não permitem inferir, isoladamente, a quantidade total mobilizada pelo sistema. Essa distinção é particularmente relevante porque uma redução

substancial da vazão máxima não implica necessariamente uma redução proporcional da fração mobilizada ao longo de todo o processo.

Assim, os resultados de R_Q estabelecem uma característica específica da resposta subaquática: o transporte atinge picos de vazão significativamente menores que aqueles observados sob condição subaérea, mantendo, contudo, uma relação relativa bastante estável entre os ambientes no intervalo de f analisado. Essa característica fornece a base quantitativa para a posterior comparação entre a resposta instantânea, representada por R_Q , e a resposta acumulada, representada por R_M .

Comparação entre R_M e R_Q nos cinco níveis de f

A comparação entre R_M e R_Q permite avaliar se a diferença entre os ambientes subaquático e subaéreo se manifesta de maneira semelhante na fração mobilizada e na vazão máxima instantânea do transporte. As duas métricas são expressas como razões percentuais entre as condições ambientais e os valores obtidos estão sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6. Comparação entre R_M e R_Q nos cinco níveis de f

f	R_M	R_Q	$R_M - R_Q$
0,54	96,19%	73,15%	23,04 p.p.
0,60	94,09%	73,98%	20,10 p.p.
0,70	91,71%	68,87%	22,84 p.p.
0,81	94,66%	73,63%	21,03 p.p.
0,85	95,00%	70,84%	24,16 p.p.

Média	94,33%	72,10%	22,24 p.p.
Desvio-padrão	1,65 p.p.	2,18 p.p.	1,63 p.p.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A utilização dessas duas razões coloca as respostas em uma mesma escala relativa, permitindo comparar diretamente a proporção da fração mobilizada preservada no ambiente subaquático com a proporção da vazão máxima preservada.

Os resultados mostram uma diferença sistemática entre as duas respostas. R_M permanece entre 91,71% e 96,19%, enquanto R_Q varia entre 68,87% e 73,98%. Portanto, a fração mobilizada no ambiente subaquático permanece próxima daquela observada na condição subaérea, enquanto a vazão máxima do transporte apresenta uma redução relativa substancialmente maior.

Em termos médios, R_M corresponde a 94,33%, enquanto R_Q corresponde a 72,10%. A diferença entre essas médias é de 22,24 pontos percentuais. Considerando a redução em relação ao ambiente subaéreo, a fração mobilizada no ambiente subaquático apresenta redução média de 5,67%, enquanto a vazão máxima apresenta redução média de 27,90%. A redução relativa da vazão máxima é, portanto, aproximadamente 4,9 vezes maior que a redução relativa da fração mobilizada.

Esse contraste permanece presente em todos os cinco níveis de f . A maior diferença entre R_M e R_Q ocorre em $f = 0,85$, com 24,16 pontos percentuais, enquanto a menor ocorre em $f = 0,60$, com 20,10 pontos percentuais. Não há, portanto, nenhum nível de f em que as duas métricas apresentem respostas próximas entre si.

A diferença entre R_M e R_Q evidencia que a presença do ambiente subaquático não produz uma redução proporcional entre a vazão máxima e a mobilização acumulada. A intensidade máxima apresenta uma redução relativa muito maior com a mudança de ambiente do que a fração mobilizada ao longo do período analisado.

Esse resultado é particularmente relevante porque M e $Q_{m\acute{a}x}$ representam dimensões distintas do processo. M resulta da acumulação do transporte ao longo do período analisado, enquanto $Q_{m\acute{a}x}$ caracteriza apenas o maior valor instantâneo da vazão. Consequentemente, uma redução expressiva do pico de vazão não implica necessariamente uma redução proporcional da quantidade acumulada mobilizada.

A comparação também mostra que a utilização exclusiva de $Q_{m\acute{a}x}$ poderia superestimar a magnitude da diferença entre os ambientes quando o objetivo é avaliar o fator de mobilização. De forma complementar, a utilização exclusiva de M poderia ocultar alterações importantes na vazão máxima do processo. A análise conjunta das duas métricas evita essa interpretação parcial.

Os valores de R_M , próximos da unidade, indicam que a condição subaquática mantém grande parte da mobilização observada na condição subaérea. Em contraste, os valores de R_Q , próximos de 70%, mostram que o pico de vazão é consideravelmente mais reduzido. O conjunto dos resultados, portanto, aponta para uma dissociação entre as respostas da mobilização acumulada e da intensidade máxima.

Assim, o principal resultado dessa comparação é que a condição subaquática preserva aproximadamente 94% da fração mobilizada

subaérea, contudo apenas cerca de 72% de sua vazão máxima instantânea. A diferença média de 22,24 pontos percentuais entre R_M e R_Q quantifica, de forma descritiva, a dissociação observada entre essas duas dimensões do transporte granular.

Em conjunto, R_M e R_Q mostram que a redução da vazão instantânea do transporte em meio subaquático é desproporcionalmente maior que a redução da mobilização acumulada. Essa assimetria constitui o principal resultado comparativo entre as duas condições ambientais no intervalo de f analisado.

A dissociação entre as duas dimensões do transporte granular é compatível com a possibilidade de que diferenças na dinâmica temporal do transporte contribuam para essa resposta. Um escoamento pode apresentar menor vazão máxima e, ainda assim, manter uma fração mobilizada elevada se o transporte ocorrer durante um período temporal suficientemente prolongado.

Os resultados disponíveis sustentam essa interpretação em nível macroscópico, mas não permitem determinar isoladamente quais mecanismos físicos — como forças de interação fluido-partícula, dissipação ou alterações no rearranjo granular — controlam essa diferença. Além disso, esses resultados são estabelecidos em um domínio discreto de cinco valores de f , associado a uma geometria, granulometria e conjunto de propriedades físicas específicos. Os dados sustentam a dissociação observada nesse domínio, portanto, a generalização para outras geometrias, fluidos ou regimes deve ser tratada como hipótese a ser testada, e não como conclusão já demonstrada.

Considerações Finais

No domínio investigado, a condição subaquática preserva aproximadamente 94% da fração mobilizada observada no ambiente subaéreo, contudo apenas 72% da vazão máxima do transporte. Nas condições simuladas, a mudança para o ambiente subaquático produz uma redução relativa substancialmente maior na vazão máxima do transporte do que na fração mobilizada. A diferença entre essas respostas mostra que a fração mobilizada e a vazão máxima não são métricas intercambiáveis para caracterizar a resposta do sistema às condições ambientais de fluxos granulares. Essa distinção é relevante porque a utilização de uma única métrica para resumir um evento de transporte pode não representar adequadamente diferenças na evolução temporal do processo.

O comportamento monotônico da fração mobilizada nos dois ambientes fornece a evidência mais consistente, no domínio analisado, da associação entre o aumento do coeficiente de atrito e a redução da mobilização. O aumento de f acompanha a redução progressiva da fração mobilizada nos cinco níveis avaliados. Esse padrão é compatível com a literatura sobre contato granular e fluxos densos (Cundall; Strack, 1979; Pouliquen, 1999; Pouliquen e Chevoir, 2002).

A vazão máxima não apresenta uma resposta monotônica ao longo de todo o intervalo de f , indicando que a fração mobilizada e a vazão máxima não constituem representações equivalentes da resposta do transporte. O efeito do aumento de f está associado de forma consistente à redução de M , $Q_{m\acute{a}x}$ caracteriza apenas o maior valor instantâneo da série temporal e apresenta resposta distinta entre os níveis avaliados. A comparação entre R_M e R_Q mostra,

portanto, que a resposta acumulada e a resposta instantânea não variam proporcionalmente com a mudança de ambiente.

Como sugestão para futuros trabalhos, propõe-se aumentar a resolução de f e variar independentemente propriedades do fluido, condições de contato e geometria, preservando as séries temporais completas de vazão. A análise deverá comparar simultaneamente R_M e R_Q . Se R_Q permanecer sistematicamente inferior a R_M em configurações independentes, haverá evidência adicional de que a dissociação observada não é restrita às condições deste estudo. Se a relação entre essas métricas variar sistematicamente com uma única variável controlada, essa variável poderá fornecer uma evidência mais específica sobre os mecanismos envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCEY, Christophe; PASCAL, Ivan. **Estimating mean bedload transport rates and their uncertainty.** Journal of Geophysical Research: Earth Surface, v. 125, e2020JF005534, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JF005534>

BENAVIDES, Santiago J.; DEAL, Eric; RUSHLOW, Matthew; VENDITTI, Jeremy G.; ZHANG, Qiang; KAMRIN, Ken; PERRON, J. Taylor. **How fast or how many? Sources of intermittent sediment transport.** Geophysical Research Letters, v. 50, e2022GL101919, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL101919>

CUNDALL, Peter A.; STRACK, Otto D. L. **A discrete numerical model for granular assemblies.** Géotechnique, v. 29, n. 1, p. 47–65, 1979. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>

DEEN, N. G.; VAN SINT ANNALAND, M.; VAN DER HOEF, M. A.; KUIPERS, J. A. M. **Review of discrete particle modeling of fluidized beds.** Chemical Engineering Science, v. 62, n. 1–2, p. 28–44, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>

FAN, Jianhua; LUU, Li-Hua; PHILIPPE, Pierre; NOURY, Gildas. **Discharge rate characterization for submerged grains flowing through a hopper using DEM-LBM simulations.** Powder Technology, v. 404, 117421, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117421>

FORTERRE, Yoël; POULIQUEN, Olivier. **Flows of dense granular media.** Annual Review of Fluid Mechanics, v. 40, p. 1–24, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142>

IVERSON, Richard M. **The physics of debris flows.** Reviews of Geophysics, v. 35, n. 3, p. 245–296, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/97RG00426>

JOP, Pierre; FORTERRE, Yoël; POULIQUEN, Olivier. **A constitutive law for dense granular flows.** Nature, v. 441, p. 727–730, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04801>

KOIVISTO, Juha; KORHONEN, Marko; ALAVA, Mikko; ORTIZ, Carlos P.; DURIAN, Douglas J.; PUISTO, Antti. **Friction controls even submerged granular flows.** Soft Matter, v. 13, n. 41, p. 7657–7664, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7SM00806F>

NUCCI, Elena; ARMANINI, Aronne; LARCHER, Matteo. **Drag forces in statistically stationary and homogeneous submerged granular flows.** Physical Review E, v. 99, 042904, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.042904>

- PAILHA, Mickaël; POULIQUEN, Olivier. **A two-phase flow description of the initiation of underwater granular avalanches.** Journal of Fluid Mechanics, v. 633, p. 115–135, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112009007460>
- PHILLIPS, C. B.; HILL, K. M.; PAOLA, C.; SINGER, M. B.; JEROLMACK, D. J. **Effect of flood hydrograph duration, magnitude, and shape on bed load transport dynamics.** Geophysical Research Letters, v. 45, n. 16, p. 8264–8271, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078976>
- POULIQUEN, Olivier; CHEVOIR, François. **Dense flows of dry granular material.** Comptes Rendus. Physique, v. 3, n. 2, p. 163–175, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1631-0705\(02\)01309-9](https://doi.org/10.1016/S1631-0705(02)01309-9)
- POULIQUEN, Olivier. **Scaling laws in granular flows down rough inclined planes.** Physics of Fluids, v. 11, n. 3, p. 542–548, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.869928>
- SINGH, Arvind; FIENBERG, Kurt; JEROLMACK, Douglas J.; MARR, Jeffrey; FOUFOULA-GEORGIU, Efi. **Experimental evidence for statistical scaling and intermittency in sediment transport rates.** Journal of Geophysical Research: Earth Surface, v. 114, F01025, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JF000963>
- ZHU, H. P.; ZHOU, Z. Y.; YANG, R. Y.; YU, A. B. **Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments.** Chemical Engineering Science, v. 62, n. 13, p. 3378–3396, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.089>

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Brasil;
Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA,

Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4946-7993>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9286086846141450>

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5241-9776>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2452889693767673>

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-2426>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8016883581345169>

⁴ Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5714-6244>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9180912233806978>

⁵ Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7200508804238669>

⁶ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Brasil. [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8387-5272>