

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**VICTOR EMANUEL SANTANA**

**INFLUÊNCIA DA POPULAÇÃO DE PARTÍCULAS NO PROCESSO DE  
SEDIMENTAÇÃO EM FLUIDO NEWTONIANO**

**CURITIBA**

**2023**

**VICTOR EMANUEL SANTANA**

**INFLUÊNCIA DA POPULAÇÃO DE PARTÍCULAS NO PROCESSO DE  
SEDIMENTAÇÃO EM FLUIDO NEWTONIANO**

**Influence of particle population on the sedimentation process in Newtonian  
fluid**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Matos Germer.

Coorientador: Me. Yamid José García Blanco.

**CURITIBA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao (s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**VICTOR EMANUEL SANTANA**

**INFLUÊNCIA DA POPULAÇÃO DE PARTÍCULAS NO PROCESSO DE  
SEDIMENTAÇÃO EM FLUIDO NEWTONIANO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01/Dezembro/2023

---

Admilson Teixeira Franco  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Felipe Oliveira Basso  
Doutor  
Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos

---

Alan Lugarini  
Doutor  
Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos

**CURITIBA**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que me deu o propósito e a perseverança necessários para concluir esse curso.

Aos meus pais que acreditam em mim, me proporcionaram a base necessária para vencer esse desafio além de serem os responsáveis pela pessoa que sou hoje.

A minha família que sempre me apoiou e confiou no meu potencial.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Eduardo Matos Germer e Me. Yamid José García Blanco que me guiaram desde meu período de iniciação científica até finalmente o trabalho de conclusão de curso.

Aos meus amigos e colegas de curso que me ajudaram em momentos de dificuldade tanto pessoais quanto acadêmicos.

Ao CERNN que me proporcionou a vivência no laboratório, onde fui capaz de aprender muito academicamente e profissionalmente, além de colocar à disposição o material necessário para essa pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP - Gestão FINEP, Convênio N° 0.1.19.0240.00, Ref 0431/19 - PRH21-UTFPR.

## RESUMO

Com o aumento do número de poços atingindo a fase de abandono, a atenção para essa etapa tem se intensificado. Atualmente, o método principal de abandono é o bombeamento de cimento Portland e outros materiais auxiliares para preencher o poço e evitar vazamentos de gás ou petróleo. No entanto, o cimento apresenta alguns problemas que podem resultar em trincas sob pressões não previstas. Diante das limitações apresentadas pelo cimento, a bentonita tem surgido como uma alternativa viável devido às suas características mecânicas e químicas. Quando utilizada no fechamento de poços, a bentonita forma uma barreira impermeável e se adapta ao ambiente devido à sua densidade e plasticidade. No entanto, o uso da bentonita pode levar ao tamponamento precoce em poços de petróleo e gás mais profundos, quando ocorre a hidratação prematura e a formação de tampões antes de alcançar o fim do poço. O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento de grupos de partículas, de diferentes tamanhos e massas específicas, sedimentando em água, em especial os pellets de bentonita, que são partículas com potencial de aplicação prática, estudando a influência do número de partículas junto do fator de forma e razão mássica na trajetória e na velocidade de sedimentação. Para isso foram realizadas combinações de testes com diferentes geometrias e quantidades de partículas: foram usadas esferas de vidro, esferas de resina, cilindros de resina e pellets de bentonita com diferentes concentrações de partícula. Após a realização dos experimentos, foi possível concluir que aumentar o número de partículas na sedimentação resultou em maior contato entre elas, com algumas tendendo a se deslocar para a parede do tanque. A razão mássica influenciou a trajetória e a velocidade, sendo que partículas com maior razão mássica tiveram menor impacto devido à necessidade de forças maiores para deslocá-las. A esfericidade emergiu como um fator crucial, afetando as velocidades e trajetórias. Partículas longas apresentaram alinhamento lateral, enquanto as não esféricas, como bentonita, permaneceram em contato por mais tempo durante o *kissing*, destacando a importância de propriedades adesivas. Essas conclusões sublinham a complexidade do comportamento dessas partículas e sua relevância, especialmente na indústria do petróleo e gás, sugerindo a necessidade de estudos mais aprofundados para otimizar processos relacionados à sedimentação em meios fluidos.

Palavras-chave: Sedimentação Multiparticulas. Fluido Newtoniano. Pellets de Bentonita.

## ABSTRACT

With the increasing number of wells reaching the abandonment phase, attention to this stage has intensified. Currently, the primary method of abandonment involves pumping Portland cement and other auxiliary materials into the well to fill it and prevent gas or oil leaks. However, cement presents some issues that may result in cracks under unforeseen pressures. Faced with the limitations of cement, bentonite has emerged as a viable alternative due to its mechanical and chemical characteristics. When used in wellbore closure, bentonite forms an impermeable barrier and adapts to the environment due to its density and plasticity. However, the use of bentonite can lead to premature plugging in deeper oil and gas wells, especially when premature hydration occurs, causing plug formation before reaching the well's bottom. The objective of this study was to analyze the behavior of particle groups of different sizes and specific masses sedimenting in water, particularly bentonite pellets, which have practical application potential. The study aimed to investigate the influence of the number of particles, along with the shape factor and mass ratio, on the trajectory and sedimentation velocity. To achieve this, various tests with different geometries and particle quantities were conducted, using glass spheres, resin spheres, resin cylinders, and bentonite pellets with different particle concentrations. After conducting the experiments, it was possible to conclude that increasing the number of particles in sedimentation resulted in greater contact between them, with some tending to move towards the tank wall. The mass ratio influenced the trajectory and velocity, with particles having a higher mass ratio experiencing less impact due to the need for greater forces to displace them. Sphericity emerged as a crucial factor, affecting speeds and trajectories. Long particles exhibited lateral alignment, whereas non-spherical ones, such as bentonite, remained in contact for a longer duration during kissing, highlighting the importance of adhesive properties. These findings underscore the complexity of particle behavior and its relevance, especially in the oil and gas industry, suggesting the need for further studies to optimize processes related to sedimentation in fluid media.

Keywords: Multiple Particles Sedimentation. Newtonian Fluid. Bentonite Pellets.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura cristalina da montmorilonita. ....	24
Figura 2 - Hidratação da montmorilonita de cálcio e de sódio.....	24
Figura 3 – Forças na partícula.....	26
Figura 4 - Mapa dos regimes de trajetória e esteiras associadas em função de Re e $m^*$ .....	29
Figura 5 - Mecanismo de Drafting, Kissing e Tumbling ao longo do tempo .....	32
Figura 6 - Tanque utilizado para os experimentos .....	41
Figura 7 - Tanque .....	47
Figura 8 - Vista superior do layout do experimento .....	49
Figura 9 - Vista lateral do layout experimental .....	49
Figura 10 – Interface do Tracker®.....	51
Figura 11 - Posições da partícula de controle: .....	53

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Partícula de vidro.....	42
Fotografia 2 - Pellet de bentonita.....	43
Fotografia 3 - Esferas de resina.....	45
Fotografia 4 - Cilindros de resina.....	46
Fotografia 5 – Tanque.....	48
Fotografia 6 - Layout experimental.....	50
Fotografia 7 - Ensaio 1 no instante 0,008s.....	59
Fotografia 8 - Ensaio 2 no instante 0,064s.....	59
Fotografia 9 - Ensaio 1 no instante 0,580s e instante 0,916s.....	60
Fotografia 10 - Ensaio 2 nos instantes:.....	61
Fotografia 11 - Ensaio 3 nos instantes:.....	62
Fotografia 12 - Ensaio 1 nos instantes:.....	64
Fotografia 13 - Ensaio 2 nos instantes:.....	65
Fotografia 14 - Ensaio 3 nos instantes:.....	66
Fotografia 15 - Ensaio 1 nos instantes:.....	68
Fotografia 16 - Ensaio 2 nos instantes:.....	69
Fotografia 17 - Ensaio 3 nos instantes:.....	70
Fotografia 18 - Ensaio 1 nos instantes:.....	75
Fotografia 19 - Ensaio 3 nos instantes:.....	76
Fotografia 20 - Toque da esfera com a parede.....	77
Fotografia 21 - Ensaio 3 nos instantes:.....	79
Fotografia 22 - Ensaio 3 nos instantes:.....	82
Fotografia 23 - Ensaio 3 nos instantes:.....	84
Fotografia 24 - Ensaio 1 nos instantes:.....	85
Fotografia 25 - Toque no instante 0,228s.....	86
Fotografia 26 - Ensaio 1 no instante 0s.....	88
Fotografia 27 - Ensaio 1 no instante 0,310s.....	89
Fotografia 28 - Ensaio 1 no instante 0,495s.....	89
Fotografia 29 - Ensaio 1 nos instantes:.....	91
Fotografia 30 - Ensaio 2 nos instantes:.....	92
Fotografia 31 - Ensaio 2 nos instantes:.....	93
Fotografia 32 - Ensaio 1 nos instantes:.....	94
Fotografia 33 - Ensaio 1 nos instantes:.....	106
Fotografia 34 - Ensaio 2 nos instantes:.....	107
Fotografia 35 - Ensaio 3 nos instantes:.....	108
Fotografia 36 - Alinhamento lateral dos pellets.....	109
Fotografia 37 - Frames retirados dos vídeos utilizados para a análise do erro de paralaxe. (a) Vista de cima. (b) Vista do meio. (c) Vista de baixo. ....	119
Fotografia 38 - Ensaio 1 nos instantes 0s, 0,200s, 0,370s e 0,825s.....	125
Fotografia 39 - Ensaio 2 nos instantes 0s, 0,240s, 0,790s e 0,970s.....	126
Fotografia 40 - Ensaio 3 nos instantes 0s, 0,200s, 400s e 900s.....	127
Fotografia 41 - Ensaio 1 nos instantes 0s, 0,400s, 0,800s e 1,200s.....	129
Fotografia 42 - Ensaio 2 nos instantes 0s, 0,150s, 0,750s e 1,150s.....	130
Fotografia 43 - Ensaio 3 nos instantes 0s, 0,100s, 0,400s e 0,700s.....	131
Fotografia 44 - Toque da esfera com a parede.....	131
Fotografia 45 – Ensaio 1 nos instantes 0s, 0,200s, 0,440s e 0,900s.....	133
Fotografia 46 - Ensaio 2 nos instantes 0s, 0,200s, 0,540s e 0,800s.....	134

Fotografia 47 - Ensaio 3 nos instantes 0s, 0,200s, 0,280s e 0,900s .....	135
Fotografia 48 - Ensaio 1 nos instantes:.....	139
Fotografia 49 - Ensaio 2 nos instantes:.....	140
Fotografia 50 - Ensaio 3 nos instantes:.....	141
Fotografia 51 - Ensaio 1 nos instantes:.....	143
Fotografia 52 - Ensaio 2 nos instantes:.....	144
Fotografia 53 - Ensaio 3 nos instantes:.....	145
Fotografia 54 - Ensaio 1 nos instantes:.....	146
Fotografia 55 - Toque no instante 0,228s .....	146
Fotografia 56 - Ensaio 1 nos instantes:.....	147
Fotografia 57 - Ensaio 3 nos instantes:.....	148
Fotografia 58 - Instante 0s .....	151
Fotografia 59 - Instante 0,310s .....	152
Fotografia 60 - Instante 0,495s .....	152
Fotografia 61 - Ensaio 11 nos instantes:.....	154
Fotografia 62 - Ensaio 2 nos instantes:.....	154
Fotografia 63 - Ensaio 3 nos instantes:.....	155
Fotografia 64 - Ensaio 1 nos instantes:.....	157
Fotografia 65 - Ensaio 2 nos instantes:.....	158
Fotografia 66 - Ensaio 2 nos instantes:.....	158
Fotografia 67 - Ensaio 3 nos instantes:.....	159
Fotografia 68 - Ensaio 1 nos instantes:.....	161
Fotografia 69 - Ensaio 2 nos instantes:.....	162
Fotografia 70 - Ensaio 3 nos instantes:.....	162

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Trajetórias com lançamento comum. ....	55
Gráfico 2 - Trajetórias com lançamento com pinça. ....	55
Gráfico 3 - Trajetória da esfera sendo lançada na frente. ....	57
Gráfico 4 - Velocidade do Ensaio 1.....	58
Gráfico 5 - Desaceleração no Ensaio 1 .....	58
Gráfico 6 - Velocidade do Ensaio 2.....	60
Gráfico 7 - Comparação entre a velocidade em função do tempo com 1 esfera e 64 esferas.....	61
Gráfico 8 - Velocidade do Ensaio 3.....	62
Gráfico 9 – Trajetória da esfera sendo lançada do meio. ....	63
Gráfico 10 - Velocidade do Ensaio 1.....	63
Gráfico 11 - Velocidade do Ensaio 2.....	64
Gráfico 12 - Velocidade do Ensaio 3.....	65
Gráfico 13 - Trajetória da esfera sendo lançada de trás. ....	67
Gráfico 14 - Velocidade do Ensaio 1.....	68
Gráfico 15 - Velocidade do Ensaio 2.....	69
Gráfico 16 - Velocidade do Ensaio 3.....	70
Gráfico 17 - Trajetória de 1 esfera sedimentando. ....	72
Gráfico 18 – Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 1 esfera ....	73
Gráfico 19 - Trajetória de 4 esferas sedimentando. ....	73
Gráfico 20 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 4 esferas ....	74
Gráfico 21 - Trajetória de 16 esferas sedimentando. ....	75
Gráfico 22 – Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 16 esferas .	76
Gráfico 23 - Trajetória de 64 esferas sedimentando. ....	77
Gráfico 24 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 64 esferas ..	78
Gráfico 25 - Trajetória de 1 esfera sedimentando. ....	80
Gráfico 26 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 1 esfera.....	81
Gráfico 27 - Trajetória de 4 esferas sedimentando. ....	81
Gráfico 28 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 4 esferas ....	82
Gráfico 29 - Trajetória de 16 esferas sedimentando. ....	83
Gráfico 30 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 16 esferas ..	83
Gráfico 31 - Trajetória de 64 esferas sedimentando. ....	84
Gráfico 32 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 64 esferas ..	85
Gráfico 33 - Trajetória de 1 cilindro sedimentando. ....	87
Gráfico 34 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 1 cilindro ...	87
Gráfico 35 - Trajetória de 4 cilindros sedimentando. ....	90
Gráfico 36 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 4 cilindros .	90
Gráfico 37 - Trajetória de 16 cilindros sedimentando. ....	91
Gráfico 38 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 16 cilindros	92
Gráfico 39 - Trajetória de 64 cilindros sedimentando. ....	93
Gráfico 40 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 64 cilindros	94
Gráfico 41 - Velocidade normalizada em função do número de partículas.....	95
Gráfico 42 - Número de Reynolds em função do número de partículas .....	96
Gráfico 43 - Coeficiente de arrasto em função do número de partículas.....	96
Gráfico 44 - Coeficiente de Arrasto em função de Reynolds .....	97
Gráfico 45 - Comparação da trajetória de 1 partícula: .....	97
Gráfico 46 - Comparação da trajetória de 4 partículas: .....	98

Gráfico 47 - Comparação da trajetória de 16 partículas: .....	98
Gráfico 48 - Comparação da trajetória de 64 partículas: .....	99
Gráfico 49 - Velocidade normalizada em função do número de partículas.....	100
Gráfico 50 - Número de Reynolds em função do número de partículas .....	101
Gráfico 51 - Coeficiente de arrasto em função do número de partículas.....	102
Gráfico 52 - Comparação da trajetória de 1 partícula .....	102
Gráfico 53 - Comparação da trajetória de 4 partículas .....	103
Gráfico 54 - Comparação da trajetória de 16 partículas .....	103
Gráfico 55 - Comparação da trajetória de 64 partículas .....	104
Gráfico 56 - Velocidade Ensaio 1 .....	106
Gráfico 57 - Velocidade Ensaio 2 .....	107
Gráfico 58 - Velocidade Ensaio 3 .....	108
Gráfico 59 - Trajetória de 1 esfera sedimentando. ....	123
Gráfico 60 - Velocidade do Ensaio 2.....	124
Gráfico 61 - Trajetória de 4 esferas sedimentando .....	124
Gráfico 62 - Velocidade do Ensaio 1.....	125
Gráfico 63 - Velocidade do Ensaio 2.....	126
Gráfico 64 - Velocidade do Ensaio 3.....	127
Gráfico 65 - Trajetória de 16 esferas sedimentando .....	128
Gráfico 66 - Velocidade do Ensaio 1.....	128
Gráfico 67 - Velocidade do Ensaio 2.....	129
Gráfico 68 - Velocidade do Ensaio 3.....	130
Gráfico 69 - Trajetória de 64 esferas sedimentando .....	132
Gráfico 70 - Velocidade do Ensaio 1.....	132
Gráfico 71 - Velocidade do Ensaio 2.....	133
Gráfico 72 - Velocidade do Ensaio 3.....	134
Gráfico 73 - Trajetória de 1 esfera sedimentando. ....	137
Gráfico 74 - Velocidade do Ensaio 1.....	138
Gráfico 75 - Trajetória de 4 esferas sedimentando. ....	138
Gráfico 76 - Velocidade do Ensaio 1.....	139
Gráfico 77 - Velocidade do Ensaio 2.....	140
Gráfico 78 - Velocidade do Ensaio 3.....	141
Gráfico 79 - Trajetória de 16 esferas sedimentando. ....	142
Gráfico 80 - Velocidade do Ensaio 1.....	142
Gráfico 81 - Velocidade do Ensaio 2.....	143
Gráfico 82 - Velocidade do Ensaio 3.....	144
Gráfico 83 - Trajetória de 64 esferas sedimentando. ....	145
Gráfico 84 - Velocidade do Ensaio 1.....	146
Gráfico 85 - Velocidade do Ensaio 2.....	147
Gráfico 86 - Velocidade do Ensaio 3.....	148
Gráfico 87 - Trajetória 1 cilindro .....	150
Gráfico 88 - Velocidade Ensaio 1 .....	151
Gráfico 89 - Trajetória 4 cilindros .....	153
Gráfico 90 - Velocidade Ensaio 1 .....	153
Gráfico 91 - Velocidade Ensaio 2 .....	154
Gráfico 92 - Velocidade Ensaio 3 .....	155
Gráfico 93 - Trajetória 16 cilindros .....	156
Gráfico 94 - Velocidade Ensaio 1 .....	156
Gráfico 95 - Velocidade Ensaio 2 .....	157
Gráfico 96 - Velocidade Ensaio 3 .....	159

<b>Gráfico 97 - Trajetória 64 Cilindros .....</b>	<b>160</b>
<b>Gráfico 98 - Velocidade Ensaio 1 .....</b>	<b>160</b>
<b>Gráfico 99 - Velocidade Ensaio 2 .....</b>	<b>161</b>
<b>Gráfico 100 - Velocidade Ensaio 3 .....</b>	<b>162</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados teóricos do pellet .....	43
Tabela 2 - Dados teóricos da esfera .....	44
Tabela 3 - Dados teóricos do cilindro.....	45
Tabela 4 - Propriedades Físicas da água .....	46
Tabela 5 – Configuração dos testes .....	52
Tabela 7 - Dados das velocidades terminais (m/s) para cada teste e para os dois métodos de lançamento (normal e com pinça). Também apresentada a média dos testes e o desvio padrão .....	54
Tabela 8 - Comparação entre as velocidades em relação à posição inicial da esfera.....	56
Tabela 9 - Velocidade terminal (m/s) dos Ensaios .....	71
Tabela 10 - Resultados dos Ensaios das esferas de resina .....	71
Tabela 11 - Velocidade terminal (m/s) dos Testes.....	79
Tabela 12 – Resultado dos testes das esferas .....	80
Tabela 13 - Velocidade terminal (m/s) dos testes.....	86
Tabela 14 – Resultado dos testes dos cilindros.....	86
Tabela 15 - Velocidade terminal média dos Ensaios.....	105
Tabela 16 - Resultado dos Ensaios com bentonita.....	105
Tabela 17 - Dados do experimento .....	118
Tabela 18 - Comparação entre as velocidades terminais obtidas ao gravar ...	119
Tabela 18 - Tabela de custos.....	121

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros dimensionais .....	35
Quadro 2 – Dimensões dos parâmetros da Análise Dimensional.....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil
CSG	Coal Seam Gas
DKT	Drafting, Kissing and Tumbling
FMEA	Análise de Modos de Falha e seus Efeitos
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[m <sup>2</sup> ]
c	Concentração volumétrica das partículas	[%]
C	Coeficiente de atrito da partícula	[-]
C <sub>D</sub>	Coeficiente de Arrasto	[-]
d	Diâmetro da partícula	[m]
D	Diâmetro do tanque	[m]
d <sub>c</sub>	Diâmetro do cilindro	[m]
d <sub>e</sub>	Diâmetro da esfera	[m]
d <sub>eq</sub>	Diâmetro equivalente da partícula	[m]
F <sub>D</sub>	Força de arrasto	[m]
F <sub>E</sub>	Força de empuxo	[N]
F <sub>P</sub>	Força peso	[N]
Fr	Número de Froude	[-]
g	Aceleração gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
Ga	Número de Galilei	[-]
h	Altura da partícula	[m]
m	massa	[kg]
m*	Razão mássica	[-]
n	Expoente para equação de Zaki	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
t*	Tempo normalizado	[-]
V	Velocidade da partícula	[m/s]
v*	Velocidade normalizada	[-]
V <sub>T</sub>	Velocidade terminal	[m/s]
w	Velocidade terminal de uma única partícula	[m/s]
w <sub>m</sub>	Velocidade média das partículas sedimentando	[m/s]
φ	Esfericidade	[-]
μ <sub>f</sub>	Viscosidade dinâmica do fluido	[N·s/m <sup>2</sup> ]
Π <sub>N</sub>	Enésimo grupo adimensional	[-]
λ <sub>N</sub>	Enésimo grupo adimensional	[-]
ρ <sub>f</sub>	Massa específica do fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>p</sub>	Massa específica da partícula	[kg/m <sup>3</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto do Tema</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Caracterização do Problema</b> .....	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>19</b>
1.3.1	Objetivos específicos.....	19
<b>1.4</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>19</b>
<b>1.5</b>	<b>Conteúdo ou Etapas do Trabalho</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Bentonita</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Sedimentação</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise Dimensional</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Fechamento</b> .....	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Partículas</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>Fluido</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Procedimento</b> .....	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>Sistema de liberação</b> .....	<b>47</b>
<b>3.5</b>	<b>Obtenção e tratamento dos dados</b> .....	<b>47</b>
<b>3.6</b>	<b>Configuração dos Testes</b> .....	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Método de lançamento</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2</b>	<b>Escolha da partícula</b> .....	<b>56</b>
4.2.1	Partícula sendo liberada à frente.....	56
4.2.2	Partícula sendo liberada no meio .....	62
4.2.3	Partícula sendo liberada de trás .....	66
<b>4.3</b>	<b>Esferas de Resina</b> .....	<b>71</b>
4.3.1	Sedimentação de 1 Esfera .....	72
4.3.2	Sedimentação de 4 Esferas .....	73
4.3.3	Sedimentação de 16 Esferas .....	75
4.3.4	Sedimentação de 64 Esferas .....	77
<b>4.4</b>	<b>Esferas de Vidro</b> .....	<b>79</b>
4.4.1	Sedimentação de 1 Esfera .....	80
4.4.2	Sedimentação de 4 Esferas .....	81
4.4.3	Sedimentação de 16 Esferas .....	82

4.4.4	Sedimentação de 64 Esferas .....	84
<b>4.5</b>	<b>Cilindros .....</b>	<b>86</b>
4.5.1	Sedimentação de 1 Cilindro .....	87
4.5.2	Sedimentação de 4 Cilindros.....	89
4.5.3	Sedimentação de 16 Cilindros.....	91
4.5.4	Sedimentação de 64 Cilindros.....	93
<b>4.6</b>	<b>Efeito da Razão Mássica .....</b>	<b>94</b>
<b>4.7</b>	<b>Efeito da Geometria da Partícula .....</b>	<b>100</b>
<b>4.8</b>	<b>Estudo de caso .....</b>	<b>104</b>
4.8.1	Pellets de Bentonita.....	105
4.8.2	Comparação .....	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>113</b>
	<b>APÊNDICE A – ERRO DE PARALAXE .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE B – ORÇAMENTO .....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS ESFERAS DE RESINA .....</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS ESFERAS DE VIDRO.....</b>	<b>136</b>
	<b>APÊNDICE E – RESULTADOS CILINDROS DE RESINA.....</b>	<b>149</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

A sedimentação de partículas pode ser descrita como a queda livre de uma partícula em um fluido. É um problema aparentemente simples, mas envolve física complexa e intrigante. A sedimentação de partículas é de grande importância na engenharia e nas ciências naturais, uma vez que esse fenômeno pode ser observado em muitos processos industriais, como perfuração em poços de petróleo, em processos de homogeneização na indústria de alimentos, no transporte de grãos, assim como em alguns fenômenos naturais, como o fluxo de lava, a sedimentação de poluentes, polinização de plantas, entre outros. Portanto, a maioria dos estudos nessa área tem como objetivo identificar padrões de sedimentação e usá-los para a previsão de trajetórias de partículas.

Dando enfoque para a indústria do petróleo e gás, cada vez mais poços atingem o status de esgotado, em outros termos, um poço de extração de petróleo que não é mais rentável ou viável para continuar produzindo petróleo em quantidades significativas, mais atenção tem sido direcionada a fase de abandono.

Segundo a ANP, no Brasil existem no total 30.156 poços sendo 23.205 *on-shore*, que são poços que se encontram em terra, e 6.951 *off-shore*, que são poços que se encontram no mar, até o ano de 2022. Destes, 19,6% foram abandonados permanentemente, isto é, quando não há interesse de retorno ao poço; 21,4% foram abandonados temporariamente e 24,5% foram fechados, ambas condições nas quais há o interesse de um retorno futuro; e 9,2% foram arrasados, que são definidos como os poços que foram abandonados definitivamente e a cabeça do poço foi retirada (ANP, 2023).

Assim, devido ao crescente número de poços de petróleo atingindo a fase de abandono, estudos nessa área se tornam cada vez mais relevantes. E uma das principais aplicações na indústria do petróleo e gás para estudos relacionados a sedimentação de partícula tem sido análises para a utilização de pellets de bentonita como substituto para o cimento Portland, que atualmente é o método mais utilizado.

Porém, o estudo de um grupo de pellets de bentonita sedimentando pode se tornar extremamente complexo devido as diferentes variáveis presentes no fenômeno, tais como: interação entre as diferentes partículas, diferentes fatores de forma, massa específica, concentração, além das propriedades intrínsecas da bentonita como a expansão volumétrica e adesividade.

## 1.2 Caracterização do Problema

O abandono de poços pode ser feito por diversos motivos: esgotamento de seus recursos, inviabilidade econômica, questões operacionais ou até mesmo de segurança.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), ao abandonar um poço de petróleo existem diretrizes e boas práticas a serem seguidas para que ocorra o isolamento correto dos reservatórios para que se evite a contaminação ambiental devido à migração de fluidos para a superfície do terreno ou para o leito marinho (IBP, 2017).

A escolha do material para o fechamento do poço é de vital importância para garantir que seja feito o isolamento correto do reservatório. Atualmente, a principal maneira de realizar esse abandono é por meio do bombeamento de cimento Portland junto de materiais auxiliares dentro do poço para preencher completamente o poço para que não haja vazamentos de gás ou petróleo Tveit (2012).

Porém, ao bombear cimento são encontrados problemas devido à natureza do material. Segundo Tveit (2012), durante o processo de sedimentação o cimento tende a encolher, gerando assim canais internos. Além disso, o cimento é um material frágil, então ao submetê-lo a pressões e tensões não previstas, como um terremoto, podem ser geradas trincas que serviriam de caminho para a fuga dos hidrocarbonetos dos gases presentes nos poços.

Nas últimas décadas, a bentonita surge como uma alternativa viável ao concreto devido as suas características mecânicas e químicas. Segundo Englehardt *et al.* (2001), ao cair no poço de petróleo, a bentonita forma uma barreira geologicamente sadia e impermeável, além disso, ao hidratar, a bentonita continua se conformando com o ambiente por ser um material denso e plástico.

Porém, ao trabalhar com esse material, existe o risco do tamponamento (*plugging*) precoce quando utilizado em poços de petróleo e gás mais profundos. De acordo com Tower *et al.* (2008) o tamponamento precoce consiste na hidratação prematura da bentonita, formando assim os tampões antes de alcançar o fim do poço de petróleo.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento de grupos de partículas, de diferentes tamanhos e massas específicas, sedimentando em água, em especial os pellets de bentonita, que são partículas com potencial de aplicação prática, estudando a influência do número de partículas junto do fator de forma e razão mássica na trajetória e na velocidade de sedimentação.

O estudo consistirá na liberação de diferentes configurações de partículas em um tanque com água, avaliando a influência do número de partículas, massa específica e fator de forma na trajetória e na velocidade.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Consolidar a metodologia, usando esferas de controle;
- Comparar resultados obtidos com diferentes massas específicas;
- Comparar resultados obtidos com diferentes fatores de forma; e
- Analisar a sedimentação do grupo de pellets.

### **1.4 Justificativa**

Devido a bentonita ser um produto nacional, ela possui um custo muito reduzido, além disso, ela é de fácil manejo, não exigindo muitos cuidados para transporte e manuseio e também é mais segura para o meio ambiente. Dessa maneira, é de interesse para a indústria nacional do petróleo e gás sua utilização para os poços de perfuração, mas para isso deve-se analisar a influência da esfericidade, além da quantidade de pellets no cluster de bentonita para que se possa entender o comportamento ao sedimentar e dessa maneira estabelecer um procedimento de uso correto dos pellets para abandono de poços.

### **1.5 Conteúdo ou Etapas do Trabalho**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. O primeiro refere-se à introdução. O segundo aborda a literatura referente a sedimentação, as propriedades da bentonita e fechamento de poços utilizando-a. O terceiro trata

do planejamento das atividades que foram desenvolvidas, detalhando a metodologia. Por sua vez, o quarto capítulo trata dos resultados e discussões e no quinto capítulo encontram-se as conclusões finais, seguidas das Referências e Apêndices.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Atualmente o isolamento do poço é feito principalmente com cimento Portland e outros materiais secundários, porém o cimento possui problemas intrínsecos como a baixa capacidade de absorção de choque, tendência de encolher ao reagir com água, além de exigir um bombeamento de alta pressão para realizar o fechamento do poço, fazendo que o processo seja caro e custoso energeticamente além do processo ter um impacto ambiental significativo. Dessa forma, a argila chamada bentonita tem aparecido como alternativa para esse processo de fechamento de poços devido sua capacidade de se readaptar ao ser solicitado mecanicamente, a baixa permeabilidade a gases, a menor pegada de carbono, que é o indicador que quantifica as emissões de gases de efeito estufa do processo, entre outros.

Em 1999, devido ao aumento do número de abandono nos poços de petróleo, a Chevron-Texaco iniciou pesquisas para usar bentonita como alternativa para fechar permanentemente poços de petróleo, e nessa pesquisa o objetivo era identificar um processo para reduzir os custos de abandono em 30% (Clark e Salsbury, 2003). Clark e Salsbury (2003) realizaram experimentos em um poço de petróleo na ilha de *Barrow*, na Austrália, que é um local que é reconhecido como uma das áreas ambientais mais sensíveis e protegidas da Austrália, porém, também abriga a maior reserva de petróleo do Oeste australiano. Esse estudo chegou à conclusão que a bentonita se mostrou um bom material para realizar o abandono do poço de petróleo, que os custos em abandono na ilha de *Barrow* poderia ser reduzida em mais de 50%, e que em futuros fechamentos a bentonita pode ser o material de escolha.

Idialu *et al.* (2004), avaliaram o uso de bentonita para o fechamento de poços de petróleo e seus benefícios econômicos e ambientais. O estudo foca nos poços de petróleo em pântanos na região Delta do rio Niger, na Nigéria. O estudo chega as conclusões que comparado ao fechamento de poços com cimento, a utilização de bentonita diminui a pegada de carbono do processo; não houve a necessidade de adição de químicos; a diferença pressão de teste foi mínima ou nenhuma, ou seja não era necessária o acréscimo de pressão como é feito com o cimento; a bentonita se manteve flexível diminuindo o risco de falhas na superfície dos tampões por movimentação, dando como resultado uma

excelente performance da bentonita e perfilando-a como o material para futuros fechamentos de poços na Nigéria.

Um estudo feito por Holl (2019), também investigou o uso de bentonita para o abandono de poços de petróleo. Para examinar o comportamento da bentonita em poços de petróleo, foram realizados experimentos com diferentes combinações de diâmetro do poço com gradiente de pressão, esse causado pelo bombeamento, na tubulação vertical. Por fim, chegou-se à conclusão que o uso da bentonita pode ser feito com segurança em diferentes tipos de poços, sejam eles poços de exploração de carvão, poços CSG, que são poços de gás natural de jazidas de carvão, poços de petróleo submersos ou poços de petróleo terrestres.

Corina *et al.* (2022) fizeram experimentos para avaliar as propriedades de cisalhamento em tampões de bentonita em diferentes configurações. Nesse estudo caracterizaram a interface de cisalhamento variando as condições do fluido e materiais adjacentes, isto é, materiais que estão em contato com o fluido e com os tampões de bentonita, tais aço e rochas. Por fim, chegaram à conclusão de que um tampão de bentonita com comprimento entre 15 e 43 metros e diâmetro entre 7 5/8" e 13 3/8" seria suficiente para cumprir o requisito mínimo da regulamentação holandesa para materiais de isolamento de poços de petróleo.

Pivovarski (2022) fez um estudo numérico analisando o uso de pellets de bentonita como material primário para o abandono de poços de petróleo e gás. Nesse trabalho pode-se concluir que a formação de tampão prematuro tende a ocorrer quando há uma vazão mássica grande, 5kg/s, ou o uso de pellets de bentonita pequenos, 5mm à 10mm. Dessa forma aumentando o tamanho dos pellets pode ajudar a reduzir a formação de tampões prematuros.

Outro fator que influencia na formação precoce dos tampões é a temperatura da água, caso esteja quente, a cinética da hidratação da bentonita ocorrerá mais rápido devido à redução da viscosidade do fluido além do aumento da velocidade terminal da partícula (Towler, 2016).

Segundo Englehardt *et al.* (2001), a capacidade de hidratação da bentonita e suas características de inchaço rápido (10-25 vezes seu tamanho original) apresentaram problemas de obstrução para a colocação em profundidade em um poço, ou seja, formam os tampões precocemente.

Historicamente, foram utilizados na indústrias diferentes soluções ao longo do tempo para realizar o fechamento dos poços visando evitar a hidratação precoce da bentonita:

- Bombeada como uma capsula viscosa;
- Despejada com um tubo de papelão;
- Em combinação com cimento;
- Alimentada por gravidade; e
- Bombeada em um plugue de diesel.

Segundo Clark e Salsbury (2003), a bentonita era amplamente usada na indústria de petróleo e gás, porém não para o abandono permanente de poços, mas sim como ligante para o cimento. Isso se devia principalmente à dificuldade associada à colocação precisa no fundo do poço, causado pela hidratação prematura. O histórico de pesquisa demonstrou que uma maneira de garantir uma colocação precisa poderia ser usando nódulos de bentonita de sódio altamente comprimidos, que teoricamente poderiam cair livremente até a profundidade desejada através do óleo ou água no poço.

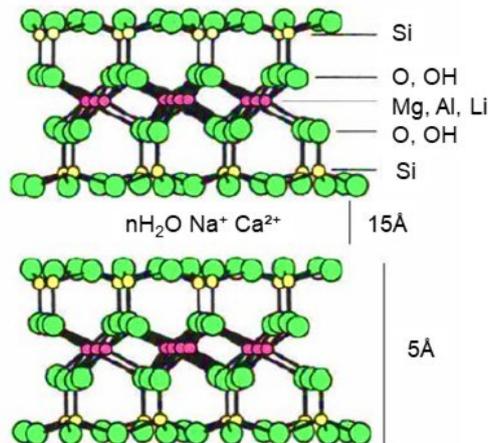
Para esse estudo, não serão utilizados os nódulos de bentonita, serão utilizadas partículas cilíndricas, ou pellets, pois, por serem um produto nacional, possuem um custo reduzido, fazendo com que sua aplicação seja mais vantajosa.

## **2.1 Bentonita**

De acordo com Luz e Oliveira (2005) a bentonita pode ser definida como uma rocha que possui as características de um mineral formado pela desvitrificação de um material ígneo e vítreo, como uma cinza vulcânica, porém é composta majoritariamente por argila cristalina, a montmorilonita.

A estrutura cristalina da montmorilonita, mostrada na Figura 1, é composta por duas placas tetraédricas de silício, separadas por uma folha central de alumina, e as três folhas são unidas por átomos de oxigênio (Silva e Ferreira, 2008).

**Figura 1 - Estrutura cristalina da montmorilonita.**

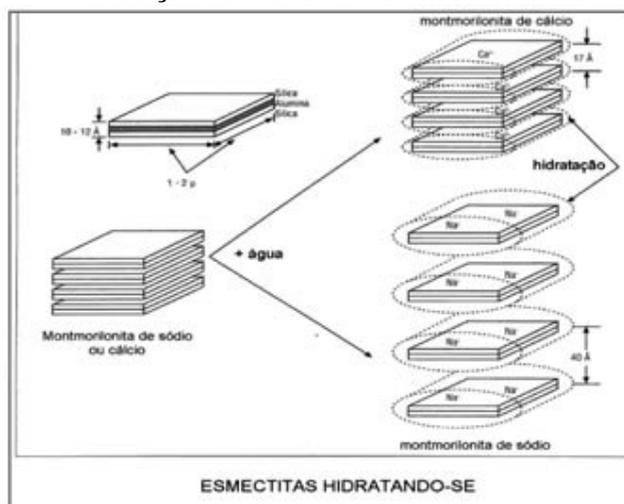


Fonte: Adaptado de Silva e Ferreira (2008).

Segundo Silva e Ferreira (2008), ao expor as lamelas de montmorilonita à água, ocorre a absorção da água pela superfície das folhas de sílica, que se separam uma da outra. Tal comportamento é conhecido como inchamento interlamelar e se deve ao cátion associado a estrutura da argila, esse cátion pode ser sódio ou cálcio.

Na Figura 2, é possível comparar a diferença entre a hidratação das argilas cálcicas e das argilas sódicas.

**Figura 2 - Hidratação da montmorilonita de cálcio e de sódio.**



Fonte: Silva e Ferreira (2008)

Na Figura 2, é possível comparar a diferença entre a hidratação das argilas cálcicas e das argilas sódicas. Se o cátion for sódio, na hidratação, a distância entre as placas de sílica pode chegar a 40 Angstrom quando a argila estiver totalmente inserida no meio, em outros termos, possui um alto grau de inchamento ao ser hidratada. Já para o cátion de cálcio, a absorção de água é

limitada e a distância pode chegar à 17 Angstrom, hidratando de maneira mais moderada (Silva e Ferreira, 2008).

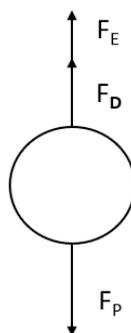
De acordo com Clem e Doehler (1961), a bentonita possui diversas propriedades interessantes química e industrialmente falando, tais como: propriedades adesivas, uma mistura de água e bentonita pode ser altamente plástica. Uma mistura de água e bentonita possui um escoamento dependente do tempo, isto é, possui tixotropia, dessa forma após a mistura dos dois, a viscosidade plástica e tensão de escoamento diminuirão por um período, porém, ao serem deixadas em repouso, retornarão aos valores iniciais (Luckham e Rossi, 1999).

Além de ser utilizada para o fechamento de poços de petróleo, como citado anteriormente, a bentonita possui diversas outras aplicações. De acordo com Luz e Oliveira (2005), ela pode ser utilizada como agente tixotrópico em fluidos de perfuração tendo como função refrigerar e limpar a broca; na pelotização de minérios de ferro, sendo usada como aditivo para promover uma ligação entre as partículas de ferro; como aglomerante de areias de moldagem usadas em fundição, servindo como ligante para promover a aglutinação da areia; entre outros.

## **2.2 Sedimentação**

A sedimentação é o processo pelo qual partículas sólidas em suspensão em um fluido, seja ele líquido ou gasoso, se depositam gradualmente devido à ação da gravidade. Segundo Luz *et al.* (2010), a sedimentação pode ocorrer quando têm como forças atuantes na partícula a força da gravidade, a força de empuxo e a força de arrasto. Quando se têm essas três forças agindo, ou seja, há a resistência do fluido, a partícula acelerará até atingir a velocidade terminal.

A velocidade terminal, ou melhor, a velocidade máxima e constante que a partícula atinge ao sedimentar em um fluido, é obtida pelo levantamento das forças motrizes e de resistência ao movimento, que neste momento são equivalentes, em outras palavras, o somatório das forças atuando sobre a partícula, que pode ser visualizado na Figura 3, é nulo.

**Figura 3 – Forças na partícula.**

**Fonte: Autoria Própria (2019)**

Quando uma partícula é submetida a sedimentação em um fluido viscoso, ou seja, onde o atrito entre fluido e partícula tem importância considerável na força de resistência ao movimento, e ao considerar o meio infinito, em outros termos, desprezando os efeitos de parede, sob o efeito gravitacional, ela acelera até que o equilíbrio entre as forças de peso,  $F_P$ , de arrasto,  $F_D$ , e de empuxo,  $F_E$ , seja atingido.

Estudos nesta área têm como objetivo identificar padrões, que possibilitem a previsão de fenômenos. Com isto, a partir do conhecimento do tipo de fluido, das condições do escoamento, do particulado envolvido, torna-se possível prever o processo de sedimentação e conseqüentemente avaliar qual a altura de leitos de cascalho em escoamentos de fluidos de perfuração, por exemplo.

A literatura é vasta em estudos relacionados à sedimentação, como por exemplo Song *et al.* (2017), que tinham como objetivo propor um novo modelo para prever o coeficiente de arrasto e a velocidade de sedimentação de partículas em um fluido newtoniano. Nesse trabalho, utilizaram-se de um tanque circular de Plexiglas® com 200mm de diâmetro e 1500mm de comprimento, além de utilizar uma câmera de alta velocidade para obter os dados do experimento. Como parâmetros de interesse, foram variados a geometria da partícula, utilizando esferas, cilindros e cubos, também variaram o fluido utilizado, utilizando três soluções de água e glicerina com diferentes concentrações.

Assim como Song *et al.* (2017), Reynolds *et al.* (1989) também realizaram experimentos em condições similares, porém com o objetivo de analisar a velocidade de sedimentação de partículas em diversos fluidos. Nesse estudo foram utilizadas partículas com diferentes tamanhos e massas específicas,

verificando assim a influência desses fatores na velocidade terminal dessas esferas sedimentando em um fluido *Power Law*, concluindo que:

- Para que a sedimentação da partícula não seja submetida à uma taxa de cisalhamento efetiva que se aproxime ou esteja dentro da primeira região de viscosidade newtoniana do fluido, é importante que o número de Reynolds da partícula não seja maior que 0,1, o que impôs uma restrição significativa na fase de validade da análise experimental;
- Experimentos mostram que, se as velocidades de assentamento de partículas esféricas (com números de Reynolds abaixo de 10) puderem ser descritas teoricamente, uma aproximação razoável para partículas irregulares, de densidade semelhante e volume esférico equivalente, pode ser feita.

Elgaddafi *et al.* (2012) também realizaram estudos experimentais de forma similares para observar o comportamento de sedimentação em fluidos de perfuração. Sua configuração experimental consistia em um cilindro com 10cm de diâmetro e 2m de comprimento, eles utilizaram 4 diferentes fluidos e esferas de vidro com diâmetro variando entre 2 e 8mm. As principais conclusões desse estudo foram que:

- Partículas de fibras uniformemente dispersas em fluidos impedem o movimento e reduzem substancialmente a velocidade de sedimentação de partículas. No entanto, à medida que a concentração de fibras aumenta, a desaceleração da velocidade de sedimentação diminui.
- A concentração de fibras (até 0,08% em peso) tem um efeito negligenciável nas propriedades reológicas tanto do óleo mineral quanto da água viscosificada com celulose polianiónica. Como resultado, partículas tão pesadas quanto vidro e tão grandes quanto 8 mm podem ser suspensas sem modificar o comportamento do fluxo desses fluidos.
- A resistência ao arrasto das fibras está fortemente relacionada com a concentração de fibras, a velocidade de assentamento e as propriedades físicas do fluido e da partícula.
- Partículas suspensas em fluidos contendo fibras apresentam uma força de arrasto adicional tanto em condições estáticas quanto dinâmicas.

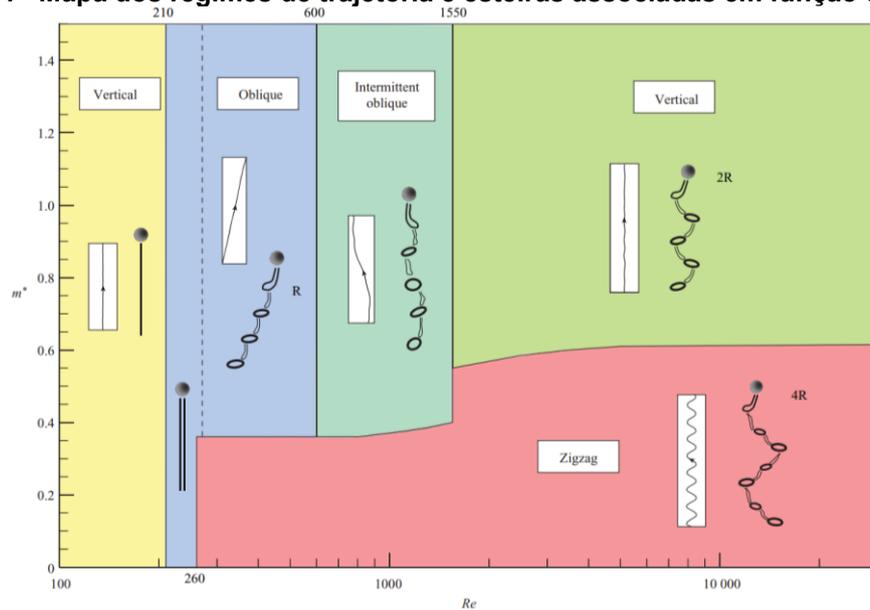
- A correlação desenvolvida nesta investigação proporciona uma previsão razoável da velocidade de sedimentação e da força ao arrasto das fibras em fluidos de varredura de perfuração que contêm fibras.

Dogonchi *et al.* (2015) fizeram uma análise numérica de partículas esféricas e não esféricas sedimentando em fluido newtoniano em condições transientes. Em seus resultados são encontradas concordâncias entre as simulações e o método numérico da aproximante de Pandé, que consiste em uma técnica de aproximação que se aproxima de um ponto por meio de funções racionais. Esse estudo se torna interessante pois é possível avaliar detalhadamente aceleração e trajetória das partículas, sendo possível entender que:

- A esfericidade da partícula aumenta a magnitude da velocidade e da aceleração da partícula;
- Aumentar a massa específica da partícula só aumenta a aceleração se o tempo de aceleração for menor que 0,108 segundos, caso esse valor seja superior, aumentar a massa específica da partícula resultará em uma aceleração menor.

Horowitz e Williamson (2010) fizeram um estudo experimental da influência do número de Reynolds (numa faixa de 100 a 1500) na dinâmica de queda livre ou ascensão de partículas esféricas em fluidos, foram 133 combinações de  $Re$  e razão de massas específicas. Nesse trabalho são encontrados resultados interessantes de como um mapa de dinâmica de movimento onde é possível contemplar as zonas onde a esfera sedimenta, ou ascende, de forma vertical, oblíqua, intermitente ou em *zigzag* como é possível observar na Figura 4:

**Figura 4 - Mapa dos regimes de trajetória e esteiras associadas em função de  $Re$  e  $m^*$**



**Fonte: Horowitz e Williamson (2010)**

Assim como Horowitz e Williamson (2010), Veldhuis e Biesheuvel (2007) apresentaram uma investigação experimental do regime de movimento de esferas em queda livre ou ascensão. Os resultados desse estudo foram divididos sete casos diferentes, apresentando os regimes obtidos para cada número de Galileu e partícula testada. Nesse estudo eles verificam as conclusões apresentadas por Jenny et al. (2003) para esse fenômeno e concluem que os resultados dos estudos possuem concordância para os comportamentos categorizados em função do número de Galileu e razão mássica.

Com a proposta de investigar a relação entre a esfericidade, ou a forma da partícula, e as propriedades reológicas do fluido Eltilib *et al.* (2011) utiliza um modelo de Power Law para representar o fluido de perfuração com cascalhos sedimentando. Em seus resultados são descritas as influencias na velocidade terminal do tamanho de partícula, esfericidade e da viscosidade do fluido utilizado:

- Um leve aumento na massa específica do fluido pode reduzir a velocidade de sedimentação da partícula;
- Partículas menores atingem velocidades terminais menores;
- A velocidade de sedimentação é acrescida com o aumento do valor da esfericidade, proposta por Wadell (1933).

- Em fluidos mais viscosos, a sedimentação das partículas tende a apresentar um movimento, mesmo para esferas maiores e de maiores esfericidades, dessa forma, é recomendado que as partículas quando forem ser transportadas horizontalmente, sejam transportadas em um fluido com um coeficiente de consistência maior, para que a sedimentação da partícula não atrapalhe o movimento

Wang *et al.* (2014), apresentam um estudo numérico sobre o movimento de duas partículas esféricas com diferentes tamanhos em um fluido newtoniano. O objetivo principal do estudo é analisar o processo de aproximação entre as partículas, incluindo o efeito da força de arrasto, a distância inicial entre as partículas e as diferenças de tamanho entre elas. Esse estudo chega a interessantes conclusões:

- A velocidade de aproximação das partículas é afetada pela distância inicial entre elas;
- O processo de *drafting*, que pode ocorrer quando duas partículas sedimentam de forma alinhada, formando uma trilha. Nesse fenômeno, a partícula menor é puxada pela maior, o que resulta em uma redução na distância entre as partículas.
- Após ocorrer o *drafting*, as partículas se aproximam tanto que chegam a se tocar, processo definido como *kissing*. As partículas entram em contato e são atraídas uma pela outra devido à força de van der Waals.
- *Tumbling* é um comportamento em que as partículas sedimentam de forma desordenada e aleatória, sem um alinhamento específico. Durante o processo de *tumbling*, as partículas giram em torno de um eixo que passa pelas suas superfícies.

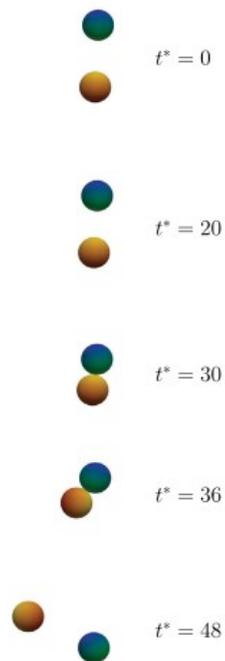
Ardekani *et al.* (2016) apresentaram um estudo numérico sobre a sedimentação de partículas esferoidais em um fluido viscoso e também a interação entre pares de partículas esferoidais através do método de limite imerso, que é um método numérico utilizado para simular o movimento de objetos imersos em um fluido. As simulações realizadas mostraram que no número de Galileu crítico, que é baseado no diâmetro equivalente da partícula, o início dos movimentos secundários diminui conforme a proporção dos diâmetros dos esferoides se afasta de 1. Acima desse limite crítico os esferoides

apresentam uma dinâmica de movimento em *zigzag* enquanto rotacionam ao redor do eixo vertical.

As principais conclusões desse estudo foram:

- A instabilidade da trajetória e da esteira tornam-se mais acentuada no caso de uma partícula não esférica, pois a orientação desempenha um papel na dinâmica do problema.
- A partícula que está atrás é atraída pela esteira da que está à frente e vai em sua direção com velocidade crescente (*drafting*), até que entrem em contato (*kissing*). As partículas em contato formar um corpo longo com seu eixo maior paralelo à gravidade, tal orientação é instável, pois um corpo longo tende a cair com seu eixo maior perpendicular à direção de sedimentação, dessa forma as duas partículas se desarranjam (*tumbling*).
- Ao examinar *Drafting-Kissing-Tumbling* (DKT), Figura 5, de pares de partículas não esféricas em  $Ga = 80$  e  $\rho_p/\rho_f = 1,14$ , começando com sua orientação estável, ou seja, o eixo maior ortogonal a gravidade, concluíram que a fase de *tumbling* desaparece no caso de duas partículas achatadas.
- Em geral, para corpos não esféricos, a partícula posterior é atraída mais rapidamente (em termos de redução da distância horizontal entre os centros) para a esteira da partícula líder.
- Os resultados deste estudo mostram que os esferoides sedimentando são atraídos um pelo outro a partir de distâncias mais longas e permanecem em contato por um tempo consideravelmente mais longo depois de colidirem do que as esferas.

**Figura 5 - Mecanismo de Drafting, Kissing e Tumbling ao longo do tempo**



**Fonte: Ardekani et al. (2016)**

Com o objetivo de analisar a interação de duas partículas sedimentando na linha de centro de um fluido Borger, Bot *et al.* (1998) fizeram um estudo experimental que consistia em formular um fluido Borger com água, poliacrídica e goma xantana em diferentes concentrações, depois colocaram esferas com diferentes massas específicas para sedimentar. Após o tratamento dos dados, os autores verificaram que a interação hidrodinâmica é significativa e pode afetar a trajetória e a velocidade de cada partícula, além de ser mais complexa em um fluido viscoelástico do que em fluidos newtonianos, também concluindo que várias partículas sedimentando tem uma velocidade maior do que uma única partícula sedimentando.

Tao *et al.* (2017), fizeram um estudo numérico utilizando um modelo tridimensional lattice Boltzman para analisar a sedimentação de uma e múltiplas partículas sedimentando. A análise foi realizada variando o número de partículas, diâmetros e condições de deslizamento. Os autores chegaram à conclusão que a presença de múltiplas partículas escorregadia, que são partículas sólidas com um revestimento que permite que a mesma se mova mais facilmente pelo fluido, na sedimentação em um fluido newtoniano aumenta a resistência hidrodinâmica e leva a uma sedimentação mais lenta. Comparando com as partículas não-escorregadias, as partículas escorregadias sedimentam mais lentamente e a

presença de múltiplas partículas escorregadias aumenta ainda mais essa resistência hidrodinâmica. Isso ocorre devido ao efeito de bloqueio das partículas, que impede o escoamento do fluido ao redor das partículas e aumenta a área de contato entre elas.

O artigo de Verjus *et al.* (2016) apresenta uma análise numérica do processo de sedimentação de duas partículas esféricas em um canal vertical em baixos números de Reynolds. Os autores demonstram que a sedimentação pode resultar em múltiplos estados e rotas para o caos, e que o comportamento da sedimentação é influenciado pelas condições iniciais, pelas dimensões do canal e pela razão de tamanho das partículas. Os resultados indicam que o comportamento caótico é mais provável de ocorrer em canais mais estreitos e com partículas de tamanhos similares.

Outro campo de estudo importante na sedimentação, é a sedimentação multipartículas, também conhecida como sedimentação impedida, ou obstruída. O termo sedimentação impedida, ou *hindered settling*, refere-se ao processo no qual partículas em suspensão, ao se assentarem em um fluido, fazem-no a uma taxa reduzida devido à presença e interação com outras partículas (Talmage e Fitch, 1993).

Richardson e Zaki (1954), descrevem um método para calcular a velocidade de sedimentação de partículas baseado na concentração das partículas no fluido, pois não era praticável fazer a medição dos dados em altas concentrações. A equação proposta nesse trabalho tem sido utilizada de base para diversas pesquisas subsequentes na área:

$$\frac{w_m}{w} = (1 - c)^n \quad (1)$$

Onde  $w_m$  é a velocidade média das partículas sedimentando,  $w$  é a velocidade terminal de uma única partícula sedimentando,  $c$  é a concentração volumétrica das partículas no fluido e  $n$  é um expoente, determinado empiricamente, que representa a redução da velocidade terminal. Porém, diversos estudos experimentais como Kumbhakar *et al.* (2017), Cheng (1997) e Pal e Ghoshal (2013), verificaram que a velocidade  $w_m$  é menor do que a equação propõe.

O artigo de Cheng (1997) também aborda os efeitos da concentração de partícula na velocidade terminal. Nesse estudo também é proposto uma relação

para calcular a velocidade de sedimentação que possuem concordância com os dados experimentais obtidos, além de propor que o expoente  $n$  da Equação (1) não depende apenas do número de Reynolds da partícula, mas também da concentração de partículas no fluido.

Fortes *et al.* (1987) apresentaram um estudo experimental sobre a fluidização de esferas de vidro sedimentando em água dentro de uma coluna com seção retangular. Nesse trabalho eles afirmam que dois mecanismos locais estão presentes: *Drafting-Kissing-Tumbling* e arranjos perpendiculares ao escoamento estáveis. Esse estudo se torna interessante pois é possível avaliar a influência do DKT e do efeito de parede em sedimentação de várias partículas:

- O efeito estabilizador do atrito na parede é responsável pelo maior  $Re$  no inclinado canal, mas as evidências mostram que os mecanismos de *drafting*, *kissing* e *tumbling* não são afetados nem pela inclinação nem pelos efeitos da parede. De um modo geral, a dinâmica nas regiões próximas à parede não é dominada inercialmente. Assim, as interações das partículas perto da parede não podiam ser controladas pela sucção inercial. As paredes podem ter um importante efeito quantitativo no arrasto friccional sem alterar o equilíbrio qualitativo com forças opostas associadas à sucção inercial.
- A dinâmica de leitos de partículas fluidizadas por água em moderados e altos números de Reynolds, são dominados por mecanismos locais associados a esteiras
- *Drafting*, *kissing* e *tumbling* parece ser o principal mecanismo de rearranjo na fluidização de leitos de esferas com água.
- Partículas longas alinham-se lateralmente no fluxo em longos arranjos de partículas únicas. A instabilidade de pares de partículas que se encostaram e a relativa a estabilidade de pares cruzados (dupletos) parece desempenhar um papel importante na agregação.

Ulmann e Doychev (2014), apresentaram um estudo numérico sobre a sedimentação de esferas rígidas em números de Galileu intermediário, avaliando o efeito do agrupamento de partículas sobre seu movimento. Para isso, foi simulado uma sedimentação distribuída aleatoriamente, com partículas pesadas

focando em uma razão mássica de 1,5, além de um volume de sólido de 0,5%. E concluíram que:

- Considerando esferas isoladas à  $Ga=121$  e  $Ga=178$ , as esferas sedimentaram em uma trajetória retilínea e oblíqua, respectivamente.
- No caso multipartícula, em valores mais altos do número de Galileu, foi constatado um forte agrupamento de partículas na forma de regiões colunares verticalmente alongadas.
- Em número de Galileu menores o arranjo de partículas encontrado no presente estudo pode, na verdade, ser caracterizado como um pouco mais ordenado do que uma distribuição de Poisson.
- No caso multipartícula, foi constatado que 30% das partículas estão na região de aglomerados em dado instante do tempo, e que seu tempo de residência tanto em aglomerados quanto em regiões vazias é longo em comparação com a escala de tempo gravitacional.

### 2.3 Análise Dimensional

Para que se possa ter uma melhor compreensão do experimento, é necessário variar parâmetros e analisar sua influência no fenômeno. Devido à dificuldade em variar todos os parâmetros existentes nos experimentos são realizadas as análises dimensionais, que consistem em um método que reduz a quantidade de variáveis à grupos adimensionais, fazendo com que haja economia de tempo e recursos, além de permitir que experimento com diferentes propriedades cheguem a um resultado semelhante desde que mantenham o mesmo valor para esse grupo adimensional (White, 2004).

Dessa maneira, foram definidos os parâmetros dimensionais para realizar a análise dimensional do experimento:

**Quadro 1 – Parâmetros dimensionais**

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Diâmetro da partícula	$d$	m
Massa específica da partícula	$\rho_p$	$\text{kg/m}^3$
Massa específica do fluido	$\rho_f$	$\text{kg/m}^3$
Viscosidade do fluido	$\mu_f$	$\text{N.s/m}^2$
Aceleração gravitacional	$g$	$\text{m/s}^2$
Velocidade da partícula	$V$	m/s
Diâmetro do tanque	$D$	m

Força de arrasto	$F_D$	N
------------------	-------	---

Fonte: Autoria Própria (2023)

Posteriormente, definiu-se que o sistema para realizar a análise dimensional seria o MLT, onde as dimensões primárias são massa, comprimento e tempo. Essa definição é necessária para listar as dimensões de todos os parâmetros dimensionais em função das dimensões primárias fundamentais do sistema, como é possível observar no Quadro 2:

**Quadro 2 – Dimensões dos parâmetros da Análise Dimensional**

d	$\rho_p$	$\rho_f$	$\mu_f$	g	V	D	$F_D$
L	$ML^{-3}$	$ML^{-3}$	$ML^{-1}T^{-1}$	$LT^{-2}$	$LT^{-1}$	L	$MLT^{-2}$

Fonte: Autoria Própria (2023)

Definido o número de parâmetros: 8, o próximo passo é definir parâmetros repetentes, que servirão para adimensionalizar os parâmetros de interesse nos grupos adimensionais, isto é, a quantidade deles depende da quantidade de dimensões primárias existentes nos parâmetros dimensionais, nesse caso serão necessários três parâmetros repetentes.

Os parâmetros escolhidos foram o diâmetro da partícula, a massa específica do fluido e a velocidade da partícula. Assim, possuindo 8 parâmetros dimensionais e 3 parâmetros repetentes, serão formados 5 grupos adimensionais.

$$\Pi_1 \rightarrow (d^a, \rho_f^b, V^c) D$$

$$L^a \times M^b L^{-3b} \times L^c T^{-c} \times L^1 = L^0 M^0 T^0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} a - 3b + c + 1 = 0 \\ b = 0 \\ -c = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a &= -1 \\ b &= 0 \\ c &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Pi_1 = \frac{d}{D} \quad (5)$$

Esse grupo adimensional é conhecido como razão de diâmetros, importante parâmetro na hora de verificar a influência do efeito de parede na sedimentação.

$$\Pi_2 \rightarrow (d^d, \rho_f^e, V^f) \rho_p$$

$$L^d \times M^e L^{-3e} \times L^f T^{-f} \times M^1 L^{-3} = L^0 M^0 T^0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} d & -3e & +f & -3 & = 0 \\ & e & & +1 & = 0 \\ & & -f & & = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} d &= 0 \\ e &= -1 \\ f &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho_p}{\rho_f} = m^* \quad (9)$$

Esse grupo adimensional é conhecido como razão entre as massas específicas, ou razão mássica.

$\Pi_3 \rightarrow (d^g, \rho_f^h, V^i) \mu_f$

$$L^g \times M^h L^{-3h} \times L^i T^{-i} \times M^1 L^{-1} T^{-1} = L^0 M^0 T^0 \quad (10)$$

$$\begin{cases} g & -3h & +i & -1 & = 0 \\ & h & & +1 & = 0 \\ & & -i & -2 & = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} g &= -1 \\ h &= -1 \\ i &= -1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Pi_3 = \frac{\mu_f}{\rho_f V d} \quad (13)$$

Esse grupo adimensional é razão entre as forças viscosas e as forças de inércias, ao elevar à -1, é encontrado como número de Reynolds.

$$\Pi_3^{-1} = \lambda_1 = Re_D = \frac{\rho_f V d}{\mu_f} \quad (14)$$

O número de Reynolds é a razão entre as forças inerciais e viscosas, caso ele se apresentar grande, o escoamento será turbulento, ou seja, as forças predominantes nele serão as forças de inércia, caso seja pequeno, as forças viscosas se sobrepõem às inerciais e o escoamento é laminar (Fox *et al.*, 2001).

Assim, ao observar a equação 14, é possível ver que ela é composta por quatro parâmetros do escoamento: a massa específica,  $\rho_f$ , e a viscosidade dinâmica do fluido,  $\mu_f$ , e a velocidade da partícula,  $V$ , e o diâmetro da partícula,  $d$ . Dessa maneira, variando um deles, é possível verificar como modelos dinamicamente semelhantes se comportam.

$\Pi_4 \rightarrow (d^d, \rho_f^e, V^f) g$

$$L^j \times M^k L^{-3k} \times L^l T^{-l} \times L^1 T^{-2} = L^0 M^0 T^0 \quad (15)$$

$$\begin{cases} j - 3k + l + 1 = 0 \\ k = 0 \\ -l - 2 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} j &= 1 \\ k &= 0 \\ l &= -2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\Pi_4 = \frac{dg}{V^2} \quad (18)$$

Esse grupo adimensional é a razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade, ao elevar à -2, é encontrado como número de Froude:

$$\Pi_4^{-2} = \lambda_2 = Fr_D = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (19)$$

$\Pi_5 \rightarrow (d^m, \rho_f^n, V^o) F_D$

$$L^m \times M^n L^{-3n} \times L^o T^{-o} \times M^1 L^1 T^{-2} = L^0 M^0 T^0 \quad (20)$$

$$\begin{cases} m - 3n + o + 1 = 0 \\ n + 1 = 0 \\ -o - 2 = 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} m &= 2 \\ n &= -1 \\ o &= -2 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\Pi_5 = \frac{F_D}{d^2 \rho_f V^2} \quad (23)$$

Esse grupo adimensional ao ser multiplicado por  $\pi/8$ , é denominado como o coeficiente de arrasto:

$$\Pi_5 \times \frac{\pi}{8} = \lambda_3 = C_D = \frac{2F_D}{\rho_f V^2 A} \quad (24)$$

Para relacionar as forças de gravitacionais e viscosas, pode-se multiplicar diferentes números adimensionais:

$$\lambda_4 = \lambda_1^2 \times \Pi_4 = \frac{\rho^2 d^3 g}{\mu_f^2} = Ga \quad (25)$$

Esse número adimensional é conhecido como número de Galilei. O número de Galilei, também encontrado como número de Arquimedes na literatura, que é a relação entre as forças gravitacionais e as forças viscosas, ele é usado para determinar se a força inercial domina ou não as forças viscosas em um sistema. Quando o número de Galilei é baixo, as forças viscosas têm um efeito significativo e o escoamento é mais lento e viscoso. Por outro lado, quando o número de Galilei é alto, as forças inerciais são dominantes e o escoamento é mais rápido e dinâmico (Kuwagi *et al.*, 2014).

Na equação 25, é possível observar os parâmetros referentes as forças gravitacionais: a massa específica do fluido,  $\rho_f$ , e a aceleração da gravidade,  $g$ , além dos parâmetros referentes as forças inerciais: a massa específica do fluido,  $\rho_f$ , e a viscosidade dinâmica do fluido,  $\mu_f$ , e o diâmetro da partícula,  $d$ .

Dessa maneira, serão variados os comprimentos característicos, variando assim o  $Re$  e o  $Ga$ , além de variam também a quantidade de partículas nos experimentos para analisar a influência dos mesmos no escoamento.

## 2.4 Fechamento

Nesse capítulo foi feita uma revisão bibliográfica acerca da sedimentação de pellet de bentonita, primeiro abordando possíveis aplicações e limitações em seu uso, principalmente o tamponamento precoce. Posteriormente descreveu-se a bentonita e suas propriedades, demonstrando o porquê o uso dela ser de interesse na indústria brasileira do petróleo e gás. Além disso, foi realizada uma análise dimensional com parâmetros importantes do experimento, para que dessa forma fosse possível encontrar parâmetros adimensionais que pudessem representar os resultados encontrados.

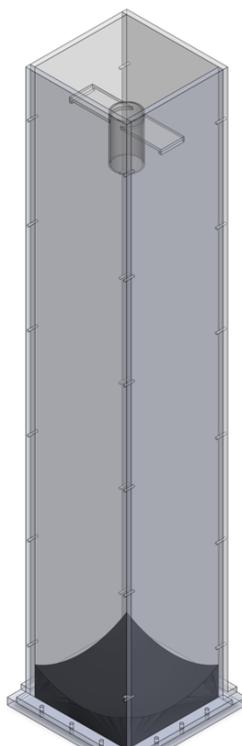
Dessa maneira, estudos como o de Wang *et al.* (2014), Verjus *et al.* (2016), Ardekani *et al.* (2016), Fortes *et al.* (1987) e Ulmann e Doychev (2014), ilustram os efeitos entre as partículas que serão apresentados ao serem realizados os testes. Já os trabalhos de Eltilib *et al.* (2011) e Dogonchi *et al.* (2015) elucidam os impactos que a não-esfericidade dos pellets apresentaram. Horowitz e Williamson (2010) e Veldhuis e Biesheuvel (2007) fornecerem categorizações do movimento da partícula ao sedimentar, dessa maneira, serão de grande importância para estimar o comportamento dos pellets de bentonita ao sedimentar.

Por fim, tais referências auxiliaram na elaboração da metodologia e na compreensão da cinética da sedimentação de uma ou mais partículas, para que fosse possível classificar e compreender os comportamentos que serão observados ao realizar os experimentos.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização dos experimentos foi utilizado um tanque de acrílico de seção quadrada interna de 20x20cm e uma altura de 1,2m, ilustrado pela Figura 6:

**Figura 6 - Tanque utilizado para os experimentos**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Nele foi instalado uma válvula de esfera de  $\frac{3}{4}$ " de aço inox no fundo do tanque e além de um fundo semiesférico para facilitar a remoção das partículas ao fim do experimento. A fixação das paredes com a base foi feita através de parafusos e um anel de vedação, já a fixação entre as paredes foi realizada por meio de cola para acrílico e parafusos. Também foi utilizado silicone em alguns lugares para garantir a vedação.

É importante ressaltar, que para a realização os experimentos com uma partícula não foram considerados efeitos de parede, pois, segundo Atappatu *et al.* (1990), o efeito de parede pode ser desprezado quando  $0 \leq d/D \leq 0,95$  e o  $Re \leq 20000$ . Onde  $D$  é o diâmetro hidráulico do tanque. Dessa maneira, foi considerado que o diâmetro equivalente da maior partícula não chegará a 95% do diâmetro hidráulico do tanque e que o Reynolds não superará 20000.

### 3.1 Partículas

Neste trabalho foram utilizados quatro tipos de partículas diferentes: Esferas de vidro, esferas de resina, cilindros de resina e pellets de bentonita.

Para realizar a validação da metodologia, foram utilizadas esferas de vidro sedimentando em água. As esferas de vidro que foram utilizadas podem ser visualizadas na Fotografia 1.

**Fotografia 1 - Partícula de vidro**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Elas possuem um diâmetro médio de  $4\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$  e uma massa específica teórica de  $2368 \text{ kg/m}^3 \pm 0,5\text{kg/m}^3$ , sendo sólidas.

Na Fotografia 2 é possível observar os pellets, eles têm forma cilíndrica e possuem um diâmetro médio de  $12\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ , e comprimento de aproximadamente  $20\text{mm} \pm 2\text{mm}$ . Para a realização dos testes foram separados 192 pellets de bentonita com as dimensões mais próximas possível, além do menor número de quebras ou imperfeições de maneira que os três testes, que serão realizados, sejam feitos com três grupos semelhantes de partículas.

**Fotografia 2 - Pellet de bentonita**

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Para verificar a influência do fator de forma e das propriedades adesivas da bentonita, foram fabricadas esferas com o número de Reynolds teoricamente equivalente aos obtidos pelos pellets.

Para encontrar uma esfera com o Reynolds equivalente, primeiro deve-se utilizar a equação proposta por Chien (1994):

$$V_t = 32.355 \sqrt{d_{eq} g \left( \frac{\rho_p}{\rho_f} \right) - 1} \quad (26)$$

Onde  $V_t$  é a velocidade terminal,  $d_{eq}$  é o diâmetro equivalente da partícula, isto significa, é o diâmetro de uma esfera com volume equivalente ao da partícula,  $\rho_p$  é a massa específica da partícula e  $\rho_f$  é a massa específica do fluido e  $g$  é a aceleração gravitacional. Ao considerar o pellet de bentonita sedimentando em água são encontrados os valores descritos na Tabela 1:

<b>Propriedade</b>	<b>Medida</b>
<b>Diâmetro Equivalente</b>	16,3 mm
<b>Massa Específica</b>	2200 kg/m <sup>3</sup>
<b>Velocidade Terminal estimada</b>	0,45 m/s
<b>Número de Reynolds estimado</b>	7350

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Sabendo o número de Reynolds estimado do Pellet podemos utilizá-lo, junto da equação de velocidade terminal para esferas sedimentando em fluido newtoniano proposta por Zanker (1980):

$$V_t = 1.74 \sqrt{dg \left( \frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (27)$$

Usando a relação de Reynolds e isolando o diâmetro:

$$d = \frac{\rho_f V_t Re_D}{\mu_f} \quad (28)$$

Inserindo a relação para o diâmetro na correlação proposta por Zanker (1980), resulta:

$$V_t = \sqrt[3]{1.74^2 \frac{Re_D \mu_f g}{\rho_f} \left( \frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (29)$$

Os valores encontrados para a esfera impressa podem ser encontrados na Tabela 2:

<b>Tabela 2 - Dados teóricos da esfera</b>	
<b>Propriedade</b>	<b>Medida</b>
<b>Diâmetro</b>	18,1 [mm]
<b>Massa Específica</b>	1308 kg/m <sup>3</sup>
<b>Velocidade Terminal</b>	0,41 m/s
<b>Número de Reynolds</b>	7406

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Na Fotografia 3 estão as esferas impressas, que possuem um diâmetro médio de 17,84mm ±0,22mm.

Fotografia 3 - Esferas de resina



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para comparar as esferas com cilindros do mesmo material, também foram fabricados cilindros com o volume equivalente:

$$V_e = V_c \quad (30)$$

$$\frac{4\pi d_e^3}{3 \cdot 8} = \pi \frac{d_c^2}{4} h \quad (31)$$

Para simplificar, foi considerado que a altura e o diâmetro dos cilindros seriam iguais, logo:

$$\frac{d_e^3}{6} = \frac{d_c^3}{4} \quad (32)$$

$$d_c = 0,8736d_e \quad (33)$$

Os valores encontrados para o cilindro impresso podem ser encontrados na Tabela 3:

<b>Propriedade</b>	<b>Medida</b>
<b>Diâmetro</b>	15,78 [mm]
<b>Altura</b>	15,78 [mm]
<b>Massa Específica</b>	1308 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 4 encontram-se os cilindros impressos:

**Fotografia 4 - Cilindros de resina**



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.2 Fluido

Para o presente trabalho, o fluido utilizado foi a água. Apesar da viscosidade da água variar muito pouco com a temperatura, os testes foram realizados em um ambiente (sala) com a temperatura controlada à 20°C. Na Tabela 4 estão as principais propriedades físicas da água à 20°C:

<b>Tabela 4 - Propriedades Físicas da água</b>	
<b>Propriedade</b>	<b>Medida</b>
<b>Massa Específica [<math>\rho</math>]</b>	998 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade Dinâmica</b>	1,002.10 <sup>-3</sup> [N·s/m <sup>2</sup> ]
<b>Viscosidade Cinemática</b>	1,004.10 <sup>-6</sup> [m <sup>2</sup> /s]

Fonte: Fox *et al.*, 2001

### 3.3 Procedimento

O procedimento experimental pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Preparação da configuração – etapa na qual o tanque é preenchido pelo fluido de trabalho, depois o sistema de iluminação e a câmera são posicionados em seus respectivos lugares;
- Preparação do sistema de liberação – etapa que consiste em colocar as partículas dentro do sistema de liberação, depois posiciona-lo no tanque;

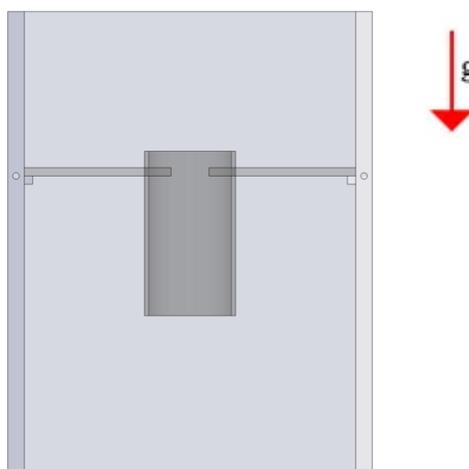
- Execução do experimento – essa etapa é a execução do teste propriamente dita, nela deve-se iniciar a gravação, realizar a liberação da partícula, parar a gravação e por fim retirar a partícula.
- Tratamento dos dados – após realizar os testes, os vídeos obtidos devem ser tratados, etapa que está melhor detalhada na seção 3.5.

### 3.4 Sistema de liberação

Para garantir que a liberação das partículas seja padronizada, é necessário desenvolver um sistema de liberação que garanta o mínimo de interferência possível. Além disso, o sistema de liberação precisa garantir que a liberação das partículas seja feita do centro do tanque para que dessa maneira não haja influência do efeito de parede.

Na Figura 7 é possível conferir que o gabarito está inserido no centro do tanque, com o objetivo de garantir que as partículas fossem liberadas sempre do centro do tanque.

Figura 7 - Tanque

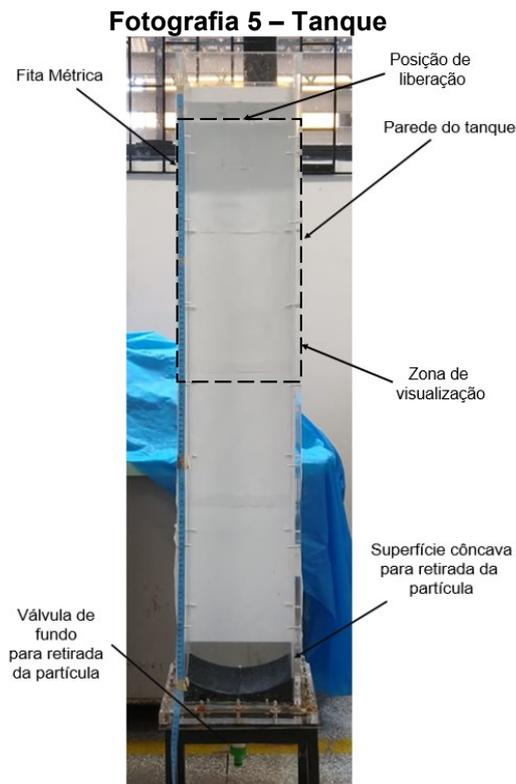


Fonte: Autoria Própria (2023)

Devido ao grande volume de partículas, optou-se por realizar o lançamento delas por meio da liberação conjunta das partículas, onde as partículas estariam todos em um recipiente que foi girado dentro do gabarito já dentro da água.

### 3.5 Obtenção e tratamento dos dados

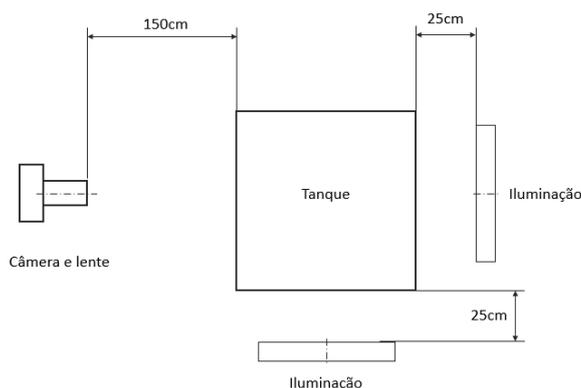
A obtenção de dados do experimento será realizada através de vídeo, onde se analisará a posição da partícula em relação ao tempo. No tanque foi colocado uma fita métrica colada na frente do tanque para definir uma escala real no Tracker®, como é possível observar na Fotografia 5:



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

A execução dos experimentos será gravada por meio da câmera de alta velocidade Chronos 2.1-HD<sup>®</sup> monocromática, com capacidade de gravar até 1000 quadros por segundo, além de ter uma resolução de 1920 x 1080p. A configuração foi complementada por um sistema de iluminação com dois pedestais com anéis de *led* que são alimentados por corrente contínua, para que não haja oscilação na iluminação. A disposição dos equipamentos do experimento é ilustrada pela vista superior do setup na Figura 8:

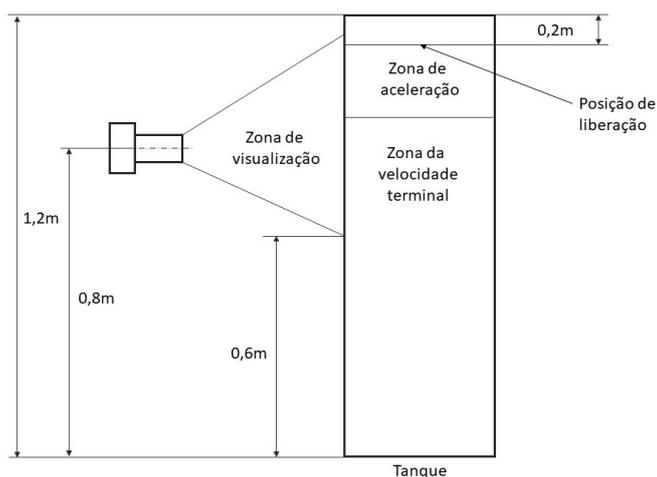
**Figura 8 - Vista superior do layout do experimento**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Na Figura 9 é possível conferir um diagrama esquemático da vista lateral da configuração, no qual é possível observar a câmera e o tanque.

**Figura 9 - Vista lateral do layout experimental**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Além disso, é possível constatar a zona de visualização do experimento, que enquadra aproximadamente metade do comprimento total do tanque, compreendendo o ponto de partida do movimento, toda zona de aceleração e também uma parte após a velocidade terminal ser atingida.

Na Fotografia 6 se encontra o layout experimental montado conforme as ilustrações acima.

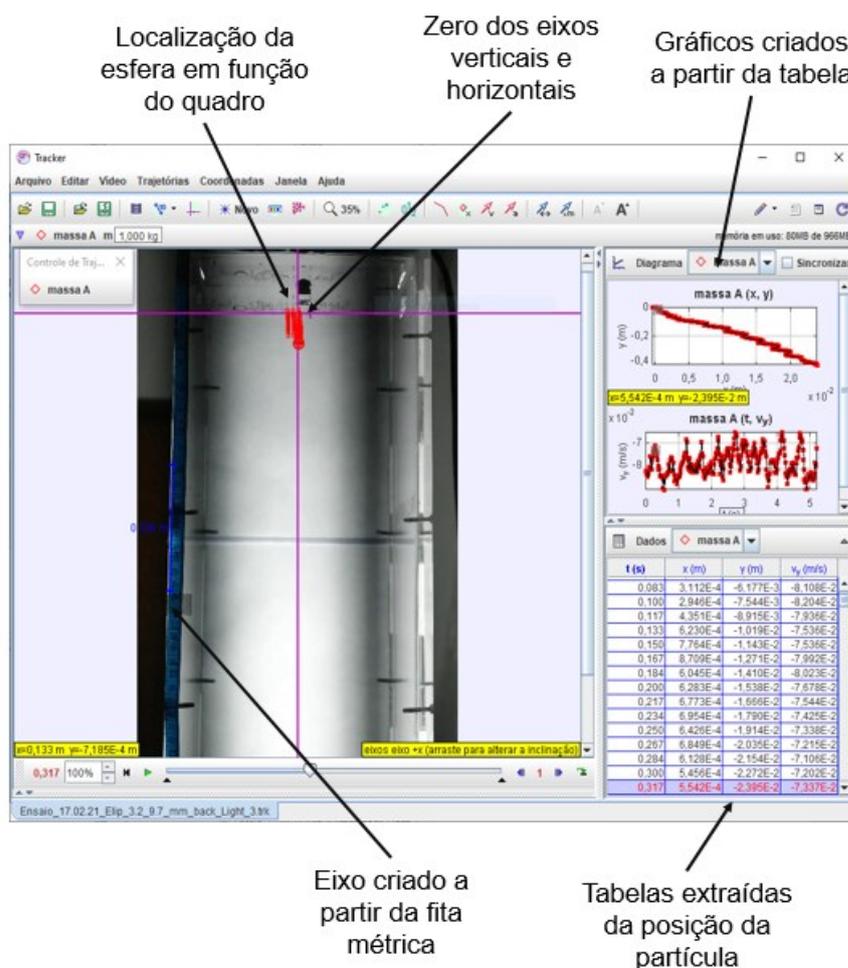
**Fotografia 6 - Layout experimental**

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Para esse trabalho, o erro de paralaxe foi desprezado, pois em trabalhos anteriores, cujos resultados são apresentados no Apêndice A, foram realizados testes para verificar a influência do efeito de paralaxe no teste que se demonstrou desprezível.

Para o tratamento dos dados será utilizado o software Tracker<sup>®</sup> para o rastreamento da partícula e para o cálculo das velocidades. O Tracker<sup>®</sup> é um software livre de análise de vídeo que fornece a posição da partícula em cada instante de tempo, por meio da análise dos frames da gravação. Além disso, com os dados obtidos nas execuções, o Tracker<sup>®</sup> também plota gráficos e monta tabelas de posição nos eixos horizontais e verticais, as velocidades nos eixos, a velocidade escalar, aceleração, entre outras. Nele é possível definir uma referência de tamanho real em uma escala no vídeo através da criação de uma régua virtual a partir da fita métrica fixada dentro do tanque, como é possível ver na Figura 10.

Figura 10 – Interface do Tracker®



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 10 também é possível observar que o zero dos eixos  $x$  e  $y$  são ajustados de acordo com a posição da câmera em cada gravação. As linhas vermelhas na Figura 10 mostram a localização da esfera em diferentes quadros de vídeo, também são apresentados os gráficos plotados e as tabelas montadas.

Os custos associados aos experimentos realizados serão disponibilizados no Apêndice B.

### 3.6 Configuração dos Testes

Para obtenção dos dados, foram realizadas diferentes configurações com as partículas da seção 3.1:

**Tabela 5 – Configuração dos testes**

Teste	Material	Geometria	Qtd. de partículas	Objetivo
1	Vidro	Esferas	1	Verificar a influência do método de liberação
2	Vidro	Esferas	1	
3	Vidro	Esferas	4	Verificar a influência da quantidade de partículas em uma razão de aspecto de 2,3
4	Vidro	Esferas	16	
5	Vidro	Esferas	64	
6	Vidro	Esferas	64	Verificar a influência da posição de liberação da partícula a ser analisada
7	Vidro	Esferas	64	
8	Resina	Esferas	1	
9	Resina	Esferas	4	Verificar a influência da quantidade de partículas
10	Resina	Esferas	16	
11	Resina	Esferas	64	
12	Resina	Cilindros	1	Verificar a influência da geometria da partícula
13	Resina	Cilindros	4	
14	Resina	Cilindros	16	
15	Resina	Cilindros	64	
16	Bentonita	Pellets	64	Verificar a influência da propriedades da bentonita

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Foram realizadas 16 combinações diferentes de testes com diferentes objetivos. Vale ressaltar que serão realizadas triplicatas, ou seja, três ensaios, de todos os experimentos para assegurar a confiabilidade do resultado.

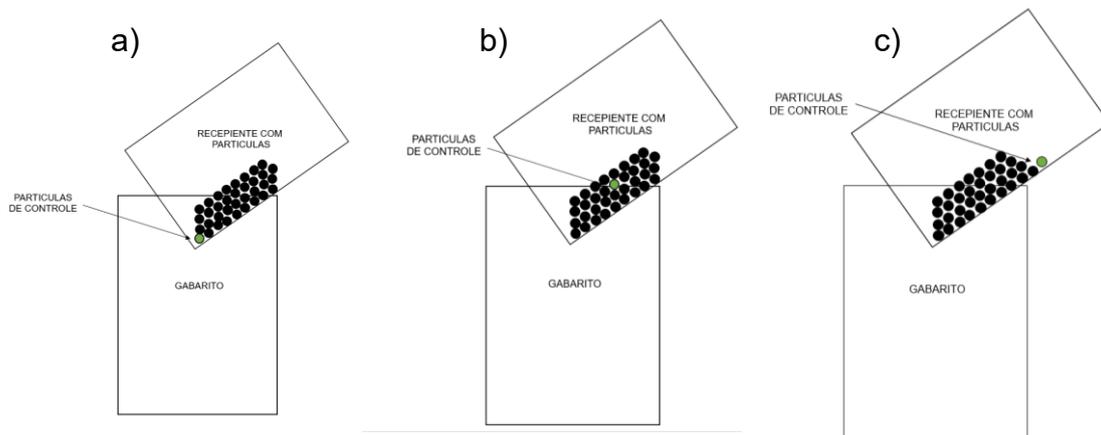
Primeiro foram realizados 2 testes (1 e 2) com 1 esfera de vidro, para verificar a interferência do método de lançamento escolhido.

Depois serão realizados 3 testes (5, 6 e 7) com 64 esferas de vidro, onde em cada um deles a partícula de controle será posicionada em uma posição diferente ao ser lançada:

- Frente – Dentro do recipiente que será utilizado para o lançamento, a esfera foi posicionada a frente das outras antes delas serem liberadas;
- Meio – A esfera foi posicionada entre as outras esferas antes delas serem liberadas;
- Atrás – Dentro do recipiente que será utilizado para o lançamento, a esfera foi posicionada atrás das outras antes delas serem liberadas

Na Figura 11, é possível observar as diferentes posições nas quais a esfera de controle foi liberada para verificar a influência da posição de liberação da partícula a ser analisada.

**Figura 11 - Posições da partícula de controle:**  
**a) Na frente das partículas; b) Entre as partículas; c) Atrás das partículas**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Posteriormente foram realizados os testes com 4 e 16 esferas de vidro que junto dos outros testes com partículas de vidro serão utilizados para examinar a influência da razão mássica das partículas.

Depois foram realizados testes com 1, 4, 16 e 64 esferas, que serão utilizadas como base, pois é possível verificar os dados obtidos com a literatura, em seguida serão realizados os testes com 1, 4, 16 e 64 cilindros para examinar como o fator de forma influencia na sedimentação. E por fim, serão realizados os testes com 64 pellets de bentonita para averiguar como a propriedade adesiva da bentonita influencia a trajetória e a velocidade da sedimentação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos testes e tratamento dos vídeos, foram obtidos dados da velocidade e posicionamento, na horizontal e vertical, de todas as partículas para poder compará-las e analisar a influência da forma e do número de partículas.

### 4.1 Método de lançamento

Para verificar a influência do método de lançamento proposto, fora realizada uma nova bateria de testes com uma esfera de vidro, onde em vez de lança-la como descrito na seção 3.4, a esfera foi solta, de dentro do fluido, com uma pinça.

Na Tabela 6, estão as velocidades terminais para cada ensaio em função dos dois diferentes métodos de liberação.

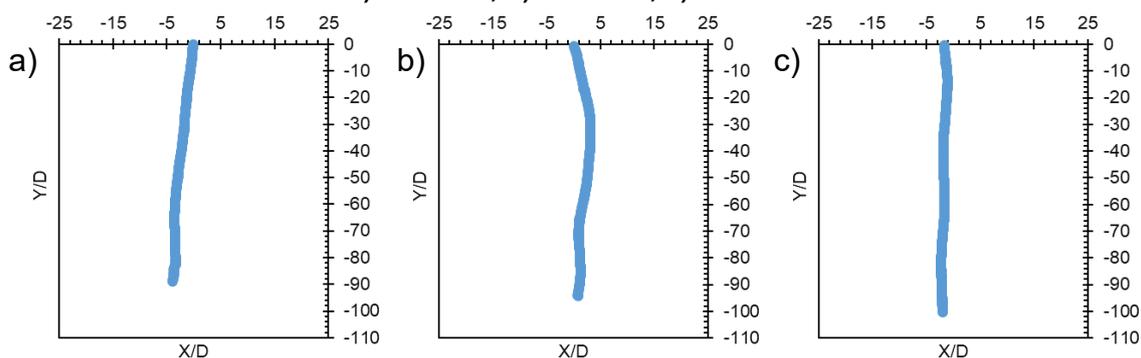
**Tabela 6 - Dados das velocidades terminais (m/s) para cada teste e para os dois métodos de lançamento (normal e com pinça). Também apresentada a média dos testes e o desvio padrão**

Método de lançamento	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio Padrão
Lançamento comum	0,3489	0,3694	0,3938	0,3707	0,0154
Lançamento com pinça	0,3626	0,3665	0,3693	0,3662	0,0023

Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao analisar as velocidades médias dos testes, é possível observar que, apesar do método da seção 3.4 possuir uma variação maior, a diferença é pequena. Dessa forma, é possível afirmar que a influência do método de liberação na velocidade, para um fluido newtoniano, é desprezível.

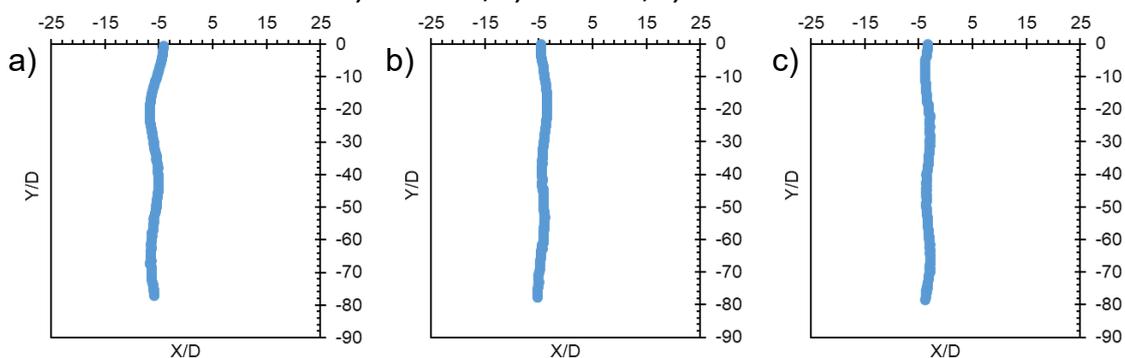
No Gráfico 1, é possível visualizar as trajetórias da esfera ao sedimentar, tendo sido lançada com o método que denominamos de comum, e foi descrito na seção 3.4.

**Gráfico 1 - Trajetórias com lançamento comum.****a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3****Fonte: Autoria Própria (2023)**

É possível notar que as trajetórias apresentam um comportamento mais retilíneo, principalmente no Gráfico 1c. No Gráfico 1a é possível afirmar que a trajetória apesar de retilínea, apresenta um deslocamento de aproximadamente 5 vezes a largura da partícula. No Gráfico 1b o comportamento visto apresenta mais oscilações horizontais, onde o valor máximo também é 5 vezes a largura da partícula.

O eixo horizontal dos gráficos de trajetória representa a largura do tanque adimensionalizado pelo diâmetro da esfera, que é cerca de 50 vezes menor. Já o eixo vertical, é a posição da partícula também adimensionalizada pelo diâmetro da esfera.

No Gráfico 2, é possível observar as trajetórias quando o lançamento é realizado por meio de pinça.

**Gráfico 2 - Trajetórias com lançamento com pinça.****a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3****Fonte: Autoria Própria (2023)**

Nele, as trajetórias apresentam o mesmo movimento retilíneo, porém com deslocamentos horizontais menores, assim como nos ensaios realizados com o lançamento normal, dessa maneira, verificou-se que os métodos de lançamento

utilizados não resultam em diferenças significativas, podendo-se escolher entre um ou outro sem afetar significativamente as variáveis de interesse (posição/trajetória e velocidade terminal).

## 4.2 Escolha da partícula

Com o objetivo de verificar a interferência da escolha da partícula, ou seja, estabelecer se seria necessário definir uma partícula padrão sendo liberada sempre do mesmo jeito, ou se a partícula que seria analisada poderia ser escolhida aleatoriamente.

E para verificar essa representatividade da partícula escolhida para ser analisada, foi escolhida uma esfera padrão, que foi pintada para contrastar com as outras. Para essa análise, foram feitas três triplicatas com 64 esferas, onde a esfera padrão foi lançada das seguintes formas:

- Frente – A esfera foi posicionada a frente das outras;
- Meio – A esfera foi posicionada entre as outras;
- Atrás – A esfera foi posicionada atrás das outras.

Na Tabela 7 está a comparação entre as velocidades dos ensaios para a partícula de controle com diferentes posições iniciais.

**Tabela 7 - Comparação entre as velocidades em relação à posição inicial da esfera**

Posição Inicial	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio Padrão
<b>Frente</b>	0,3522	0,3457	0,3705	0,3561	0,0096
<b>Meio</b>	0,3386	0,3656	0,3491	0,3511	0,0097
<b>Atrás</b>	0,3195	0,3560	0,3685	0,3480	0,0190

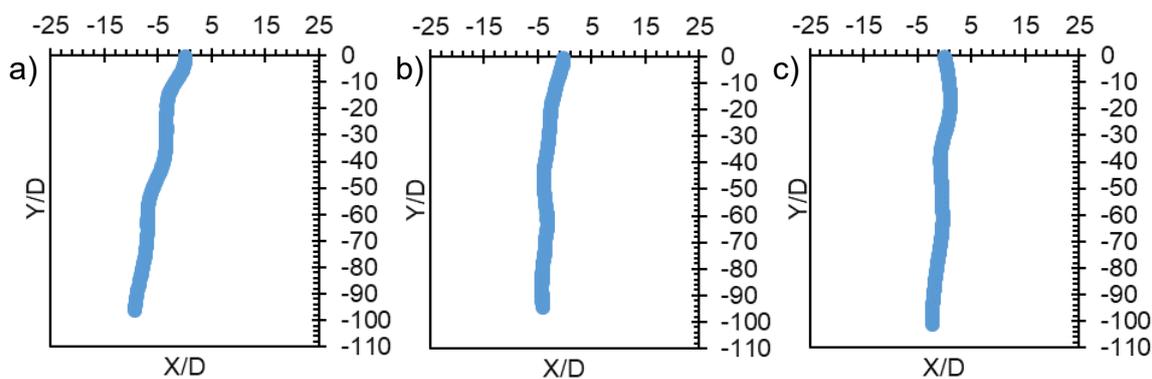
**Fonte: Autoria Própria (2023)**

### 4.2.1 Partícula sendo liberada à frente

Na Tabela 7, é possível constatar que a média das velocidades possuem um valor muito próximo, em outros termos, a velocidade terminal da esfera independe da sua posição em relação as outras no momento do lançamento.

Ao analisar as trajetórias das partículas sendo lançadas na frente do grupo, Gráfico 3 é evidente que, apesar das interações entre as partículas, a esfera analisada ainda possui o mesmo comportamento na trajetória, sendo retilíneas com leves oscilações horizontais.

**Gráfico 3 - Trajetória da esfera sendo lançada na frente.**  
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3



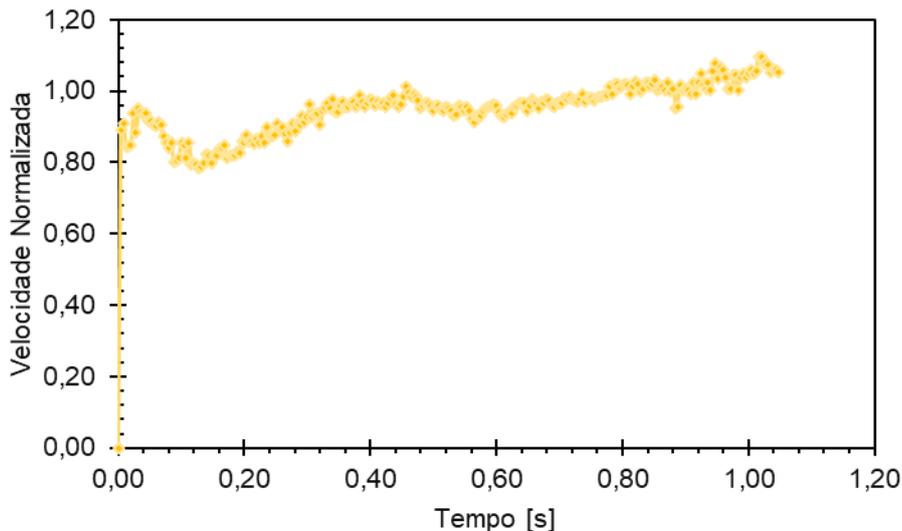
Fonte: Autoria Própria (2023)

Porém, no ensaio 1, o Gráfico 3a, é visível que existem maiores oscilações na trajetória, possivelmente devido à proximidade dela com as outras partículas.

Neste ensaio a variação horizontal apresentada é de 9,5 vezes o diâmetro da partícula, enquanto nos ensaios 2 e 3, Gráfico 3b e Gráfico 3c, respectivamente, a variação horizontal é de 4,11 e 3,46 vezes.

No Gráfico 4 está a velocidade de sedimentação normalizada pelo valor médio de 1 partícula sedimentando sozinha em função do tempo. Nele é possível observar a interação entre as partículas após o início da sedimentação, pois a velocidade, que deveria estar estabilizando, começou a desacelerar. Posteriormente a partícula volta a acelerar e se mantém em um patamar próximo a velocidade de uma esfera sedimentando sozinha.

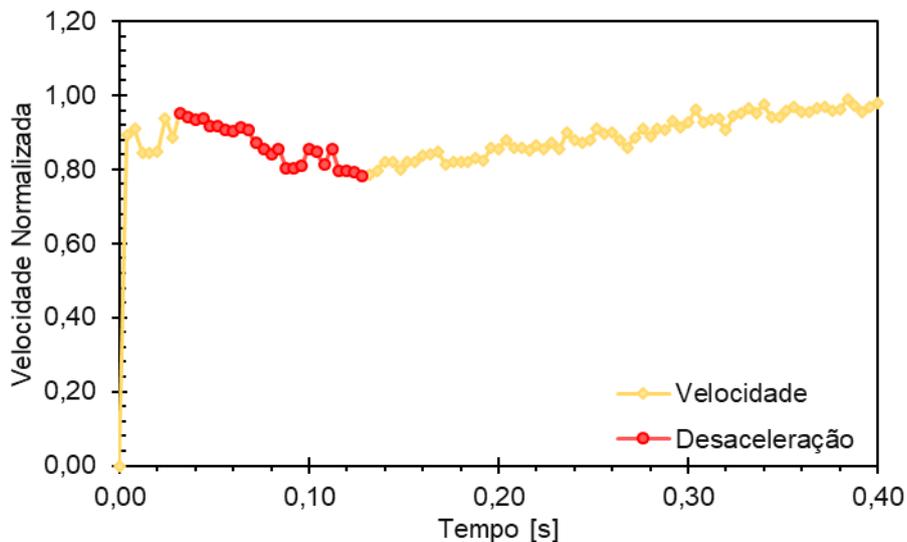
Gráfico 4 - Velocidade do Ensaio 1



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 5 se encontra a desaceleração causada pelo contato em ter as partículas, que ocorre entre os instantes 0,032s e 0,128s.

Gráfico 5 - Desaceleração no Ensaio 1

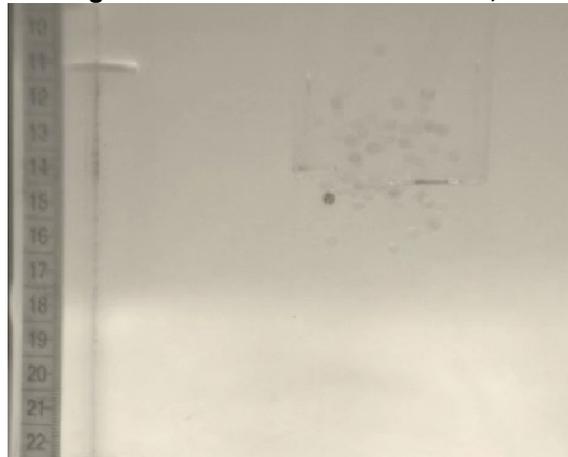


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 7, é evidente que a partícula de controle está muito próxima às outras partículas, dessa forma sendo submetida ao fenômeno de *drafting*, causado por uma perturbação devido a diferença de pressões no espaço entre as partículas, o que faz com que a partícula seja atraída até a esteira da

partícula traçadora, tendo como consequência um contato entre as partículas que gera a redução na velocidade e a alteração na trajetória vistas.

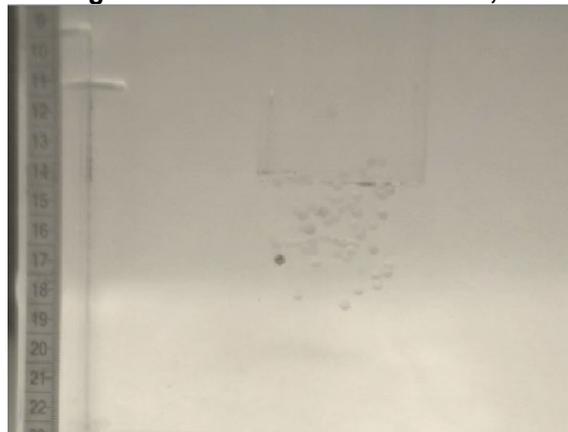
**Fotografia 7 - Ensaio 1 no instante 0,008s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 8, é possível constatar que as partículas estão se distanciando, o que enfraquece as forças que estão atraindo as partículas, fazendo com que a velocidade volte a ser a aumentar até atingir a terminal.

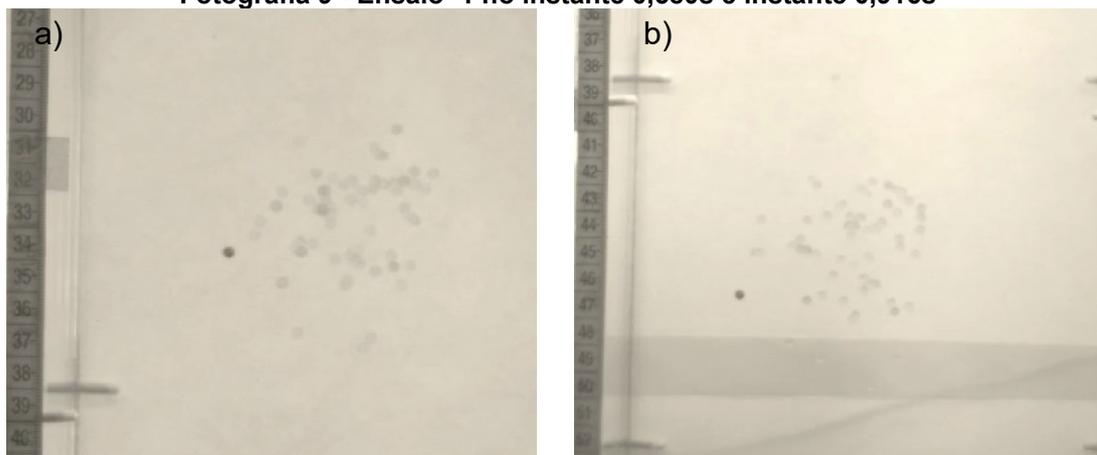
**Fotografia 8 - Ensaio 2 no instante 0,064s**



**Fonte: Autoria Própria**

Por fim, na Fotografia 9, a partícula de controle já se encontra mais isolada das outras, o que reflete na estabilização da velocidade de sedimentação.

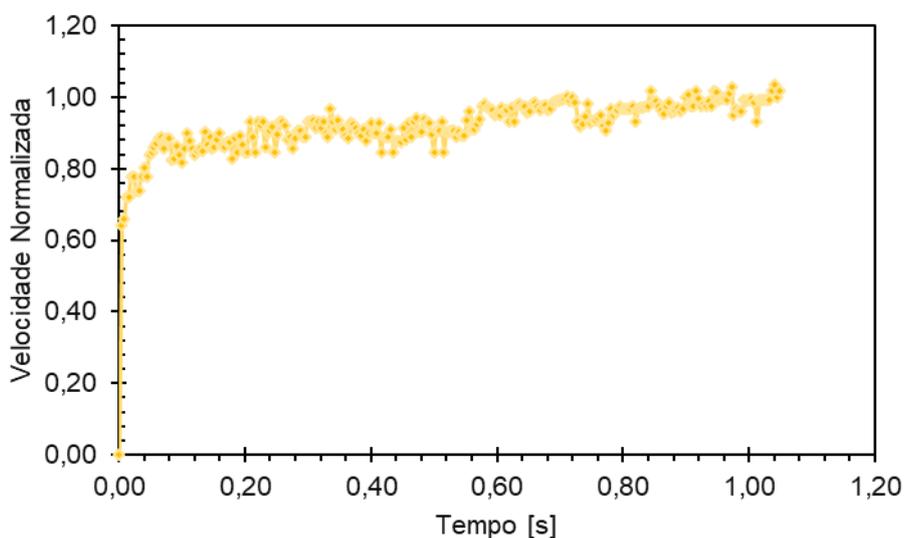
Fotografia 9 - Ensaio 1 no instante 0,580s e instante 0,916s



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na velocidade da partícula no Ensaio 2, Gráfico 6, é possível observar que a partícula acelera, até que ela atinja a velocidade terminal e se mantenha, porém, o tempo de aceleração é maior ao compará-lo a uma esfera sedimentando sozinha, o que indica que as interações entre a partícula padrão e as outras é mais forte no começo, retardando a aceleração.

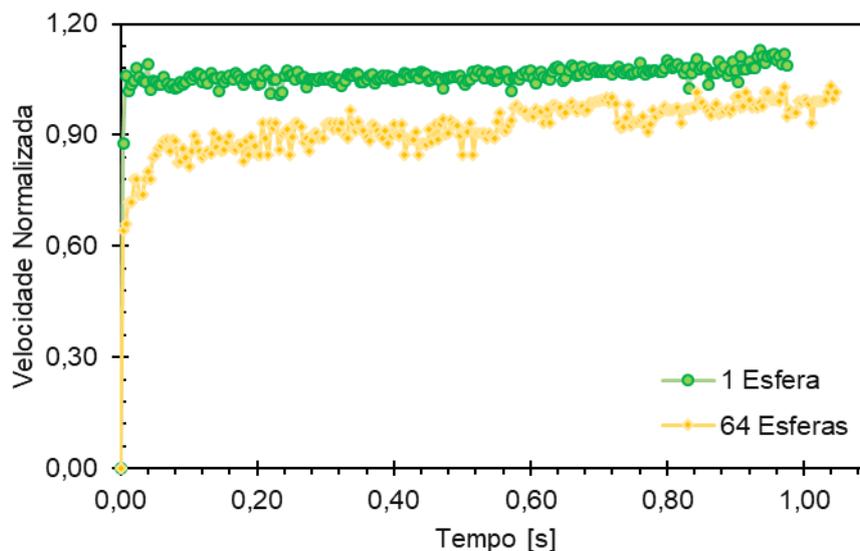
Gráfico 6 - Velocidade do Ensaio 2



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 7 é evidente que a esfera sedimentando sozinha atinge a velocidade terminal de maneira muito rápida, já quando há 64 esferas sedimentando juntas, além do valor da velocidade ser menor, ela demora mais para acelerar como descrito anteriormente.

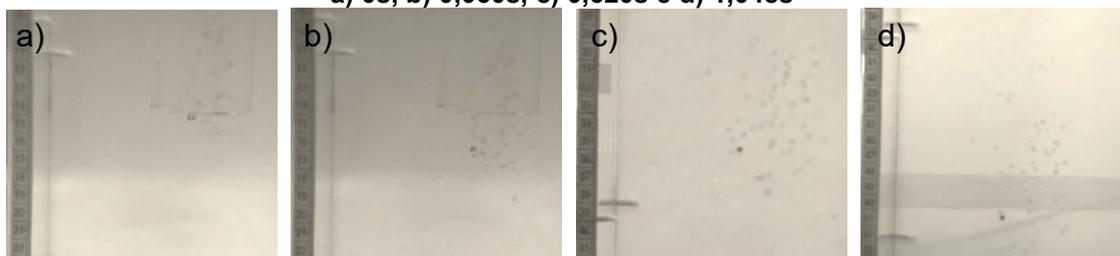
**Gráfico 7 - Comparação entre a velocidade em função do tempo com 1 esfera e 64 esferas.**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 10, é possível confirmar a maior influência das partículas, já que a esfera de controle se encontra mais próxima das outras durante toda a sedimentação. Essa proximidade é refletida na velocidade média da sedimentação do ensaio 2, que é 0,3457 m/s. Esse valor é o menor entre os ensaios com a esfera sendo liberada à frente.

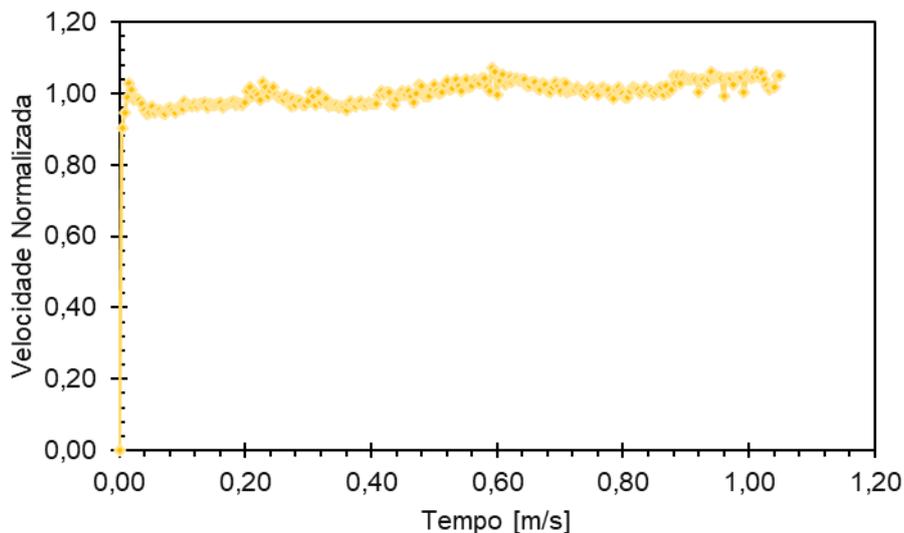
**Fotografia 10 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,060s, c) 0,620s e d) 1,048s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 8, é possível observar que há a influência das outras partículas na esfera de controle, porém, o efeito é mais constante em relação ao ensaio 1, o que indica que a esfera de controle está próxima às outras, porém, em poucos instantes se distancia e acelera normalmente, onde a velocidade se mantém próxima ao valor observado para uma esfera sedimentando sozinha.

Gráfico 8 - Velocidade do Ensaio 3

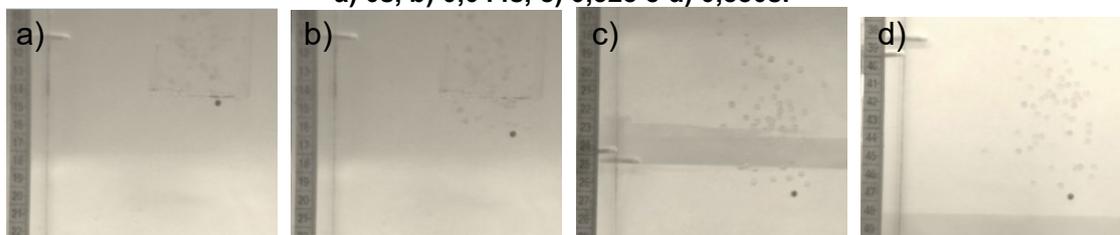


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 11, é evidente que a partícula de controle sedimenta mais isolada do grupo o trajeto inteiro, dessa forma, ela apresenta um comportamento muito similar à de uma esfera sedimentando sozinha, confirmando o padrão visto na velocidade de sedimentação.

Fotografia 11 - Ensaio 3 nos instantes:

a) 0s, b) 0,044s, c) 0,328 e d) 0,880s.



Fonte: Autoria Própria (2023)

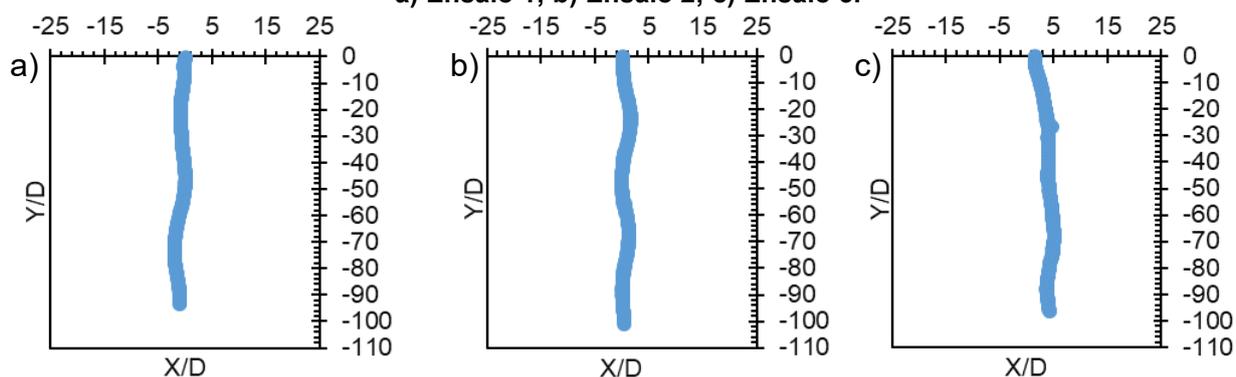
Por fim, é possível considerar que, apesar de que nos três ensaios a partícula de controle foi liberada à frente das outras, isso não faz com que ela sempre sedimente à frente do grupo de partículas, pois nos ensaios 1 e 2 ela sedimenta no meio de outras partículas, e no ensaio 3 ela sedimenta a frente das outras partículas.

#### 4.2.2 Partícula sendo liberada no meio

No Gráfico 9 estão as trajetórias dos ensaios com partículas sendo liberadas do meio. É possível verificar que eles possuem uma trajetória com o mesmo movimento retilíneo com pequenas oscilações horizontais.

**Gráfico 9 – Trajetória da esfera sendo lançada do meio.**

a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.

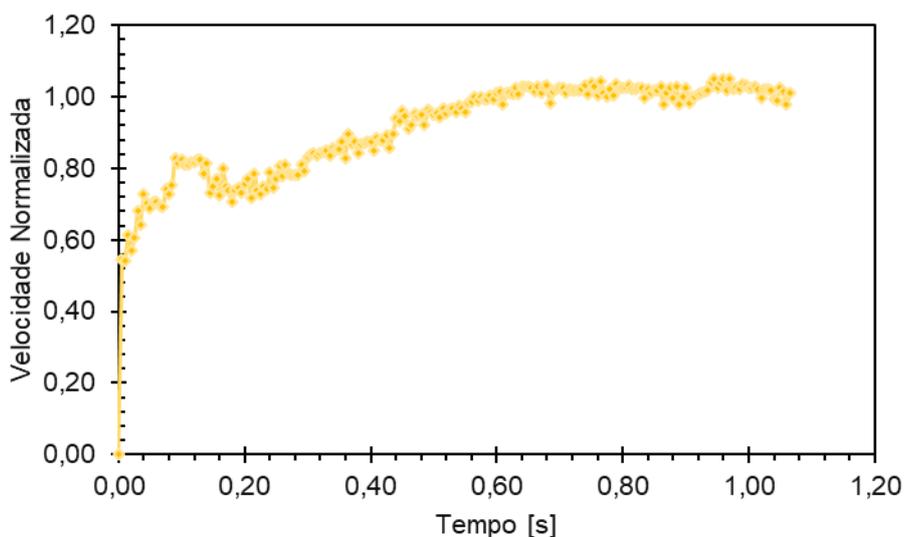


Fonte: Autoria Própria (2023)

Percebe-se, pelas velocidades médias de sedimentação, que as partículas de controle (ou traçadora) do ensaio 1 é a que sofre a maior influência das outras partículas sedimentando, pois apresenta a menor velocidade de sedimentação, e assim como no Gráfico 3, essa influência não é tão perceptível ao analisar a trajetória das partículas.

No Gráfico 10, o comportamento da velocidade se assemelha muito ao encontrado no Gráfico 4, o que indica que a esfera de controle começa a sedimentação próxima das outras e durante a sedimentação se distancia para acelerar, onde a partir dos 0,60s de ensaio, se estabiliza próximo ao valor de uma esfera sedimentando sozinha.

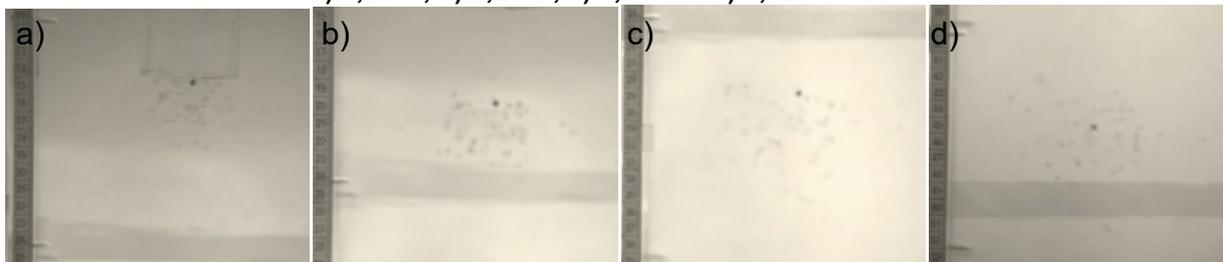
**Gráfico 10 - Velocidade do Ensaio 1**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 12a é possível confirmar que a esfera de controle começou a sedimentar próximo de diversas partículas e conforme o escoamento foi se desenvolvendo, a distância entre ela e as outras partículas aumentou, Fotografia 12b, e se manteve constante até o fim.

**Fotografia 12 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0,030s, b) 0,210s, c) 0,480s e d) 0,920s.**

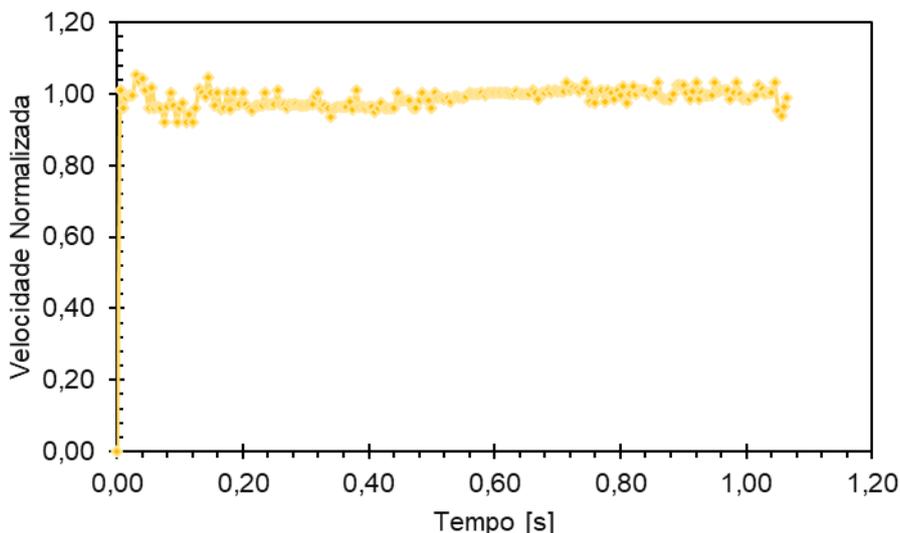


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Dada a velocidade média do ensaio 1, que é 0,3386 m/s, torna-se ainda mais perceptível a influência das partículas durante o processo.

Analisando o Gráfico 11, onde a velocidade da partícula é praticamente estável durante toda a sedimentação com um valor normalizado próximo à 1, junto da velocidade média do ensaio, que é de 0,3656 m/s, é possível ver uma menor influência das outras partículas na esfera de controle.

**Gráfico 11 - Velocidade do Ensaio 2**

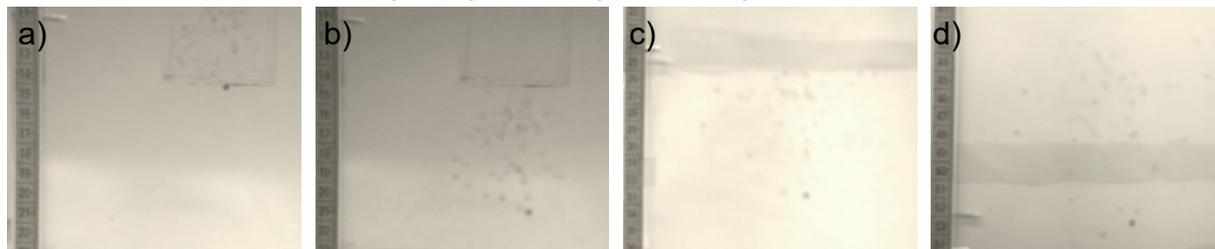


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 13, é possível verificar que a partícula de controle se mantém longe das partículas, reduzindo sua influência como indicado anteriormente. Também é visto que próximo ao instante 0,180s, a esfera de

controle está próxima de outra, o que se deve à esfera ter entrado na esteira da partícula de controle, que teve como consequência a diminuição da força de arrasto que fez com que ela acelerasse mais e chegasse mais perto da partícula de controle.

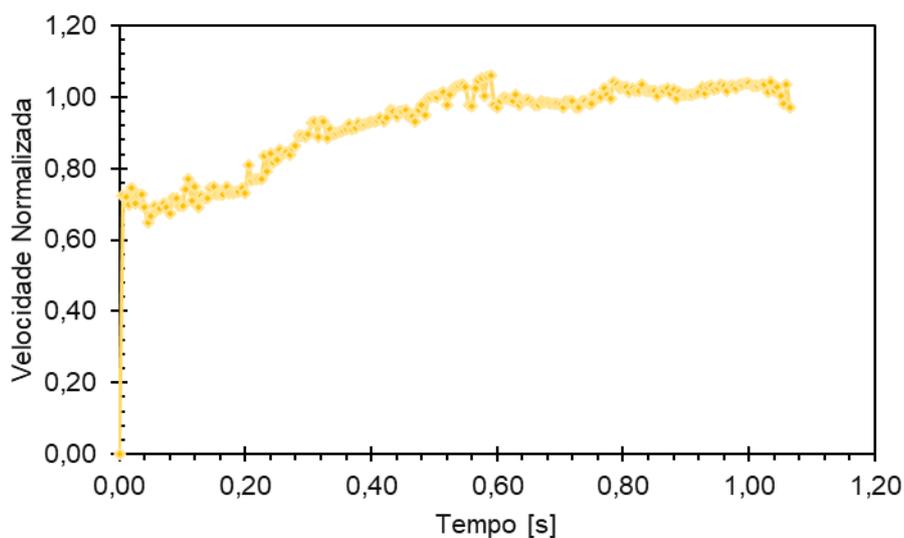
**Fotografia 13 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,180s, c) 0,500s e d) 1,040s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Tal fenômeno é refletido no Gráfico 12, onde há uma pequena redução na velocidade de sedimentação pois a esfera que está na esteira da partícula traçadora gera uma perturbação na pressão da esteira, fazendo com que a partícula desacelere.

**Gráfico 12 - Velocidade do Ensaio 3**

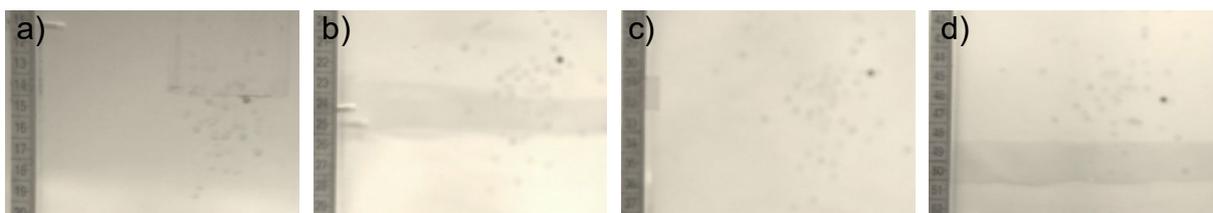


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Ao analisar o Gráfico 12, também se verifica que a partícula de controle passa a sedimentação próxima a outras partículas devido à redução da velocidade no começo da sedimentação, além da redução da aceleração da partícula fazendo com que a mesma demore quase 0,6 segundos para atingir a velocidade terminal.

Analisando a Fotografia 14, é possível observar que entre os instantes 0s e 0,5s a partícula se encontra próxima das outras, o que justifica a partícula ter ainda estar acelerando quando já devia ter atingido a velocidade terminal. No instante 0,910s a partícula já se encontra mais distante das outras, e ao analisar o gráfico da velocidade percebe-se que não há mais variações, indicando que não ocorreram interações entre as partículas.

**Fotografia 14 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0,010s, b) 0,260s, c) 0,500s e d) 0,910s.**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Também é possível concluir que no ensaio 1 a partícula passa grande parte da sedimentação atrás das outras, já no ensaio 2, a partícula de controle sedimenta a frente das outras e no ensaio 3 ela se encontra mais no meio. Dessa forma, também é possível concluir que soltar uma esfera no meio do grupo não garante que a mesma sedimentará no meio do grupo.

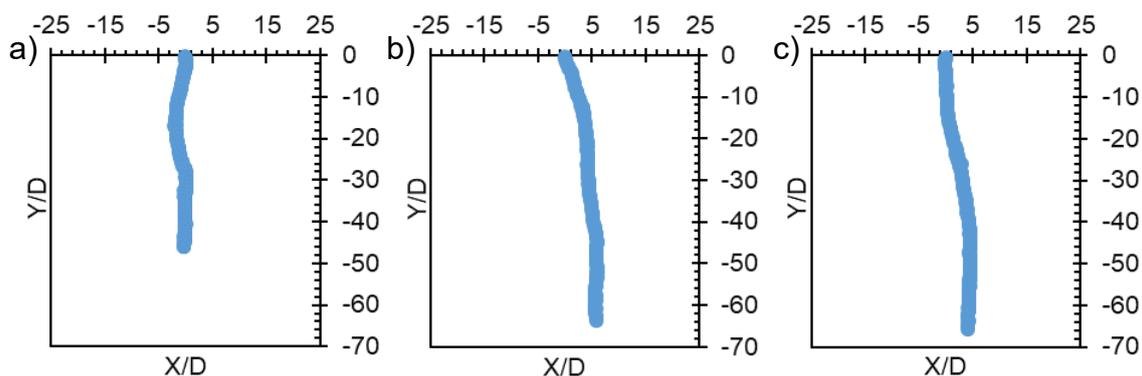
Por fim, é interessante ver que o comportamento das trajetórias é mais estável que o caso da lançada na frente.

#### 4.2.3 Partícula sendo liberada de trás

Ao analisar as trajetórias dos ensaios com as partículas sendo liberadas com a partícula de controle atrás das outras, presentes no Gráfico 13, constata-se que elas possuem um comportamento retilíneo com pequenas oscilações horizontais, assim como quando a partícula de controle é liberada à frente e no meio das outras partículas

**Gráfico 13 - Trajetória da esfera sendo lançada de trás.**

a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3

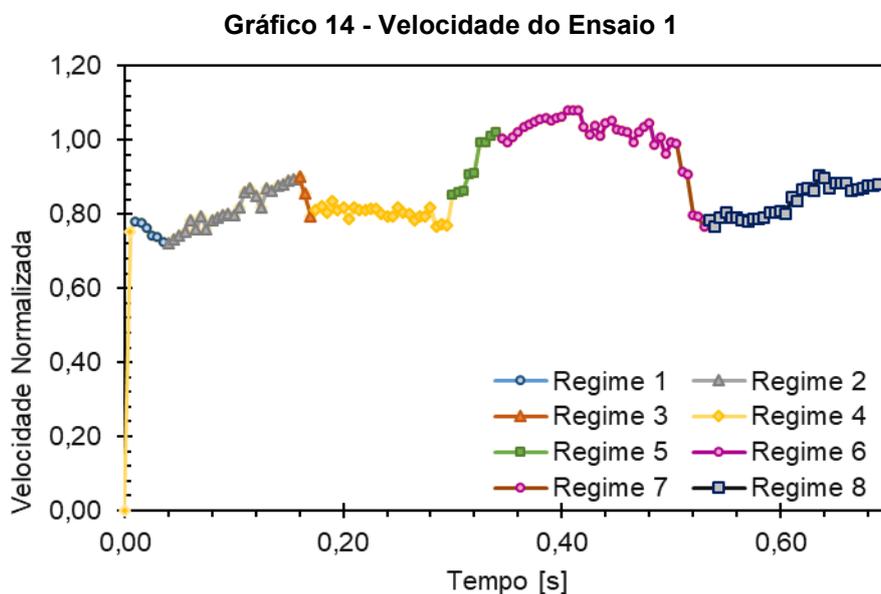


Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 14, há uma grande oscilação no valor da velocidade, indicando que a partícula de controle interage com outras em diferentes instantes da sedimentação:

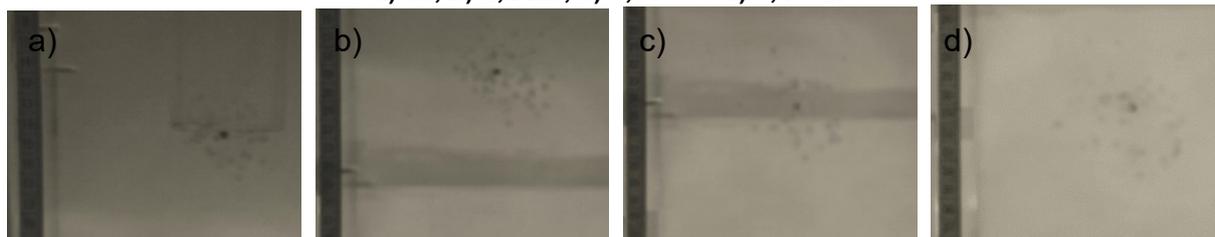
- Regime 1: Ocorre entre os instantes 0,010s e 0,035s, onde após a partícula começar a acelerar, ela apresenta uma leve desaceleração indicando uma interação com as partículas em sua vizinhança;
- Regime 2: Entre os instantes 0,035s e 0,160s, a partícula volta a acelerar lentamente;
- Regime 3: Entre os instantes 0,160s e 0,170s, a partícula apresenta novamente uma desaceleração, dessa vez de maneira mais brusca e curta;
- Regime 4: Entre os instantes 0,170s e 0,295s, a velocidade da partícula se mantém estável, o que sugere que ela esteve sobre menor influência do que nos outros instantes;
- Regime 5: Ocorre entre os instantes 0,295s e 0,340s. Nesse regime, a partícula acelera de maneira mais acentuada do que no regime 2, o que indica que a partícula tenha entrado em uma esteira de uma partícula a sua frente;
- Regime 6: Assim como no regime 4, entre os instantes 0,340s e 0,5s, a velocidade da partícula demonstra certa estabilidade;
- Regime 7: Entre os instantes 0,500s e 0,535s, novamente a partícula apresenta uma desaceleração brusca;

- Regime 8: Por fim, no último regime, que ocorre entre os instantes 0,535s e 0,685s, a partícula apresenta fim uma velocidade quase terminal.



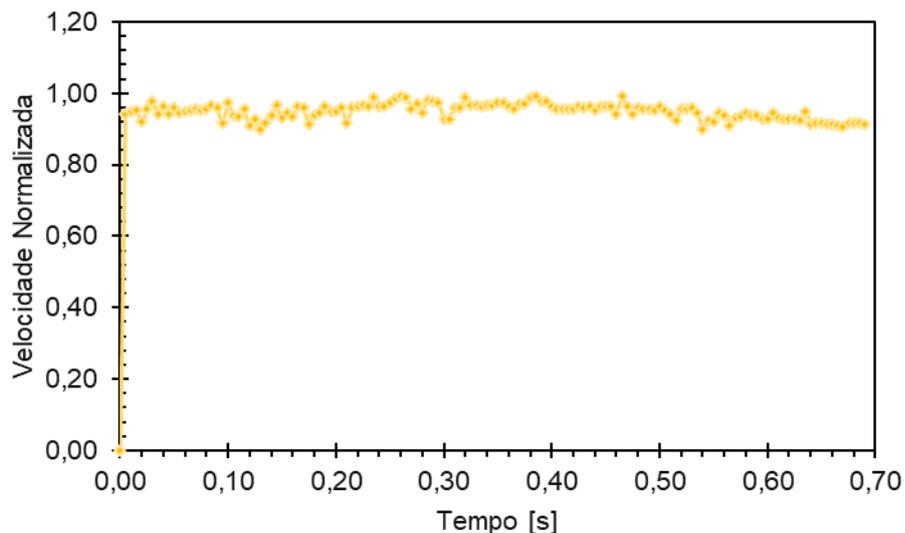
Na Fotografia 15 confirma-se a proximidade da partícula de controle das outras partículas sedimentando. Também é possível confirmar que ela se encontra mais distante das outras aos 0,3s e se aproximou aos 0,5s.

**Fotografia 15 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,144s, c) 0,308s e d) 0,496s.**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

No Gráfico 15, é possível observar que a velocidade de sedimentação do ensaio 2 se comporta de maneira estável, o que indica uma influência menor, ou ao menos constante, na esfera de controle das partículas sedimentando, onde o valor da velocidade normalizada se mantém próximo à 1.

**Gráfico 15 - Velocidade do Ensaio 2**

Fonte: Autoria Própria (2023)

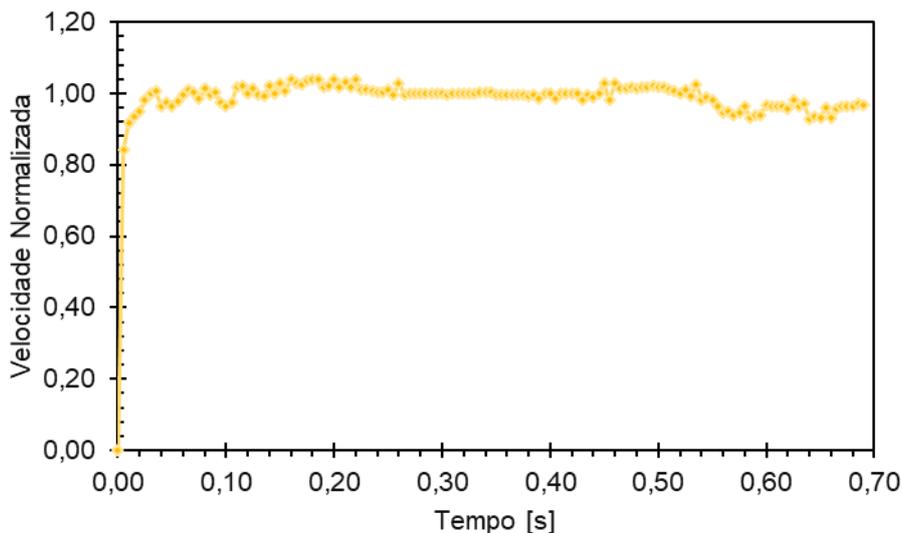
Na Fotografia 16, verifica-se que a esfera de controle não fica tão próxima das outras durante a sedimentação, o que confirma a baixa influencia na velocidade da partícula.

**Fotografia 16 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,240s, c) 0,410s e d) 0,680s.**



Fonte: Autoria Própria (2023)

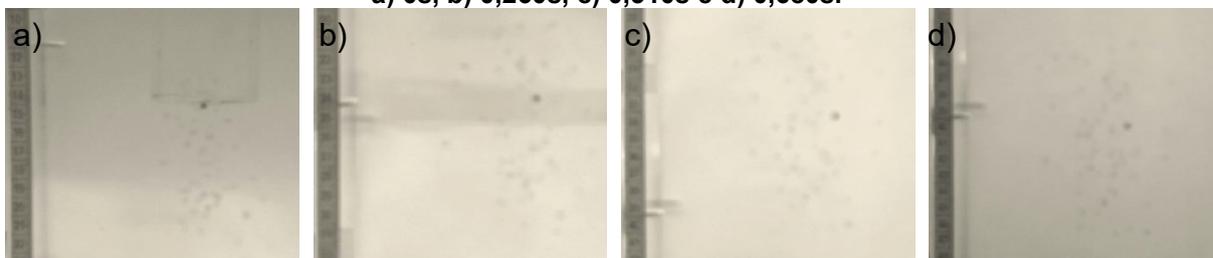
Já para o ensaio 3, representado pelo Gráfico 16 é possível identificar uma influência menor na partícula, assim como no ensaio 2.

**Gráfico 16 - Velocidade do Ensaio 3**

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 17 confirma-se que a esfera de controle não fica tão próxima das outras durante a sedimentação, o que confirma a baixa influencia na velocidade da partícula.

**Fotografia 17 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,260s, c) 0,510s e d) 0,680s.**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Nessa seção foi possível observar que o impacto da posição de liberação da partícula é baixo para a velocidade e trajetória, onde o fator mais relevante para a variação dos resultados é a quantidade de partículas ao redor da partícula de controle durante o ensaio, não a posição que ela foi liberada.

Dessa maneira, a escolha da partícula para a análise também não influencia o comportamento, desde que ela esteja submetida a interação com as outras partículas, ou seja, é mais relevante garantir que a partícula que será analisada esteja no meio do grupo do que escolher a mesma partícula para todos os ensaios.

### 4.3 Esferas de Resina

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com as esferas impressas em resina 3D apresentadas na seção 3.1, a devido aos resultados da seção anterior, que mostraram que não existe muita diferença entre a partícula que será acompanhada, não haverá esfera de controle, a esfera da qual serão retirados os dados será escolhida do meio do grupo. Na Tabela 8 estão os valores médios das velocidades terminais obtidas.

**Tabela 8 - Velocidade terminal (m/s) dos Ensaios**

Quantidade	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio Padrão
01 Esfera	0,2567	0,2787	0,2657	0,2670	0,0078
04 Esferas	0,2460	0,2468	0,2244	0,2391	0,0098
16 Esferas	0,2709	0,2183	0,2475	0,2456	0,0182
64 Esferas	0,3014	0,2397	0,3125	0,2845	0,0299

Fonte: Autoria Própria (2023)

Já na Tabela 9, se encontram os valores obtidos a partir das propriedades das esferas, das propriedades do fluido e da velocidade terminal do experimento.

**Tabela 9 - Resultados dos Ensaios das esferas de resina**

Partículas	Diâmetro	Esfericidade	Razão Mássica	Galileu	Velocidade normalizada	Reynolds	Coefficiente de Arrasto
[un]	d [mm]	$\phi$	$m^*$	$Ga_D$	$v^*$	$Re_D$	$C_D$
1	17,84	1	1,31	4160	1,000	4745	1,016
4					0,895	4248	1,268
16					0,920	4364	1,202
64					1,066	5056	0,895

Fonte: Autoria Própria (2023)

O valor da esfericidade, proposto por Wadell (1933), pode ser definido por:

$$\phi = \frac{\text{Área da superfície de uma esfera de volume equivalente}}{\text{Área da superfície da partícula}} \quad (37)$$

Os valores para razão mássica, número de Reynolds e número de Galileu foram calculados a partir das equações 9, 14 e 25, respectivamente.

Os valores apresentados para a velocidade foram normalizados a partir da velocidade de uma partícula sedimentando sozinha, dessa maneira, é possível verificar o aumento ou redução da velocidade de maneira proporcional.

Para encontrar o valor do coeficiente de arrasto terminal, foi necessário a realização de um balanço de forças:

$$\sum F = 0 \quad (37)$$

$$F_D + F_E + F_P = 0 \quad (38)$$

$$\frac{C_{DT}AV_T^2\rho_f}{2} + \rho_f Vg + mg = 0 \quad (39)$$

$$\frac{d^2\pi}{8}C_{DT}V_T^2\rho_f + \frac{4d^3\pi}{3} \frac{d\rho_f g}{8} + \frac{4d^3\pi}{3} \frac{d\rho_p g}{8} = 0 \quad (40)$$

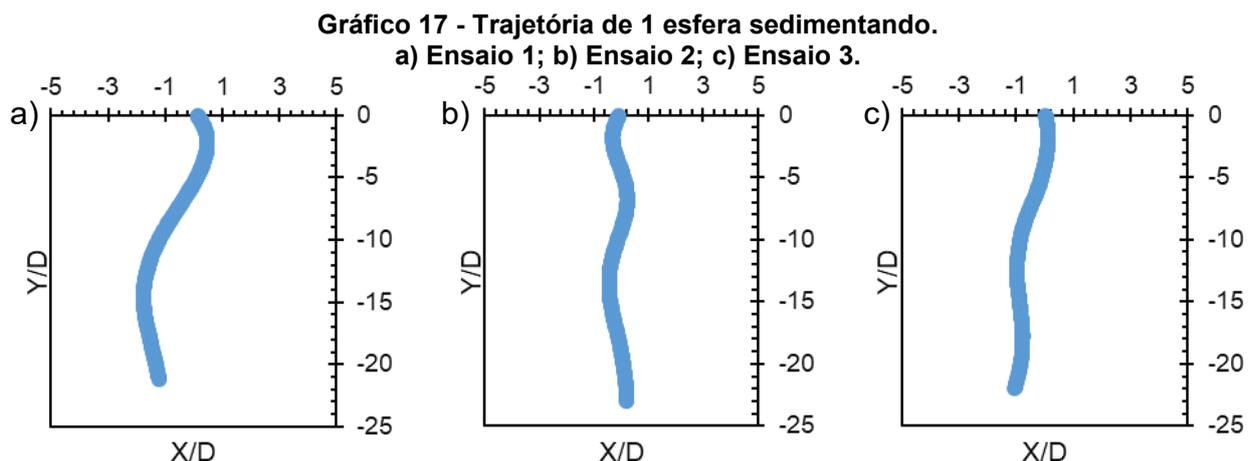
$$C_{DT}V_T^2\rho_f + \frac{4}{3}d\rho_f g + \frac{4}{3}d\rho_p g = 0 \quad (41)$$

$$C_{DT} = \frac{4}{3} \frac{dg}{V_T^2} \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right) \quad (42)$$

#### 4.3.1 Sedimentação de 1 Esfera

Para verificar a influência de diversas partículas sendo sedimentadas juntas, foram realizados ensaios com uma única esfera sedimentando, para dessa maneira comparar os dados obtidos e conferir possíveis influencias das outras partículas.

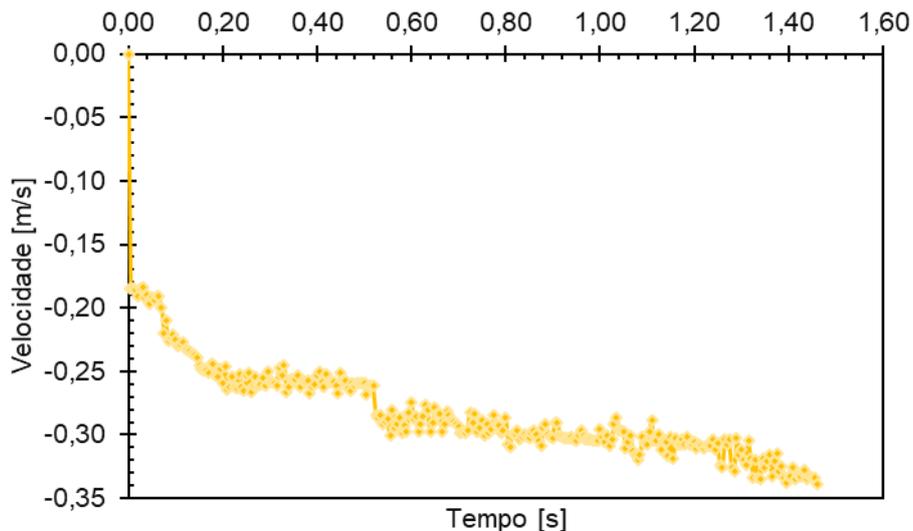
No Gráfico 17, estão as trajetórias da esfera sedimentando sozinha. Nele é possível observar que as trajetórias apresentam um movimento obliquo e intermitente.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao examinar a velocidade de sedimentação da esfera de resina, presente no Gráfico 18, é pode-se reparar que, devido a sua menor razão mássica, a aceleração é menor.

**Gráfico 18 – Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 1 esfera**



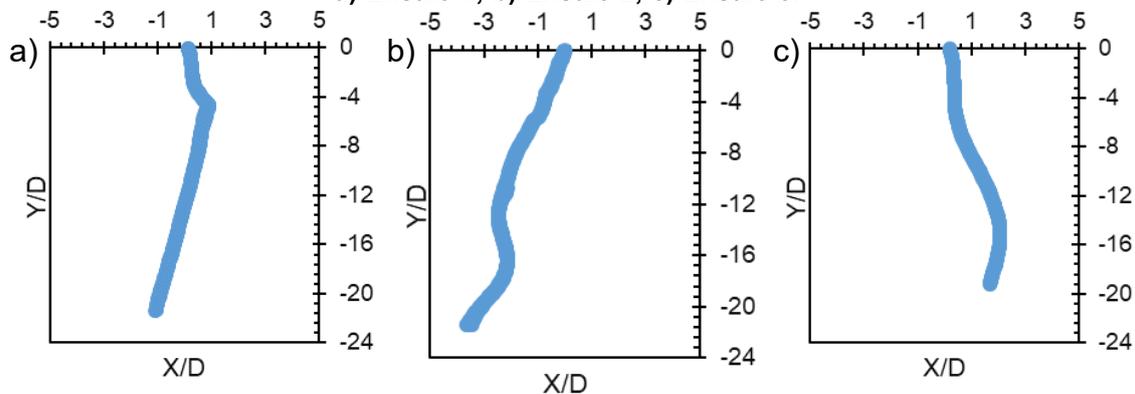
Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.2 Sedimentação de 4 Esferas

Analisando o Gráfico 19, é possível verificar que no ensaio 1, Gráfico 19a, existe uma mudança brusca na trajetória da esfera, o que indica uma interação com as outras partículas sedimentando. Tal interação será ilustrada adiante.

**Gráfico 19 - Trajetória de 4 esferas sedimentando.**

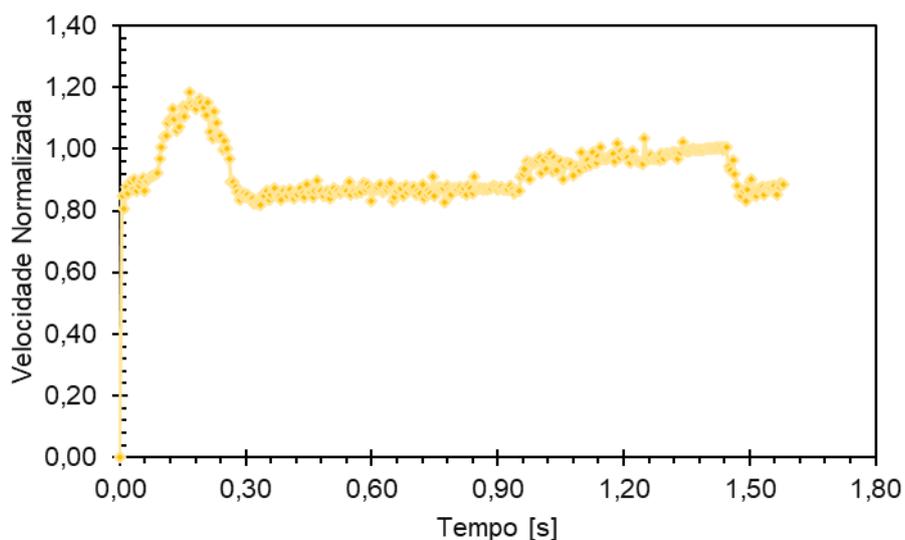
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria Própria (2023)

A interação vista, também pode ser observada no Gráfico 20 que apresenta a variação da velocidade de sedimentação em função do tempo para 4 partículas sedimentando em conjunto.

**Gráfico 20 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 4 esferas**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Nesse gráfico é possível ver um grande aumento na velocidade, a partir do instante 0,12s, que atinge um pico de 120% da velocidade de sedimentação de uma esfera. Isto pode ser devido a interação da partícula com a esteira de outra partícula sedimentando ao seu redor.

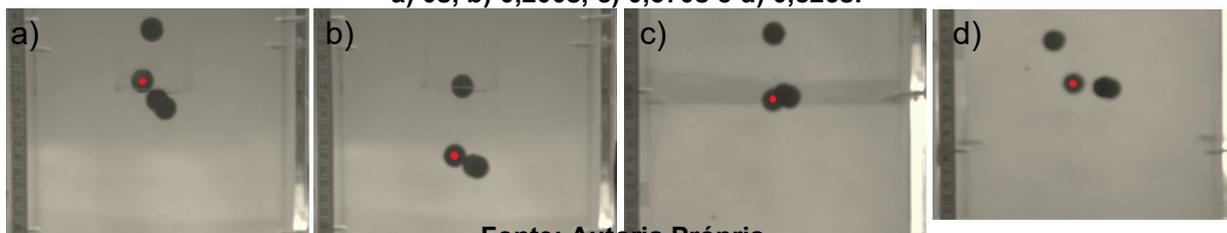
Após o claro pico de velocidade, a velocidade apresenta certa estabilidade, se mantendo entre 90% da velocidade de sedimentação de uma esfera, até que no instante 0,90s a partícula apresenta uma leve aceleração e no instante 1,44s apresenta novamente uma desaceleração, o que pode ser devido a uma nova interação de *drafting* e *kissing*.

Na Fotografia 18c é evidente o contato entre as partículas sedimentando, que é ilustrado pela mudança brusca na trajetória observado anteriormente.

Porém, o aumento de velocidade visto anteriormente não se deve a isso, a esfera analisada ter acelerado provém dela ter entrado na esteira das esferas sedimentando antes dela, o que fez com que ela as alcançasse e posteriormente encostasse nas mesmas.

Esse contato fez com que a esfera tivesse um deslocamento lateral que é refletido na desaceleração da partícula que acontece após a aceleração.

Fotografia 18 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,200s, c) 0,370s e d) 0,825s.



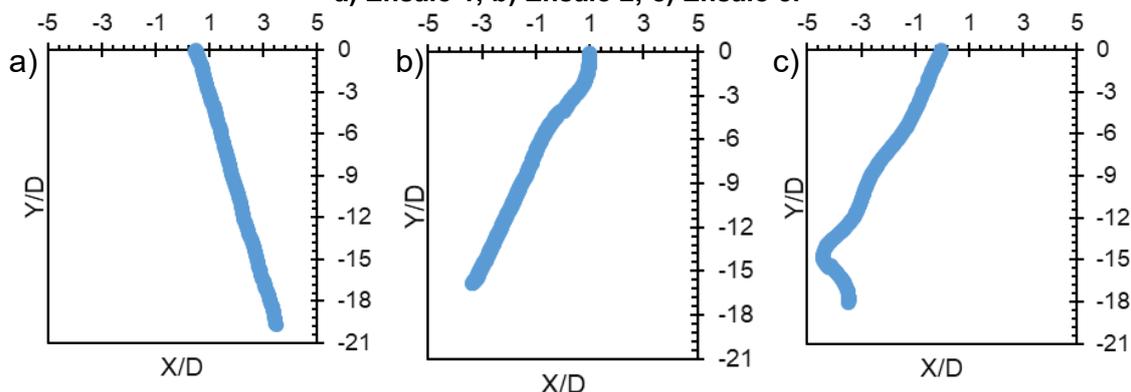
Fonte: Autoria Própria

Na Fotografia 18 também é perceptível que entre os instantes 0s e 0,2s, acontece o processo de *drafting*, onde há a aceleração da partícula, seguido pelo processo de *kissing* no instante 0,370s.

#### 4.3.3 Sedimentação de 16 Esferas

Ponderando o Gráfico 21, é possível observar que as trajetórias apresentam um comportamento oblíquo, diferentemente do que foi visto com a esfera sedimentando sozinha, não há oscilações.

Gráfico 21 - Trajetória de 16 esferas sedimentando.  
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.

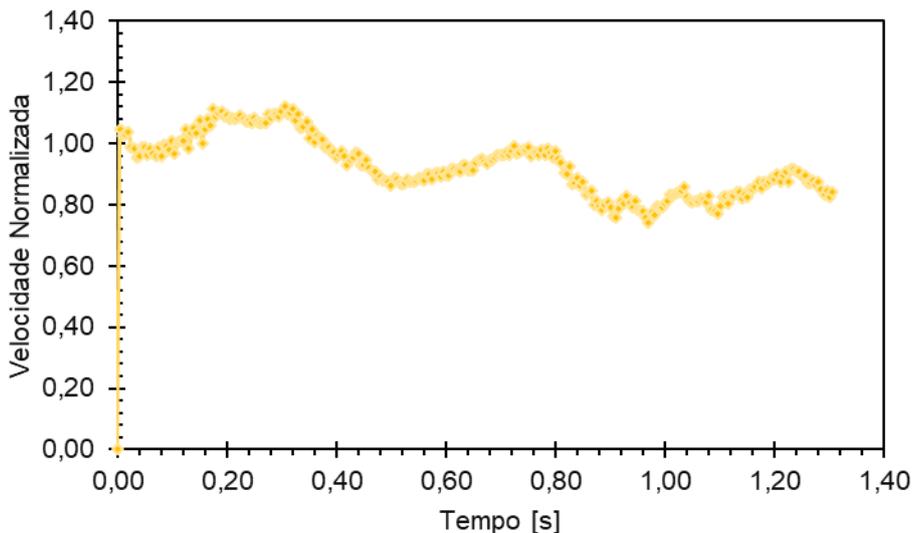


Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 21c, a esfera sedimenta de maneira oblíqua assim como no Gráfico 21a e Gráfico 21c, porém, seu deslocamento lateral é mais acentuado, fazendo com que a esfera colida com a parede, ilustrado na Fotografia 20.

No Gráfico 22, percebe-se que a velocidade apresenta um comportamento oscilatório, apresentando acelerações e desacelerações ao longo do escoamento. Isso pode ser atribuído à maior quantidade de partículas ao seu redor, que fez com que a partícula analisada estivesse submetida a forças de diferentes direções ao longo da sedimentação, fazendo com que ela acelerasse e desacelerasse conforme se aproximada das partículas

**Gráfico 22 – Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 16 esferas**

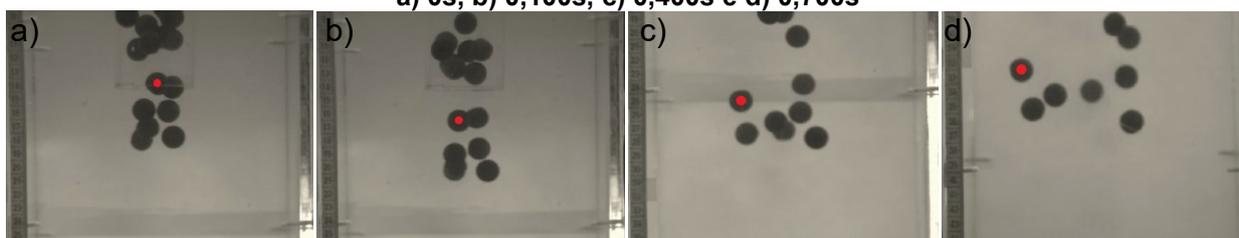


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 19, é possível observar que a esfera durante os instantes iniciais realiza o processo de *drafting* e *kissing*, ilustrado pela Figura 5, com a esfera que sedimenta ao seu redor, após esse fenômeno, a esfera tem sua trajetória deslocada fazendo-a ir em direção ao canto do tanque.

A aceleração vista entre os instantes 0,4s e 0,7s pode ser atribuída ao destacamento da partícula do grupo, *tumbling*, e conforme ela se aproxima da parede, ela sai da esteira da esfera a sua frente o que gera a desaceleração vista junto do efeito de parede.

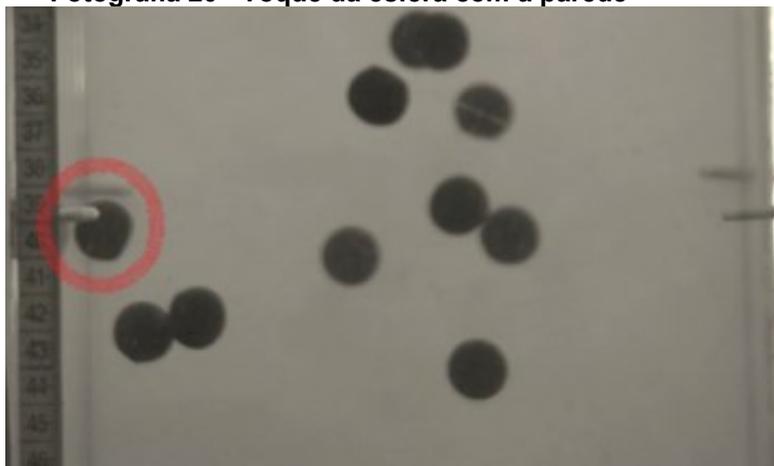
**Fotografia 19 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,100s, c) 0,400s e d) 0,700s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 20 é possível constatar o toque da partícula com o tanque que ocorre no instante 1,02s. Após isso, a esfera obviamente muda bruscamente sua trajetória como é possível observar no Gráfico 21c, além disso, a esfera volta a acelerar pois o toque a direciona para baixo.

Fotografia 20 - Toque da esfera com a parede



Fonte: Autoria Própria (2023)

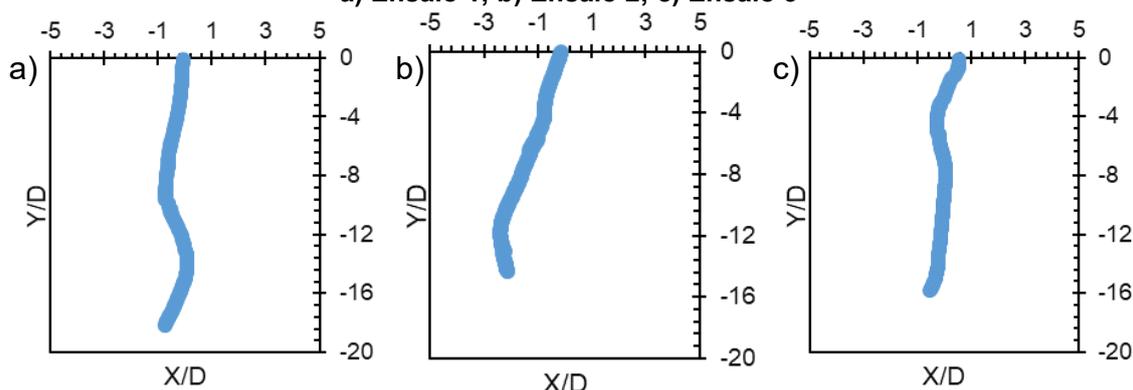
Por fim, nota-se que ao submeter a esfera a sedimentar junto de 15 outras, interações partícula-partícula são mais frequentes, sendo possível observar o fenômeno de *drafting* e *kissing* em diferentes grupos de esferas. Também é perceptível que as esferas tendem a se espalhar e ir em direção as paredes.

#### 4.3.4 Sedimentação de 64 Esferas

Nessa seção será discutido os resultados obtidos ao sedimentar 64 esferas juntas. Ao contemplar o Gráfico 23, repara-se que assim como no Gráfico 19, há menos oscilações horizontais na trajetória da partícula.

Gráfico 23 - Trajetória de 64 esferas sedimentando.

a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3



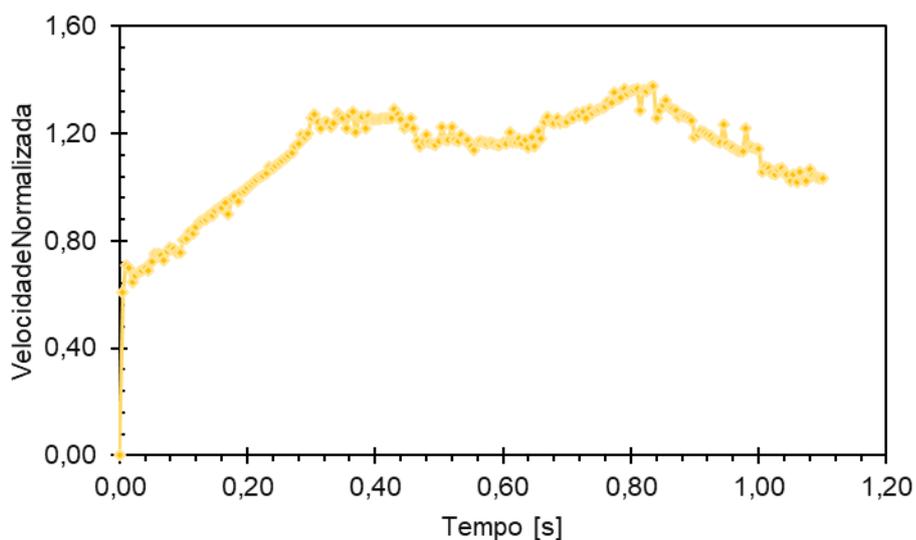
Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 24 a partícula acelera até atingir um pico de velocidade, cerca de 130% da velocidade de sedimentação de uma esfera sedimentando sozinha. Percebe-se que nessa situação a partícula demorou mais a acelerar quando

comparando com o Gráfico 18, o que se deve ao aumento das partículas ao seu redor.

Após a aceleração, o valor da velocidade se mantém estável por uns instantes para enfim começar a desacelerar a partir do instante 0,8s, tal fenômeno indica um toque com outra partícula.

**Gráfico 24 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 64 esferas**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

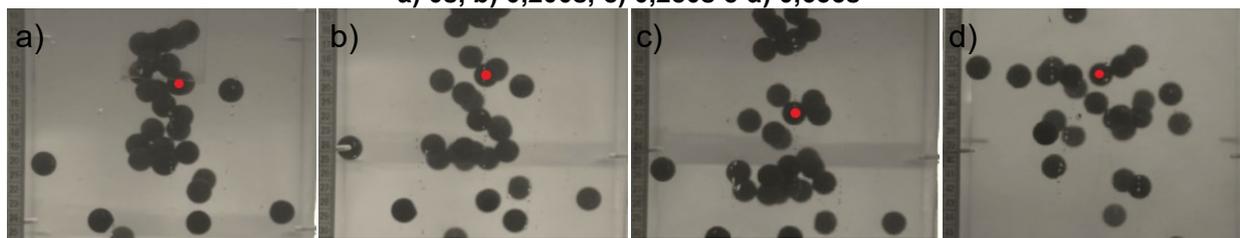
Na Fotografia 21 é possível observar que a partícula sedimenta constantemente sobre influência das partículas em sua vizinhança. Dessa maneira, a partícula está muito mais suscetível a contatos, como é visto no instante 0,280s, Fotografia 21c, e no instante 0,655s, Fotografia 21d.

Tais instantes foram selecionados com base no Gráfico 23c e Gráfico 24, pois apresentavam mudanças de comportamento que indicavam interações entre as partículas.

Na Fotografia 21c, é possível verificar o contato entre a partícula analisada e outra sedimentando, isso é refletido no gráfico da velocidade, onde a partícula que estava acelerando tem sua velocidade estabilizada.

Na Fotografia 21d, nota-se outro contato entre partículas, porém, dessa vez há uma leve desaceleração, além de causar um desvio na trajetória como é visível no Gráfico 23c.

Fotografia 21 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,200s, c) 0,280s e d) 0,655s



Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, percebe-se que com o aumento do número de partículas no escoamento, existe a tendência de mais contato entre as partículas, além de aumentar a frequência do *drafting*.

É possível constatar também que algumas das partículas após um tempo sedimentando tendem a se deslocar para a parede, e esse número parece aumentar com o aumento de partículas sedimentando.

#### 4.4 Esferas de Vidro

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com as esferas de vidro apresentadas na seção 3.1. Foram executados ensaios de sedimentação com partículas esféricas de vidro, com a finalidade de comparar o efeito de razão mássica das partículas, onde a esfera de vidro possui uma razão mássica de 2,3 e a esfera de resina, vista na seção anterior, possui uma razão mássica de 1,3.

Na Tabela 10, é possível observar as velocidades terminais obtidas.

Tabela 10 - Velocidade terminal (m/s) dos Testes

Quantidade	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio Padrão
<b>01 Esfera</b>	0,3461	0,3694	0,3938	0,3698	0,0160
<b>04 Esferas</b>	0,3797	0,3355	0,3489	0,3547	0,0167
<b>16 Esferas</b>	0,3510	0,3518	0,3277	0,3435	0,0105
<b>64 Esferas</b>	0,3521	0,3457	0,3705	0,3561	0,0096

Fonte: Autoria Própria (2023)

Já na Tabela 11, se encontram os valores obtidos a partir das propriedades das esferas, das propriedades do fluido e da velocidade terminal do experimento.

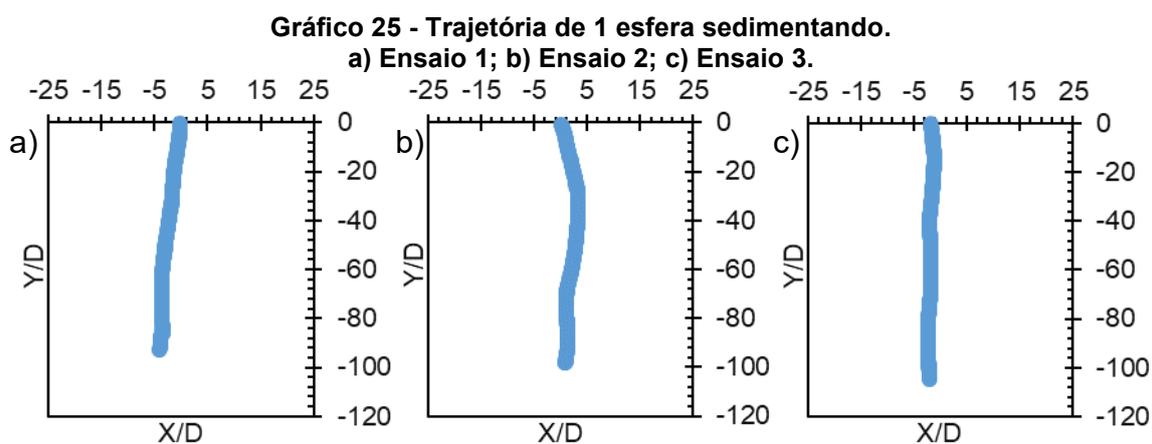
Tabela 11 – Resultado dos testes das esferas

Partículas	Diâmetro	Esfericidade	Razão Mássica	Galileu	Velocidade normalizada	Reynolds	Coefficiente de Arrasto
[ $\mu\text{m}$ ]	$d_{\text{EQ}}$ [mm]	$\phi$	$m^*$	$Ga_D$	$v^*$	$Re_D$	$C_D$
1	3,69	1	2,31	823	1,000	1365	0,458
4					0,955	1304	0,502
16					0,927	1266	0,533
64					0,961	1312	0,496

Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.4.1 Sedimentação de 1 Esfera

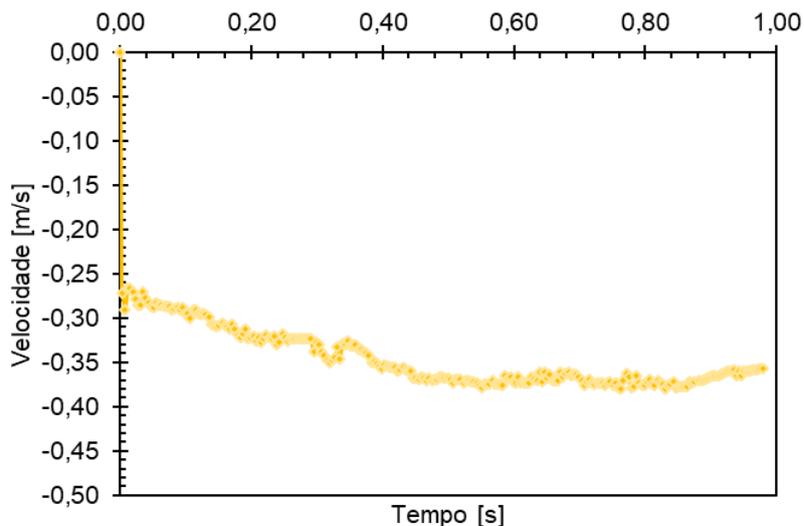
No Gráfico 25a é possível observar que a trajetória apesar de retilínea, apresenta um deslocamento de aproximadamente 5 vezes a largura da partícula. No Gráfico 25b o comportamento visto apresenta mais oscilações horizontais, onde o valor máximo também é 5 vezes a largura da partícula. É possível reconhecer que as trajetórias apresentam um comportamento mais retilíneo, principalmente no Gráfico 25c.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 26, é possível notar que a partícula atinge sua velocidade terminal mais rapidamente ao compararmos com a esfera de menor massa específica, atingindo certa estabilidade a partir dos 0,4s.

**Gráfico 26 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 1 esfera**



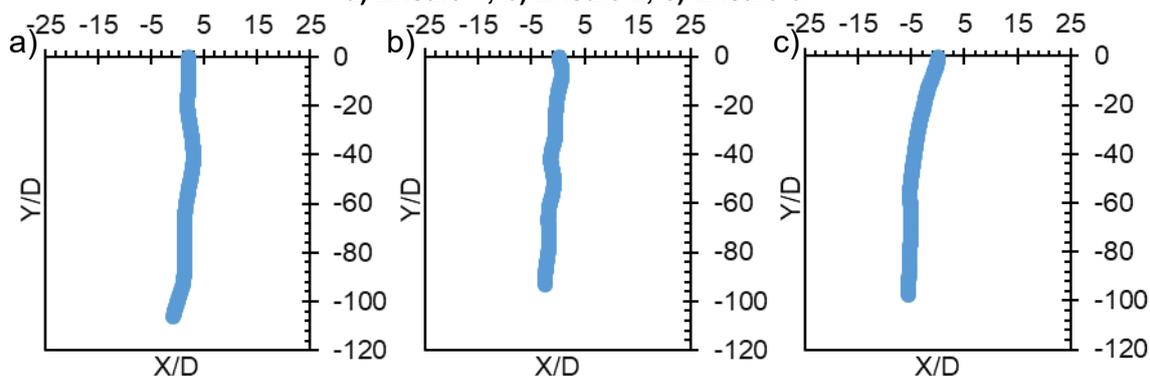
Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.4.2 Sedimentação de 4 Esferas

No Gráfico 27a é perceptível que as trajetórias apresentaram um comportamento muito similar aos vistos no Gráfico 25, assim como no Gráfico 27b. No Gráfico 27c, é possível observar que a partícula começa apresentando um comportamento oblíquo e depois apresenta trajetória retilínea.

**Gráfico 27 - Trajetória de 4 esferas sedimentando.**

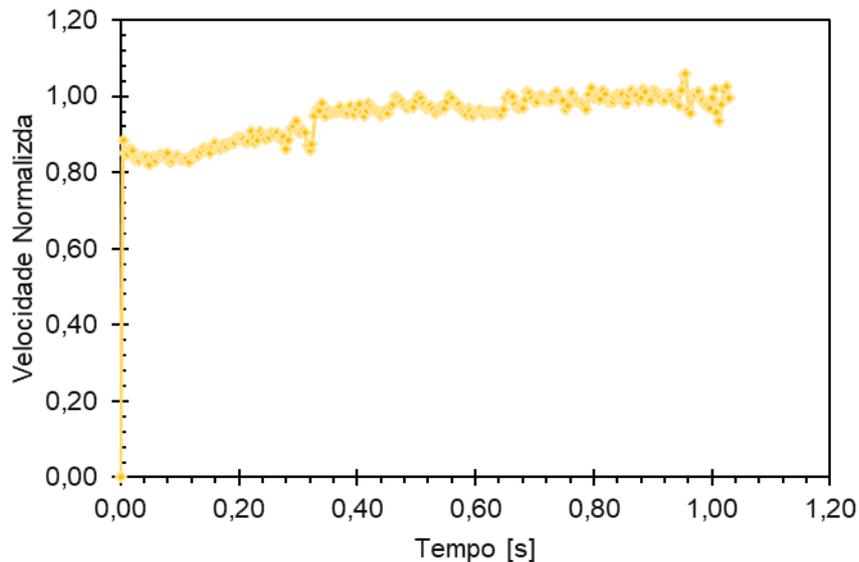
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 28, a mudança de comportamento observada na trajetória não é refletida, onde a partícula acelera e se mantém, com a velocidade atingindo um valor próximo a de uma esfera sedimentando sozinha, o que indica que a partícula sedimentou distante das outras durante o ensaio.

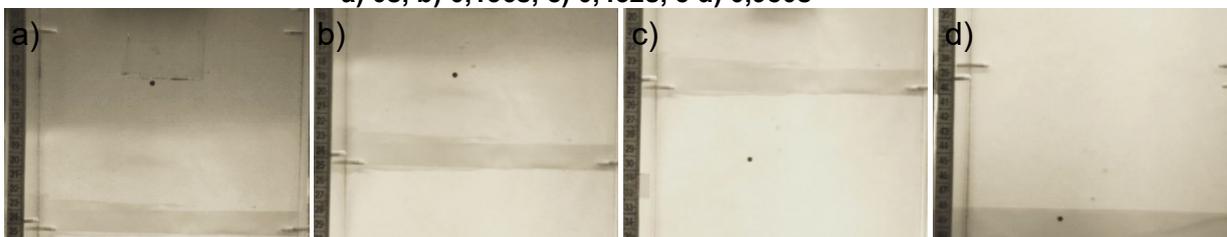
**Gráfico 28 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 4 esferas**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 22, pode-se reparar que a partícula sedimenta de forma isolada, o que reflete o comportamento da velocidade ser similar ao de 1 partícula sedimentando.

**Fotografia 22 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,136s, c) 0,452s, e d) 0,980s**



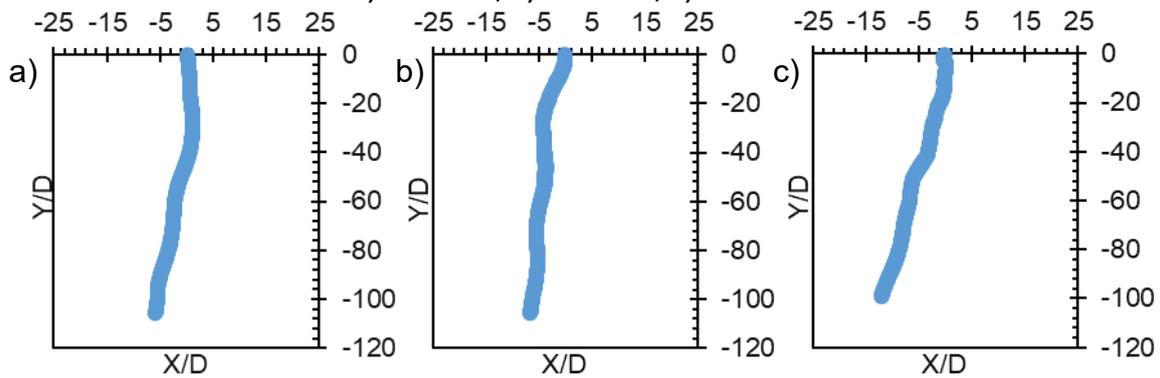
**Fonte: Autoria Própria (2023)**

#### 4.4.3 Sedimentação de 16 Esferas

No Gráfico 29 estão as trajetórias dos testes com 16 esferas. É possível notar que o Gráfico 29a e Gráfico 29c apresentam um deslocamento lateral maior que constatado anteriormente indicando uma maior influência das partículas em sua vizinhança, já o Gráfico 29b apresenta o comportamento similar ao encontrado para uma partícula sedimentando sozinha.

**Gráfico 29 - Trajetória de 16 esferas sedimentando.**

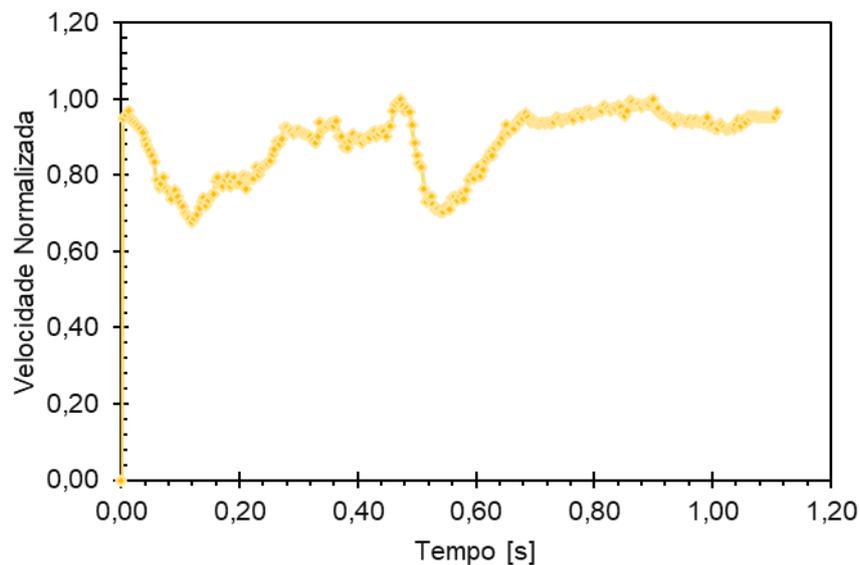
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 30 é possível reparar que a velocidade apresenta picos de desaceleração entre os instantes 0s e 0,120s e entre os instantes 0,480 e 0,560s. Tais fenômenos indicam que a partícula passou pelo processo de *drafting*, *kissing* e *tumbling* nesses instantes. Além disso, é possível observar que após o segundo pico de aceleração e desaceleração a partícula se mantém com uma velocidade constante próximo ao valor de uma esfera sedimentando, o que indica que ela se distanciou do grupo e se manteve longe.

**Gráfico 30 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 16 esferas**

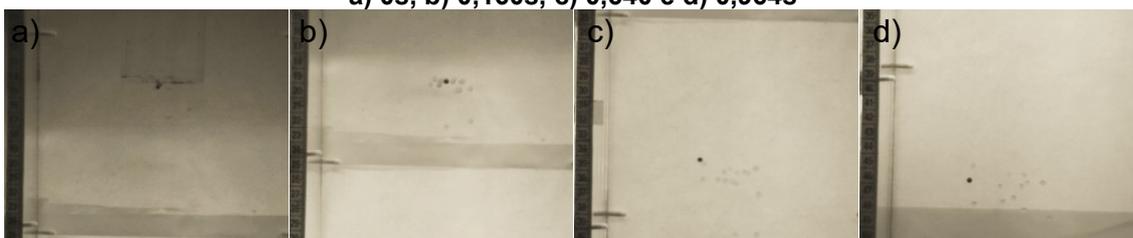


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 23 é possível observar que a partícula começa a sedimentar muito próxima das outras, fazendo com que sua velocidade seja reduzida, enquanto no final do ensaio, Fotografia 23d, ela se encontra mais distante das outras, o que reflete na estabilização da velocidade de sedimentação.

Na Fotografia 23c, a partícula está sendo submetida ao processo de *drafting*, *kissing* e *tumbling*, onde a partícula de controle está na esteira da partícula sedimentando a sua frente, se aproxima dela devido a aceleração causada pela diminuição do arrasto na esteira, toca a partícula e desacelera, posteriormente entra na esteira da partícula novamente e acelera, toca novamente na partícula e se afasta realizando o resto da sedimentação sozinha.

**Fotografia 23 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,160s, c) 0,640 e d) 0,964s**



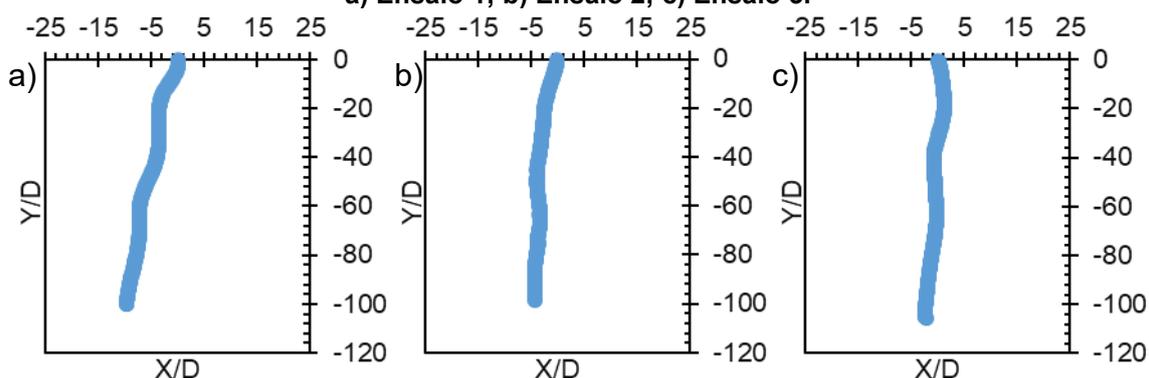
Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.4.4 Sedimentação de 64 Esferas

No Gráfico 31b é perceptível que as trajetórias apresentaram um comportamento muito similar aos observados no Gráfico 25, assim como no Gráfico 31c. No Gráfico 31a, é possível ver que a partícula apresenta um deslocamento lateral maior que observado anteriormente, indicando uma maior influência das partículas em sua vizinhança.

**Gráfico 31 - Trajetória de 64 esferas sedimentando.**

a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.

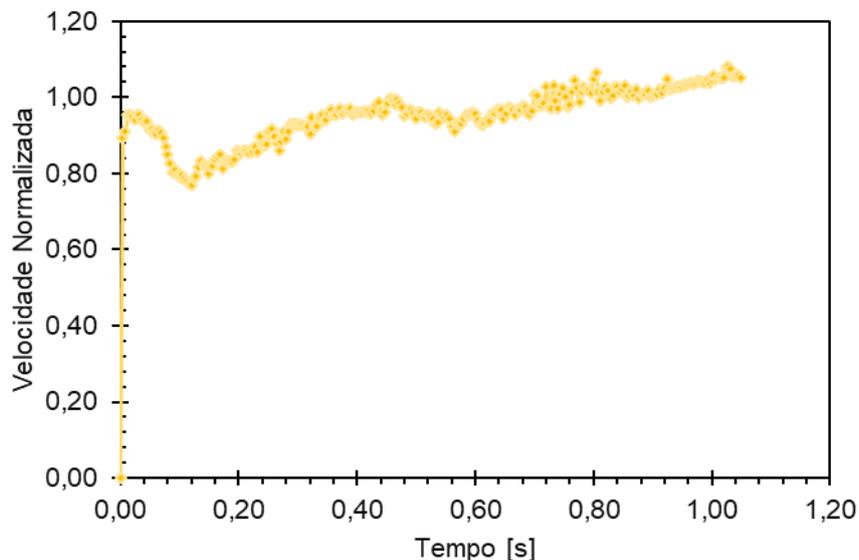


Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 32 é pode-se reparar que que entre os instantes 0s e 0,080s a partícula apresenta uma desaceleração e posteriormente acelera e se mantém acelerando à uma taxa cada vez menor, o que indica uma maior influência das outras esferas no começo da sedimentação, possivelmente com um toque nos

instantes iniciais, e posteriormente um distanciamento fazendo com que a partícula tendesse a uma velocidade próxima à de 1 esfera sedimentando.

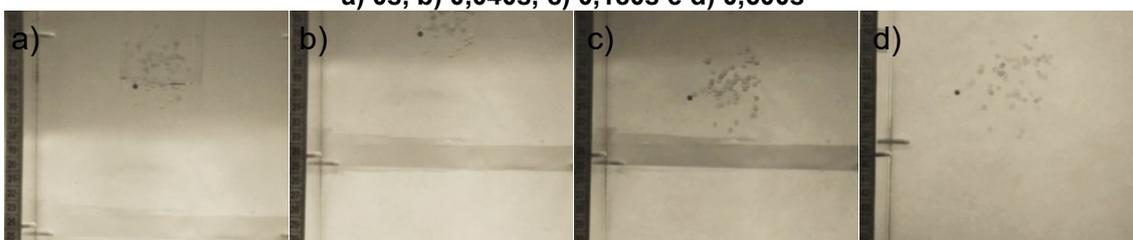
**Gráfico 32 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 64 esferas**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 24 é notório que a partícula começa sedimentando próxima das outras e ao decorrer do ensaio ela vai se deslocando lateralmente devido a um toque entre as partículas.

**Fotografia 24 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,040s, c) 0,180s e d) 0,600s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 25 é possível observar um toque da partícula, que explica o deslocamento lateral constatado na trajetória da partícula devido ao processo de *tumbling*.

Fotografia 25 - Toque no instante 0,228s



Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, é possível concluir que em relação às esferas da seção anterior, as esferas de vidro apresentam uma menor influência na trajetória e na velocidade ao ser exposta a influência de outras partículas, o que pode ser explicado pela maior razão mássica que faz com que as forças necessárias para deslocar a partícula sejam maiores.

#### 4.5 Cilindros

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com os cilindros em resina 3D apresentados na seção 3.1. Tais cilindros foram fabricados com o mesmo material e com um volume equivalente às esferas tratadas na seção 4.3, para verificar a influência da forma da partícula.

Na Tabela 12, é possível observar as velocidades terminais obtidas

Tabela 12 - Velocidade terminal (m/s) dos testes

Quantidade	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio Padrão
<b>01 Cilindro</b>	0,2116	0,1995	0,1937	0,2016	0,0067
<b>04 Cilindros</b>	0,1995	0,2017	0,1782	0,1931	0,0099
<b>16 Cilindros</b>	0,2086	0,1943	0,2415	0,2148	0,0178
<b>64 Cilindros</b>	0,2332	0,2233	0,2305	0,2290	0,0038

Fonte: Autoria Própria (2023)

Já na Tabela 13, se encontram os valores obtidos a partir das propriedades dos cilindros, das propriedades do fluido e da velocidade terminal do experimento.

Tabela 13 – Resultado dos testes dos cilindros

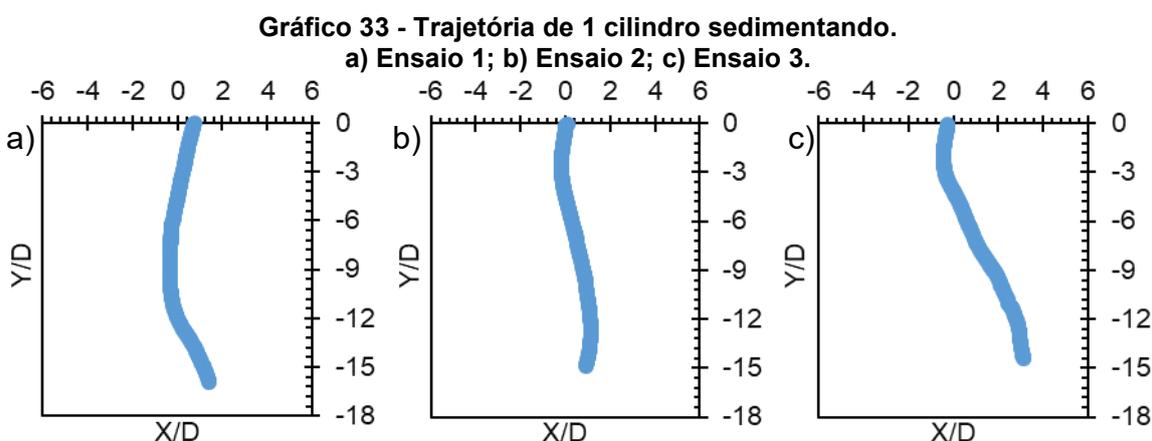
Partículas	Diâmetro	Esfericidade	Razão Mássica	Galileu	Velocidade normalizada	Reynolds	Coefficiente de Arrasto
[un]	$d_{EQ}$ [mm]	$\phi$	$m^*$	$Ga_D$	$v^*$	$Re_D$	$C_D$
1	17,84	0,87	1,31	3427	1,000	4745	1,016
4					0,958	4248	1,268
16					1,065	4364	1,202
64					1,136	5056	0,895

Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.5.1 Sedimentação de 1 Cilindro

Da mesma maneira que foram realizados ensaios com uma única esfera sedimentando, foram realizados ensaios para dessa maneira comparar os dados obtidos e verificar possíveis influências das outras partículas.

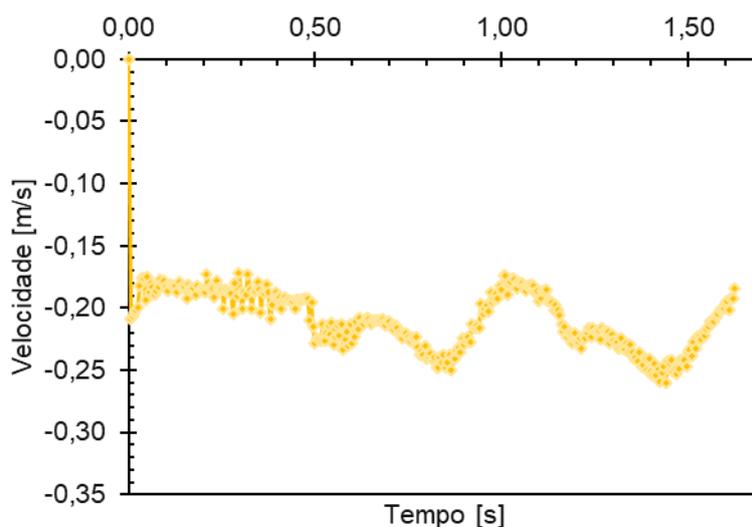
Pode-se reparar que no Gráfico 33, as trajetórias do cilindro sedimentando sozinho apresentam um movimento oblíquo e intermitente, similar ao que ocorre com as esferas de resina, isso pode ser atribuído a mesma razão mássica além do número de Reynolds ser bem próximo.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 34, verifica-se que a velocidade do cilindro não se mantém constante como se é observado com as esferas.

**Gráfico 34 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 1 cilindro**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Essas variações no comportamento da velocidade podem ser explicados pelas Fotografia 26, Fotografia 27 e Fotografia 28, que demonstram que o cilindro ao sedimentar rotaciona em torno de si mesmo. Ao correlacionar isso com a fórmula generalista para a velocidade terminal de um objeto em queda livre:

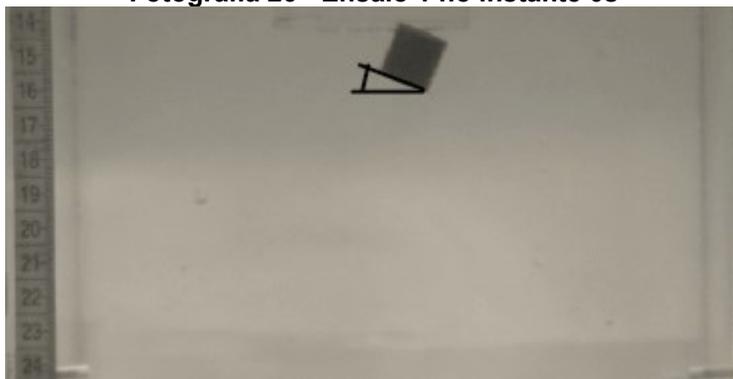
$$V_T = \sqrt{\frac{2mg}{\rho AC}} \quad (43)$$

É possível notar que a velocidade terminal depende da área normal do objeto ao escoamento, então, devido as rotações, essa área constantemente varia, fazendo com que a velocidade do cilindro também apresente tais variações, conseqüentemente a força de arrasto associado a essa sedimentação também apresentará a mesma variação.

Na Equação 43,  $m$  é a massa da partícula sedimentando,  $g$  é a aceleração gravitacional,  $\rho$  é a densidade do fluido no qual a sedimentação está ocorrendo,  $A$  é a área normal ao escoamento da partícula e  $C$  é o coeficiente de atrito da partícula.

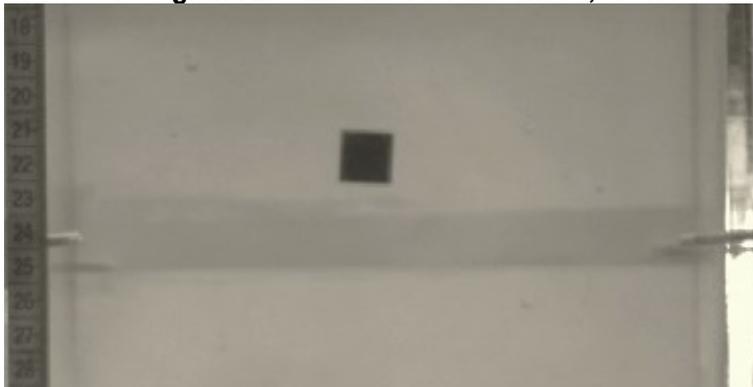
Na Fotografia 26, é possível visualizar o instante inicial da sedimentação, nele nota-se que o cilindro está se inclinando à aproximadamente  $20^\circ$  em relação a largura do tanque.

**Fotografia 26 - Ensaio 1 no instante 0s**



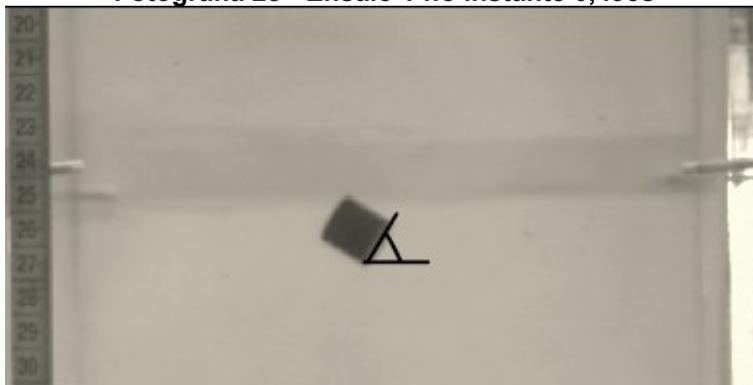
**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Já na Fotografia 27, no instante 0,310s, o cilindro encontra-se aproximadamente paralelo em relação a largura do tanque.

**Fotografia 27 - Ensaio 1 no instante 0,310s**

Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, na Fotografia 28, no instante 0,495s, o cilindro apresenta uma inclinação de  $60^\circ$  em relação a horizontal do tanque.

**Fotografia 28 - Ensaio 1 no instante 0,495s**

Fonte: Autoria Própria (2023)

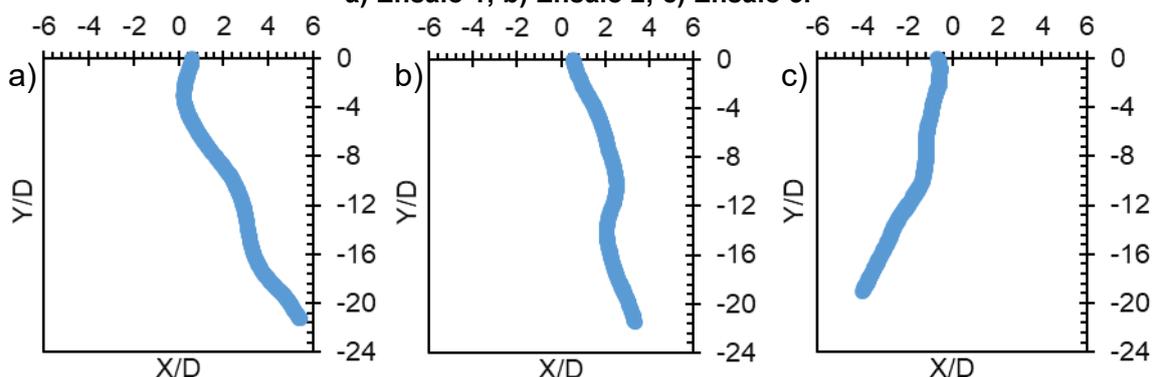
Dessa maneira, é possível afirmar que o cilindro constantemente gira em torno de si, alterando a área projetada para o escoamento, e consequentemente a força de arrasto, o que explica as variações vistas no Gráfico 34. Além disso, tal comportamento não é observado para as esferas sedimentando pois mesmo que as esferas rotacionem em torno do próprio eixo, sua área normal ao escoamento é inalterada, fazendo com que o valor da velocidade terminal se mantenha constante como é possível se observar no Gráfico 18 e Gráfico 26.

#### 4.5.2 Sedimentação de 4 Cilindros

No Gráfico 35a, é possível observar, assim como no Gráfico 35c, as partículas apresentam um movimento acentuado para um lado do tanque, o que pode indicar um toque ou interação com outra partícula.

**Gráfico 35 - Trajetória de 4 cilindros sedimentando.**

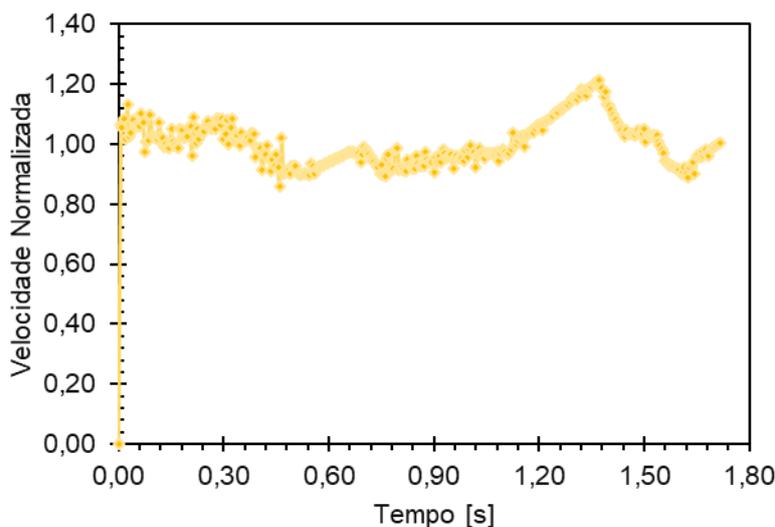
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Diferentemente dos gráficos das velocidades dos cilindros, o Gráfico 36 não indica interações entre as partículas, já que a velocidade da esfera oscila naturalmente, porém, é possível observar que a velocidade se apresenta de maneira constante até aproximadamente 1s, onde ela acelera atingindo um pico de 120% da velocidade de 1 cilindro sedimentando.

**Gráfico 36 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 4 cilindros**

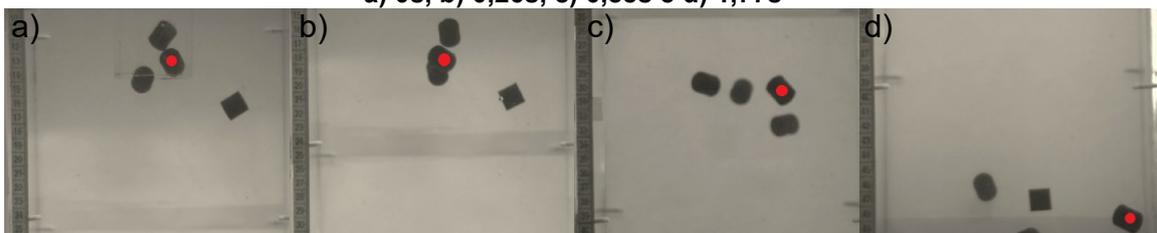


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 29b, é possível ver o instante no qual há a mudança brusca de direção, que é ilustrada pela proximidade entre a partícula avaliada e outra partícula sedimentando.

Na Fotografia 29c, nota-se que a partícula já apresenta o deslocamento para a lateral do tanque como visto no Gráfico 35a. Por fim, na Fotografia 29d, é possível observar que o cilindro está quase colidindo com a parede do tanque.

**Fotografia 29 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,26s, c) 0,88s e d) 1,77s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

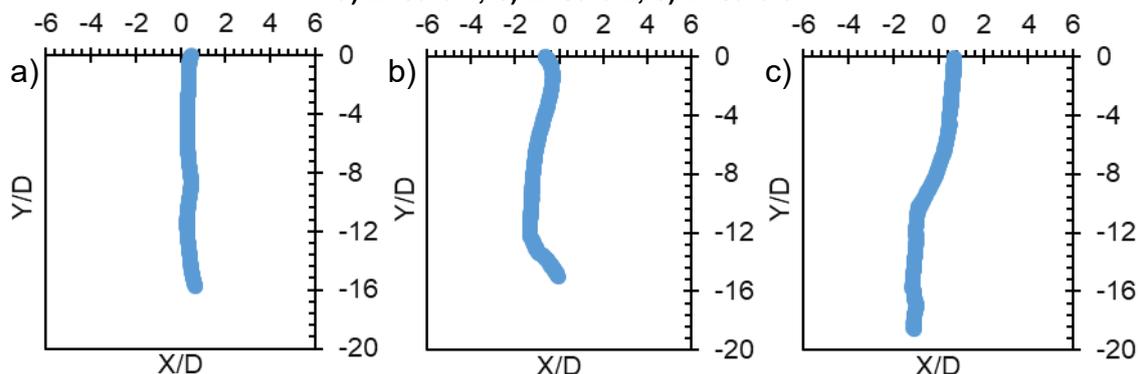
#### 4.5.3 Sedimentação de 16 Cilindros

No Gráfico 37a, nota-se que a trajetória possui um comportamento mais vertical do que visualizado com apenas 1 cilindro, o que indica que as partículas sedimentando nas vizinhanças do cilindro em análise limitaram sua movimentação.

No Gráfico 37b, a partícula apresenta um comportamento oblíquo e intermitente, similar ao visto para 1 cilindro.

**Gráfico 37 - Trajetória de 16 cilindros sedimentando.**

a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.

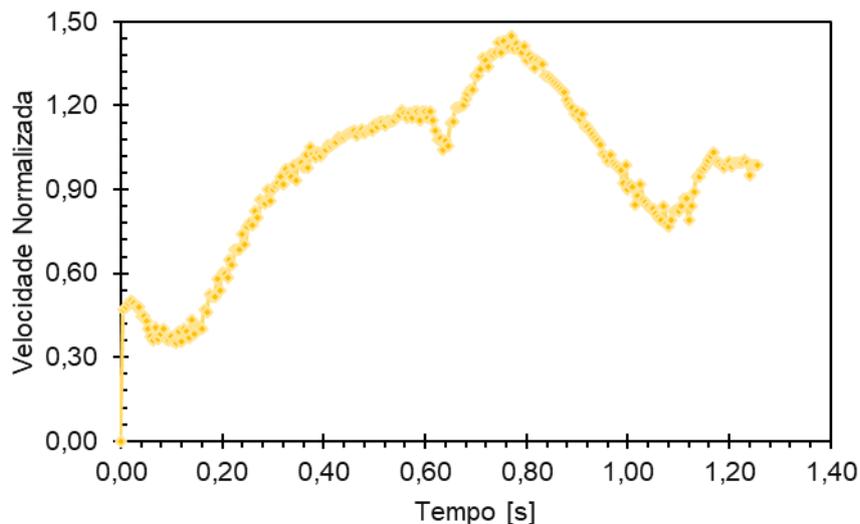


Fonte: Autoria Própria (2023)

Também é possível observar no Gráfico 37c, que o movimento do cilindro começa sendo oblíquo, mas na metade do escoamento ele começa a sedimentar de forma mais retilínea.

No Gráfico 38, é possível observar que a velocidade da partícula varia muito, possuindo picos de aceleração, onde chega a atingir 150% da velocidade de 1 cilindro sedimentando, e desaceleração que não foram observados com um cilindro sedimentando sozinho, o que indica que o cilindro tenha se aproximado e distanciado das outras partículas ao longo do escoamento. Também é possível observar que a aceleração se apresenta de maneira mais reduzida do que no Gráfico 34, onde a partícula começa a acelerar e logo desacelera.

**Gráfico 38 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 16 cilindros**

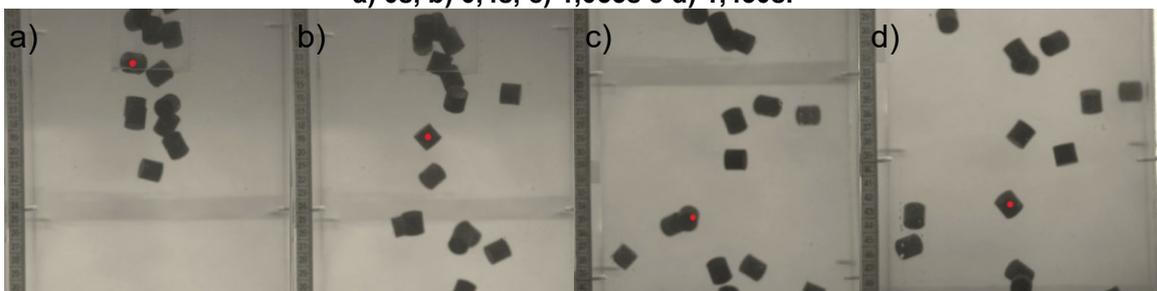


**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Na Fotografia 30, confirma-se que a partícula se aproximou e afastou das outras durante o escoamento. Na Fotografia 30b, é possível observar que a partícula escoava sem outras em sua vizinhança, o que reflete no gráfico da velocidade, onde há uma grande aceleração.

Na Fotografia 30c, há um toque entre uma partícula e a em análise, o que é refletido no gráfico da trajetória com a mudança de direção no Gráfico 37b.

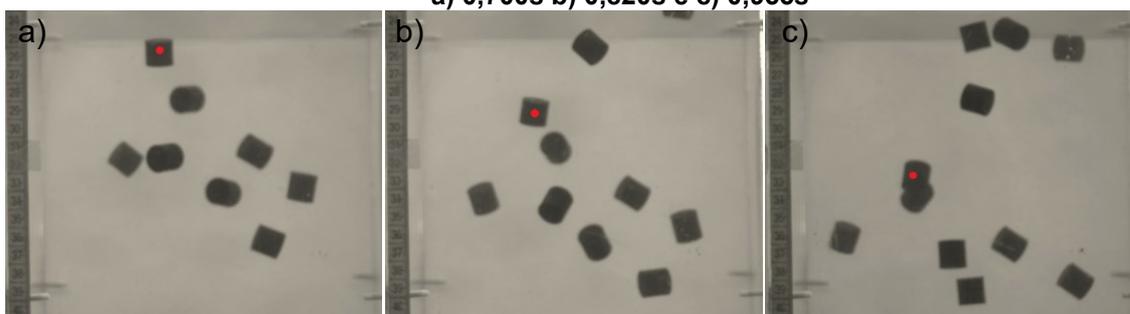
**Fotografia 30 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,4s, c) 1,055s e d) 1,450s.**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Na Fotografia 31, observa-se que as partículas estão se aproximando, ou estão em processo de *drafting*, precedendo o toque observado na Fotografia 30c, o que explica a desaceleração da partícula que é vista no Gráfico 38 nesse intervalo de tempo.

Fotografia 31 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0,700s b) 0,820s e c) 0,955s



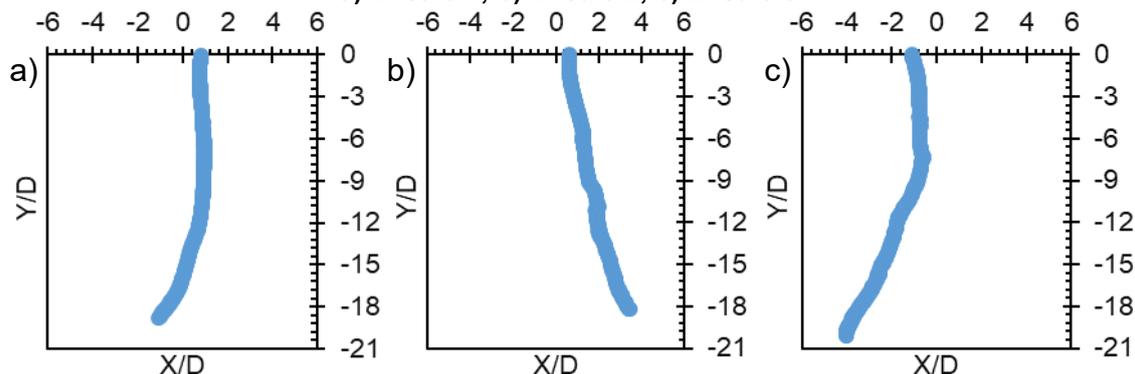
Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.5.4 Sedimentação de 64 Cilindros

No Gráfico 39, as trajetórias dos cilindros apresentam um comportamento oblíquo. No Gráfico 39a o movimento começa mais retilíneo e posteriormente começa a se deslocar para a lateral do tanque, o mesmo comportamento pode ser visto no Gráfico 39c. No Gráfico 39b, o movimento é oblíquo do começo ao fim.

Gráfico 39 - Trajetória de 64 cilindros sedimentando.

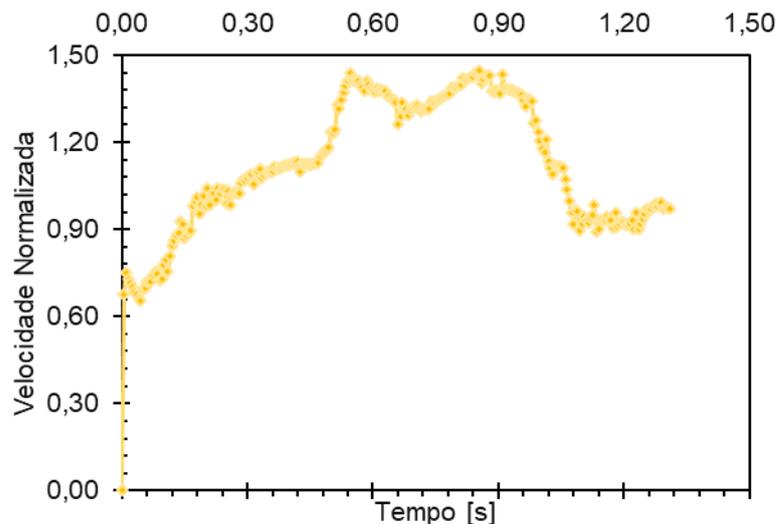
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 40 verifica-se que a aceleração da partícula é reduzida no começo da sedimentação devido as partículas em sua vizinhança, e no instante 0,8s a velocidade apresenta uma redução brusca e por fim, no instante 1,4s apresenta uma aceleração brusca que pode indicar uma colisão ou uma interação entre a partícula em análise e outras em sua vizinhança.

**Gráfico 40 - Desenvolvimento da velocidade de sedimentação de 64 cilindros**

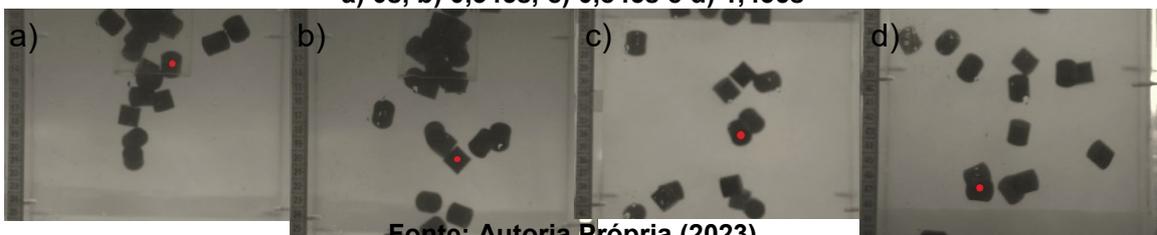


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 32, é possível observar que entre os instantes 0s e 0,345s, a partícula está com diversas partículas em sua vizinhança explicando a aceleração reduzida da partícula no começo da sedimentação.

Na Fotografia 32c, é possível observar que há um toque entre as partículas, tal toque ocasiona a redução da velocidade observada no Gráfico 40, além da mudança de direção vista no Gráfico 39a.

**Fotografia 32 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,345s, c) 0,845s e d) 1,435s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

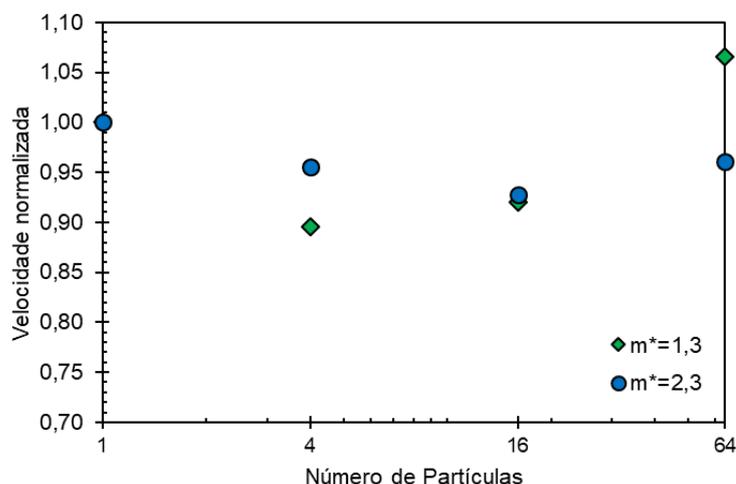
Na Fotografia 32d, é possível observar um outro toque da partícula que é refletido no Gráfico 40 com um aumento da velocidade de sedimentação.

#### **4.6 Efeito da Razão Mássica**

De modo a verificar a influência da razão mássica, foram comparados os resultados obtidos com as esferas de vidro, com razão mássica igual à 2,31, e as esferas de resina, com razão mássica igual à 1,31.

No Gráfico 41 é possível observar que a redução da velocidade para a partícula de vidro acontece sempre e com uma intensidade parecida para as diferentes quantidades de partículas ao seu redor.

**Gráfico 41 - Velocidade normalizada em função do número de partículas**

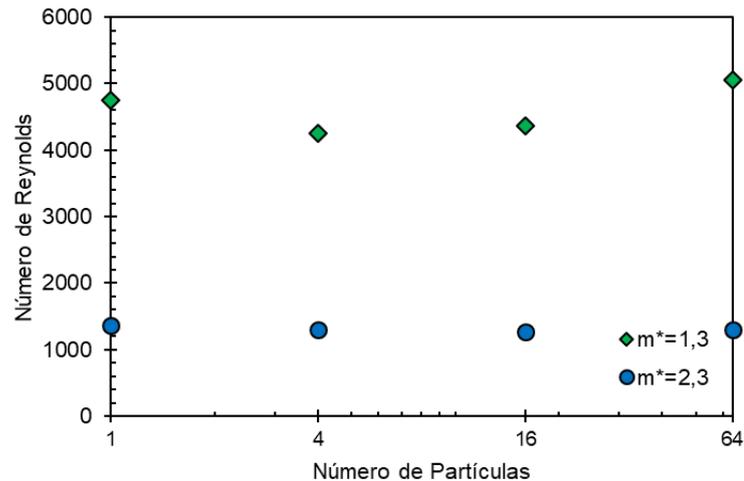


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Já a partícula de resina não apresentou a redução da velocidade ao sedimentar com 64 partículas, comportamento que também pode ser observado com os cilindros, que possuem a mesma razão mássica. Isso pode ser explicado pelo fato da partícula com menor densidade apresentar maiores oscilações laterais ao sedimentar sozinha, e quando ela sedimenta junto de muitas outras partículas, o espaço disponível para esse deslocamento é reduzido, fazendo assim com que as partículas sedimentem mais verticalmente e conseqüentemente mais rapidamente.

No Gráfico 42 é possível observar o número de Reynolds, onde é possível observar que eles apresentam um comportamento constante independente do número de partículas, principalmente para as esferas de vidro.

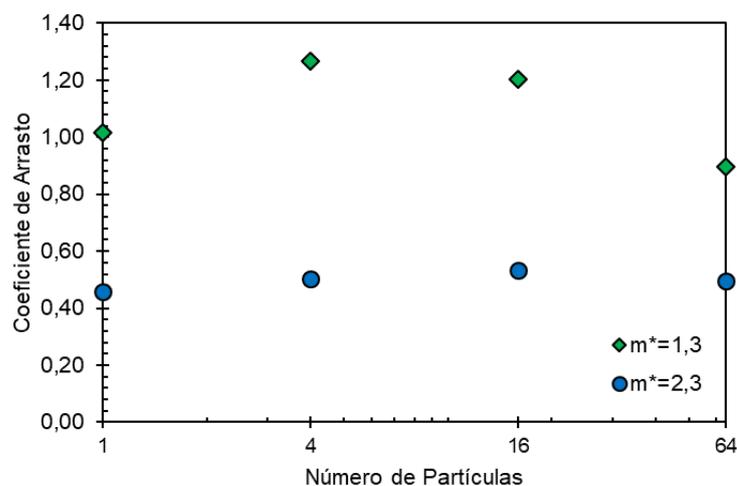
Gráfico 42 - Número de Reynolds em função do número de partículas



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 43, nota-se que os coeficientes de arrasto para as partículas analisadas apresentam uma variação maior para a partícula de resina, o que pode ser atribuído as variações nas partículas impressas serem maiores do que nas esferas de vidro.

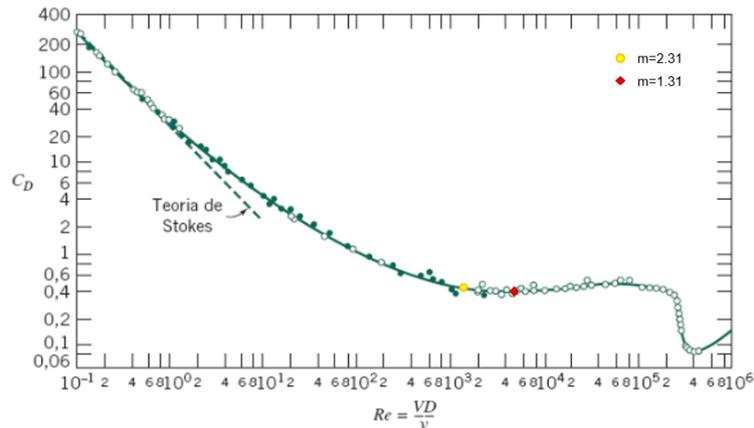
Gráfico 43 - Coeficiente de arrasto em função do número de partículas



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 44 se encontra o gráfico do coeficiente de arrasto de uma esfera lisa em função do número de Reynolds. Nele foram marcados os coeficientes de arrasto para as esferas testadas em seus respectivos Reynolds.

Gráfico 44 - Coeficiente de Arrasto em função de Reynolds

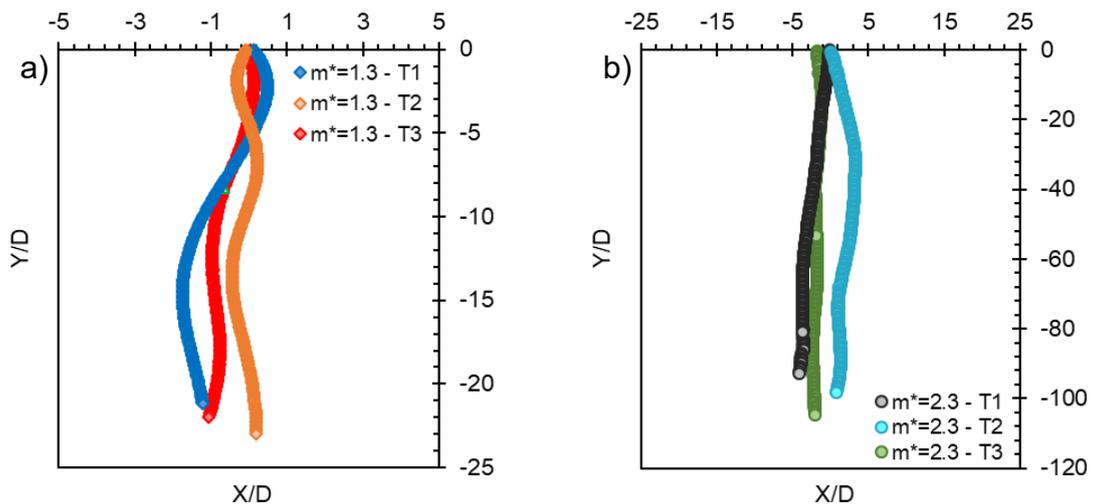


Fonte: Fox *et al.*, 2001

Nisso, é possível observar que a variação de  $C_D$  não é tão grande quanto visto no Gráfico 43, o que indica que ambas as partículas estão em um regime similar e podem ser comparadas.

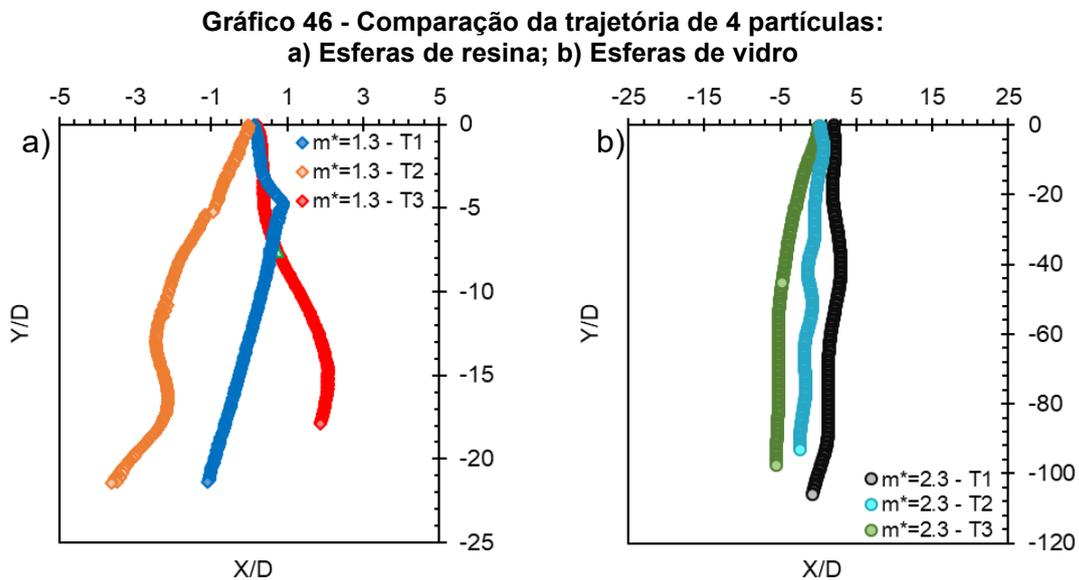
Como discutido anteriormente, no Gráfico 45 é possível ver que a trajetória para uma menor razão mássica apresenta um comportamento oblíquo e intermitente, já para partículas com maiores razões mássicas, ainda é possível verificar movimentos laterais, porém a sedimentação se comporta de maneira mais vertical.

Gráfico 45 - Comparação da trajetória de 1 partícula:  
a) Esferas de resina; b) Esferas de vidro



Fonte: Autoria Própria (2023)

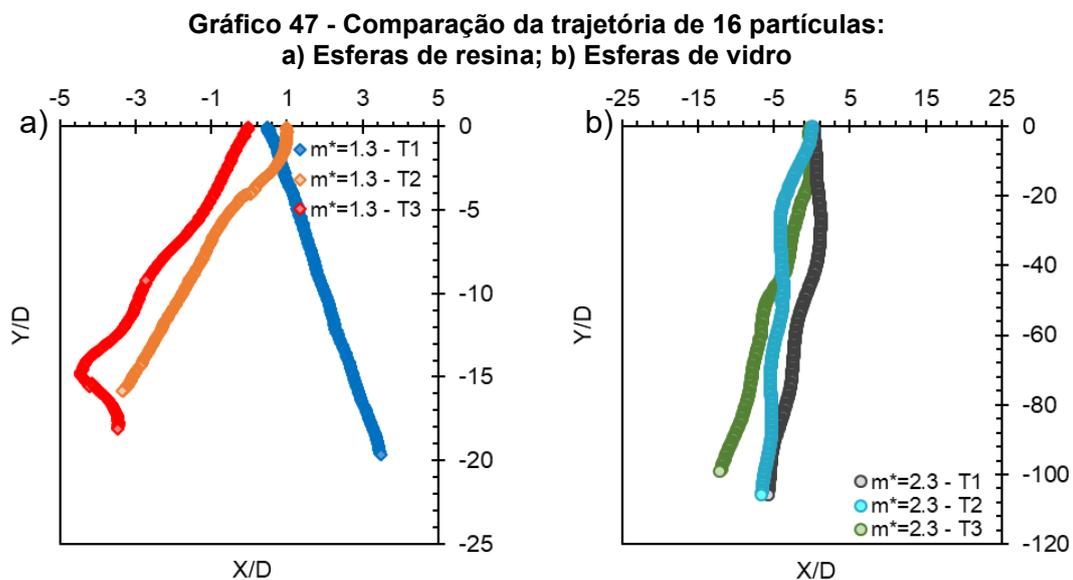
No Gráfico 46a é possível constatar que para a partícula de resina já é possível identificar interações entre as partículas, onde para os ensaios 1 e 2, a trajetória já apresenta um deslocamento lateral considerável, enquanto no ensaio 3 a partícula apresenta uma mudança brusca na trajetória



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 46b, os ensaios apresentam comportamentos similares ao observar a esfera de vidro sedimentando sozinha.

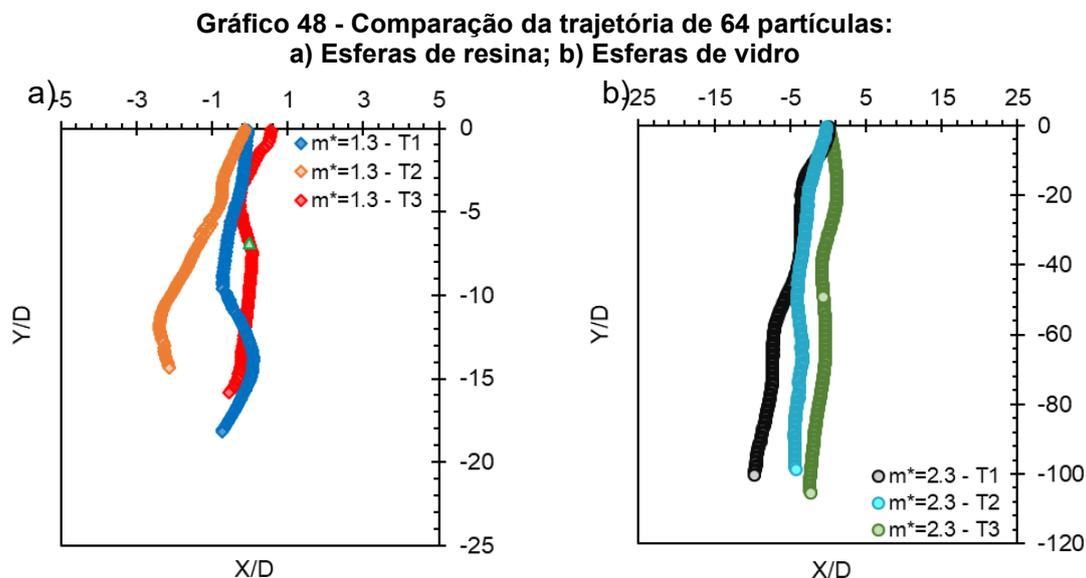
No Gráfico 47a as trajetórias se apresentam como oblíquas, além disso, no ensaio 3, é possível observar que a partícula apresenta um deslocamento lateral tão grande que colide com a parede.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 47b, a partícula começa a apresentar uma trajetória oblíqua, porém, as trajetórias ainda apresentam oscilações laterais.

No Gráfico 48a é possível observar que as esferas voltam a apresentar uma trajetória oblíqua e intermitente, possivelmente devido a limitação do movimento devido ao grande volume de partículas em seus arredores.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 48b, a partícula continua a apresentar um deslocamento lateral, porém, de maneira menos acentuada do que visto com 16 partículas, o que também pode ser explicado pela limitação do movimento devido ao grande volume de partículas em seus arredores.

Ao comparar os resultados de ambas partículas, é possível notar que para a esfera de vidro, a mudança de trajetória não se mostra tão proeminente quanto para a esfera de resina. Além disso, é possível observar que as partículas de resina apresentam oscilações horizontais maiores para todos os casos.

Também é possível perceber que para as partículas sedimentando em um grupo de 16 partículas os deslocamentos horizontais foram maiores para ambas as razões mássicas, isso pode ser atribuído ao fato de haverem mais partículas do que quando há 4 partículas, fazendo com que ocorram de maneira mais frequente as interações entre as partículas, além de possuir mais espaço livre no tanque ao se comparar com 64 partículas sedimentando, possibilitando maior liberdade para a partícula se deslocar.

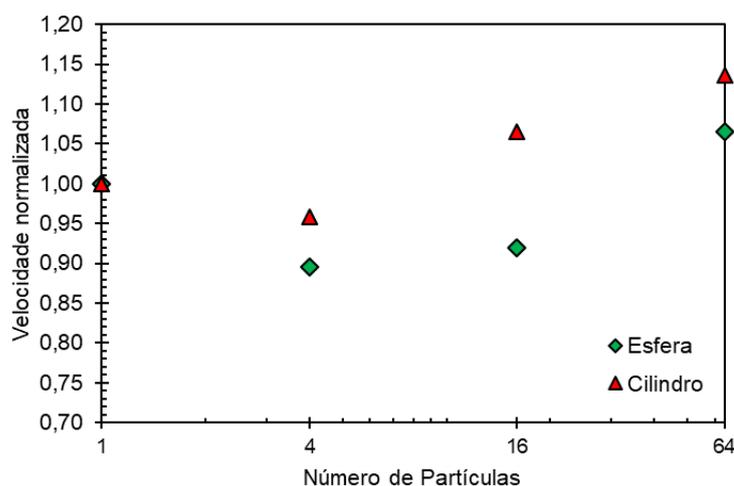
Ao observar as velocidades de sedimentação, repara-se que a partícula de vidro apresenta uma redução em todos os casos que foi exposta a uma sedimentação com múltiplas partículas, o que não ocorreu com a partícula de resina. Tais resultados podem ser explicados pela diferença da razão mássica, onde devido à baixa massa específica da partícula em relação ao fluido, a deixa mais suscetível as forças provenientes das outras partículas como a aceleração gerada pela entrada na esteira de outra partícula.

#### 4.7 Efeito da Geometria da Partícula

De modo a examinar a influência da geometria da partícula, serão comparados os resultados obtidos com as esferas de resina e os cilindros de resina pois possuem um volume equivalente.

No Gráfico 49, é possível observar que o cilindro, ao sedimentar junto de outras partículas, acaba não apresentando uma redução na velocidade como é possível perceber com as esferas, o que pode ser atribuído a rotação do cilindro, pois para partícula não esférica, a partícula posterior é atraída mais rapidamente para a esteira da partícula em sua frente, como afirmado por Ardekani *et al.* (2016).

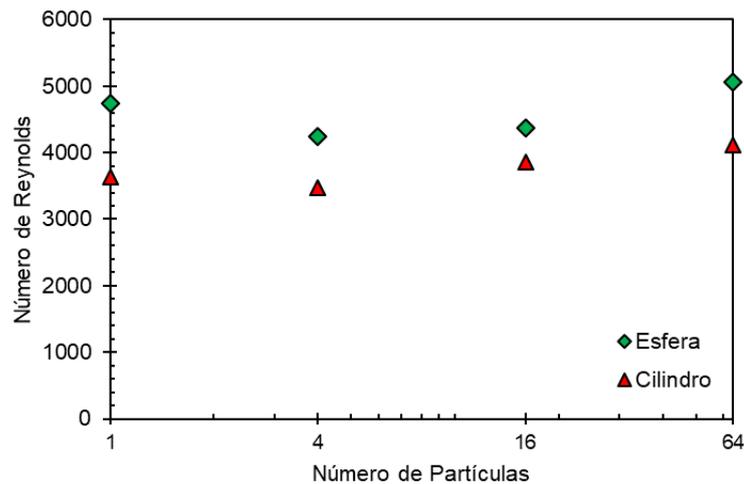
Gráfico 49 - Velocidade normalizada em função do número de partículas



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 50, é possível atentar que apesar de um volume equivalente, o cilindro apresenta um número de Reynolds menor do que a esfera, o que se deve a menor velocidade de sedimentação, devido à maior força de arrasto como descrito a seguir, e a esfericidade da partícula, onde o cilindro, que possui uma esfericidade de 0,87 possui um diâmetro equivalente menor.

**Gráfico 50 - Número de Reynolds em função do número de partículas**

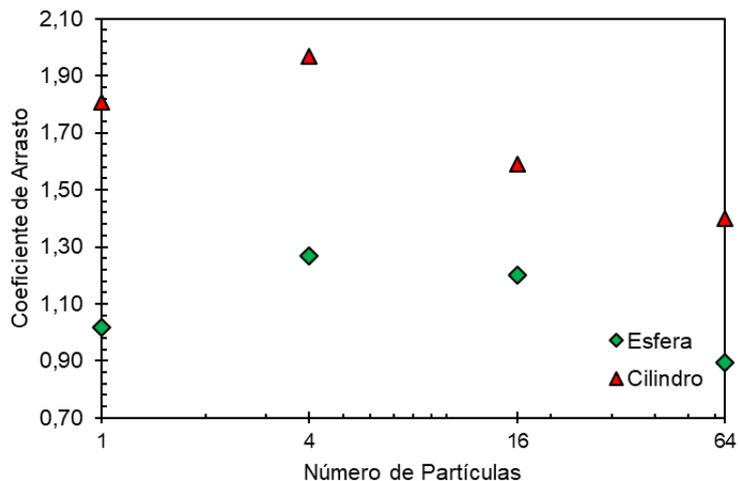


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 51 é possível reparar que o coeficiente de arrasto do cilindro é maior do que a esfera, o que se deve ao fato de um cilindro possuir uma área de seção transversal constante, resultando em uma distribuição de pressão que cria vórtices turbulentos significativos na esteira do objeto.

Esses vórtices aumentam a resistência ao movimento, resultando em um maior arrasto. Por outro lado, uma esfera possui uma distribuição de pressão mais suave e simétrica, o que leva a uma formação de vórtices mais controlada na esteira, resultando em um arrasto menor em comparação com um cilindro.

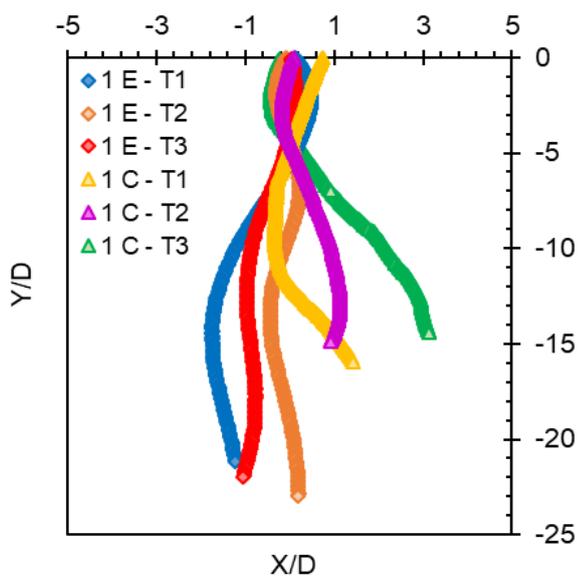
**Gráfico 51 - Coeficiente de arrasto em função do número de partículas**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 52 é possível constatar que os cilindros já apresentam um deslocamento lateral mais perceptível.

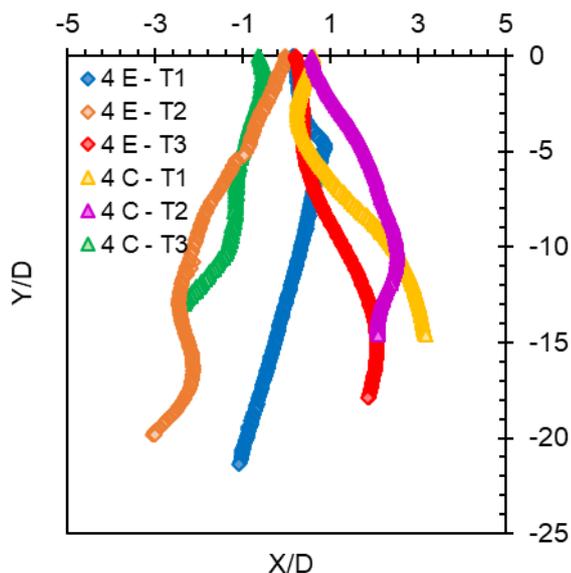
**Gráfico 52 - Comparação da trajetória de 1 partícula**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 53, nota-se que as esferas já começam a apresentar mudanças de direções, ensaio 1, e deslocamentos laterais mais acentuados, enquanto os cilindros ainda não apresentaram influências perceptíveis.

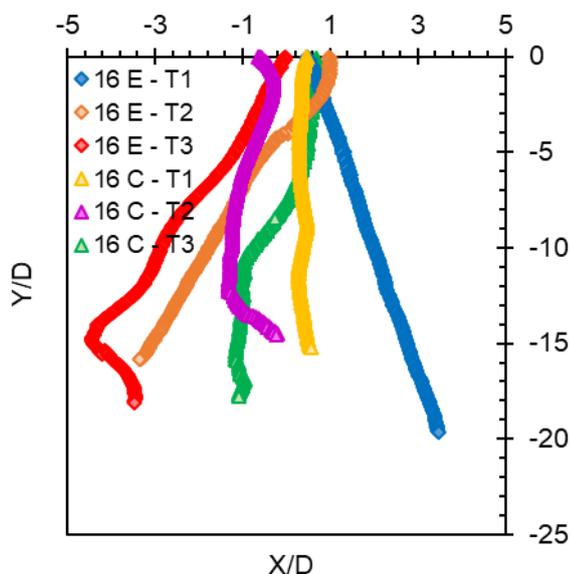
Gráfico 53 - Comparação da trajetória de 4 partículas



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 54 é possível observar que o ensaio 2 dos cilindros apresenta duas mudanças bruscas de direção, indicando interações entre as partículas, além disso, é possível ver que as trajetórias dos cilindros apresentam um comportamento mais retilíneo, diferentemente das esferas que tendem à lateral do tanque.

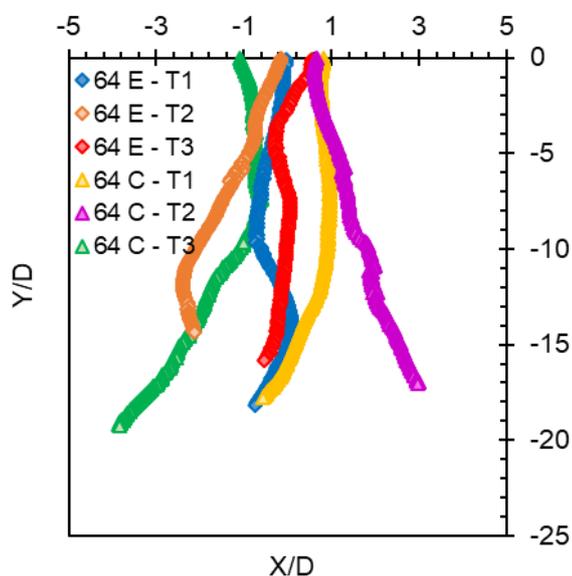
Gráfico 54 - Comparação da trajetória de 16 partículas



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 55 é possível constatar que os cilindros apresentam um deslocamento lateral mais acentuado, onde no ensaio 3, o cilindro apresenta uma mudança de trajetória no meio da sedimentação.

**Gráfico 55 - Comparação da trajetória de 64 partículas**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para as esferas, é possível observar que as esferas voltam a apresentar uma trajetória oblíqua e intermitente, possivelmente devido a limitação do movimento devido ao grande volume de partículas em seus arredores. Tal comportamento não se repete para os cilindros.

Por fim, pode-se concluir que a esfericidade da partícula apresenta um fator muito importante para a sedimentação das partículas, onde partículas com a mesma massa específica e volume podem apresentar velocidades e trajetórias diferentes somente pela diferença na forma da partícula.

#### 4.8 Estudo de caso

Após verificar a influência do fator de forma e da razão mássica na sedimentação de múltiplas partículas, será verificado a aplicabilidade das análises na bentonita, material que pode ser utilizado para o fechamento dos poços.

Para isso, primeiro será investigado o comportamento da bentonita sedimentando com um grupo de 64 partículas e posteriormente, será comparado seus resultados com as partículas das seções anteriores.

#### 4.8.1 Pellets de Bentonita

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com as partículas de bentonita apresentadas na seção 3.1. Na Tabela 14, é possível observar as velocidades terminais obtidas.

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio Padrão
0,4524	0,5675	0,4798	0,4999	0,0491

Fonte: Autoria Própria (2023)

Já na Tabela 15, se encontram os valores obtidos a partir das propriedades dos pellets de bentonita, das propriedades do fluido e da velocidade terminal do experimento.

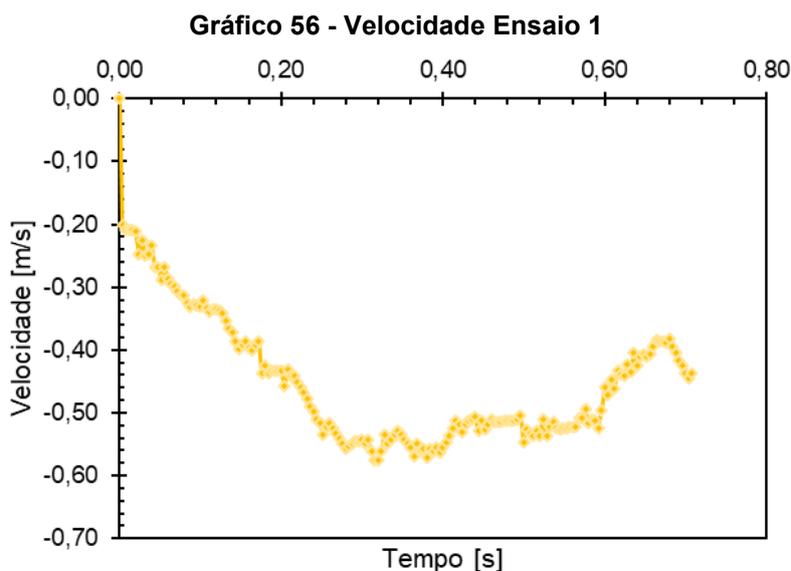
Partículas	Diâmetro	Esfericidade	Razão Mássica	Galileu	Reynolds	Coefficiente de Arrasto
[ $\mu\text{m}$ ]	$d_{\text{EQ}}$ [mm]	$\phi$	$m^*$	$Ga_D$	$Re_D$	$C_D$
64	16,66	0,85	2,20	7389	8310	1,050

Fonte: Autoria Própria (2023)

Um dos fatores importantes para a análise da sedimentação de pellets de bentonita é a concentração volumétrica da bentonita, isto é, a fração do volume total que os pellets representavam dentro do fluido.

Dessa forma, ao multiplicar o volume de um pellet pela quantidade total sedimentando e dividir pelo volume total de água no tanque, foi encontrado um valor de 0,4% para a concentração volumétrica dos pellets

No Gráfico 56, é possível ver que o pellet demora a acelerar devido as partículas em sua vizinhança, depois a velocidade se estabiliza, e por fim no instante 0,6s a partícula apresenta uma desaceleração, indicando uma interação.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 33 é possível ver que a partícula sedimenta sempre próxima de outras, na Fotografia 33c é possível observar o instante 0,6s, onde no gráfico da velocidade é visto o início da desaceleração da partícula.

**Fotografia 33 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,108s, c) 0,600s e d) 0,636s**

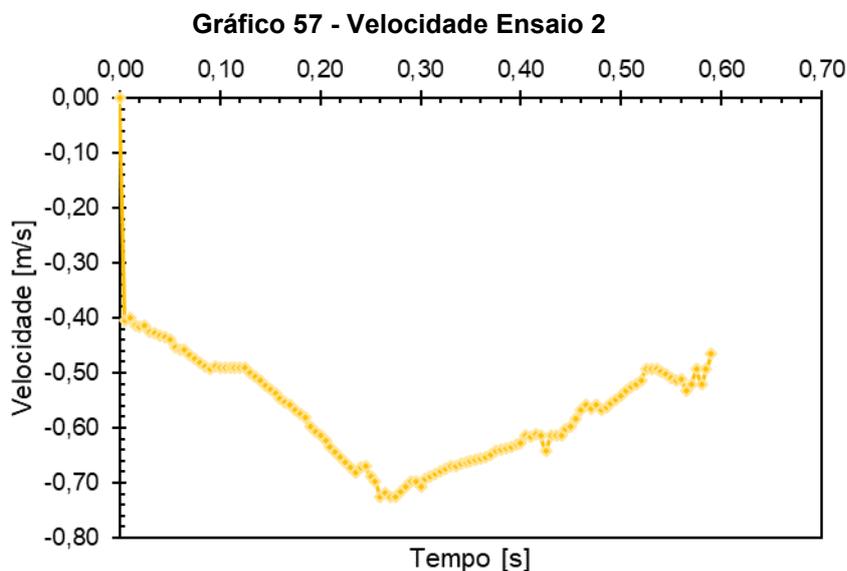


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Entre o instante 0,600s e o instante 0,636s, presente na Fotografia 33d, é possível constatar que o pellet em análise fica em contato com a partícula abaixo dele. Ao apresentar esse comportamento, as partículas normalmente tendem a se afastar, porém, como dito por Ardekani *et al.* (2016) partículas não esféricas tendem a não apresentar o *tumbling* as partículas acabaram sedimentando juntas ao invés de se separarem como normalmente acontece no fenômeno de *kissing*, além disso, ainda pode-se atribuir parte desse tempo no qual as partículas se mantêm juntas às propriedades adesivas da bentonita ao ser hidratada.

No Gráfico 57, é possível ver que o comportamento da velocidade pellet é composto por 2 momentos, o primeiro onde a partícula demora a acelerar

devido as partículas em sua vizinhança, e o segundo, a partir do instante 0,26s, que a partícula apresenta uma desaceleração, indicando uma interação.

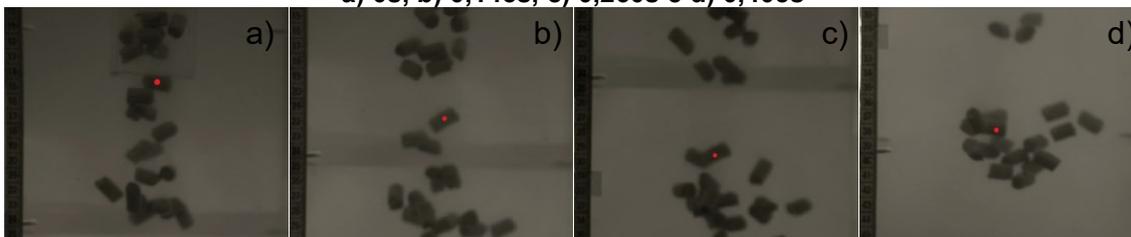


**Fonte: Autorial Própria (2023)**

Na Fotografia 34 atenta-se que entre os instantes 0s e 0,145s, a partícula mantém certa distância das outras sedimentando, dessa forma, ela acelera. Já a partir do instante 0,260s a partícula encosta em outra, e como visto no Ensaio 1, ela não se desprende o que causa a desaceleração da mesma. Na Fotografia 34d, é possível observar que devido as propriedades adesivas, grupos de pellets de bentonitas começam a se formar.

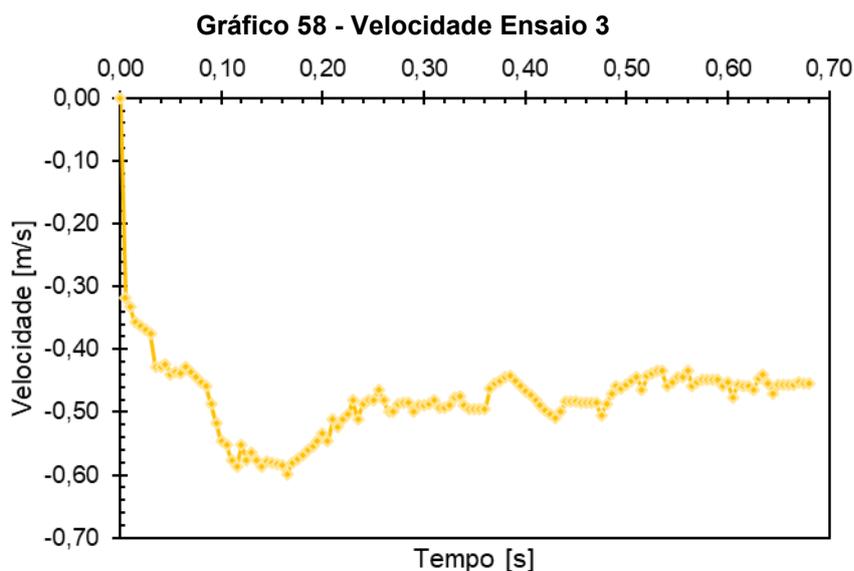
**Fotografia 34 - Ensaio 2 nos instantes:**

**a) 0s, b) 0,145s, c) 0,260s e d) 0,405s**



**Fonte: Autorial Própria (2023)**

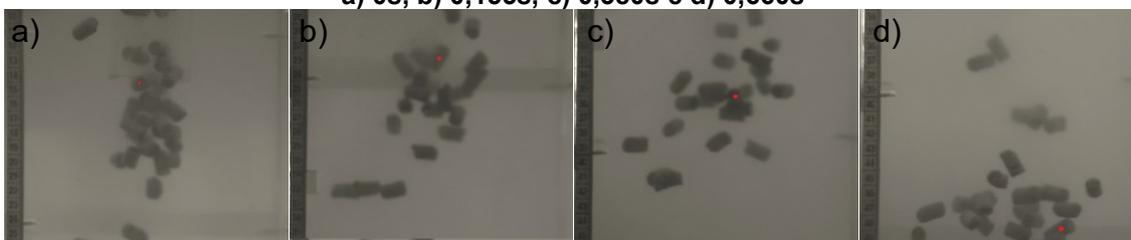
No Gráfico 58, é possível reparar que a aceleração da partícula ocorre de forma lenta, e a partir do instante 0,220s a velocidade apresenta uma estabilidade, o que sugere que o pellet em análise não é submetido a diferentes influências durante a sedimentação.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 35, é possível confirmar que durante todo o ensaio o pellet de bentonita se encontra entre diversas partículas o que explica o comportamento da velocidade.

**Fotografia 35 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,155s, c) 0,380s e d) 0,660s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

É interessante notar que apesar das partículas sedimentarem lado a lado durante todo o ensaio, elas não se juntam, o que indica que o tempo da sedimentação não era suficiente para que os pellets hidratassem de maneira que suas propriedades adesivas pudessem fazer os pellets se juntarem de maneira permanente.

#### 4.8.2 Comparação

É possível constatar que diferentemente dos cilindros, os pellets não tendem a ir para as paredes. Isso pode ser explicado pela sua maior razão de aspecto e número de Reynolds.

Assim como apontado por Ardekani *et al.* (2016), partículas não esféricas tenderam a ficar mais tempo em contato durante o *kissing*, onde muitas vezes o

fenômeno de *tumbling* não ocorria. Tal efeito é acentuado pela propriedade adesiva da bentonita.

Na Fotografia 36, é possível confirmar o fenômeno de partículas longas alinhando-se lateralmente no fluxo em longos arranjos de partículas únicas, como descrito por Fortes et al. (1987).

**Fotografia 36 - Alinhamento lateral dos pellets**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Tal fenômeno não foi visualizado para as outras partículas desse trabalho pois sua razão de aspecto, AR, ou seja, a relação entre a largura e a altura da partícula, era sempre 1. Já para o pellet, a razão de aspecto é:

$$AR = \frac{H}{D} \quad (44)$$

$$AR = \frac{20}{12} = 1,2 \quad (45)$$

Por fim, ao analisar a velocidade dos pellets, é possível observar que, assim como para os cilindros, as velocidades dos ensaios apresentam grandes variações ao longo do tempo.

Efeitos devido a hidratação do pellet, como o aumento volumétrico e adesividade, não foram tão perceptíveis, indicando que a bentonita precisa de mais tempo para poder hidratar. Assim, para a melhor compreensão desses efeitos seriam necessários testes adicionais onde fosse possível aumentar a duração do teste, seja com um fluido com uma viscosidade maior ou com um tanque de maior comprimento.

De maneira a aproximar mais os experimentos das condições encontradas em campo, seria de interesse também realizar testes com diferentes

combinações de geometria, já que ao se trabalhar com bentonita não serão grupos amostrais tão homogêneos quanto os apresentados anteriormente.

## 5 CONCLUSÕES

A análise do comportamento de um grupo de pellets de bentonita sedimentando em água revelou insights valiosos sobre a dinâmica de sedimentação dessas partículas em diferentes cenários. Com base nas observações e resultados obtidos, esta conclusão destaca as principais conclusões de nosso estudo:

- Representatividade do comportamento com uma única partícula: Uma conclusão relevante foi que o impacto da posição de liberação da partícula na trajetória e na velocidade de sedimentação é relativamente baixo. Isso sugere que o comportamento de uma única partícula pode ser representativo do comportamento do grupo, desde que a partícula esteja sujeita à interação com as demais.
- Influência do número de partículas: Para as esferas com baixa razão mássica, observou-se que o aumento do número de partículas na sedimentação resultou em um maior contato entre elas e um aumento na frequência do fenômeno de *drafting*. Além disso, algumas partículas mostraram uma tendência a se deslocar para a parede do tanque, o que se intensificou com o aumento do número de partículas sedimentando.
- Razão mássica e influência na trajetória e velocidade: As esferas com maior razão mássica demonstraram ter uma influência menor na trajetória e na velocidade quando expostas à influência de outras partículas. Isso pode ser atribuído à necessidade de maiores forças para deslocar essas partículas devido à sua maior razão de massa.
- Impacto da esfericidade: A esfericidade da partícula emergiu como um fator crucial para a sedimentação. Partículas com a mesma massa específica e volume apresentaram diferentes velocidades e trajetórias de sedimentação devido à sua forma não esférica.
- Alinhamento de partículas longas: Observou-se que apenas no caso das partículas de bentonita, com uma maior razão de aspecto, houve o fenômeno de partículas longas se alinhando lateralmente no fluxo, formando arranjos únicos.
- Comportamento não esférico e propriedade adesiva: Partículas não esféricas, como a bentonita, tendem a permanecer em contato por mais

tempo durante o *kissing*, e o fenômeno de *tumbling* muitas vezes não ocorre, fenômeno potencializado pela sua propriedade adesiva.

Essas conclusões destacam a complexidade do comportamento das partículas de bentonita sedimentando em água e enfatizam a importância de fatores como a forma, a razão mássica, o número de partículas e a influência mútua. Esses resultados podem ter implicações em diversas áreas, mas principalmente na indústria do petróleo e gás. Por fim, sugerem a necessidade de estudos mais aprofundados para entender completamente esses fenômenos e otimizar processos relacionados à sedimentação de partículas não esféricas em meios fluidos.

## REFERÊNCIAS

- ARDEKANI, M. N., COSTA, P., BREUGEM, W. P., & BRANDT, L. (2016). Numerical study of the sedimentation of spheroidal particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 87, 16-34.
- ATAPATTU, D.D.; CHHABRA, R.P.; UHLHERR, P.H.T. (1990). Wall effect for spheres falling at small Reynolds number in a viscoplastic medium. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. n. 38, p. 31-42.
- BRASIL. Acesso aos Dados Técnicos. 18 de abril de 2023. <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/arquivos-acervo-de-dados-tecnicos/tabela-pocos.csv>>.
- BOT, E. T., HULSEN, M., & VAN DEN BRULE, B. H. A. (1998). The motion of two spheres falling along their line of centres in a Boger fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 79(2-3), 191–212. doi:10.1016/s0377-0257(98)00106-2
- CLARK, J., & SALSBURY, B. (2003). Well Abandonment Using Highly Compressed Sodium Bentonite - An Australian Case Study. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference. doi:10.2118/80592-ms
- CLEM, A. G., & DOEHLER, R. W. (1961). Industrial applications of bentonite. *Clays and Clay Minerals*, 10, 272-283.
- CORINA, A. N., & DOURADO, C. A. M. (2023). Evaluation of Bentonite Application for the Abandonment of Deep Geo-energy Wells. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(1), 301-317.
- DOGONCHI, A. S., HATAMI, M., HOSSEINZADEH, K., & DOMAIRRY, G. (2015). Non-spherical particles sedimentation in an incompressible Newtonian medium by Padé approximation. *Powder Technology*, 278, 248-256.
- ELGADDAFI, R., AHMED, R., GEORGE, M., & GROWCOCK, F. (2012). Settling behavior of spherical particles in fiber-containing drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 84-85, 20-28.
- ELTILIB, R. A. E. E., AL KAYIEM, H. H., & JAAFAR, A. (2011). Investigation on The Particle Settling Velocity in Non-Newtonian Fluids. *Journal of Applied Sciences*, 11, 1528-1535. doi: 10.3923/jas.2011.1528.1535.

ENGLEHARDT, J., WILSON, M. J., & WOODY, F. (2001). New Abandonment Technology New Materials and Placement Techniques. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference. doi:10.2118/66496-ms

FORTES, A. F., JOSEPH, D. D., & LUNDGREN, T. S. (1987). Nonlinear mechanics of fluidization of beds of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*, 177(-1), 467. doi:10.1017/s0022112087001046

FOX, R. W., MCDONALD, A. T., & PRITCHARD, P. J. (2001). *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 5ª edição. LTC Editora.

HOLL, H. G. (2019). Hydraulic testing of compacted bentonite used for plug and abandonment operations. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7(5), 261-278.

HOROWITZ, M., & WILLIAMSON, C. H. K. (2010). The effect of Reynolds number on the dynamics and wakes of freely rising and falling spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 651, 251-294.

IDIALU, P., AINODION, J., ALABI, L., et al. (2004). Restoration and Remediation of Abandoned Petroleum Drill Sites-A Nigerian Case Study. In: Society of Petroleum Engineers. SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. [S. l.: s. n.]

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Caderno de boas práticas de E&P: Diretrizes para abandono de poços. Julho de 2017.

KELM, C. H., FAUL, R. R., et al. (1999). Well Abandonment—A "Best Practices" Approach Can Reduce Environmental Risk. In: Society of Petroleum Engineers. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. [S. l.: s. n.]

KUWAGI, K., KOGANE, A., HIRANO, H., ALIAS, A. B., & TAKAMI, T. (2014). Non-dimensionalization and three-dimensional flow regime map for fluidization analyses. *Chemical Engineering Science*, 119, 199-211. Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82(1-3), 43-92.

LUZ, A. B. D., & OLIVEIRA, C. H. D. (2008). Argila-bentonita. CETEM.

LUZ, A. B. D., SAMPAIO, J. A., & FRANÇA, S. C. A. (2010). Tratamento de minérios. CETEM/MCT.

PIVOVARSKI, R. G. (2022). Estudo numérico do escoamento bifásico líquido-sólido em poços de petróleo horizontais (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

REYNOLDS, P. A., & JONES, T. E. R. (1989). An Experimental Study of the Settling Velocities of Single Particles in Non-Newtonian Fluids. *International Journal of Mineral Processing*, (25), 47-77.

SILVA, A., & FERREIRA, H. (2008). Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 3(2), 26-35.

SONG, X., Xu, Z., LI, G., PANG, Z., & ZHU, Z. (2017). A new model for predicting drag coefficient and settling velocity of spherical and non-spherical particle in Newtonian fluid. *Powder Technology*, 321, 242-250.

TAO, S., GUO, Z., & WANG, L. (2017). Numerical study on the sedimentation of single and multiple slippery particles in a Newtonian fluid. *Powder Technology*, 315, 126-138.

TOWLER, B. F., HYWEL-EVANS, D., & Firouzi, M. (2016). Field trials of plugging oil and gas wells with hydrated bentonite. In: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. OnePetro.

TVEIT, H. E. (2012). Evaluation of Bentonite as an Alternative Sealing Material in Oil and Gas Wells. Master's thesis. Institutt for petroleumsteknologi OG anvendt geofysikk.

VELDHUIS, C. H. J., & BIESHEUVEL, A. (2007). An experimental study of the regimes of motion of spheres falling or ascending freely in a Newtonian fluid. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(10), 1074-1087.

VERJUS, R., GUILLOU, S., EZERSKY, A., & ANGILELLA, J.-R. (2016). Chaotic sedimentation of particle pairs in a vertical channel at low Reynolds number: Multiple states and routes to chaos. *Physics of Fluids*, 28(12), 123303.

WANG, L., GUO, Z. L., & MI, J. C. (2014). Drafting, kissing and tumbling process of two particles with different sizes. *Computers & Fluids*, 96, 20-34.

WHITE, F. M. (2004). *Mecânica dos fluidos*. McGraw Hill Brasil.

## APÊNDICE A – ERRO DE PARALAXE

### Erro De Paralaxe

O erro de paralaxe pode ser definido como um erro de medição relacionado à distância quando a medição depende do campo de visão, como um sistema de imagens ou de vídeos.

Para verificar a influência desse erro nesse experimento, foram feitos três vídeos de diferentes posições: um acima, um no meio e outro abaixo, de modo que fosse possível comparar a velocidade terminal obtida em cada um dos vídeos e comparar a variação dos valores obtidos com as velocidades obtidas sem essa análise da perspectiva.

Para esse experimento foi utilizado uma mistura de água e glicerina com 50%wt. Para a densidade, foram medidos diferentes valores em várias temperaturas com a ajuda de um picnômetro, foi obtida a curva de densidade em função da variação de temperatura trabalhada. A viscosidade também foi medida experimentalmente em um Viscosímetro FANN 35A. Os valores encontrados podem ser conferidos na Tabela 16 - Dados do experimento.

Foi utilizada uma partícula esférica feita do polímero Delrin com diâmetro de 10mm. Dados como diâmetro, massa e densidade foram conferidos experimentalmente como mostra a Tabela 16 - Dados do experimento:

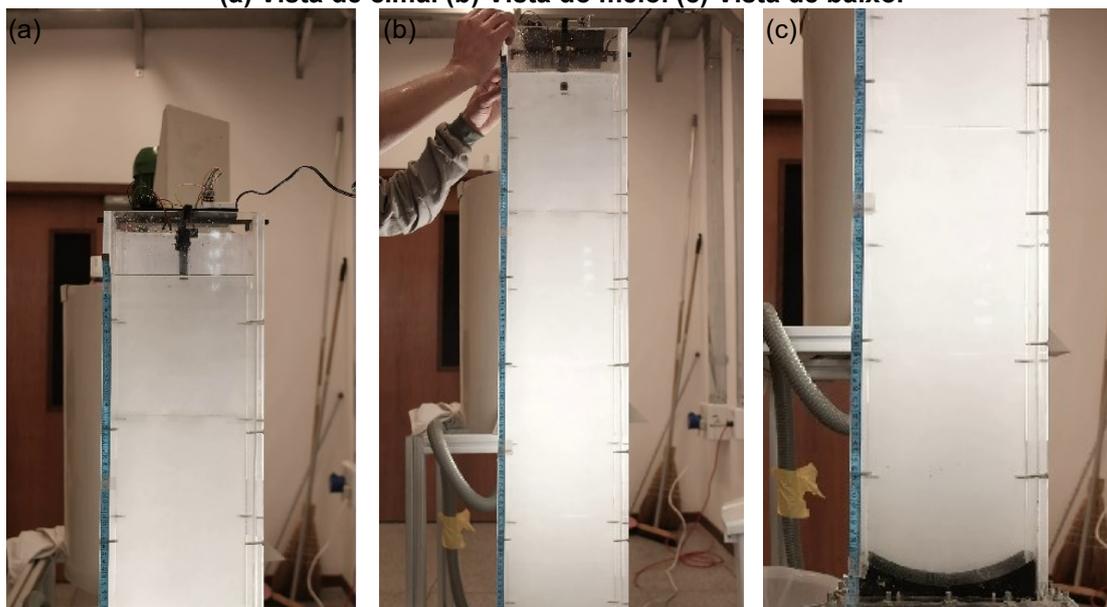
**Tabela 16 - Dados do experimento**

Diâmetro [mm]	Densidade do fluido [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade da partícula [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidade dinâmica [Pa.s]	Viscosidade cinemática [m <sup>2</sup> /s]
d	$\rho_F$	$\rho_P$	$\mu$	$\nu$
10	1150	1358,37	0,005086	4,42x10 <sup>-6</sup>

**Fonte: Autoria Própria (2020)**

Na Fotografia 37 se encontram as zonas de visualização pelas quais foram feitas a análise da influência do erro de paralaxe no experimento. Na Fotografia 37a o experimento foi realizado com a câmera posicionada no nível da superfície do tanque, na Fotografia 37b foi posicionada no meio do tanque e na Fotografia 37c foi posicionada no nível da base do tanque.

**Fotografia 37 - Frames retirados dos vídeos utilizados para a análise do erro de paralaxe.  
(a) Vista de cima. (b) Vista do meio. (c) Vista de baixo.**



**Fonte: Autoria Própria (2020)**

A avaliação da influência do erro de paralaxe foi feita através da análise da variação entre os valores de velocidade terminal gravando a sedimentação da partícula de diferentes posições. Na Tabela 17 estão os valores médios de velocidade terminal obtido em cada vídeo além do desvio padrão entre eles:

**Tabela 17 - Comparação entre as velocidades terminais obtidas ao gravar a esfera sedimentando de diferentes ângulos**

Diâmetro [mm]	Acima	Meio	Abaixo	Média	Desvio Padrão
10	0,1992	0,2042	0,1996	0,2010	0,0021

**Fonte: Autoria Própria (2020)**

É possível concluir que o desvio padrão é maior do que nos outros testes, porém isso já é esperado pois os vídeos feitos em diferentes partes pegam etapas diferentes do experimento: o vídeo feito de um ângulo acima pega do começo até o meio da sedimentação, o vídeo feito com a câmera no meio pega todo o experimento, enquanto o último vídeo captura somente do meio para o final da queda da esfera.

**APÊNDICE B – ORÇAMENTO**

## Orçamento

Considerando a execução de todos os experimentos, foi montado a Tabela 18 com os custos do projeto:

**Tabela 18 - Tabela de custos**

Item	Qtd.	Unidade	Custo un.	Custo total	Propriedade
Água	0,045	m <sup>3</sup>	R\$ 1,84	R\$ 8,26	UTFPR
Câmera	1	un.	R\$ 35.000	R\$ 35.000	CERNN
Tanque	1	un.	R\$ 2.700	R\$ 2.700	CERNN
Iluminação	3	un.	R\$ 28,90	R\$ 86,70	CERNN
Esferas de vidro	0,1	kg	R\$ 40	R\$ 4,00	CERNN
Resina para impressão	0,5	kg	R\$299,90	R\$149,95	CERNN
Pellet de Bentonita	0,6	kg	R\$7,96	R\$4,78	CERNN
Tubo para o sistema de liberação	0,5	m	R\$ 12,67	R\$ 6,33	CERNN
<b>Total</b>				R\$	37910,02

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Itens como a câmera, o tanque e o sistema de iluminação, são de patrimônio da UTFPR/CERNN, e que foram disponibilizados para a realização desse projeto.

## **APÊNDICE C – RESULTADOS ESFERAS DE RESINA**

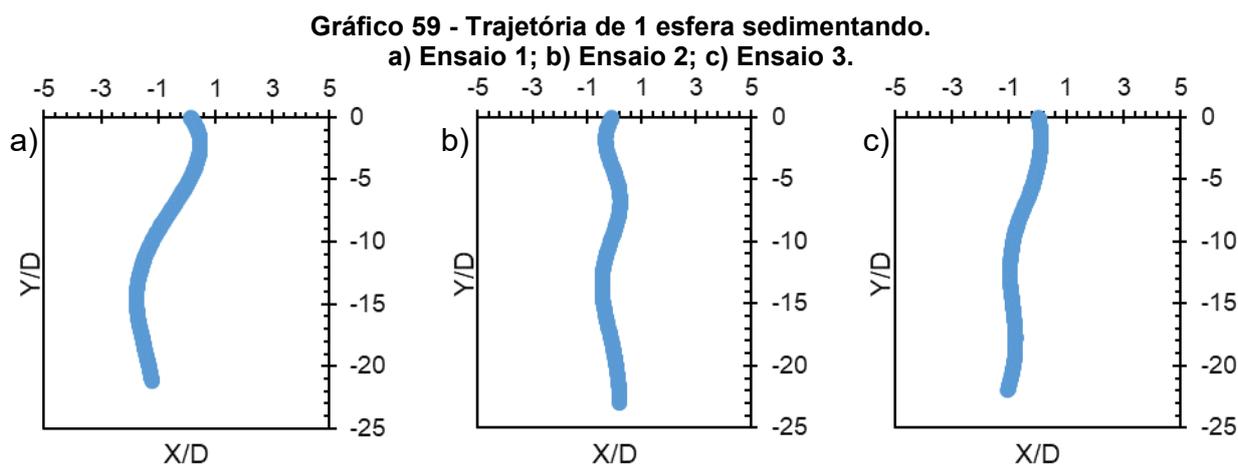
## ESFERAS DE RESINA

Neste apêndice serão apresentados de forma completa os dados e discussões obtidos a partir das esferas impressas em resina 3D apresentadas na seção 3.1.

### 1. Sedimentação de 1 Esfera

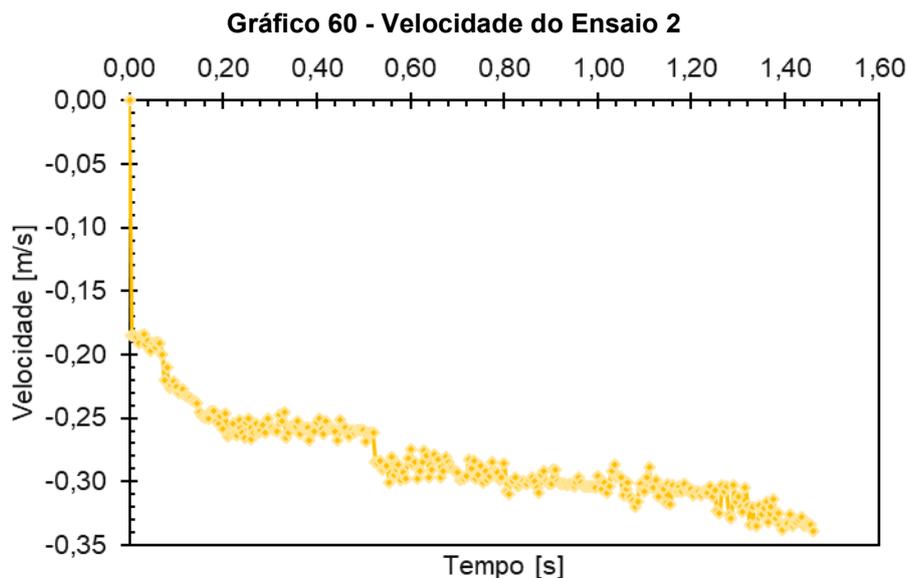
Para verificar a influência de diversas partículas sendo sedimentadas juntas, foram realizados ensaios com uma única esfera sedimentando, para dessa maneira comparar os dados obtidos e verificar possíveis influências das outras partículas.

No Gráfico 59, estão as trajetórias da esfera sedimentando sozinha. Nele é possível visualizar que as trajetórias apresentam um movimento oblíquo e intermitente.



No ensaio 1 o deslocamento horizontal se apresenta de maneira mais acentuada, com um valor máximo de 3 vezes o diâmetro da partícula. O ensaio 2 ainda apresentam as oscilações, porém com uma magnitude menor.

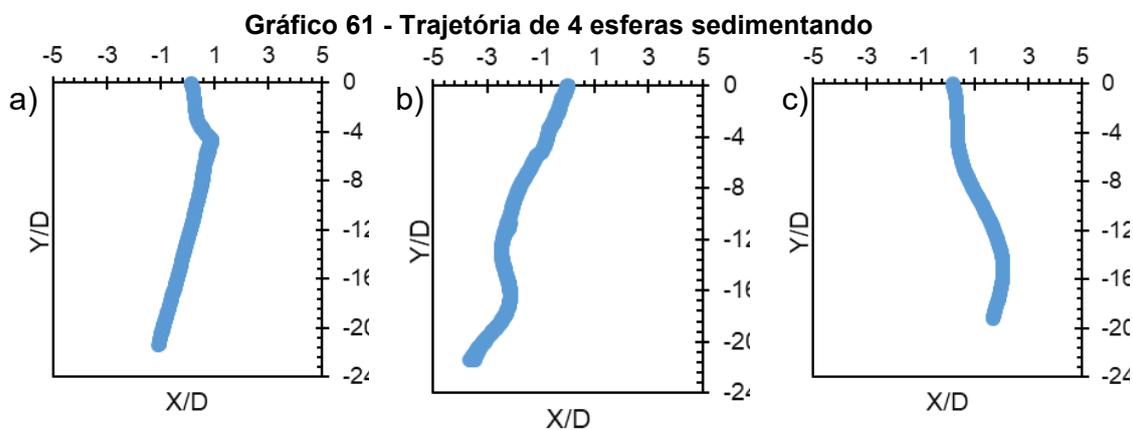
Ao observar a velocidade de sedimentação da esfera de resina, presente no Gráfico 60, é possível observar que devido a sua menor razão mássica, a aceleração é menor.



**Fonte: Aatoria Própria**

## 2. Sedimentação de 4 Esferas

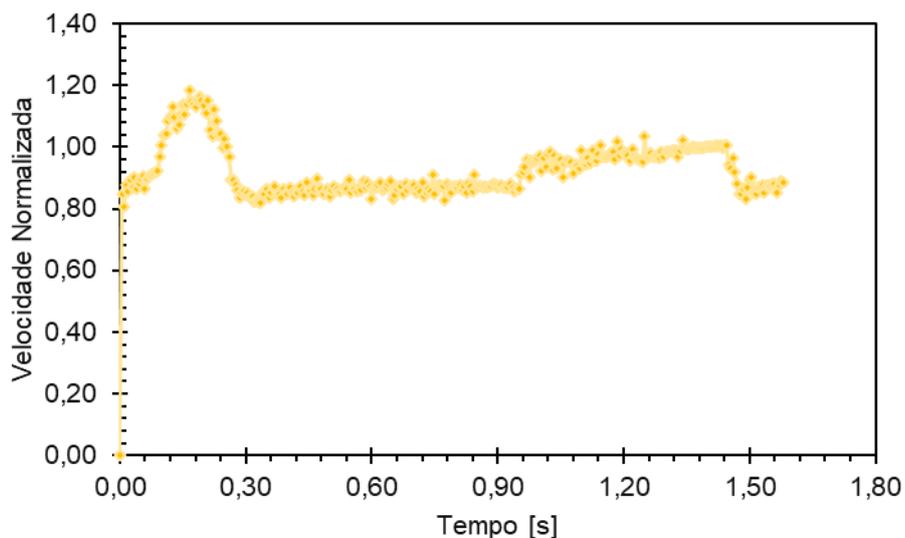
Analisando o Gráfico 61, é possível verificar que no ensaio 1, Gráfico 61a, existe uma mudança brusca na trajetória da esfera, o que indica uma interação com as outras partículas sedimentando. Tal interação será ilustrada adiante.



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

A interação vista, também pode ser visualizada no Gráfico 62 onde, a partir do instante 0,12s, é possível ver um grande aumento na velocidade.

Gráfico 62 - Velocidade do Ensaio 1

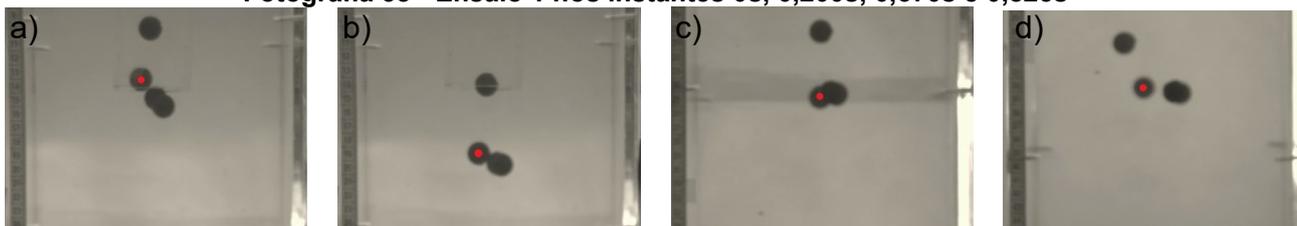


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 38 é possível observar o contato entre as partículas sedimentando, que é ilustrado pela mudança brusca na trajetória constatada anteriormente. Porém, o aumento de velocidade visto anteriormente não se deve a isso, a esfera analisada ter acelerado provem dela ter entrado na esteira das esferas sedimentando antes dela, o que fez com que ela as alcançasse e posteriormente encostasse nas mesmas.

Esse contato fez com que a esfera tivesse um deslocamento lateral que é refletido na desaceleração da partícula.

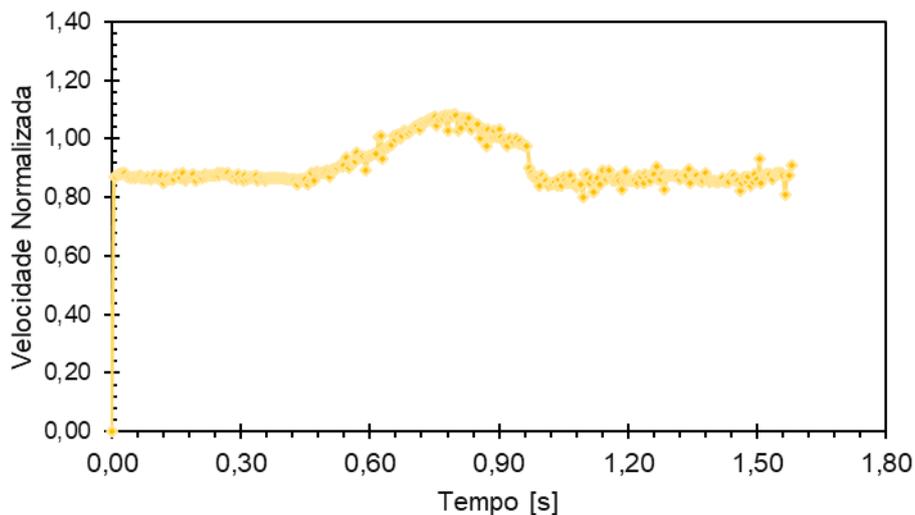
Fotografia 38 - Ensaio 1 nos instantes 0s, 0,200s, 0,370s e 0,825s



Fonte: Autoria Própria

No Gráfico 63 temos a velocidade da sedimentação do ensaio 2. Nele é possível reparar que a partir dos 0,7s há uma redução na velocidade, que indica uma interação da partícula com as outras sedimentando.

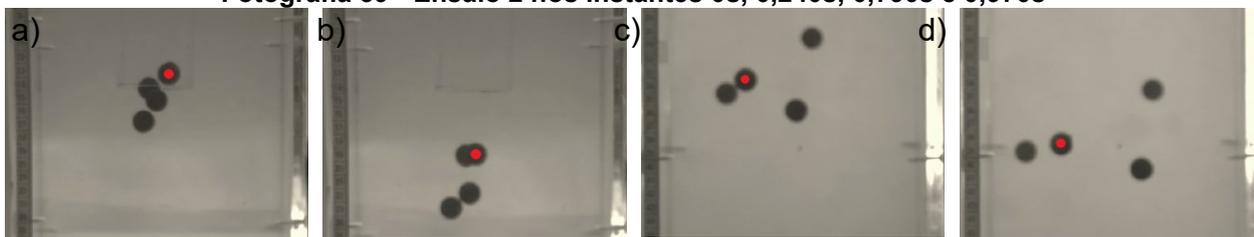
Gráfico 63 - Velocidade do Ensaio 2



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 39 é possível confirmar a interação da partícula analisada com outra no instante onde há a redução de velocidade, porém, no instante 0,24s, as partículas estão muito próximas, mas não há indicação disso nem na trajetória nem na velocidade de sedimentação, o que pode ser explicado por uma distância não observada na profundidade do tanque, ou o eixo z.

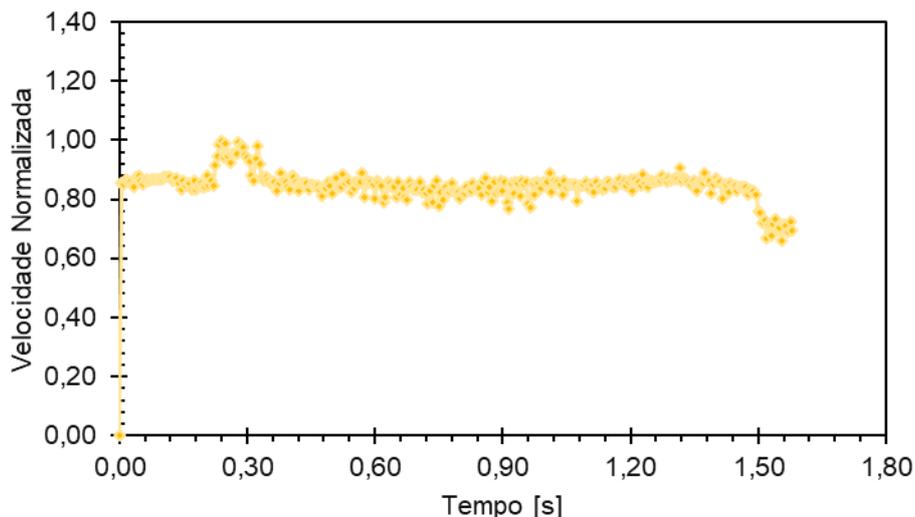
Fotografia 39 - Ensaio 2 nos instantes 0s, 0,240s, 0,790s e 0,970s



Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao examinar o Gráfico 64, é possível visualizar uma aceleração entre os instantes 0,24s e 0,36s e uma desaceleração no final da sedimentação, indicando interação da partícula analisada com as outras.

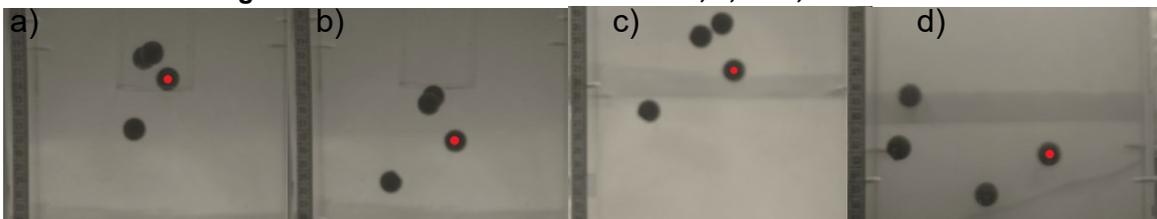
Gráfico 64 - Velocidade do Ensaio 3



Fonte: Autoria Própria (2023)

Observando a Fotografia 40, é possível notar que a partícula analisada começa o escoamento próxima das outras, porém se afasta e se mantém durante toda a sedimentação. Dessa maneira, as oscilações vistas no gráfico da velocidade podem ser associadas ao erro do processo.

Fotografia 40 - Ensaio 3 nos instantes 0s, 0,200s, 400s e 900s

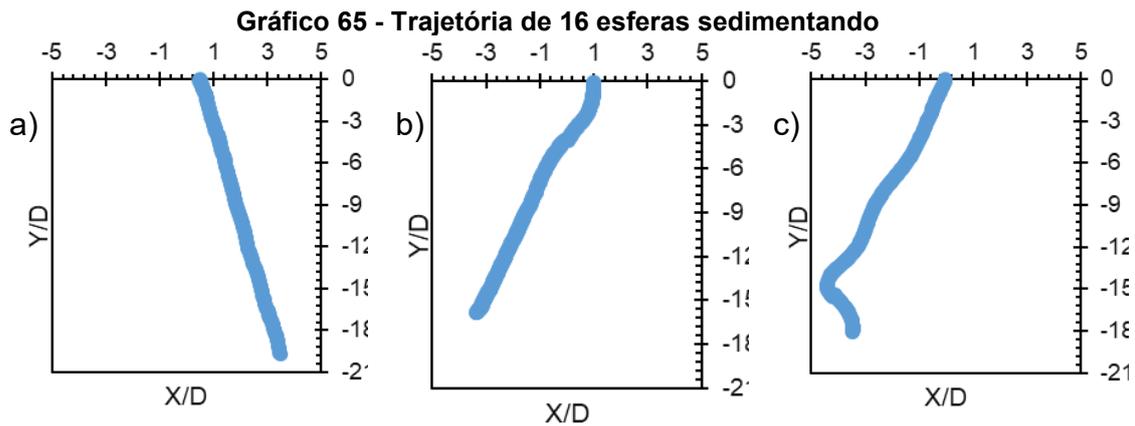


Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, é possível concluir que as interações das partículas sedimentando em um grupo com 4 gera interações pontuais entre elas, fazendo com que nem todas as partículas apresentem interações umas com as outras ao serem liberadas juntas.

### 3. Sedimentação de 16 Esferas

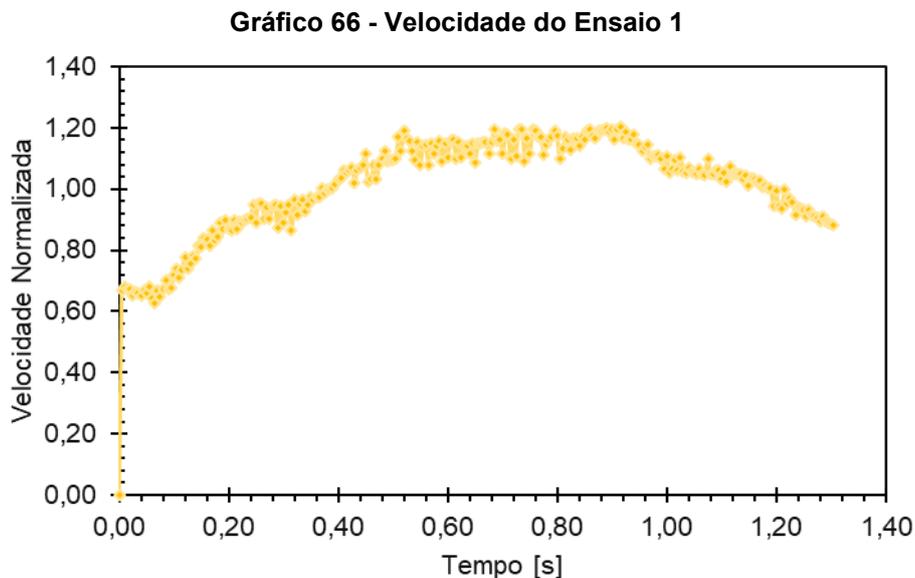
Ao observar o Gráfico 65, é possível constatar que as trajetórias apresentam um comportamento oblíquo, diferentemente do que foi visto com a esfera sedimentando sozinha, não há oscilações.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 65c, a esfera sedimenta de maneira oblíqua assim como no Gráfico 65a e Gráfico 65c, porém, seu deslocamento lateral é mais acentuado, fazendo com que a esfera colida com a parede, ilustrado na Fotografia 44.

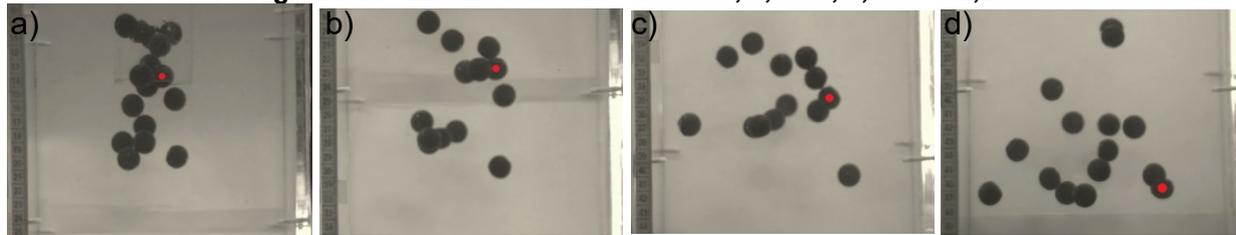
No Gráfico 66, percebe-se que a velocidade apresenta um comportamento oscilatório, apresentando acelerações e desacelerações ao longo do escoamento.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 41 é possível ver que a partícula em análise está com várias partículas ao seu redor durante a sedimentação, confirmando a falta de oscilação e a aceleração reduzida durante o escoamento constatadas anteriormente, além disso, é possível ver que a partir do instante 1s a esfera tem em sua vizinhança uma esfera muito próxima, o que explicaria a redução na velocidade causada pela atração entre elas.

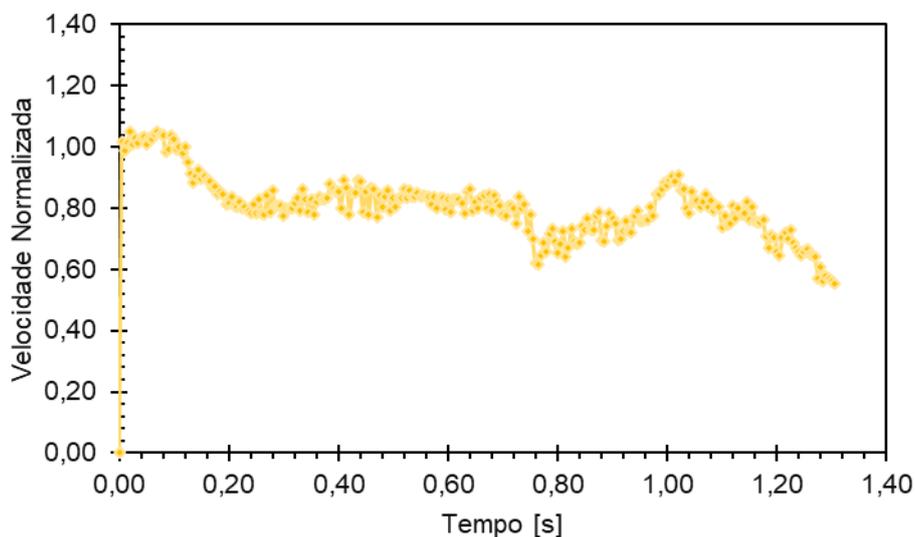
Fotografia 41 - Ensaio 1 nos instantes 0s, 0,400s, 0,800s e 1,200s



Fonte: Autorial Própria

No Gráfico 67 é visível que a velocidade apresenta um comportamento oscilatório, onde ela acelera até atingir sua velocidade terminal, tem desacelerações causadas pelas interações com as partículas em sua vizinhança.

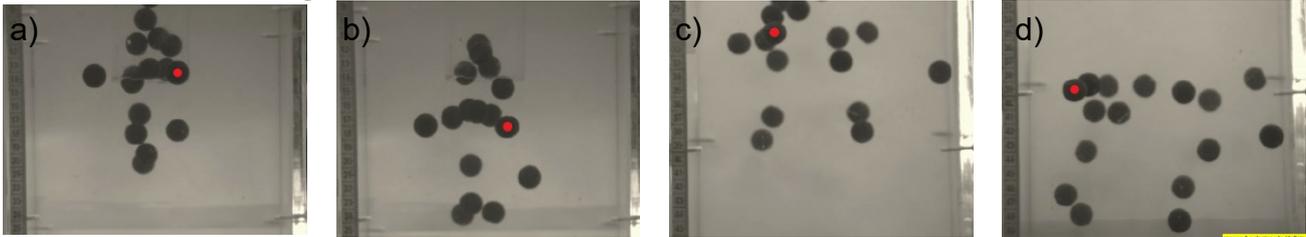
Gráfico 67 - Velocidade do Ensaio 2



Fonte: Autorial Própria (2023)

Na Fotografia 42 é possível ver que a partícula está constantemente sendo submetida a interações das partículas em sua vizinhança, então, a variação na velocidade vista acima pode ser explicada pela esfera sendo atraída com mais intensidade ora para partículas acima dela, o que geraria a desaceleração, ora para partículas abaixo dela, o que geraria a aceleração vista.

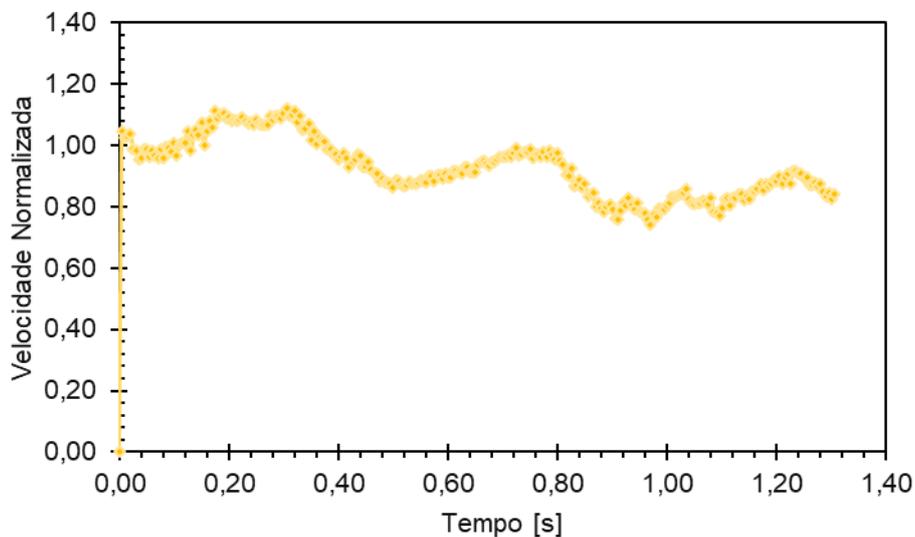
Fotografia 42 - Ensaio 2 nos instantes 0s, 0,150s, 0,750s e 1,150s



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 68, assim como no Gráfico 67, percebe-se que a velocidade apresenta um comportamento oscilatório, apresentando acelerações e desacelerações ao longo do escoamento.

Gráfico 68 - Velocidade do Ensaio 3

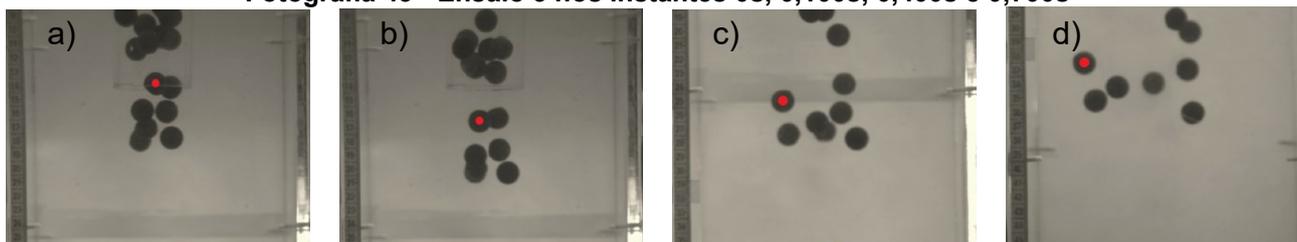


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 43, é possível reparar que a esfera durante os instantes iniciais realiza o processo de *drafting* e *kissing*, ilustrado pela Figura 5, com a esfera que sedimenta ao seu redor, após esse fenômeno, a esfera tem sua trajetória deslocada fazendo-a ir em direção ao canto do tanque.

A aceleração vista entre os instantes 0,4s e 0,7s pode ser atribuída ao destacamento da partícula do grupo, *tumbling*, e conforme ela se aproxima da parede, ela sai da esteira da esfera a sua frente o que gera a desaceleração vista junto do efeito de parede.

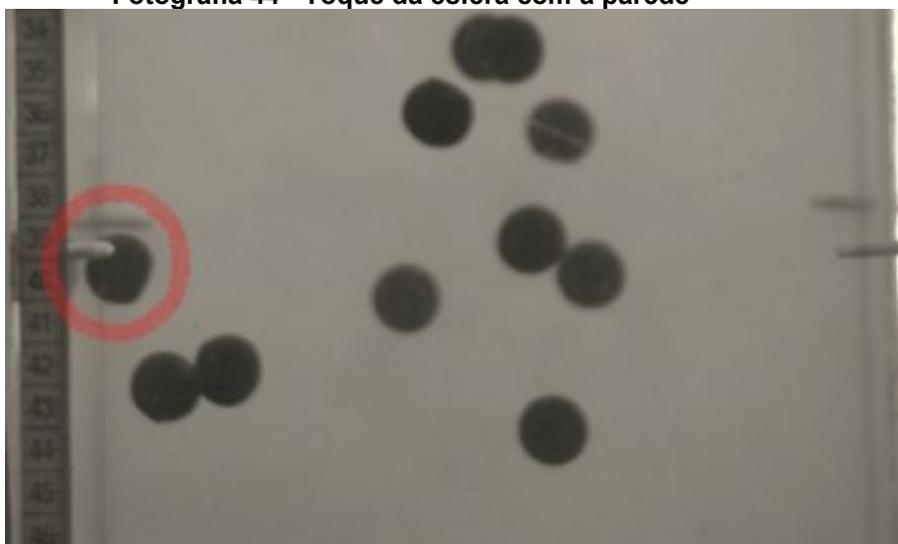
Fotografia 43 - Ensaio 3 nos instantes 0s, 0,100s, 0,400s e 0,700s



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 44 é possível verificar o toque da partícula com o tanque que o ocorre no instante 1,02s. Após isso, a esfera obviamente muda bruscamente sua trajetória como é possível observar no Gráfico 65c, além disso, a esfera volta a acelerar pois o toque a direciona para baixo.

Fotografia 44 - Toque da esfera com a parede

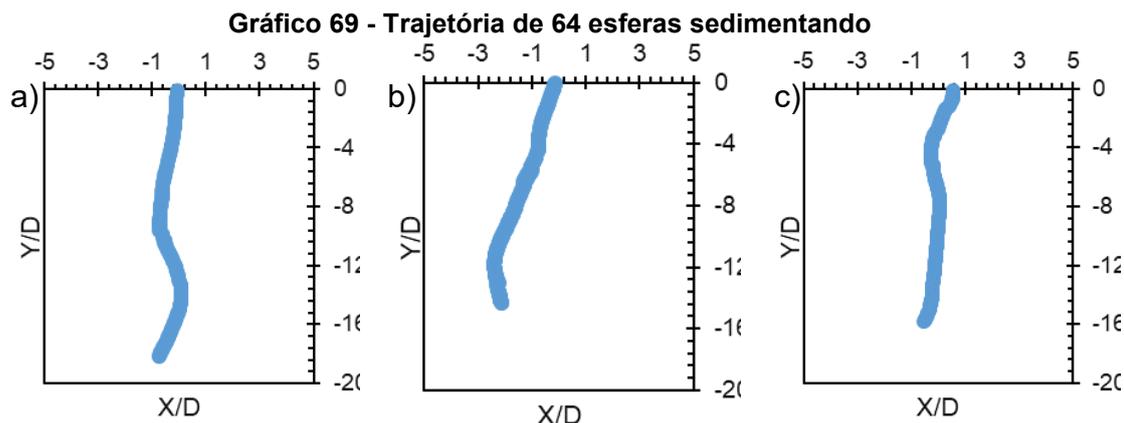


Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, nota-se que ao submeter a esfera a sedimentar junto de 15 outras, interações partícula-partícula são mais frequentes, sendo possível visualizar o fenômeno de *drafting* e *kissing* em diferentes grupos de esferas. Também é possível concluir que as esferas tendem a se espalhar e ir em direção as paredes.

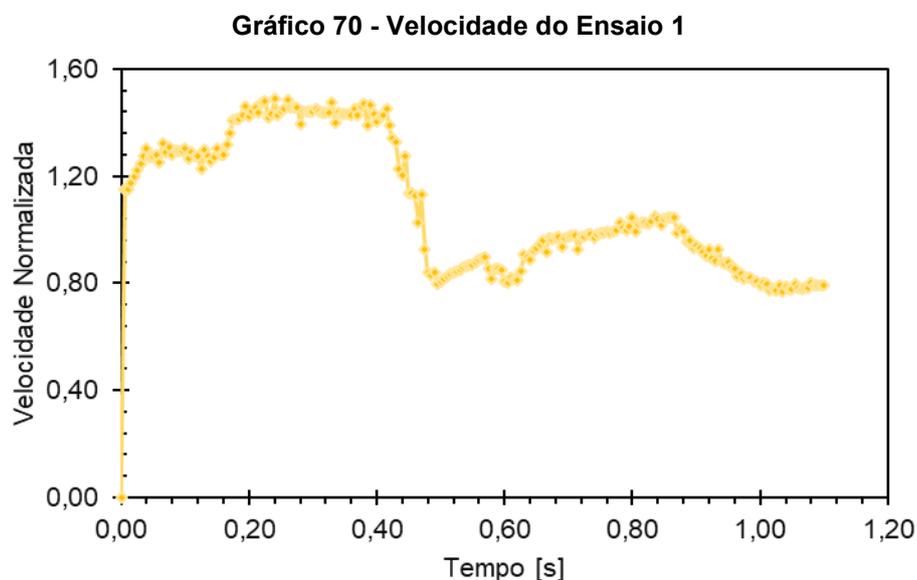
#### 4. Sedimentação de 64 Esferas

Nessa seção será discutido os resultados obtidos ao sedimentar 64 esferas juntas. Ao analisar o Gráfico 69, é visível que assim como no Gráfico 61 e no Gráfico 65, há menos oscilações horizontais na trajetória da partícula.



Fonte: Autoria Própria (2023)

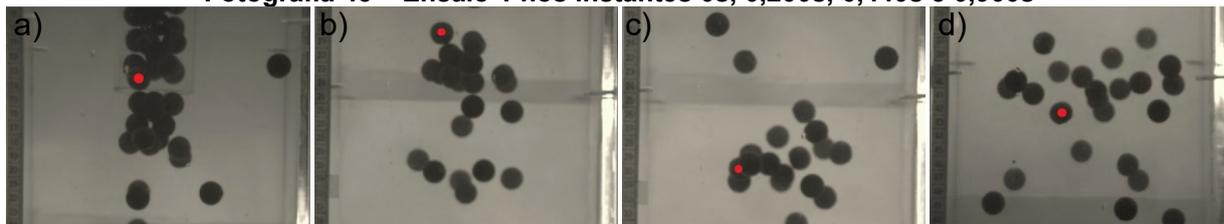
No Gráfico 70 é possível verificar que o comportamento da velocidade de sedimentação também é oscilatório, possuindo uma grande desaceleração a partir do instante de 0,4s.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 45 é possível ver que a partícula analisada está constantemente cercada por outras partículas, o que reflete em sua trajetória ser oblíqua e sem oscilações até o instante 0,4, onde a partícula colide e se distancia das outras, apresentando posteriormente uma trajetória oblíqua e oscilatória e uma velocidade de sedimentação mais estável.

Fotografia 45 – Ensaio 1 nos instantes 0s, 0,200s, 0,440s e 0,900s

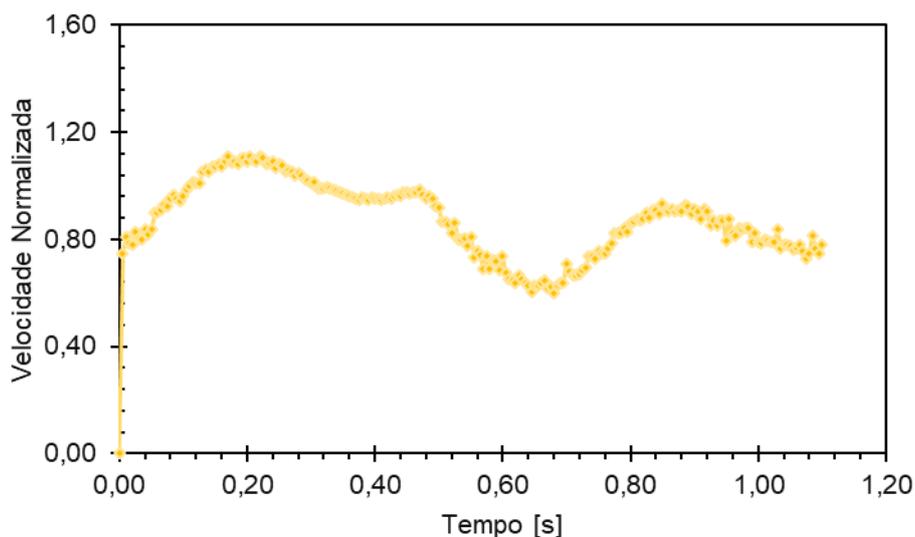


Fonte: Autoria Própria (2023)

Também é possível notar uma colisão entre os instantes 0,4s e 0,5s, que é ilustrada pela mudança de trajetória vista no Gráfico 69a.

No Gráfico 71 também se encontra um comportamento oscilatório para a velocidade, onde a partícula acelera, depois entra em um regime de desaceleração menor para posteriormente desacelerar mais rapidamente até atingir a velocidade mínima e por fim acelerar novamente, indicando uma forte interação com as partículas em sua vizinhança durante todo o processo.

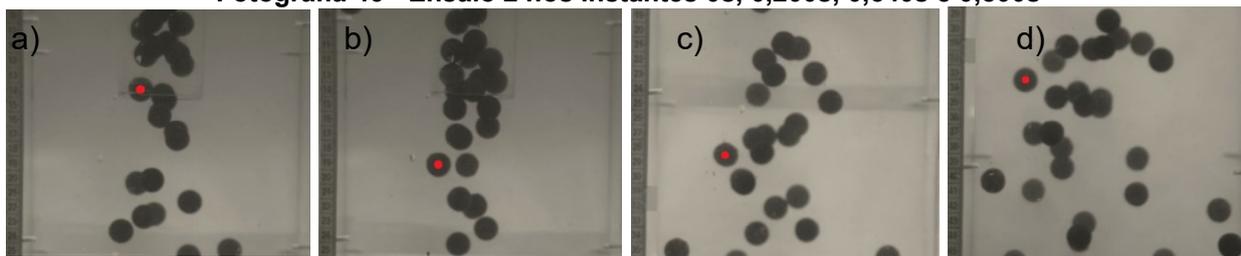
Gráfico 71 – Velocidade do Ensaio 2



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 46 é percebido que no instante 0,2s a partícula está se aproximando das partículas em sua vizinhança, fazendo com que haja uma leve desaceleração, o mesmo acontece no instante 0,54s, porém, devido ao maior número de partículas ao seu redor, a desaceleração é mais agressiva, já no instante 0,8s, a partícula está distanciando, o que é representado pelo aumento na sua velocidade de sedimentação.

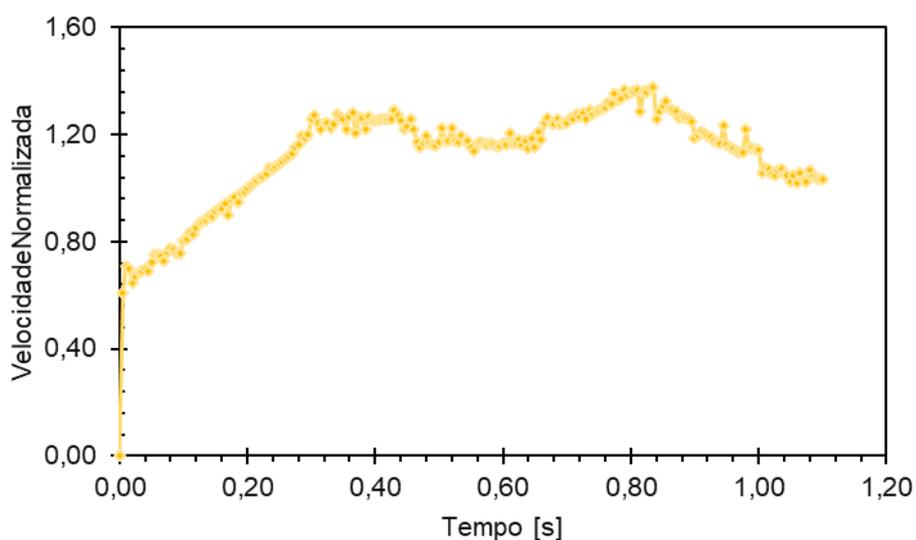
**Fotografia 46 - Ensaio 2 nos instantes 0s, 0,200s, 0,540s e 0,800s**



Fonte: Aatoria Própria (2023)

No Gráfico 72 a partícula acelera até atingir um pico de velocidade, a qual se mantém estável por uns instantes para enfim começar a desacelerar, o que indica uma menor interação com as outras partículas em relação aos ensaios 1 e 2.

**Gráfico 72 – Velocidade do Ensaio 3**



Fonte: Aatoria Própria (2023)

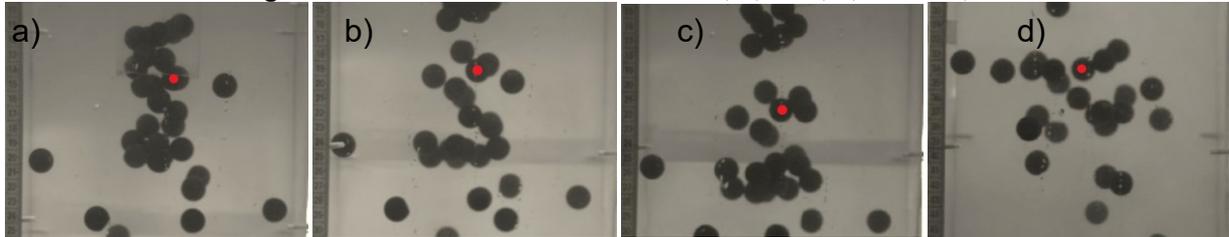
Na Fotografia 47 é possível observar que a partícula sedimenta constantemente sobre influência das partículas em sua vizinhança. Dessa maneira, a partícula está muito mais suscetível a contatos, como é visto no instante 0,280s, Fotografia 47c, e no instante 0,655s, Fotografia 47d.

Tais instantes foram selecionados com base no Gráfico 69c e Gráfico 72 pois apresentavam mudanças de comportamento que indicavam interações entre as partículas.

Na Fotografia 47c, é possível observar o contato entre a partícula analisada e outra sedimentando, isso é refletido no gráfico da velocidade, onde a partícula que estava acelerando tem sua velocidade estabilizada.

Na Fotografia 47d, nota-se outro contato entre partículas, porém, dessa vez há uma leve desaceleração, além de causar um desvio na trajetória como é visto no Gráfico 69c.

**Fotografia 47 - Ensaio 3 nos instantes 0s, 0,200s, 0,280s e 0,900s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, conclui-se que com o aumento do número de partículas no escoamento, existe a tendência de mais contato entre as partículas, além de aumentar a frequência do *drafting*. Verifica-se também que algumas das partículas após um tempo sedimentando tendem a se deslocar para a parede, e esse número parece aumentar com o aumento de partículas sedimentando.

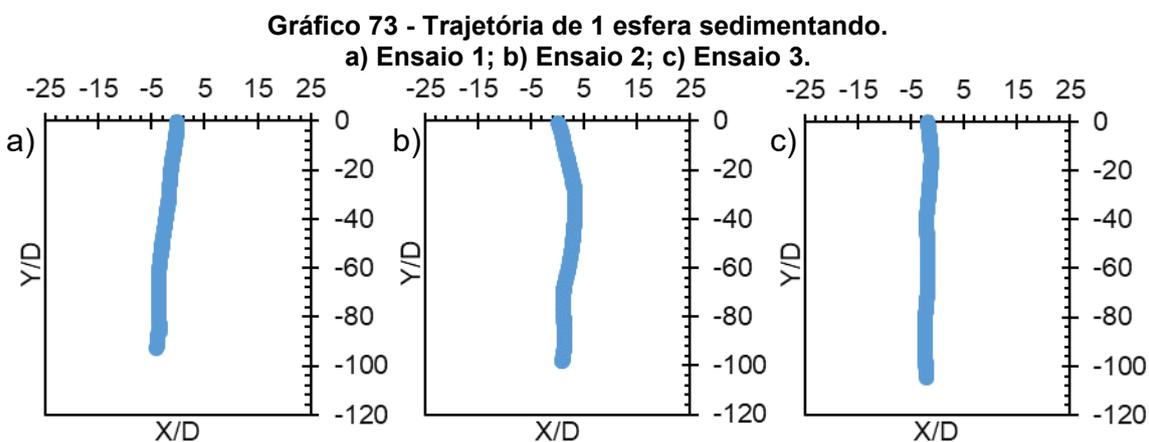
## **APÊNDICE D – RESULTADOS ESFERAS DE VIDRO**

## ESFERAS DE VIDRO

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com as esferas de vidro apresentadas na seção 3.1.

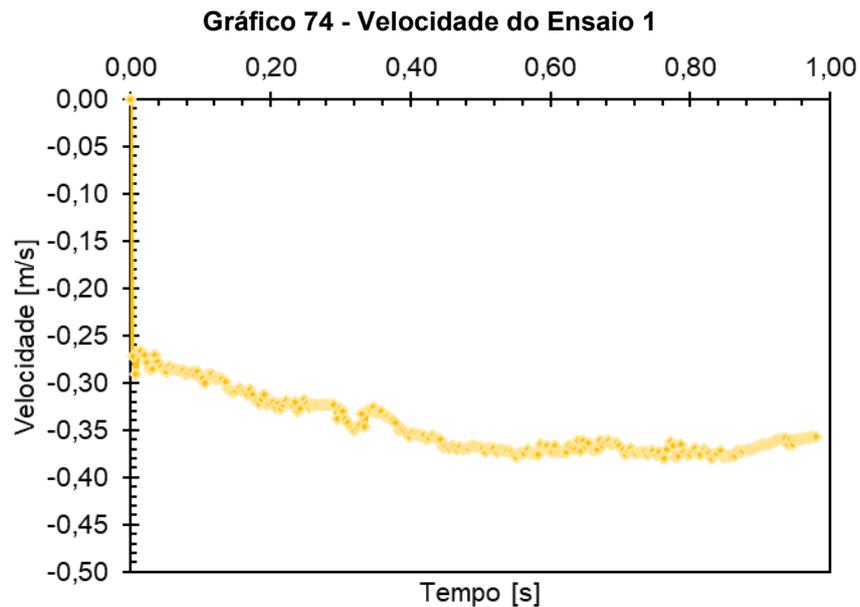
### 1. Sedimentação de 1 Esfera

No Gráfico 73a é possível verificar que a trajetória apesar de retilínea, apresenta um deslocamento de aproximadamente 5 vezes a largura da partícula. No Gráfico 73b o comportamento observado apresenta mais oscilações horizontais, onde o valor máximo também é 5 vezes a largura da partícula. É possível perceber que as trajetórias apresentam um comportamento mais retilíneo, principalmente no Gráfico 73c.



Fonte: Autoria Própria (2023)

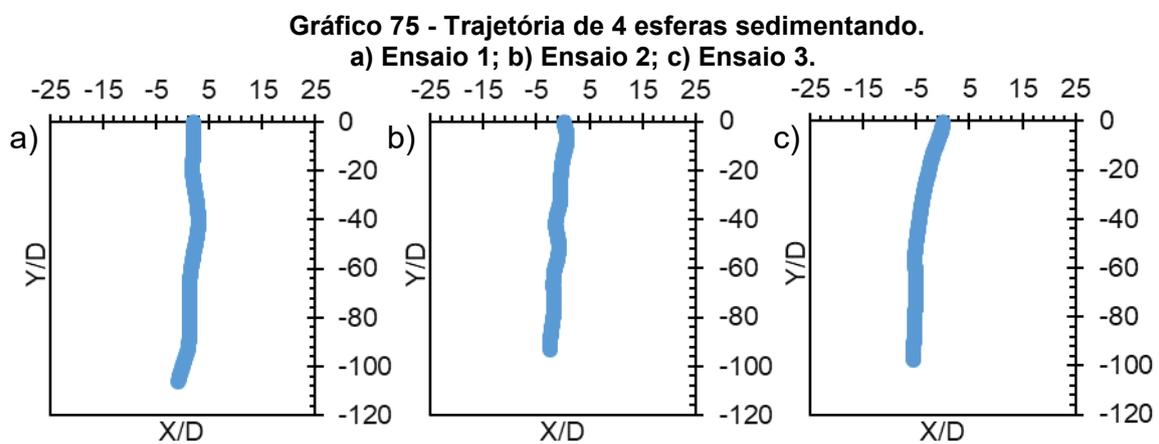
No Gráfico 74, é possível notar que a partícula atinge sua velocidade terminal mais rapidamente ao compararmos com a esfera de menor massa específica, atingindo certa estabilidade a partir dos 0,4s.



Fonte: Autoria Própria (2023)

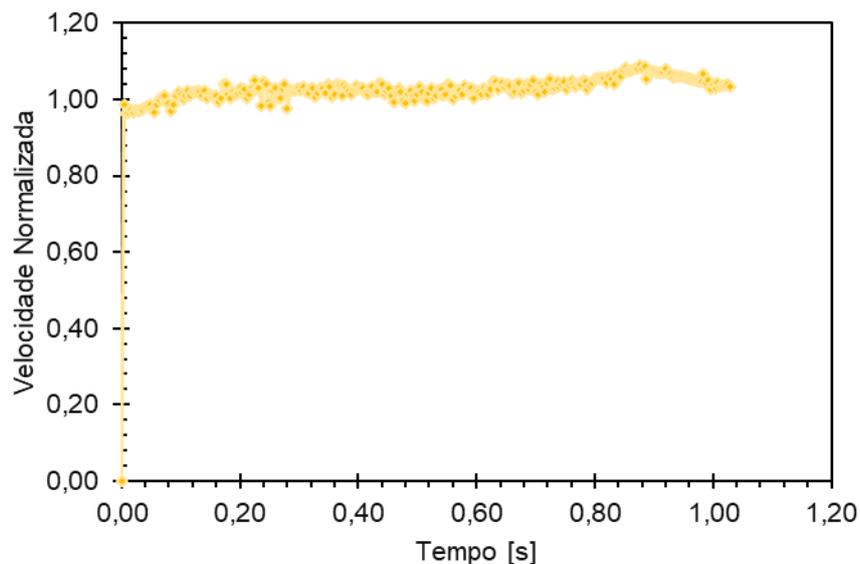
## 2. Sedimentação de 4 Esferas

No Gráfico 75a é possível afirmar que as trajetórias apresentaram um comportamento muito similar aos vistos no Gráfico 72, assim como no Gráfico 75b. No Gráfico 75c, é possível observar que a partícula começa apresentando um comportamento oblíquo e depois apresenta trajetória retilínea.



Fonte: Autoria Própria (2023)

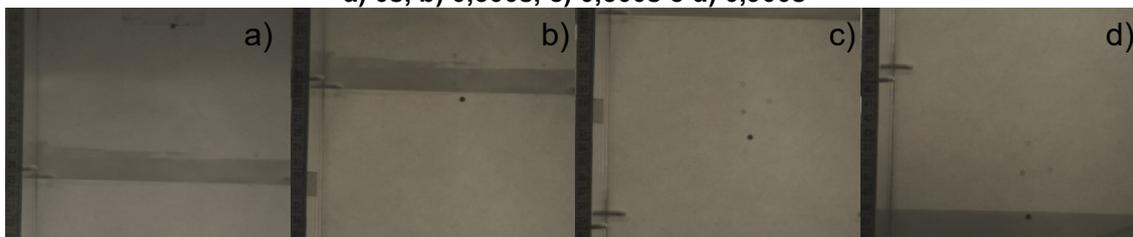
No Gráfico 76 é possível observar que o comportamento da velocidade do ensaio 1 se assemelha muito a uma partícula sedimentando sozinha, onde a partícula acelera até atingir a velocidade terminal e se mantém estável.

**Gráfico 76 - Velocidade do Ensaio 1**

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

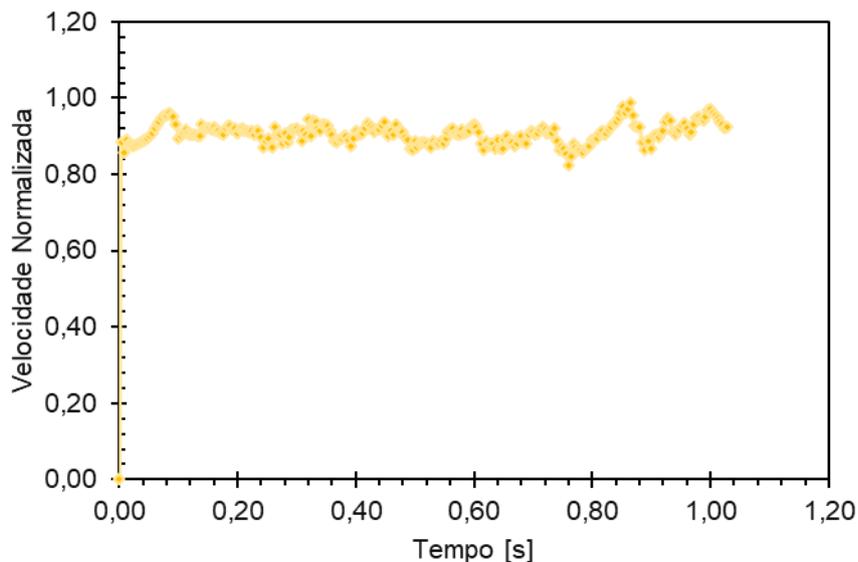
Na Fotografia 48 é possível afirmar que a partícula sedimenta de maneira isolada das outras, o que é correspondido no comportamento da trajetória e da velocidade, nota-se também que entre os instantes 0,5s e 0,9s há um distanciamento entre a partícula traçadora e as outras do grupo devido à desaceleração das outras partículas.

**Fotografia 48 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,300s, c) 0,500s e d) 0,900s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 77 é possível ver que a velocidade apresenta oscilações, porém, ela não apresenta grandes acelerações e desacelerações o que indica que a partícula esteve sob influência das outras.

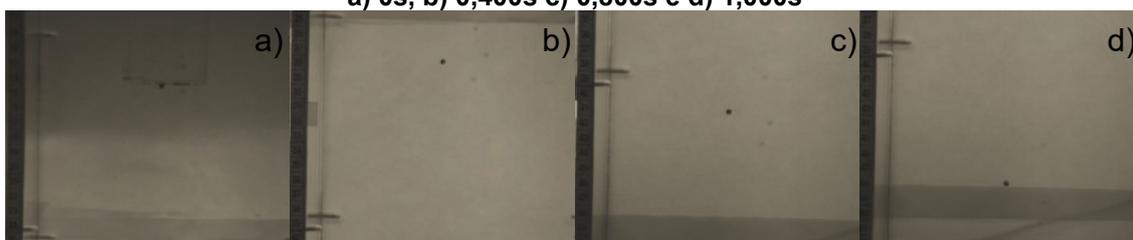
**Gráfico 77 - Velocidade do Ensaio 2**

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 49 é possível observar que a partícula sedimenta ao lado das outras partículas, porém mais distante, o que pode explicar as oscilações laterais na trajetória, onde a partícula está constantemente sendo atraída para próxima das outras, porém devido a distância entre elas, a atração devido à queda da pressão hidrodinâmica não é suficiente para que haja uma grande mudança na trajetória. As variações no valor da velocidade também podem ser atribuídas à tal efeito.

**Fotografia 49 - Ensaio 2 nos instantes:**

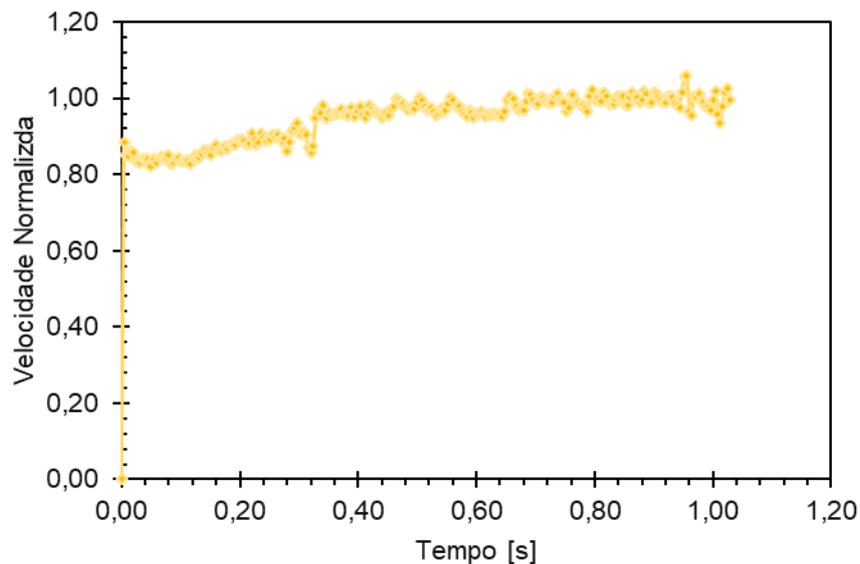
**a) 0s, b) 0,400s c) 0,800s e d) 1,000s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 78, a mudança de comportamento constatada na trajetória não é refletida, onde a partícula acelera e se mantém.

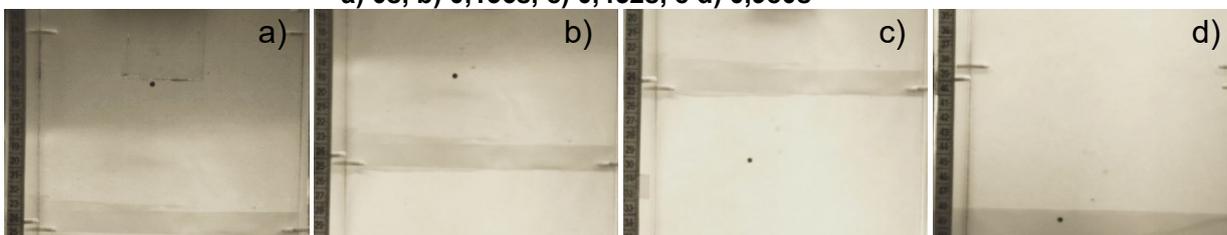
Gráfico 78 - Velocidade do Ensaio 3



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 50, é possível observar que a partícula sedimenta de forma isolada, o que reflete o comportamento da velocidade ser similar ao de 1 partícula sedimentando.

Fotografia 50 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,136s, c) 0,452s, e d) 0,980s



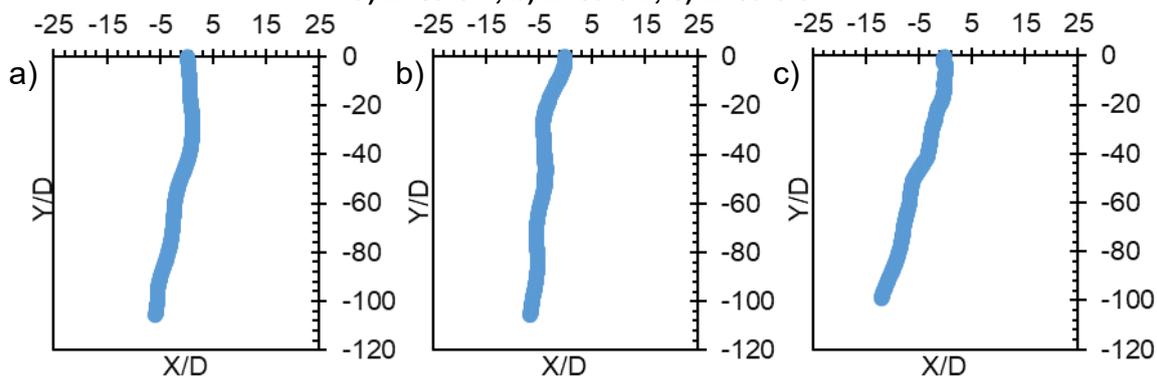
Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3. Sedimentação de 16 Esferas

No Gráfico 79 estão as trajetórias dos ensaios com 16 esferas. É possível notar que o Gráfico 79a e Gráfico 79c apresentam um deslocamento lateral maior que atestado anteriormente indicando uma maior influência das partículas em sua vizinhança, já o Gráfico 79b apresenta o comportamento similar ao encontrado para uma partícula sedimentando sozinha.

Gráfico 79 - Trajetória de 16 esferas sedimentando.

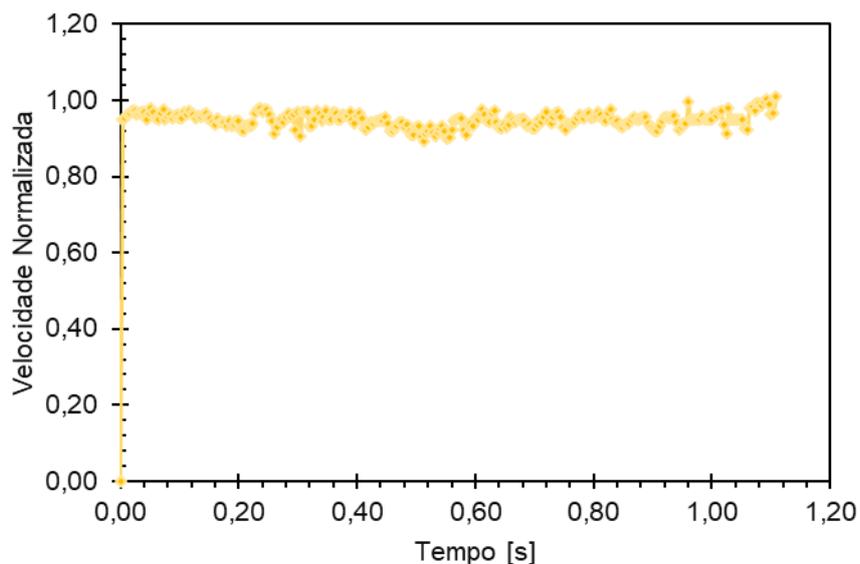
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 80 é possível atestar que o comportamento da velocidade do ensaio 1 se assemelha muito a uma partícula sedimentando sozinha, onde a partícula acelera até atingir a velocidade terminal e se mantém estável.

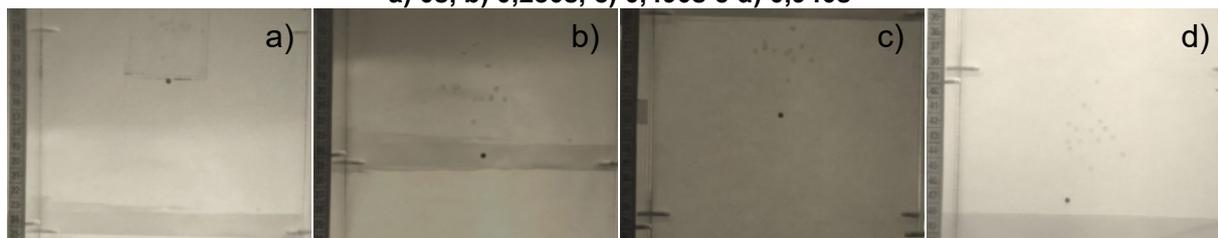
Gráfico 80 - Velocidade do Ensaio 1



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 51 é possível visualizar que a partícula sedimenta a frente das outras, o que explica a trajetória similar à de esfera sedimentando, além da velocidade de comportamento constante

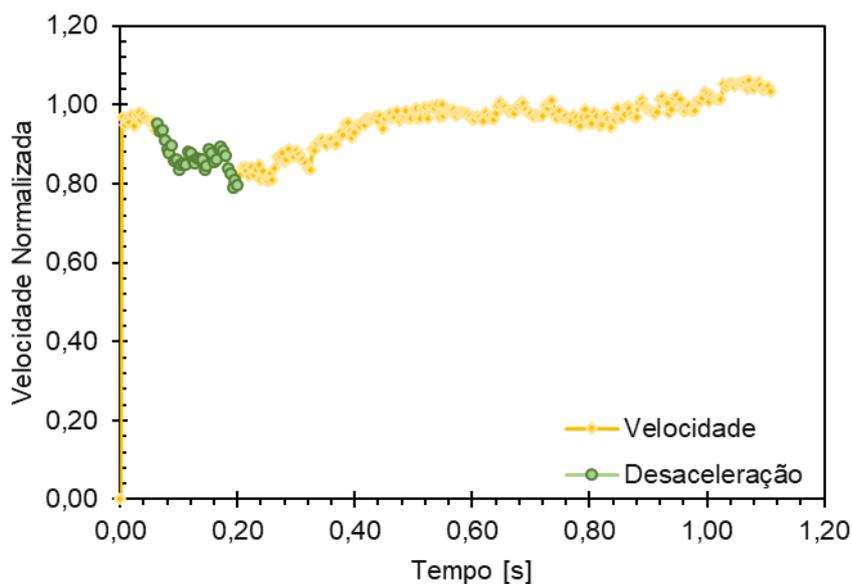
**Fotografia 51 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,280s, c) 0,490s e d) 0,940s**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

No Gráfico 81 é possível observar que a partícula acelera até atingir uma velocidade terminal, depois apresenta uma desaceleração entre os instantes 0,020s e 0,210s, depois volta a acelerar até o instante 0,480s onde atinge a velocidade terminal e se mantém estabilizada. Tal comportamento indica que no começo da sedimentação a partícula está em contato com as outras e posteriormente se destaca do grupo fazendo com que sua velocidade estabilize.

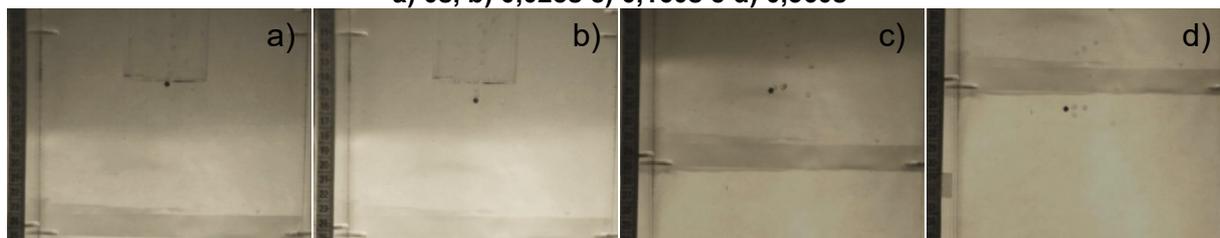
**Gráfico 81 - Velocidade do Ensaio 2**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Na Fotografia 52b é possível observar o primeiro contato da partícula, resultando na primeira desaceleração, na Fotografia 52c novamente há um toque da partícula, o que acentua a desaceleração vista no gráfico. Na Fotografia 52d, é possível observar que a partícula ainda sedimenta próxima das outras, porém, como há uma partícula a frente do grupo onde ela se encontra, ela volta a acelerar por estar na esteira.

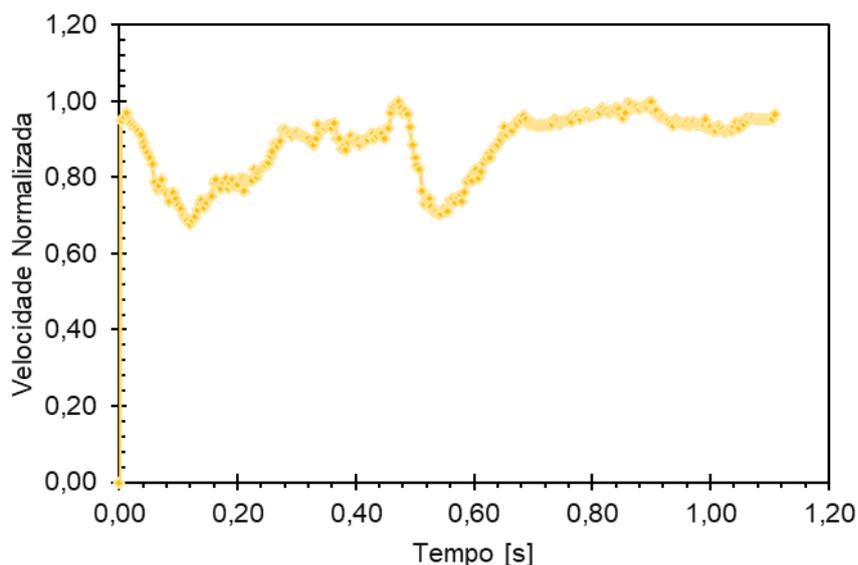
Fotografia 52 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,028s c) 0,160s e d) 0,360s



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 82 é visualizar que a velocidade apresenta picos de desaceleração entre os instantes 0s e 0,120s e entre os instantes 0,480 e 0,560s.

Gráfico 82 - Velocidade do Ensaio 3

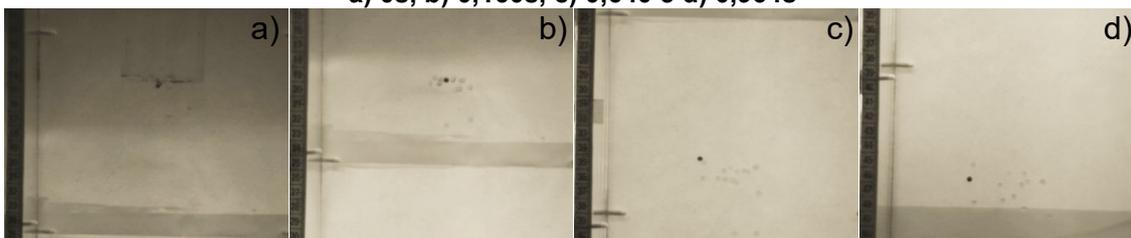


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 53 é possível averiguar que a partícula começa a sedimentar muito próxima das outras, fazendo com que sua velocidade seja reduzida, enquanto no final do ensaio, Fotografia 53d, ela se encontra mais distante das outras, o que reflete na estabilização da velocidade de sedimentação.

Na Fotografia 53c, a partícula está sendo submetida ao processo de *drafting*, *kissing* e *tumbling*, o que reflete no pico de desaceleração e aceleração, onde a partícula que estava perto das outras, toca a partícula e desacelera, posteriormente entra na esteira da partícula novamente e acelera, toca novamente na partícula e se afasta realizando o resto da sedimentação sozinha.

**Fotografia 53 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,160s, c) 0,640 e d) 0,964s**

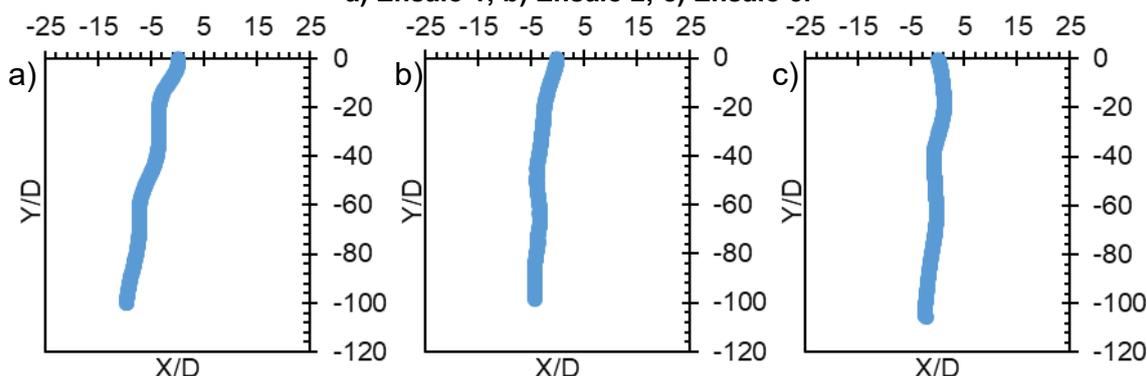


Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4. Sedimentação de 64 Esferas

No Gráfico 83b é possível apurar que as trajetórias apresentaram um comportamento muito similar aos vistos no Gráfico 73, assim como no Gráfico 83c. No Gráfico 83a, é possível observar que a partícula apresenta um deslocamento lateral maior que constatado anteriormente, indicando uma maior influência das partículas em sua vizinhança.

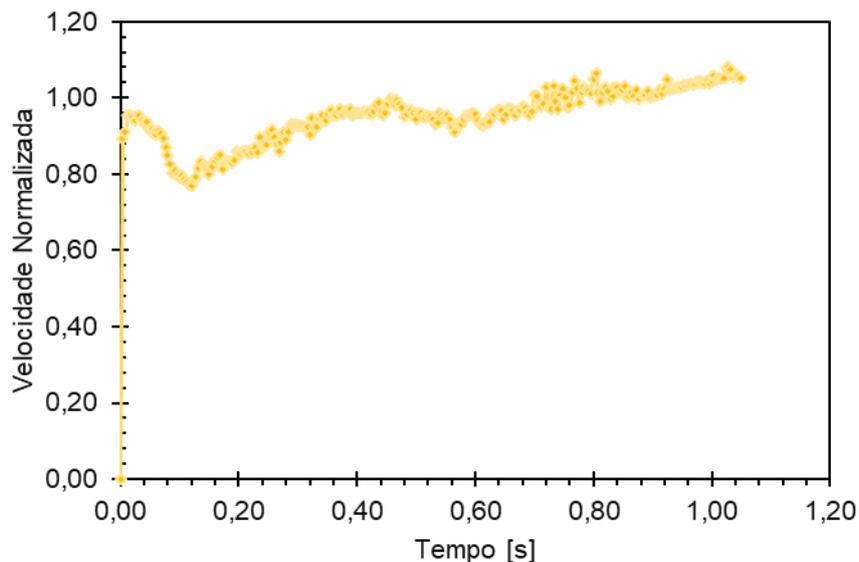
**Gráfico 83 - Trajetória de 64 esferas sedimentando.  
a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3.**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 84 é possível reconhecer que entre os instantes 0s e 0,080s a partícula apresenta uma desaceleração e posteriormente acelera e se mantém à uma velocidade instável, o que indica uma maior influência das outras esferas no começo da sedimentação.

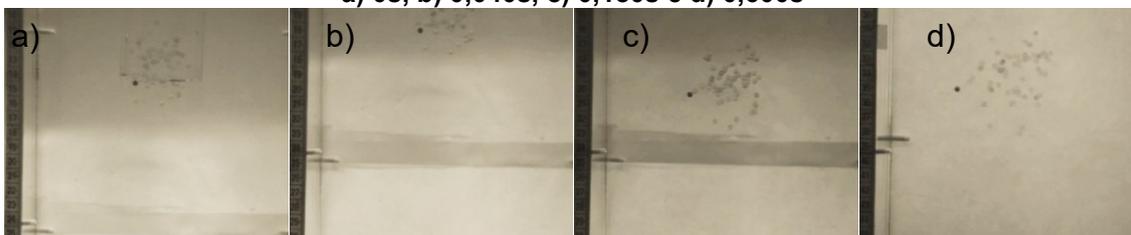
Gráfico 84 - Velocidade do Ensaio 1



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 54 é possível averiguar que a partícula começa sedimentando próxima das outras e ao decorrer do ensaio ela vai se deslocando lateralmente devido à um toque entre as partículas.

Fotografia 54 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,040s, c) 0,180s e d) 0,600s



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 55 é possível observar um toque da partícula, que explica o deslocamento lateral encontrado na trajetória da partícula devido ao processo de *tumbling*.

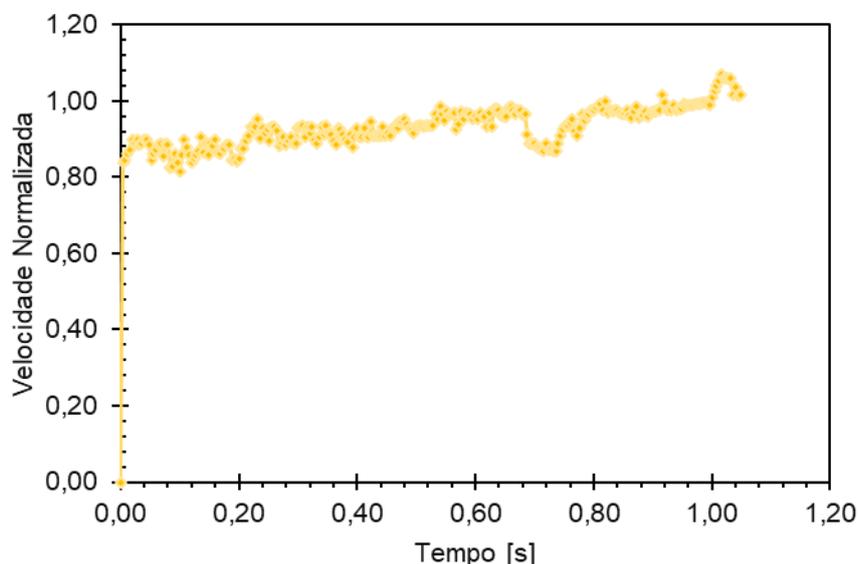
Fotografia 55 - Toque no instante 0,228s



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 85 é possível atestar que a velocidade se mantém estável do começo do ensaio até o instante 0,680s, onde há uma desaceleração brusca. Isso indica uma interação mais acentuada com outra partícula, como um toque.

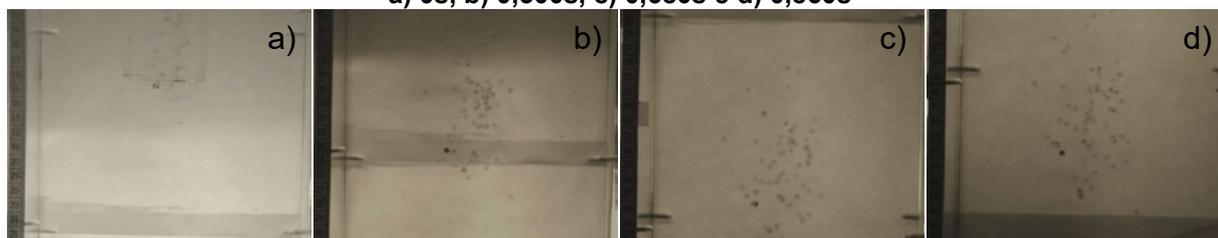
**Gráfico 85 - Velocidade do Ensaio 2**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

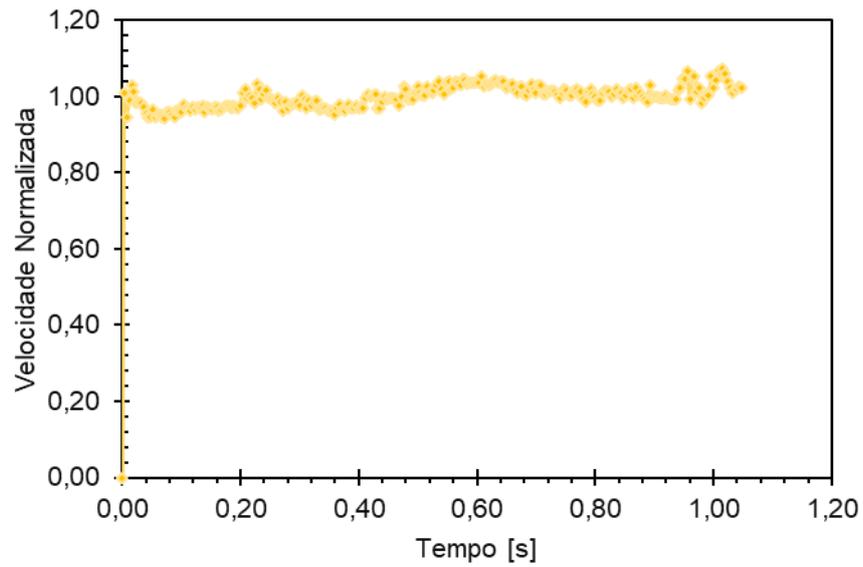
Na Fotografia 56 é possível observar que a partícula sedimenta próxima das outras até o instante do que, Fotografia 56c, após isso ela se distancia, o que gera a aceleração vista no gráfico. Nas fotografias também é possível notar que o grupo de partículas vai se espalhando conforme a sedimentação se desenvolve.

**Fotografia 56 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,300s, c) 0,680s e d) 0,860s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

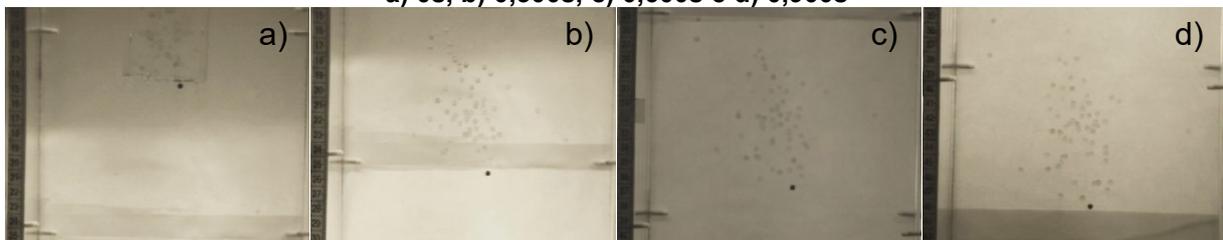
No Gráfico 86 é possível afirmar que o comportamento da velocidade do ensaio 1 se assemelha muito a uma partícula sedimentando sozinha, onde a partícula acelera até atingir a velocidade terminal e se mantém estável.

**Gráfico 86 - Velocidade do Ensaio 3**

Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 57 é visível que a partícula sedimenta a frente das outras, onde ela se mantém a uma distância constante.

**Fotografia 57 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,300s, c) 0,600s e d) 0,900s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

## **APÊNDICE E – RESULTADOS CILINDROS DE RESINA**

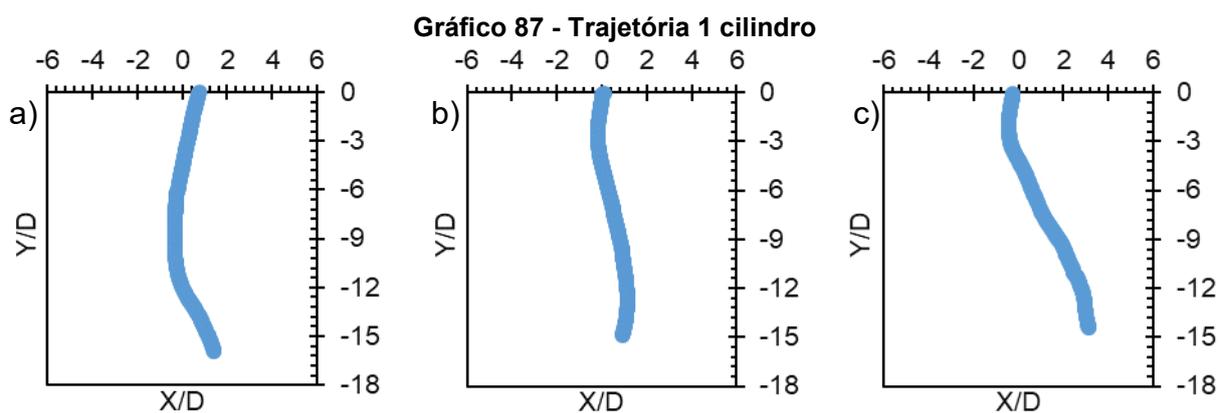
## CILINDROS

Neste apêndice serão apresentados de forma completa os dados e discussões obtidos a partir dos cilindros impressos com resina 3D apresentadas na seção 3.1.

### 1. Sedimentação de 1 Cilindro

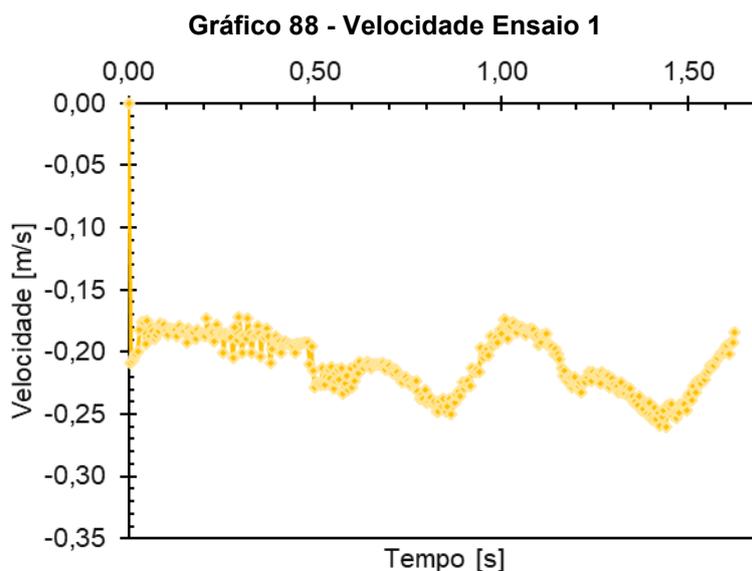
Da mesma maneira que foram realizados ensaios com uma única esfera sedimentando, foram realizados ensaio para dessa maneira comparar os dados obtidos e verificar possíveis influencias das outras partículas.

É mostrado no Gráfico 87, as trajetórias do cilindro sedimentando sozinho apresentam um movimento oblíquo e intermitente, similar ao que ocorre com as esferas de resina, isso pode ser atribuído a mesma razão mássica além do número de Reynolds ser bem próximo.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 88, nota-se que a velocidade do cilindro não se mantém constante como se foi demonstrado pelas evoluções das velocidades das esferas.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

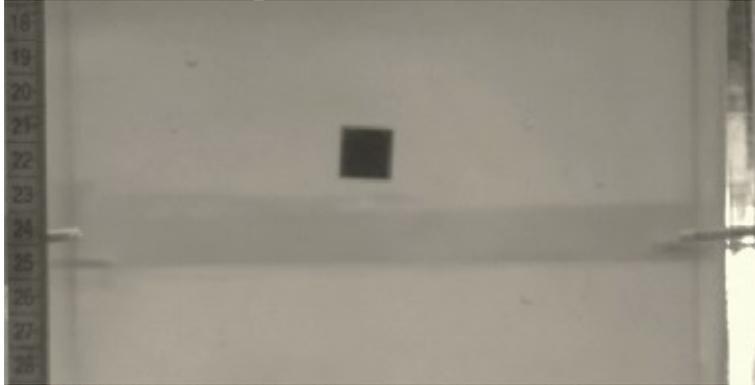
Na Fotografia 58, é possível visualizar o instante inicial da sedimentação, nele nota-se que o cilindro está se inclinando à aproximadamente  $20^\circ$  em relação a largura do tanque.

**Fotografia 58 - Instante 0s**



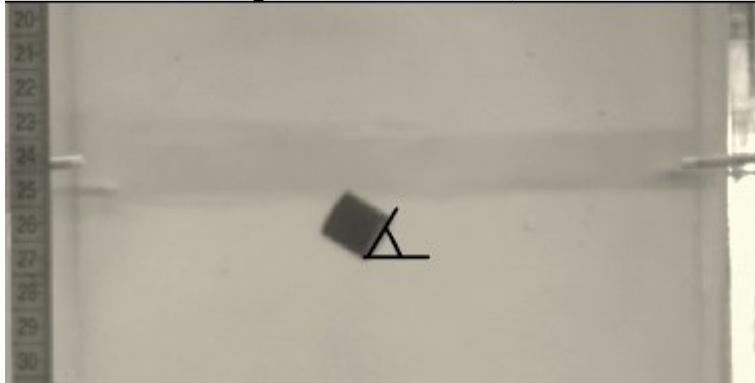
**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Já na Fotografia 59, no instante 0,310s, o cilindro encontra-se aproximadamente paralelo em relação a largura do tanque.

**Fotografia 59 - Instante 0,310s**

Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, na Fotografia 60, no instante 0,495s, o cilindro apresenta uma inclinação de  $60^\circ$  em relação a horizontal do tanque.

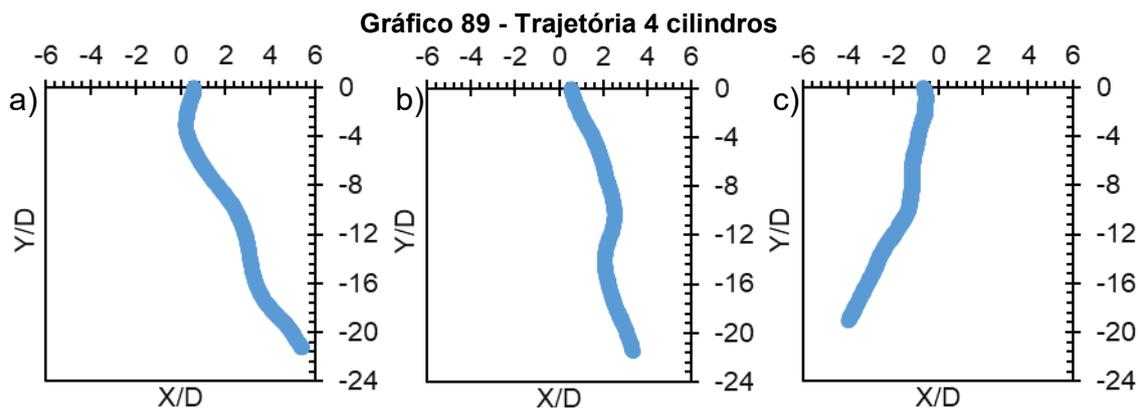
**Fotografia 60 - Instante 0,495s**

Fonte: Autoria Própria (2023)

Dessa maneira, é possível afirmar que o cilindro constantemente gira em torno de si, alterando a área projetada para o escoamento, e conseqüentemente a força de arrasto, o que explica as variações vistas no gráfico de velocidade.

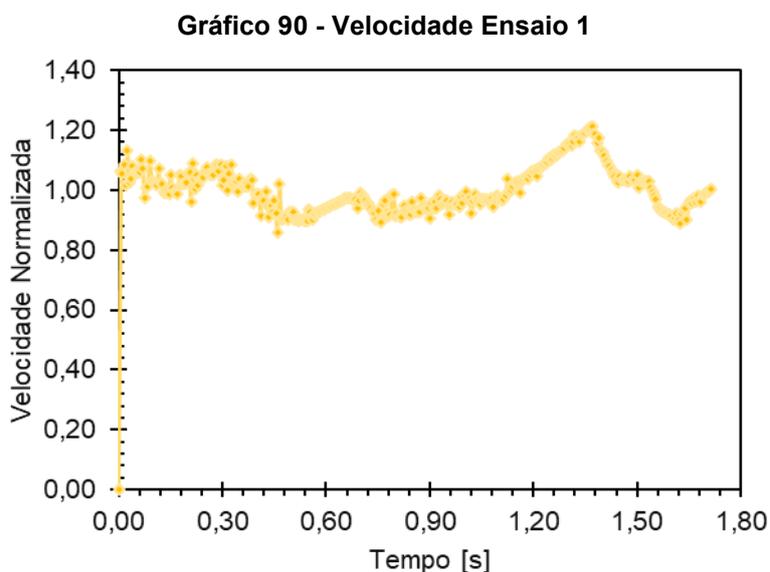
## 2. Sedimentação de 4 Cilindros

No Gráfico 89a é claro, assim como no Gráfico 89c, que as partículas apresentam um movimento acentuado para um lado do tanque, o que pode indicar um toque ou interação com outra partícula.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Diferentemente dos gráficos das velocidades das esferas, o Gráfico 90 não indica interações entre as partículas, já que a velocidade da esfera oscila naturalmente.

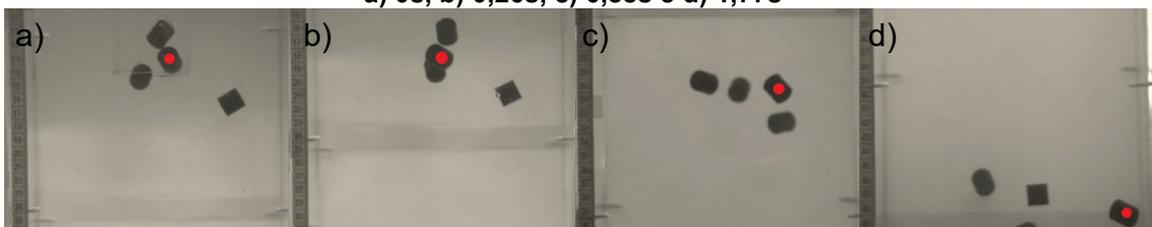


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 61b, é possível ver o instante no qual há a mudança brusca de direção, que é ilustrada pela proximidade entre a partícula avaliada e outra partícula sedimentando.

Na Fotografia 61c, nota-se que a partícula já apresenta o deslocamento para a lateral do tanque como visto no Gráfico 89. Por fim, na Fotografia 61d, é possível afirmar que o cilindro está quase colidindo com a parede do tanque.

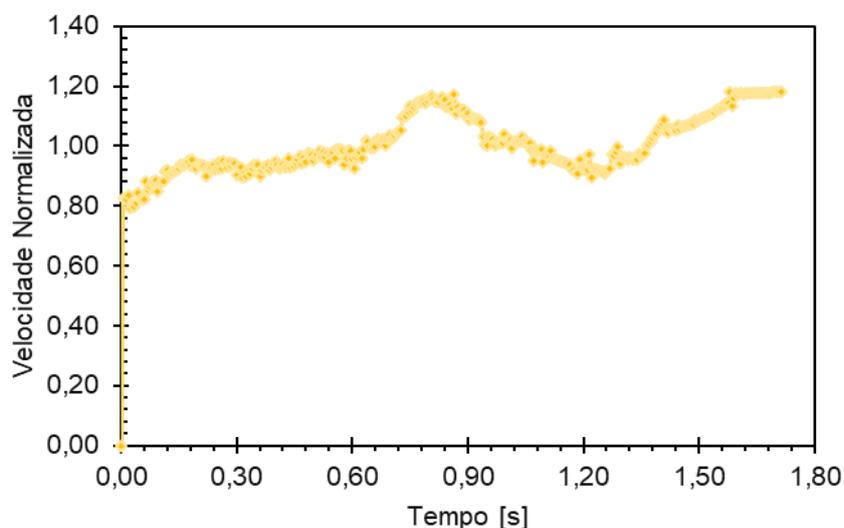
**Fotografia 61 - Ensaio 11 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,26s, c) 0,88s e d) 1,77s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 91, nota-se que a velocidade similar à do outro ensaio, apresentando apenas as oscilações devido à geometria da partícula.

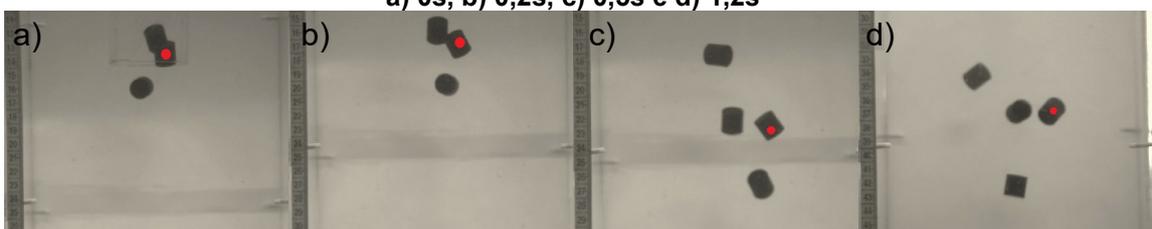
**Gráfico 91 - Velocidade Ensaio 2**



Fonte: Autoria Própria (2023)

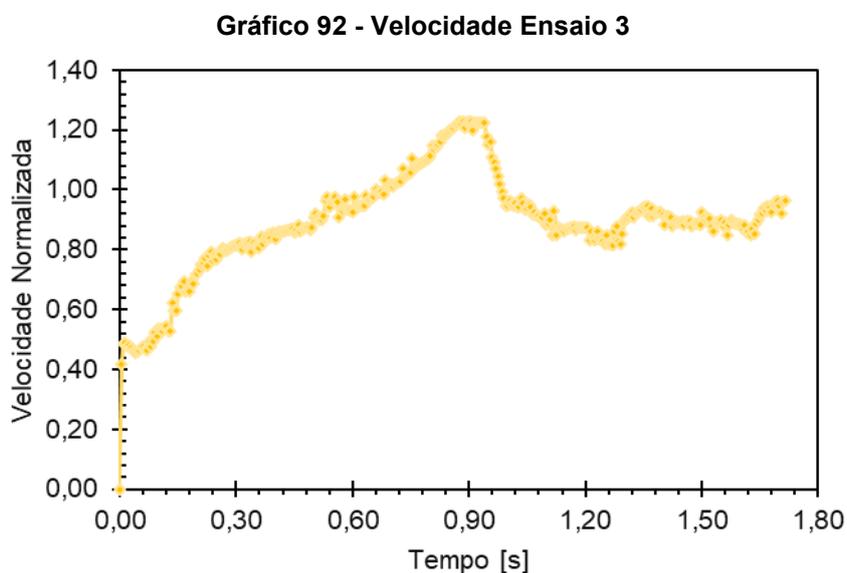
Na Fotografia 62, nota-se que o cilindro sedimenta com relativa distancia para as outras partículas do escoamento, o que é refletido pela velocidade e da trajetória possuindo um comportamento muito similar ao de uma partícula sedimentando sozinha.

**Fotografia 62 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,2s, c) 0,5s e d) 1,2s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

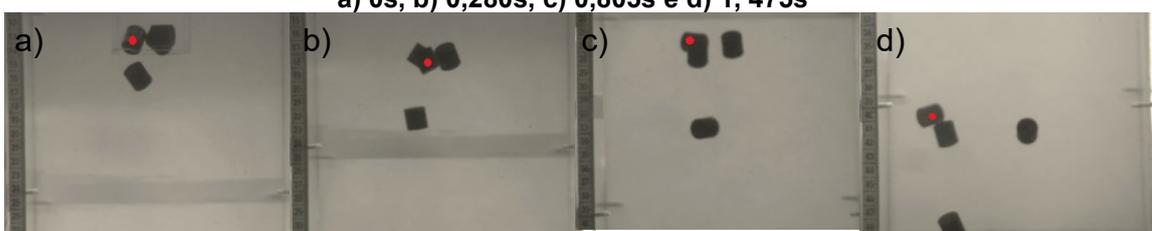
No Gráfico 92, é possível notável que a velocidade apresenta uma oscilação maior do que nos ensaios 1 e 2, o que indica uma maior interação entre as partículas, principalmente no instante 0,8s devido a brusca mudança de velocidade.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 63, a partícula analisada se mantém constantemente próxima das outras partículas, no instante 0,805s que é possível ver a desaceleração da partícula, o cilindro encontra-se próximo do outro.

**Fotografia 63 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,280s, c) 0,805s e d) 1,475s**



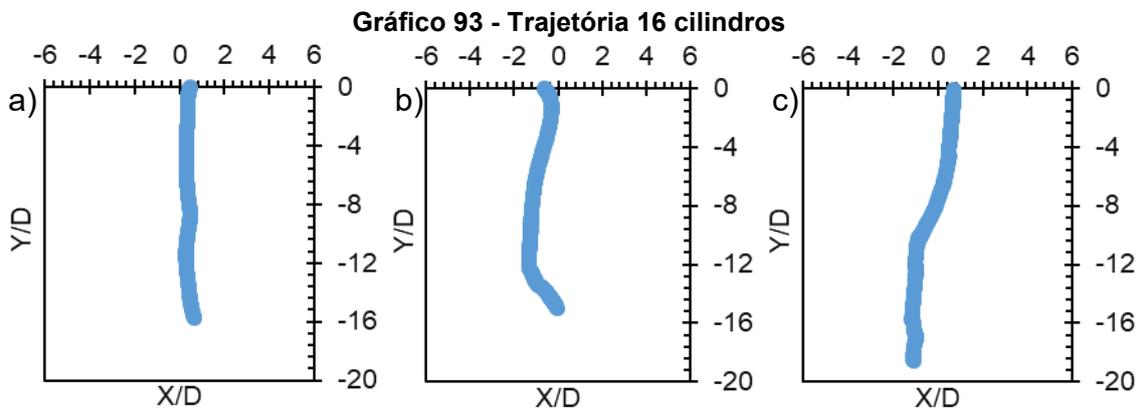
**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 63, os cilindros tendem a direção da parede, devido a um toque no instante 1s.

### 3. Sedimentação de 16 Cilindros

No Gráfico 93a, nota-se que a trajetória possui um comportamento mais vertical do que constatado com apenas 1 cilindro, o que indica que as partículas sedimentando nas vizinhanças do cilindro em análise limitaram sua movimentação.

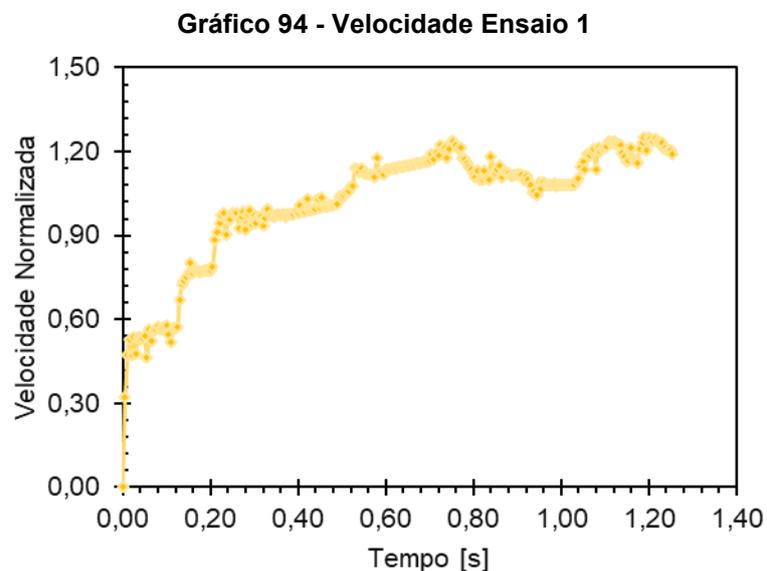
No Gráfico 93b, a partícula apresenta um comportamento oblíquo e intermitente, similar ao visto para 1 cilindro.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 93c é evidente que o movimento do cilindro começa sendo oblíquo, mas na metade do escoamento ele começa a sedimentar de forma mais retilínea.

No Gráfico 94, pode-se perceber que a partícula em análise apresenta uma redução na aceleração no começo do escoamento até o instante 0,24s.

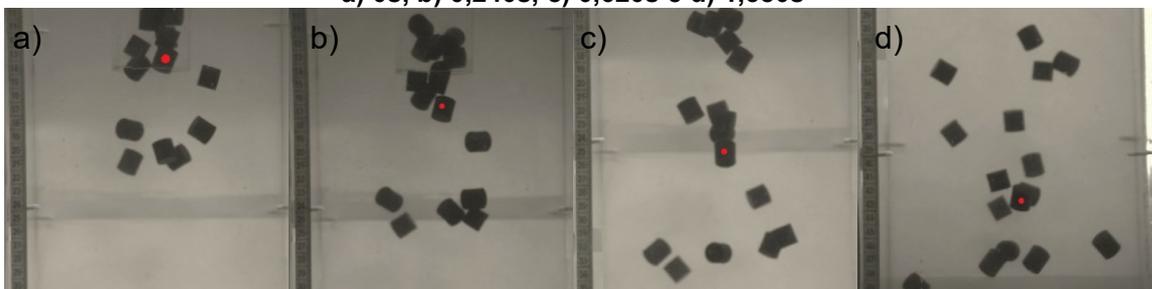


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 64 nota-se que o cilindro analisado sedimenta constantemente com outros em suas proximidades, além disso, é possível notar que a partícula escoava basicamente sem rotacionar, diferentemente do que é observado quando o cilindro sedimenta sozinho.

Esse fenômeno pode ser devido as partículas em sua esteira, que retardaram o movimento da partícula por meio da atração gerada pelas forças de Van der Waals, fazendo com que a partícula não rotacione.

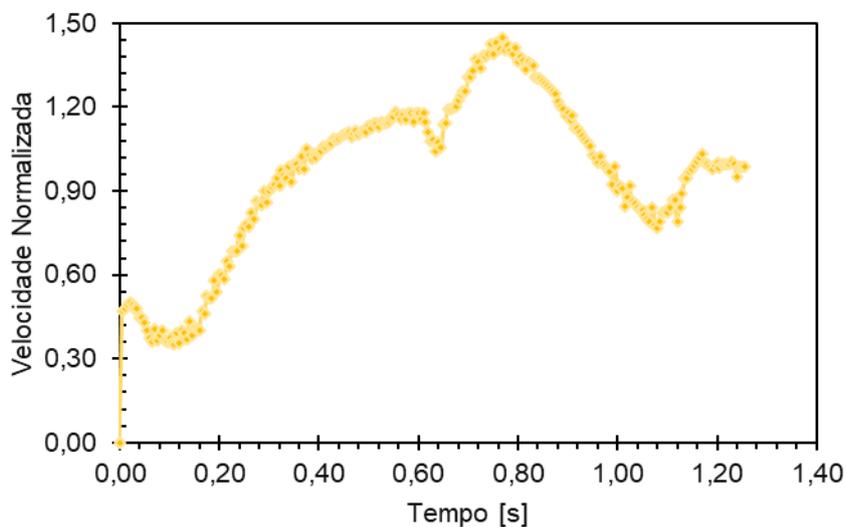
**Fotografia 64 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,240s, c) 0,620s e d) 1,380s**



**Fonte: Autorial Própria (2023)**

No Gráfico 95, é possível observar que a velocidade da partícula varia muito, possuindo picos de aceleração e desaceleração que não foram observados com um cilindro sedimentando sozinho, o que indica que o cilindro tenha se aproximado e distanciado das outras partículas ao longo do escoamento.

**Gráfico 95 - Velocidade Ensaio 2**



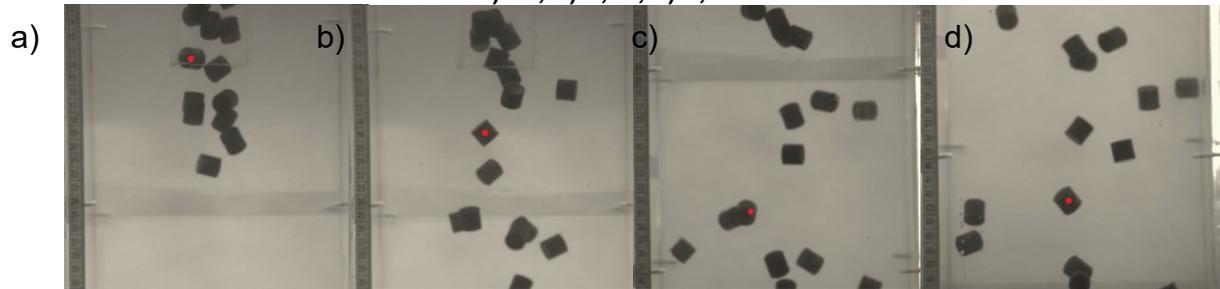
**Fonte: Autorial Própria (2023)**

Na Fotografia 65, confirma-se que a partícula se aproximou e afastou das outras durante o escoamento. Na Fotografia 65b, é notório que a partícula escoou sem outras em sua vizinhança, o que reflete no gráfico da velocidade, onde há uma grande aceleração.

Na Fotografia 65c, há um toque entre uma partícula e a em análise, o que é refletido no gráfico da trajetória com a mudança de direção no Fotografia 65b.

**Fotografia 65 - Ensaio 2 nos instantes:**

a) 0s, b) 0,4s, c) 1,055s e

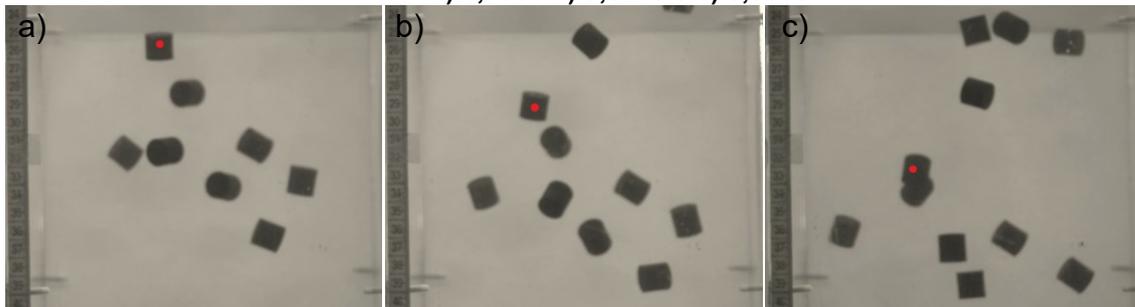


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 66, constata-se que as partículas estão se aproximando, ou estão em processo de *drafting*, precedendo o toque visto na Fotografia 65c, o que explica a desaceleração da partícula que é vista no Gráfico 95 nesse intervalo de tempo.

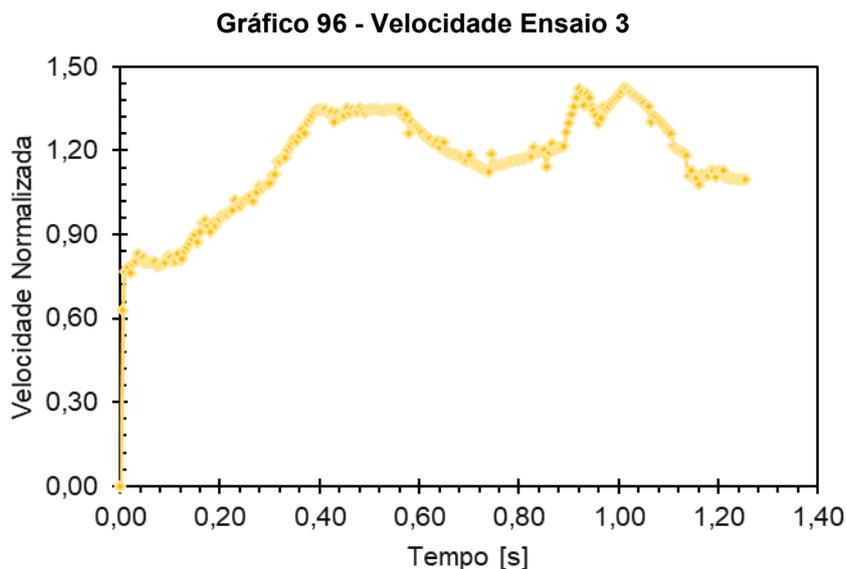
**Fotografia 66 - Ensaio 2 nos instantes:**

a) 0,700s b) 0,820s e c) 0,955s



Fonte: Autoria Própria (2023)

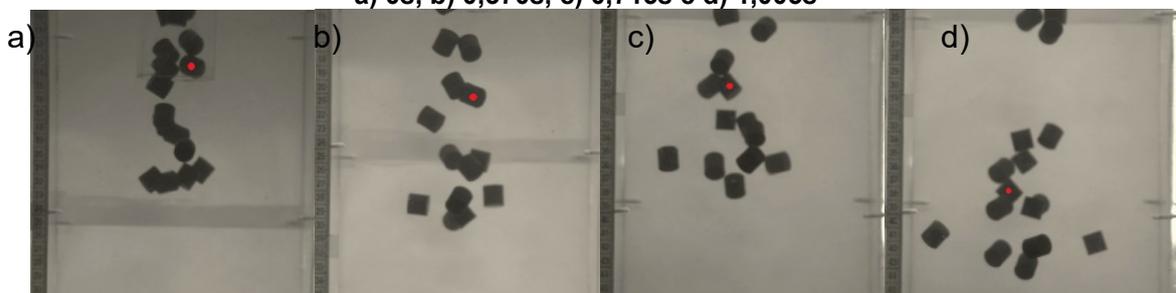
No Gráfico 96 nota-se que a aceleração da partícula é reduzida no começo do escoamento devido as partículas em sua vizinhança, depois, verifica-se que o comportamento da velocidade possui oscilações, mas nada proeminente que possa indicar uma interação entre as partículas.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 67 é possível observar que a partícula sedimenta constantemente com partículas em sua volta. No instante 0,715, Fotografia 67c, é possível confirmar uma colisão entre as partículas, que é refletido na trajetória da partícula, que tem seu movimento oblíquo interrompido e começa a apresentar uma trajetória retilínea.

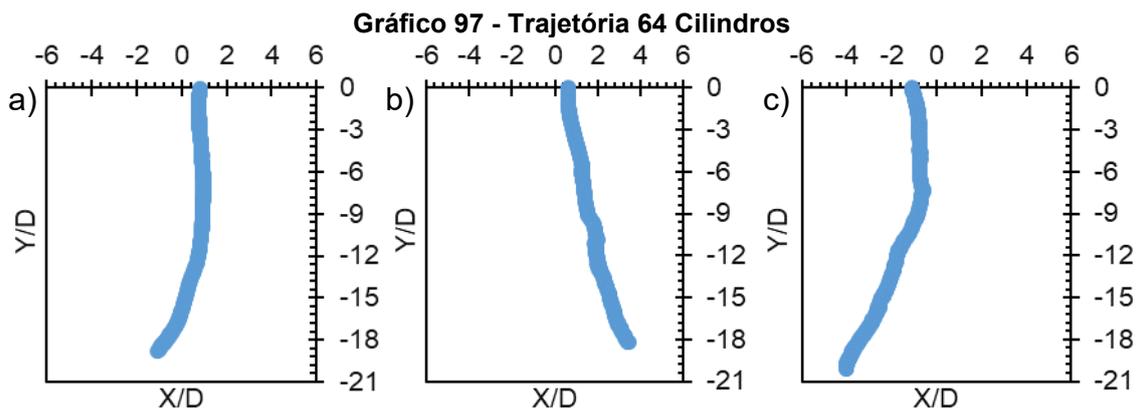
**Fotografia 67 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,370s, c) 0,715s e d) 1,005s**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

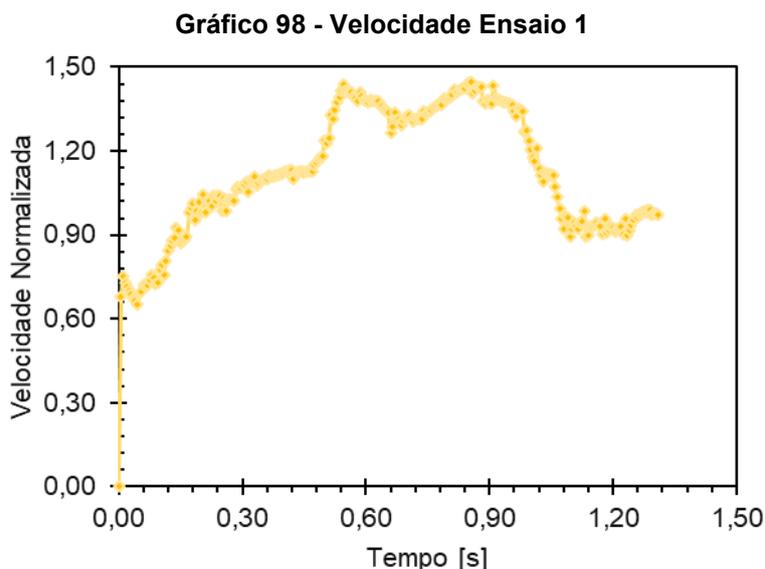
#### 4. Sedimentação de 64 Cilindros

No Gráfico 97, as trajetórias dos cilindros apresentam um comportamento oblíquo. No Gráfico 97a o movimento começa mais retilíneo e posteriormente começa a se deslocar para a lateral do tanque, o mesmo comportamento pode ser visto no Gráfico 97c. No Gráfico 97b, o movimento é oblíquo do começo ao fim.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

No Gráfico 98 nota-se que a aceleração da partícula é reduzida no começo da sedimentação devido as partículas em sua vizinhança, e no instante 0,8s a velocidade apresenta uma redução brusca e por fim, no instante 1,4s apresenta uma aceleração brusca que pode indicar uma colisão ou uma interação entre a partícula em análise e outras em sua vizinhança.



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 68, é possível observar que entre os instantes 0s e 0,345s, a partícula está com diversas partículas em sua vizinhança explicando a aceleração reduzida da partícula no começo da sedimentação.

Na Fotografia 68c, é possível evidenciar que há um toque entre as partículas, tal toque ocasiona a redução da velocidade vista no Gráfico 98, além da mudança de direção vista no Gráfico 97a.

**Fotografia 68 - Ensaio 1 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,345s, c) 0,845s e d) 1,435s**

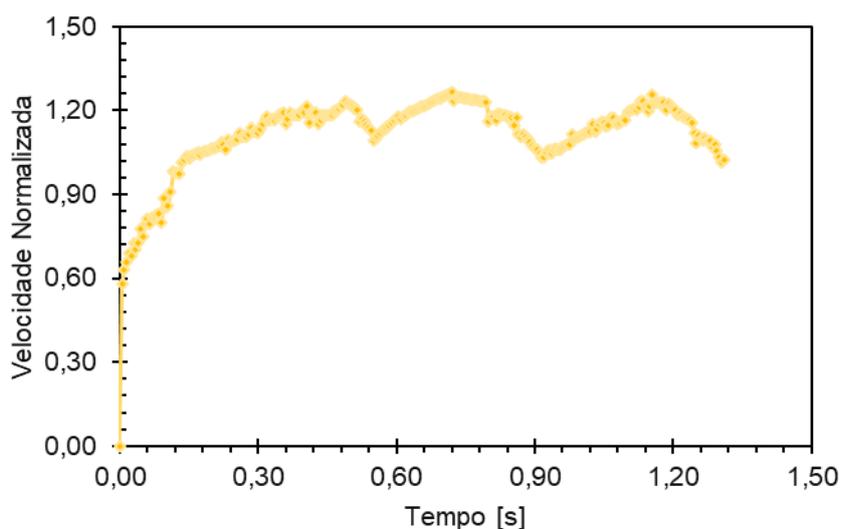


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 68d, é possível observar um outro toque da partícula que é refletido no Gráfico 98 com um aumento da velocidade de sedimentação.

No Gráfico 99 percebe-se que a aceleração da partícula é reduzida no começo do escoamento devido as partículas em sua vizinhança, depois, também é possível atentar que o comportamento da velocidade possui oscilações similares a que um cilindro sedimentando sozinho apresenta devido a sua geometria.

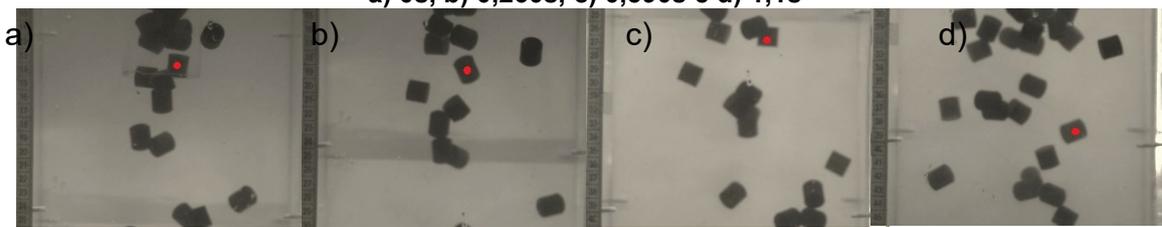
**Gráfico 99 - Velocidade Ensaio 2**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Na Fotografia 69 é perceptível que o cilindro começa a sedimentar com vários outros em seu arredor, depois se distancia. Na Fotografia 69c, é possível observar que o cilindro analisado se aproxima de outra e depois se afasta em direção a lateral do tanque, como é possível constatar no Gráfico 97b.

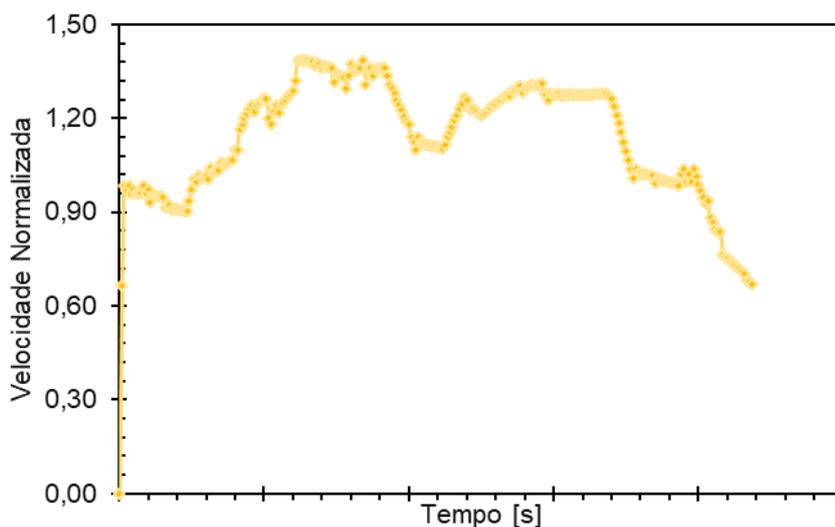
**Fotografia 69 - Ensaio 2 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,260s, c) 0,590s e d) 1,1s**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No Gráfico 100 é possível ver que o valor da velocidade de sedimentação varia muito, isso se deve à grande quantidade de partículas em seus arredores.

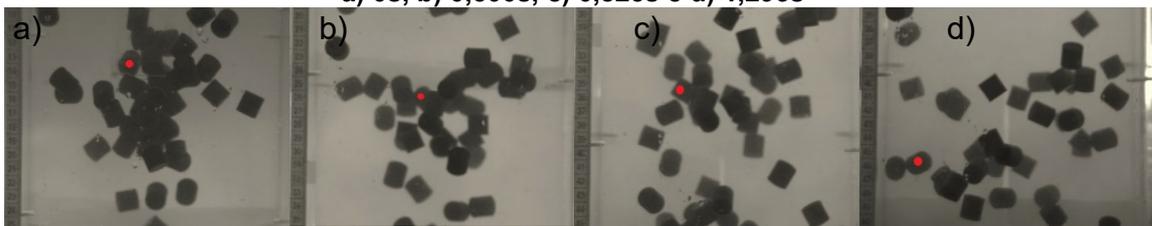
**Gráfico 100 - Velocidade Ensaio 3**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Fotografia 70, verifica-se que a partícula sedimenta com várias ao seu redor, fazendo com que ela colida nos instantes 0,5s e no instante 1,295s. Nas colisões observadas, existem mudanças na trajetória associadas a elas, na colisão do instante 0,5s, a trajetória que apresentava um comportamento retilíneo começou a sedimentar de forma oblíqua, já na colisão do instante 1,295s, ocorre uma mudança de direção.

**Fotografia 70 - Ensaio 3 nos instantes:  
a) 0s, b) 0,500s, c) 0,825s e d) 1,295s**



Fonte: Autoria Própria (2023)