



# Nanofluidos de grafeno: Estudo do comportamento da viscosidade em função da temperatura e da fração volúmica

FÁTIMA RAQUEL PINTO SOARES

julho de 2022

# **Nanofluidos de grafeno: Estudo do comportamento da viscosidade em função da temperatura e da fração volúmica**

**Fátima Raquel Pinto Soares**

Engenheira Biomédica pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto

“Dissertação apresentada no Instituto Superior de Engenharia do Porto para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Biomédica”

Orientador: Gina Maria Oliveira Vilão de Ramos

julho 2022







## **Agradecimentos**

É com orgulho que vejo concluída a minha dissertação de Mestrado, que ao longo do tempo contou com importantes apoios e incentivos que contribuíram para que a realização desta exigente etapa fosse concluída com sucesso.

Agradeço aos meus pais que durante os anos de estudo nunca mediram esforços para me fazer crescer tanto a nível profissional como a nível de pessoal.

Agradeço aos meus professores que durante toda a trajetória tiveram papel importante na construção de minha formação. Agradeço em especial à Professora Gina Vilão que ao longo do desenvolvimento deste trabalho se mostrou sempre paciente e solícita a ajudar. Agradeço pelo apoio, perseverança e incentivo, à qual estarei eternamente grata.

Ao Departamento de Física e ao NBIN-CIETI, agradeço a disponibilidade dos materiais e equipamentos necessários ao desenvolvimento do projeto.

Agradeço também a todos os meus amigos de curso que compartilharam comigo as dificuldades, anseios e que contribuíram para tornar o caminho mais leve e descontraído.



## Resumo

Os nanofluidos de grafeno têm vindo a ser alvo de estudo, uma vez que apresentam diversas propriedades que os tornam aplicáveis em diversas áreas. Foi realizado, inicialmente, uma pesquisa bibliográfica relativa aos nanofluidos pretendidos, ao seu vasto campo de possibilidades de aplicação e, em particular, às aplicações na área da medicina, de particular interesse no contexto do Mestrado em Engenharia Biomédica.

Neste trabalho, estudaram-se os nanofluidos de 0.1% de fração volúmica de grafeno em vários fluidos base, como água destilada, soro fisiológico, glicerina e etilenoglicol.

Estudaram-se, também, nanofluidos com uma fração volúmica de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5% e 0.75% de grafeno em etilenoglicol. Estes nanofluidos foram submetidos a ultrassons para homogeneizar. Fez-se um estudo prévio sobre o tempo ideal ao qual as amostras deveriam estar submetidas aos ultrassons, recorrendo para tal à espectroscopia ótica. Estudou-se a estabilidade do nanofluido utilizando o método de observação por sedimentação, espectroscopia ótica e pH. Foi, também, feito o estudo da viscosidade cinemática e dinâmica em função da temperatura, para as temperaturas de 20, 30, 40, 50, e 60 °C. Foram determinadas as massas volúmicas destes nanofluidos para a mesma gama de temperaturas. Foi ainda estudada a condutividade elétrica para a amostra de nanofluido de 0.1% de fração volúmica de grafeno em soro fisiológico em função da temperatura.

Relativamente à viscosidade dinâmica e cinemática verificou-se que estas diminuem com o aumento da temperatura e aumentam com o aumento da concentração de nanopartículas de grafeno no fluido base. Do mesmo modo, verificou-se que a massa volúmica diminui com o aumento da temperatura. Por fim, verificou-se que a condutividade elétrica teve um aumento exponencial com o aumento da temperatura.

Finalizando, compararam-se os valores experimentais da viscosidade obtidos em função da fração volúmica das nanopartículas com vários modelos teóricos, como o modelo de Einstein, Brinkman, Wang, Batchelor, De Bruijin, Vand e Maiga. Verificando-se que os modelos que mais se aproximam dos valores experimentais são os modelos de Batchelor e Vand.

**Palavras-chave:** Nanofluido, Grafeno, Água Destilada, Soro Fisiológico, Glicerina, Etilenoglicol, Espectroscopia Ótica, Estabilidade, pH, Condutividade Elétrica, Viscosidade e Densidade.



## **Abstract**

Graphene nanofluids have come to be the targets of study, since they exhibit several properties that make them applicable in several areas. Initially, a bibliographical search was conducted on the aimed nanofluids, their vast field of application possibilities and, particularly, applications in the area of medicine, of interest in the context of the master's degree in Biomedical Engineering.

In this work, graphene nanofluids with 0.1% volume fraction were studied in various base fluids, such as distilled water, saline solution, glycerine, and ethylene glycol. Furthermore, nanofluids of 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5% and 0.75% graphene in ethylene glycol were also studied. These nanofluids were subjected to ultrasounds to homogenize. A prior study was conducted on the ideal time to which the samples should be subjected to the ultrasounds, resorting to optical spectroscopy to do so. In order to study the nanofluids' stability, the methods of observation by sedimentation, optical spectroscopy and pH were used. A study was also done on kinematic and dynamic viscosity as a function of temperature, for the temperature of 20, 30, 40, 50, and 60 °C. The density of these nanofluids was determined for this same range of temperatures. In addition to that, the electrical conductivity for the 0.1% volume fraction of graphene in saline solution sample was also studied in function of the temperature.

Regarding the dynamic and kinematic viscosity, it was observed that they decrease with the increase in temperature and increase with increasing concentration of nanoparticles in the base fluid.

Similarly, it was found that the density decreases with the increase in temperature.

Finally, it could be observed that the electrical conductivity had an exponential increase with the increase in temperature.

In the end, the experimental results of viscosity obtained in function of the volume fraction of the nanoparticles were compared with several theoretical models, such as the Einstein, Brinkman, Wang, Batchelor, De Bruijn, Vand and Maiga model. Being the ones that better fit the experimental values, the Batchelor and Vand model.

**Key words:** Nanofluid, Graphene, Distilled Water, Saline Solution, Glycerine, Ethylene Glycol, Optical Spectroscopy, Stability, pH, Electrical Conductivity, Viscosity and Density.



# Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
1.1. Motivação e Objetivos .....	3
1.2. Estrutura .....	4
<b>2. Nanofluidos .....</b>	<b>7</b>
2.1. Introdução .....	7
2.2. Viscosidade dos Nanofluidos.....	9
2.3. Aplicações de Nanofluidos .....	11
2.4. Grafeno.....	13
2.4.1. Propriedades do grafeno .....	14
2.4.2. Aplicações do grafeno .....	15
2.4.2.1. Biossensores .....	15
2.4.2.2. Bioimagem.....	16
2.4.2.3. Transporte de medicamentos .....	17
2.4.2.4. Efeitos antibacterianos .....	17
2.4.2.1. Outras aplicações .....	17
<b>3. Fundamentos Teóricos .....</b>	<b>21</b>
3.1. Viscosidade .....	21
3.2. Variação da viscosidade com a temperatura.....	22
3.1. Medição da viscosidade .....	23
3.2. Modelos teóricos da viscosidade.....	24
3.3. Densidade .....	26
3.4. Condutividade Elétrica.....	26
<b>4. Metodologias e Técnicas Experimentais.....</b>	<b>31</b>
4.1. Métodos de Preparação de Nanofluidos.....	31
4.2. Estabilidade de um Nanofluido .....	32
4.2.1. Sedimentação .....	33
4.2.2. Espectroscopia ótica .....	34
4.2.3. pH .....	35
4.3. Preparação do nanofluido.....	36

4.4.	<b> Materiais e Reagentes .....</b>	<b>37</b>
4.4.1.	<b>Água destilada (H<sub>2</sub>O) .....</b>	<b>38</b>
4.4.2.	<b>Soro fisiológico (H<sub>2</sub>O + NaCl 0.90%) .....</b>	<b>38</b>
4.4.3.	<b>Glicerina (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) .....</b>	<b>39</b>
4.4.4.	<b>Etilenoglicol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) .....</b>	<b>40</b>
4.5.	<b> Densidade .....</b>	<b>40</b>
4.6.	<b> Viscosidade .....</b>	<b>42</b>
4.6.1.	<b>Viscosímetro .....</b>	<b>42</b>
4.6.2.	<b>Calibração .....</b>	<b>43</b>
4.6.3.	<b>Viscosidade Cinemática .....</b>	<b>44</b>
4.6.4.	<b>Viscosidade Dinâmica .....</b>	<b>45</b>
4.7.	<b> Condutividade Elétrica .....</b>	<b>45</b>
5.	<b> <i>Análise de Resultados</i> .....</b>	<b>49</b>
5.1.	<b> Estabilidade.....</b>	<b>49</b>
5.1.1.	<b>Sedimentação .....</b>	<b>49</b>
5.1.2.	<b>Espectroscopia ótica .....</b>	<b>52</b>
5.1.2.1.	<b>Nanofluido de grafeno em água destilada .....</b>	<b>52</b>
5.1.2.2.	<b>Nanofluido de grafeno em soro fisiológico .....</b>	<b>53</b>
5.1.2.3.	<b>Nanofluido de grafeno em glicerina .....</b>	<b>54</b>
5.1.2.4.	<b>Nanofluidos de grafeno em etilenoglicol .....</b>	<b>55</b>
5.1.3.	<b>pH .....</b>	<b>60</b>
5.2.	<b> Viscosidade e densidade dos fluidos base.....</b>	<b>61</b>
5.3.	<b> Viscosidade e densidade dos nanofluidos de 0,1% grafeno .....</b>	<b>69</b>
5.4.	<b> Viscosidade e densidade dos nanofluidos de grafeno e etilenoglicol .....</b>	<b>78</b>
5.5.	<b> Condutividade Elétrica.....</b>	<b>83</b>
6.	<b> <i>Análise do Modelo da Viscosidade Dinâmica</i> .....</b>	<b>86</b>
7.	<b> <i>Conclusões</i> .....</b>	<b>98</b>
8.	<b> <i>Referências</i> .....</b>	<b>101</b>
	<b> <i>Anexos</i> .....</b>	<b>105</b>
	<b> <i>Anexo A – Dados relativos à calibração do viscosímetro 75 (nº 6950) com água destilada</i> .....</b>	<b>105</b>

<i>Anexo B – Dados relativos à calibração do viscosímetro 100 (nº 7246) com água destilada.....</i>	<i>106</i>
<i>Anexo C – Dados relativos à calibração do viscosímetro 200 (nº 182) com água destilada .....</i>	<i>106</i>
<i>Anexo D – Dados relativos à calibração do viscosímetro 200 (nº 183) com água destilada .....</i>	<i>108</i>
<i>Anexo E – Exemplo do cálculo da incerteza da viscosidade cinemática .....</i>	<i>109</i>
<i>Anexo F – Exemplo do cálculo da incerteza da densidade.....</i>	<i>112</i>



## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Diagrama esquemático das aplicações tecnológicas mais proeminentes dos nanofluidos[2].....	3
Figura 2.1 - Impacto das nanopartículas na medicina, com capacidade de combinar diagnóstico e terapia, os chamados nanoteranósticos [2]. .....	7
Figura 2.2 - Estruturas de nanopartículas à base de carbono (a) fulerenos, (b) grafeno, (c) nanotubos de carbono, (d) nanofibras de carbono e (e) carbono negro [6]. .....	8
Figura 2.3 - Estruturas de algumas nanopartículas orgânicas (a) dendrímeros, (b) lipossomas, (c) micelas [6]. .....	8
Figura 2.4 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica de nanopartículas em diferentes temperaturas [14]. .....	10
Figura 2.5 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura, em diferentes frações volúmicas de nanopartículas [14]. .....	11
Figura 2.6 - Aplicação dos nanofluidos [15]. .....	12
Figura 2.7 - Estrutura atômica do grafeno. ....	13
Figura 2.8 – Fulerenos, formados pela ligação das extremidades das folhas sobre a forma esférica; Nanotubos, de parede única; Grafite, quando empilhado e unido por ligações de <i>Van der Waals</i> [18]. .....	14
Figura 2.9 - Visão geral de várias aplicações médicas do grafeno [20]. .....	15
Figura 2.10 - Exemplo de um sensor de grafeno [22]. .....	16
Figura 3.1 - Representação da ação de cisalhamento num fluido. ....	21
Figura 4.1 - O método de preparação de nanofluidos em duas etapas. ....	32
Figura 4.2 - Sedimentação de um nanofluido em função do tempo. ....	33
Figura 4.3 – Espectrofotómetro. ....	35
Figura 4.4 - Medidor de pH. ....	35
Figura 4.5 - Estrutura molecular da água. ....	38
Figura 4.6 - Estrutura molecular da glicerina. ....	39
Figura 4.7 - Estrutura molecular do Etilenoglicol. ....	40
Figura 4.8 - Picnómetro. ....	41
Figura 4.9 - Banho térmico. ....	42
Figura 4. - Viscosímetro de <i>Cannon-Fenske</i> e os seus principais componentes: (1) tubo de aspiração, (2) tubo de ventilação, (3) reservatório, (4) esfera pré-escoamento, (5) traço de referência superior, (6) esfera de medição, (7) traço de referência inferior e (8) capilar. ....	43

Figura 4.11 - Montagem experimental utilizada para a calibração do viscosímetro de Cannon-Fenske. ....	44
Figura 4.12- Medidor da condutividade elétrica. ....	45
Figura 5.1 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.1% grafeno em etilenoglicol a 0h, 3h, 6h e 9h, respetivamente. ....	49
Figura 5.2 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.1% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respetivamente. ....	50
Figura 5.3 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.2% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48, 72h, respetivamente. ....	50
Figura 5.4 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.3% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respetivamente. ....	50
Figura 5.5 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.5% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respetivamente. ....	51
Figura 5.6 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.75% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respetivamente. ....	51
Figura 5.7 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada para diferentes tempos de sonicação. ....	53
Figura 5.8 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico para diferentes tempos de sonicação. ....	54
Figura 5.9 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina para diferentes tempos de sonicação. ....	55
Figura 5.10 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação. ....	56
Figura 5.11 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.2% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação. ....	57
Figura 5.12 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.3% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação. ....	58
Figura 5.13 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.5% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação. ....	59
Figura 5.14 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.75% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação. ....	60
Figura 5.15 - Valores de pH do nanofluido de 0.1% em água destilada em função do tempo de sonicação a 25 °C. ....	61

Figura 5.16 - Comportamento da viscosidade cinemática da água destilada com a variação da temperatura. ....	62
Figura 5.17 - Comportamento da massa volúmica da água destilada com a variação da temperatura. ....	63
Figura 5.18 - Comportamento da viscosidade dinâmica da água destilada com a variação da temperatura. ....	63
Figura 5.19 - Comportamento da viscosidade cinemática do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	64
Figura 5.20 - Comportamento da massa volúmica do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	65
Figura 5.21 - Comportamento da viscosidade dinâmica do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	65
Figura 5.22 - Comportamento da viscosidade cinemática da glicerina com a variação da temperatura. ....	66
Figura 5.23 - Comportamento da massa volúmica da glicerina com a variação da temperatura. ....	67
Figura 5.24 - Comportamento da viscosidade dinâmica da glicerina com a variação da temperatura. ....	67
Figura 5.25 - Comportamento da viscosidade cinemática do etilenoglicol com a variação da temperatura. ....	68
Figura 5.26 - Comportamento da massa volúmica do etilenoglicol com a variação da temperatura. ....	69
Figura 5.27 - Comportamento da viscosidade dinâmica do etilenoglicol com a variação da temperatura. ....	69
Figura 5.28 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada e da água destilada com a variação da temperatura. ....	70
Figura 5.29- Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada e da água destilada com a variação da temperatura. ....	71
Figura 5.30 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada e da água destilada com a variação da temperatura. ....	71
Figura 5.31 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de Grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	72
Figura 5.32 - Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	73

Figura 5.33 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	73
Figura 5.34 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina com a variação da temperatura. ....	74
Figura 5.35 - Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina com a variação da temperatura. ....	75
Figura 5.36 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina com a variação da temperatura. ....	75
Figura 5.37 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e do etilenoglicol com a variação da temperatura. ....	76
Figura 5.38 - Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e do etilenoglicol com a variação da temperatura. ....	77
Figura 5.39 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e do etilenoglicol com a variação da temperatura. ....	77
Figura 5.40 - Comportamento da viscosidade cinemática em função da temperatura para nanofluidos de diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol. ....	80
Figura 5.41 - Comportamento da massa volúmica em função da temperatura para nanofluidos de diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol. ....	81
Figura 5.42 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura para nanofluidos de diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol. ....	81
Figura 5.43 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica de grafeno em etilenoglicol para todas as temperaturas estudadas. ....	82
Figura 5.44 - Comportamento da condutividade elétrica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura. ....	83
Figura 6.1 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Einstein. ....	86
Figura 6.2 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Brinkman. ....	87
Figura 6.3 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Wang. ....	88
Figura 6.4 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Batchelor. ....	88
Figura 6.5 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de De Bruijin. ....	89

Figura 6.6 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Vand. ....	90
Figura 6.7 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Maiga. ....	91
Figura 6.8 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 293.15K. ....	91
Figura 6.9 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 303.15K. ....	92
Figura 6.10 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 313.15K. ....	92
Figura 6.11 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 323.15K. ....	93
Figura 6.12 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 333.15K. ....	93
Figura 6.13 - Comparação dos modelos de Batchelor e Vand com os valores experimentais para a temperatura de 293.15K. ....	94
Figura 6.14 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas por correlação de valores. ....	95



## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Lista de modelos teóricos da viscosidade estudados. ....	25
Tabela 4.1 - Cálculos prévios para a preparação dos nanofluidos de 0.1% de grafeno nos vários fluidos bases estudados. ....	36
Tabela 4.2 - Cálculos prévios para a preparação dos nanofluidos de grafeno em etilenoglicol para várias frações volúmicas. ....	37
Tabela 4.3 - Especificações das nanoplaquetas de grafeno. ....	37
Tabela 4.4 - Especificações do fluido base água destilada. ....	38
Tabela 4.5 - Especificações do fluido base soro fisiológico. ....	39
Tabela 4.6 - Especificações do fluido base glicerina. ....	39
Tabela 4.7 - Especificações do fluido base etilenoglicol. ....	40
Tabela 5.1 - Resumo do tempo de estabilidade para todos os nanofluidos produzidos com etilenoglicol. ....	52
Tabela 5.2 - Valores tabelados da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica da água destilada [40]. ....	62
Tabela 5.3 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do soro fisiológico e respectivas incertezas associadas. ....	64
Tabela 5.4 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica da glicerina e respectivas incertezas associadas. ....	66
Tabela 5.5 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	68
Tabela 5.6 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada, e respectivas incertezas associadas. ....	70
Tabela 5.7 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e respectivas incertezas associadas. ....	72
Tabela 5.8 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina, e respectivas incertezas associadas. ....	74
Tabela 5.9 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	76

Tabela 5.10 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	78
Tabela 5.11 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.2% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	78
Tabela 5.12 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.3% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	79
Tabela 5.13 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.5% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	79
Tabela 5.14 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.75% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas. ....	79
Tabela 5.15 - Valores experimentais da viscosidade dinâmica para todas frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol. ....	82
Tabela 6.1 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Einstein. ....	86
Tabela 6.2 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Brinkman. ....	87
Tabela 6.3 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Wang. ....	87
Tabela 6.4 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Batchelor. ....	88
Tabela 6.5 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de De Bruijin. ....	89
Tabela 6.6 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Vand. ....	90
Tabela 6.7 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Maiga. ....	90
Tabela 6.8 - Erros relativos entre os modelos teóricos e os valores experimentais para a temperatura de 293.15K. ....	94

## Lista de Abreviaturas

- SI - Sistema internacional de unidades
- IAPWS - *International Association for the Properties of Water and Steam*
- CIETI - Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial
- pH - Escala adimensional que mede a acidez ou basicidade de uma solução
- DNA - Ácido desoxirribonucleico
- UV - Ultravioleta
- 0D - Adimensional
- 1D - Unidimensional
- 2D - Bidimensional
- 3D - Tridimensional
- F - Força
- $\tau$  - Tensão de cisalhamento
- A - Área de superfície
- $\partial y$  - Taxa de deformação
- $\nu$  - Viscosidade cinemática
- $\nu_{nf}$  - Viscosidade cinemática do nanofluido
- $\nu_{fb}$  - Viscosidade cinemática do fluido base
- $\eta$  - Viscosidade dinâmica
- $\eta_{nf}$  - Viscosidade dinâmica do nanofluido
- $\eta_{fb}$  - Viscosidade dinâmica do fluido base
- $\rho$  - Massa volúmica
- $\rho_{nf}$  - Massa volúmica do nanofluido
- $\rho_{fb}$  - Massa volúmica do fluido base
- R - Constante universal dos gases
- $\Delta P$  - Variação da pressão
- L - Comprimento
- R - Raio
- g - Força da ação gravítica
- g' - Aceleração do lugar da calibração
- $\Delta t_h$  - Correção da energia cinética
- T - Tempo

- $\phi$  - Fração volúmica  
m - Massa  
 $m_{np}$  - Massa da nanopartícula  
 $m_0$  - Massa do picnómetro vazio  
 $M_{np}$  - Massa molar da nanopartícula  
V - Volume  
 $V_{nf}$  - Volume do nanofluido  
 $V_{fb}$  - Volume do fluido base  
I - Intensidade da corrente elétrica  
J - Densidade da corrente elétrica  
 $\vec{n}$  - Vetor normal à superfície  
CAS - *Chemical Abstracts Service*  
H<sub>2</sub>O - Água  
NaCl - Cloreto de Sódio  
C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> - Glicerina  
EG - Etilenoglicol

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO



## 1. Introdução

Esta dissertação é resultado do trabalho realizado no âmbito do Mestrado de Engenharia Biomédica, 2º ano, no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

O desenvolvimento deste projeto decorreu em parceria entre o Departamento de Física e o grupo de investigação do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial (CIETI) no Núcleo de Biomateriais e Nanotecnologias (NBIN).

### 1.1. Motivação e Objetivos

O grafeno é um material que tem sido alvo de estudos a nível mundial, por parte de autores em diversas áreas, uma vez que apresenta características únicas para serem aplicáveis em vários campos. A junção de nanopartículas deste material com um fluido, forma um nanofluido com características bastante interessantes e promissoras que podem ser aplicáveis em diversos ramos[1], [2], como se pode observar na figura 1.1.



Figura 1.1 - Diagrama esquemático das aplicações tecnológicas mais proeminentes dos nanofluidos[2].

Para que a utilização do nanofluido seja viável, este tem de ter alguma estabilidade ao longo do tempo, que é um dos objetivos que nós propomos com este trabalho.

Para além do estudo teórico e da análise de modelos que poderiam descrever o comportamento dos nanofluidos, serão produzidos nanofluidos de grafeno com vários fluidos base, de forma a observar a sua estabilidade, com o objetivo de se perceber quais os fatores a ter em conta para cada base. Serão também preparados nanofluidos com várias concentrações de grafeno para o mesmo fluido base, neste caso, etilenoglicol.

Com este trabalho, pretende-se investigar e relatar algumas das propriedades destes nanofluidos, entre elas a massa volúmica, a viscosidade cinemática e dinâmica, e comparar com modelos teóricos existentes na bibliografia, com o intuito de avaliar o seu comportamento. Será realizado o estudo da estabilidade destes nanofluidos para poder estudar as propriedades físicas sem perder a qualidade do nanofluido.

## **1.2. Estrutura**

De forma a organizar e possibilitar uma sequenciação lógica dos diversos tópicos, este trabalho foi estruturado em sete capítulos. No primeiro capítulo, é apresentada uma breve contextualização do trabalho desenvolvido e a forma como o documento está organizado. No segundo capítulo, consta uma pesquisa bibliográfica aos principais conceitos do projeto desenvolvido. No terceiro capítulo, estão apresentados os fundamentos teóricos relativos aos trabalhos experimentais executados. O quarto capítulo contém as metodologias e técnicas utilizadas, bem como os materiais necessários à sua concretização e os respetivos procedimentos. O quinto capítulo apresenta os dados experimentais obtidos e a sua interpretação e análise detalhada. O sexto capítulo apresenta uma análise dos resultados face a modelos teóricos. Por fim, no sétimo capítulo, constam as conclusões de todo o trabalho desenvolvido, bem como propostas para trabalhos futuros. A presente dissertação termina com a apresentação das referências e anexos mencionados ao longo de todo este trabalho.

## CAPÍTULO 2 – NANOFUIDOS



## 2. Nanofluidos

### 2.1. Introdução

Recentemente, suspensões de várias nanopartículas ou nanocompósitos alcançaram um amplo campo de aplicação em trabalhos de pesquisa biomédica em algumas condições específicas e ensaios clínicos. Estas suspensões, que permitem que as nanopartículas se dispersem e atuem em meios homogêneos e estáveis, são denominadas de nanofluidos. Vários estudos introduziram as vantagens dos nanofluidos em abordagens biomédicas em diferentes áreas[2]. Alguns exemplos das principais aplicações biomédicas de nanofluidos é nos sistemas de libertação de drogas, imagens e atividades antibacterianas. Também é representado na figura 2.1, a combinação possível entre o diagnóstico e a terapia com o uso das nanopartículas. Outros exemplos, é a aplicação de sistemas de nanofluidos magnéticos na entrega de drogas direcionadas, no tratamento por hipertermia e no diagnóstico diferencial.

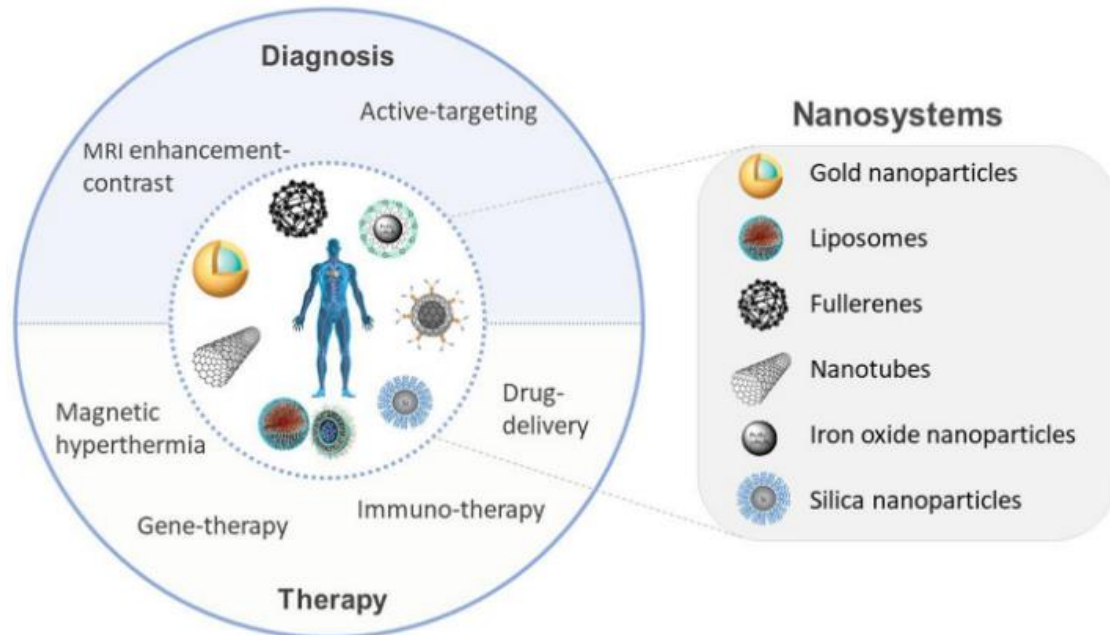


Figura 2.1 - Impacto das nanopartículas na medicina, com capacidade de combinar diagnóstico e terapia, os chamados nanoteranósticos [2].

Os nanofluidos são produzidos pela dispersão de nanopartículas num fluido que é conhecido como fluido de base. A dispersão das nanopartículas influencia as propriedades termofísicas, elétricas e mecânicas do fluido [3]. As nanopartículas são partículas entre 1 e 100 nanômetros de tamanho [4]. Estas podem ser compostos de carbono (Fig.2.2), metálicas, óxidos metálicos ou matéria orgânica, Fig.2.3.

Devido à presença das nanopartículas, os nanofluidos exibem propriedades físicas, químicas e biológicas únicas em comparação com os fluidos base que têm partículas em escalas maiores. Este fenómeno deve-se a terem uma área de superfície relativamente maior em relação ao volume[5].

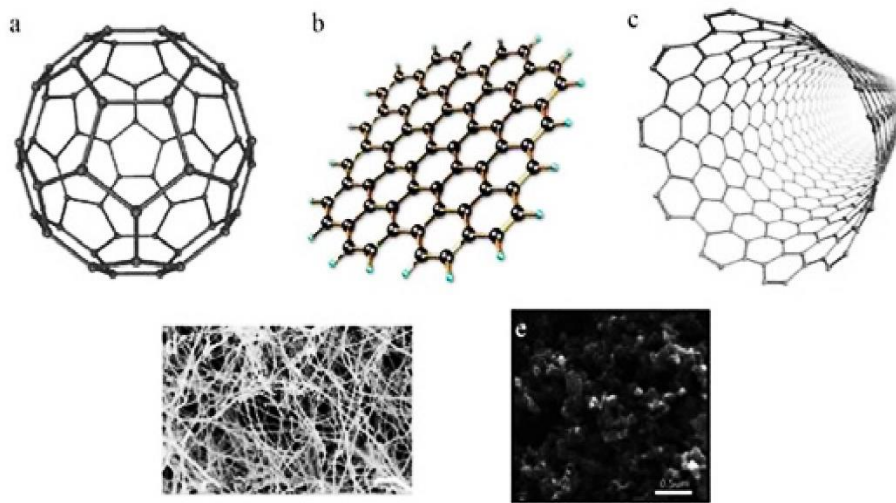


Figura 2.2 - Estruturas de nanopartículas à base de carbono (a) fulerenos, (b) grafeno, (c) nanotubos de carbono, (d) nanofibras de carbono e (e) carbono negro [6].

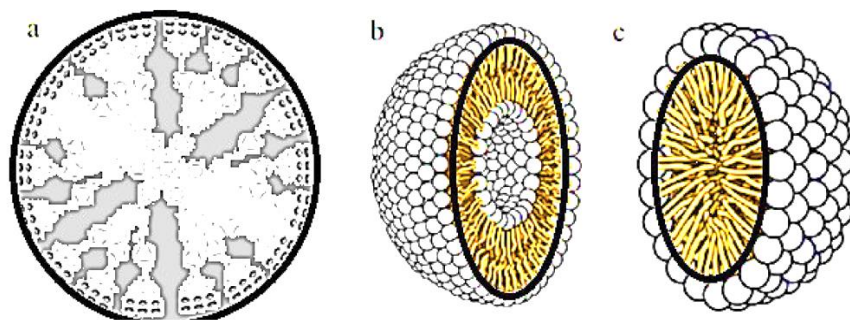


Figura 2.3 - Estruturas de algumas nanopartículas orgânicas (a) dendrímeros, (b) lipossomas, (c) micelas [6].

As nanopartículas têm diferentes dimensões, formas, tamanhos e materiais [7]. Uma nanopartícula pode ser de dimensão zero, onde o comprimento, largura e altura são

fixados num único ponto, unidimensional. Pode ser bidimensional, ou seja, tem comprimento e largura. E pode ainda ser tridimensional onde tem todos os parâmetros como comprimento, largura e altura.

As nanopartículas podem ser esféricas, cilíndricas, tubulares ou irregulares. A sua superfície pode ser uniforme ou irregular com variações de superfície. Nanopartículas podem ser cristalinas ou amorfas, podendo conter sólidos, os quais podem ser monocristalinos ou multicristais (soltos ou aglomerados) [8].

Choi e Eastman [9] foram os primeiros a nomear esta dispersão de nanopartículas num fluido base como nanofluido. Há mais de um século, Maxwell [10] foi o primeiro a estudar a suspensão de partículas microescala em fluidos, embora não tenha obtido resultados satisfatórios para a indústria. A introdução de partículas da ordem do nano, proporcionou uma nova área de investigação, a qual a comunidade científica dedicou a sua atenção. Mais especificamente, o estudo de dispersões coloidais em fluidos devido às alterações obtidas nas propriedades físicas destes.

Dentro das várias propriedades termofísicas de um fluido, a viscosidade e a condutividade térmica têm o papel mais significativo no comportamento da transferência de calor [11]. Uma maior condutividade térmica tem efeito favorável na transferência de calor por convecção de fluidos, enquanto que o aumento na viscosidade piora a transferência de calor por convecção.

Uma vez que a razão entre a superfície e o volume das nanopartículas é muito maior em comparação com as micropartículas, a condutividade térmica dos nanofluidos também é maior em comparação com os microfluidos ou fluidos puros [12]. A maior condutividade térmica dos nanofluidos torna-os apropriados para aplicações de transferência de calor [13]. Vários fatores influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos, como a temperatura do nanofluido, a concentração da fase sólida, o tamanho das nanopartículas, e a forma das nanopartículas. Vários estudos têm sido conduzidos com o objetivo de investigar os parâmetros efetivos na condutividade térmica de nanofluidos.

## **2.2. Viscosidade dos Nanofluidos**

Nas últimas décadas, existe uma grande dedicação por parte da comunidade científica no estudo das propriedades dos nanofluidos.

Uma das propriedades físicas relevante para o estudo do comportamento dos nanofluidos é a viscosidade e a sua variação com a temperatura e com a fração volúmica das

nanopartículas no fluido base. A Fig. 2.4 apresenta um exemplo, para nanofluidos de sílica em etilenoglicol, da viscosidade dinâmica do nanofluido em função da fração volúmica de sílica para diferentes temperaturas. Observa-se que a viscosidade do nanofluido aumenta com o aumento da fração volúmica de sílica em todas as temperaturas, tendo estas um comportamento semelhante entre si [14].

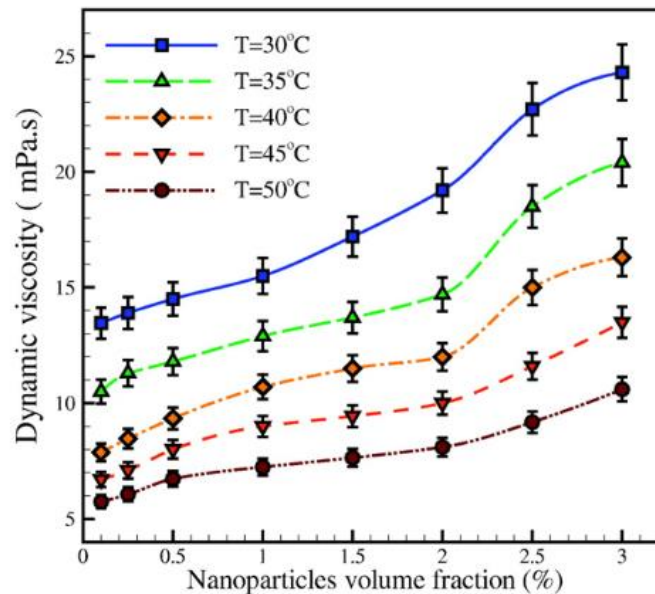


Figura 2.4 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica de nanopartículas em diferentes temperaturas [14].

A Fig.2.5 ilustra o comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido com diferentes frações volúmicas de sílica em função da temperatura. Verifica-se que a viscosidade dinâmica diminui com o aumento da temperatura. A razão pode estar relacionada ao facto de que para temperaturas mais altas, a energia das moléculas e a distância intermolecular tornam-se maiores, resultando numa menor interação entre as moléculas. Com o aumento do número de nanopartículas no etilenoglicol, pode ocorrer aglomeração de nanopartículas [14].

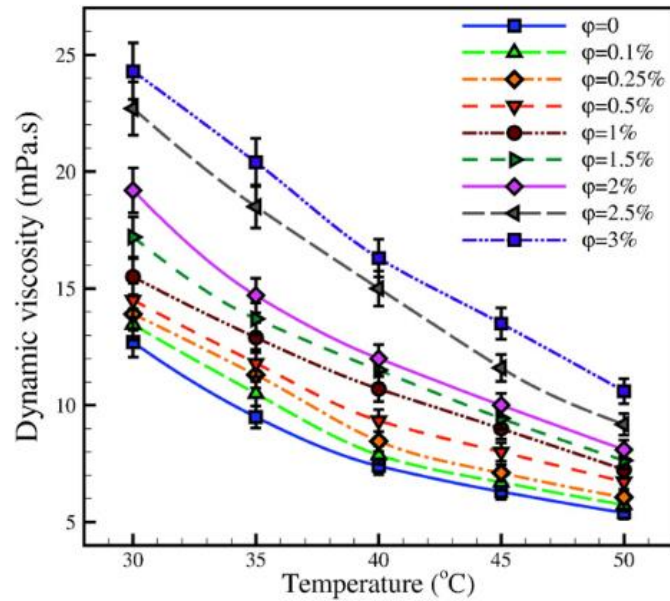


Figura 2.5 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura, em diferentes frações volúmicas de nanopartículas [14].

### 2.3. Aplicações de Nanofluidos

Com o avanço da tecnologia e do estudo na área dos nanofluidos, estes são cada vez mais utilizados em inúmeras áreas, desde cosméticos a áreas de medicina, tanto diagnóstico como terapia, como está descrito na Fig.2.6 [15]. Os nanofluidos são tão utilizados devido às inúmeras características únicas, que são fundamentais para várias aplicações na engenharia, como:

- Capacidade de transferir calor ultrarrápido;
- Elevada condutividade térmica;
- Melhor estabilidade em relação aos coloides;
- Superior qualidade de lubrificação;
- Coeficiente de atrito reduzido;
- Diminuição da erosão e do entupimento dos microcanais.

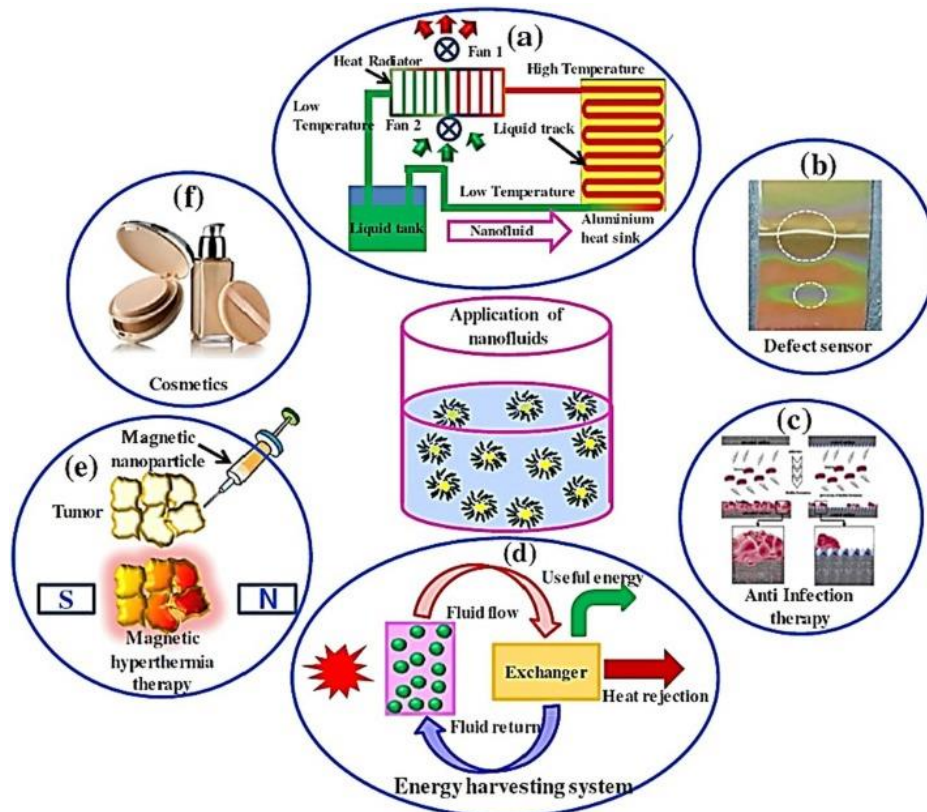


Figura 2.6 - Aplicação dos nanofluidos [15].

Em particular na área da medicina, vários estudos e aplicações têm sido desenvolvidos que fazem uso das propriedades do nanomaterial e do nanofluido, para desenvolver ou melhorar técnicas e aplicações medicinais.

Uma das aplicações na medicina, é o controlo de infeções bacterianas, pois as nanopartículas são uma alternativa altamente promissora e que poderá ser utilizada através de diversos mecanismos de combate. As nanopartículas podem também ser utilizadas como mecanismos de melhoria de terapias tradicionais com antibióticos. Ou então, auxiliar numa terapia dirigida.

O principal objetivo da terapia dirigida é a entrega de doses de fármacos com elevada especificidade a um local, tecido ou tipo de células. Neste contexto, as nanopartículas podem servir de agentes transportadores do fármaco. A utilização de nanopartículas de óxido de ferro supermagnéticas para tratamentos de quimioterapia, permite a administração de doses baixas e muito localizadas na zona da lesão. O fármaco é administrado num vaso próximo da lesão e é guiado através da aplicação de um campo magnético na zona da lesão (através de íman), retendo nesse local a dose e evitando a proliferação para zonas de tecido saudável [16].

Ainda há muito a ser estudado sobre este tipo de fluidos, uma vez que têm características bastante atraentes para as mais variadas aplicações. Contudo, isto exige algumas condições como estabilidade, uniformidade e durabilidade.

## 2.4. Grafeno

O grafeno é um composto de carbono que existe como uma folha planar bidimensional. Tecnicamente é um não metal, mas é muitas vezes referido como um quase-metal, devido às suas propriedades serem semelhantes às de um semicondutor. Como tal, possui muitas propriedades únicas que não se encontram em outros materiais não metálicos [17]. Cada átomo de carbono possui uma ligação covalente a três outros átomos de carbono em uma matriz hexagonal, deixando um elétron livre por cada átomo de carbono, como está representado na Fig. 2.7.

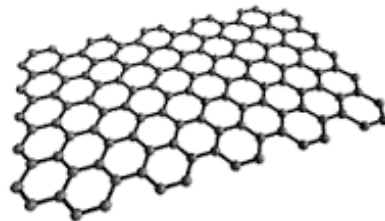


Figura 2.7 - Estrutura atômica do grafeno.

Apesar da sua bidimensionalidade, o grafeno funciona como bloco base para os outros alótropos de carbono com outras dimensões, como exemplificado na Fig. 2.8.

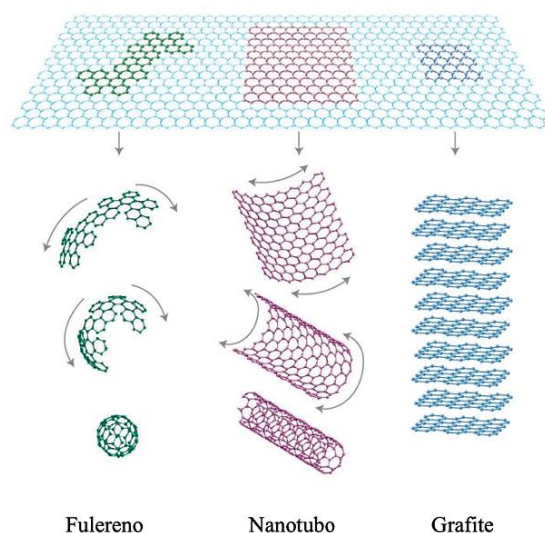


Figura 2.8 – Fullerenos, formados pela ligação das extremidades das folhas sobre a forma esférica; Nanotubos, de parede única; Grafite, quando empilhado e unido por ligações de *Van der Waals*[18].

### 2.4.1. Propriedades do grafeno

Uma das propriedades mais importantes do grafeno é que os portadores de carga se comportam como partículas relativistas sem massa<sup>(1)</sup>. O grafeno é um semimetal 2D de intervalo zero com uma pequena sobreposição entre as bandas de valência e condução, e os portadores de carga movem-se com pouca dispersão em condições ambientais [17].

A estrutura repetitiva do grafeno torna-o um material ideal para conduzir calor no plano. O grafeno pode exibir dois tipos de condutividade térmica no plano e entre planos. A condutividade no plano de uma folha de camada única é de 3000-5000 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, mas a condutividade entre planos pode ser tão baixa quanto 6 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>[19].

Referente às propriedades mecânicas, elasticidade e flexibilidade, o grafeno é um dos materiais mais fortes já descobertos, com uma resistência à tração de 1.3 x 10<sup>11</sup>Pa. Além de ter uma resistência incomparável, também é muito leve (0.77 mg m<sup>-2</sup>). A elevada resistência mecânica do grafeno pode aumentar significativamente a resistência noutros materiais compósitos, quando neles aplicado [17].

As moléculas de grafeno apresentam flexibilidade, pois há rotação em torno de algumas das ligações. Apresenta também rigidez e estabilidade suficientes para que a molécula possa suportar mudanças na sua forma. Esta é uma propriedade muito desejável, pois não

<sup>1</sup> Fermiões de Dirac

há muitas moléculas que possam ser flexíveis e de suporte ao mesmo tempo. Em termos de elasticidade, o grafeno tem uma constante elástica entre  $1\text{-}5\text{ N m}^{-1}$ , com módulo de Young de  $5\text{ GPa}$  [17].

### 2.4.2. Aplicações do grafeno

Hoje em dia, já existem muitas aplicações do grafeno. Este veio substituir os materiais convencionais, assim como proporcionar novas aplicações que antes não eram possíveis. As aplicações do grafeno são realmente infinitas e muitas ainda não foram concebidas, como se pode ver na Fig. 2.9.

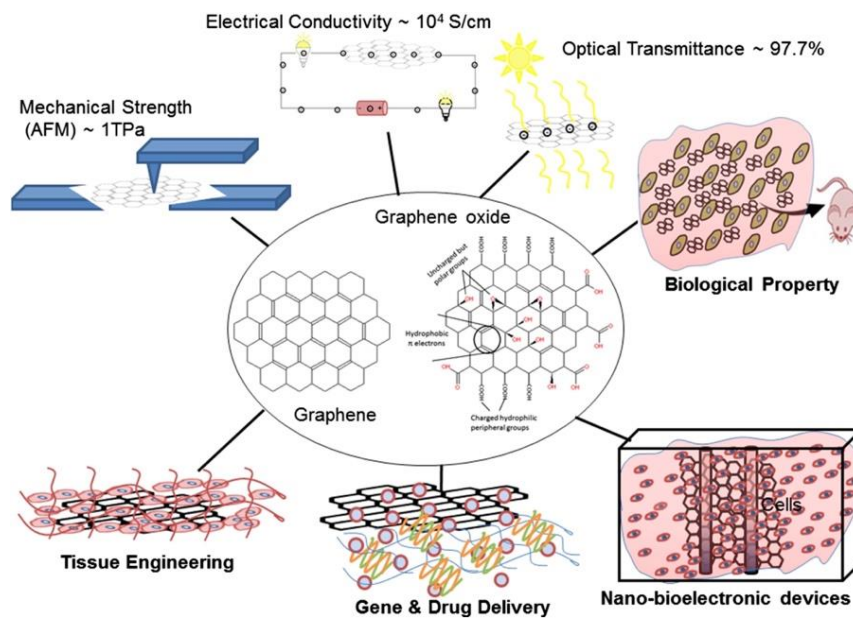


Figura 2.9 - Visão geral de várias aplicações médicas do grafeno [20].

#### 2.4.2.1. Biossensores

Uma das aplicações de grafeno são os biossensores, pois um biossensor ideal é capaz de detetar mudanças mínimas no ambiente envolvente, de modo a fazer o diagnóstico e terapia de doenças. Devido ao arranjo planar e consistente dos átomos numa folha de grafeno, cada átomo dentro da folha é exposto ao ambiente circundante. Isso permite que o grafeno detete efetivamente mudanças na sua vizinhança em dimensões micrométricas, proporcionando um alto grau de sensibilidade [21]. O grafeno também é capaz de detetar eventos individuais a nível molecular. Muitas das propriedades do grafeno são benéficas em aplicações de sensores; como tal, este pode ser usado em sensores em vários campos,

incluindo biossensores, sensores de diagnóstico, sensores de DNA e sensores de gás, como se pode ver na Fig. 2.10, um exemplo de um sensor de grafeno.

Os biossensores podem ser baseados em diferentes mecanismos de detecção, como sinalização ótica e eletroquímica, sendo esta última considerada um dos melhores métodos para a detecção de biomoléculas devido à alta sensibilidade, baixo custo e rápida resposta. Uma vez que o grafeno apresenta excelentes propriedades eletroquímicas, a sua utilização como elétrodo nesta área é promissora, melhorando assim a detecção de biomoléculas.

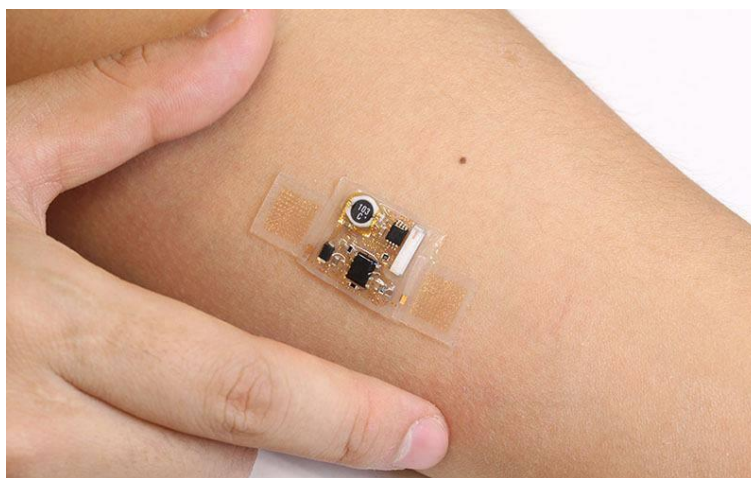


Figura 2.10 - Exemplo de um sensor de grafeno [22].

#### 2.4.2.2. Bioimagem

A imagem biomédica pode ser usada na monitorização de condições de saúde de componentes biológicos *in vivo* e *in vitro*, sendo importante para diagnóstico. Os materiais à base de grafeno têm sido estudados para este campo, devido à boa biocompatibilidade, absorção celular, propriedades óticas, e modificações químicas flexíveis. Estes materiais têm apresentado grande potencialidade na espectroscopia de fluorescência, uma vez que apresentam propriedades óticas notáveis. Na ressonância magnética, em conjunto com outras nanopartículas, o grafeno tem sido estudado para ser usado como agente de contraste, pois possui uma boa estabilidade fisiológica e baixa toxicidade [23].

### **2.4.2.3. Transporte de medicamentos**

A estrutura do grafeno, a sua alta área de superfície e a presença de oxigênio, torna o óxido de grafeno excelente para o transporte de medicamentos ou genes, uma vez que existe facilidade na conjugação com polímeros, biomoléculas, outras nanopartículas, entre outros, conferindo ao grafeno outras funcionalidades para diversas aplicações [23].

### **2.4.2.4. Efeitos antibacterianos**

A resistência aos antibióticos tornou-se recentemente um problema de saúde significativo no mundo, pois há um aumento na infecção hospitalar adquirida por patógenos multirresistentes [24]. No entanto, o uso excessivo de antibióticos tradicionais levou ao problema da resistência aos antibióticos. Nas últimas duas décadas, esforços foram feitos para inventar novos medicamentos para tratar patógenos multirresistentes, incluindo nanopartículas. Para superar a resistência aos antibióticos, muitos medicamentos antibacterianos foram desenvolvidos, como nanopartículas de metal e óxido de metal. Os nanomateriais à base de grafeno provaram ser antibacterianos devido às suas propriedades físico-químicas únicas [24].

### **2.4.2.1. Outras aplicações**

Outra aplicação é em baterias, pois quando incorporado aumenta a sua eficiência e melhora a taxa de ciclo de carga/descarga. A excelente condutividade elétrica, área de superfície do grafeno aumentam as propriedades benéficas presentes em muitos elétrodos tradicionais de base inorgânica [25].



## CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS



### 3. Fundamentos Teóricos

#### 3.1. Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade dos fluidos que caracteriza a sua resistência ao escoamento por ação de uma força deformadora, como está representado na Fig.3.1. A viscosidade é causada pelo atrito interno entre as moléculas do fluido e está dependente da temperatura do mesmo. Ou seja, quanto maior a viscosidade, menor será a velocidade com que o fluido se movimenta. Nos líquidos, o atrito interno origina-se das forças de atração entre moléculas relativamente próximas. Com o aumento da temperatura, a energia cinética média das moléculas torna-se maior e conseqüentemente o intervalo de tempo médio no qual as moléculas passam próximas umas das outras torna-se menor. Assim, as forças intermoleculares tornam-se menos efetivas e a viscosidade diminui com o aumento da temperatura.

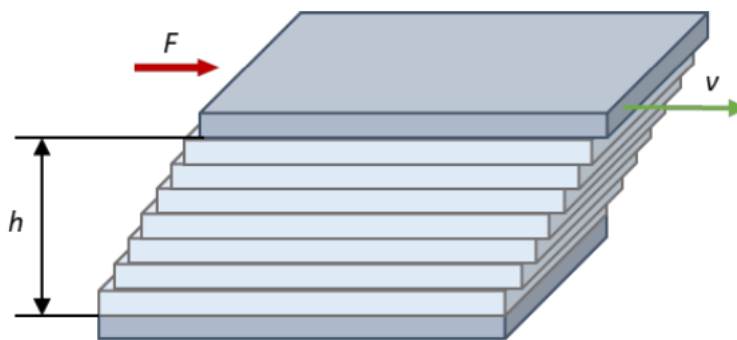


Figura 3.1 - Representação da ação de cisalhamento num fluido.

A aplicação da força,  $F$ , na camada  $a$  gera uma ação de cisalhamento e produz uma tensão de cisalhamento,  $\tau$ , aplicada ao elemento fluido. Sendo que a tensão de cisalhamento está dependente da área de superfície da força aplicada,  $A$ ,  $\tau = F/A$ . Para fluidos newtonianos, estas grandezas são diretamente proporcionais e a constante de proporcionalidade corresponde ao seu coeficiente de viscosidade dinâmica,  $\eta$ , Eq. 3.1.

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.1)$$

O coeficiente de viscosidade dinâmica,  $\eta$ , representa o parâmetro que reflete a existência de forças resistivas tangenciais nos líquidos em movimento. Ou seja, a viscosidade dinâmica é a relação entre a tensão de corte e taxa de deformação,  $\frac{\partial v}{\partial y}$ . No SI exprime-se

em Pascal segundo (Pa s) que corresponde a  $1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . No sistema cgs, a unidade é o poise<sup>(2)</sup> (P), que corresponde a  $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Usualmente, usa-se o centipoise (cP), onde a correspondência com o SI é de  $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa s}$  (milipascal segundo).

A viscosidade cinemática é, frequentemente, um parâmetro de interesse para o estudo de fluidos newtonianos, podendo ser determinada com o auxílio de viscosímetros capilares. Formalmente, o coeficiente de viscosidade cinemática,  $\nu$ , corresponde à razão entre o coeficiente de viscosidade dinâmica,  $\eta$ , e a massa volúmica do fluido,  $\rho$ , sob as mesmas condições de pressão e temperatura, Eq. 3.2.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.2)$$

No SI, o coeficiente de viscosidade cinemática expressa-se em  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ , porém, na realidade, a unidade mais utilizada para esta grandeza é o Stokes<sup>(3)</sup>, (S ou St) que corresponde a  $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , e os seus submúltiplos, como por exemplo, centistokes (cSt),  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ .

### 3.2. Variação da viscosidade com a temperatura

A viscosidade dos líquidos é altamente dependente da temperatura. O aumento na temperatura causa uma aparente redução nas forças intermoleculares devido ao aumento na velocidade individual de cada molécula. Como consequência, ocorre uma redução na viscosidade, mesmo havendo um aumento na transferência de momento por colisões. Existem diversos modelos empíricos que podem ser utilizados para ajustar a dependência da viscosidade com a temperatura, sendo que a maioria deles propõe uma dependência exponencial. Os mais utilizados seguem uma expressão semelhante à equação de *Arrhenius*, Eq. 3.3.

$$\eta(t) = \eta_0 e^{\frac{E}{RT}} \quad (3.3)$$

Onde  $\eta_0$  e  $E$  são coeficientes determinados com base em dados experimentais e  $R$  é a constante universal dos gases.

---

<sup>2</sup> O nome de *poise* para a unidade da viscosidade no sistema cgs é em homenagem a Jean-Léonard-Marie Poiseuille, matemático, que formulou a expressão para a variação do fluxo laminar de fluidos em tubos circulares.

<sup>3</sup> *Stokes*, nome em homenagem a George Gabriel Stokes, unidade no sistema cgs para a viscosidade cinemática.

### 3.1. Medição da viscosidade

A viscosidade de um fluido não pode ser medida diretamente, mas o seu valor pode ser determinado a partir de uma equação apropriada, relacionando-o a quantidades que são diretamente mensuráveis. Um aparelho adequado para as medições necessárias é conhecido como viscosímetro. Os viscosímetros, sendo equipamentos experimentais em que o fenómeno é descrito por equações matemáticas, é sempre necessário introduzir nas equações correções para ter em conta outros efeitos ou calibrar o instrumento com um fluido cuja viscosidade já é conhecida com precisão.

Alguns viscosímetros envolvem o fluxo laminar através de um tubo circular, utilizando a lei de *Poiseuille*. Para a determinação da viscosidade, no caso de viscosímetros capilares, aplica-se a Lei de *Hagen-Poiseuille*. Em condições estacionárias, a velocidade de escoamento num tubo capilar tubular de comprimento,  $L$ , e raio total,  $R$ , é determinada pela Eq. 3.4, onde  $\Delta P$  é a queda de pressão ao longo do escoamento.

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta L} (R^2 - r^2) \quad (3.4)$$

Considerando um capilar com área constante, pode-se reescrever a velocidade média como representado na Eq. 3.5.

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta P}{8\eta L} R^2 \quad (3.5)$$

Esta expressão é conhecida como Lei de *Hagen-Poiseuille* e pode ser usada para determinar a viscosidade num viscosímetro capilar, segundo a Eq. 3.6.

$$\eta = \frac{\Delta P}{8L \langle v \rangle} R^2 \quad (3.6)$$

O valor  $\Delta P$  pode ser determinado, no caso dos viscosímetros com o tubo capilar vertical, em que o canal de escoamento forma um ângulo de  $90^\circ$  com o plano horizontal, pela relação entre a queda de pressão do fluido e a diferença na altura do fluido (antes e depois do escoamento). Supondo que esta diferença seja  $h$ , a queda de pressão no fluido pode ser calculada pela Eq. 3.7.

$$\Delta P = \rho g h \quad (3.7)$$

Substituindo a expressão anterior na Eq. 3.6, obtemos a Eq. 3.8.

$$v = \frac{\eta}{\rho} = \frac{g h}{8L \langle v \rangle} R^2 \quad (3.8)$$

A velocidade média do fluido pode ser descrita como a distância que este percorre num determinado intervalo de tempo. Como o tempo de escoamento pode ser medido, pode-se relacionar com a distância percorrida,  $L$ . Desta forma, a viscosidade cinemática pode ser representada pela Eq. 3.9:

$$v = \frac{g h R^2}{8L^2} t \quad (3.9)$$

O termo  $\frac{g h R^2}{8L^2}$  só depende das características do viscosímetro, podendo ser substituído por uma constante  $C$ . Podendo assim, usar um fluido padrão para determinar tal constante. No caso da calibração não ser feita no mesmo lugar que as medições, ter-se-á de fazer correção da aceleração da gravidade, através da Eq. 3.10, onde  $g'$  é a aceleração do lugar onde foi feita a calibração.

$$v = C t \frac{g}{g'} \quad (3.10)$$

Para os casos em que a constante  $C$  dos viscosímetros capilares seja maior que  $0.1 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-2}$ , a correção de energia cinética (correção de “*Hagenbach*”) pode ser desprezada. Se for inferior a  $0.1 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-2}$ , a correção da energia cinética pode ser significativa se o tempo de fluxo mínimo de 200 s não for observado, Eq. 3.11, sendo  $\Delta t_h$  a correção da energia cinética (correção de “*Hagenbach*”).

$$v = C (t - \Delta t_h) \frac{g}{g'} \quad (3.11)$$

Para o caso particular do viscosímetro de *Cannon-Fenske*, a viscosidade cinemática é dada pelo produto da constante do viscosímetro,  $C$ , pelo tempo de escoamento do fluido em estudo,  $t$ , como está representado na Eq. 3.12. Caso o valor de  $t$  seja significativamente inferior a 200 segundos, pode surgir a necessidade de aplicar um termo de correção cinética,  $B$ , como referido anteriormente.

$$v = C (t - B) \quad (3.12)$$

### 3.2. Modelos teóricos da viscosidade

Como referido no capítulo anterior, a viscosidade é uma propriedade do fluido que caracteriza a sua resistência ao escoamento por ação de uma força deformadora e é altamente dependente da temperatura.

No sentido de conferir a tendência dos dados experimentais com algumas previsões teóricas previamente formuladas, decidiu-se efetuar uma comparação entre os valores experimentais de viscosidade dinâmica das diferentes amostras e a sua previsão teórica, baseada em modelos teóricos. Existem vários modelos clássicos que tentam prever a viscosidade em suspensões sólido-líquidas, sendo o de maior destaque na literatura o modelo de Einstein [26], no qual este considerou uma suspensão diluída de partículas esféricas que pode ser definida como uma viscosidade efetiva de suspensão ( $\eta_{nf}$ ) dada pela Eq. 3.13,

$$\eta_{nf} = \eta_{fb}(1 + 2.5\phi) \quad (3.13)$$

em que  $\eta_{nf}$  é a viscosidade do nanofluido,  $\eta_{fb}$  a viscosidade do fluido base e  $\phi$  a fração volúmica. Vários autores propuseram novos modelos nas décadas seguintes, baseados no trabalho de Einstein. A Tabela 3.1 mostra as equações de alguns destes modelos.

Tabela 3.1 - Lista de modelos teóricos da viscosidade estudados.

<i>Autor</i>	<i>Modelo</i>	<i>Equação</i>
<i>Brinkman</i> [27]	$\eta_{nf} = \eta_{fb}(1 - \phi)^{-2.5}$	(14)
<i>Wang</i> [28]	$\eta_{nf} = \eta_{fb}(1 + 7.23\phi + 123\phi^2)$	(15)
<i>Batchelor</i> [29]	$\eta_{nf} = \eta_{fb}(1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2)$	(16)
<i>De Bruijin</i> [30]	$\eta_{nf} = \eta_{fb}\left(\frac{1}{1 - 2.5\phi + 1.552\phi^2}\right)$	(17)
<i>Vand</i> [31]	$\eta_{nf} = \eta_{fb}(1 + 2.5\phi + 7.349\phi^2)$	(18)
<i>Maiga</i> [32]	$\eta_{nf} = \eta_{fb}(1 - 0.19\phi + 306\phi^2)$	(19)

Estes modelos clássicos apresentam algumas limitações quando aplicados ao cálculo da viscosidade de nanofluidos, pois não têm em consideração as características e o tamanho das nanopartículas. Deste modo, dois nanofluidos com nanopartículas diferentes (e características diferentes) e tamanhos diferentes, caso tenham a mesma concentração de nanopartículas no fluido base, teriam viscosidades idênticas, algo que está empiricamente errado.

### 3.3. Densidade

A massa volúmica (usualmente designada por densidade absoluta) de uma substância é o quociente da massa da substância pelo seu volume, Eq. 3.14,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.14)$$

onde  $\rho$  representa a massa volúmica,  $m$  a massa da substância e  $V$  o volume da substância.

A massa volúmica de uma substância depende da sua temperatura, devido à propriedade de dilatação dos materiais, sendo que, quando a temperatura aumenta ocorre um aumento do volume. Este aumento de volume conduz a uma diminuição de massa volúmica.

A medição da massa volúmica depende também da pressão, mas como os líquidos são praticamente incompressíveis, esta variação é pouco significativa na determinação da massa volúmica.

A equação mais usada cientificamente por diversos autores para o cálculo da massa volúmica[33] de misturas está representada na Eq. 3.15.

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{fb} \quad (3.15)$$

Como já referido anteriormente, esta propriedade está dependente da temperatura, apresentando um comportamento exponencial[34], Eq. 3.16.

$$\rho = \rho_0 e^{bT} \quad (3.16)$$

Além disso, foram criados modelos matemáticos polinomiais, os quais descrevem o comportamento da massa volúmica em função da sua temperatura e fração volúmica[34], Eq. 3.17.

$$\rho(T, C) = x_0 + x_1 T + x_2 C + x_3 T^2 + x_4 T C \quad (3.17)$$

### 3.4. Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica é uma propriedade intrínseca do material e quantifica a maior ou menor capacidade de condução de corrente elétrica. A intensidade de corrente elétrica,  $I$ , é definida como a carga total que atravessa uma superfície  $S$ , por unidade de tempo, como representado na Eq. 3.18,

$$I = \frac{dQ}{dt} = \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS \quad (3.18)$$

em que  $I$  representa a intensidade da corrente elétrica,  $Q$  a carga elétrica,  $J$  a densidade de corrente elétrica e  $\vec{n}$  o vetor normal à superfície  $S$ .

O estudo desta propriedade é relevante para processos que envolvam transferência de calor, como é o caso de uma grande parte das aplicações dos nanofluidos e, por esse motivo, existe atualmente uma variedade imensa de estudos nesse sentido.

No S.I., a condutividade elétrica expressa-se em Siemens metro (S m), que é equivalente a  $\Omega^{-1} \text{ m}$ .



CAPÍTULO 4 – METODOLOGIAS E TÉCNICAS  
EXPERIMENTAIS



## 4. Metodologias e Técnicas Experimentais

### 4.1. Métodos de Preparação de Nanofluidos

Convencionalmente, existem dois métodos de preparação de nanofluidos, o método de uma etapa e o método de duas etapas. No método de uma etapa, o nanofluido é preparado simultaneamente, de modo a criar nanopartículas dentro do próprio fluido base. Este método produz um nanofluido com uma maior estabilidade e minimiza a precipitação de nanopartículas[35].

O método de duas etapas é o mais utilizado e utiliza as nanopartículas já previamente preparadas em pó seco, por métodos mecânicos ou/e químicos. Este pó nanométrico é misturado com o fluido base por ultrassons, ou agitação por força magnética, ou mistura de alto cisalhamento, ou homogeneização e moagem de bolas, como se pode ver na Fig. 4.1 [36]. A agitação constante reduz a aglomeração de nanopartículas, que é um dos principais problemas da preparação dos nanofluidos [28].

Este método de duas etapas é uma maneira bastante económica de produzir nanofluidos em escala comercial/industrial. A partir de investigações anteriores, observou-se que, devido à alta área superficial e atividade superficial, as nanopartículas têm a tendência de se agregar. Na preparação de nanofluidos, usando o método de duas etapas, é mais estável usar nanopartículas de óxidos do que nanopartículas metálicas, isto porque o pó nanométrico agrega-se facilmente devido às forças de *Van der Waals* entre as partículas metálicas. A solução mais eficaz para aumentar a estabilidade dos nanofluidos é o uso de surfactantes. Embora este método seja mais económico para produzir nanofluidos, existem alguns problemas de secagem, armazenamento e transporte.

A condutividade térmica dos nanofluidos é diminuída devido à aglomeração e obstrução. No entanto, a microestrutura das nanopartículas pode ser variada e aprimorada alterando os parâmetros de preparação, como temperatura, acidez da solução (pH), frequência dos ultrassons, tipos de reagentes e aditivos, concentrações e ordem de tamanho[15].

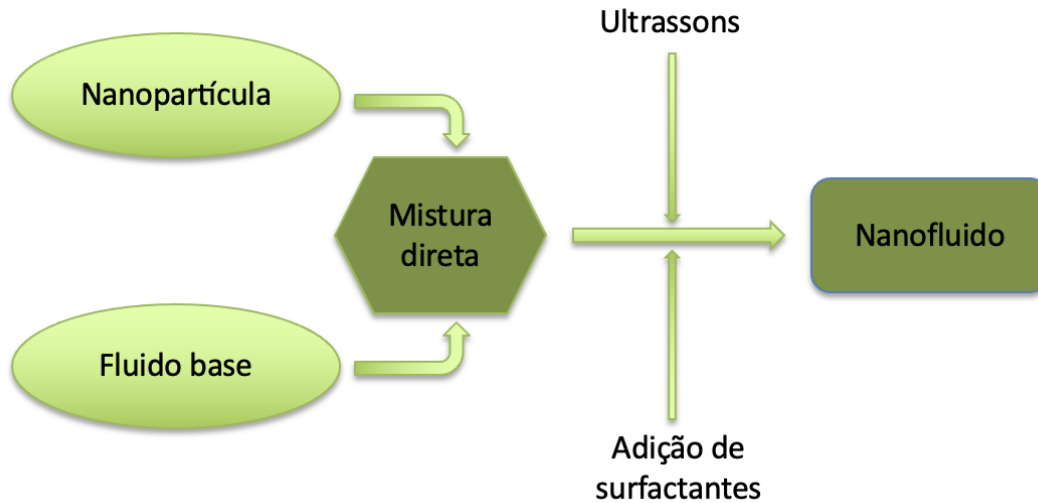


Figura 4.1 - O método de preparação de nanofluidos em duas etapas.

## 4.2. Estabilidade de um Nanofluido

O processo de preparação do nanofluido, assim como a dispersão das nanopartículas, é de extrema importância, podendo este comprometer toda a caracterização das propriedades físicas do nanofluido, assim como a estabilidade do mesmo. As nanopartículas têm uma área superficial elevada e a sua tendência é agregarem-se, provocando assim a sua sedimentação, diminuindo e alterando, portanto, as propriedades do nanofluido. Assim sendo, uma das principais preocupações relativas ao nanofluido é a manutenção da sua estabilidade pelo maior tempo possível, seja durante períodos de armazenamento ou durante a sua utilização. O tempo mínimo necessário para a manutenção da estabilidade é relativo e estará sempre relacionado com o fim a que destina o nanofluido.

Os líquidos com suspensão de partículas estão naturalmente sujeitos a instabilidades e formação de sedimentos devido às diferentes forças em atuação na solução, como a força de atração *Van der Waals* e a tendência considerável para as nanopartículas a se agregarem[37].

Em suma, a estabilidade do nanofluido está fortemente dependente do resultado entre as forças de atração *Van der Waals* e as forças de repulsão elétricas. Se a força *Van der Waals* for superior às forças elétricas, então as nanopartículas em suspensão serão naturalmente atraídas, levando à sua aproximação o que aumenta a frequência das colisões entre as nanopartículas. Como consequência, ocorre a formação de aglomerados

devido à coesão entre as nanopartículas. Os aglomerados de nanopartículas irão precipitar e gerar fenómenos de sedimentação[37].

A funcionalidade e o nível de desempenho de um nanofluido para um determinado fim, está então fortemente dependente da sua estabilidade. A tendência para as nanopartículas a se aglomerarem deve ser eliminada, ou fortemente condicionada, para se obter um nanofluido estável. Existem vários métodos para se alcançar uma maior estabilidade do nanofluido produzido, como, por exemplo, a adição de surfactantes durante o processo de produção.

De modo a estudar se o nanofluido está viável ou não para uso, temos que verificar a sua estabilidade. Existem vários métodos para estudar a estabilidade de um nanofluido, sendo abordados os seguintes: por sedimentação, por espectroscopia ótica e pelo pH.

#### 4.2.1. Sedimentação

O método de sedimentação é o mais simples e pouco dispendioso. É um método qualitativo uma vez que consiste na observação da variação do volume e da concentração das partículas em relação ao tempo de sedimentação, como se pode perceber pela Fig. 4.2. Os nanofluidos são considerados estáveis quando uma destas propriedades, concentração ou volume, se mantém constante. Quanto mais tempo demorar a formação do precipitado, maior será a estabilidade do nanofluido. A principal desvantagem deste método é o facto de ser necessário um longo período de observação[38].

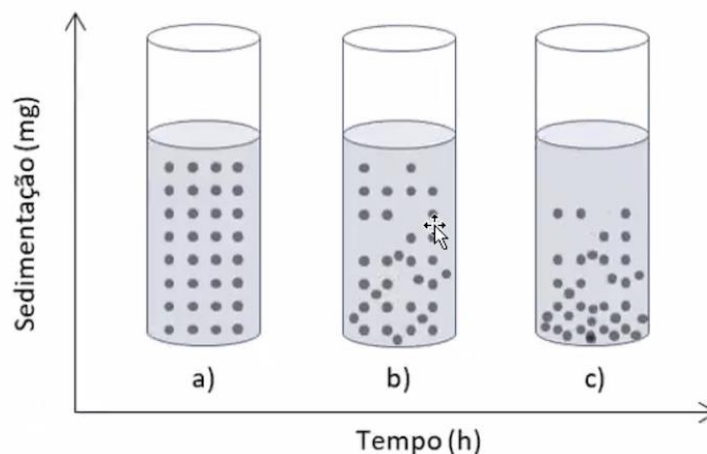


Figura 4.2 - Sedimentação de um nanofluido em função do tempo.

#### 4.2.2. Espectroscopia ótica

O espectrofotómetro para o estudo da estabilidade de um nanofluido é recorrentemente utilizado, uma vez que é aplicável para todos os fluidos base. Este aparelho é um instrumento de análise capaz de medir e comparar a quantidade de luz (radiação eletromagnética) absorvida, transmitida ou refletida por uma determinada amostra, seja ela solução, sólido transparente ou sólido opaco.

O resultado da espectrofotometria é dado por um gráfico que é conhecido como espectro de absorção da radiação ou de transmitância em função do comprimento de onda. Este fornece informações da intensidade de absorção/transmissão das bandas eletrônicas, por comprimento de onda da fonte de luz. Essa faixa de comprimentos de onda desejados pode ser selecionada antes da realização das medidas, o que torna a medida mais específica e eficaz já que não será necessário um número excessivo de dados para obter o resultado esperado.

Os espectrofotómetros UV-Vis cobrem uma gama de luz entre 200 nm e 2500 nm (ultravioleta a infravermelho). A faixa de comprimentos de onda da radiação eletromagnética usada neste trabalho foi entre 200 nm e 600 nm. Para que os resultados obtidos pelas medidas realizadas no espectrofotómetro sejam precisos, é necessário sempre fazer a calibração do instrumento (espectro da lâmpada).

Sabendo que existe uma relação linear entre a absorbância e a concentração de partículas, é possível obter uma avaliação da estabilidade do nanofluido. Sucintamente, uma maior absorbância significa que há uma maior concentração de nanopartículas, havendo uma menor quantidade de nanopartículas sedimentadas, significando assim uma maior estabilidade[38].

O espectrofotómetro usado foi o *T70 UV-Vis Spectrophotometer* de *PG Instruments*, como representado na Fig. 4.3.



Figura 4.3 – Espectrofotômetro.

### 4.2.3. pH

O controle de pH é uma das técnicas utilizadas para estudar a estabilidade de um nanofluido, devido às forças repulsivas existentes entre as nanopartículas em suspensão, visto que, quanto maior o valor do pH, menor é a quantidade de aglomerados de nanopartículas, originando uma maior estabilidade no nanofluido[39].

O medidor de pH usado foi o *HANNA instruments*, como representado na Fig. 4.4.



Figura 4.4 - Medidor de pH.

### 4.3. Preparação do nanofluido

Para preparar as amostras de nanofluidos foi necessário, previamente, determinar o volume de fluido base necessário, tendo por base a massa volúmica das nanopartículas de grafeno e a percentagem em volume das mesmas, como está representado na Tab. 4.1 e na Tab. 4.2. Desta forma, o volume de fluido base necessário foi medido com o auxílio de uma pipeta volumétrica e uma micropipeta. Relativamente à quantidade de nanopartículas necessárias, esta foi conseguida por pesagem, utilizando-se para o efeito uma balança de precisão KERN ALJ 220-4 NM, com uma precisão de  $\pm 1\text{mg}$ . Usou-se a Eq. 4.1 para calcular o volume do nanofluido a pesar e a Eq. 4.2 para calcular a sua massa.

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{fb}} 100 \quad (4.1)$$

$$m_{np} = V_{np} \rho_{np} \quad (4.2)$$

$$\phi = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np}}{\rho_{np}} + \frac{m_{fb}}{\rho_{fb}}} 100 \quad (4.3)$$

Usou-se o método da incerteza combinada, Eq. 4.4, para o cálculo da incerteza associada à fração volúmica representada nas Tab. 4.1 e 4.2. Como as massas foram medidas com o mesmo equipamento, as incertezas tipo B de ambas as grandezas serão iguais,  $\mu(m_{np}) = \mu(m_{fb}) = \mu_{balança}$ .

$$\mu(\phi)^2 = \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial m_{np}} \right) \mu(m_{np}) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial m_{fb}} \right) \mu(m_{fb}) \right]^2 \quad (4.4)$$

Tabela 4.1 - Cálculos prévios para a preparação dos nanofluidos de 0.1% de grafeno nos vários fluidos bases estudados.

Fluido Base	$m_{np} / \text{g}$	$\mu(m_{np}) / \text{g}$	$m_{fb} / \text{g}$	$\phi_{\text{exp}} / \%$	$\mu(\phi) / \%$
Água destilada	0.0550	0.00058	24.8558	0.1009	0.0011
Soro fisiológico	0.0565	0.00058	25.1893	0.1022	0.0010
Glicerina	0.0550	0.00058	24.6256	0.1018	0.0013
Etilenoglicol	0.0553	0.00058	27.2211	0.0926	0.0011

Tabela 4.2 - Cálculos prévios para a preparação dos nanofluidos de grafeno em etilenoglicol para várias frações volúmicas.

Fluído Base	$m_{np} / g$	$\mu(m_{np}) / g$	$m_{fb} / g$	$\phi_{exp} / \%$	$\mu(\phi) / \%$
Etilenoglicol	0.0553	0.00058	27.2211	0.0926	0.0011
	0.1103	0.00058	26.1762	0.1921	0.0011
	0.1650	0.00058	25.8481	0.2910	0.0011
	0.2751	0.00058	26.9261	0.4659	0.0011
	0.4128	0.00058	26.8251	0.7030	0.0011

As amostras foram preparadas em frascos de vidro e recorrendo a um homogeneizador de ultrassom, o BANDELIN SONOPULS HD2200, para se obter dispersões uniformes e estáveis. Inicialmente foi adicionado ao frasco, o volume necessário de fluido base e posteriormente as nanopartículas. O processo de agitação ocorreu de forma gradual, cujo período de agitação definido, com a ponta de ultrassons, foi de 10 em 10 minutos, com 2 minutos intercalado de repouso. Foi definido este procedimento, uma vez que o equipamento sobreaquece e as amostras não podem ultrapassar os 20 °C, de modo a não alterar as suas propriedades. O controlo da temperatura foi feito pela adição permanente de gelo a um gobelé de vidro que continha o frasco da amostra (banho de gelo).

Ao longo do procedimento de preparação das amostras foram tomadas todas as medidas de precaução de forma a minimizar os erros cometidos e também evitar possíveis contaminações.

#### 4.4. Materiais e Reagentes

O grafeno usado para a atividade laboratorial foi nanoplaquetas de grafeno com as seguintes características presentes na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 - Especificações das nanoplaquetas de grafeno.

##### Propriedades

Tamanho	11 a 15nm
Área de superfície	59 a 80 m <sup>2</sup> /g
Pureza	>99.5%
Massa volúmica	2.2 g cm <sup>-3</sup>
Número CAS	7782-42-5
Comercializada pela empresa	Mknano
Condutividade elétrica	10 <sup>7</sup> S m <sup>-1</sup>

Condutividade Térmica	3000-5000 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Expansão Térmica	4 - 6 x 10 <sup>-6</sup>
Módulo de Young's	1000 GPa
Tensão de rotura	5 GPa

#### 4.4.1. Água destilada (H<sub>2</sub>O)

Água (H<sub>2</sub>O) é uma substância química cujas moléculas são formadas por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio, que estabelecem ligações, como está representado na Fig. 4.5. Esta substância cobre grande parte da superfície da Terra e é a maior constituinte dos fluidos dos seres vivos. As temperaturas do planeta permitem a existência de água nos três estados físicos da matéria.

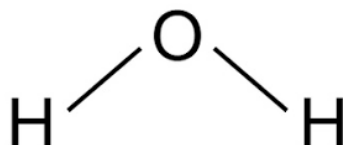


Figura 4.5 - Estrutura molecular da água.

A água usada como fluido base no trabalho experimental apresenta as especificações apresentadas na Tab.4.4.

Tabela 4.4 - Especificações do fluído base água destilada.

Propriedades	
Massa Molar	18,01528 g/mol
Massa Volúmica	0,998 g cm <sup>-3</sup>
Ponto de fusão	0 °C
Ponto de Ebulição	100 °C
Fornecida pelo	Laboratório de química do ISEP

#### 4.4.2. Soro fisiológico (H<sub>2</sub>O + NaCl 0.90%)

Soro fisiológico é uma solução isotónica em relação aos líquidos corporais que contém 0,9%, em massa, de cloreto de sódio em água destilada. Cada 100mL da solução aquosa contém 0,9 g do sal. O soro fisiológico usado na preparação dos nanofluidos tem as seguintes especificações, apresentadas na Tab.4.5.

Tabela 4.5 - Especificações do fluido base soro fisiológico.

## Propriedades

Massa Molar	58.44 g/mol
Massa Volúmica	1,005 g cm <sup>-3</sup>
Número CAS (NaCl)	7604-14-5
Comercializada pela empresa	B BRAUN

**4.4.3. Glicerina (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>)**

Glicerina é o termo comercial dado ao composto orgânico propanotriol, com pureza acima de 95%. A glicerina é um composto orgânico líquido, incolor, viscoso e com sabor adocicado. Esta está presente em todos os óleos e gorduras de origem animal e vegetal, cuja estrutura molecular se pode ver na Fig. 4.6. Além disso, atualmente a substância também pode ser de origem sintética (proveniente do petróleo).

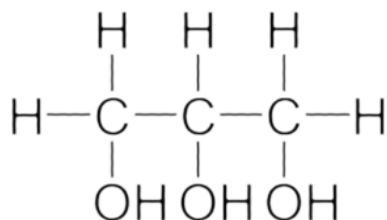


Figura 4.6 - Estrutura molecular da glicerina.

A glicerina usada para a preparação do nanofluido apresenta as seguintes especificações listadas na Tab. 4.6.

Tabela 4.6 - Especificações do fluido base glicerina.

## Propriedades

Massa Molar	92,09382 g/mol
Massa Volúmica	1,261 g cm <sup>-3</sup>
Ponto de fusão	18.1 °C
Ponto de ebulição	290 °C
Número CAS	56-81-5
Comercializada pela empresa	LABCHEM

#### 4.4.4. Etilenoglicol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>)

O etilenoglicol é um álcool com dois grupos-OH, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>, Fig. 4.7, com o número de CAS 107-21-1. No seu estado líquido é incolor, inodoro e de baixa volatilidade e viscosidade.

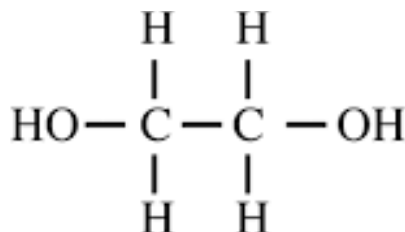


Figura 4.7 - Estrutura molecular do Etilenoglicol.

É miscível com água e com outros líquidos orgânicos. É solúvel em éter, mas insolúvel em benzeno, hidrocarbonetos e óleos. As suas propriedades físicas encontram-se descritas na seguinte Tab. 4.7.

Tabela 4.7 - Especificações do fluido base etilenoglicol.

#### Propriedades

Massa Molar	62.07 g/mol
Massa Volúmica	1.11 g cm <sup>-3</sup>
Ponto de fusão	-13 °C
Ponto de ebulição	198 °C
Número CAS	107-21-1
Comercializada pela empresa	Carlo Erba

### 4.5. Densidade

Para determinar a densidade do nanofluido, usou-se o método do picnómetro, embora existam outros métodos para a determinação da densidade, como exemplo: Princípio de Arquimedes (pela diferença de volumes), método do densímetro (leitura direta do valor apresentado no densímetro), vibração mecânica. etc.

Os picnómetros são frascos de vidro construídos cuidadosamente de forma que o volume do fluido que contém é invariável. Possuem uma abertura relativamente larga para facilitar a sua utilização, e tampa de vidro esmerilhada, perfurada na forma de um fino tubo longitudinal, Fig. 4.8.



Figura 4.8 - Picnómetro.

Encheu-se cuidadosamente o picnómetro com água destilada previamente preparada. Verificou-se que não ficaram bolhas de ar aprisionadas no interior do picnómetro. Para a medição à temperatura de 25 °C, colocou-se o picnómetro cheio com a água destilada num banho térmico, Fig. 4.9, de forma a aquecer o sistema (picnómetro + líquido) até à temperatura de 25 °C (usou-se um termómetro para registar a temperatura do banho). Quando atingido o equilíbrio térmico ( $\pm 10$ min) retirou-se o picnómetro do banho térmico e limpou-se com um papel absorvente as paredes exteriores do picnómetro de forma a não existir nenhum resíduo de água no seu exterior quando se efetua a pesagem na balança. Registou-se o valor da massa do sistema. Para cada temperatura realizaram-se 5 pesagens. Repetiu-se o procedimento para as outras temperaturas, 30, 40, 50 e 60 °C. A balança utilizada foi a *AND Eletronic Balance* com a precisão de 0.0001g.

Posteriormente, fez-se o mesmo para todos os nanofluidos. Começou-se por lavar o picnómetro com acetona para secá-lo. Determinou-se a massa do picnómetro vazio depois de seco. Adicionou-se o nanofluido cuidadosamente e pesou-se o picnómetro com o nanofluido. Para cada temperatura realizou-se 5 pesagens, sem remover o nanofluido do picnómetro. Em cada ensaio, colocou-se o nanofluido novamente no banho verificando que o volume estava certo e esperou-se 10 min para fazer a nova pesagem. Repetiu-se o procedimento para 30, 40, 50 e 60 °C.



Figura 4.9 - Banho térmico.

Após o procedimento efetuado para cada temperatura, calculou-se a densidade para uma determinada temperatura, usando a Eq. 4.5,

$$d_{nf} = \frac{M_{nf} - m_0}{m_1 - m_0} \quad (4.5)$$

onde  $M_{nf}$  é a massa do picnómetro cheio com o nanofluido,  $m_0$  a massa do picnómetro vazio e  $m_1$  a massa do picnómetro cheio com água destilada.

Depois deste cálculo, tivemos que determinar a massa volúmica do nanofluido, multiplicando o valor da densidade obtido pelo valor da massa volúmica da água destilada à mesma temperatura, como se pode ver na Eq. 4.6.

$$\rho_{nf} = d_{nf} * \rho_{H_2O} \quad (4.6)$$

## 4.6. Viscosidade

### 4.6.1. Viscosímetro

No contexto deste trabalho, foi utilizado o viscosímetro de *Cannon-Fenske*, Fig. 4.10, para a determinação da viscosidade cinemática de um nanofluido, através da medição do seu tempo de escoamento entre dois traços de referência.

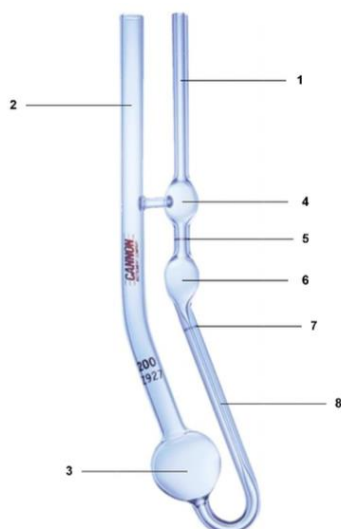


Figura 4.10 - Viscosímetro de *Cannon-Fenske* e os seus principais componentes: (1) tubo de aspiração, (2) tubo de ventilação, (3) reservatório, (4) esfera pré-escoamento, (5) traço de referência superior, (6) esfera de medição, (7) traço de referência inferior e (8) capilar.

A metodologia de utilização do viscosímetro de *Cannon-Fenske* é bastante simples. Primeiramente, introduz-se um volume conhecido do fluido a estudar, através do tubo de ventilação, que se acumula no reservatório maior, a jusante. De seguida, e com o auxílio de uma bomba de aspiração aplicada no tubo, aspira-se o fluido que sobe através do capilar de forma a preencher toda a esfera de medição, ou reservatório menor, a montante. Quando se encontra acima do traço de referência superior, o processo de aspiração deve ser interrompido, o que permite o escoamento do fluido sob ação da força gravitacional. Deve-se, então, medir o tempo de escoamento entre os traços de referência.

No início deste processo, é necessário efetuar a calibração do viscosímetro com um líquido padrão, cujo valor de viscosidade cinemática é conhecido. Assim, após a medição do seu tempo de escoamento, pode-se efetuar a determinação da constante do viscosímetro, sendo este valor posteriormente utilizado para a quantificação da viscosidade cinemática de outros fluidos. Usou-se água destilada para calibrar o equipamento.

#### 4.6.2. Calibração

Para efetuar a calibração do viscosímetro, ligou-se o banho do viscosímetro à corrente elétrica, utilizando a unidade de controlo onde estão localizados os interruptores de iluminação, aquecimento e agitação, Fig.11. Verificou-se a temperatura do banho e

ajustou-se, conforme a necessidade, ao valor inicial do procedimento, 20 °C. Com o auxílio de uma bomba, aspirou-se a amostra no ramo do viscosímetro que contém o capilar até que o bordo superior ultrapassasse o traço de referência superior. Deixou-se a amostra escorrer livremente no viscosímetro e, com o auxílio de um cronómetro digital, mediu-se o tempo de escoamento entre os dois traços de referência. Registou-se 5 tempos para cada temperatura e repetiu-se o procedimento descrito para os 30, 40, 50 e 60 °C. Como a viscosidade cinemática da água destilada é conhecida, conseguiu-se calcular a constante de capilaridade,  $C$ , para as diferentes temperaturas, através da divisão da viscosidade cinemática pelo tempo de escoamento.



Figura 4.11 - Montagem experimental utilizada para a calibração do viscosímetro de Cannon-Fenske.

As tabelas utilizadas para a calibração de todos os tubos capilares usados na atividade experimental estão em Anexo. Calibração do tubo 75ml nº 6950 Anexo A. Calibração do tubo 100ml nº 7246 Anexo B. Calibração do tubo 200ml nº 183 Anexo C. E por último, calibração do tubo 200ml nº 183 Anexo E.

#### 4.6.3. Viscosidade Cinemática

Foi estudada a variação da viscosidade do nanofluido em função da temperatura. Primeiramente, começou-se por estudar a viscosidade da água destilada para efetuar a calibração do viscosímetro, como referido anteriormente, e para determinar a viscosidade usou-se a Eq. 4.7, onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática,  $t$  o tempo de escoamento e  $C$  é a constante determinada na calibração.

$$\nu = C * t \quad (4.7)$$

Repetiu-se o processo descrito no ponto 4.6.2 para determinar a viscosidade dos nanofluidos para todas as temperaturas. Para isto, mediu-se o tempo de escoamento dos fluido base/nanofluidos para temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60 °C. Fez-se 5 medidas para cada temperatura.

#### 4.6.4. Viscosidade Dinâmica

Para calcular a viscosidade dinâmica, apenas se multiplicou a viscosidade cinemática pela massa volúmica na respetiva temperatura, como está representado na Eq. 4.8.

$$\eta = \nu * \rho \quad (4.8)$$

### 4.7. Condutividade Elétrica

Foi medida inicialmente a condutividade elétrica do fluido base. *A posteriori* fez-se as medições de condutividade elétrica para o nanofluido para diferentes temperaturas.

Para estabilizar a temperatura do nanofluido, usou-se um banho térmico à referida temperatura e, posteriormente, mediu-se a condutividade elétrica e temperatura em simultâneo. O medidor de condutividade utilizado foi *sensION<sup>TM</sup>+ EC7*, Fig. 4.11.



Figura 4.12- Medidor da condutividade elétrica.



## CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE RESULTADOS



## 5. Análise de Resultados

### 5.1. Estabilidade

Para analisar os resultados obtidos do estudo experimental, começou-se por verificar a estabilidade para todos os nanofluidos preparados experimentalmente. Os métodos aplicados para esta análise foram: a observação por sedimentação, espectroscopia ótica e medição de pH, como mencionados anteriormente.

#### 5.1.1. Sedimentação

Este método baseia-se na observação do nanofluido depois de preparado, de modo a observar quanto tempo demora a criar precipitado. Fez-se isto para todas as frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5%, 0.75%. A Fig. 5.1 diz respeito a um registo feito imediatamente após a agitação com recurso a ultrassons durante 80 minutos. Registou-se a formação de precipitado nos seguintes momentos: imediatamente depois da finalização da amostra, 3 horas depois, 6 horas depois, e 9 horas após a preparação do nanofluido. Nota-se, então, que o nanofluido de 0.1% grafeno em etilenoglicol é estável durante as primeiras 9h.



Figura 5.1 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.1% grafeno em etilenoglicol a 0h, 3h, 6h e 9h, respetivamente.

A Fig. 5.2 mostra a precipitação logo após a preparação da amostra, 24 horas depois, 48 horas depois e, por fim, após 72 horas. Nota-se, então que o nanofluido de 0.1% grafeno em etilenoglicol aguenta-se estável durante 24h, visto que às 48h já se nota uma diferença de camadas, e às 72h já está totalmente precipitado. Ou seja, o nanofluido está viável para utilização durante 24h.

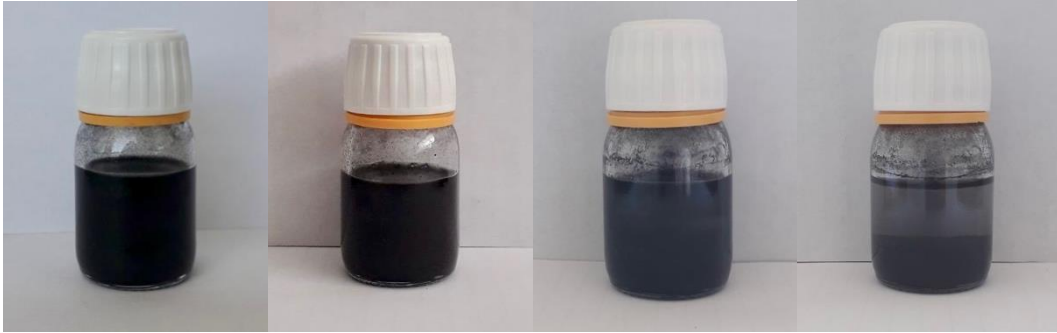


Figura 5.2 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.1% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respectivamente.

A Fig. 5.3 apresenta o nanofluido de 0.2% grafeno em etilenoglicol após a sua preparação, 24h, 48h e 72h depois. Pode se reparar que, neste caso, o nanofluido de 0.2% grafeno em etilenoglicol perde a sua viabilidade após 48h, porque como se pode ver já apresenta precipitado.



Figura 5.3 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.2% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respectivamente.

Na Fig. 5.4 está representado o nanofluido de 0.3% grafeno em etilenoglicol após a sua preparação, 24h, 48h e 72h depois. Neste caso, este nanofluido está estável durante as primeiras 24h, visto que após 48h já apresenta precipitado no fundo do frasco.

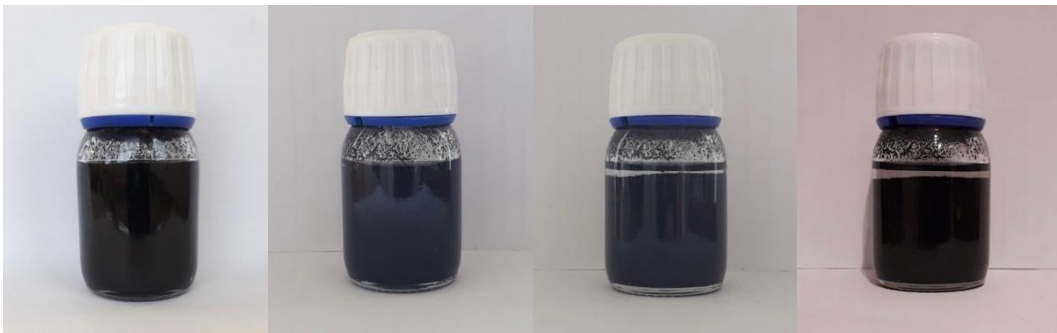


Figura 5.4 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.3% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respectivamente.

Na Fig. 5.5 está representado o nanofluido de 0.5% grafeno em etilenoglicol após a sua preparação, 24h, 48h e 72h depois. Neste caso, este nanofluido fica estável pelo menos durante 72h, pois não apresenta precipitado.



Figura 5.5 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.5% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respetivamente.

Na Fig. 5.6 está representado o nanofluido de 0.75% grafeno em etilenoglicol após a sua preparação, 24h, 48h e 72h depois.

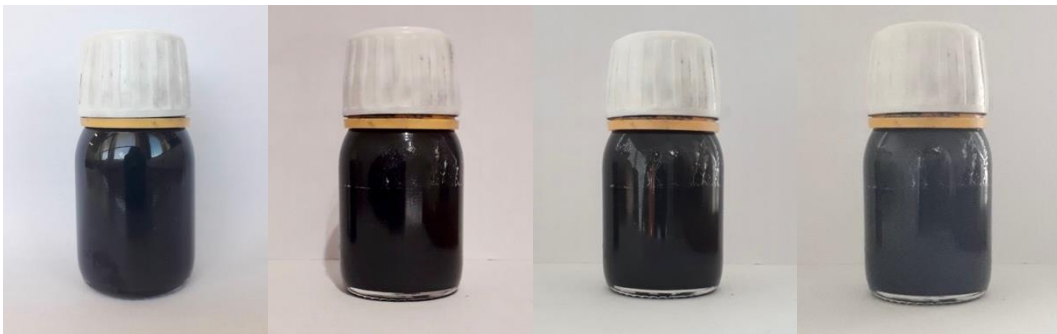


Figura 5.6 - Avaliação da estabilidade do nanofluido de 0.75% grafeno em etilenoglicol a 0h, 24h, 48h, 72h, respetivamente.

Neste caso, este nanofluido fica estável pelo menos durante 72h, pois não apresenta precipitado.

Comparando agora todas as frações volúmicas, nota-se que a de 0.5% e 0.75% apresentam maior tempo de viabilidade, sendo que ao fim de 72h ainda não apresentam precipitado. Enquanto as restantes frações volúmicas apresentam menos tempo de viabilidade porque ao fim de 48h já se nota a presença de precipitado.

Para uma mais fácil interpretação, listamos o intervalo de tempo em que o nanofluido se apresenta viável para todas as amostras.

Tabela 5.1 - Resumo do tempo de estabilidade para todos os nanofluidos produzidos com etilenoglicol.

<i>Fração volúmica do grafeno</i>	<i>Tempo de estabilidade</i>
0.1%	24h
0.2%	24h
0.3%	24h
0.5%	72h
0.75%	72h

### 5.1.2. Espectroscopia ótica

As amostras foram colocadas em cuvetes de quartzo com dimensões de 1cm x 1cm. Em primeiro lugar, registou-se a *baseline*, isto é, registou-se o espectro de absorção a partir de uma amostra do fluido base.

De seguida, registou-se os espectros para todos os intervalos de homogeneização, ou seja, após 0, 20, 40, 60, 80 e 100 minutos para os diferentes nanofluidos produzidos. Os espectros foram medidos aquando da produção do nanofluido.

De modo a não perdermos informação quando medimos o espectro, tivemos que diluir o nanofluido numa porção 0.1 cc em 3 ml de fluido base.

#### 5.1.2.1. Nanofluido de grafeno em água destilada

Para a amostra de 0.1% de grafeno em água destilada mediu-se o espectro de absorção para 0 min, 20 min, 40 min, 60 min e 80 min de sonicação, Fig. 5.7. Repara-se então que com o aumento do tempo da sonicação, há um aumento da absorção nesta faixa, 190nm a 500nm. Quando esta absorção permanecer constante, é considerado que atingimos o tempo ideal de preparação. Observa-se então que o tempo ideal de sonicação é de 60 minutos.

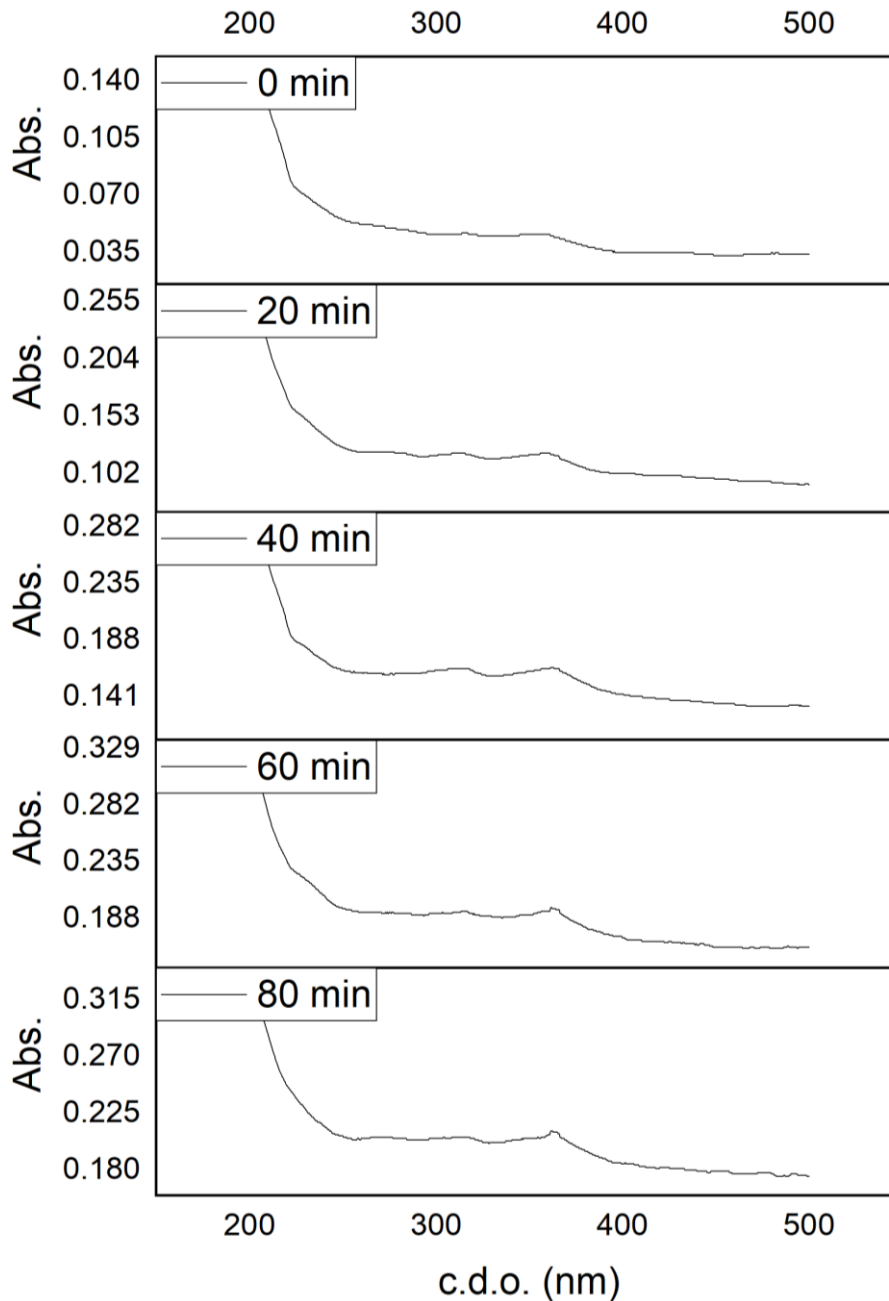


Figura 5.7 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada para diferentes tempos de sonicação.

#### 5.1.2.2. Nanofluido de grafeno em soro fisiológico

Para a amostra de 0.1% de grafeno em soro fisiológico mediu-se o espectro de absorção para 0 min, 20 min, 40 min, 60 min e 80 min de sonicação, Fig. 5.8. Neste caso, o melhor tempo de sonicação é aos 40 min, porque repara-se que, aos 60 min, a banda perdeu absorção.

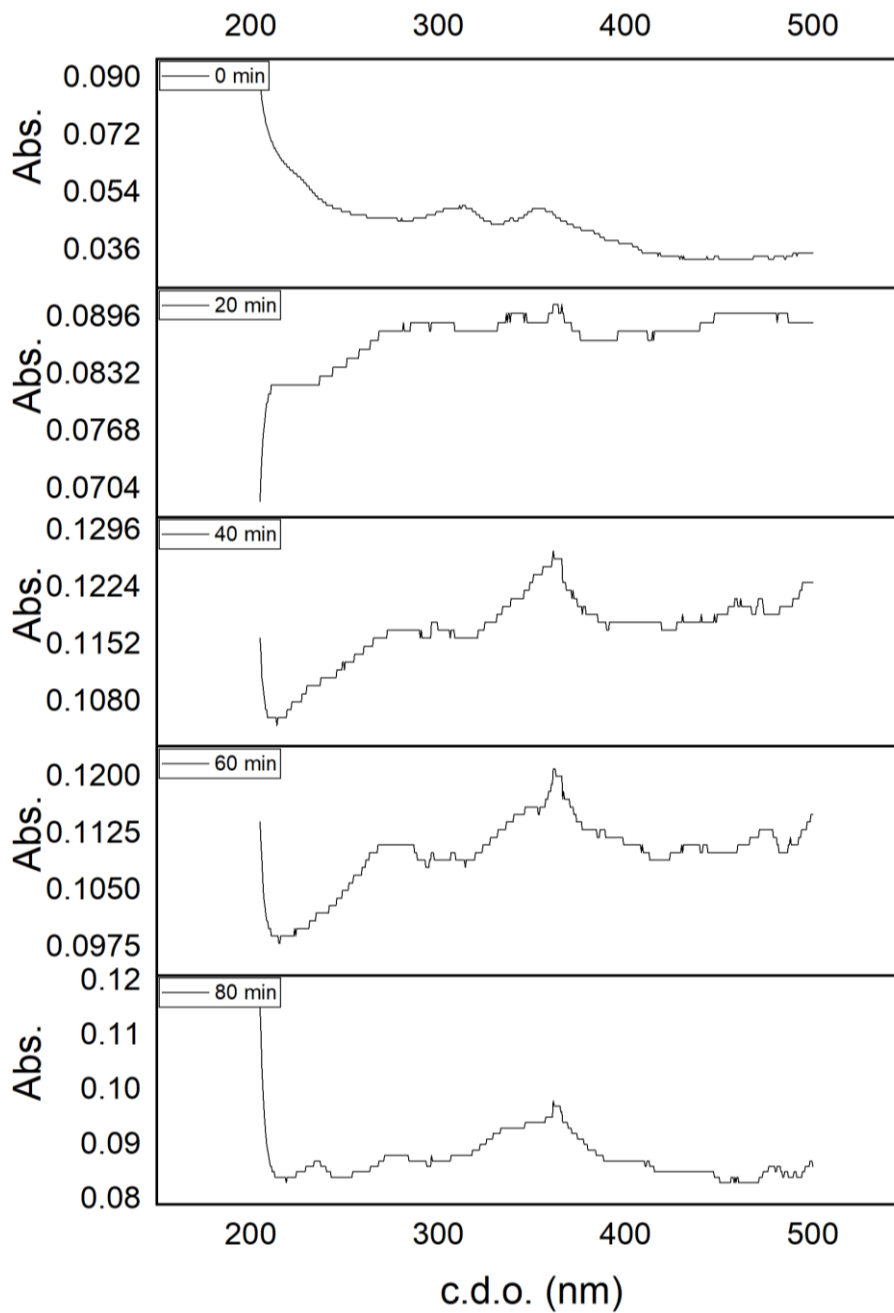


Figura 5.8 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico para diferentes tempos de sonicação.

### 5.1.2.3. Nanofluido de grafeno em glicerina

Para a amostra de 0.1% de grafeno em glicerina mediu-se o espectro de absorção para 20 min, 40 min, 60 min, 80 min e 100 min de sonicação, Fig. 5.9. O nanofluido fica estável aos 80 min, como se pode observar este perde valores de absorção aos 100 min de sonicação.

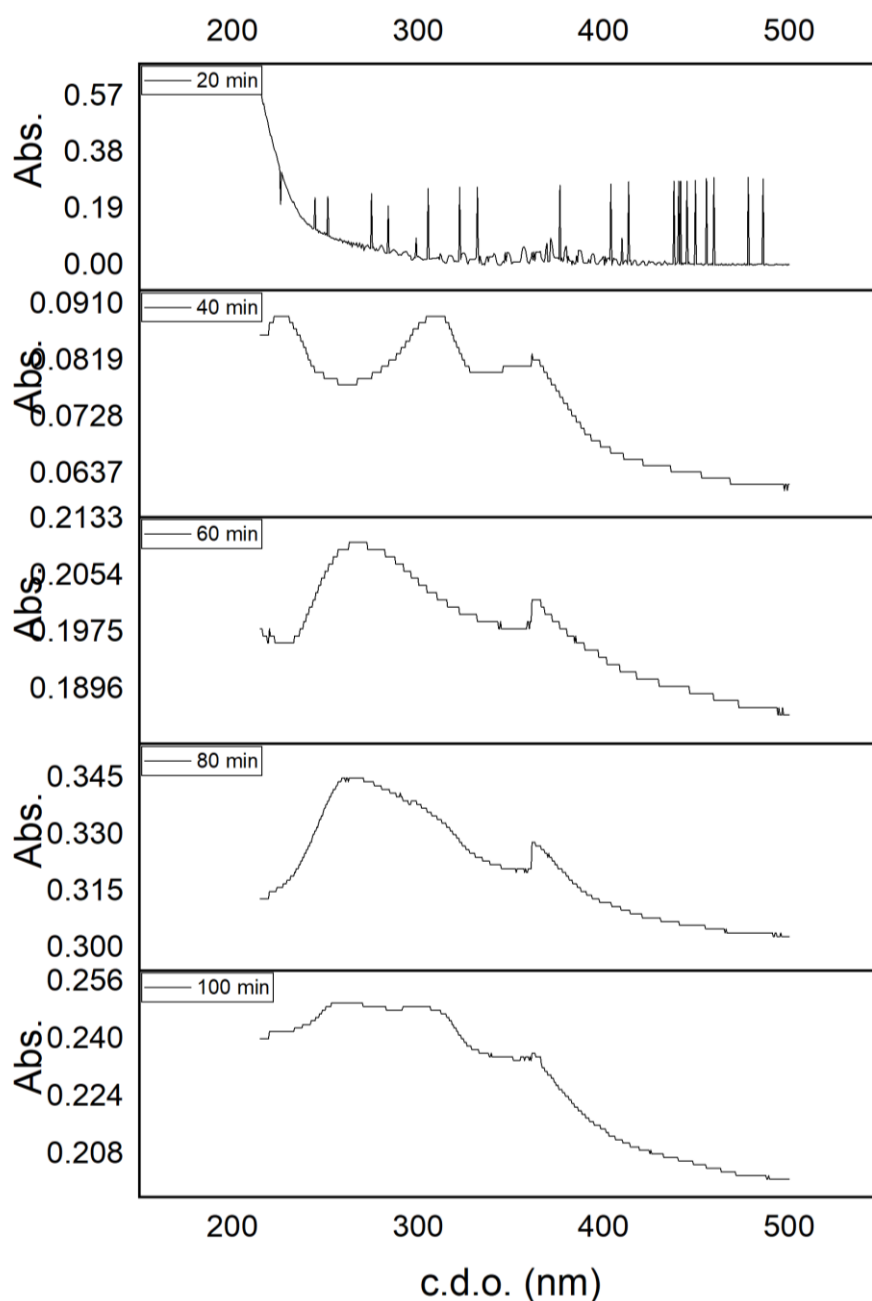


Figura 5.9 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina para diferentes tempos de sonicação.

#### 5.1.2.4. Nanofluidos de grafeno em etilenoglicol

Registou-se os espectros de absorção para todos os nanofluidos que se produziu com o etilenoglicol, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5% e 0.75%.

Para o nanofluido de 0.1% de fração volúmica, registou-se os espectros de absorção aos 40 min, 60 min, 80 min e 100 min de sonicação, Fig. 5.10. Neste caso, o nanofluido é viável aos 80 min de sonicação, porque aos 100 min os valores de absorção são menores.

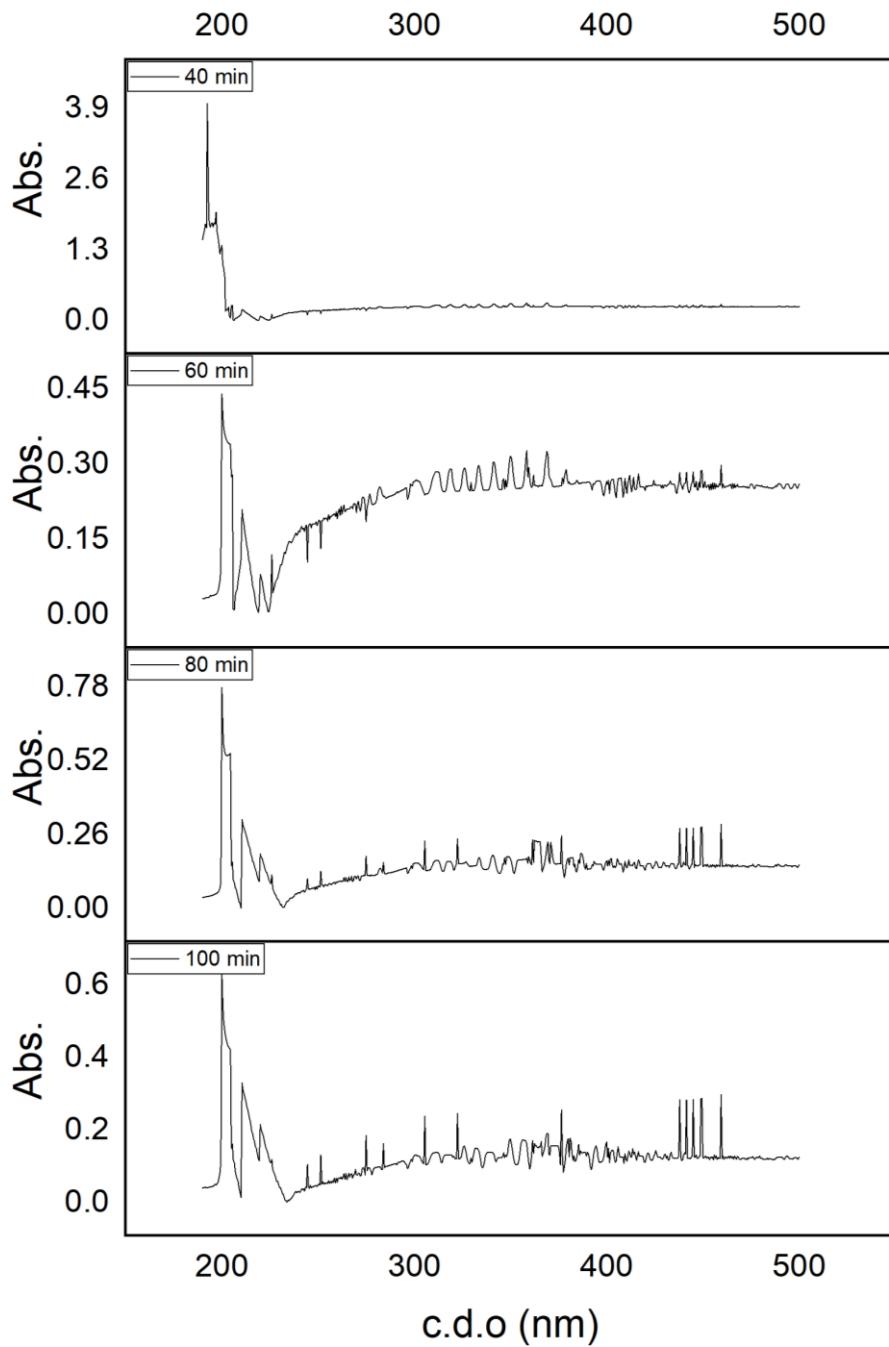


Figura 5.10 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação.

Para o nanofluido de 0.2% de fração volúmica, registou-se os espectros de absorção aos 0 min, 20 min, 40 min, 60 min e 80 min de sonicação, Fig. 5.11. Neste caso, o tempo ideal de sonicação é aos 80 min, visto que a absorção está a aumentar e o comportamento da banda não demonstra grandes variações.

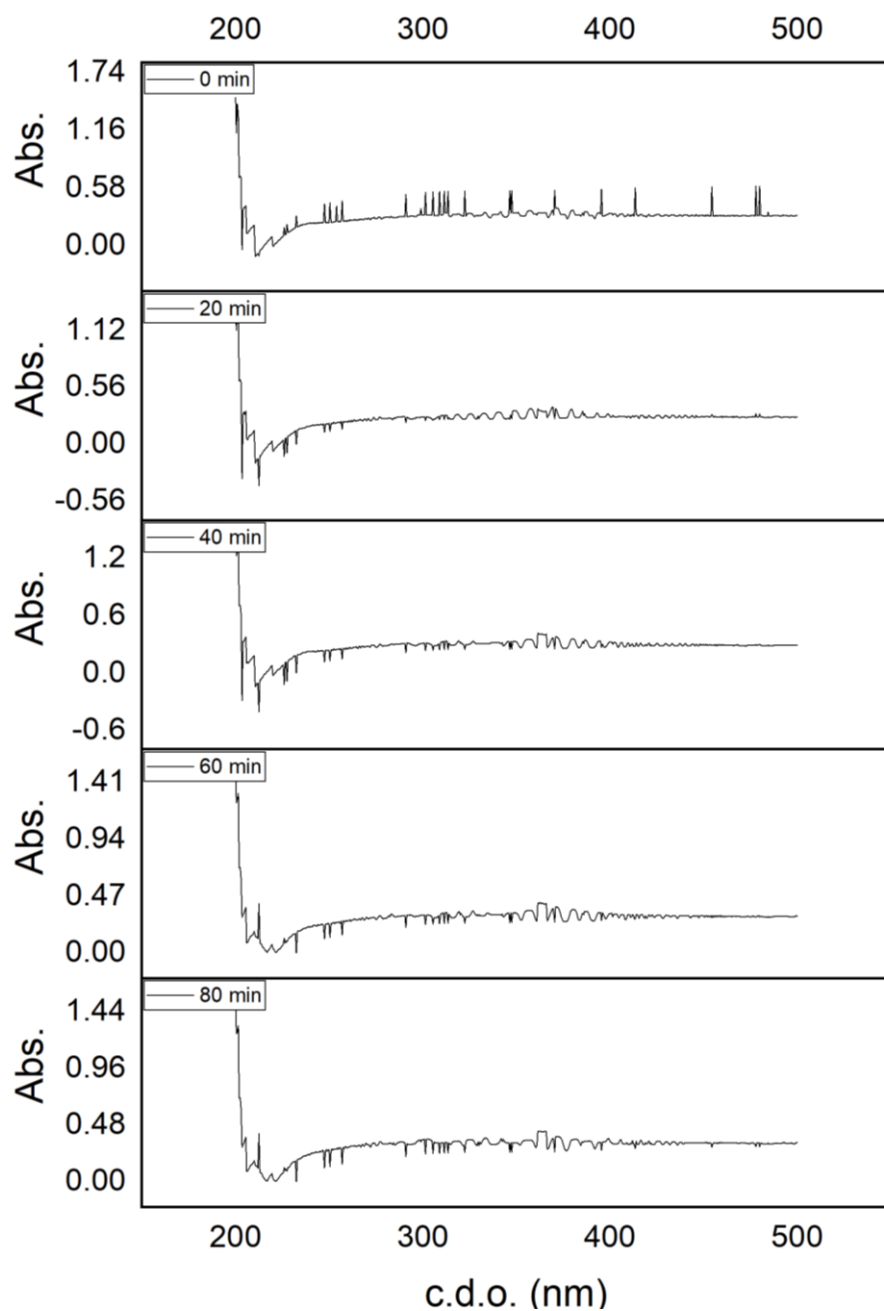


Figura 5.11 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.2% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação.

Para nanofluido de 0.3% de grafeno em etilenoglicol, registou-se os espectros de absorção aos 0 min, 20 min, 40 min, 60 min e 80 min de sonicação, Fig. 5.12. Neste caso, o ideal era estudar mais intervalos de sonicação, por exemplo, 100 min e 120 min para se conseguir tirar melhores conclusões.

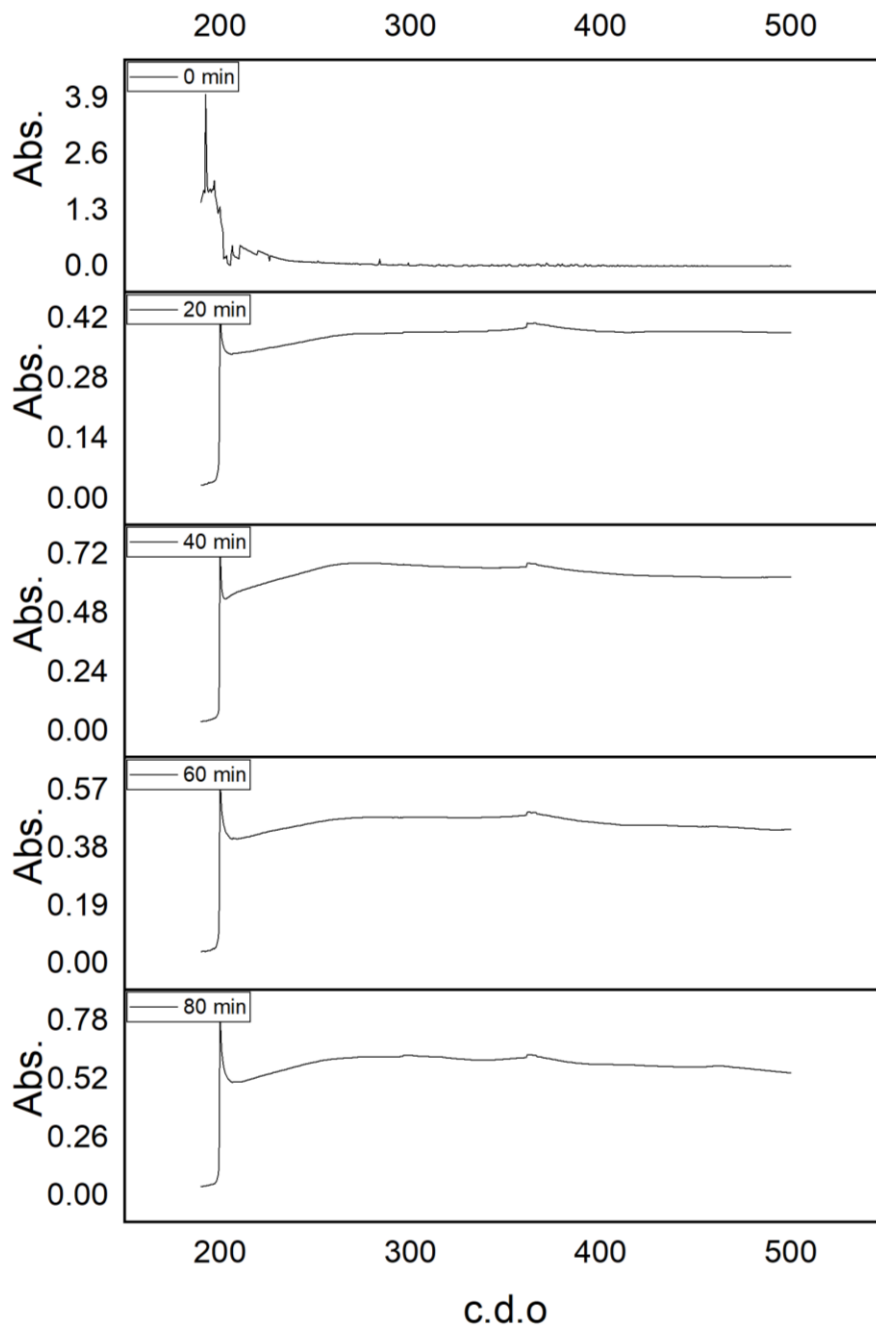


Figura 5.12 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.3% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação.

Para nanofluido de 0.5% de grafeno em etilenoglicol, registou-se os espectros de absorção aos 20 min, 40 min, 60 min e 80 min de sonicação, Fig. 5.13. Neste caso, não se consegue concluir a viabilidade do nanofluido, pelo qual se devia ter estudados intervalos de sonicação superiores, como 100 min e 120 min.

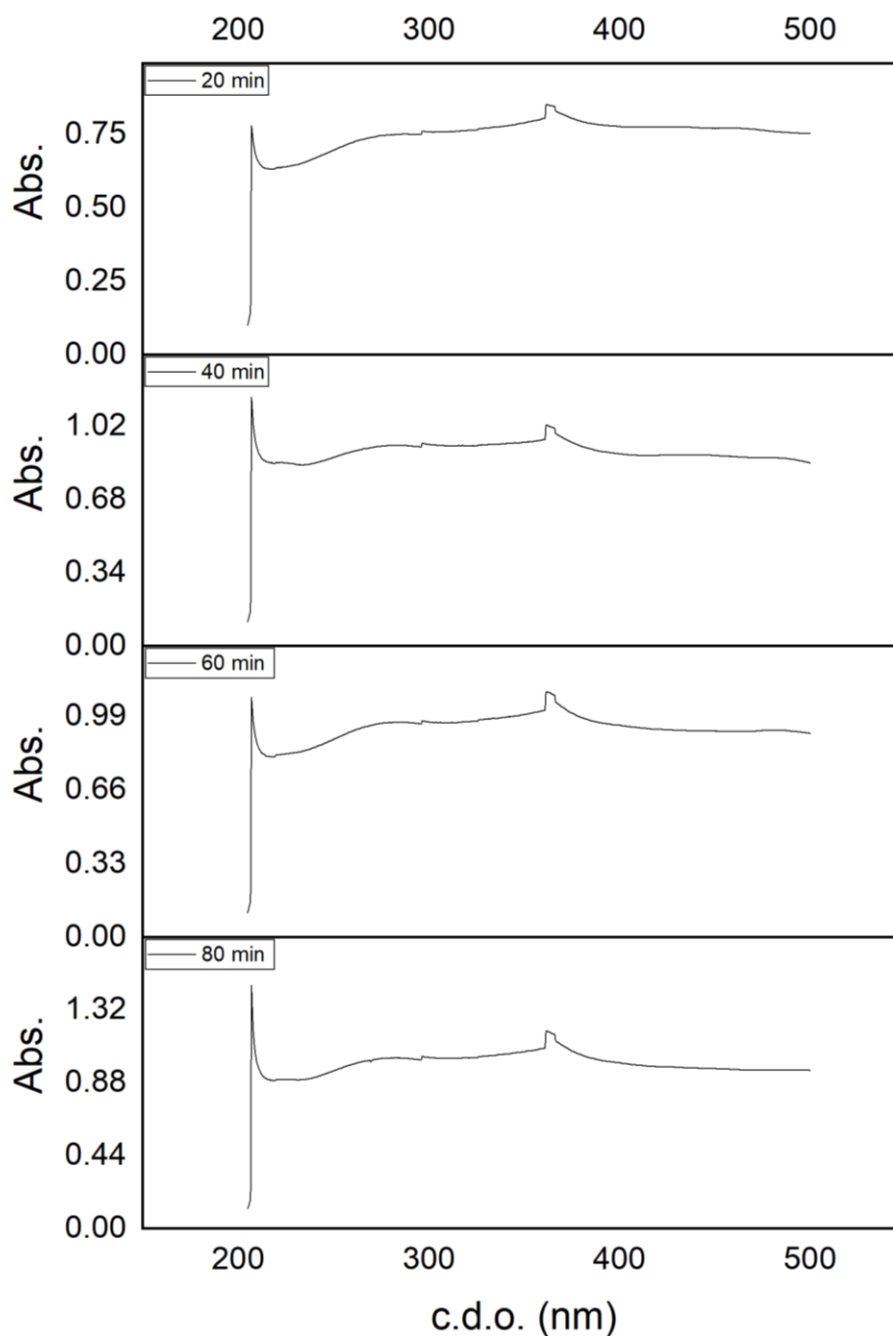


Figura 5.13 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.5% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação.

Para nanofluido de 0.75% de grafeno em etilenoglicol, registou-se os espectros de absorção aos 0 min, 20 min, 40 min, 60 min e 80 min de sonicação, Fig. 5.14. Neste caso, o tempo ideal de sonicação é aos 60 min, visto que a primeira banda do espectro de absorção que foi analisada, para os 80 min de sonicação, apresenta valores inferiores de absorção do que o espectro para 60 min de sonicação.

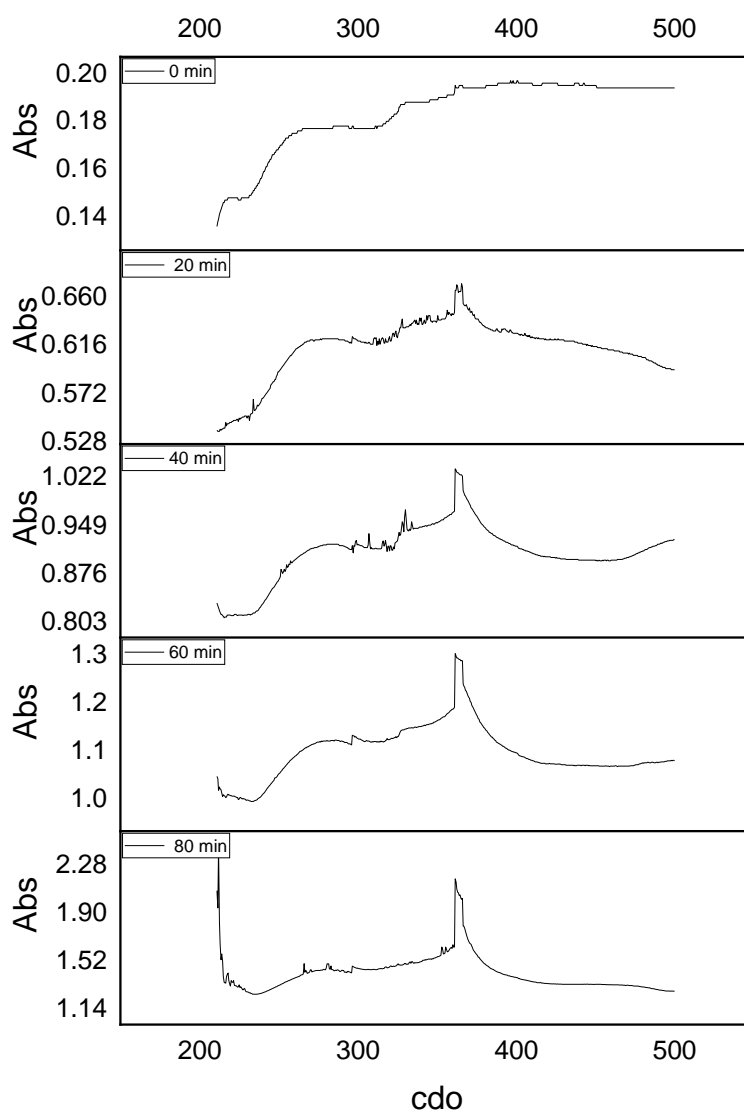


Figura 5.14 - Espectros de absorção do nanofluido de 0.75% de grafeno em etilenoglicol para diferentes tempos de sonicação.

### 5.1.3. pH

O pH foi medido inicialmente sem submeter o nanofluido a ultrassons, e foi também medido após os intervalos de homogeneização referidos, ou seja, após 20, 40, 60, 80 e 100 minutos de agitação de partículas. Antes de cada medição, controlou-se a temperatura, verificando que o nanofluido se encontrava sempre a 25°C, devido a ser um estudo sobre a estabilidade do nanofluido durante a preparação do mesmo. Para este efeito, este foi colocado num banho térmico à referida temperatura e, posteriormente, esta foi medida com um termómetro digital.

Foram registados os valores de pH para o nanofluido com 0.1% grafeno em água destilada com diferentes tempos de sonicação, Fig. 5.15.

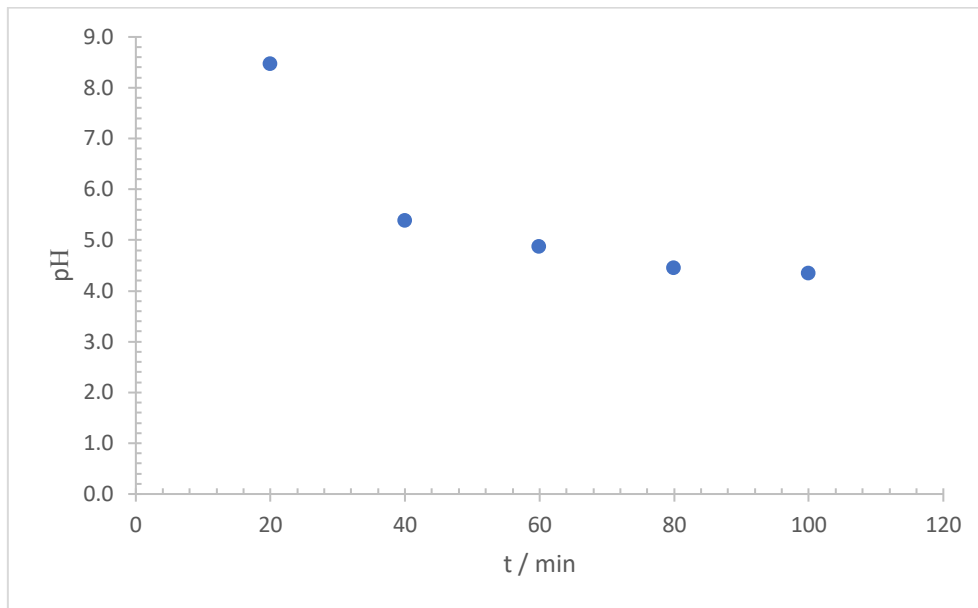


Figura 5.15 - Valores de pH do nanofluido de 0.1% em água destilada em função do tempo de sonicação a 25 °C.

Como se pode verificar pela Fig. 5.15 o valor de pH tende para um valor constante depois dos 80 min de sonicação, o que se pode concluir que, a partir dos 60 minutos de sonicação, o nanofluido tende a ficar estabilizado.

## 5.2. Viscosidade e densidade dos fluidos base

Analisou-se o comportamento da viscosidade e densidade em função da temperatura para a água destilada, o soro fisiológico, a glicerina e o etilenoglicol. Apresentamos primeiro a viscosidade cinemática, a massa volúmica e a viscosidade dinâmica da água destilada, estes valores são todos tabelados pela associação IAPWS - *The International Association for the Properties of Water and Steam*, como se pode ver na Tab. 5.1.

Tabela 5.2 - Valores tabelados da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica da água destilada [40].

T/K	$\nu/m^2s^{-1}$	$\rho(H_2O)/g\text{ cm}^{-3}$	$h/cP$
293.15	1.00E-06	0.9982	1.0016
298.15	8.93E-07	0.9971	0.8900
303.15	8.01E-07	0.9956	0.7972
308.15	7.34E-07	0.9941	0.7297
313.15	6.58E-07	0.9922	0.6528
318.15	6.02E-07	0.9903	0.5959
323.15	5.53E-07	0.9881	0.5465
328.15	5.11E-07	0.9857	0.5036
333.15	4.74E-07	0.9832	0.4660
338.15	4.42E-07	0.9806	0.4329
343.15	4.13E-07	0.9778	0.4035

A viscosidade cinemática da água destilada tem um comportamento exponencial, dado pela equação representada na Fig. 5.16, a qual contém um coeficiente de correlação de 0.99304, e apresenta uma diminuição com o aumento da temperatura.

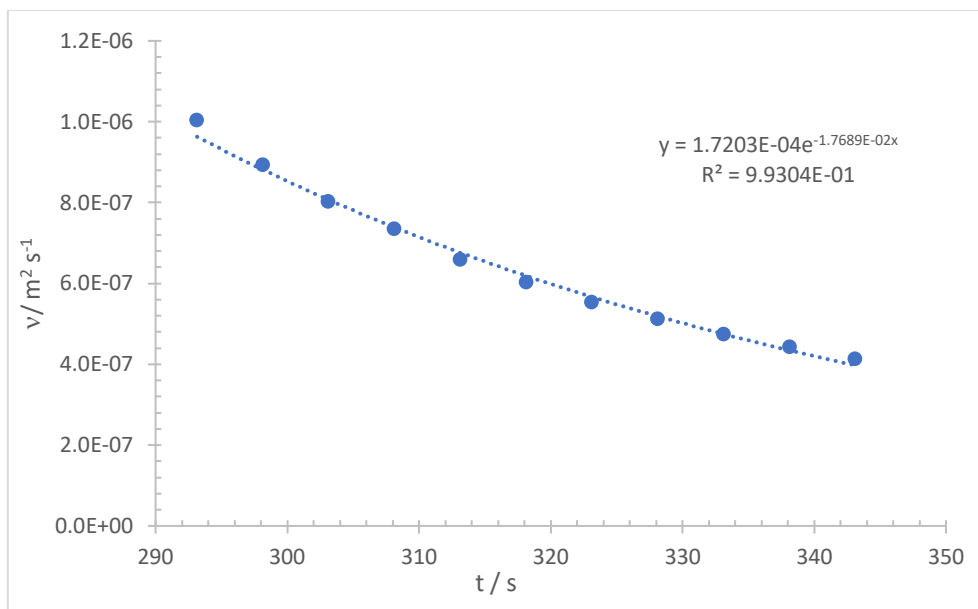


Figura 5.16 - Comportamento da viscosidade cinemática da água destilada com a variação da temperatura.

A massa volúmica da água destilada tem um comportamento em função da temperatura que se pode ajustar a um polinómio de grau 3, como está representado na Fig. 5.17, com o coeficiente de correlação de 1.

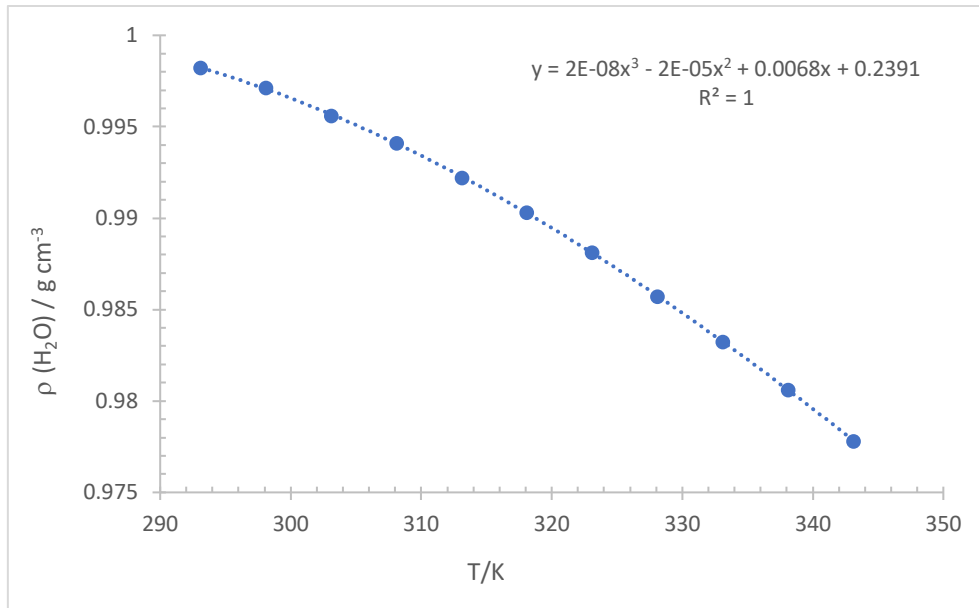


Figura 5.17 - Comportamento da massa volúmica da água destilada com a variação da temperatura.

A viscosidade dinâmica da água destilada apresenta um comportamento exponencial, em que esta diminui com o aumento da temperatura, como representado na Fig. 5.18, com um coeficiente de correlação de 0.9938.

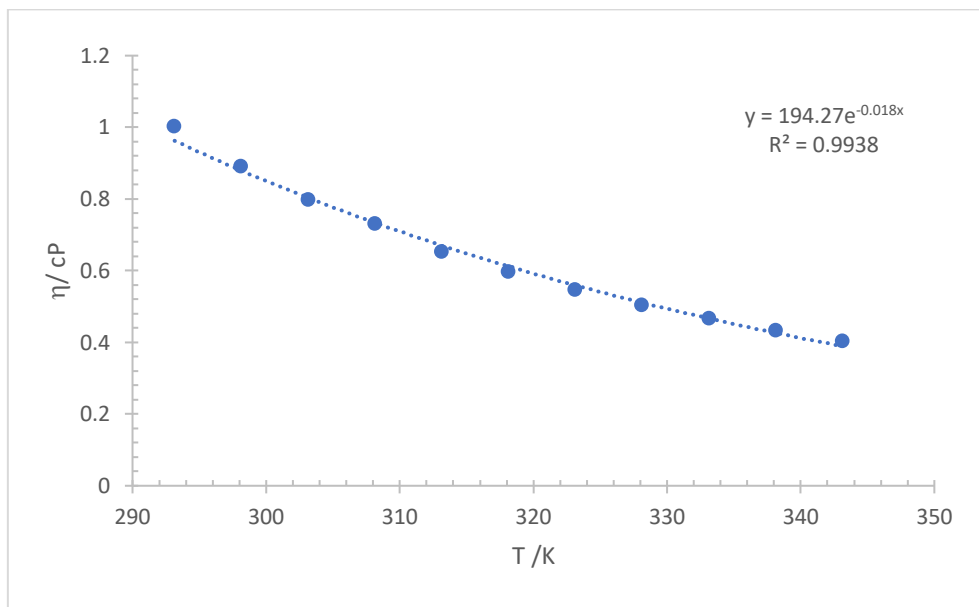


Figura 5.18 - Comportamento da viscosidade dinâmica da água destilada com a variação da temperatura.

O segundo fluido base com que se trabalhou foi o soro fisiológico, o qual apresenta os comportamentos presentes na Tab. 5.3. Os cálculos das incertezas encontram-se no

Anexo E (exemplo do cálculo da incerteza para a temperatura de 20 °C do viscosímetro) e Anexo F (exemplo do cálculo da incerteza do picnómetro para 20 °C).

Tabela 5.3 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do soro fisiológico e respetivas incertezas associadas.

T/K	$\alpha(C)/m^2s^{-2}$	$u/m^2s^{-1}$	$\alpha(u)/m^2s^{-1}$	$r_{(soro)}/g\text{ cm}^{-3}$	$\alpha(r)/g\text{ cm}^{-3}$	$h/Pa\text{ s}$	$h/cP$	$\alpha(h)/cP$
293.15	1.14E-11	9.44E-07	1.27E-09	1.0016	0.00023	9.45E-04	0.945	0.0013
303.15	7.43E-13	7.55E-07	6.76E-11	1.0012	0.00030	7.56E-04	0.756	0.0002
313.15	2.45E-12	6.21E-07	1.89E-10	0.9994	0.00047	6.21E-04	0.621	0.0003
323.15	1.88E-12	5.26E-07	1.26E-10	0.9970	0.00188	5.24E-04	0.524	0.0010
333.15	1.24E-12	4.52E-07	7.37E-11	1.0008	0.00038	4.52E-04	0.452	0.0002

Como podemos ver na Fig. 5.19, o soro fisiológico apresenta uma diminuição da viscosidade cinemática com o aumento da temperatura. O viscosímetro usado foi o 75 n° 6950.

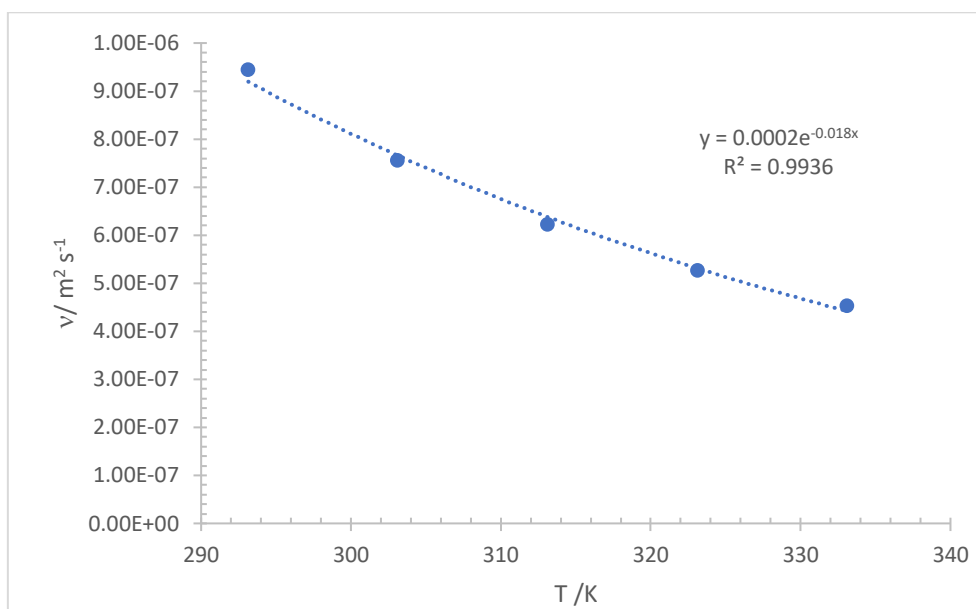


Figura 5.19 - Comportamento da viscosidade cinemática do soro fisiológico com a variação da temperatura.

Para o cálculo da massa volúmica do soro fisiológico, usou-se o picnómetro de 10 ml n°132, o qual se pode ajustar a um comportamento polinomial em função da temperatura, como se pode ver na Fig. 5.20.

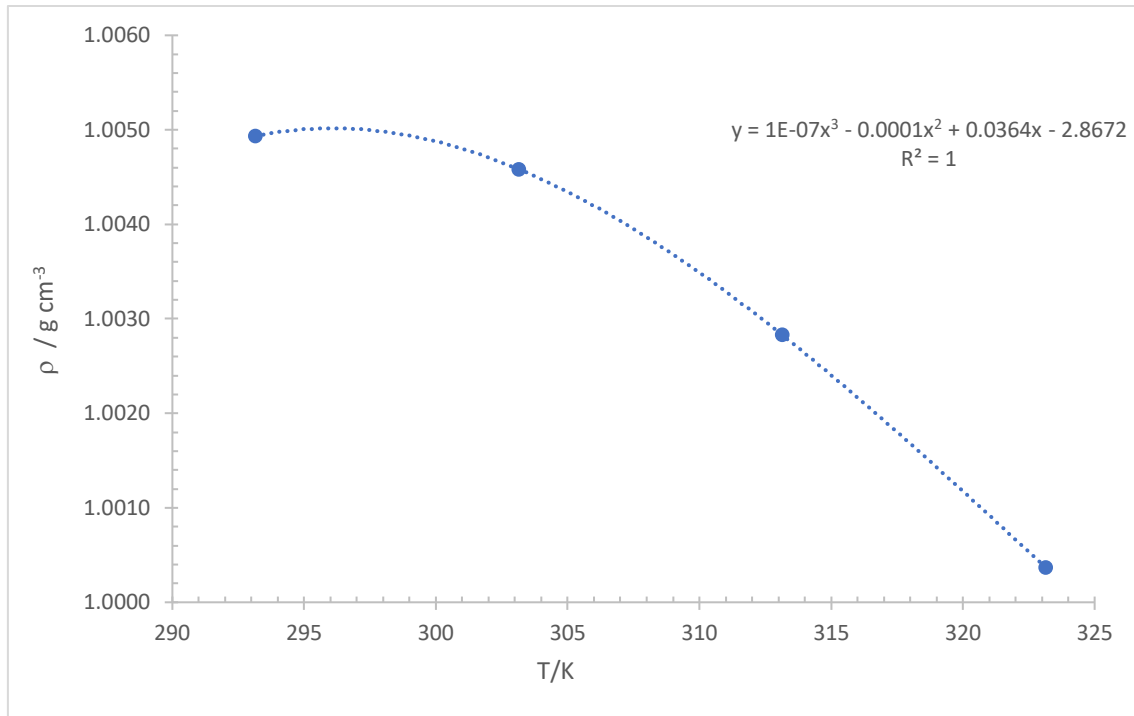


Figura 5.20 - Comportamento da massa volúmica do soro fisiológico com a variação da temperatura.

Por último, através da viscosidade cinemática do soro e da sua massa volúmica, calculou-se a sua viscosidade dinâmica, a qual tem um comportamento exponencial que diminui com o aumento da temperatura, Fig. 5.21.

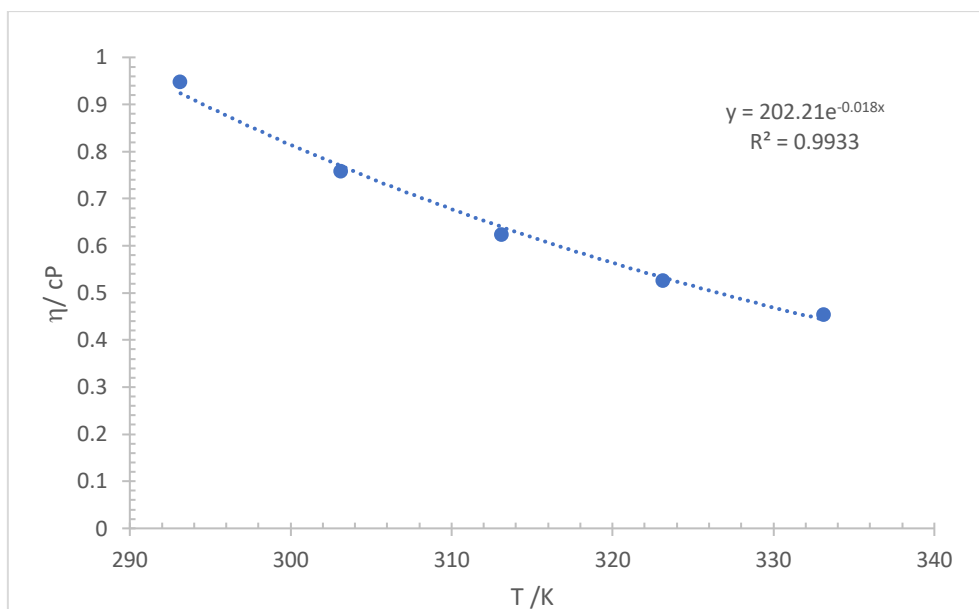


Figura 5.21 - Comportamento da viscosidade dinâmica do soro fisiológico com a variação da temperatura.

A glicerina apresenta os seguintes valores de viscosidade cinemática, dinâmica e de massa volúmica representados na Tab. 5.4.

Tabela 5.4 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica da glicerina e respetivas incertezas associadas.

T/K	$\nu/\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$\alpha(\nu)/\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$\rho_{\text{(glicerina)}}/\text{g cm}^{-3}$	$\alpha(\rho)/\text{g cm}^{-3}$	$h/\text{cP}$	$\alpha(h)/\text{cP}$
293.15	1.40E-04	1.10E-07	1.2435	0.0022	173.508	0.333
303.15	7.44E-05	4.56E-08	1.2342	0.0005	91.830	0.068
313.15	3.96E-05	2.89E-08	1.2275	0.0003	48.564	0.038
323.15	2.23E-05	6.45E-08	1.2213	0.0005	27.198	0.079
333.15	1.32E-05	1.47E-08	1.2164	0.0005	16.063	0.019

A glicerina tem uma viscosidade que diminui de uma forma exponencial com o aumento da temperatura, Fig. 5.22. O viscosímetro usado foi o 200 n°183.

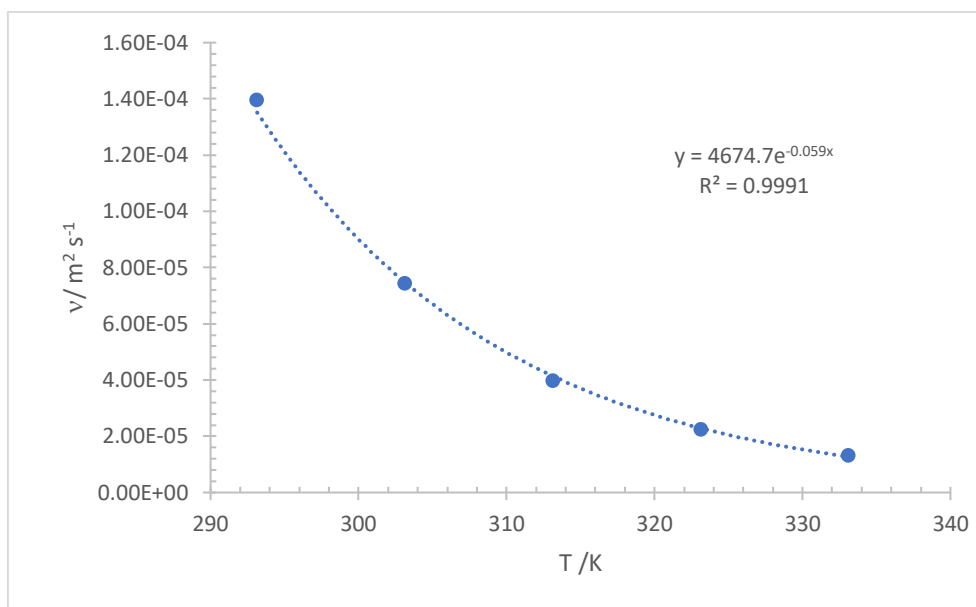


Figura 5.22 - Comportamento da viscosidade cinemática da glicerina com a variação da temperatura.

Com o aumento da temperatura, a massa volúmica da glicerina diminui exponencialmente, como representado na Fig. 5.23. O picnómetro usado foi de 10 ml n° 167.

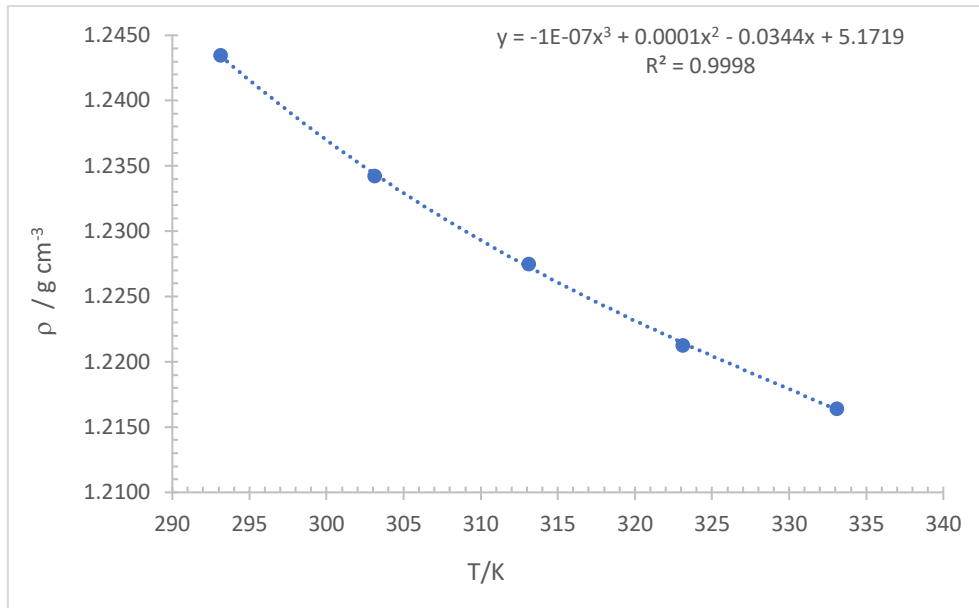


Figura 5.23 - Comportamento da massa volúmica da glicerina com a variação da temperatura.

Para o cálculo da viscosidade dinâmica, multiplicou-se a viscosidade cinemática e a massa volúmica da glicerina, e esta apresenta uma diminuição exponencial com a temperatura, Fig. 5.24.

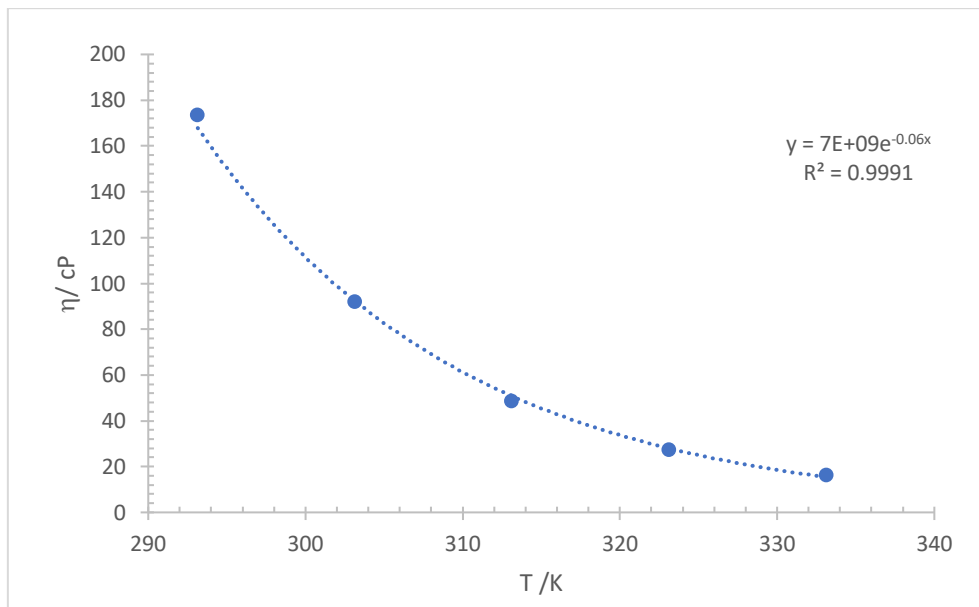


Figura 5.24 - Comportamento da viscosidade dinâmica da glicerina com a variação da temperatura.

E por fim, apresentamos o etilenoglicol, que foi o quarto e último fluido base usado para o presente estudo.

Tabela 5.5 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do etilenoglicol e respectivas incertezas associadas.

T/K	$\nu/m^2s^{-1}$	$\alpha(\nu)/m^2s^{-1}$	$\rho_{(EG)}/g\text{ cm}^{-3}$	$\alpha(\rho)/g\text{ cm}^{-3}$	h / cP	$\alpha(h) / \text{cP}$
293.15	1.63826E-05	9.8576E-09	1.1134	0.0018	18.240	0.032
303.15	1.14323E-05	1.54955E-09	1.1064	0.0003	12.649	0.003
313.15	7.53943E-06	1.66521E-09	1.0993	0.0003	8.288	0.003
323.15	5.39417E-06	9.03493E-10	1.0922	0.0006	5.892	0.004
333.15	3.96348E-06	8.98079E-10	1.0849	0.0010	4.300	0.004

Este apresenta uma viscosidade cinemática que diminui exponencialmente com a temperatura, Fig. 5.25. O viscosímetro usado foi o 100 n° 7246.

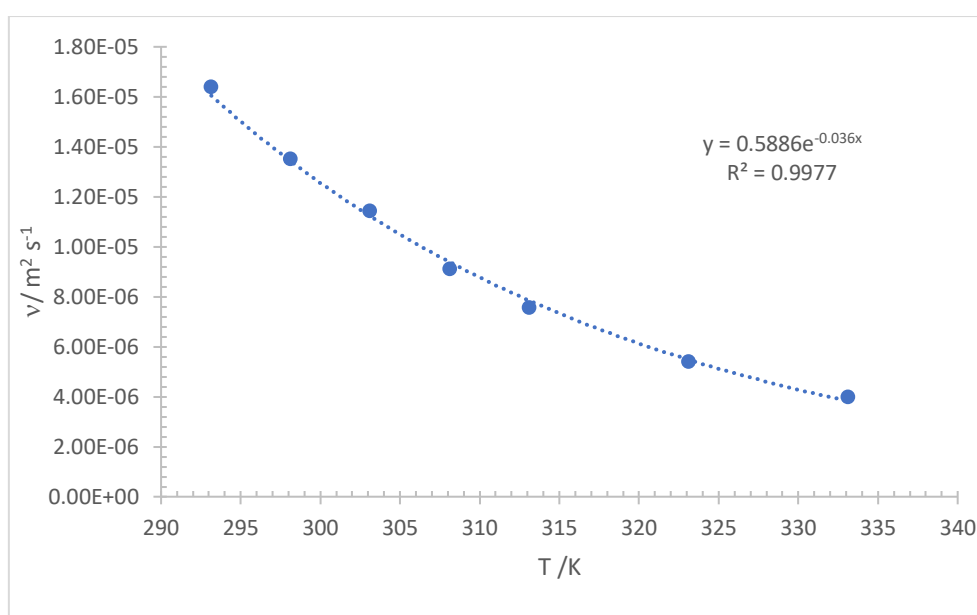


Figura 5.25 - Comportamento da viscosidade cinemática do etilenoglicol com a variação da temperatura.

A massa volúmica do etilenoglicol apresenta uma função polinomial com o aumento da temperatura, Fig. 5.26. O picnómetro usado foi de 10 ml n° 167.

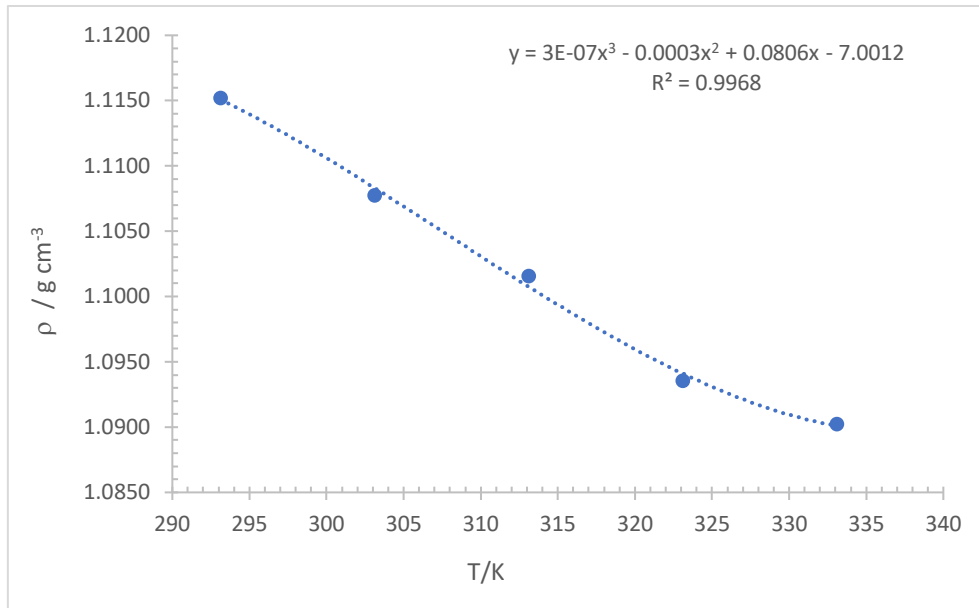


Figura 5.26 - Comportamento da massa volúmica do etilenoglicol com a variação da temperatura.

Por fim, calculamos a viscosidade dinâmica do etilenoglicol, a qual diminui exponencialmente com o aumento da temperatura, Fig.5.27.

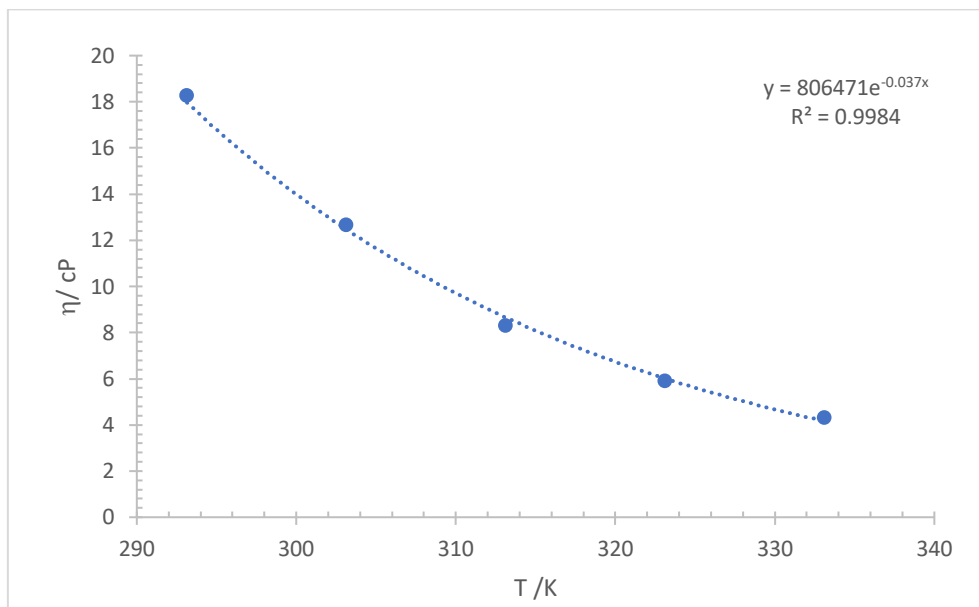


Figura 5.27 - Comportamento da viscosidade dinâmica do etilenoglicol com a variação da temperatura.

### 5.3. Viscosidade e densidade dos nanofluidos de 0,1% grafeno

Depois de estudarmos os diferentes fluidos bases, apresentamos a variação dos seus comportamentos com a adição de grafeno em função da temperatura de 20 °C (293.15 K)

a 60 °C (333.15K), de forma a formar nanofluidos com a fração volúmica de 0.1% de grafeno nos diferentes fluidos bases apresentados.

O primeiro aqui exposto é o nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada com 80 min de sonicação, Tab. 5.6.

Tabela 5.6 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada, e respetivas incertezas associadas.

T/K	$u/m^2s^{-1}$	$\alpha(u)/m^2s^{-1}$	$\Gamma_{(0,1\%Grf+H2O)}/g\text{ cm}^{-3}$	$\alpha(\Gamma)/g\text{ cm}^{-3}$	$h/Pa\text{ s}$	$h/cP$	$\alpha(h)/cP$
293.15	9.6071E-07	2.22E-09	0.9888	0.0016095	9.500E-04	0.950	0.0027
303.15	7.5332E-07	3.20E-09	0.9868	0.0002216	7.434E-04	0.743	0.0032
313.15	6.0542E-07	2.11E-09	0.9813	0.0003082	5.941E-04	0.594	0.0021
323.15	5.1645E-07	1.17E-09	0.9731	0.00031	5.025E-04	0.503	0.0011
333.15	4.4108E-07	1.95E-10	0.9720	0.0003627	4.287E-04	0.429	0.0002

O nanofluido apresenta uma pequena diminuição da viscosidade cinemática em relação à água destilada, mas o seu comportamento não sofre alterações significativas, ou seja, também diminui com o aumento da temperatura, Fig. 5.28. O viscosímetro usado foi o 100 n° 7246.

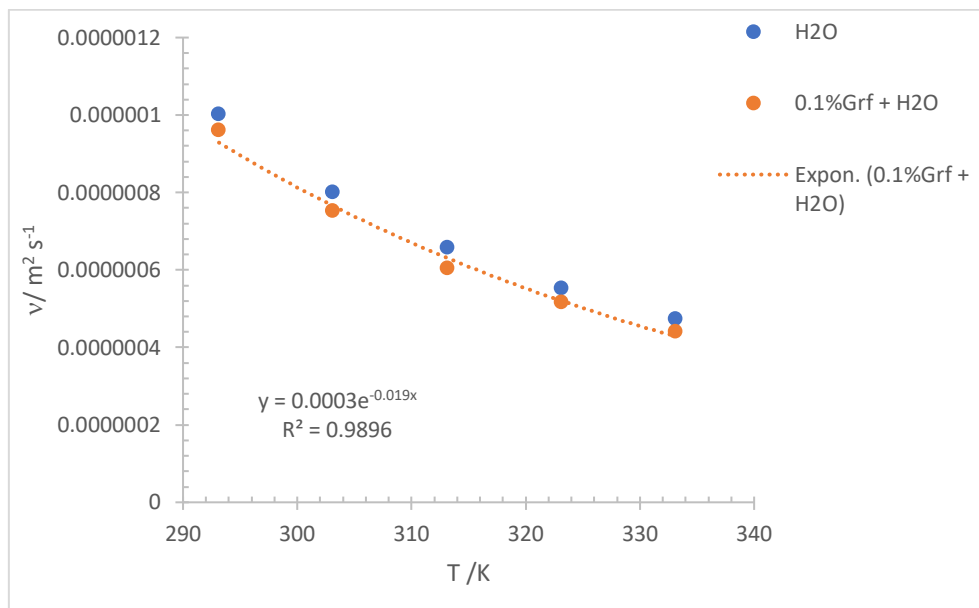


Figura 5.28 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada e da água destilada com a variação da temperatura.

A massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada com 80 min de sonicação é comparativamente mais baixa do que da água destilada, Fig. 5.29. E também diminui com o aumento da temperatura. O picnómetro usado foi de 10 ml n°167.

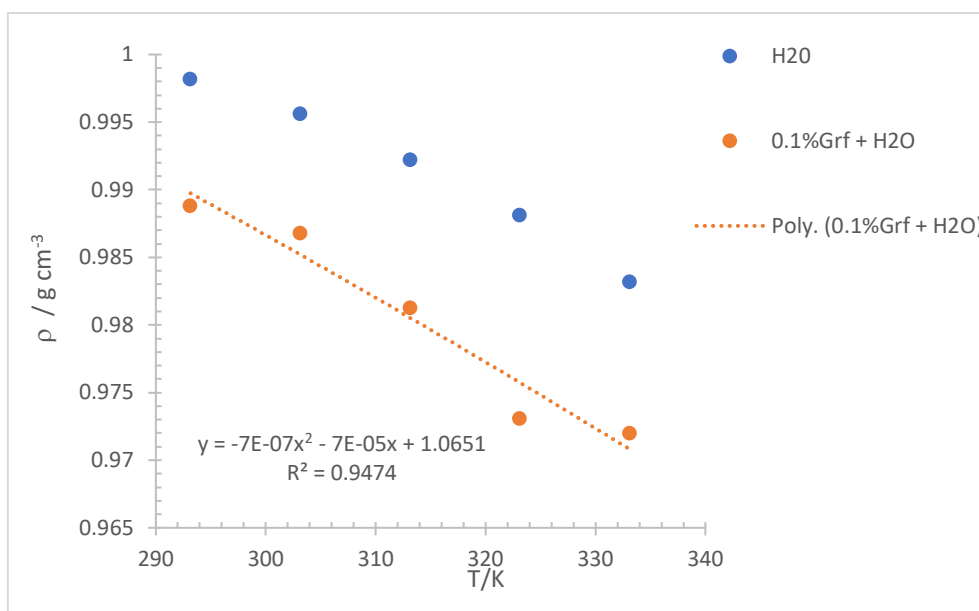


Figura 5.29- Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada e da água destilada com a variação da temperatura.

A viscosidade dinâmica do nanofluido e da água destilada tem um comportamento parecido, diminuindo exponencialmente com a temperatura. No entanto, o nanofluido apresenta valores de viscosidade um pouco mais baixos, Fig. 5.30.

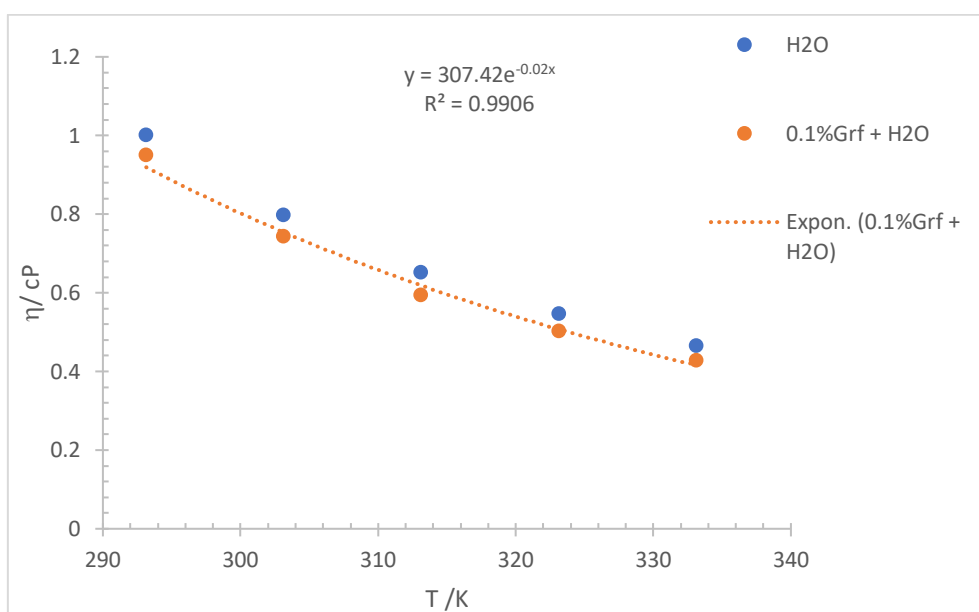


Figura 5.30 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em água destilada e da água destilada com a variação da temperatura.

O nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico apresenta os seguintes valores para a viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica, Tab. 5.7.

Tabela 5.7 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e respectivas incertezas associadas.

T/K	$\nu/m^2s^{-1}$	$\alpha(\nu)/m^2s^{-1}$	$\rho_{(0.1\%Grf+soro)}/g\text{ cm}^{-3}$	$\alpha(\rho)/g\text{ cm}^{-3}$	$h/cP$	$\alpha(h)/cP$
293.15	9.29E-07	1.25E-09	1.0082	0.0017	0.937	0.0020
303.15	7.34E-07	6.58E-11	1.0049	0.0004	0.738	0.0003
313.15	6.11E-07	1.85E-10	1.0037	0.0004	0.613	0.0003
323.15	4.98E-07	1.20E-10	1.0009	0.0003	0.498	0.0002
333.15	4.34E-07	7.08E-11	0.9995	0.0004	0.434	0.0002

A viscosidade dinâmica do nanofluido é bastante semelhante à do soro e apresenta uma diminuição com o aumento da temperatura, Fig. 5.31. O viscosímetro usado foi o 75 n° 6950.

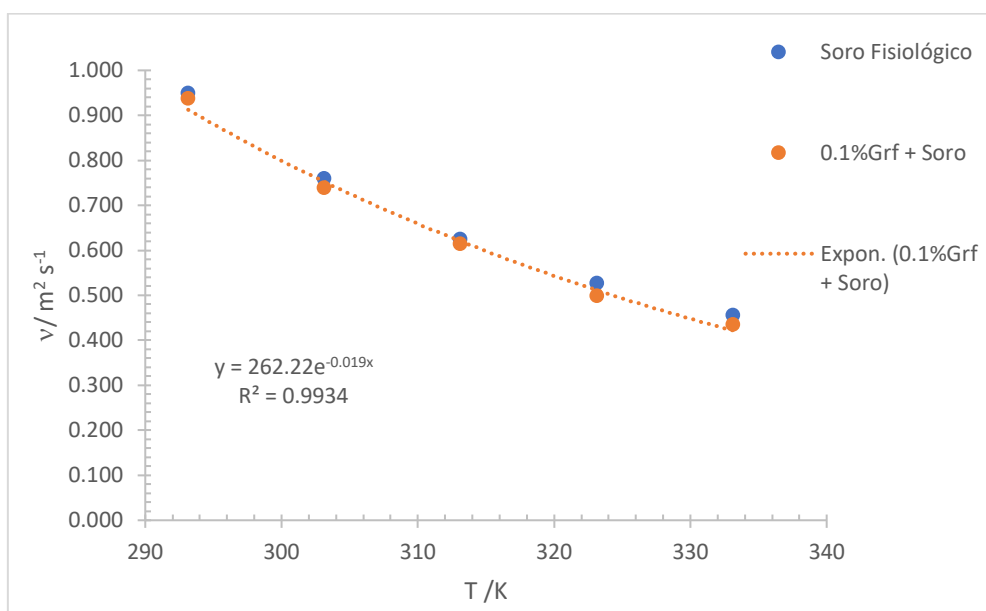


Figura 5.31 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de Grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura.

O picnómetro usado para o cálculo da massa volúmica do nanofluido foi o de 10 ml n° 167. Este apresenta uma diminuição da massa volúmica com o aumento da temperatura, havendo um ganho de massa volúmica para temperaturas inferiores a 300K, Fig. 5.32, em comparação aos valores da massa volúmica do soro fisiológico.

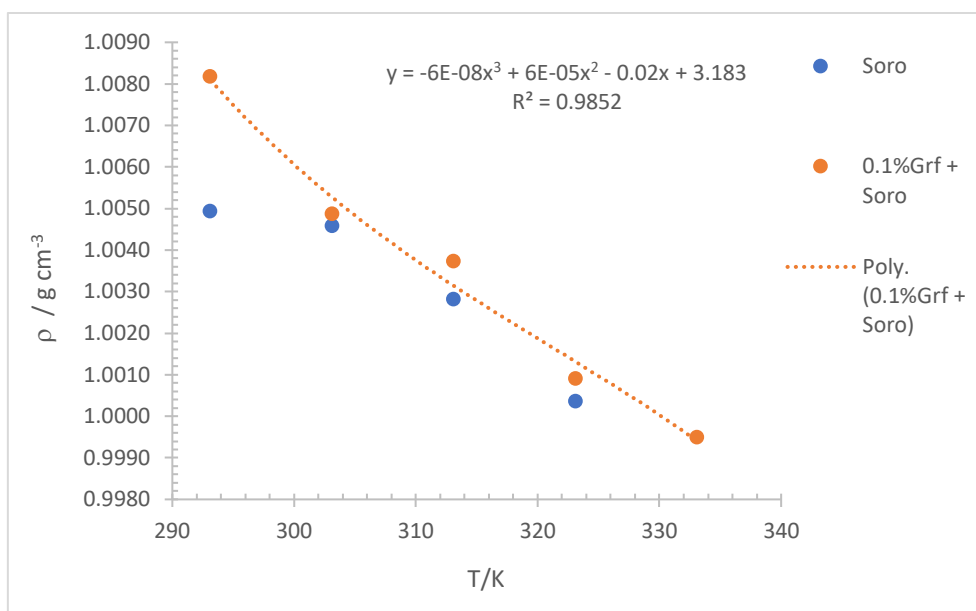


Figura 5.32 - Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura.

A viscosidade dinâmica do soro e do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro são bastante semelhantes, diminuindo com o aumento da temperatura, Fig. 5.33.

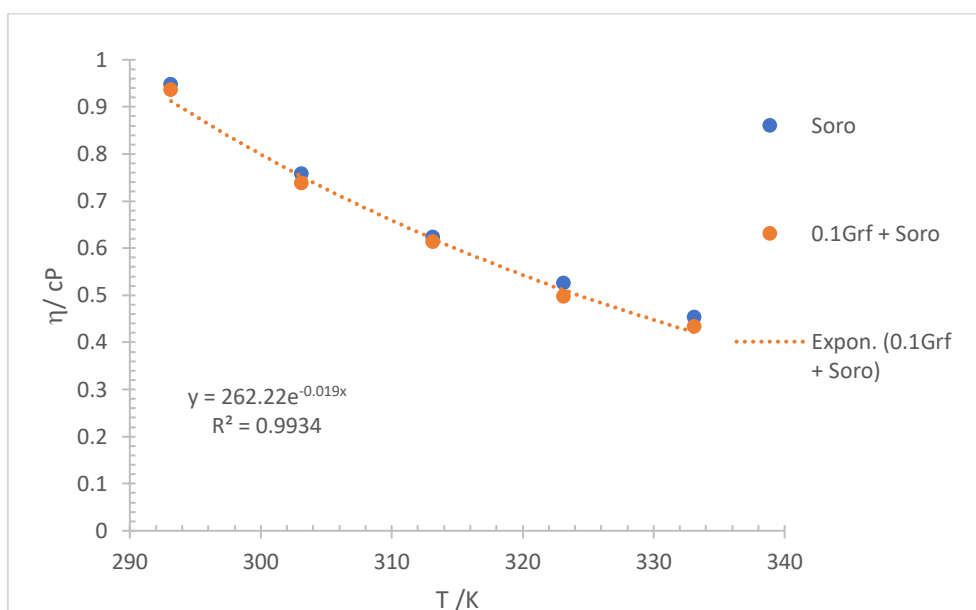


Figura 5.33 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura.

De seguida, estudou-se o nanofluido de glicerina, a qual apresenta os valores contidos na Tab. 5.8.

Tabela 5.8 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina, e respetivas incertezas associadas.

T/K	$\nu/m^2s^{-1}$	$\alpha(\nu)/m^2s^{-1}$	$\rho_{(0.1\%Grf+glicerina)}/g\ cm^{-3}$	$\alpha(\rho)/g\ cm^{-3}$	h / cP	$\alpha(h)/cP$
293.15	1.40E-04	1.10E-07	1.2324	0.0020	171.988	0.312
303.15	6.84E-05	4.19E-08	1.2278	0.0003	83.933	0.055
313.15	3.70E-05	2.71E-08	1.2227	0.0003	45.218	0.035
323.15	2.16E-05	6.26E-08	1.2154	0.0004	26.268	0.077
333.15	1.32E-05	0.00E+00	1.2131	0.0005	15.988	0.006

A viscosidade cinemática do nanofluido e da glicerina são bastante semelhantes, tendo o mesmo comportamento, ou seja, diminui com o aumento da temperatura, Fig. 5.34. O viscosímetro usado foi o 200 nº183.

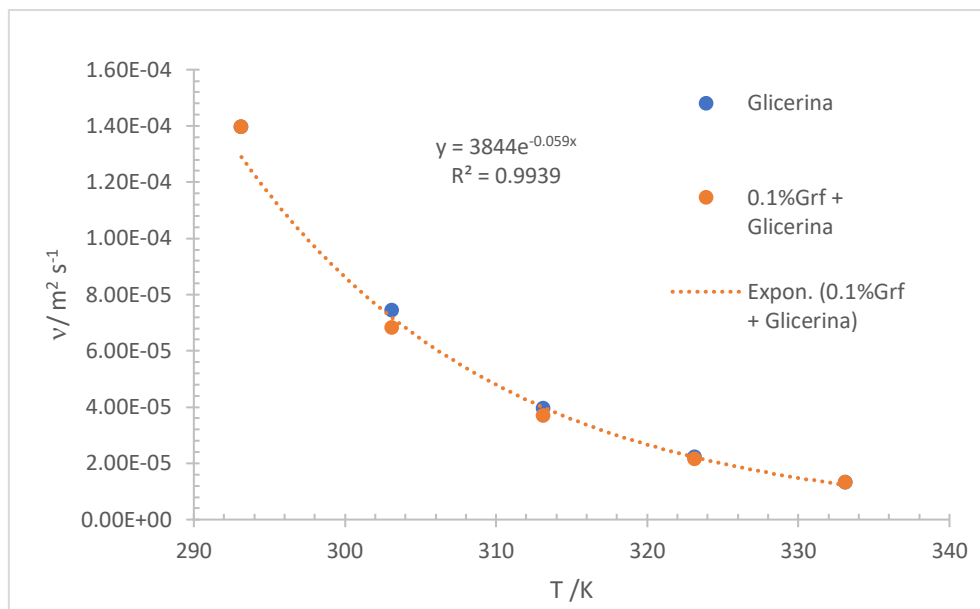


Figura 5.34 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina com a variação da temperatura.

Comparando os valores da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina, repara-se que o nanofluido apresenta valores menores, ou seja, há uma perda da massa volúmica. No entanto, o comportamento polinomial é bastante semelhante, como representado na Fig. 5.35. O picnómetro usado foi de 10 ml nº 167.

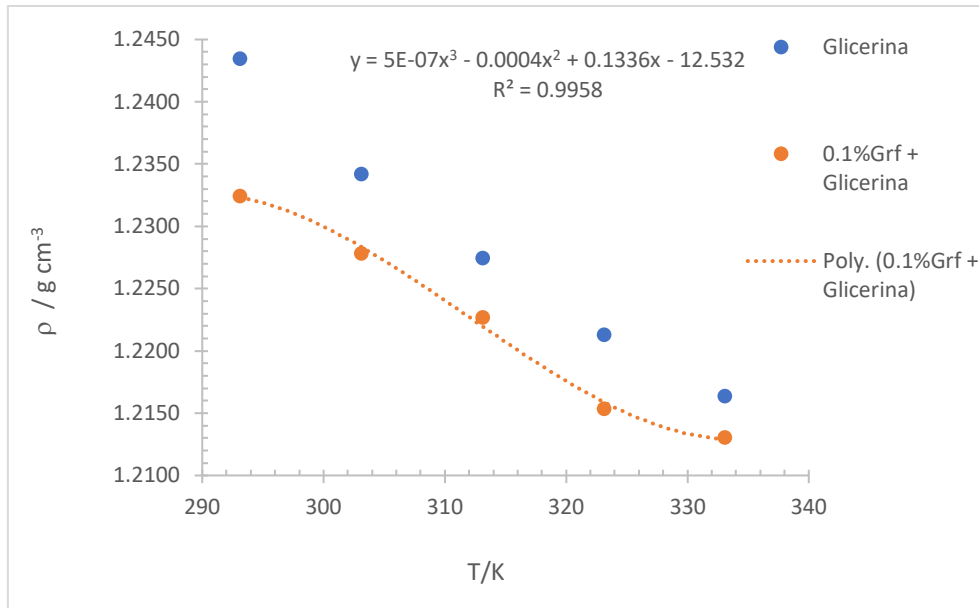


Figura 5.35 - Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina com a variação da temperatura.

Os valores da viscosidade dinâmica do nanofluido e da glicerina são bastante semelhantes, apresentando o mesmo comportamento exponencial, Fig. 5.36.

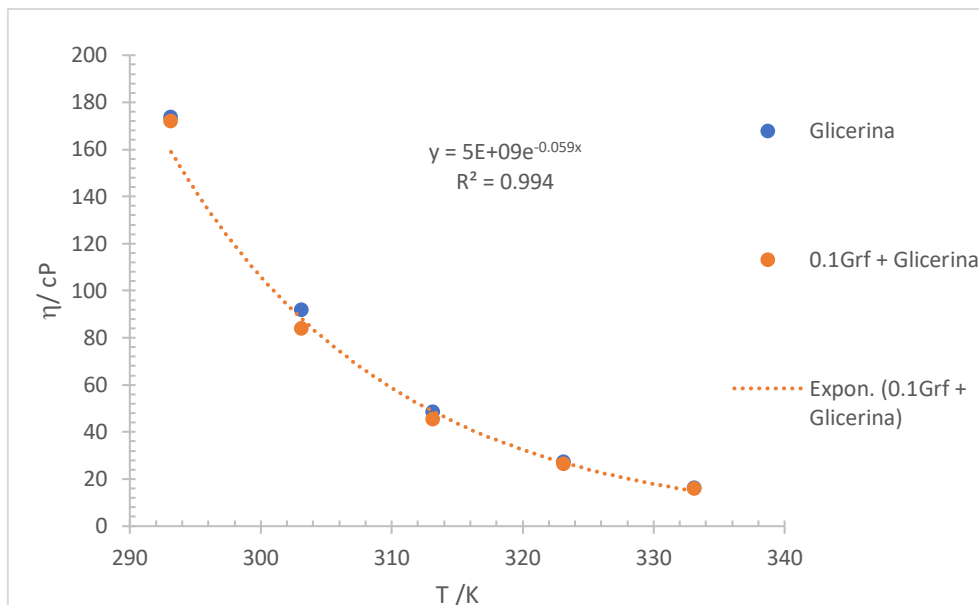


Figura 5.36 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em glicerina e da glicerina com a variação da temperatura.

Os valores experimentais para o nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol estão apresentados na Tab.5.9 e as suas incertezas associadas.

Tabela 5.9 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e respectivas incertezas associadas.

T/K	$u/m^2s^{-1}$	$\alpha(u)/m^2s^{-1}$	$\rho_{(0.1\%Grf + EG)}/g\ cm^{-3}$	$\alpha(\rho)/g\ cm^{-3}$	$h/cP$	$\alpha(h)/cP$
293.15	1.89E-05	1.14E-08	1.1057	0.0018	20.856	0.037
303.15	1.26E-05	1.71E-09	1.0971	0.0003	13.820	0.004
313.15	8.68E-06	1.92E-09	1.0907	0.0003	9.467	0.003
323.15	6.33E-06	1.06E-09	1.0845	0.0004	6.861	0.003
333.15	4.57E-06	1.03E-09	1.0802	0.0005	4.933	0.002

O nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol apresenta valores maiores de viscosidade cinemática face ao etilenoglicol. No entanto, com o aumento da temperatura, essa diferença deixa de ser notável, Fig. 5.37. A viscosidade dinâmica do nanofluido também diminui exponencialmente com o aumento da temperatura e o viscosímetro usado foi o 100 n°7246.

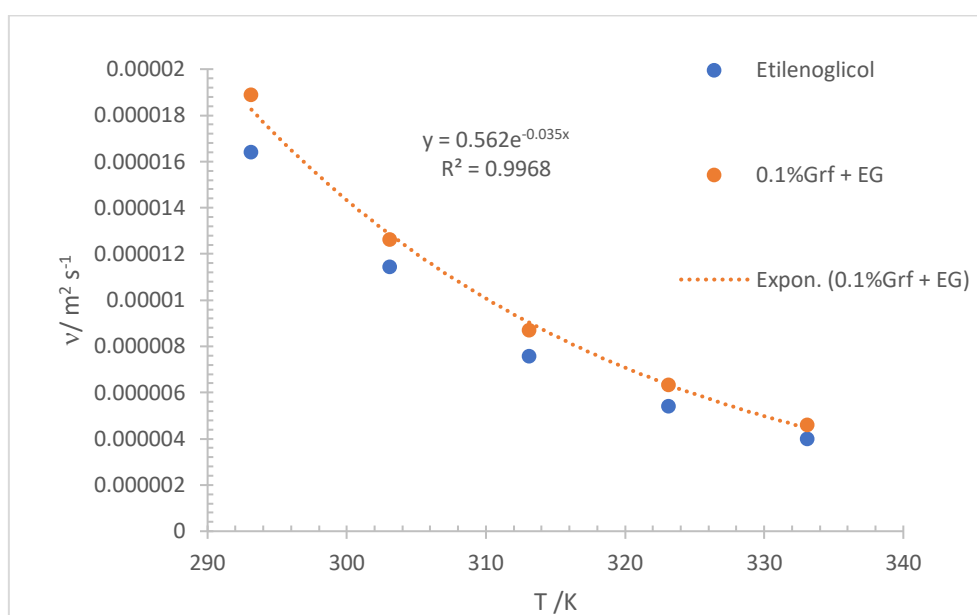


Figura 5.37 - Comportamento da viscosidade cinemática do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e do etilenoglicol com a variação da temperatura.

Já em relação à massa volúmica, o nanofluido apresenta uma perda face ao etilenoglicol puro. O picnómetro usado foi de 10 ml n°167. A massa volúmica no nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol também diminui com a temperatura, Fig. 5.38.

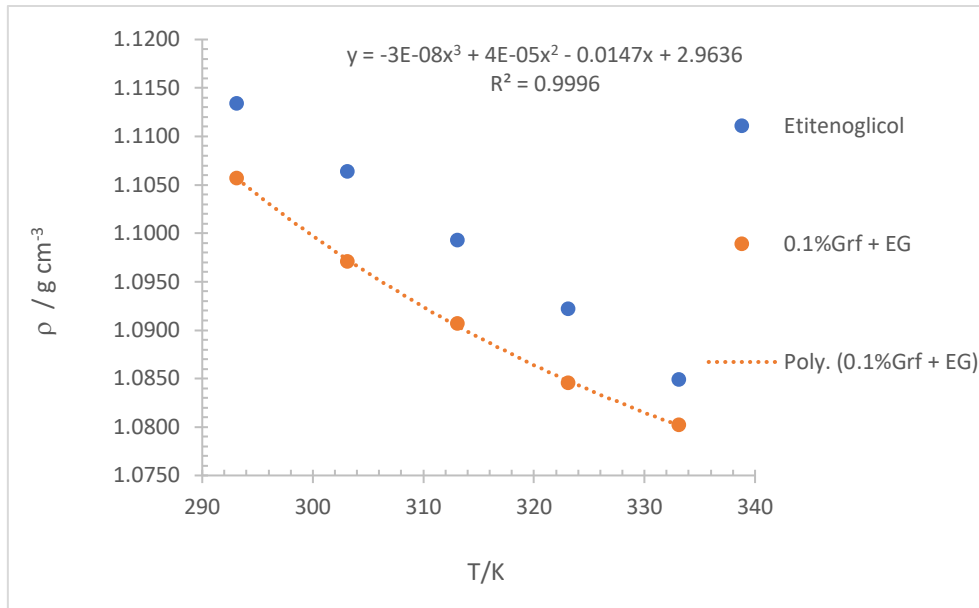


Figura 5.38 - Comportamento da massa volúmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e do etilenoglicol com a variação da temperatura.

A viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol apresenta valores um pouco superiores comparado com os valores do etilenoglicol, mas o seu comportamento é semelhante, diminui com a temperatura, Fig. 5.39.

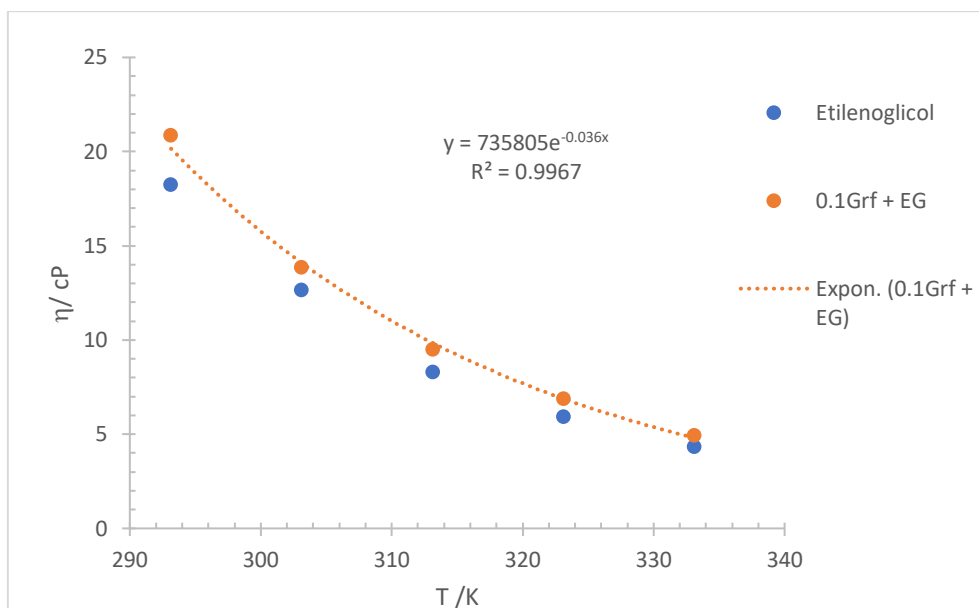


Figura 5.39 - Comportamento da viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e do etilenoglicol com a variação da temperatura.

## 5.4. Viscosidade e densidade dos nanofluidos de grafeno e etilenoglicol

Estudou-se a viscosidade cinemática, a massa volúmica e a viscosidade dinâmica para diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol, sendo estas de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5% e 0.75%.

Para a fração volúmica de 0.1% de grafeno em etilenoglicol foi usado o viscosímetro 100 nº7246. E o picnómetro de 10 ml nº167. Os valores experimentais da viscosidade cinemática, dinâmica e da massa volúmica encontram-se na Tab. 5.10.

Tabela 5.10 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.1% de grafeno em etilenoglicol e respetivas incertezas associadas.

T/K	$\nu/m^2s^{-1}$	$\alpha(\nu)/m^2s^{-1}$	$\rho_{(0.1\%Gr+EG)} / g\ cm^{-3}$	$\alpha(\rho) / g\ cm^{-3}$	h / cP	$\alpha(h) / cP$
293.15	1.89E-05	1.13E-08	1.1057	0.0018	20.8563	0.0366
303.15	1.26E-05	1.70E-09	1.0971	0.0003	13.8198	0.0039
313.15	8.68E-06	1.91E-09	1.0907	0.0003	9.4671	0.0030
323.15	6.33E-06	1.05E-09	1.0845	0.0004	6.8608	0.0030
333.15	4.57E-06	0.00E+00	1.0802	0.0005	4.9332	0.0021

Para a fração volúmica de 0.2% de grafeno em etilenoglicol usou-se o viscosímetro 100 nº7246 e o picnómetro de 10 ml nº167. Os valores calculados estão apresentados na Tab. 5.11.

Tabela 5.11 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.2% de grafeno em etilenoglicol e respetivas incertezas associadas.

T/K	$\nu/m^2s^{-1}$	$\alpha(\nu)/m^2s^{-1}$	$\rho_{(0.2\%Gr+EG)} / g\ cm^{-3}$	$\alpha(\rho) / g\ cm^{-3}$	h / cP	$\alpha(h) / cP$
293.15	2.41E-05	1.45E-08	1.1185	0.0018	26.9855	0.0472
303.15	1.62E-05	2.19E-09	1.1110	0.0004	18.0139	0.0071
313.15	1.13E-05	2.48E-09	1.1047	0.0003	12.4396	0.0045
323.15	8.06E-06	1.34E-09	1.0965	0.0004	8.8406	0.0037
333.15	6.04E-06	1.36E-09	1.0920	0.0005	6.5983	0.0032

Para a fração volúmica de 0.3% de grafeno em etilenoglicol usou-se o viscosímetro 200 nº182 e o picnómetro de 10 ml nº167. Os valores calculados encontram-se na Tab. 5.12.

Tabela 5.12 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.3% de grafeno em etilenoglicol e respetivas incertezas associadas.

T/K	$u/m^2s^{-1}$	$\alpha(u)/m^2s^{-1}$	$r_{(0.3\%Grf+EG)} / g\ cm^{-3}$	$\alpha(r) / g\ cm^{-3}$	h / cP	$\alpha(h) / cP$
293.15	2.38E-05	1.27E-08	1.1199	0.0018	26.7061	0.0459
303.15	2.15E-05	1.30E-08	1.1129	0.0003	23.9129	0.0156
313.15	1.75E-05	1.36E-08	1.1058	0.0004	19.3341	0.0167
323.15	1.22E-05	9.28E-09	1.0998	0.0004	13.4115	0.0111
333.15	7.36E-06	7.36E-09	1.0953	0.0005	8.0655	0.0089

Para a fração volúmica de 0.5% de grafeno em etilenoglicol usou-se o viscosímetro 200 nº182 e o picnómetro de 10 ml nº167. Os valores calculados estão na Tab. 5.13.

Tabela 5.13 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.5% de grafeno em etilenoglicol e respetivas incertezas associadas.

T/K	$u/m^2s^{-1}$	$\alpha(u)/m^2s^{-1}$	$r_{(0.5\%Grf+EG)} / g\ cm^{-3}$	$\alpha(r) / g\ cm^{-3}$	h / cP	$\alpha(h) / cP$
293.15	7.23E-05	3.85E-08	1.1139	0.0018	80.5619	0.1392
303.15	6.40E-05	3.88E-08	1.1058	0.0003	70.7735	0.0467
313.15	4.81E-05	3.76E-08	1.0983	0.0003	52.8638	0.0431
323.15	2.92E-05	2.22E-08	1.0894	0.0005	31.8264	0.0287
333.15	1.62E-05	1.62E-08	1.0847	0.0006	17.6230	0.0201

Para a fração volúmica de 0.75% de grafeno em etilenoglicol usou-se o viscosímetro 200 nº183 e o picnómetro de 10 ml nº167. Os valores calculados estão na Tab. 5.14. Nesta tabela, só temos pontos para 3 temperaturas diferentes porque para temperaturas superiores, o nanofluido ficou agarrado às paredes do tubo capilar, impedindo, assim, a medição do tempo de escoamento.

Tabela 5.14 - Valores experimentais da viscosidade cinemática, massa volúmica e viscosidade dinâmica do nanofluido de 0.75% de grafeno em etilenoglicol e respetivas incertezas associadas.

T/K	$u/m^2s^{-1}$	$\alpha(u)/m^2s^{-1}$	$r_{(0.75\%Grf+EG)} / g\ cm^{-3}$	$\alpha(r) / g\ cm^{-3}$	h / cP	$\alpha(h) / cP$
293.15	2.05E-04	1.61E-07	1.1135	0.0018	228.4515	0.4162
303.15	1.27E-04	7.76E-08	1.1039	0.0003	139.6705	0.0931
313.15	8.03E-05	5.87E-08	1.0977	0.0003	88.1063	0.0677

De seguida, apresentamos a viscosidade cinemática para todas as diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol em função da temperatura como representado na Fig. 5.40. Observa-se, então, que ambas as viscosidades aumentam com o aumento da temperatura e ambas diminuem com o aumento da fração volúmica.

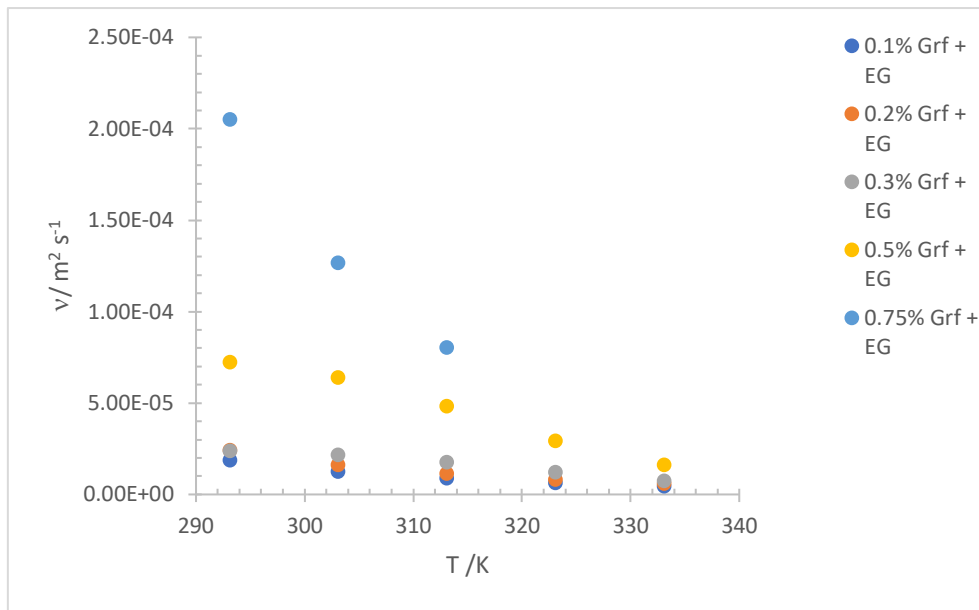


Figura 5.40 - Comportamento da viscosidade cinemática em função da temperatura para nanofluidos de diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol.

A amostra que apresenta maior massa volúmica é a de fração volúmica de 0.3% e de seguida a de 0.2%, e a que apresenta menor é a de 0.1%. No entanto, todos os casos apresentam uma diminuição com o aumento da temperatura, Fig. 5.41.

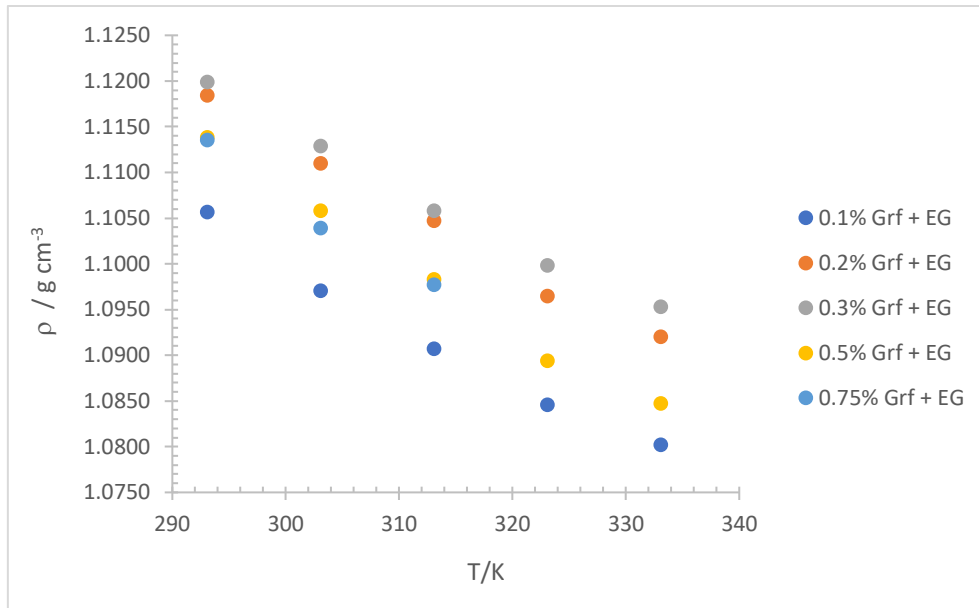


Figura 5.41 - Comportamento da massa volúmica em função da temperatura para nanofluidos de diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol.

Para a viscosidade dinâmica, a amostra que apresenta maiores valores é a de fração volúmica de 0.75% de grafeno em etilenoglicol, sendo que quanto menor a fração volúmica, menor a viscosidade dinâmica, Fig. 5.42. A viscosidade dinâmica diminui com a temperatura em todos os casos.

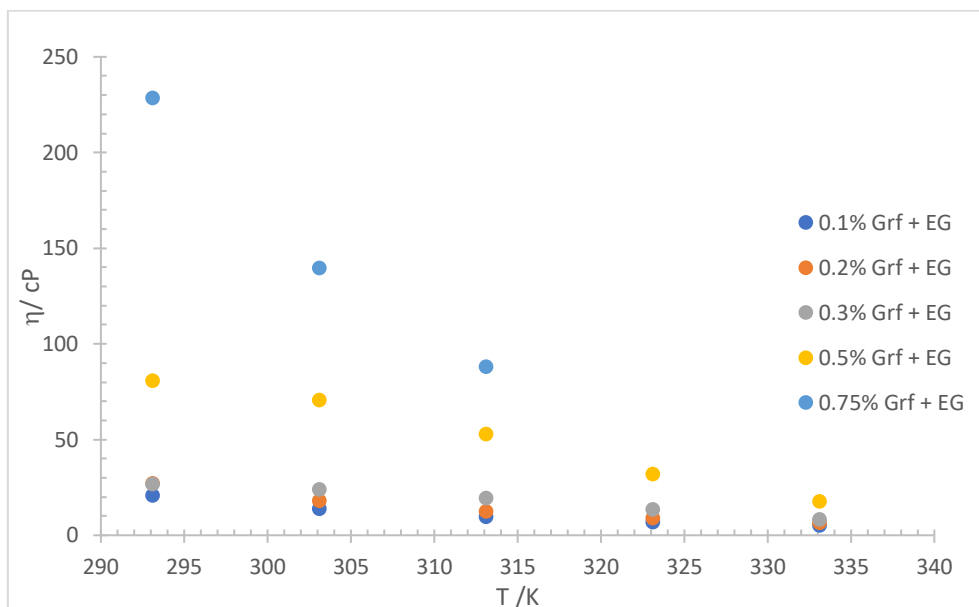


Figura 5.42 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura para nanofluidos de diferentes frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol.

Outro estudo que se fez foi a viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para uma mesma temperatura, como mostra a Tab. 5.15.

Tabela 5.15 - Valores experimentais da viscosidade dinâmica para todas frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	20.856	13.820	9.467	6.861	4.933
0.2	26.986	18.014	12.440	8.841	6.598
0.3	26.706	23.913	19.334	13.411	8.066
0.5	80.562	70.774	52.864	31.826	17.623
0.75	228.451	139.671	88.106		

A Fig. 5.43 representa os valores da Tab. 5.15, onde se pode ver um aumento da viscosidade dinâmica com o aumento da fração volúmica. E por outro lado, com o aumento da temperatura, os valores da viscosidade dinâmica diminuem.

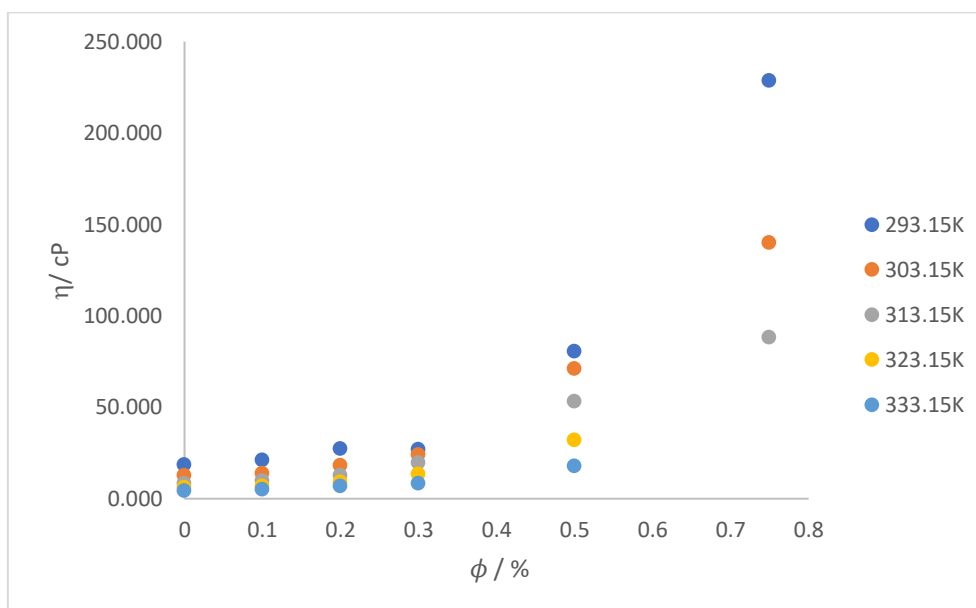


Figura 5.43 - Comportamento da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica de grafeno em etilenoglicol para todas as temperaturas estudadas.

Este estudo da viscosidade dinâmica em função de todas as frações volúmicas é bastante relevante porque possibilita a comparação com os modelos teóricos a seguir apresentados.

## 5.5. Condutividade Elétrica

Para perceber o comportamento da condutividade elétrica de um nanofluido, mediu-se para o soro fisiológico e para o nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico com 80 min de sonicação, Fig. 5.44. E com isto percebemos então que, a condutividade elétrica aumenta exponencialmente com a temperatura. No entanto, o nanofluido apresenta valores inferiores de condutividade elétrica comparando com o seu fluido base.

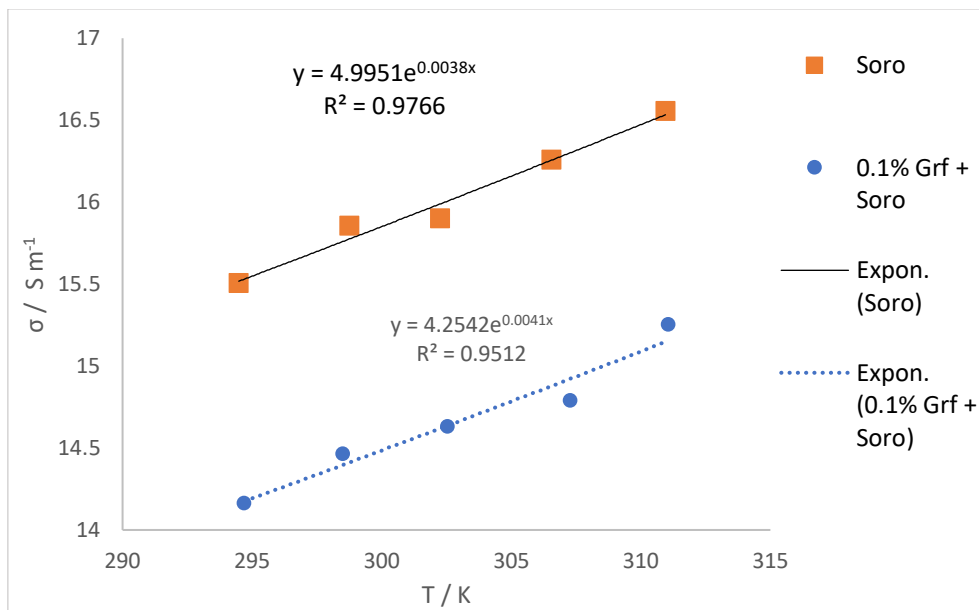


Figura 5.44 - Comportamento da condutividade elétrica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico e do soro fisiológico com a variação da temperatura.



---

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DO MODELO DA  
VISCOSIDADE DINÂMICA

## 6. Análise do Modelo da Viscosidade Dinâmica

### Modelo de Einstein

O primeiro modelo teórico estudado foi o modelo de Einstein, através da fração volúmica e da viscosidade dinâmica do fluido fase, etilenoglicol, os valores obtidos estão representados Tab. 6.1 e na Fig. 6.1.

Tabela 6.1 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Einstein.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	18.696	12.868	8.540	6.054	4.407
0.2	19.152	13.181	8.748	6.201	4.515
0.3	19.608	13.495	8.956	6.349	4.622
0.5	20.520	14.123	9.373	6.644	4.837
0.75	21.660	14.907	9.893	7.013	5.106

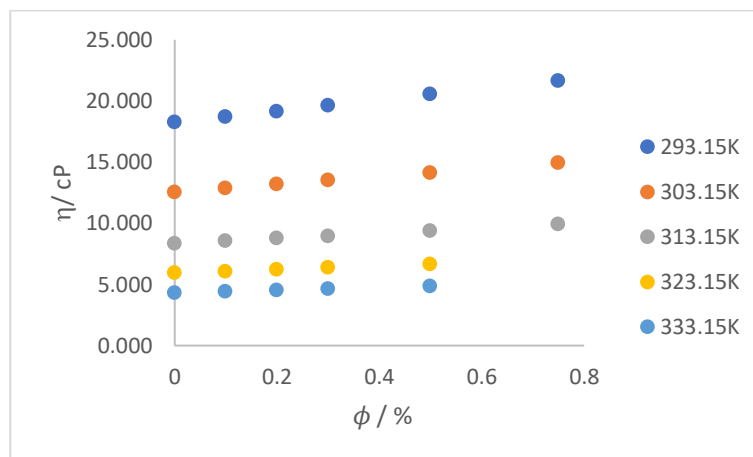


Figura 6.1 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Einstein.

### Modelo de Brinkman

De seguida, estudou-se o modelo de Brinkman. Os valores obtidos estão representados na Tab. 6.2 e na Fig. 6.2.

Tabela 6.2 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Brinkman.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	23.737	16.337	10.842	7.686	5.596
0.2	31.865	21.930	14.554	10.318	7.512
0.3	44.493	30.621	20.322	14.406	10.489
0.5	103.183	71.014	47.129	33.410	24.324
0.75	583.691	401.718	266.601	188.995	137.599

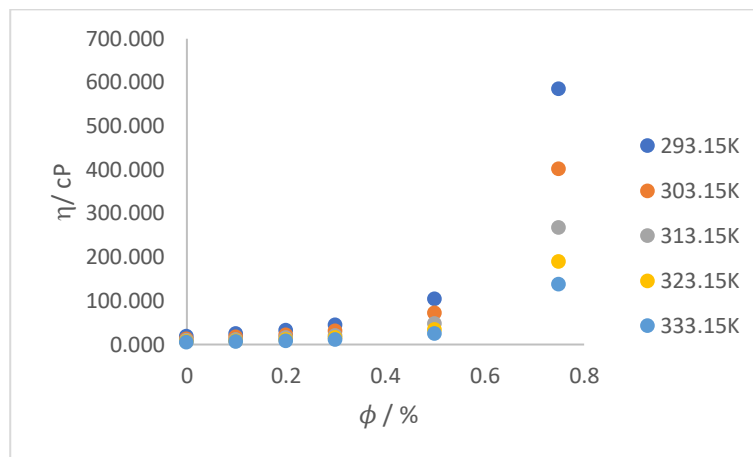


Figura 6.2 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Brinkman.

### Modelo de Wang

Estudou-se, também, o modelo de Wang. Os valores obtidos estão representados na Tab. 6.3 e na Fig. 6.3.

Tabela 6.3 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Wang.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	53.864	37.071	24.602	17.441	12.698
0.2	134.358	92.470	61.368	43.504	31.674
0.3	259.724	178.752	118.629	84.097	61.227
0.5	645.070	443.961	294.635	208.869	152.069
0.75	1379.153	949.183	629.927	446.561	325.122

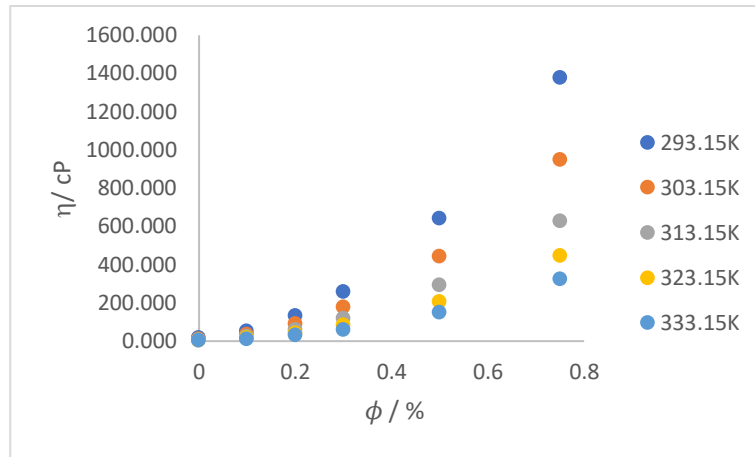


Figura 6.3 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Wang.

### Modelo de Batchelor

Também estudamos o modelo de Batchelor. Os valores obtidos estão representados na Tab. 6.4 e na Fig. 6.4.

Tabela 6.4 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Batchelor.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	23.931	16.470	10.931	7.749	5.642
0.2	31.884	21.944	14.563	10.324	7.516
0.3	42.099	28.974	19.229	13.631	9.924
0.5	69.313	47.704	31.659	22.443	16.340
0.75	116.054	79.873	53.008	37.578	27.359

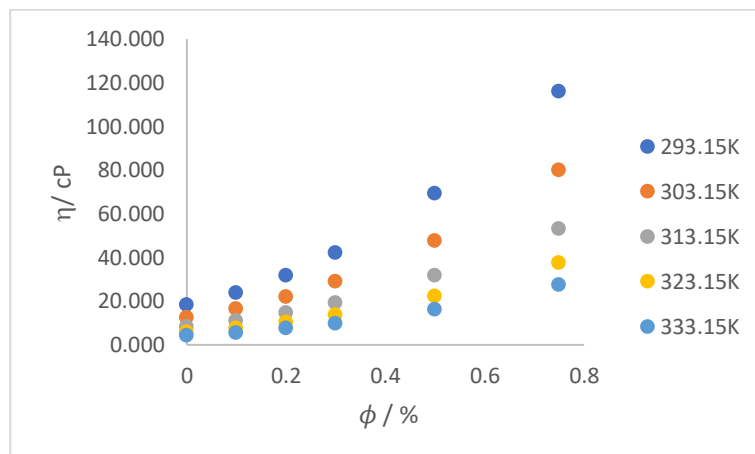


Figura 6.4 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Batchelor.

## Modelo de De Bruijin

Com os valores da fração volúmica e da viscosidade dinâmica do fluido fase, etilenoglicol, estudou-se o modelo de De Bruijin. Os valores obtidos estão representados na Tab. 6.5 e na Fig. 6.5.

Tabela 6.5 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de De Bruijin.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	23.827	16.399	10.883	7.715	5.617
0.2	32.452	22.334	14.822	10.508	7.650
0.3	46.809	32.215	21.380	15.156	11.035
0.5	132.176	90.969	60.372	42.798	31.159
0.75	-9120.178	-6276.837	-4165.634	-2953.052	-2149.990

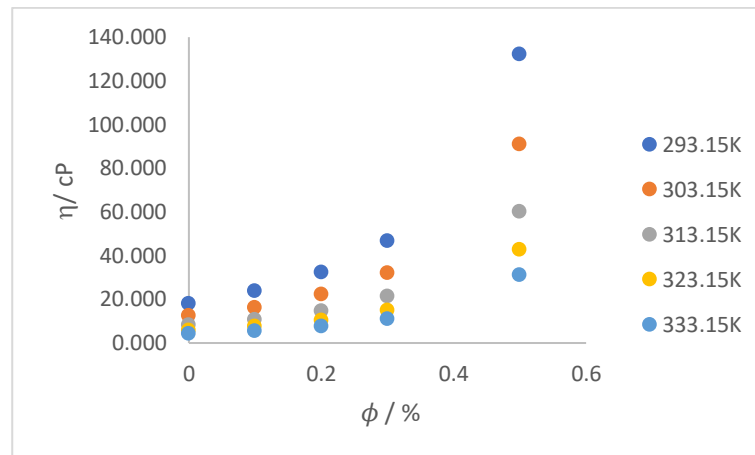


Figura 6.5 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de De Bruijin.

## Modelo de Vand

O penúltimo modelo teórico que se estudou foi o modelo de Vand. Os valores obtidos estão representados na Tab. 6.6 e na Fig. 6.6.

Tabela 6.6 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Vand.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	24.141	16.615	11.026	7.817	5.691
0.2	32.722	22.521	14.946	10.595	7.714
0.3	43.985	30.272	20.090	14.242	10.369
0.5	74.553	51.310	34.052	24.140	17.575
0.75	127.843	87.986	58.392	41.395	30.138

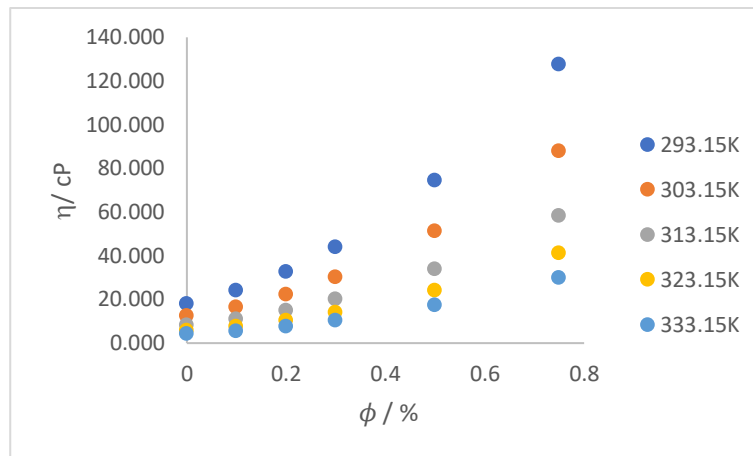


Figura 6.6 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Vand.

### Modelo de Maiga

O último modelo teórico que se estudou foi o modelo de Maiga. Os valores obtidos estão representados na Tab. 6.7 e na Fig. 6.7.

Tabela 6.7 - Simulação da viscosidade dinâmica pelo modelo de Maiga.

T/K \ f %	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
0	18.240	12.554	8.331	5.906	4.300
0.1	73.709	50.729	33.667	23.867	17.376
0.2	240.809	165.734	109.989	77.972	56.768
0.3	519.540	357.566	237.300	168.224	122.476
0.5	1411.895	971.717	644.882	457.162	332.840
0.75	3155.262	2171.566	1441.164	1021.653	743.821

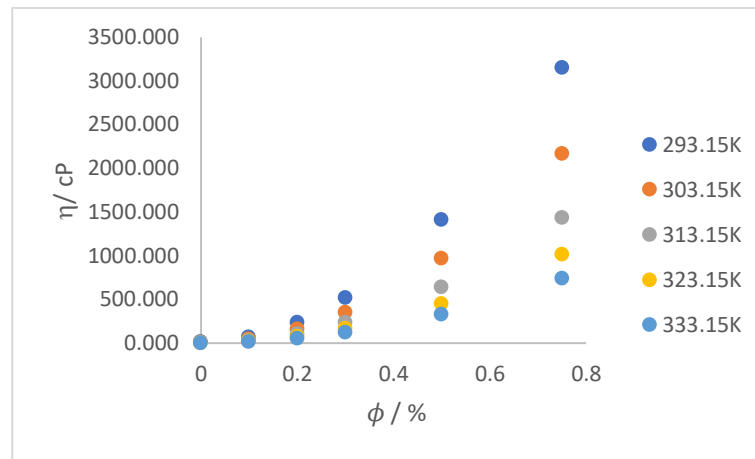


Figura 6.7 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas pelo modelo de Maiga.

### Comparação dos modelos teóricos com os valores experimentais

O nosso objetivo é comprar todos os modelos para perceber qual melhor se adequa aos nossos valores experimentais, então comparou-se para todas as temperaturas, o comportamento de todos os modelos teóricos usados em função da fração volúmica.

A Fig. 6.8 representa os valores para a temperatura de 293.15K.

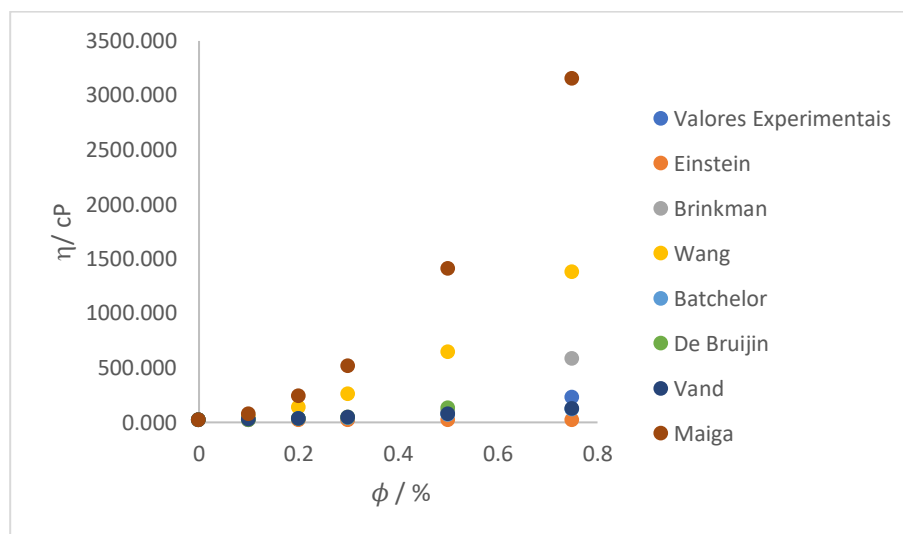


Figura 6.8 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 293.15K.

A Fig. 6.9 representa os valores para a temperatura de 303.15K.

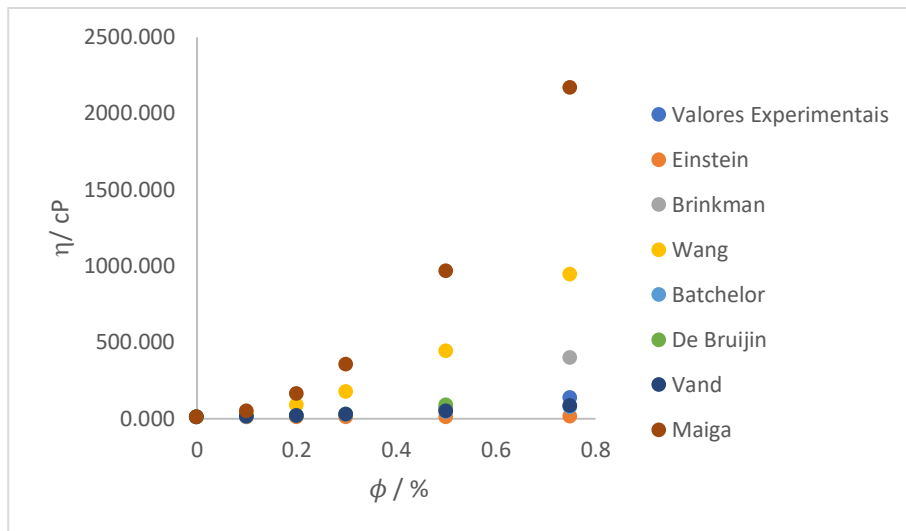


Figura 6.9 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 303.15K.

A Fig. 6.10 representa os valores para a temperatura de 313.15K.

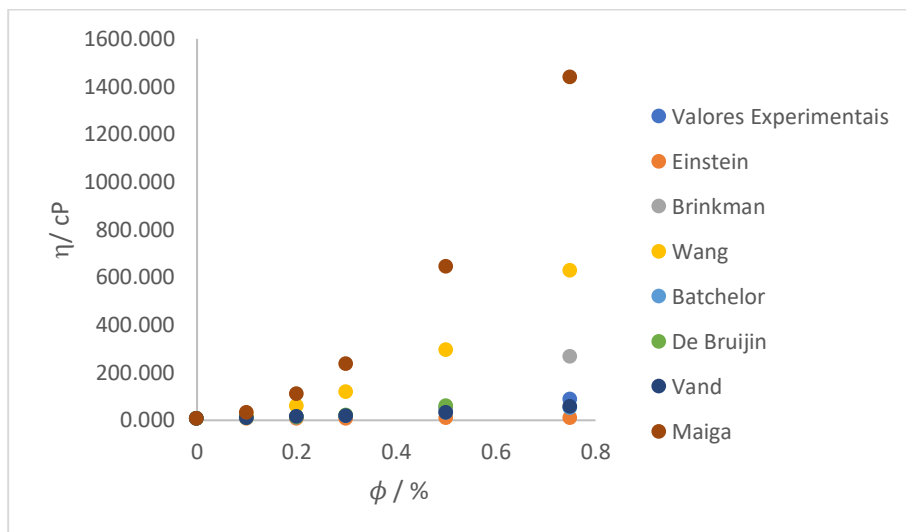


Figura 6.10 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 313.15K.

A Fig. 6.11 representa os valores para a temperatura de 323.15K.

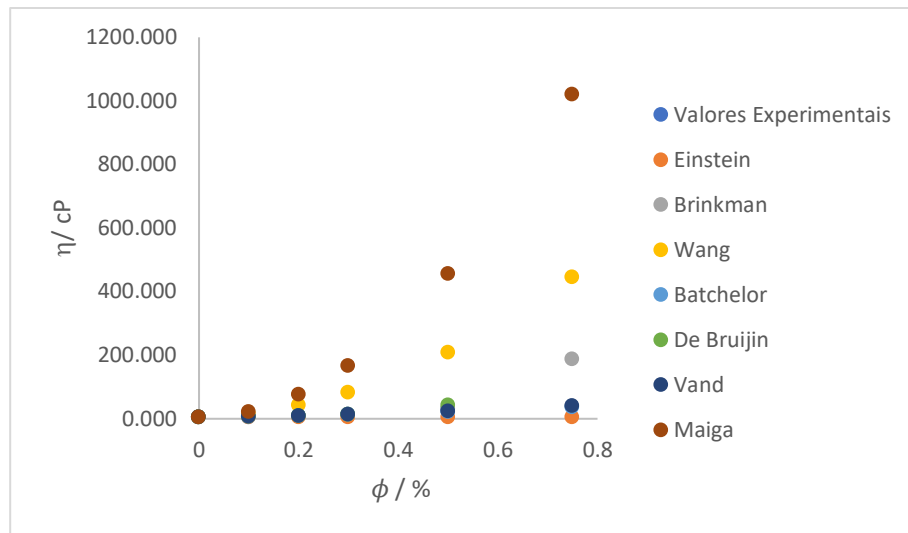


Figura 6.11 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 323.15K.

A Fig. 6.12 representa os valores para a temperatura de 333.15K.

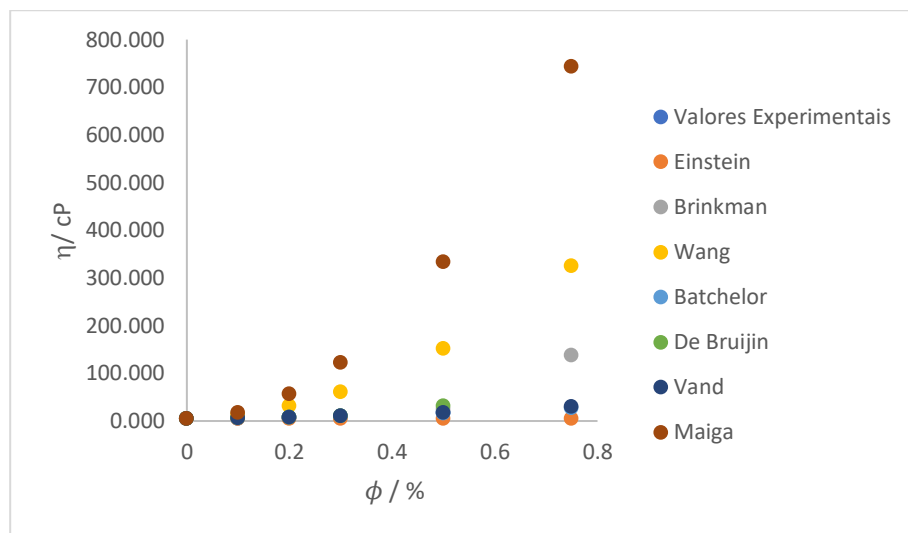


Figura 6.12 - Comparação de todos os modelos estudados com os valores experimentais para a temperatura de 333.15K.

Verifica-se, com a análise destes gráficos, que o modelo teórico de Maiga é o que menos se enquadra com os valores experimentais obtidos. Os modelos que mais se aproximam são os modelos de Vand e de Batchelor, Fig. 6.13. Para comprovar esta aproximação aos modelos teóricos, calculou-se os erros relativos de todos os modelos para a temperatura de 209.15K, apresentada na Tab. 6.8.

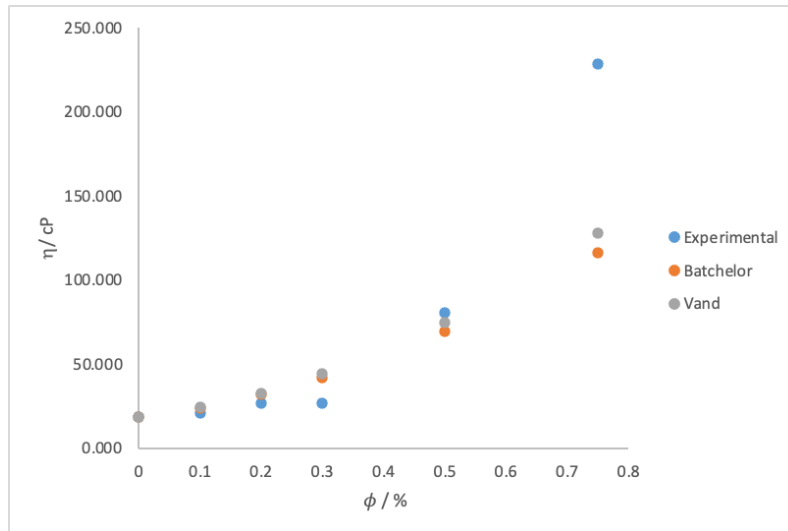


Figura 6.13 - Comparação dos modelos de Batchelor e Vand com os valores experimentais para a temperatura de 293.15K.

Tabela 6.8 - Erros relativos entre os modelos teóricos e os valores experimentais para a temperatura de 293.15K.

$\phi / \%$	Einstein	Brinkman	Wang	Batchelor	De Bruijin	Vand	Maiga
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.1	10.36%	13.81%	158.26%	14.74%	14.25%	15.75%	253.42%
0.2	29.03%	18.08%	397.89%	18.15%	20.26%	21.26%	792.36%
0.3	26.58%	66.60%	872.53%	57.64%	75.27%	64.70%	1845.40%
0.5	74.53%	28.08%	700.71%	13.96%	64.07%	7.46%	1652.56%
0.75	90.52%	155.50%	503.70%	49.20%	4092.17%	44.04%	1281.15%

Outro método que se usou para a determinação de um modelo que representasse o comportamento da viscosidade, foi o de correlação de valores para chegar a uma expressão logarítmica, Eq. 6.1. Escreveu-se as expressões A e B, Eq. 6.2 e Eq. 6.3, através dos valores experimentais. Estas equações foram calculadas baseadas no estudo de Sundar et al[41].

$$\text{Log}(\mu_{nf}) = Ae^{-BT} \quad (6.1)$$

$$A = 614.44 * \phi^2 - 734.2 * \phi + 248.24 \quad (6.2)$$

$$B = 0.0169 * \phi^2 - 0.0251 * \phi + 0.0193 \quad (6.3)$$

Através desta expressão calculou-se os valores representados na Fig. 6.14. Como se pode constatar, estes não se enquadram muito nos valores experimentais, pois para uma fração volúmica de 0.5%, os valores da viscosidade são menores do que para 0.3% e 0.2%.

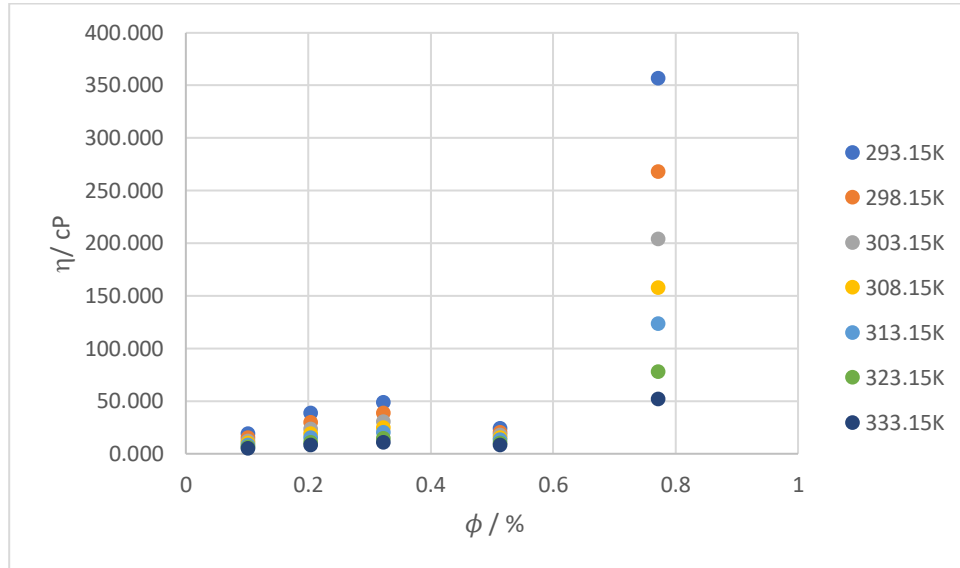


Figura 6.14 - Simulação da viscosidade dinâmica em função da fração volúmica para todas as temperaturas por correlação de valores.



## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

## 7. Conclusões

A nanotecnologia tem evoluído consideravelmente nos últimos anos, contribuindo significativamente para os avanços da medicina. Com o aumento da esperança média de vida, existe a necessidade de fornecer uma melhor qualidade de vida à população.

Este projeto focou-se no estudo de algumas propriedades dos nanofluidos, tais como a massa volúmica, a viscosidade cinemática, a viscosidade dinâmica e a condutividade elétrica em função da temperatura e/ou fração volúmica, no sentido de caracterizar os nanofluidos com base em nanopartículas de grafeno.

Os nanofluidos preparados foram com base em nanopartículas de grafeno dispersas em vários fluidos base, sendo estes, água destilada, soro fisiológico, glicerina e etilenoglicol. Verificou-se que várias amostras de nanofluidos apresentavam rapidamente precipitação. O que pode provocar a precipitação das nanopartículas é a formação de aglomerados. Estes efeitos são completamente indesejáveis, pois resultam no aparecimento de fases distintas na amostra, comprometendo as propriedades termofísicas do nanofluido.

Para estudar a estabilidade dos nanofluidos utilizaram-se os métodos de observação por sedimentação, espectroscopia ótica e medição de pH. Pela sedimentação, concluiu-se que os nanofluidos de grafeno em etilenoglicol para frações volúmicas de 0.1%, 0.2% e 0.3% mantêm-se estáveis durante as primeiras 24h. Os nanofluidos com frações volúmicas maiores aguentam 72h estáveis. Pela medição de pH, concluiu-se que o nanofluido de 0,1% grafeno em água destilada a 25 °C precisa no mínimo de 60min de sonicação, pois apenas nesse intervalo de tempo é que o pH tende para um valor constante.

Por espectroscopia ótica, pode-se estimar qual o tempo ideal de sonicação para cada nanofluido. A sonicação dificulta a formação de aglomerados e, por sua vez, a precipitação, tornando o nanofluido inviável.

Relativamente à viscosidade dinâmica e cinemática, estudou-se, primeiramente, para todos os fluidos base usados. Segundo, para os nanofluidos 0.1% de grafeno em todos os fluidos bases. E, por último, várias frações volúmicas de grafeno em etilenoglicol em função da temperatura. Verificou-se que ambas as viscosidades diminuem com o aumento da temperatura, seguindo a tendência do fluido base respetivo, e aumentam com o aumento da fração volúmica de nanopartículas no fluido base.

Do mesmo modo, verificou-se que a massa volúmica diminui com o aumento da temperatura. No entanto, não apresenta um comportamento linear com o aumento da concentração de nanopartículas.

Por fim, verificou-se que a condutividade elétrica do nanofluido de 0.1% de grafeno em soro fisiológico com 80min de sonicação teve um aumento exponencial com o aumento da temperatura.

No final, comparou-se os resultados obtidos com vários modelos teóricos, como o modelo de Einstein, Brinkman, Wang, Batchelor, De Bruijin, Vand e Maiga. Sendo que os que melhor se enquadram nos resultados experimentais obtidos, são o modelo de Batchelor e Vand, como se pode ver na Tab. 6.8, à exceção para a fração volúmica de 0.3%. Para confirmar esta singularidade deveríamos de repetir o estudo desta amostra.

Para trabalhos futuros, sugere-se fazer amostras com frações volúmicas intermédias entre 0.3% e 0.7%, de forma a perceber o comportamento da viscosidade em função da fração volúmica. Poder-se-ia, também, estudar os modelos teóricos da massa volúmica, já que o modelo clássico para as misturas não se enquadra nos valores experimentais.



## 8. Referências

- [1] Z. Jing, Q. Du, X. Zhang, and Y. Zhang, “Nanomedicines and nanomaterials for cancer therapy: Progress, challenge and perspectives,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 446, no. P3, p. 137147, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.137147.
- [2] R. R. Souza *et al.*, “Recent advances on the thermal properties and applications of nanofluids: From nanomedicine to renewable energies,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 201, no. May 2021, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117725.
- [3] O. A. Alawi, N. A. C. Sidik, H. W. Xian, T. H. Kean, and S. N. Kazi, “Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 116, pp. 1314–1325, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.133.
- [4] S. Hasan, “A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types,” 2015. [Online]. Available: [www.isca.me](http://www.isca.me)
- [5] S. Smita, S. K. Gupta, A. Bartonova, M. Dusinska, A. C. Gutleb, and Q. Rahman, “Nanoparticles in the environment: assessment using the causal diagram approach,” 2010. [Online]. Available: <http://www.ehjournal.net/content/11/S1/S13>
- [6] M. Zahoor *et al.*, “A review on silver nanoparticles: Classification, various methods of synthesis, and their potential roles in biomedical applications and water treatment,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 16. MDPI, Aug. 02, 2021. doi: 10.3390/w13162216.
- [7] E. J. Cho, H. Holback, K. C. Liu, S. A. Abouelmagd, J. Park, and Y. Yeo, “Nanoparticle characterization: State of the art, challenges, and emerging technologies,” *Molecular Pharmaceutics*, vol. 10, no. 6. pp. 2093–2110, Jun. 03, 2013. doi: 10.1021/mp300697h.
- [8] S. Machado, J. G. Pacheco, H. P. A. Nouws, J. T. Albergaria, and C. Delerue-Matos, “Characterization of green zero-valent iron nanoparticles produced with tree leaf extracts,” *Science of the Total Environment*, vol. 533, pp. 76–81, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.091.
- [9] S. U. S. Choi, J. A. Eastman, and J. A. Eastman, “bTI Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” 1935.
- [10] Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism [volume 2]*.
- [11] M. H. Ahmadi, M. Alhuyi Nazari, R. Ghasempour, H. Madah, M. B. Shafii, and M. A. Ahmadi, “Thermal conductivity ratio prediction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid by applying connectionist methods,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 541, pp. 154–164, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.01.030.
- [12] P. Bhattacharya, S. K. Saha, A. Yadav, P. E. Phelan, and R. S. Prasher, “Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids,” *Journal of Applied Physics*, vol. 95, no. 11 I, pp. 6492–6494, Jun. 2004, doi: 10.1063/1.1736319.
- [13] A. Baghban, F. Pourfayaz, M. H. Ahmadi, A. Kasaeian, S. M. Pourkiaei, and G. Lorenzini, “Connectionist intelligent model estimates of convective heat transfer coefficient of nanofluids in circular cross-sectional channels,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 132, no. 2, pp. 1213–1239, May 2018, doi: 10.1007/s10973-017-6886-z.

- [14] M. Akbari, M. Afrand, A. Arshi, and A. Karimipour, “An experimental study on rheological behavior of ethylene glycol based nanofluid: Proposing a new correlation as a function of silica concentration and temperature,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 233, pp. 352–357, May 2017, doi: 10.1016/j.molliq.2017.03.020.
- [15] S. A. Angayarkanni and J. Philip, “Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 225. Elsevier, pp. 146–176, Nov. 01, 2015. doi: 10.1016/j.cis.2015.08.014.
- [16] J. Ping Liu, O. Gutfleisch, E. Fullerton, and D. J. Sellmyer, “Applications of Magnetic Nanoparticles in Biomedicine,” in *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*, Springer US, 2009, pp. 591–616. doi: 10.1007/978-0-387-85600-1.
- [17] X. Huang, X. Qi, F. Boey, and H. Zhang, “Graphene-based composites,” *Chemical Society Reviews*, vol. 41, no. 2, pp. 666–686, Jan. 2012, doi: 10.1039/c1cs15078b.
- [18] A. K. Geim and K. S. Novoselov, “The rise of graphene.” [Online]. Available: [www.nature.com/naturematerials](http://www.nature.com/naturematerials)
- [19] E. Pop, V. Varshney, and A. K. Roy, “Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications,” *MRS Bulletin*, vol. 37, no. 12, pp. 1273–1281, Nov. 2012, doi: 10.1557/mrs.2012.203.
- [20] S. Goenka, V. Sant, and S. Sant, “Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering,” *Journal of Controlled Release*, vol. 173, no. 1. Elsevier B.V., pp. 75–88, 2014. doi: 10.1016/j.jconrel.2013.10.017.
- [21] “Graphene sensors: introduction and market status,” *Grafene-info: the graphene experts*, Jan. 25, 2019.
- [22] Diário da Saúde, “Sensor de grafeno pode identificar infecções em 15 minutos,” *Infecção*, Aug. 12, 2029.
- [23] T. P. Dasari Shareena, D. McShan, A. K. Dasmahapatra, and P. B. Tchounwou, “A Review on Graphene-Based Nanomaterials in Biomedical Applications and Risks in Environment and Health,” *Nano-Micro Letters*, vol. 10, no. 3. SpringerOpen, Jul. 01, 2018. doi: 10.1007/s40820-018-0206-4.
- [24] A. M. Allahverdiyev, K. V. Kon, E. S. Abamor, M. Bagirova, and M. Rafailovich, “Coping with antibiotic resistance: Combining nanoparticles with antibiotics and other antimicrobial agents,” *Expert Review of Anti-Infective Therapy*, vol. 9, no. 11. pp. 1035–1052, Nov. 2011. doi: 10.1586/eri.11.121.
- [25] H. Kim, D. H. Seo, S. W. Kim, J. Kim, and K. Kang, “Highly reversible Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene hybrid anode for lithium rechargeable batteries,” *Carbon N Y*, vol. 49, no. 1, pp. 326–332, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.carbon.2010.09.033.
- [26] A. Einstein, *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. 1956.
- [27] H. C. Brinkman, “The viscosity of concentrated suspensions and solutions,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 20, no. 4, p. 571, 1952, doi: 10.1063/1.1700493.
- [28] X.-Q. Wang and A. S. Mujumdar, “A Review on nanofluids- part II: experiments and applications,” vol. 25, no. 04, pp. 631–648, [Online]. Available: [www.abeq.org.br/bjche](http://www.abeq.org.br/bjche)
- [29] G. Batchelor, “The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles,” *J. Fluid Mech.*, vol. 83, no. 1, pp. 99–117, 1977.
- [30] H. de Bruijn, “The viscosity of suspensions of spherical particles,” Apr. 1942.
- [31] V. Vand, “Viscosity of solutions and suspensions,” Cheshire, England, 1947.

- [32] S. Etaig, R. Hasan, and N. Perera, “Investigation of a New Effective Viscosity Model for Nanofluids,” in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 157, pp. 404–413. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.383.
- [33] M. Sharifpur, S. Yousefi, and J. P. Meyer, “A new model for density of nanofluids including nanolayer,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 168–174, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.010.
- [34] D. Trost, A. Polcar, D. Boldor, D. B. Nde, A. Wolak, and V. Kumbár, “Temperature dependence of density and viscosity of biobutanol-gasoline blends,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/app11073172.
- [35] A. Arshad, M. Jabbal, Y. Yan, and D. Reay, “A review on graphene based nanofluids: Preparation, characterization and applications,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 279. Elsevier B.V., pp. 444–484, Apr. 01, 2019. doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.153.
- [36] K. H. Solangi *et al.*, “A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids,” *Energy*, vol. 89. Elsevier Ltd, pp. 1065–1086, Sep. 01, 2015. doi: 10.1016/j.energy.2015.06.105.
- [37] L. Raquel de Oliveira, “Nanofluidos: Síntese e Caracterização.”
- [38] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. C. Metselaar, “A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 17–18, pp. 4051–4068, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
- [39] S. Mukherjee, “Preparation and Stability of Nanofluids-A Review,” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 63–69, 2013, doi: 10.9790/1684-0926369.
- [40] J. R. Cooper, Q. Mary, M. E. Road, and S. I. Associates, “Thermodynamic Properties of Water and Steam,” *The International Association for the Properties of Water and Steam*, no. September 2008, pp. 1–19, 2008.
- [41] L. Syam Sundar, E. Venkata Ramana, M. K. Singh, and A. C. M. de Sousa, “Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture,” *Chemical Physics Letters*, vol. 554, pp. 236–242, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.cplett.2012.10.042.



**Anexos**

Anexo A – Dados relativos à calibração do viscosímetro 75 (nº 6950) com água destilada

T/K	t_med /s	$v/m^2s^{-1}$	$C/m^2s^{-2}$	$\alpha(C)/m^2s^{-2}$
293.15	118.280	1E-06	8.48E-09	1.14E-11
303.15	96.530	8E-07	8.29E-09	7.43E-13
313.15	81.630	6.6E-07	8.06E-09	2.45E-12
323.15	70.690	5.5E-07	7.82E-09	1.88E-12
333.15	62.410	4.7E-07	7.59E-09	1.24E-12

**Anexo B – Dados relativos à calibração do viscosímetro 100 (nº 7246) com água destilada**

T/K	t <sub>med</sub> /s	$\nu/m^2s^{-1}$	$C/m^2s^{-2}$	$\alpha(C)/m^2s^{-2}$
293.15	61.64	1.0034E-06	1.63E-08	9.79E-12
298.15	55.32	8.926E-07	1.61E-08	2.03E-12
303.15	50.2	8.007E-07	1.60E-08	2.16E-12
308.15	46.71	7.34E-07	1.57E-08	2.02E-12
313.15	42.45	6.579E-07	1.55E-08	3.42E-12
323.15	36.42	5.531E-07	1.52E-08	2.53E-12
333.15	32.23	4.74E-07	1.47E-08	3.32E-12

**Anexo C – Dados relativos à calibração do viscosímetro 200 (nº 182) com água destilada**

T/K	t_med /s	v/m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	C/m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	α(C)/m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
293.15	11.07	1E-06	9.06E-08	4.83E-11
298.45	10.24	8.93E-07	8.72E-08	5.54E-11
303.15	9.55	8.01E-07	8.38E-08	5.09E-11
308.15	8.9	7.34E-07	8.25E-08	5.37E-11
313.15	8.33	6.58E-07	7.90E-08	6.16E-11
323.15	7.59	5.53E-07	7.29E-08	5.55E-11
333.15	6.97	4.74E-07	6.80E-08	6.80E-11

## Anexo D – Dados relativos à calibração do viscosímetro 200 (nº 183) com água destilada

T/K	t <sub>med</sub> /s	$\nu/m^2s^{-1}$	$C/m^2s^{-2}$	$\alpha(C)/m^2s^{-2}$
293.65	10.97	1E-06	9.15E-08	7.18E-11
298.45	10.09	8.93E-07	8.85E-08	5.38E-11
303.15	9.42	8.01E-07	8.50E-08	5.21E-11
308.15	8.77	7.34E-07	8.37E-08	9.04E-11
313.15	8.24	6.58E-07	7.98E-08	5.84E-11
323.15	7.45	5.53E-07	7.42E-08	2.15E-10
333.15	6.87	4.74E-07	6.90E-08	7.68E-11

## Anexo E – Exemplo do cálculo da incerteza da viscosidade cinemática

```

*
Viscosidade de um fluido -- Exemplo tubo 200 n°182 DFI
tamb = 20.7 °C
23/Jun/22
Realizada por Fatima Soares

incerteza da viscosidade cinematica --> u_v
v=c*t
v --> viscosidade cinematica do fluido [m^2 s^-1]
C --> constante do viscosimetro
t --> tempo de escoamento
*)

```

Viscosimetro 200 T=20°C

```

syms C t v ;
v=C*t

```

v =

C\*t

#### Cálculo das derivadas parciais do viscosimetro

```

dpt_20=diff(v,t) => derivada parcial em ordem ao tempo
↓
dpC_20=diff(v,C) => derivada parcial em a constante do viscosimetro

```

dpt\_20 =

C

dpC\_20 =

t

### Cálculo dos coeficientes de sensibilidade do viscosímetro

```
% valor da viscosidade da agua pa T=20°C  
C=9.06413730803975E-08  
t=263.09  
% C_1 = Coeficiente de sensibilidade  
C_1=eval(dpt_20)  
% C_2 = Coeficiente de sensibilidade  
C_2=eval(dpC_20)%  
%
```

C =

9.0641e-08

t =

263.0900

C\_1 =

9.0641e-08

C\_2 =

263.0900

### Calculo da Viscosidade cinemática

Para T=20°C

```
v=C*t  
%
```

v =

2.3847e-05

**Incertezas:**

```
% IN_frac=raiz(((C_1)*(in_t))^2+((C_1)*(in_t_B))^2+(C_2*in_C)^2)

%INCERTEZA TIPO B do cronómetro
in_t_B=0.01/(3^0.5)
%INCERTEZA TIPO A do tempo
% desv_t=0.35528
% in_t=desv_t/(5^0.5)
%INCERTEZA DA CONSTANTE DO VISCOSIMETRO
in_C=4.83114044724439E-11
%INCERTEZA
INC_v=((C_1*in_t_B)^2+(C_2*in_C)^2)^0.5
INC_v_relativo=(INC_v/v)*100
```

in\_t\_B =

0.0058

in\_C =

4.8311e-11

INC\_v =

1.2721e-08

## Anexo F – Exemplo do cálculo da incerteza da densidade

```
densidade do nanofluido 0.1% grafeno + Agua
Realizada por Fatima Soares
frac_vol_prt=0.001
incerteza da densidade --> d
d=((m_nf-m_0)/(m_1-m_0))
m_fn --> massa do nanofluido ( fluido do qual se pretende determinar a
massa volúmica)
m_0 --> massa do picnometro
m_1 --> massa da água destilada
ro_h2o --> massa volúmica da água destilada (valores de referência)
%}
```

```
frac_vol_amostra=0.001
syms m_1 m_nf m_0 ro_h2o ;%
d=ro_h2o*((m_nf-m_0)/(m_1-m_0))
```

```
frac_vol_amostra =
```

```
1.0000e-03
```

```
d =
```

```
(ro_h2o*(m_0 - m_nf))/(m_0 - m_1)
```

**Cálculo das derivadas parciais da massa do picnometro**

```
dpm_0=diff(d,m_0)% => derivada parcial em ordem à massa do picnometro
%
dpm_1=diff(d,m_1)% => derivada parcial em ordem da massa com água
%
dpm_nf=diff(d,m_nf)% => derivada parcial em ordem a massa com nanofluido
%
%
```

```
dpm_0 =
```

```
ro_h2o/(m_0 - m_1) - (ro_h2o*(m_0 - m_nf))/(m_0 - m_1)^2
```

```
dpm_1 =
```

```
(ro_h2o*(m_0 - m_nf))/(m_0 - m_1)^2
```

```
dpm_nf =
```

```
-ro_h2o/(m_0 - m_1)
```

**Cálculo dos coeficientes de sensibilidade da densidade**

Amostra de 0.1% Grafeno em Agua T=20°C n° do picnometro 132 valores médios das massas

```
m_nf=22.8980
m_1=22.9930
m_0=12.9017
ro_h2o=1
% C_1 = Coeficiente de sensibilidade
C_1=eval(dpm_0)
% C_2 = Coeficiente de sensibilidade
C_2=eval(dpm_1)
% C_3 = Coeficiente de sensibilidade
C_3=eval(dpm_nf)
%
%
```

m\_nf =

22.8980

m\_1 =

22.9930

m\_0 =

12.9017

ro\_h2o =

1

C\_1 =

-9.3289e-04

C\_2 =

-0.0982

C\_3 =

0.0991

**Calculo da massa volúmica do nanofluido**

```
ro_nf=ro_h2o*((m_nf-m_0)/(m_1-m_0))
%
%Incertezas:
%
% IN_frac=raiz(((C_1)*(in_m_0))^2+((C_2)*(in_m_h2o))^2+((C_3)*(in_m_nf))^2)

in_m_0=5.7735e-5
in_m_h2o=0.0012722
in_m_nf=0.0002236
INC_ro_nf=((C_1)*(in_m_0))^2+((C_2)*(in_m_h2o))^2+((C_3)*(in_m_nf))^2)^0.5

INC_ro_nf_relativo=INC_ro_nf/ro_nf*100
```

ro\_nf =

0.9906

in\_m\_0 =

5.7735e-05

in\_m\_h2o =

0.0013

in\_m\_nf =

2.2360e-04

INC\_ro\_nf =

1.2683e-04

INC\_ro\_nf\_relativo =

0.0128