

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE COSTA NOVO MALHEIROS

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO FATOR DE ATRITO E DO COEFICIENTE DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM NANOFUIDOS DE Al_2O_3 COM
ADIÇÃO DO SURFACTANTE CTAB**

**VITÓRIA
2019**

FELIPE COSTA NOVO MALHEIROS

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO FATOR DE ATRITO E DO COEFICIENTE DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM NANOFUIDOS DE Al_2O_3 COM
ADIÇÃO DO SURFACTANTE CTAB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro

RESUMO

Quando se trata de sistemas térmicos, nos quais um fluido circulante é necessário para realizar a transferência de calor, métodos e tecnologias que proporcionam maior eficiência e redução de custos são desafios constantes enfrentados pelos engenheiros. Com relação ao transporte (recirculação), a técnica de adição de pequenas concentrações de surfactantes em um fluido pode ser capaz de reduzir o consumo de energia para esse transporte. Já a adição de nanopartículas em um fluido pode ser capaz de aumentar a troca de calor. Sabendo que os nanofluidos têm a capacidade de aumentar a transferência de calor e que as soluções de surfactantes podem reduzir o consumo de energia para o transporte de fluidos, estudos experimentais usando nanofluidos de água- Al_2O_3 com e sem a adição de surfactante CTAB foram conduzidos para verificar a possibilidade de aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção e os efeitos de redução de arrasto. Esses experimentos foram realizados em condições de escoamento turbulento e fluxo de calor constante, com o objetivo de medir o fator de atrito e o coeficiente de transferência de calor por convecção. O tamanho médio das nanopartículas de Al_2O_3 utilizadas foi de 13 nm. Foram utilizadas concentrações de nanofluidos de 0,1% e 0,4% em massa, enquanto as concentrações de CTAB foram de 200 ppm, 500 ppm e 700 ppm. Neste trabalho foi possível verificar que o aumento da concentração de nanopartículas aumentou o coeficiente de transferência de calor em até 44%. A capacidade de redução do arrasto das soluções de surfactantes também foi avaliada e pode alcançar uma redução de até 72%, o que, por sua vez, reduziu os efeitos da transferência de calor em aproximadamente 90%. A fim de aumentar a transferência de calor por convecção em soluções de surfactantes, foram adicionadas nanopartículas de Al_2O_3 . Embora tenha ocorrido um aumento na transferência de calor em relação às soluções de surfactantes, não foi possível obter o mesmo desempenho que os nanofluidos sem surfactantes. Verificou-se também que nos casos em que nanopartículas e surfactantes estavam presentes no fluido e não apresentaram efeitos de redução de arrasto, os coeficientes de transferência de calor foram maiores do que o do fluido base.

ABSTRACT

As thermal systems consist of transporting a circulating fluid to perform heat transfer, methods and technologies that provide increased efficiency and cost reduction are constant challenges faced by engineers. Regarding transport (recirculation), the technique of adding small concentrations of surfactants in a fluid may be able to reduce energy consumption for this transport. Addition of nanoparticles to a fluid may be able to provide increased heat exchange efficiency. Knowing that nanofluids have the ability to increase heat transfer and that surfactant solutions can reduce energy consumption for fluid transport, experimental studies using Al_2O_3 -water nanofluids, with and without the addition of CTAB surfactant were conducted to verify the possibility of increasing the convection heat transfer coefficient and the drag reduction effects. These experimental studies were conducted in a turbulent and constant heat flux experimental one to measure the friction factor and the convective heat transfer coefficient. The average size of the Al_2O_3 nanoparticles used was 13 nm. Nanofluid concentrations of 0.1% and 0.4% by mass were used, while CTAB concentrations were 200 ppm, 500 ppm and 700ppm. In this work it was possible to verify that the increase of nanoparticle concentration increased the heat transfer coefficient by 44%. The drag reduction capacity of surfactant solutions was also evaluated, which could achieve a reduction of up to 72%, but in turn reduced heat transfer effects by approximately 90%. In order to increase convective heat transfer in surfactant solutions, Al_2O_3 nanoparticles were added. Although there was an increase in heat transfer over surfactant solutions, it was not possible to achieve the same performance as nanofluids without surfactants. It was also found that in surfactant nanofluids that did not experience the drag reduction effects, the heat transfer coefficient showed significant values.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual dos tipos de nanopartículas utilizadas por pesquisadores em seus artigos.	14
Figura 2 - Escoamento em uma tubulação (A) com o fluido base (B) com adição de surfactante (C) e com adição do surfactante e nanopartículas.	14
Figura 3 - Método de dois passos para a preparação do nanofluido.	17
Figura 4 - fotografia MET de nanopartículas de Al_2O_3	18
Figura 5 - Descrição do Potencial Zeta para uma partícula carregada negativamente.	19
Figura 6 - Influência do pH no Potencial Zeta para nanofluidos de Al_2O_3	21
Figura 7 - Fotografias para nanofluido com 0,2%wt de Al_2O_3 em diferentes tempos.	21
Figura 8 - comportamento da nanopartícula na água com adição de surfactante.	23
Figura 9 - Mecanismos de estabilidade dos nanofluidos.	25
Figura 10 - Diagrama esquemático para soluções de surfactante.	27
Figura 11 - Comportamento de soluções DR com surfactante.	28
Figura 12 - Esquemático dos dados de entrada e saída em uma bancada experimental para avaliação dos nanofluidos.	39
Figura 13 - Tubo com alteração da superfície interna.	41
Figura 14 - Arranjos das fórmulas químicas dos insumos utilizados neste trabalho.	43
Figura 15 - Equipamentos utilizados para preparar e caracterizar o nanofluido.	44
Figura 16 - valores de Potencial Zeta e pH para nanofluido de 0,1%wt de Al_2O_3 sem surfactante.	46
Figura 17 - distribuição do tamanho dos aglomerados para o nanofluido de Al_2O_3 para a) 1 hora de ultrassom e b) 15 horas de ultrassom.	46
Figura 18 - Influência do pH no Potencial Zeta do nanofluido de Al_2O_3	47
Figura 19 - Influência do pH na distribuição do tamanho dos aglomerados para nanofluido com 0,1%wt de Al_2O_3 preparado com 1 hora de ultrassom.	48
Figura 20 - Esquemático geral da bancada experimental.	51
Figura 21 - Esquemático da seção de teste de pressão (STP) e seção de teste de temperatura (STT).	51
Figura 22 - Faixa de vazão [m^3/h] e Reynolds em função da escala do rotâmetro.	52
Figura 23 - dados experimentais do fator de atrito para água deionizada a 30°C.	54
Figura 24 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e o obtido por meio do modelo de Gnielinski (1975).	56
Figura 25 - Dados experimentais do fator de atrito para nanofluidos de Al_2O_3	57
Figura 26 – Dados experimentais do fator de atrito para diferentes concentrações do surfactante CTAB.	58
Figura 27 - Dados experimentais da Redução de Arrasto para diferentes concentrações do surfactante CTAB.	59
Figura 28 - Dados experimentais do fator de atrito em nanofluidos de Al_2O_3 com diferentes concentrações do surfactante CTAB e para soluções DR do surfactante CTAB em diferentes concentrações.	60
Figura 29 - Dados experimentais da Redução de Arrasto em nanofluido de 0,1% Al_2O_3 com diferentes concentrações do surfactante CTAB e em Soluções DR com diferentes concentrações do surfactante CTAB.	61
Figura 30 - Dados experimentais do fator de atrito em nanofluido com diferentes concentrações de Al_2O_3 para concentração do surfactante CTAB de 500ppm.	62
Figura 31 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do número de Reynolds para diferentes concentrações do nanofluido de Al_2O_3 na mesma concentração de 500ppm do surfactante CTAB.	63
Figura 32 - Influência da concentração de Al_2O_3 no nanofluido no coeficiente de transferência de calor.	64
Figura 33 – Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor para as soluções DR com diferentes concentrações do surfactante CTAB.	66

Figura 34 - Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor para nanofluidos com 0,1% de Al_2O_3 com diferentes concentrações do surfactante CTAB e para soluções DR com diferentes concentrações do surfactante CTAB.	68
Figura 35 - Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção para diferentes concentrações do nanofluido de Al_2O_3 na mesma concentração de 500ppm do surfactante CTAB.	69
Figura 36 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor relativo para diferentes números de Reynolds.....	71
Figura 37 - Desempenho termo-hidráulico das amostras no mesmo número de Reynolds.	74
Figura 38 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção para os nanofluidos redutores de arrasto no mesmo valor de Reynolds.	77
Figura 39 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo para vazão de $0,4414\text{ m}^3/\text{h}$	79
Figura 40 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo para vazão de $0,5518\text{ m}^3/\text{h}$	80
Figura 41 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo para vazão de $0,6622\text{ m}^3/\text{h}$	81

Lista de símbolos

DR	Redução de Arrasto
HTR	Redução da Transferência de Calor
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
λ_D	Comprimento de Debye
ζ	Potencial Zeta
q	Carga elétrica da partícula
ε	Constante dielétrica da Solução
ε_0	Permissividade Elétrica do Vácuo
pH	Potencial de Ionização
k_{eff}	Condutividade Térmica Efetiva
k_0	Condutividade Térmica do Fluido Base
k_m	Condutividade Térmica da Nanopartícula
n	Fator de Forma
ψ	Esfericidade da Nanopartícula
α	Concentração Volumétrica
NTC	Nanotubo de Carbono
MWCNT	Nanotubo de Carbono Multicamadas
τ_w	Tensão na Parede da Tubulação
ΔP	Gradiente de Pressão
D	Diâmetro interno da tubulação
L	Comprimento da Secção de Teste de Pressão
f	Fator de Atrito
ρ	Massa Específica
V	Velocidade média do escoamento
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidade Cisalhante
%DR	Porcentagem de Redução de Arrasto
f_0	Fator de Atrito da Solução

Nu_0	Número de Nusselt do Solvente
Nu	Número de Nusselt da Solução
h	Coefficiente de transferência de Calor por Convecção
k	Condutividade Térmica
Pr	Número de Prandtl
L_H	Comprimento da seção de Teste de Temperatura
c_p	Calor Específico
Re_c	Número de Reynolds Crítico
%wt	Concentração Mássica
PPM	Parte por Milhão
$\dot{\gamma}$	Taxa de Cisalhamento
c_{nf}	Calor Específico do Nanofluido
c_{fb}	Calor Específico do Fluido Base
c_{np}	Calor Específico da Nanopartícula
ρ_{fb}	Massa Específica do Fluido Base
ρ_{np}	Massa Específica da Nanopartícula
h_{rel}	Coefficiente de transferência de Calor por Convecção Relativo
h_0	Coefficiente de transferência de Calor por Convecção do solvente
STP	Secção de Teste de Pressão
STT	Secção de Teste de Temperatura
T	Temperatura
T_p	Temperatura Interna da Parede da Tubulação
T_f	Temperatura Média do Fluido
q''	Fluxo de Calor por unidade de área
x	Posição
\dot{V}	Vazão Volumétrica
T_s	Temperatura Média do Fluido na Saída da Tubulação
T_e	Temperatura Média do Fluido na Entrada da Tubulação
T_w	Temperatura Externa da Parede da Tubulação
r_{ext}	Raio Externo da Tubulação
r_{int}	Raio Interno da Tubulação

\bar{h}	Coeficiente Global de Transferência da Calor por Convecção
\dot{W}	Potência Hidráulica
NF	Nanofluido

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.	Nanofluido	16
2.1.1.	Medição da Estabilidade dos Nanofluidos	18
2.1.2.	Métodos para melhorar a estabilidade dos nanofluidos	22
2.1.3.	Mecanismos de estabilidade	24
2.2.	Redução de Arrasto e Transferência de Calor em soluções com Surfactantes	25
2.3.	Conceitos básicos dos efeitos de DR e HTR	29
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3.1.	Condutividade térmica	32
3.2.	Fator de atrito e coeficiente de transferência de calor por convecção	34
3.3.	Bancadas experimentais para medição do fator de atrito e transferência de calor por convecção	35
3.4.	Redução de Arrasto em Nanofluidos	40
4.	METODOLOGIA	43
4.1.	Materiais	43
4.2.	Produção e caracterização do nanofluido	44
4.3.	Propriedades Termofísicas	48
4.4.	Bancada experimental	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1.	Validação da bancada experimental	54
5.2.	Fator de atrito e %DR	56
5.3.	Coeficiente de transferência de calor por convecção	63
5.4.	Redução de arrasto (%DR) e coeficiente de transferência de calor por convecção relativo (h_{relativo})	70
5.5.	Comportamento Termo-hidráulico	72
5.6.	Comparação dos dados experimentais dos nanofluidos com surfactante (NF + CTAB) em relação as suas respectivas soluções DR	76
5.7.	Comparação do comportamento termo-hidráulico nas mesmas vazões	78
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
8.	APÊNDICE A	91
8.1.	ANÁLISE DE INCERTEZAS	91

1. INTRODUÇÃO

Atualmente no cenário mundial, discussões sobre o consumo de energia vem ganhando atenção nos setores industrial, econômico, social, acadêmico e político. A falta de disponibilidade de energia pode ser uma das mais sérias restrições para o desenvolvimento da sociedade moderna. Sendo assim, a busca por fontes alternativas de energia vem ganhando incentivos como uma solução para esse problema. Pensando dessa maneira, a economia de energia mostra-se uma opção a essa temática, e técnicas para reduzir o consumo de energia serão sempre um desafio para os engenheiros. A implantação, viável, de métodos para economia de energia podem reduzir elevados custos de produção. Sabe-se que em sistemas térmicos se faz necessário o consumo de energia tanto para o transporte de um fluido (geralmente um fluido bombeado) quanto para transferência de calor do mesmo.

Em se tratando de economia de energia relacionada ao transporte de fluidos, aplicações relacionados a redução de arrasto (DR – *Drag Reduction*) vem ganhando atenção nos últimos anos. Essa técnica consiste basicamente em reduzir o consumo de energia de bombeamento à mesma vazão, ou manter o mesmo consumo de energia para uma maior vazão. Já no que tange a melhoria de transferência de calor, a utilização de nanofluidos pode ser uma alternativa promissora, permitindo que seja possível, para uma mesma taxa de transferência de calor, uma menor área de troca térmica e conseqüentemente a redução no tamanho desses sistemas, ou ainda, para uma mesma área, promover maior intensidade de troca térmica.

A Redução de Arrasto pode ter grande relevância no que tange as perdas de energia durante o transporte. Uma área de grande importância no que tange este assunto é a DR por adição de aditivos, técnica essa relacionada ao transporte de um fluido com quantidades minúsculas (geralmente em um nível de partes por milhão, ppm) de aditivos que podem reduzir muito o atrito, tornando-se atrativo não só devido a economia de energia como também ao seu custo e facilidade de operação.

As primeiras observações dos efeitos de redução de arrasto ocorreram na década de 1930, quando Forrest e Grierson (1931) notaram a redução da perda de energia em escoamentos turbulentos de água com fibras de celulose. Entretanto, tal fato passou despercebido. Esse fenômeno só foi ganhar atenção alguns anos depois, quando Toms (1949) realizou experimentos onde aditivos de alto peso molecular, na ordem de partes por milhão em peso, proporcionaram um aumento da vazão mantendo-se um mesmo gradiente de pressão em escoamentos turbulentos. Esse fenômeno ficou conhecido como efeito Toms (*Toms effect*). Esse efeito só foi chamado de redução de arraste em 1964, por Savins (1964). Essas soluções que sofreram esse efeito DR contêm aditivos, e são chamadas soluções de redução de arrasto (soluções DR). Existem basicamente dois tipos de aditivos DR: Polímeros de alto peso molecular e surfactantes. De acordo com Myska e Zakin (1997), aditivos DR de polímeros de alto peso molecular tendem a sofrer danos permanentes em suas cadeias quando submetidos a tensões de cisalhamento mais elevadas ou quando experimentam altas temperaturas. Por outro lado, os surfactantes possuem a capacidade de formar microestruturas, micelas cilíndricas denominadas de micelas gigantes, e ao sofrerem estes danos (fortes tensões cisalhantes e altas temperaturas) as micelas gigantes se quebram em micelas menores e são capazes de se regenerarem, recompondo-se novamente, fazendo com que esse dano seja temporário e não mais permanente como no caso dos polímeros.

O exato mecanismo de como os aditivos redutores de arrasto atuam ainda não é completamente definido. Sabe-se, no entanto, que em escoamentos com soluções DR as

intensidades turbulentas são reduzidas em relação ao escoamento do seu respectivo solvente. Warholic e colaboradores (1999) demonstraram que as intensidades turbulentas são reduzidas no escoamento com DR. Já em sistemas térmicos, no qual o objetivo é aquecer ou resfriar um fluido, o efeito DR pode não se mostrar vantajoso, pois a redução dos efeitos de turbulência geralmente afeta negativamente a troca térmica. De acordo com Aguilar e colaboradores (2001) escoamentos com DR resultam em coeficientes de transferência de calor convectivos baixos, e como consequência a transferência de calor em soluções de DR tende a ser prejudicada. Esta diminuição do coeficiente convectivo é denominada de redução da transferência de calor (*Heat Transfer Reduction* - HTR). O efeito da HTR, em soluções DR de surfactantes, é sempre superior ao efeito de DR, além disso segundo Zakin e colaboradores (1998) o efeito de HTR pode se aproximar de 90%.

Alguns métodos podem mitigar o efeito HTR. Técnicas como alteração da superfície interna da tubulação, inserção de aparatos que proporcionem a quebra local das microestruturas micelares do surfactante ou o aumento das flutuações turbulentas, além da utilização de energia ultrassônica. Essas propostas não são novidades para a melhoria da transferência de calor. Entretanto, esses métodos podem penalizar o ganho obtido anteriormente pelo efeito de redução de arrasto (WANG et al., 2011).

Nas últimas décadas uma nova classe de fluidos para transferência de calor vem sendo estudada, essa nova classe de fluidos foi nomeada de nanofluido, por Choi (1995), onde consiste na utilização de nanopartículas (metálicas, óxidos metálicos ou nanotubos) de tamanhos menores que 100 nm em um fluido base (água, óleo, etilenoglicol e outros), no qual possui a capacidade de aumentar a condutividade térmica desse fluido e conseqüentemente o coeficiente de transferência de calor por convecção. De maneira geral, a ideia de se inserir um sólido não solúvel em um fluido está relacionada com a necessidade de um aumento no consumo de energia, devido ao aumento da viscosidade da solução coloidal. Entretanto, de acordo com Pak e colaboradores (2007), Sundar e Sharma (2010) e Xuan e Li (2003) a adição de pequenas quantidades dessas nanopartículas não proporcionam um aumento significativo na potência de bombeamento.

Devido a melhorias das propriedades termofísicas, com pouca ou nenhuma penalidade na queda de pressão, os nanofluidos vem atraindo o interesse de muitos pesquisadores. Vários estudos relacionados a condutividade térmica, viscosidade, experimentos do desempenho de transferência de calor e aplicações de nanofluidos cada vez mais vem sendo realizados. De acordo com Sajid e Ali (2019), é possível perceber, na Figura 1, que as nanopartículas de Al_2O_3 , possuem preferência nos estudos realizados por pesquisadores, enquanto as nanopartículas de SiC e MgO têm recebido pouca atenção. Isso se deve ao fato das nanopartículas de Al_2O_3 mostrarem boa estabilidade no fluido base, serem facilmente disponíveis, menos onerosas e possuírem melhores propriedades termofísicas, em relação as demais nanopartículas, sendo essas as principais razões para o amplo uso de nanofluidos de Al_2O_3 .

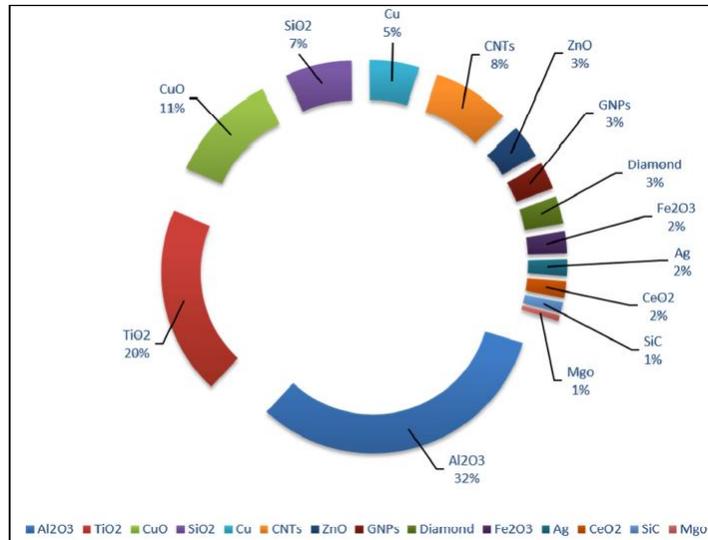


Figura 1 - Percentual dos tipos de nanopartículas utilizadas por pesquisadores em seus artigos.

FONTE: Sajid (2019).

Sabendo que os nanofluidos proporcionam um aumento da transferência de calor e que as soluções DR proporcionam economia na energia para o transporte, de tal modo que o segundo prejudica o primeiro, Yang e colaboradores (2012), combinando as ideias de Choi (1995) e Toms (1949), sugeriram um novo tipo de fluido capaz economizar energia, reduzindo arrasto, sem perder tanto em transferência de calor, e chamou esse novo fluido de “nanofluido à base de líquido viscoelástico” (*viscoelastic-fluid-based nanofluids*). Raei e colaboradores (2018) sugerem, na Figura 2, o comportamento entre soluções DR e nanofluidos e avaliam o comportamento da combinação de diferentes concentrações de nanofluidos de Al₂O₃ e surfactante CTAC. Verificaram também que a interação entre eles é complexa, e que apesar de existirem os efeitos de aumento da DR e redução da HTR em relação ao solvente e fluido base, esses efeitos são menos pronunciados em comparação ao efeito isolado de cada um.

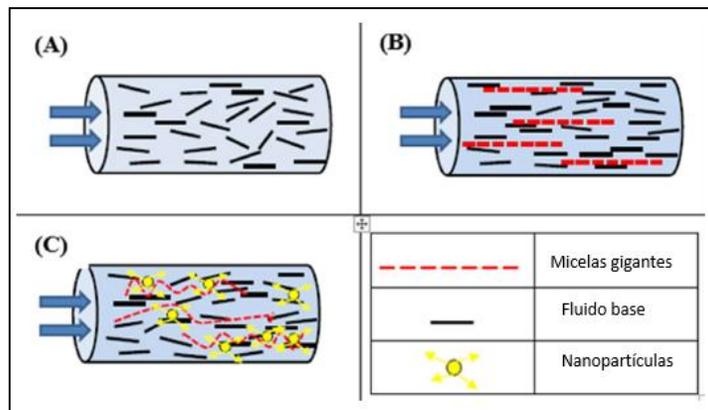


Figura 2 - Escoamento em uma tubulação (A) com o fluido base (B) com adição de surfactante (C) e com adição do surfactante e nanopartículas.

FONTE: Adaptado Raei e colaboradores (2018).

O uso de surfactantes como agentes redutores de arrasto pode proporcionar um consumo energético no transporte de um fluido. Em contrapartida a transferência de calor por convecção é reduzida, dessa maneira, esta técnica pode não se mostrar vantajosa em aplicações de sistemas térmicos. Tendo em vista isso, sabe-se que os nanofluidos são capazes de aumentar a transferência de calor por convecção, e como consequência desse aumento é possível reduzir a área de um trocador de calor (minimizando custos) ou aumentar o fluxo de calor do sistema. Ambas as técnicas, redução de arrasto e nanofluidos, se utilizadas adequadamente podem proporcionar redução do consumo energético (redução de custos). Sendo assim, a investigação experimental da utilização em conjunto de nanofluidos com soluções redutoras de arrasto mostra-se como um novo campo de estudo visando aplicações em sistemas térmicos, podendo reduzir custos ou aumentar produção em aplicações industriais.

Tendo em vista as possibilidades de melhoria para eficiência energética dos sistemas térmicos por meio da utilização de soluções DR e nanofluidos, este trabalho tem por finalidade avaliar o efeito da sinergia entre os efeitos de redução de arraste por uso de surfactante no transporte de um fluido combinado com a utilização de um nanofluido, visando mitigar o efeito da HTR nestas soluções. Tal avaliação foi realizada de maneira experimental, medindo-se o fator de atrito e o coeficiente de transferência de calor por convecção, em uma bancada experimental elaborada exclusivamente para este estudo. As nanopartículas e o fluido base, para preparação do nanofluido, utilizadas neste estudo foram Al_2O_3 e água deionizada, respectivamente. Já o surfactante utilizado, para o preparo das soluções DR, foi o CTAB. O foco principal foi investigar a possibilidade de aumentar a transferência de calor em soluções DR de CTAB adicionando-se nanopartículas de Al_2O_3 . Para isso, primeiramente, foram medidos experimentalmente o fator de atrito e o coeficiente de transferência de calor por convecção em soluções DR de CTAB e em nanofluidos de Al_2O_3 , separadamente. Em seguida, foi analisada a influência da adição dessas nanopartículas nas soluções DR, e a influência da adição desse surfactante no nanofluido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Nanofluido

Foi a partir dos anos 1990 que se iniciaram vários projetos de pesquisa em que a adição de quantidades muito pequenas de nanopartículas em um fluido base comum, como água, etilenoglicol ou óleo, aumentou efetivamente a condutividade térmica dessa mistura, denominada por Choi (1995) de nanofluido. De acordo com Dey e colaboradores (2017), o nanofluido é uma mistura heterogênea de sólido e líquido, onde os sólidos são partículas minúsculas (metais, óxidos metálicos ou carbono) de tamanhos nanométricos, menores do que 100 nm, podendo ser nanopartículas, nanotubos ou nanofios. O líquido ou fluido base pode ser uma fase simples ou uma mistura de diferentes fluidos. Esse nanofluido é uma suspensão coloidal estável com ou sem a adição de dispersantes.

O aumento da transferência de calor encontrado nos nanofluidos é principalmente devido a uma pequena concentração de nanopartículas que podem alterar, aumentando, significativamente as propriedades termofísicas do fluido base. Dessa maneira, algumas aplicações dessa utilização de nanofluidos se mostraram uma alternativa promissora, no que tange a redução do consumo de energia aumentando a efetividade da transferência de calor, como nas aplicações em radiadores automotivos (Peyghambarzadeh e colaboradores (2011), Peyghambarzadeh e Hoseini (2011), Naraki e colaboradores (2013) e Elias e colaboradores (2014)), em sistemas de refrigeração (Vasconcelos e colaboradores (2017) Azevedo e colaboradores (2017)) e em coletores solares (Hung, Teng e Lin (2013), (Yousefi e colaboradores (2012), Mwesigye e Meyer (2017) e Alashkar e Gadalla (2017)).

É importante ressaltar que quando um sólido é depositado em um meio fluido pode existir a possibilidade de sedimentação desse sólido, sendo assim, a preparação do nanofluidos torna-se muito importante, pois pode determinar se as nanopartículas permanecerão em suspensão coloidal ou como um sedimento ou agregado no fluido base. As propriedades finais dos nanofluidos são determinadas pela qualidade da dispersão e suspensão. Uma dispersão uniforme e suspensão estável de nanopartículas em líquidos são a chave para a maioria das aplicações de nanofluidos. Por esta razão, existem técnicas específicas para a preparação dos nanofluidos. Em geral, os métodos para a produção dos nanofluidos podem ser caracterizados como método de um passo e método de dois passos.

No método de um passo, a formação das nanopartículas é combinada com a formação do nanofluido. As nanopartículas são fisicamente ou quimicamente formadas no fluido base ou na presença de surfactantes através da condensação do metal a partir do vapor ou por uma reação química, deposição física de vapor (PVD) e deposição química de vapor (CVD), respectivamente. A principal vantagem do processo de uma etapa é que as nanopartículas são puras e têm tamanhos mais uniformes. A desvantagem do processo é que, como o nanofluido é preparado no próprio fluido base, somente pequenas quantidades dele podem ser produzidas. Isso impede a produção em massa dos nanofluidos em processos industriais para que sejam comercialmente disponíveis (DAS *et al.*, 2007).

No método de dois passos, as nanopartículas são preparadas em uma etapa anterior, e depois são misturadas com o fluido base em uma segunda etapa, como exemplificado na Figura 3. As nanopartículas, uma vez produzidas, tendem a se agregar, tanto em forma de pó quanto em suspensões. Segundo Mukherjee e colaboradores (2018), essa tendência de aglomeração se deve ao fato das nanopartículas possuírem uma alta área superficial e conseqüentemente uma

alta energia superficial, fazendo com que fortes forças de Van Der Waals atuem entre as nanopartículas. A adição de um surfactante dissolvido no nanofluido, pode evitar essa agregação das nanopartículas. Além disso, a utilização de ultrassom (vibração mecânica) pode ser aplicada ao nanofluido para promover uma desagregação. A principal vantagem do método de dois passos é que as nanopartículas podem ser produzidas separadamente por um método industrial que permite sua produção em massa e de maneira menos onerosa em relação ao método de um passo.

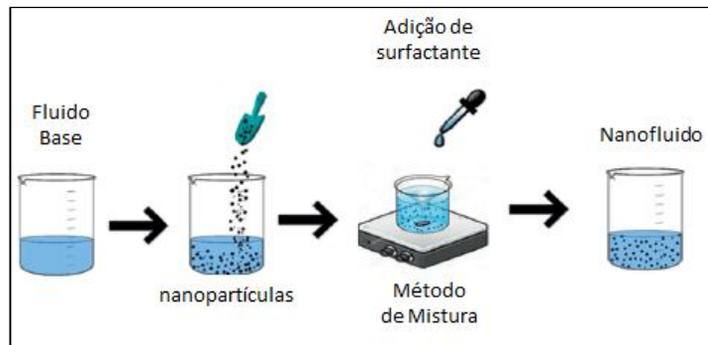


Figura 3 - Método de dois passos para a preparação do nanofluido.

FONTE: Adaptado Mukherjee e colaboradores (2018).

De acordo com Yu e Xie (2012) a estabilidade coloidal dos nanofluidos pode ser explicada através da teoria DLVO (Derjaguin, Landau, Verway e Overbeek), que é definida como a soma das forças atrativas de Van Der Waals e as forças repulsivas da dupla camada elétrica existentes entre as partículas que se aproximam uma da outra em decorrência do movimento browniano. Se a força de atração for maior do que a força repulsiva, as duas partículas irão colidir e sedimentar no fluido de base, tornando a suspensão instável. Sendo a situação inversa, quando as nanopartículas possuem forças de repulsão altas o suficiente, isso favorece para que se tenha uma suspensão estável. Assim, para o nanofluido estável, as forças repulsivas entre as partículas devem ser dominantes.

De acordo com Hwang e colaboradores (2008), independentemente do método de fabricação do nanofluido, a sua preparação deve estar uniformemente dispersa, o que é essencial para se obter uma boa estabilidade das propriedades dos nanofluidos. Por isso, em seu artigo, ele aborda de maneira sistemática várias técnicas de tratamento físico, avaliando o efeito de cada técnica na preparação do nanofluido. Além disso, Wang e Mujumdar (2008) sugerem que o método de dois passos é mais adequado para as nanopartículas de óxido, enquanto que para as nanopartículas metálicas, recomendar-se-á o método de um passo.

Os métodos utilizados para se caracterizar um nanofluido interferem na compreensão das propriedades físicas do mesmo. A caracterização do nanofluido inclui a determinação da estabilidade coloidal, tamanho e distribuição do tamanho de partículas, concentração e composição elementar, bem como medidas das propriedades termofísicas. Algumas das ferramentas mais utilizadas para caracterização incluem, medição da velocidade de sedimentação, imagens por microscopia eletrônica de transmissão (MET), espalhamento dinâmico da luz (DLS) e medição do Potencial Zeta (carga superficial da nanopartícula).

2.1.1. Medição da Estabilidade dos Nanofluidos

A Figura 4 ilustra a utilização da MET em nanopartículas de Al_2O_3 . O MET é utilizado para determinar a aglomeração das nanopartículas, mostrando o tamanho, forma e distribuição dentro do nanofluido. Quanto maior o tamanho dos aglomerados maiores serão as chances de ocorrer a sedimentação. Nesta técnica não é possível visualizar as nanopartículas imersas no nanofluido, pois a amostra do nanofluido é seca antes de serem capturadas quaisquer fotografias. Conforme descrito por Liu e colaboradores (2006), uma gota do nanofluido é colocada em uma fita adesiva fixada na superfície superior do porta-espécimes e a solução é aquecida em um forno a vácuo e seca naturalmente sob o ar. As nanopartículas sólidas são então revestidas com Ouro (Au) e Paládio (Pd) e então mantidas na câmara de vácuo para captura das imagens.

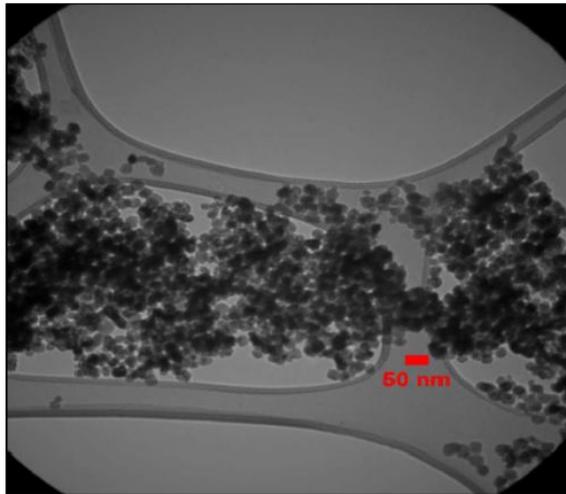


Figura 4 - fotografia MET de nanopartículas de Al_2O_3 .

FONTE: Behrouz (2018)

Outra técnica utilizada para análise da estabilidade dos nanofluidos é o Espalhamento Dinâmico de Luz (Dynamic Light Scattering, DLS), também chamada de Espectroscopia de Correlação de Fótons (Photon Correlation Spectroscopy, PCS). Ao contrário do MET que permite calcular o tamanho da nanopartícula, a técnica DLS permite calcular vários tamanhos de nanopartículas e aglomerados em uma amostra de maior volume. Consiste basicamente em medir o estado de aglomeração das nanopartículas em função do tempo. Essa técnica se baseia no movimento Browniano e no espalhamento da luz. Pois, conforme Michaelides (2014) partículas e moléculas em suspensão tendem a ficar em constante movimento, tal movimento é induzido pelo constante bombardeamento de moléculas do solvente, que também estão se movendo, devido a sua energia térmica.

Uma das formas de se medir a estabilidade de maneira mais precisa é a medição do Potencial Zeta das nanopartículas em um nanofluido, que oferece um conhecimento quantitativo da tendência dessas nanopartículas em formar agregados, e tem sido utilizado por vários autores como critério para a estabilidade do nanofluido (GHADIMI et al., 2011) e (ZHU et

al., 2007). Na Figura 5, tomando como exemplo uma partícula de carga negativa, e de acordo com Michaelides (2014), cargas positivas serão adsorvidas na superfície dessa partícula a uma distância λ_D , denominado de comprimento de Debye, formando uma camada, chamada de camada de Stern, carregada com cargas contrárias a da partícula. Em seguida, haverá uma outra camada em torno da camada de Stern, que é conhecida como camada difusa, essa camada tem suas próprias cargas elétricas e é mais difusa. O Potencial Zeta (ζ) é então definido como a diferença de potencial entre a camada de Stern e o meio de dispersão do fluido ligado à partícula dispersa. Quando o raio da partícula é muito maior que o comprimento de Debye, o Potencial Zeta pode ser medido conforme a Equação 1, proposta por Russel e colaboradores (1989). Onde q é a carga da partícula, ε é a constante dielétrica da solução, ε_0 é permissividade elétrica do vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m) e λ_D o comprimento de Debye.

$$\zeta = \frac{q\lambda_D}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}$$

1

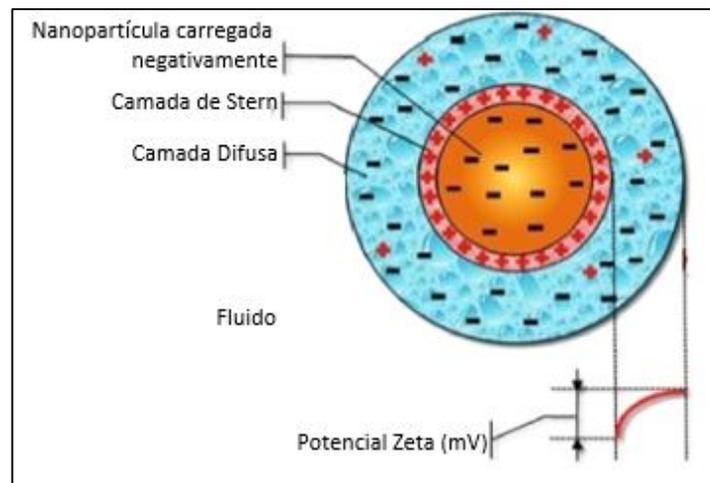


Figura 5 - Descrição do Potencial Zeta para uma partícula carregada negativamente.

Fonte: Adaptado Mukherjee e colaboradores (2018)

Tabela 1 apresenta, de maneira geral, o comportamento das nanopartículas no fluido base em relação ao Potencial Zeta, proposto por Michaelides (2014). Geralmente, o potencial Zeta varia de negativo em altos valores de pH a positivos em baixos valores de pH. Os nanofluidos são instáveis no ponto isoeletrico, onde o Potencial Zeta é zero, ou seja, as cargas positivas e negativas são igualmente distribuídas no fluido.

Tabela 1 - Comportamento do nanofluido em relação ao potencial Zeta.

Potencial Zeta ζ	Comportamento
$\zeta = 0 \text{ mV}$ Ponto isoelétrico	Não há estabilidade; Alta agregação e sedimentação.
$ \zeta > 15 \text{ mV}$	Moderada agregação; Sedimentação
$ \zeta > 30 \text{ mV}$	Estabilidade temporária; Moderada sedimentação
$ \zeta > 40 \text{ mV}$	Estável; Baixa sedimentação.
$ \zeta > 60 \text{ mV}$	Estável; Não apresenta Sedimentação.

Fonte: Adaptado Michaelides (2014)

A Figura 6 ilustra a influência do pH no potencial Zeta para alguns nanofluidos de Al_2O_3 com e sem adição de surfactantes de alguns autores da literatura. Lee e colaboradores (2008) utilizaram nanopartículas de Al_2O_3 de tamanho médio de $30 \pm 5 \text{ nm}$, utilizando água destilada como fluido base e mediram a influência do tempo de ultrassom no valor do Potencial Zeta para a concentração de 0,1% em volume para valores de pH e temperatura de 6,04 e 25°C , respectivamente. Wang e colaboradores (2009) investigaram a influência do pH no Potencial Zeta para nanofluido de Al_2O_3 e água com concentração de 0,05% em massa, com nanopartículas do tamanho médio 25 nm, e adição do surfactante SDBS em 0,05% em massa. Singh e colaboradores (2012) mediram o Potencial Zeta para nanofluido de Al_2O_3 em água (25 nm) em concentração de 0,25% em volume e um pH de 4,0 e relataram ter encontrado um ponto isoelétrico para esse nanofluido, nessa concentração, no valor do pH 8,7. Já Khairul e colaboradores (2016) utilizando nanofluido de Al_2O_3 -água deionizada, com tamanho médio de 10 nm e concentração de 0,1%wt em massa, avaliaram a influência do surfactante SDBS, medindo os valores do Potencial Zeta e seus respectivos valores de pH.

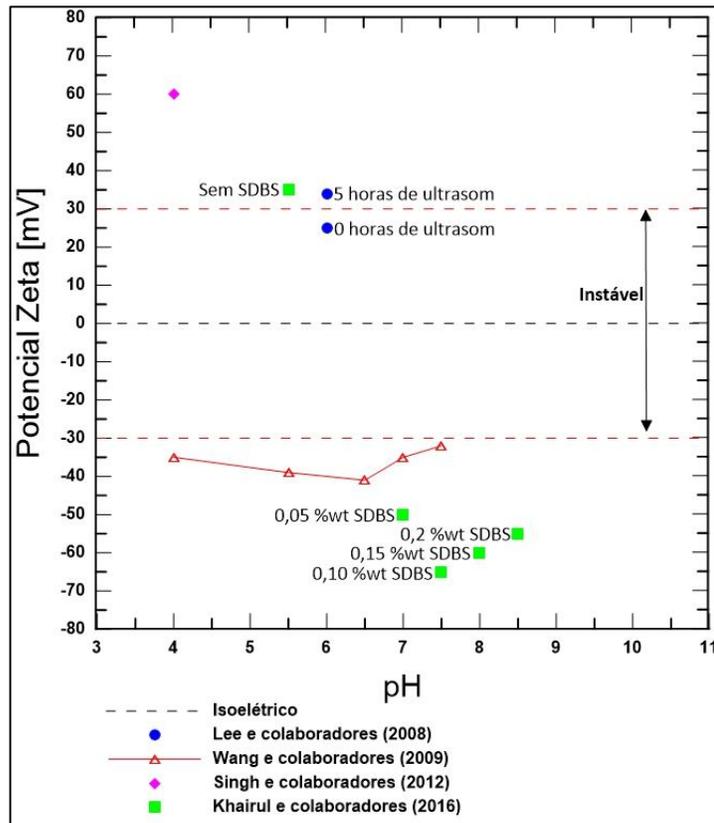


Figura 6 - Influência do pH no Potencial Zeta para nanofluidos de Al_2O_3 .

Dentre os métodos para avaliar a estabilidade do nanofluido, o método de fotografias para medição da velocidade de sedimentação (Figura 7) pode ser considerado o método mais simples em relação aos supracitados. Esse método consiste na preparação de uma amostra em um tubo (recipiente) de vidro (boa transparência). Assim as fotografias do tubo de vidro são capturadas em intervalos regulares de tempo. As comparações das imagens capturadas das soluções coloidais podem ser analisadas. No caso de partículas de suspensão instáveis, as partículas aglomeram-se e sedimentam no fundo do tubo de vidro. Se forem observadas variações de intensidade de cor entre as imagens capturadas, a solução poderá ser considerada instável. Em geral, costuma-se combinar outro método com este para a análise da estabilidade do nanofluido.

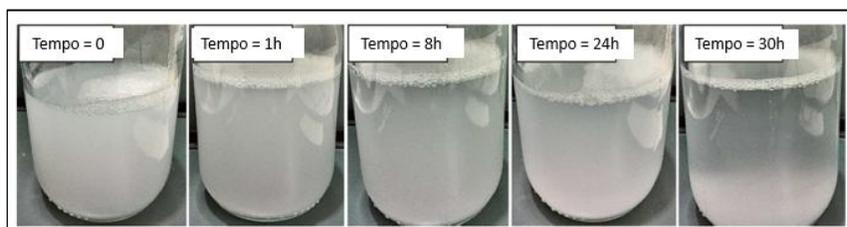


Figura 7 - Fotografias para nanofluido com 0,2%wt de Al_2O_3 em diferentes tempos.

2.1.2. Métodos para melhorar a estabilidade dos nanofluidos

As nanopartículas dispersas no nanofluido se mantêm em suspensão devido ao movimento browniano, impedindo que a ação gravitacional provoque uma sedimentação acelerada. Entretanto, após uma estabilidade temporária, como já dito anteriormente, devido ao tamanho dessas nanopartículas, as forças de Van Der Waals podem fazer com que ocorra aglomerações, formando agregados e reduzindo o efeito de dispersão no fluido base, podendo aumentar assim a velocidade de sedimentação e conseqüentemente comprometer as propriedades dos nanofluidos.

As utilizações de algumas técnicas específicas podem facilitar a obtenção de nanofluidos com boa estabilidade e dispersão, isso é possível através de aplicações de determinados métodos químicos e mecânicos. De acordo com a literatura, a combinação desses métodos químicos e mecânicos mostram-se bastante eficazes na preparação dos nanofluidos. Os métodos físicos estão relacionados a aplicação de forças de alta energia como agitação magnética e ultrassom, que atuam na intenção de quebrar os aglomerados de nanopartículas. Já o método químico, compreende a desaglomeração das nanopartículas por meio da adição de um surfactante, controle de pH ou modificação de superfície das nanopartículas.

A utilização do agitador magnético pode ser considerada um dos métodos mais básicos aplicado à quebra dos aglomerados de nanopartículas. A agitação do fluido é promovida através de um corpo magnético que gira devido a um campo magnético externo. Já a utilização do método de ultrassom apresenta mais eficácia em relação ao agitador magnético, tendo em vista que o efeito da quebra dos aglomerados ocorre bem mais rápido em relação ao método anterior. Existem basicamente dois tipos, o banho ultrassônico e o sonotrodo. No primeiro, as ondas ultrassônicas se propagam através de um fluido, geralmente água, e o nanofluido dentro de algum recipiente fica imerso nesse banho, já o segundo, o sonotrodo fica em contato direto com o nanofluido.

Como as nanopartículas possuem grande área superficial, elas apresentam também um alto nível de energia em sua superfície, o que faz com que as mesmas se aglomerem na tentativa de baixar essa energia. O tratamento químico das nanopartículas permite que grupos químicos sejam adsorvidos na superfície dessas partículas, permitindo uma boa interação e estabilidade. Essa adsorção pode separar os aglomerados momentaneamente, e dependendo das condições pode ocorrer uma nova aglomeração ao longo do tempo. As técnicas químicas mais utilizadas para prolongar a estabilidade dos nanofluidos são a adição de surfactantes e ajuste de pH (DEY *et al.*, 2017).

O controle de pH em nanofluidos mostra-se uma técnica interessante no controle da estabilidade dos nanofluidos, pois está diretamente relacionada com as interações eletrostáticas entre as partículas. A mudança do pH, ou grau de ionização, pode melhorar ou piorar essa estabilidade.

Um surfactante, contração do termo *Surface Active Agent*, é uma substância que, quando presente em baixa concentração em um sistema, tem a propriedade de adsorver sobre as superfícies ou interfaces do sistema e de alterar de forma acentuada a superfície ou energias livres interfaciais dessas superfícies (ou interfaces). O termo interface indica um limite entre as

duas fases não miscíveis; O termo superfície indica uma interface onde uma das fases é um gás, geralmente ar. De acordo com Rosen (2004) os surfactantes são moléculas anfipáticas que consistem numa porção hidrofóbica (não polar) que está ligada a uma porção hidrofílica (polar ou iônica). A Figura 8 exemplifica o comportamento de uma nanopartícula em água e sua interação com as moléculas de surfactante.

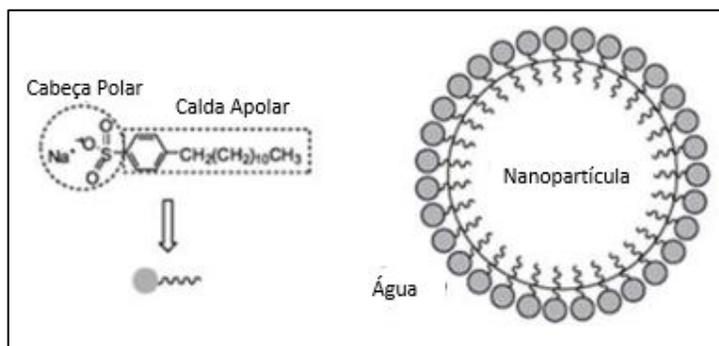


Figura 8 - comportamento da nanopartícula na água com adição de surfactante.

FONTE: adaptado Rinaldi e colaboradores (2007)

Conforme Porter (1994), a parte hidrofílica ou a cabeça polar da molécula de surfactante pode ser categorizada em dois grupos: surfactantes iônicos e não iônicos (neutro). O primeiro pode ser categorizado em dois tipos: surfactantes catiônico, aniônico e anfotérico. A

Tabela 2 apresenta alguns tipos de surfactantes de acordo com a classificação apresentada.

Tabela 2 - Tipos de surfactantes.

Catiônico	Aniônico	Anfotérico	Não iônico
Brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB)	Sulfonato de dodecilbenzeno de sódio (SDBS)	Lecitina Hidroxisultaina	Éter nonilfenílico
Cloreto de cetrimônio	Sulfonato de dodecilbenzeno de sódio (SDBS)	Lauroamphoacetato de sódio Cocamidopropyl betaina	Tween 80
Cloreto de benzalcônio	Sulfato de lauril de amônio		
	Laurilsulfato de potássio		

FONTE: Adaptado MUKHERJEE e colaboradores (2018.)

De acordo com Mukherjee e colaboradores (2018), da mesma maneira que os surfactantes, as nanopartículas podem ser hidrofílicas ou hidrofóbicas (pois possuem cargas). Os fluidos base também podem ser de caráter polar ou não polar. Sendo assim, as nanopartículas hidrofílicas, geralmente os óxidos metálicos (Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , ZnO e outros), possuem maior facilidade de dispersão em fluidos polares, como a água por exemplo, e as nanopartículas hidrofóbicas, como os nanotubos de carbono (NTC), apresentarão melhor dispersão em fluidos não polares, como o óleo. No entanto, para misturar nanopartículas hidrofílicas em fluidos não polares ou nanopartículas hidrofóbicas em fluidos polares, a tarefa torna-se difícil e a adição dos surfactantes como dispersantes pode melhorar a estabilidade entre as nanopartículas e fluidos base.

Muitos artigos relatam a influência de surfactantes na estabilidade dos nanofluidos. A concentração insuficiente de surfactantes pode inverter a polaridade nas nanopartículas, promovendo uma atração entre elas e aumentando o tamanho dos aglomerados formados. Wang e colaboradores (2009) avaliaram como a concentração do surfactante SDBS influenciou na estabilidade e na dispersão de nanofluidos Al_2O_3 -água e CuO -água. Já Qi e colaboradores (2013) avaliaram a estabilidade em nanofluido de Al_2O_3 -água utilizando quitosana como dispersante. Em ambas as situações a mudança na concentração dos surfactantes alterou a estabilidade do nanofluido. A adição do surfactante também altera outras propriedades dos nanofluidos. Lotfizadehdehkordi e colaboradores (2013) e Das e colaboradores (2017) mostraram a influência da adição de SDBS na viscosidade e condutividade térmica do nanofluido.

2.1.3. Mecanismos de estabilidade

Os nanofluidos podem exibir dois tipos de mecanismos relacionados a dispersão dos nanofluidos: estabilização eletrostática e estérica (DEY *et al.*, 2017). A estabilização eletrostática ocorre pela adsorção de íons pela superfície das nanopartículas (Figura 9). Essas adsorções criam camadas elétricas, já explicada pela teoria DLVO, que resultam em uma força de repulsão entre as nanopartículas. O controle de pH possui forte influência nesse mecanismo de estabilização. Já a estabilização estérica das nanopartículas ocorre através da adsorção de macromoléculas, tais como polímeros ou surfactantes, nas superfícies das nanopartículas. Essa adsorção, pelas macromoléculas, produz uma força repulsiva estérica adicional, funcionando como um escudo, causando uma obstrução para as forças de Van Der Waals, entre as nanopartículas. Outros autores, assim como Mukherjee e colaboradores (2018), adicionam o mecanismo de estabilidade denominado de eletroestérico, que de maneira sucinta é quando ambos os mecanismos de estabilização contribuem para evitar a agregação das nanopartículas.

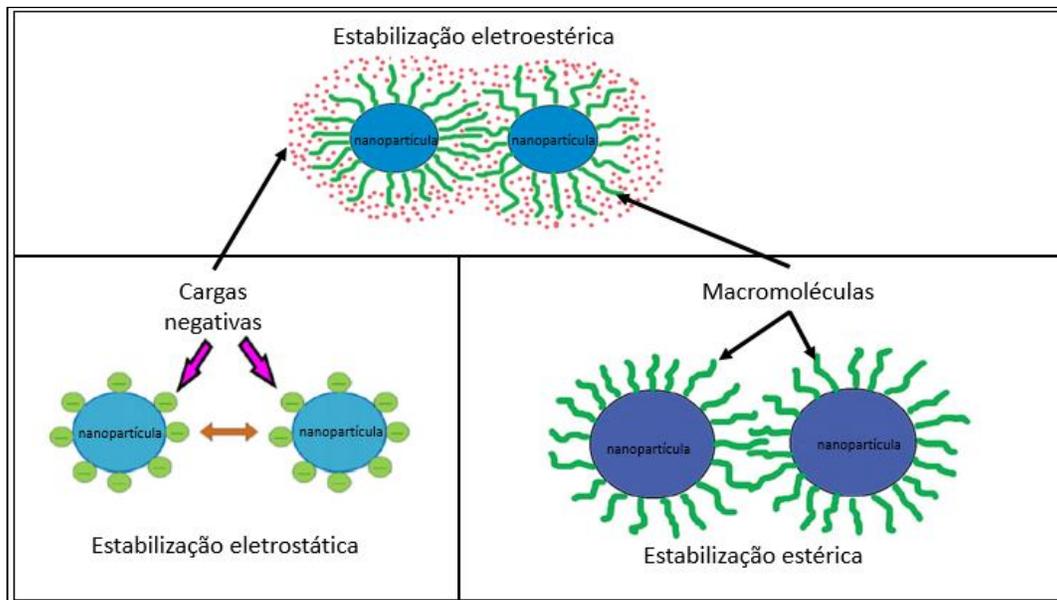


Figura 9 - Mecanismos de estabilidade dos nanofluidos.

FONTE: Adaptado MUKHERJEE e colaboradores (2018).

2.2. Redução de Arrasto e Transferência de Calor em soluções com Surfactantes

Forrest e Grierson (1931), descobriram que a resistência ao escoamento poderia ser reduzida, em escoamentos turbulentos, quando as fibras de celulose estavam presentes na água. Naquele momento este fenômeno não recebeu atenção suficiente. O primeiro que relatou, oficialmente, este fato foi o inglês Toms (1948), que relatou o fenômeno DR em escoamentos turbulentos com solução de polímero. Portanto, esse fenômeno em escoamentos turbulentos é frequentemente chamado de efeito Toms (*Toms Effect*). A partir disso, deu-se início a análises em todo o mundo sobre os mecanismos da redução de arrasto. O fenômeno DR foi então bem reconhecido e um progresso significativo para esta técnica foi feito em aplicações reais (Nijs (1995) *apud* Andrade (2013)).

Apesar de existirem inúmeros estudos sobre redução de arrasto, não há ainda uma teoria exata para explicar esse fenômeno. Do ponto de vista dos efeitos físicos da turbulência existem basicamente duas linhas, uma baseada na teoria viscosa proposta por Lumley (1948) e outra baseada nos efeitos elásticos proposta por Tabor e De Gennes (1986), conforme citado por Costalonga (2017). Ambas as teorias sobre as explicações do mecanismo de redução de arrasto aplicam-se tanto aos redutores de arrasto poliméricos quanto aos surfactantes, mesmo apesar de inicialmente esses estudos terem sido voltados aos polímeros, enquanto que os estudos de redução de arrasto por surfactante terem se iniciado depois, por Savins (1967), conforme citado por Zakin e colaboradores (1998).

Conforme a teoria viscosa, Lumley (1948), a adição do surfactante, aumentaria a viscosidade extensional da solução, devido ao prolongamento da subcamada viscosa, onde essa seria responsável pela supressão das flutuações turbulentas. Já, de acordo com a teoria elástica, Tabor e De Gennes (1986), conforme citado por Costalonga (2017), o efeito de redução de arrasto ocorre devido a capacidade de armazenamento da energia elástica das moléculas que

foram afetadas pelos efeitos da turbulência, suprimindo-a e em seguida liberando essa energia para o escoamento principal.

Na intenção de manter o assunto da linha do trabalho coeso, a abordagem sobre redução de arrasto terá como foco a redução de arrasto por surfactantes. Uma breve definição e classificação dos surfactantes já foi realizada anteriormente, devido sua grande utilização em muitos nanofluidos. É importante ressaltar que alguns fatores como forte tensão de cisalhamento e alta temperatura podem promover um dano permanente ao polímero. Essas estruturas danificadas não podem se reorganizar, conseqüentemente resultando na perda do efeito de redução de arrasto. Portanto, a técnica de redução de arrasto com adição de polímero geralmente é inaplicável tanto em sistemas de recirculação com bombeamento quanto em sistemas térmicos com elevadas temperaturas.

De acordo com Li e colaboradores (2012) o fator chave para o efeito de redução de arrasto provocada por surfactantes está relacionada com as nanoestruturas formadas na solução de surfactante, as chamadas estruturas induzidas por cisalhamento (SIS). Isso ocorre porque, depois que o surfactante é dissolvido em água, com o auxílio de um estabilizador (por exemplo, fornecendo contra íons para o surfactante catiônico), as moléculas de surfactante se organizam formando essas microestruturas, chamadas de micelas. Esse processo de formação da micela é uma característica do surfactante, e se inicia após o surfactante atingir a chamada concentração micelar crítica (CMC) no solvente.

A Figura 10, ilustra esquematicamente um diagrama de fase simplificado. Zakin e colaboradores (1998) esclarecem que um surfactante em sua solução estará parcialmente no estado de cristal ou gel quando a temperatura for menor do que o chamado ponto Krafft. Quando a temperatura for maior do que o ponto Krafft, as moléculas de surfactantes irão se aglomerar e formar micelas esféricas em concentrações ao longo da CMC_I . Com o aumento adicional da concentração da solução acima de CMC_{II} , os surfactantes tornar-se-ão micelas gigantes (*Worm-Like Micelles*).

Bewersdorff e Ohlendon (1988) afirmam que só é possível atingir o efeito de redução de arrasto quando as micelas gigantes estão presentes na solução, e de acordo com Rodrigues e colaboradores (2008) essas micelas gigantes estão associadas a um comportamento viscoelástico do fluido. Assim como os polímeros, os surfactantes também sofrem danos ao experimentarem maiores valores de tensão (tensão de cisalhamento) ou temperatura. Entretanto este dano nem sempre é permanente, como no caso dos polímeros. Após o desaparecimento desses efeitos (tensão e temperatura) as micelas gigantes podem se recompor automaticamente dentro de pouco tempo. Isso indica que as microestruturas na solução com surfactante possuem a capacidade de "auto reparo", e o efeito de redução de arrasto é retomado.

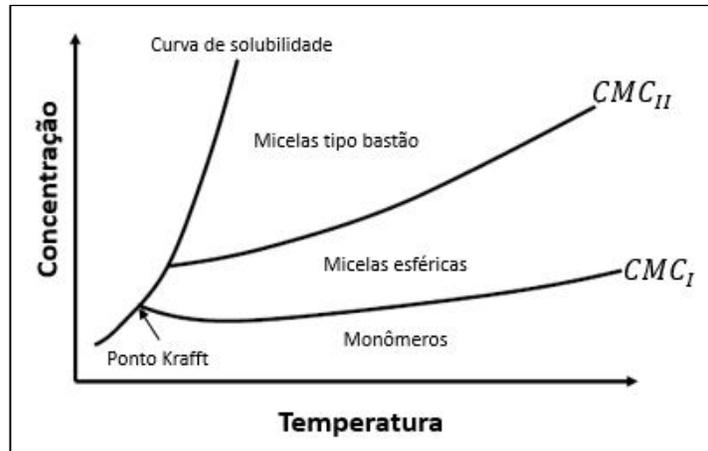


Figura 10 - Diagrama esquemático para soluções de surfactante.

FONTE: Adaptado ZAKIN e colaboradores (1998)

Com base nessa característica de auto reparo, em um sistema de recirculação de líquido real com uma bomba, uma solução DR com surfactante é mais apropriada em relação a soluções DR poliméricas. No entanto, o redutor de arrasto de surfactante também possui uma faixa de temperatura efetiva. Fora desse intervalo de temperatura, ele perde seu efeito de redução de arrasto apenas temporariamente. Uma vez que a temperatura do fluido é retomada, para essa faixa, a capacidade de redução de arrasto pode ser recuperada automaticamente. Durante o escoamento essas tensões que dissociam as microestruturas (micelas gigantes) estão relacionadas a um determinado número de Reynolds. Em um escoamento forçado, por exemplo, uma solução DR com surfactante exibirá um aumento do efeito de redução de arrasto até que se atinja um valor crítico de Reynolds, onde o efeito DR é máximo. A partir disso o efeito DR diminuirá, até cessar, com o aumento do número de Reynolds, a Figura 11 ilustra melhor esse comportamento.

De maneira geral e do ponto de vista qualitativo, as soluções DR de surfactantes apresentam comportamento semelhantes com a variação do número de Reynolds, como mostrado a Figura 11, ou seja, existe um ponto de início do efeito de DR (Re_1), um ponto de máximo efeito DR (Re_c) e o ponto do desaparecimento do efeito DR (Re_2). Os motivos para esses acontecimentos já foram explicados em subcapítulos anteriores. O aumento da concentração pode deslocar os valores de Re_c para maiores valores de Reynolds e menores valores do fator de atrito.

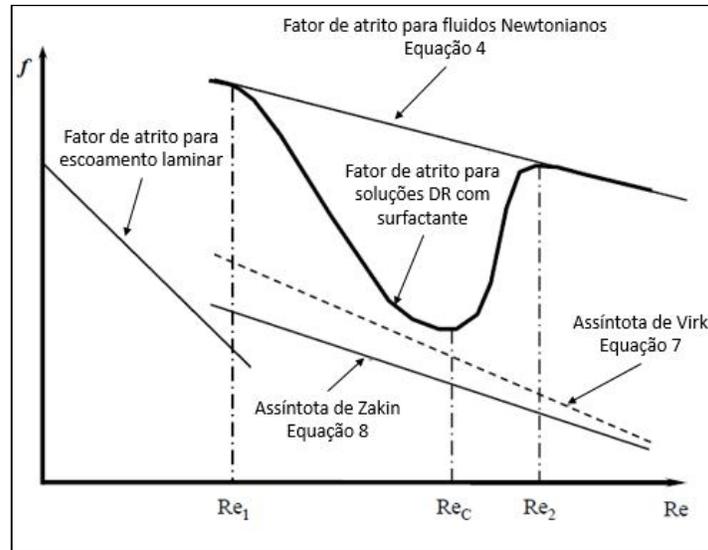


Figura 11 - Comportamento de soluções DR com surfactante.

FONTE: Adaptado LI e colaboradores (2012).

De acordo com Wang e colaboradores (2011) O efeito DR atua basicamente suprimindo a turbulência e, assim, ocorre uma grande redução do coeficiente de transferência de calor. Silberman (1983) sugere que devido ao aumento da subcamada viscosa, a resistência térmica entre a parede e o fluido diminui a capacidade de transferência de calor da solução. Outra consideração relacionada a redução da transferência de calor em soluções DR com surfactante é feita por Warholic e colaboradores (1999), no qual as flutuações turbulentas da velocidade, nos sentidos radial e axial, são suprimidas. Sendo assim, a transferência de calor do fluido fica prejudicada, pois são as flutuações no sentido radial as principais responsáveis pela capacidade de transferência de calor no fluido.

Conforme Aguilar e colaboradores (2001) em soluções DR de surfactante, o efeito da redução da transferência de calor (HTR – *Heat Transfer Reduction*) é muito maior do que o efeito DR. Dessa maneira, em aplicações de Soluções DR de surfactante, embora possa-se reduzir o consumo de energia de bombeamento (transporte), a troca térmica, no trocador de calor por exemplo, ficará prejudicada, levando a uma baixa efetividade do sistema, podendo assim limitar a aplicação da técnica de redução de arrasto por surfactante no campo da transferência de calor. Entretanto, Ma e colaboradores (2011) realizaram vários experimentos com solução DR de CTAC:NaSal onde após um determinado valor de Reynolds, denominado número crítico de Reynolds, a HTR começa a diminuir, fazendo com que a o efeito DR seja maior que a HTR.

Métodos para a melhoria da transferência de calor podem ser aplicados para reduzir a HTR e viabilizar a aplicação de soluções de DR de surfactantes. Experimentos conduzidos por Yuning e colaboradores (2001) baseiam-se na instalação de espirais na parede interna da tubulação promovendo um aumento da turbulência local e da tensão de cisalhamento. De acordo com os autores a redução da HTR ocorreu devido alterações na subcamada viscosa. Outra possibilidade para melhoria da transferência de calor em soluções DR de surfactante está relacionada com a possibilidade de se promover a destruição temporária das nanoestruturas responsáveis pela redução de arrasto. Dentre muitas opções para se realizar esta tarefa de reorganização das estruturas micelares, a adição de uma bomba na entrada do trocador de calor, por exemplo,

apresenta-se como uma alternativa, pois a bomba proporciona alto cisalhamento, desfazendo temporariamente essas microestruturas do surfactante e aumentaria a transferência de calor no trocador de calor. Experimentos conduzidos por Gasljevic e Matthys (1997) introduzindo pequenos dispositivos, como misturadores estáticos, canais tipo favos de mel ou malhas na entrada do trocador de calor, mostraram que esses dispositivos são capazes de desfazer essas micelas melhorando a HTR.

Apesar dos métodos supracitados melhorarem a transferência de calor para o fluido, em todos eles essa melhoria é acompanhada de um aumento do gradiente de pressão. Outro método, proposto por Yunying e colaboradores (2003), é a utilização de energia ultrassônica para destruir as microestruturas do surfactante na entrada do trocador de calor. Embora este método não penalize tanto o gradiente de pressão, é necessária uma grande quantidade de energia para desagregar a microestrutura, além de não ser fácil a tarefa de transmitir essa energia ao escoamento.

A determinação de qual método para a melhoria da transferência de calor poderia ser mais viável em soluções DR de surfactantes aplicado em sistemas térmicos depende da natureza do surfactante, da faixa de temperatura e do tamanho do sistema térmico. Novas possibilidades vêm sendo apresentadas, sendo a utilização de nanofluidos em soluções DR de surfactantes uma alternativa proposta por vários autores como Liu e Liao (2010), Yang e colaboradores (2012), Yang e colaboradores (2013), Wang e colaboradores (2017) e Raei e colaboradores (2018).

2.3. Conceitos básicos dos efeitos de DR e HTR.

Um fluido ao escoar, em uma tubulação ou canal, devido a sua viscosidade tem atrito com a superfície da parede, que provocará uma força de arrasto contrária ao movimento. Para se manter uma vazão constante, é necessário inserir energia ao escoamento. Através da análise do equilíbrio de forças na seção de passagem do escoamento, é possível estabelecer uma relação entre a tensão de cisalhamento na parede exercida pelo fluido e o gradiente de pressão. Assim a tensão de cisalhamento na parede de um tubo é definida como:

$$\tau_w = \frac{\Delta P D}{4L} \quad 2$$

Onde ΔP é a diferença de pressão (ou perda de carga), D o diâmetro do tubo e L o comprimento do mesmo. Uma relação similar pode ser obtida pelo balanço de força para diferentes geometrias (tubos concêntricos, canais retangulares, entre outras). Após o cálculo da tensão de cisalhamento na parede, o fator de atrito de Fanning, experimental, da parede pode ser calculado conforme a Equação 3.

$$f = \frac{\tau_w}{1/2 \rho V^2} \quad 3$$

Onde V é a velocidade média do escoamento e ρ é a massa específica do fluido. Em estudos de redução de arrasto com o fluido escoando por uma tubulação é comum realizar a obtenção do coeficiente de atrito em diferentes números de Reynolds por meio de medição experimental. Dessa forma o fator de atrito de Fanning, para escoamentos turbulentos, é estimado teoricamente através da Equação 4 (esta equação também pode ser usada para validar a confiabilidade do sistema de medição em estudos experimentais):

$$f = 0,0791Re^{-0,25} \quad 4$$

O número de Reynolds, deve ser definido pelas propriedades do fluido, tanto do solvente quanto da solução:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad 5$$

Onde μ é viscosidade aparente do fluido, geralmente medida em um reômetro, ρ é a massa específica do fluido e V é a velocidade média do escoamento. Assim, segundo Lumley (1948), a redução de arrasto pode ser calculada através da comparação entre o fator de atrito do solvente (f) e da solução (f_0) medidos no mesmo número de Reynolds, e pode ser quantificado como a redução percentual do fator de atrito em comparação com o solvente puro no mesmo número de Reynolds.

$$\%DR = \frac{f_{\text{solvente}} - f_0}{f_{\text{solvente}}} \times 100 \quad 6$$

Para soluções DR escoando em uma tubulação, o fator de atrito dessas soluções DR (f_0) possuem valores assintóticos máximos com o aumento do números de Reynolds. Virk (1975) e Zakin (1998) propuseram a assintota para o fator de atrito em escoamentos de soluções DR com adição de polímero e de surfactante, respectivamente, da seguinte forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19,01 \log(Re\sqrt{f}) - 32,4 \quad 7$$

$$f = 0,315Re^{-0,55} \quad 8$$

A Figura 11 mostra o fator de atrito de Fanning como função do número de Reynolds, uma solução DR de polímero e uma de surfactante. Na Figura 11 é possível visualizar a equação de Fanning, válida para fluidos newtonianos em escoamentos turbulentos, a assíntota de Virk, que corresponde ao menor valor do possível do fator de atrito em soluções DR com polímeros,

e a assíntota de Zakin, que corresponde ao menor valor possível para o fator de atrito em soluções DR com surfactantes.

Sabe-se que durante o escoamento turbulento, quando ocorre o efeito de redução de arrasto as intensidades turbulentas são suprimidas no mesmo número de Reynolds, reduzindo assim, o coeficiente de transferência de calor por convecção. Aguilar e colaboradores (2001), Li e colaboradores (2012) e Zakin e colaboradores (1998) sugerem medir quantitativamente a redução da transferência de calor (HTR) conforme de Equação 9.

$$HTR = \frac{Nu_0 - Nu}{Nu_0} \times 100 \quad 9$$

Onde Nu_0 e Nu representam, respectivamente o número de Nusselt do solvente e da solução DR. Por definição o número de Nusselt é:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad 10$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, D o diâmetro da tubulação e k a condutividade térmica do fluido. Para transferência de calor convectiva a seguinte correlação de Gnielinski (1976) pode ser utilizada:

$$Nu = 0,012(Re^{0,87} - 280)Pr^{0,4} \left[1 + \left(\frac{D}{L_H} \right)^{2/3} \right] \quad 11$$

Onde L_H é o comprimento de troca térmica da seção de passagem do escoamento, Pr é o número de Prandtl baseada nas propriedades do solvente e calculada conforme a Equação 12, no qual c_p é o calor específico e μ é a viscosidade dinâmica.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad 12$$

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Condutividade térmica

Para os primeiros estudos, não existiam ainda modelos para o equacionamento da condutividade térmica dos nanofluidos. O primeiro modelo mais próximo desenvolvido era o de Hamilton e Crosser (1962) que considerava a composição da mistura, a forma e a dispersão das partículas. Este modelo era aplicável a misturas cuja relação da condutividade térmica entre as duas fases era maior que 100 ($\frac{k_{eff}}{k_0} > 100$), podendo ser calculada da seguinte maneira:

$$\frac{k_{eff}}{k_0} = \frac{k_m + (n-1)k_0 - (n-1)\alpha(k_0 - k_m)}{k_m + (n-1)k_0 + \alpha(k_0 - k_m)} \quad 13$$

Onde, k_m é a condutividade térmica da partícula metálica, k_0 é a condutividade térmica do fluido de referência, α é fração volumétrica da partícula e n é o fator de forma empírico dado por:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad 14$$

Onde ψ é a esfericidade, definida como a relação da área superficial de uma esfera de volume igual ao da partícula e a área superficial da partícula. Batchelor e O'Brien (1977) desenvolveram uma Equação mais simples, aplicável a um sistema de duas fases contendo partículas metálicas com diâmetro da ordem de micrometros. Entretanto, esta Equação era aplicável apenas para o ponto de contato (interface sólido e líquido).

$$\frac{k_{eff}}{k_0} = 4 \ln\left(\frac{k_m}{k_0}\right) - 11 \quad 15$$

Os primeiros estudos sobre nanofluidos estavam relacionados a condutividade térmica. Foram Masuda e colaboradores (1993) que primeiramente mostraram experimentalmente um aumento na condutividade térmica da mistura de gama-alumina e água de aproximadamente 30% em relação a água, para uma concentração volumétrica das partículas de 4,3%. Choi (1995), utilizando o modelo de condutividade térmica proposto por Hamilton e Crosser (1962), avaliou os efeitos da fração volumétrica e da esfericidade, para um sistema CuO-água, e verificou a possibilidade de um aumento da condutividade térmica com o aumento da concentração volumétrica e com a redução da esfericidade da partícula. Após a confirmação dos resultados encontrados por Masuda e colaboradores (1993) e a aplicação do modelo de Hamilton e Crosser (1962) para o nanofluido de cobre e água foi então que Choi (1995) propôs a utilização do termo nanofluido.

Após a ideia proposta por Choi (1995), Lee e colaboradores (1999) então projetaram e construíram um aparato para medir a condutividade térmica do nanofluido, baseado no método do fio quente transiente, e conseguiram mostrar que o modelo apresentado por Hamilton e

Crosser (1962) era capaz de prever a condutividade térmica de nanofluidos contendo grandes partículas de Al_2O_3 aglomeradas (usando como fluido base tanto a água quanto etileno glicol). No entanto, o modelo aparentou ser inadequado para nanofluidos contendo partículas de óxido de cobre. O tamanho das nanopartículas utilizadas foram de 23,6 nm CuO e 38,4 nm para Al_2O_3 .

Xie e colaboradores (2002), utilizando o mesmo método do fio quente transiente mediram a condutividade térmica de nanofluidos com partículas de Al_2O_3 de diferentes tamanhos em diferentes fluidos base (água, etileno glicol e óleo de bomba) e foi possível observar que o aumento da concentração volumétrica aumentou a condutividade térmica dos nanofluidos em todas as combinações de fluido base e tamanhos de partículas. Para as suspensões usando as mesmas nanopartículas, os aumentos das condutividades térmicas foram menores com o aumento da condutividade térmica do fluido base, enquanto que para as suspensões que usam o mesmo fluido base, os aumentos das condutividades térmicas foram dependentes da área superficial específica e que existe um valor ótimo de área superficial específica no qual atinge uma máxima condutividade térmica. A partir disso, foi possível confirmar que as suspensões de nanopartículas têm uma condutividade térmica muito mais alta do que os valores calculados usando as correlações teóricas tradicionais com partículas da ordem de milímetros ou micrometros dispersas em um fluido. Xie e colaboradores (2002) afirmaram então que a condutividade térmica das suspensões de nanopartículas deveria ser muito dependente do tamanho das nanopartículas, da interação entre a partícula e o líquido e da condutividade térmica do fluido base.

Das e colaboradores (2003) também mediram em seu trabalho a condutividade térmica do nanofluido com partículas de Al_2O_3 e CuO com tamanho médio de 38,4 nm e 28,6 nm, respectivamente, e foi possível comparar que os resultados encontrados por Lee e colaboradores (1999) possuíam boa concordância com os seus. Em ambos os trabalhos foi utilizado vibração de ultrassom por 12 horas para dispersar as partículas no fluido base. A influência da temperatura na condutividade térmica do nanofluido foi apresentada por Das e colaboradores (2003) e foi possível observar que um aumento de 2 a 4 vezes na condutividade térmica dos nanofluidos ocorreu num intervalo de temperatura de 21°C a 51°C, e que o nanofluido contendo nanopartículas de CuO apresentou um maior aumento da condutividade térmica do que o nanofluido com Al_2O_3 . Entretanto, não foi possível afirmar qual das duas nanopartículas possuem a capacidade apresentar maior aumento da condutividade térmica no fluido base tendo em vista que as nanopartículas de Al_2O_3 e CuO utilizadas nesse trabalho possuíam tamanhos diferentes.

Chon e colaboradores (2005) foram os primeiros a avaliarem a influência do tamanho da nanopartícula na condutividade térmica do nanofluido. Eles utilizaram nanopartículas de Al_2O_3 de tamanhos 11 nm, 47 nm e 150 nm e observaram que para a concentração de 1% em volume, quanto menor o tamanho das nanopartículas, para uma mesma concentração, maior a condutividade térmica do nanofluido. Neste mesmo trabalho, também confirmaram que o aumento tanto de concentração quanto da temperatura aumentou a condutividade térmica do nanofluido.

Não é só o fato de se adicionar um sólido com condutividade térmica muito maior que a do fluido base que torna complexa a formulação para a condutividade térmica dos nanofluidos. Pois o comportamento dessas nanopartículas pode influenciar de diferentes maneiras na condutividade térmica do nanofluido. No caso da concentração dos nanofluidos, de maneira geral, quanto maior a concentração maior será a condutividade térmica do nanofluido. Também deve ser levada em conta a interação entre a nanopartícula e o fluido base, pois a natureza dos

mesmos possui relação direta na condutividade térmica dos nanofluidos. Sabe-se também que nanofluidos com mesmos fluidos base e mesmas nanopartículas podem possuir condutividades térmicas diferentes devido ao tamanho e forma dessas nanopartículas. Além disso, o uso de aditivos, muitas vezes na intenção de melhorar a estabilidade do nanofluido, influencia nessa condutividade térmica. De acordo com Das e colaboradores (2003), outro fator, também muito utilizado para controlar a estabilidade dos nanofluidos, é o controle de pH, no qual geralmente, quanto menor esse pH do nanofluido maior será a tendência do incremento da condutividade térmica.

3.2. Fator de atrito e coeficiente de transferência de calor por convecção.

Xuan e Li (2003), utilizando nanopartículas de Cu com tamanhos menores de 100 nm, conduziram experimentos para a medição do fator de atrito e coeficiente de transferência de calor por convecção em nanofluidos de Cu-água deionizada. As nanopartículas em suspensão melhoram notavelmente o processo de transferência de calor, onde o coeficiente de transferência de calor por convecção foi maior que o do fluido base, com o mesmo número de Reynolds. A transferência de calor por convecção do nanofluido aumentou com o aumento da concentração das nanopartículas. Por outro lado, o fator de atrito foi aproximadamente o mesmo que o fluido base (água deionizada). Nas concentrações de nanopartículas utilizadas não incorreram quase nenhuma penalidade extra de energia consumida pela bomba. Os experimentos foram realizados em uma faixa de Reynolds entre 10000 e 25000, com diferentes concentrações em volume de 0,3%, 0,5%, 0,8%, 1,0%, 1,2%, 1,5% e 2,0%.

O coeficiente de transferência de calor por convecção para o nanofluido de Al_2O_3 -água foi investigado experimentalmente, com escoamento laminar em um tubo circular, com a temperatura da parede constante por Zeinali heris e colaboradores (2007). Os experimentos mostraram que o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, no regime laminar, foi acompanhado do aumento do número de Peclet e da concentração das nanopartículas. Os autores ainda afirmam que o aumento da condutividade térmica do nanofluido não é devido somente ao aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, mas também devido ao movimento caótico e ao movimento *Browniano* desempenhado pelas nanopartículas. As concentrações das nanopartículas de Al_2O_3 utilizadas foram de 0,2%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5% em volume, com uma variação da faixa de Reynolds entre 700 e 2050.

Um estudo experimental, realizado por Torii (2010), investigou o desempenho do coeficiente transferência de calor convectivo de suspensões aquosas contendo nanopartículas de Al_2O_3 , CuO e diamante, com tamanhos médios de 33, 47 e 6 nm, respectivamente. Os experimentos foram conduzidos em uma faixa de Reynolds entre 3000 e 10000. Neste artigo foi possível observar que a viscosidade relativa dos nanofluidos aumentou com o aumento da concentração de nanopartículas e a taxa desse aumento da viscosidade do nanofluido foi diferente para cada tipo de nanopartícula. Em relação a queda de pressão dos nanofluidos, o autor relatou uma tendência singela do aumento em comparação com a da água pura. O coeficiente de transferência de calor por convecção foi amplificado para o nanofluido em comparação com a da água pura. Foi percebido também que, os coeficientes de transferência de calor por convecção sofreram influência da agregação das nanopartículas, essa conclusão foi embasada pela medição do Potencial Zeta do nanofluido.

Kayhani e colaboradores (2012) conduziram estudos experimentais, com nanofluido de Al_2O_3 em água, através de um tubo de cobre com 2 m de comprimento, sob a condição de fluxo de calor constante. Foi possível mostrar que a adição das nanopartículas aumentou o número de Nusselt e o coeficiente de transferência de calor. Para Reynolds 13500, ele obteve um aumento de 22% no número de Nusselt, na concentração de Al_2O_3 de 2% em volume. Também mostrou que não ocorreu um aumento significativo da queda de pressão em relação ao fluido base. As nanopartículas utilizadas possuíam tamanho médio de 40 nm.

Sahin e colaboradores (2013) apresentaram resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção e da queda de pressão para nanofluido de Al_2O_3 em água. As concentrações do nanofluido utilizadas foram de 0,5%, 1%, 2% e 4% em volume. O número de Reynolds variou de 4000 a 20000. Os resultados mostraram que a adição das nanopartículas em água melhorou a transferência de calor por convecção para os casos em que as concentrações de partículas eram inferiores a 2% em volume. Já para as concentrações maiores do que 2% em volume, apesar da ocorrência do aumento da condutividade térmica do nanofluido, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi prejudicado. Também foi verificado que devido ao aumento da viscosidade, o fator de atrito aumentou com o aumento da concentração de nanopartículas.

É importante ressaltar que o aumento da condutividade térmica do nanofluido não necessariamente deve ser acompanhado do aumento do número de Nusselt. Pois, o coeficiente de transferência de calor convectivo também depende de como as nanopartículas estão distribuídas no fluido base quanto e do movimento dessas nanopartículas, isto é, o método de preparo do nanofluido pode prejudicar o processo de transferência de calor por convecção, mesmo havendo um aumento da condutividade térmica.

Como visto nos trabalhos supracitados, uma avaliação de desempenho efetiva dos nanofluidos deve ser feita de maneira conjunta, em uma análise hidrodinâmica (medindo-se o fator de atrito ou queda de pressão) e uma análise térmica (coeficiente de transferência de calor por convecção ou número de Nusselt). Quantificando assim, tanto a demanda energética de transporte quanto de transferência de calor do nanofluido. O item seguinte, apresenta as configurações de algumas bancadas experimentais utilizadas, na literatura, para avaliar o desempenho dos nanofluidos.

3.3. Bancadas experimentais para medição do fator de atrito e transferência de calor por convecção

Diversos estudos realizaram uma investigação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada em nanofluidos. Uma diversidade de nanofluidos constituídos de diferentes fluidos base e nanopartículas. Na intenção de não fugir do escopo deste trabalho, devido à diversidade de nanofluidos, a atenção será dada para estudos, de bancadas experimentais, que utilizaram nanofluidos de Al_2O_3 e que avaliaram o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada. A Tabela 3 apresenta um resumo das bancadas experimentais descritas neste capítulo.

A bancada experimental utilizada por Pak e colaboradores (2007) é composta de um reservatório de aço inox com volume de $0,2 \text{ m}^3$, uma bomba centrífuga, uma linha de "by-pass", um tanque de compensação, câmara de repouso, a entrada hidrodinâmica, a seção de teste de

transferência de calor, uma câmara de mistura e um reservatório coletor de fluido para medição e calibração da vazão. A seção de entrada hidrodinâmica e a seção de transferência de calor foram montadas usando um tubo de aço inox 304 sem costura com diâmetro interno de 10,66 mm e comprimento total de 4800 mm. As demais tubulações da bancada, exceto a seção de teste hidrodinâmica e de transferência de calor, foram construídas a partir de um tubo de aço inoxidável soldado com um diâmetro externo de 25,2 mm. Para a medição da temperatura da parede foram utilizados 14 termopares do tipo-T. O diferencial de pressão foi medido através de um transdutor de pressão (Validyne DPI 03-18) na entrada e na saída da seção de transferência de calor. Para se obter a condição de contorno com fluxo de calor constante uma fonte de potência com corrente contínua de 15 kW foi utilizada e a seção de teste de transferência de calor foi isolada termicamente com buchas de nylon, minimizando as perdas para vizinhança. Tanto a câmara de repouso quanto a câmara de mistura foram isoladas termicamente com fibra de vidro. Um chiller com capacidade de resfriamento de 15 kW foi utilizado para manter a temperatura do líquido constante na entrada da seção de teste. A vazão foi controlada através de duas válvulas, uma na linha principal e outra no by-pass. A vazão foi medida diretamente em uma balança, através de um reservatório de coleta situado após a saída da seção de teste no qual o fluxo é controlado por uma válvula de três vias.

Xuan e Li (2003) apresentam uma bancada de testes contendo como elementos principais um reservatório, uma bomba, a seção de teste, um chiller e um tanque de coleta do fluido. O reservatório, com capacidade de 5 litros, foi fabricado de polimetilmetacrilato, pois por se tratar de um material transparente é possível monitorar a dispersão e estabilidade do nanofluido de maneira visual. O chiller com capacidade de 5,2 kW foi usado para manter a temperatura do nanofluido constante na entrada da seção de teste. A vazão foi controlada através do ajuste de duas válvulas, uma como "by-pass" e a outra para a circulação da linha principal. Ao fim da seção de testes uma válvula de três vias faz o controle para redirecionar o nanofluido para o reservatório ou para o tanque de coleta, aonde neste último é possível medir a vazão mássica do nanofluido. A seção de teste é composta por uma tubulação de cobre com diâmetro interno de 10 mm e comprimento de 800 mm. Um total de 10 termopares (tipo – K) são utilizados, nos quais 8 são posicionados em diferentes locais da seção de teste para medir a temperatura na parede, e os outros dois são utilizados para medir a temperatura do nanofluido na entrada e saída da seção de testes. Para obter uma condição de contorno de fluxo de calor constante, a seção de teste de transferência de calor é aquecida eletricamente por uma fonte de alimentação CC capaz de fornecer um máximo de 3,5 KW. Para minimizar a perda de calor da seção de teste para o ambiente, toda a seção de teste é termicamente isolada externamente com uma camada de pó de pérola expandida e um tubo de vácuo. Dois transdutores de pressão são instalados nas duas extremidades da seção de teste para medir a queda de pressão dos nanofluidos.

Zeinali Heris e colaboradores (2007) realizaram seus experimentos para medição da transferência de calor do nanofluido com uma condição de contorno diferente dos dois autores supracitados anteriormente. Essa bancada experimental é constituída de um reservatório de vidro com volume de 2 litros. A seção de teste consiste em um tubo anular de 1 m de comprimento, sendo o tubo interno de cobre com 6 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura e o tubo externo é de aço inox com 32 mm de diâmetro. O nanofluido escoava no interior do tubo de cobre, enquanto o vapor saturado escoava no anular, no qual é criada uma condição de contorno com a temperatura da parede constante. O isolamento térmico do tubo externo é feito com fibra de vidro. A seção de teste é composta por 10 termopares do tipo-K, que são inseridos na parede do tubo de cobre para medição de temperatura na parede e espaçados 10 cm. Outros dois termopares do tipo-K são inseridos na entrada e saída da seção de teste no interior do

escoamento para medir a temperatura do nanofluido. Um manômetro é utilizado para medição do diferencial de pressão na seção de teste. Após passar pela seção de teste o nanofluido é resfriado em um trocador de calor, onde se usa água como fluido de resfriamento. Para medição de vazão foi utilizado um reservatório de vidro com 0,3 litros de volume e uma válvula localizada na parte inferior. Dessa forma, a vazão foi medida através do tempo necessário para encher este reservatório. É relatado ainda que após a injeção do vapor, para manter a temperatura da parede constante, todo o sistema da bancada atinge o regime permanente após 20-30 minutos. A vazão é controlada através de uma válvula de "by-pass" após a bomba.

Sundar e Sharma (2010) avaliam a transferência de calor e o fator de atrito em uma bancada experimental no qual o fluido escoava em um tubo de cobre com diâmetro de 19 mm. A bancada possui basicamente um reservatório com *chiller* (30 litros), um tanque de coleta e uma bomba com velocidade variável. Uma fita de níquel-cromo com potência de 1 kW é utilizada para proporcionar a condição de fluxo de calor constante na seção de teste. A fim de minimizar as perdas de calor para o ambiente foi utilizado lã de rocha como isolante térmico na seção de teste. A seção de teste possui 1,5 m de comprimento e foram utilizados 5 termopares do tipo-K, sendo três deles soldados na parede do tubo para medir a temperatura da parede e posicionados a 0,375, 0,75 e 1,125 m da região de entrada. Os outros dois termopares foram inseridos na região de entrada e saída da seção de teste para medir a temperatura do fluido. Após ser aquecido na seção de teste, o fluido segue para o reservatório com *chiller*. O fluido então escoava por gravidade para o tanque de coleta. De acordo com o autor, essa configuração permite atingir o regime permanente mais rapidamente. A queda de pressão é medida com o manômetro de tubo em U conectado nas duas extremidades da seção de teste. A vazão do fluido na seção de teste é calculada a partir das leituras do medidor de vazão/totalizador e validado com medições manuais. A mesma bancada experimental foi utilizada nos trabalhos de Sharma e Sundar (2009).

Torii (2010) avaliou o coeficiente de transferência de calor em uma bancada experimental de circulação fechada composta basicamente por uma unidade de aquecimento, uma parte de resfriamento e uma unidade de medição e controle. Foi utilizado para seção de teste um tubo de aço inox com 1 m de comprimento e 3,96 mm de diâmetro externo e espessura de 0,17 mm. O aquecimento da seção de teste é realizada através da fixação de eletrodos que são conectados em ambas as extremidades, para garantir o fluxo de calor constante, e uma fonte de alimentação CC é empregada e a tensão pode ser ajustada. A seção de teste é envolvida por um material de isolamento térmico espesso para suprimir a perda de calor para o ambiente. São soldados na parede externa do tubo, na seção de teste, 6 termopares posicionados a uma distância da seção de entrada de 150, 290, 430, 570, 710 e 850 mm. Outros dois termopares são posicionados na entrada e na saída da seção de teste para medir a temperatura do fluido. Uma bomba com vazão máxima de 0,48 m³/h realiza a circulação do fluido na bancada de teste e um medidor de vazão eletromagnético é utilizado para a medição de vazão (KYENCE FD-8150). A perda de pressão na entrada e saída da seção de teste é medida utilizando-se um medidor de diferencial de pressão (NAGANO-KEIKI NR-250).

Kayhani e colaboradores (2012) apresentam sua bancada experimental com uma seção de teste para medição de temperatura e pressão do fluido, e unidades de aquecimento e resfriamento do fluido. A circulação do fluido ocorre através de uma bomba de engrenagens de aço inoxidável, uma linha de *by pass* e uma seção de teste. Um reservatório com capacidade de 2 litros é utilizado para armazenar o fluido. Na seção de teste um tubo de cobre de 2 m de comprimento e com diâmetro interno de 5 mm e diâmetro externo de 6 mm é utilizado. Para

obter a condição de contorno com fluxo de calor constante na parede, a seção de teste é aquecida eletricamente por uma fonte de alimentação CC ajustável. Um fio de níquel-cromo eletricamente isolado é enrolado uniformemente ao longo do comprimento. A fonte de alimentação CC é usada como fonte de energia para o aquecedor. Os terminais do fio de níquel-cromo são conectados a um transformador, no qual o fluxo de calor pode ser alterado variando-se a tensão. Há uma camada de isolante térmico espessa em torno do aquecedor para garantir a condição de fluxo de calor constante e mitigar as perdas de calor para o ambiente ao longo da seção de teste. Dez sensores de temperatura calibrados RTD PT100 são colocados na seção de teste espaçados 200 mm a partir da seção de entrada para a medição da temperatura na parede. A temperatura do fluido é medida utilizando-se outros dois sensores RTD PT 100 na entrada e saída da seção de teste. A queda de pressão é medida através de um medidor de diferencial de pressão. A medição da vazão é realizada com a ajuda de um cronômetro que mede o tempo para encher o reservatório. Após dar partida da bomba e das unidades de aquecimento e resfriamento, todo o sistema demora em média 20-30 minutos para atingir o regime permanente.

Sahin e colaboradores (2013) avaliaram experimentalmente o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão em nanofluido de água e alumina. A bancada experimental é composta de uma unidade aquecimento, uma unidade de resfriamento e uma unidade de medição. A circulação é realizada através de uma bomba, que envia a água de um reservatório para a seção de teste (unidade de aquecimento). A seção de teste é um tubo de alumínio com comprimento de 770 mm e diâmetro interno e externo de 11,7 e 14,7 mm, respectivamente. Na seção de teste uma bobina de aquecimento com potência de 2kW é utilizada. A potência elétrica é controlada por um transformador Variac e o isolamento térmico é feito através de uma manta de uma lã de vidro e lã de rocha. A vazão é medida através de um medidor de vazão eletromagnético. A queda de pressão é medida utilizando-se um medidor diferencial de pressão. São utilizados 7 termopares tipo-T na parede da tubulação e outros dois na entrada e saída da seção de teste para medir a temperatura do fluido.

Tabela 3 - Configurações das bancadas experimentais encontradas na literatura.

Autores	Condição de Contorno	Tamanho médio das nanopartículas (nm)	Diâmetro (D); comprimento (L) da tubulação	Condição do escoamento
Pak e Cho (1998)	Fluxo de calor constante (15 kW)	Al ₂ O ₃ – 13 nm; TiO – 27 nm	Aço Inox 304 D = 10,66 mm L = 4800 mm	Turbulento
Xuan e Li (2003)	Fluxo de calor constante (3,5 kW)	Cu < 100 nm	Tubo de cobre D = 10 mm L = 800 mm	Turbulento
Esfahany e colaboradores (2007)	Temperatura da parede constante. (Vapor escoando no anular)	Al ₂ O ₃ Tamanho não informado.	Tubo anular: L = 1 m Tubo interno de cobre: D = 6 mm Tubo externo de aço inox: D = 32 mm.	Laminar

Sharma e Sundar (2010)	Fluxo de calor Constante (1 kW)	Al ₂ O ₃ – 38,4 nm	Tubo de cobre D = 19 mm L = 1,5 m	Turbulento
Torii (2010)	Fluxo de calor constante (Fonte CC ajustável)	Diamante – 2 a 10 nm; Al ₂ O ₃ – 33 nm; CuO – 47 nm	Tubo de Inox D = 3,79 mm L = 1 m	Turbulento
Kayhani e colaboradores (2012)	Fluxo de calor constante (Fonte CC ajustável)	Al ₂ O ₃ – 40 nm	Tubo de cobre D = 5 mm L = 2 m	Turbulento
Sahin e colaboradores (2013)	Fluxo de calor constante (2 kW)	γAl ₂ O ₃ – 30 nm	Tubo de alumínio D = 11,7 mm L = 770 mm	Turbulento

De maneira geral, as bancadas experimentais, para a medição do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor por convecção, devem ter como aquisição de dados as informações de vazão, pressão, temperatura do fluido e temperatura da parede medidos ao longo de um trecho reto, de comprimento L e diâmetro D, com o escoamento completamente desenvolvido, tanto hidrodinâmico quanto térmico. Podem existir duas condições de contorno nos trechos das medições de pressão e temperatura, que pode ser a temperatura na parede constante ou o fluxo de calor constante. As aquisições dos dados válidos devem ser realizadas após a bancada experimental atingir o regime permanente. Para isso, devido ao aquecimento do fluido no trecho de transferência de calor, costuma-se retirar energia do fluido antes ou depois da recirculação (escoamento forçado realizado por uma bomba), com a utilização de um trocador de calor (*Chiller* ou banho termostático, por exemplo) para garantir sempre a mesma temperatura na entrada do trecho de medição. A Figura 12 ilustra, de maneira geral, um esquemático dos dados de entrada e saída em uma bancada experimental.

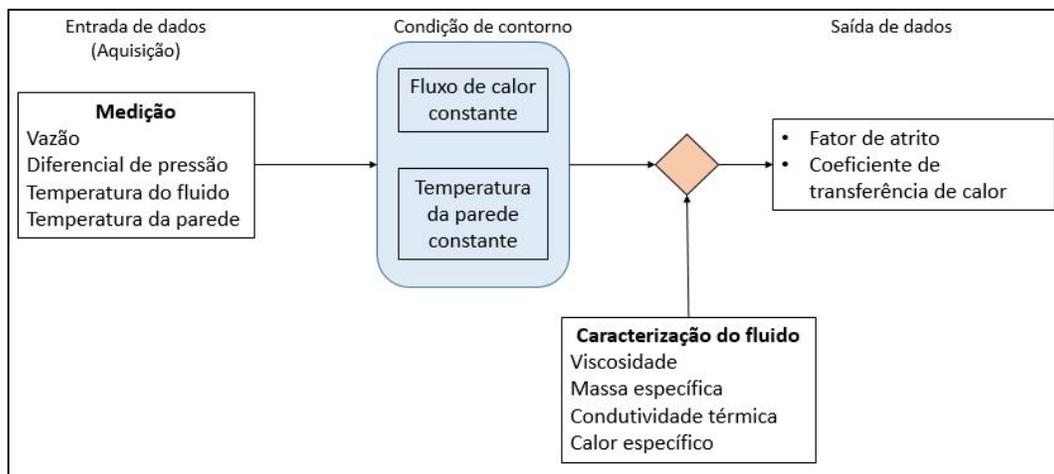


Figura 12 - Esquemático dos dados de entrada e saída em uma bancada experimental para avaliação dos nanofluidos.

Afim de se obter os dados de saída propostos é necessário realizar a medição de algumas propriedades termofísicas do fluido. No caso do fator de atrito, faz-se necessária os valores da massa específica e viscosidade. Já no caso do coeficiente de transferência de calor por convecção, o calor específico é utilizado para se medir o fluxo de calor entregue ao fluido. A condutividade térmica é utilizada quando uma análise adimensional da transferência de calor é requerida, isto é, para o cálculo do número de Nusselt.

3.4. Redução de Arrasto em Nanofluidos.

Na tentativa de combinar as características positivas dos nanofluidos e das soluções DR de surfactantes, o aumento da transferência de calor por convecção e o ganho dos efeitos de redução de arrasto, respectivamente, Liu e Liao (2010) foram pioneiros, e conduziram experimentos adicionando o surfactante CTAC em nanofluido com nanotubos de carbono (NTC). Eles chamaram esse fluido de "*drag-reducing nanofluid*". Nesse artigo foi possível mostrar que com a adição dos NTC o máximo efeito DR ocorreu em uma concentração do surfactante maior em relação a solução DR sem os nanotubos de carbono. Isto é, enquanto que para solução DR de CTAC a máxima redução de arrasto ocorreu na concentração de 200 ppm, para o nanofluido redutor de arrasto, nanofluido com surfactante, esse máximo efeito DR ocorreu em uma concentração de 300 ppm de surfactante, isso para a concentração do nanofluido de 2% em massa. Em relação a transferência de calor por convecção, foi possível verificar que em todos os casos o coeficiente de transferência de calor por convecção foi maior para os nanofluidos redutores de arrasto em relação a sua respectiva solução DR na mesma concentração de surfactante.

Yang e colaboradores (2012) realizaram experimentos para medir a condutividade térmica e a viscosidade de nanofluidos com adição de surfactante para redução de arrasto e nomearam este novo fluido de "*viscoelastic-fluid-based nanofluids*" (VFBN). Segundo os autores, assim como a solução DR, o VFBN também deve apresentar comportamento viscoelástico para que ocorra a redução de arrasto. Nesse estudo foram utilizadas nanopartículas, esféricas, metálica de Cu com tamanho médio de 50 nm e em diferentes concentrações (0,05% - 2,5% vol.) O preparo do nanofluido foi através do método de dois passos com utilização de ultrassom. Já o surfactante utilizado foi CTAC:NaSal e a solução DR, o fluido viscoelástico, foi preparado com o auxílio de um agitador magnético, nas concentrações de 50 ppm, 200 ppm, 1000 ppm e 2000 ppm. Resultados experimentais desse artigo mostram que a aumento da concentração de nanopartículas e da temperatura aumentam a condutividade térmica do VFBN em relação a solução DR, e que a viscosidade do VFBN é maior que da solução DR, além disso o aumento da concentração de nanopartículas aumentou a viscosidade e o aumento da temperatura reduziu a viscosidade.

Após os resultados apresentados por Yang e colaboradores (2012), Yang e colaboradores (2013) conduziram experimentos, na intenção de avaliar o efeito DR e HTR, para medir o gradiente de pressão e o coeficiente de transferência de calor por convecção. Utilizaram a mesma solução DR e VFBN do artigo anterior. Dessa vez as concentrações do nanofluido de Cu foram de 0,25%, 0,5% e 1% em volume, e as concentrações do surfactante foram de 600ppm e 1200ppm. Neste artigo eles observaram que a adição das nanopartículas reduziu a formação das microestruturas micelares responsáveis na solução DR e aumentou a transferência de calor e o gradiente de pressão. O aumento da temperatura aumentou o coeficiente de transferência de

calor por convecção em todos os casos. Já o gradiente de pressão não apresentou alterações no aumento da temperatura para os nanofluidos sem surfactantes e para os VFBN. Para as soluções DR, o aumento da temperatura reduziu esse gradiente de pressão (os experimentos que avaliaram a influência da temperatura foram realizados em uma faixa de 25°C a 45°C).

Li e colaboradores (2013) mediram a condutividade térmica para VFBN com nanotubos de carbono multicamada (*multiwalled carbon nanotubes* – MWCNT) e CTAC:NaSal para soluções DR. De acordo com o estudo, o VFBN apresentou uma melhoria na condutividade térmica com o aumento da temperatura e da concentração das nanopartículas, em relação a solução DR. Os VFBNs com maior concentração de massa de CTAC:NaSal apresentam maiores condutividades térmicas do que aqueles com menores concentrações de CTAC:NaSal. Segundo os autores, isso ocorreu devido à diminuição das tensões superficiais do fluido base. Através das medições de viscosidade, os VFBNs apresentaram comportamento viscoelástico. Ainda de acordo com os autores, esse VFBN, devido ao aumento da condutividade térmica e comportamento viscoelástico, possui grande potencial em aplicações que visam aumentar a eficiência energética, reduzindo a resistência ao escoamento e aumentando a transferência de calor. Entretanto não foram realizados estudos para medição de DR e HTR para esse VFBN.

Sun e colaboradores (2016) realizaram experimentos em uma bancada de testes para comparar os resultados, do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor por convecção entre, o nanofluido de Cu, a solução DR de surfactante CTAB:NaSal e o nanofluido de Cu com CTAB:NaSal. Ele também comparou os ensaios realizados em um tubo horizontal liso e um tubo com modificações realizadas na superfície interna, como mostra a Figura 13, na intenção de avaliar a influência desse artifício na transferência de calor e resistência ao escoamento. Eles encontraram que para os nanofluidos de Cu, o coeficiente de transferência de calor foi duas vezes maior nos tubos com a superfície interna modificada em relação aos tubos lisos, entretanto o fator de atrito foi dez vezes maior para os tubos modificados. Para os nanofluidos com surfactantes (Cu + CTAC:NaSal) foram encontrados um aumento na transferência de calor e uma redução no fator de atrito. O mesmo comportamento, em tubo modificado, foi encontrado para as soluções DR (CTAC:NaSal), mas o coeficiente de transferência de calor por convecção para nanofluido com surfactante foi maior em relação a solução DR. Sendo assim, foi possível concluir que nos nanofluidos com surfactante o efeito de DR foi maior que o efeito de HTR, enquanto que para as soluções DR o efeito de HTR foi maior que o efeito de DR.

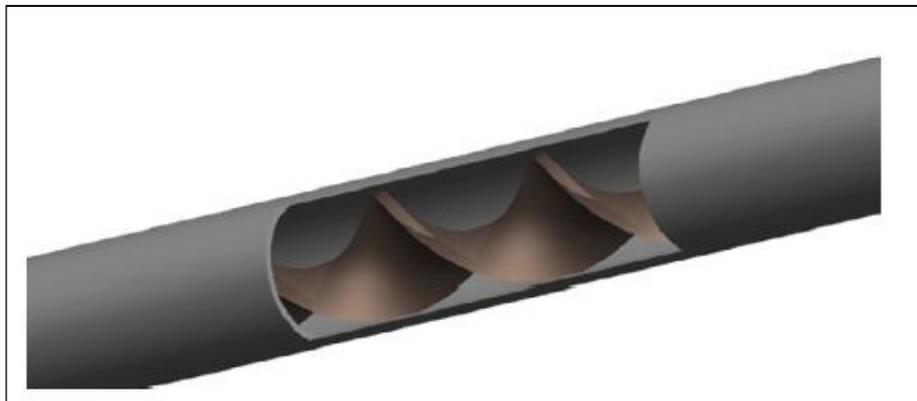


Figura 13 - Tubo com alteração da superfície interna.

FONTE: (SUN e colaboradores 2016)

Wang e colaboradores (2017) também mediram o fator de atrito e o coeficiente de transferência de calor por convecção em nanofluidos com surfactante. Para isso, utilizaram CuO, de tamanho 30 nm, como nanopartícula para a preparação do nanofluido. Para a solução DR de surfactante utilizaram CTAC:NaSal na proporção molar de 1:2. O nanofluido redutor de arrasto, assim chamado pelos autores, foi produzido em dois estágios: primeiramente adicionaram uma quantidade adequada de CTAC e NaSal ao fluido base, em seguida adicionaram nanopartículas de CuO na solução. Em sequência, colocaram em um banho ultrassônico por várias horas. A concentração do surfactante variou de 100 a 400 ppm, enquanto que a concentração das nanopartículas foi de 1 a 4% em massa. A faixa de Reynolds varrida foi entre 5000 e 50000 e os testes foram realizados em diferentes temperaturas (22°C a 50°C). De acordo com os autores, a adição de nanopartículas de CuO na solução DR de CTAC:NaSal melhorou significativamente a transferência de calor, mantendo o efeito de redução de arrasto. Foi observado também que as características de transferência de calor têm fortes dependências: a temperatura do líquido, a concentração de nanopartículas e a concentração do surfactante.

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais

O fluido base utilizado neste trabalho foi a água deionizada e as nanopartículas sólidas foram Al_2O_3 com um tamanho de 13 nm da Sigma-Aldrich, massa molar de 101,96 g/mol e densidade relativa de 4000, em relação a água. O surfactante utilizado foi o CTAB ($C_{19}H_{42}BrN$), um surfactante catiónico e com massa molar de 364,45 g/mol, também fornecido por Sigma-Aldrich. Em todas as soluções DR, para auxiliar na formação das micelas cilíndricas (gigantes), foi utilizado como contra íons, Salicilato de Sódio ($C_7H_5NaO_3$), denominado também de NaSal que possui massa molar de 160,11 g/mol. As fórmulas químicas dos insumos utilizados são apresentadas na Figura 14.

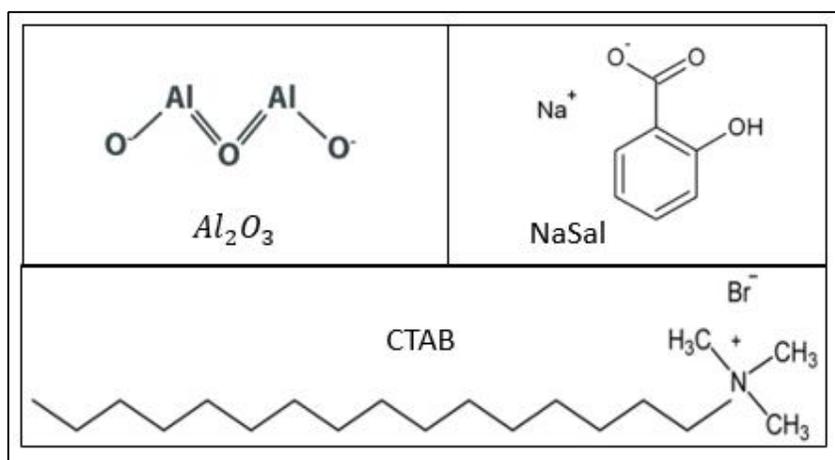


Figura 14 - Arranjos das fórmulas químicas dos insumos utilizados neste trabalho.

A Figura 15 apresenta a lista dos equipamentos utilizados para preparação e caracterização dos fluidos estudados. Para a preparação do nanofluido foi utilizado um banho de ultrassom de 40 kHz (Ultra Cleaner Unique 1450 A), a distribuição do tamanho médio dos aglomerados e o Potencial Zeta do nanofluido Al_2O_3 -água foram medidos no nano analisador Microtrac Zetatrac, no Laboratório de Sistemas de Liberação Controlada no Ifes campus Aracruz-ES. Os valores de pH foram monitorados através de um pHmetro. No Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte (LaMEFT), na Ufes Vitória-ES. Foram realizadas as medidas de massa específica e viscosidade, utilizando-se um picnômetro de 25 ml e um reômetro Hack MARS III, respectivamente. Em ambos os laboratórios a temperatura do ambiente foi mantida em 25°C, e utilizada uma balança semi-analítica (com resolução de $\pm 0,001$ g). Para avaliação do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor foi construída uma bancada de teste com controle de vazão e medição de pressão e temperatura.

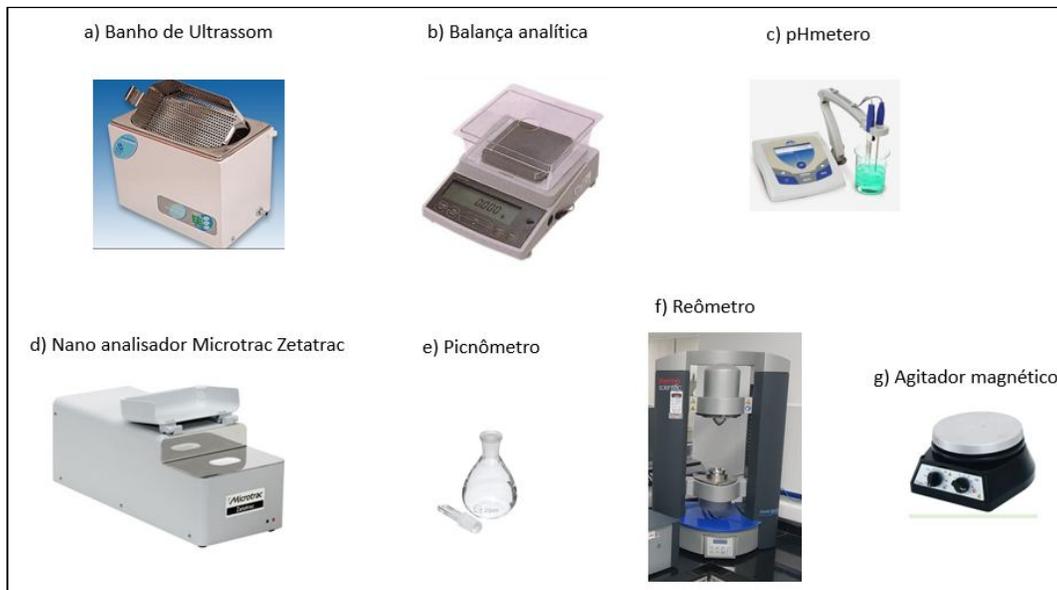


Figura 15 - Equipamentos utilizados para preparar e caracterizar o nanofluido.

4.2. Produção e caracterização do nanofluido

O fluido base utilizado para preparação do nanofluido e o solvente utilizado para a preparação da solução DR foi água deionizada, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4. A utilização dos termos fluido base e solvente são apenas particularidades e são comumente usados nas linhas de pesquisa relacionadas aos nanofluidos e a redução de arrasto, respectivamente. Todavia, neste trabalho possuem basicamente o mesmo significado. Para água deionizada foram medidos os valores de massa específica e viscosidade (utilizando-se de um picnômetro e um reômetro, respectivamente) enquanto que para o calor específico e condutividade térmica foram obtidos valores através do software EES (Tabela 4). As nanopartículas, conforme supracitado, são Al_2O_3 com tamanho de 13 nm e a preparação do nanofluido foi realizada pelo método de dois passos. Afim de se obter uma melhor dispersão das nanopartículas foi utilizado um tratamento mecânico através de um banho de ultrassom, por 1 hora, separadamente em recipientes menores nas concentrações de 0,8% em massa e depois misturado com água deionizada diretamente no reservatório. Para os nanofluidos com adição de surfactante, o tratamento em banho ultrassônico foi realizado separadamente sem surfactante e depois adicionado os aditivos DR no reservatório. Para a solução redutora de arrasto a diluição foi realizada no próprio reservatório da bancada de testes por um período de 1 hora, com a bancada em recirculação.

Tabela 4 - Propriedades da água deionizada

Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa-s)	Calor específico (kJ/kg-°C)	Condutividade térmica (W/m ² -K)
15	1,210	4,183	0,5770
20	1,080	4,183	0,5862
25	0,967	4,183	0,5948
30	0,840	4,182	0,6031
35	0,794	4,182	0,6107

As concentrações dos nanofluidos, sem surfactante, estudados neste trabalho foram de 0,1% e 0,4% em massa, conforme a Equação 16, e suas concentrações em volume (α) correspondem a 0,0252% e 0,1010%, respectivamente, conforme a Equação 17. As concentrações da Solução redutora de arrasto estudada foram de 200 ppm, 500 ppm e 700 ppm. Na intenção de avaliar a influência do surfactante no nanofluido, foram preparados também diferentes nanofluidos com a mesma concentração de Al_2O_3 de 0,1% em massa e com três diferentes concentrações do surfactante CTAB, de 200 ppm, 500 ppm e 700 ppm. Por último, para avaliar a influência das nanopartículas de Al_2O_3 na solução DR, foi preparada diferentes soluções DR com as mesmas concentrações de 500ppm de CTAB com 3 diferentes concentrações de Al_2O_3 , 0,1%, 0,2% e 0,4% em massa. Em todas as soluções redutoras de arrasto foram adicionadas NaSal na proporção de 1:2 mols (CTAB:NaSal). O preparo das soluções redutora de arrasto e coloidal foram realizadas com a utilização de uma balança analítica (Figura 15).

$$\%wt = \left(\frac{m_{Al_2O_3}}{m_{Al_2O_3} + m_{\text{água}}} \right) \quad 16$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{m_{Al_2O_3}}{\rho_{Al_2O_3}} \right)}{\left(\frac{m_{Al_2O_3}}{\rho_{Al_2O_3}} + \frac{m_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \right)} \quad 17$$

A Figura 16 mostra a influência do tempo de ultrassom para o nanofluido, sem surfactante, na estabilidade (Potencial Zeta), bem como seus respectivos valores de pH. É possível observar que o nanofluido apresentou boa estabilidade até mesmo sem a utilização do banho de ultrassom, e que para o tempo de até 15 horas o Potencial Zeta oscilou entre 55 e 61 mV.

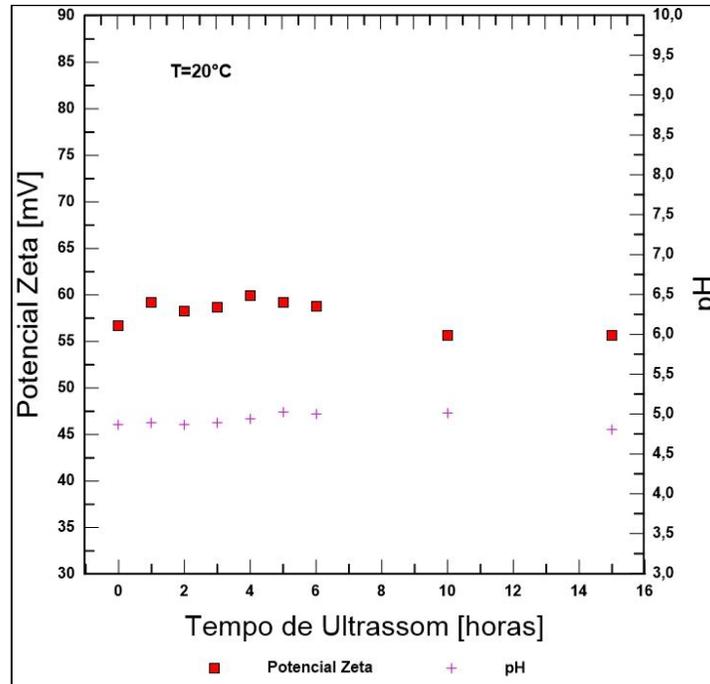


Figura 16 - valores de Potencial Zeta e pH para nanofluido de 0,1%wt de Al_2O_3 sem surfactante.

No nano analisador Microtrac Zetatrac foi medido o tamanho médio dos aglomerados formados para cada tempo de ultrassom. Foi possível observar que o tamanho dos aglomerados formados diminui com o tempo de ultrassom. A Figura 17 mostra que na primeira hora pouco mais de 18% dos aglomerados possuíam um tamanho de 181,10 nm, enquanto que no tempo de 15 horas 17% dos aglomerados possuíam um tamanho de 150,10 nm.

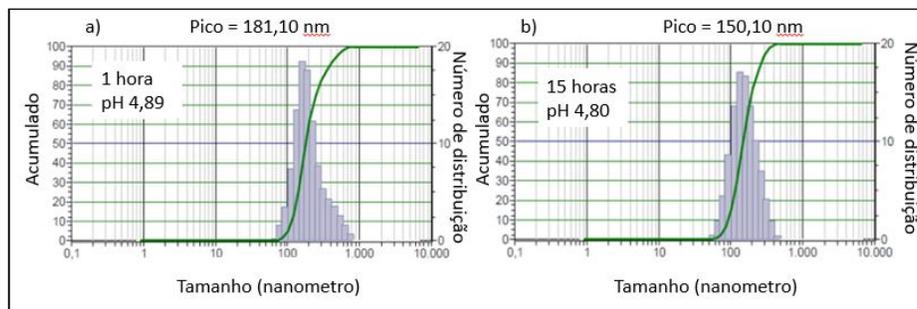


Figura 17 - distribuição do tamanho dos aglomerados para o nanofluido de Al_2O_3 para a) 1 hora de ultrassom e b) 15 horas de ultrassom.

Na intenção de avaliar a influência do pH no nanofluido foram medidos os valores do Potencial Zeta para o nanofluido, sem surfactante, em diferentes valores de pH (pH = 4,0 até pH = 10) com tempo de ultrassom de 1 hora. A Figura 18 apresenta a influência do pH na estabilidade (Potencial Zeta) do nanofluido, e que seu ponto isoelétrico se encontra próximo do pH = 9,0. É

possível visualizar que para o nanofluido preparado, valores de pH maiores que 7,0 e menores do que 10,0 apresentam instabilidade.

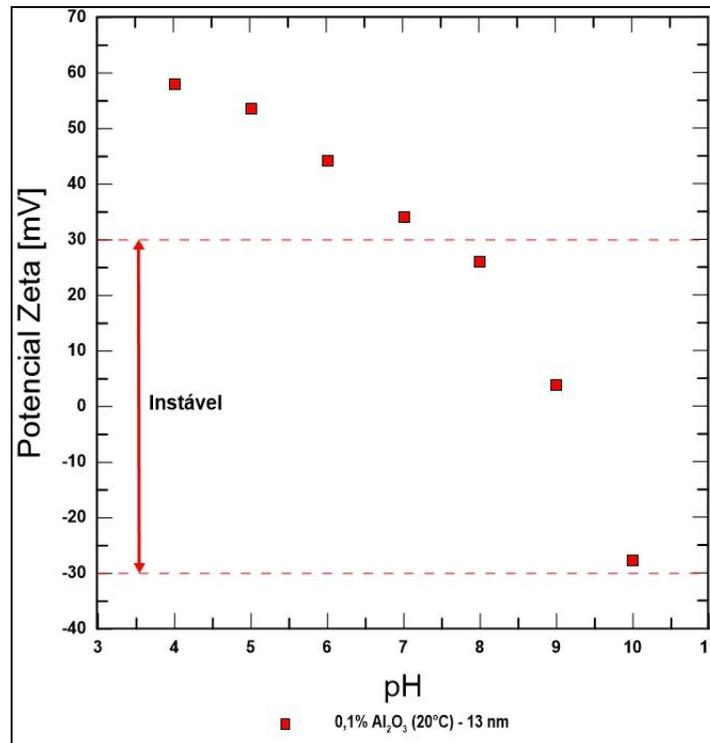


Figura 18 - Influência do pH no Potencial Zeta do nanofluido de Al₂O₃.

A Figura 19 apresenta o tamanho dos aglomerados formados para determinados valores de pH. Partindo do menor valor de pH é possível observar que o tamanho dos aglomerados aumenta com o aumento do pH, até o ponto isoelétrico, a partir do qual começa a reduzir o tamanho dos aglomerados.

Conforme apresentações da Figura 16 até a Figura 19 foi definida a metodologia de preparo do nanofluido com tempo de ultrassom de 1 hora e pH = 5,0. Pois a diferença de valores de Potencial Zeta do nanofluido para o tempo de 1 hora e 15 horas não apresentou relevante diferença. Já o valor de pH = 5,0 se deve ao fato de evitar efeitos de corrosão na bancada de testes e no reômetro. Como o objetivo deste presente estudo não é avaliar a influência da dispersão ou tamanho dos aglomerados, foi utilizado o tempo de ultrassom de 1 hora.

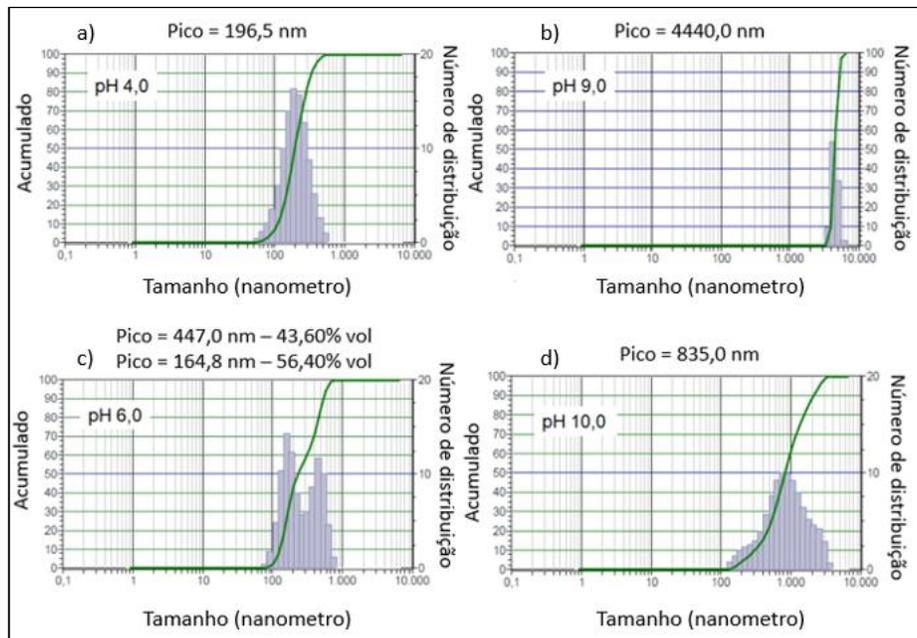


Figura 19 - Influência do pH na distribuição do tamanho dos aglomerados para nanofluido com 0,1%wt de Al_2O_3 preparado com 1 hora de ultrassom.

4.3. Propriedades Termofísicas.

As massas específicas dos nanofluidos com e sem surfactantes foram medidas utilizando-se um picnômetro de volume de 25 ml (Figura 15-e). A Tabela 5 apresenta os valores das massas específicas medidas. A viscosidade aparente foi medida no reômetro do LaMEFT, da marca *Thermo Fisher Scientific* e Modelo *HAAKE MARS III* (Figura 15). A geometria utilizada em todas as medições foi a *double-gap* e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) variou de 0 a 6000 no tempo de 1200 segundos. A viscosidade de todos os fluidos estudados (água deionizada, nanofluido e solução DR) foram medidas a 30°C, mesma temperatura no qual foram realizados os ensaios na bancada de testes.

Tabela 5 - valores medidos da Viscosidade e massa específica a 30°C.

Nanofluido	Viscosidade (mPa-s)	Massa específica (kg/m ³)
Água deionizada	0,836	998,05
0,1% Al_2O_3	0,872	1010,28
0,4% Al_2O_3	0,892	1024,55
CTAB 200 ppm	0,854	1018,17
CTAB 500 ppm	1,080	1019,60
CTAB 700 ppm	1,210	1019,80
0,1% Al_2O_3 + CTAB 200 ppm	0,875	1019,49
0,1% Al_2O_3 + CTAB 500 ppm	1,100	1020,50
0,1% Al_2O_3 + CTAB 700 ppm	1,330	1020,56
0,2% Al_2O_3 + CTAB 500 ppm	1,120	1021,48
0,4% Al_2O_3 + CTAB 500ppm	0,885	1023,30

Já em relação ao calor específico dos nanofluidos, foram Pak e colaboradores (2007) que apresentaram o primeiro modelo de calor específico para um nanofluido conforme Equação 18, entretanto de acordo com Wang (2010) conforme se aumenta a concentração de nanopartículas esse modelo não apresenta boa correlação quando a massa específica das nanopartículas é muito maior do que a do fluido base, como no caso deste trabalho, entre água deionizada ($996 \text{ kg/m}^3 - 25^\circ\text{C}$) e Al_2O_3 ($3984 \text{ kg/m}^3 - 25^\circ\text{C}$). Xuan e Roetzel (2000) apresentam um modelo no qual a influência da massa específica é ponderada, como mostra a Equação 19. A Tabela 6 apresenta a comparação entre os modelos propostos por Pak e colaboradores (2007) e Xuan e Roetzel (2000). Neste estudo foi utilizado o modelo proposto por Xuan e Roetzel (2000), mesmo apesar da diferença entre as Equações 18 e 19 serem aproximadamente de 0,5%, para concentrações de Al_2O_3 utilizadas neste trabalho.

$$c_{nf} = (1 - \alpha)c_{fb} + \alpha c_{np} \quad 18$$

$$c_{nf} = \frac{(1 - \alpha)\rho_{fb}c_{fb} + \alpha\rho_{np}c_{np}}{(1 - \alpha)\rho_{fb} + \alpha\rho_{np}} \quad 19$$

Onde, c_{nf} é o calor específico do nanofluido, c_{fb} o calor específico do fluido base, c_{np} o calor específico da nanopartícula, ρ_{fb} a massa específica do fluido base e ρ_{np} a massa específica da nanopartícula.

Tabela 6 - Diferença entre os valores de calor específico para os modelos de Pak e colaboradores (2007) e (Xuan e Roetzel (2000) a 30°C .

%wt	φ	c_{nf} [J/kg-K]	c_{nf} [J/kg-K]	Diferença percentual
Concentração em peso	Concentração em volume	Pak e colaboradores (2007)	Xuan e Rottzel (2000)	
0,1%wt	0,025%	4182	4180	0,048%
0,5%wt	0,126%	4179	4166	0,311%
1,0%wt	0,254%	4174	4149	0,599%
2,0%wt	0,511%	4166	4115	1,224%
5,0%wt	1,308%	4138	4012	3,045%

Nesse trabalho não serão medidas as condutividades térmicas dos fluidos estudados. Sendo assim, não será possível avaliar quantitativamente os ganhos ou perdas adimensionais relacionados a transferência de calor por convecção. Entretanto, essa avaliação será realizada através do coeficiente de transferência de calor por convecção calculado conforme Equação 27, bem como o ganho relativo (h_{rel}) e o ganho percentual ($\%h$), como apresentam as equações 20 e 21, respectivamente.

$$h_{rel} = \frac{h}{h_0} \quad 20$$

$$\%h = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100\% \quad 21$$

Onde, h representa o coeficiente convectivo do nanofluido ou solução DR e h_0 o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido base ou solvente.

4.4. Bancada experimental

A bancada de testes, apresentada na Figura 20, é constituída basicamente de um reservatório com capacidade de 10 litros, um banho termostático (LAUDA PROLINE PP1845) com potência de 3,5 kW para controlar a temperatura do fluido no reservatório, uma bomba centrífuga (DANCOR) de 1,5 kW, um inversor de frequência (WEG CFW 08) para controlar a rotação da bomba, um rotâmetro para a medição da vazão e duas seções (trechos) de testes, de pressão e de temperatura. Um esquemático da seção de teste de pressão (STP) e da seção de teste de temperatura (STT) pode ser visualizada na Figura 21. A tubulação é de cobre com diâmetro interno de 7,93 mm, diâmetro externo de 9,52 mm e comprimento de 6000 mm.

Na seção de teste de pressão estão localizados 3 transdutores de pressão posicionados a 900, 1250 e 1950 mm de distância da entrada da tubulação, respectivamente. Na seção de testes de temperatura, localizada 350 mm após a seção de teste de pressão, foram posicionados 6 termopares do tipo T, sendo 2 deles para medição da temperatura do fluido, um no início desta seção e outro no final, posicionados a 2300 e 4400 mm da entrada da tubulação, respectivamente, totalizando um comprimento da seção de teste de temperatura de 2100 mm. Os outros 4 termopares do tipo T foram inseridos na parede da tubulação distantes 2830, 3180, 3730 e 3980 mm da entrada da tubulação. Na extremidade dos termopares de parede foi realizada uma solda capacitiva para a formação da junta. A seção de medição de temperatura está envolta por uma fita com potência elétrica de 940 W, afim proporcionar uma condição de contorno de maneira que o fluxo de calor seja constante. Para o isolamento térmico da seção térmica foi utilizada lã de rocha. Para a aquisição das temperaturas e pressões foi utilizada uma placa de aquisição de dados da National Instruments e criada uma interface (supervisório) com o software Labview.

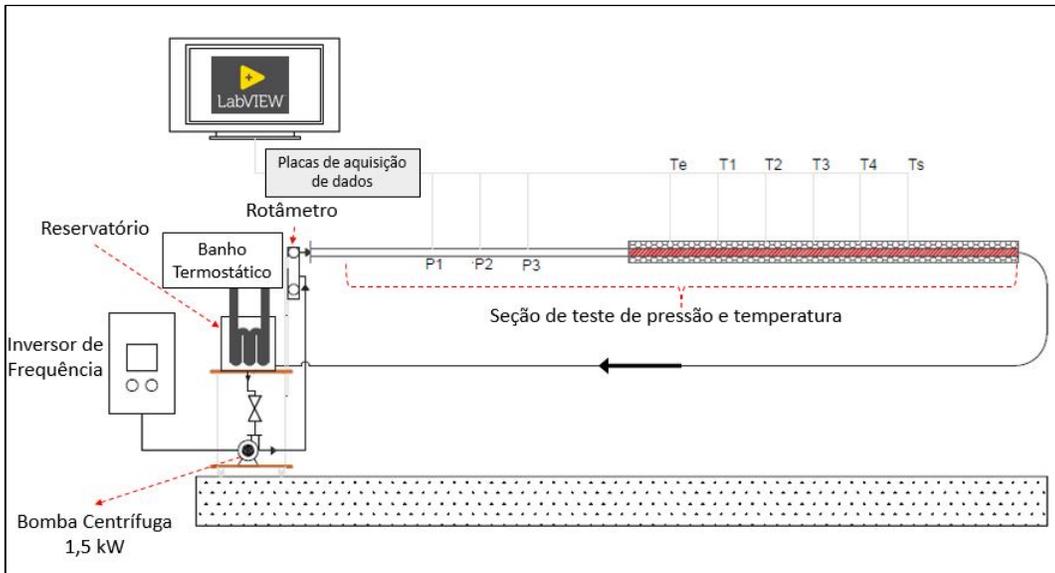


Figura 20 - Esquemático geral da bancada experimental.

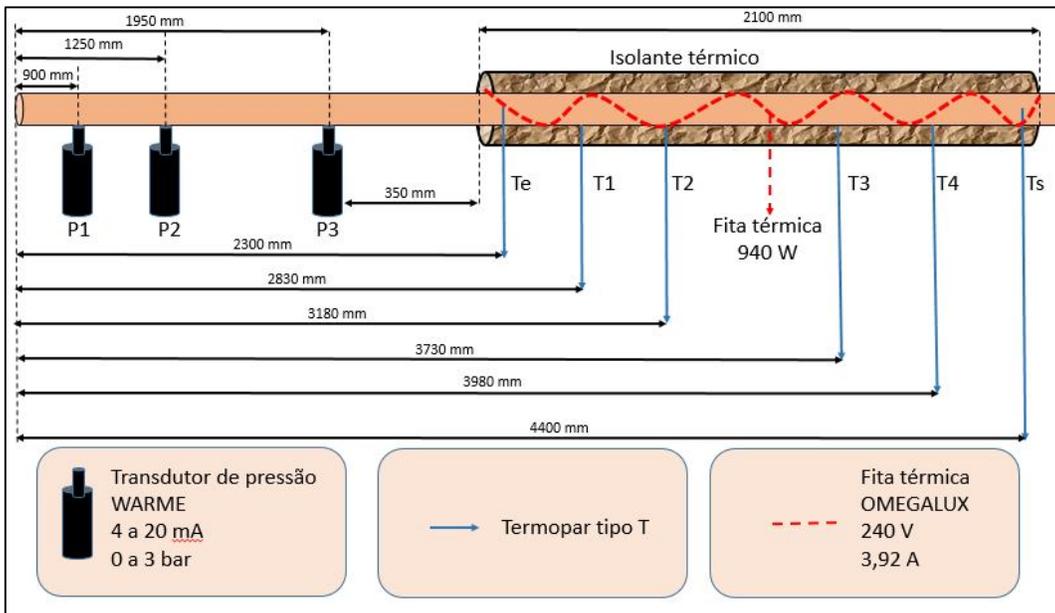


Figura 21 - Esquemático da seção de teste de pressão (STP) e seção de teste de temperatura (STT).

A Figura 22 ilustra a calibração do rotâmetro realizada pelo fabricante. A Equação 22 que representa a vazão em m^3/h em função da escala SKT do rotâmetro foi ajustada por uma Equação linear com $R^2 = 0,9993$.

Tabela 7 apresenta a relação entre a vazão real do rotâmetro e a utilização da Equação 22, nela é possível perceber que para baixas vazões (SKT < 11) a Equação 22 não representa muito bem a vazão real. Para a faixa de vazão utilizada neste trabalho (SKT >20) os valores podem chegar a um erro de até 2,84%.

$$\dot{V} = 0,009175SKT + 0,0428$$

22

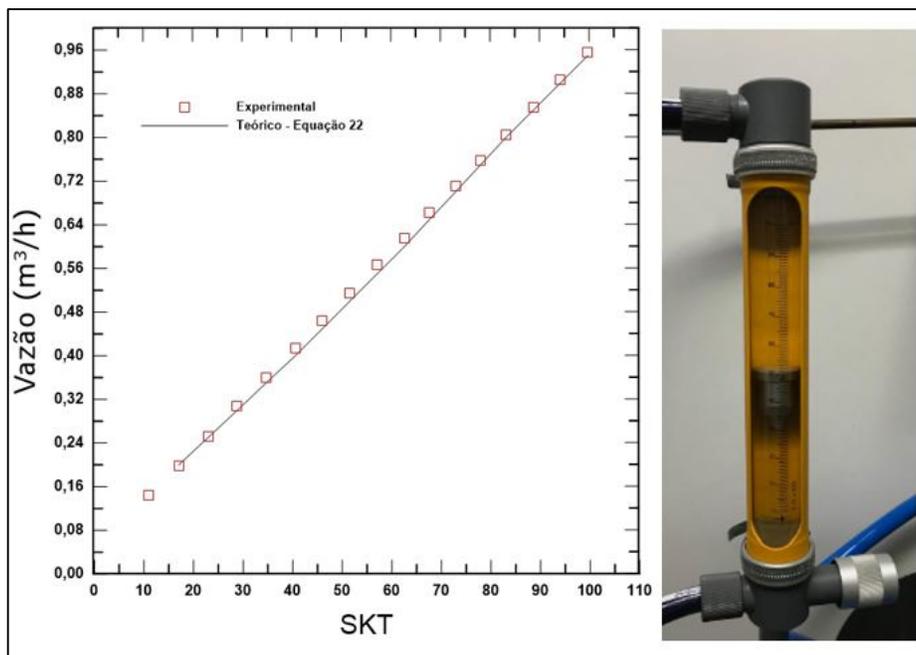


Figura 22 - Faixa de vazão [m³/h] e Reynolds em função da escala do rotâmetro.

Tabela 7 - Relação entre a vazão real e a Equação 22.

Escala Rotâmetro	Vazão (m ³ /h)		%Erro
	Real	Equação 22	
0,2	0,060	0,04462	25,63%
11,0	0,150	0,1429	4,73%
17,0	0,200	0,1975	1,25%
22,9	0,250	0,25119	-0,48%
28,8	0,300	0,30488	-1,63%
34,5	0,350	0,35675	-1,93%
40,5	0,400	0,41135	-2,84%
46,0	0,450	0,4614	-2,53%
51,5	0,500	0,51145	-2,29%
57,0	0,550	0,5615	-2,09%
62,5	0,600	0,61155	-1,92%
67,0	0,650	0,6525	-0,38%
72,8	0,700	0,70528	-0,75%
77,9	0,750	0,75169	-0,23%
83,0	0,800	0,7981	0,24%
88,5	0,850	0,84815	0,22%
94,0	0,900	0,8982	0,20%
99,5	0,950	0,94825	0,18%

A avaliação das incertezas dos parâmetros secundários foi determinada diretamente, de acordo com o método proposto por Moffat (1988) e a descrição do método encontra-se no **APÊNDICE**.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Validação da bancada experimental

Para a seção de teste de pressão (STP) foi avaliado o fator de atrito de Fanning, conforme Equação 4. A faixa de aplicação para o fator de atrito de Fanning para o número de Reynolds está compreendida entre $10^4 \leq Re \leq 10^5$. A comparação entre os valores teóricos de Fanning e os experimentais são apresentados na Figura 23, no qual a linha contínua representa a Equação 4 e os dados experimentais são calculados através da Equação 3.

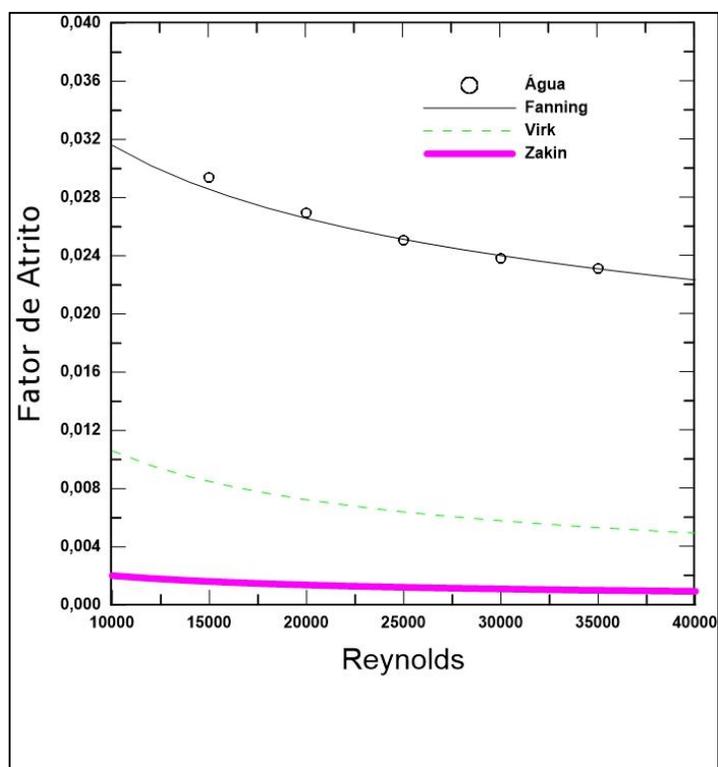


Figura 23 - dados experimentais do fator de atrito para água deionizada a 30°C.

Na seção de teste de temperatura (STT), com os termopares posicionados conforme a Figura 21, é possível medir a temperatura do fluido e da parede externa da tubulação. Sabendo que a condição de contorno do experimento é de fluxo de calor constante, devido a instalação da fita térmica envolvendo a tubulação, é possível medir experimentalmente os valores do

coeficiente de transferência de calor por convecção nas posições aonde estão fixados os termopares T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , conforme a Equação 23.

$$h(x_i) = \frac{q''}{(T_p(x_i) - T_f(x_i))} \quad 23$$

Onde q'' é o fluxo de calor por unidade de área, $T_p(x_i)$ é a temperatura da parede interna da tubulação na posição x_i e $T_f(x_i)$ é a temperatura do fluido na posição x_i . O fluxo de calor, q'' , pode ser obtido experimentalmente a partir da equação 24.

$$q'' = \frac{\rho \dot{V} c_p (T_s - T_e)}{\pi D L_H} \quad 24$$

Utilizando as condições de contorno no qual $T_f(x = 0) = T_e$ e $T_f(x = L_H) = T_s$, onde T_e é a temperatura na entrada da STT e T_f a temperatura na saída da STT, é possível determinar a temperatura média do fluido ao longo da posição, para $0 < x < 2100$ mm, conforme a Equação 25.

$$T_f(x_i) = \left(\frac{T_s - T_e}{L_H} \right) x_i + T_e \quad 25$$

A temperatura da superfície interna, $T_p(x_i)$, pode ser determinada utilizando-se o conceito de resistência equivalente, modelando o processo de transferência de calor por condução através da parede do tubo de cobre. Sendo assim, medindo-se a temperatura externa da parede, $T_w(x_i)$, é possível obter a temperatura interna da parede, $T_p(x_i)$, conforme Equação 26, onde r_{ext} é o raio externo da tubulação, r_{int} é o raio interno da tubulação ($D/2$) e k é a condutividade térmica do tubo de cobre fornecido pelo fabricante.

$$T_p(x_i) = T_w(x_i) - q'' D \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2k} \quad 26$$

Para a STT, onde o escoamento é termicamente desenvolvido, em regime permanente, o coeficiente de transferência de calor por convecção médio é calculado através da Equação 27. A Figura 24 ilustra a comparação dos dados experimentais, Equação 27, e compara com os valores teóricos da Equação de Gnielinsk (1975), Equação 11.

$$\bar{h} = \frac{h(x_1) + h(x_2) + h(x_3) + h(x_4)}{4} \quad 27$$

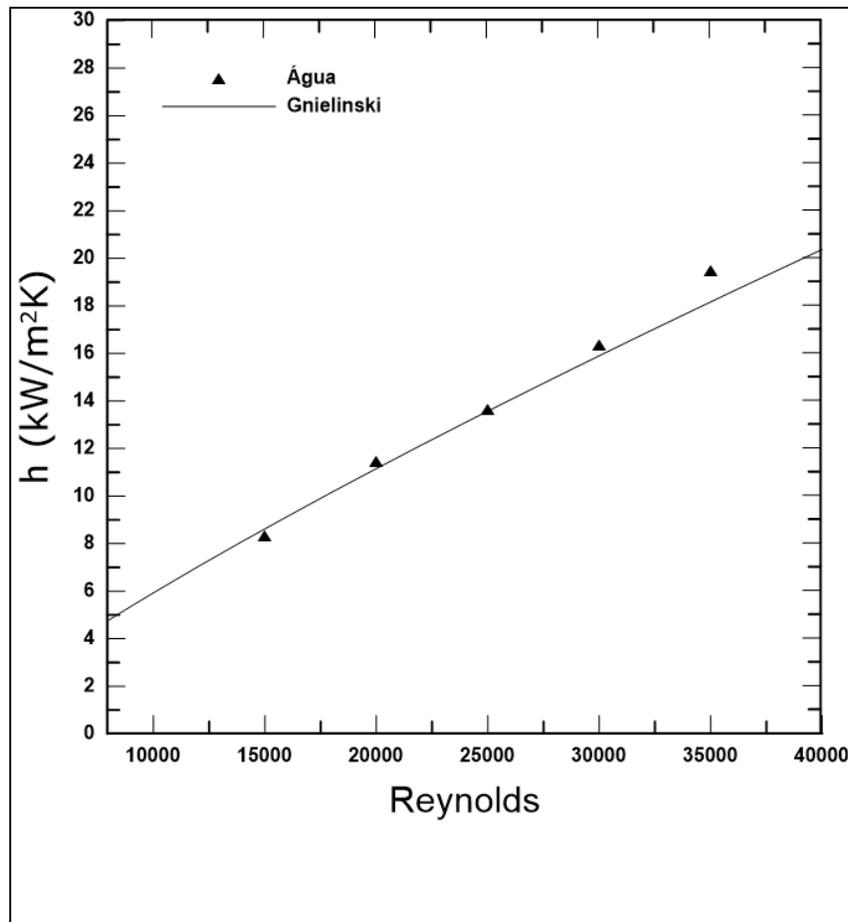


Figura 24 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e o obtido por meio do modelo de Gnielinski (1975).

5.2. Fator de atrito e %DR

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para os nanofluidos de Al_2O_3 com concentrações de 0,4% e 0,1%, em massa, em relação ao fator de atrito, f , em função do número de Reynolds, Re . É possível observar que o nanofluido de Al_2O_3 apresenta boa correspondência com a Equação de Fanning para os mesmos números de Reynolds em relação ao fluido base. De acordo com Pak e colaboradores (2007) a adição de pequenas quantidades de partículas ultrafinas de um sólido em água aumenta ligeiramente o gradiente de pressão nos mesmos números de Reynolds, entretanto o fator de atrito não sofre alterações significativas para concentrações menores do que 3% em volume para Al_2O_3 e de 10% em volume para TiO_2 . Sundar e Sharma (2010) verificaram que para o nanofluido de Al_2O_3 com até 0,5% em volume o fator de atrito não sofre alterações nos mesmos números de Reynolds. A mesma situação também foi mostrada por Xuan e Li (2003) no qual a adição de até 2% em volume para nanofluido de CuO não alterou o fator de atrito ao considerar os mesmos números de Reynolds.

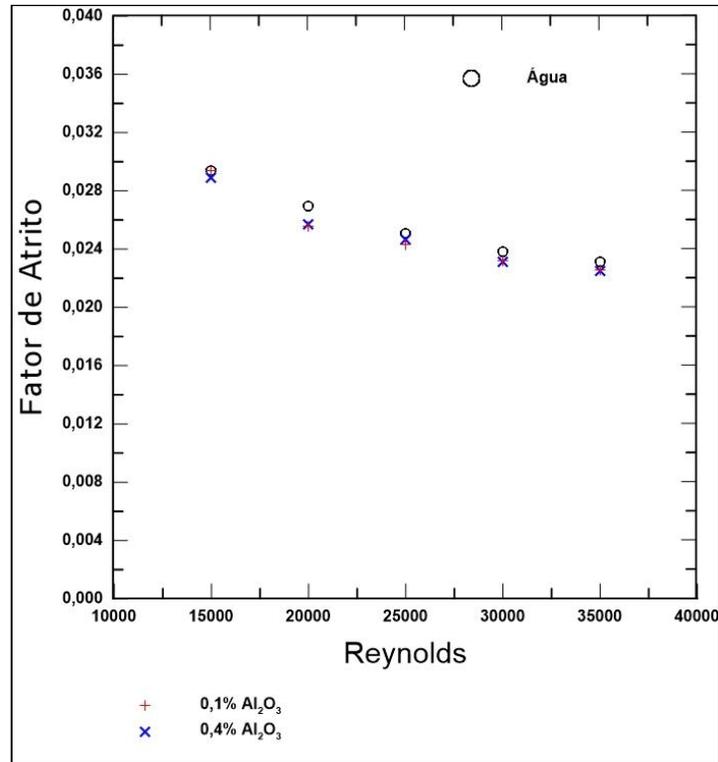


Figura 25 - Dados experimentais do fator de atrito para nanofluidos de Al_2O_3 .

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos para as soluções DR com concentrações de 200 ppm, 500 ppm e 700 ppm de CTAB em relação ao fator de atrito, f , em função do número de Reynolds, Re . É possível observar que o aumento da concentração de CTAB reduz o fator de atrito em relação ao fluido base e que com aumento do número de Reynolds o fator de atrito aumenta em relação ao fluido base. Para as soluções DR com concentrações de 200 ppm e 500 ppm de CTAB o aumento do Reynolds proporcionou um aumento do fator de atrito, enquanto que para solução DR com concentração de 700 ppm de CTAB ocorreu inicialmente uma redução do fator de atrito, e foi medido um aumento do mesmo a partir de Re 20000.

Li e colaboradores (2012) afirmam que para soluções DR, que utilizam surfactantes como aditivos, a redução de arrasto aumenta (fator de atrito diminui) com o aumento do número de Reynolds até que se atinja uma redução máxima, em que ocorre o número crítico de Reynolds. Depois disso, redução de arrasto diminui (fator de atrito aumenta) com o aumento do número de Reynolds até cessar o efeito de redução de arrasto. Além disso, Cai (2012) verificou que o aumento da concentração do surfactante CTAB aumentou esse número crítico de Reynolds no qual ocorre uma máxima %DR antes do decaimento. Dessa maneira, é possível perceber, nas Figura 26 e Figura 27, que para as soluções DR com 200 ppm e 500 ppm de CTAB esse número crítico de Reynolds ocorre antes de Re 15000, enquanto que para a solução DR de 700 ppm de CTAB este valor de Reynolds crítico está entre $15000 < Re_{critico} < 25000$.

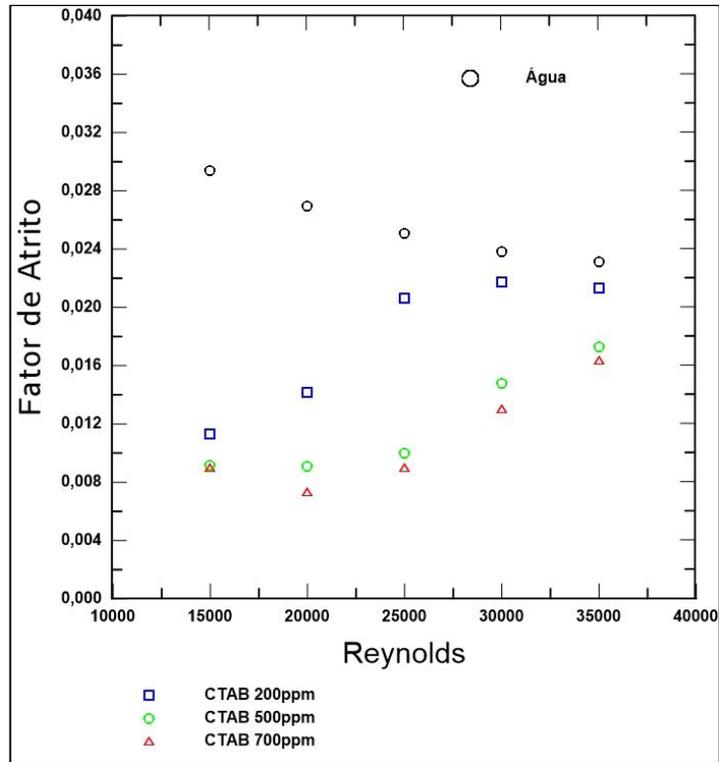


Figura 26 – Dados experimentais do fator de atrito para diferentes concentrações do surfactante CTAB.

É possível avaliar o efeito quantitativo da redução de arrasto (%DR) em função da concentração e do número de Reynolds na Figura 27. As soluções DR com 200 ppm e 500 ppm de CTAB apresentaram, respectivamente, uma redução de arrasto médio de 60% e 68% para Re 15000, decaindo até valores de 7,5% e 25% para Re 35000. Já a solução DR com 700 ppm de CTAB apresentou uma máxima redução de arrasto medido para Re 20000 de 72%, decaindo até 29% para Re 35000. Tal comportamento foi discutido no parágrafo anterior.

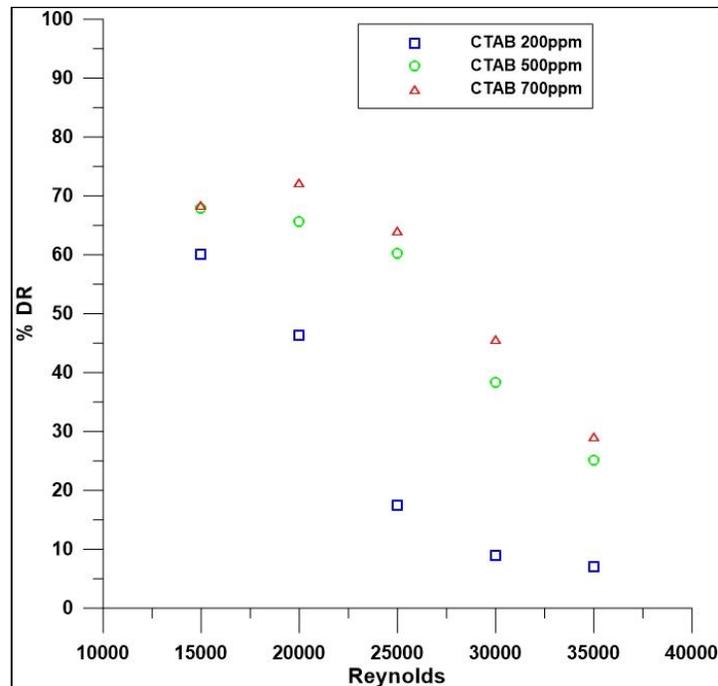


Figura 27 - Dados experimentais da Redução de Arrasto para diferentes concentrações do surfactante CTAB.

A Figura 28 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para o nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com diferentes concentrações do surfactante CTAB (200 ppm, 500 ppm e 700 ppm) e as soluções DR do mesmo surfactante nas mesmas concentrações (200 ppm, 500 ppm e 700 ppm) em relação ao fator de atrito, f , em função do número de Reynolds, Re .

Para o nanofluido 0,1% em massa de Al_2O_3 com 200 ppm de CTAB é possível verificar que não ocorreu alteração do fator de atrito nos mesmos valores de Reynolds. Isso demonstra que para o nanofluido de 0,1% em massa Al_2O_3 a concentração de 200 ppm do surfactante CTAB não foi suficiente para que a solução apresentasse os efeitos de redução de arrasto (formação de micelas gigantes). Já para o nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com 500 ppm e 700 ppm do surfactante CTAB os valores do fator de atrito apresentaram pouca diferença, entre si, nos mesmos valores de Reynolds. Comparando as soluções DR de CTAB e os nanofluidos com CTAB, nos mesmos valores de Reynolds, é possível verificar que os nanofluidos com CTAB apresentaram maior fator de atrito em relação as suas respectivas soluções DR com mesma concentração do surfactante CTAB. A adição das nanopartículas pode ter reduzido a concentração local do surfactante, sendo necessária uma maior concentração do surfactante. A mesma situação foi observada não só por Yang (2013), que utilizaram nanofluido com nanopartículas de Cu em uma solução viscoelástica (CTAC:NaSal), onde a adição dessas nanopartículas diminuíram a redução de arrasto (aumentou o fator de atrito) em relação a solução com mesma concentração do surfactante. Liu e Liao (2010) também verificaram a mesma situação no qual nanofluidos com nanotubos de carbono, em concentração de 2% em massa, com surfactante CTAC:NaSal, também apresentaram um maior fator de atrito em relação a solução DR desse mesmo surfactante sem os nanotubos de carbono.

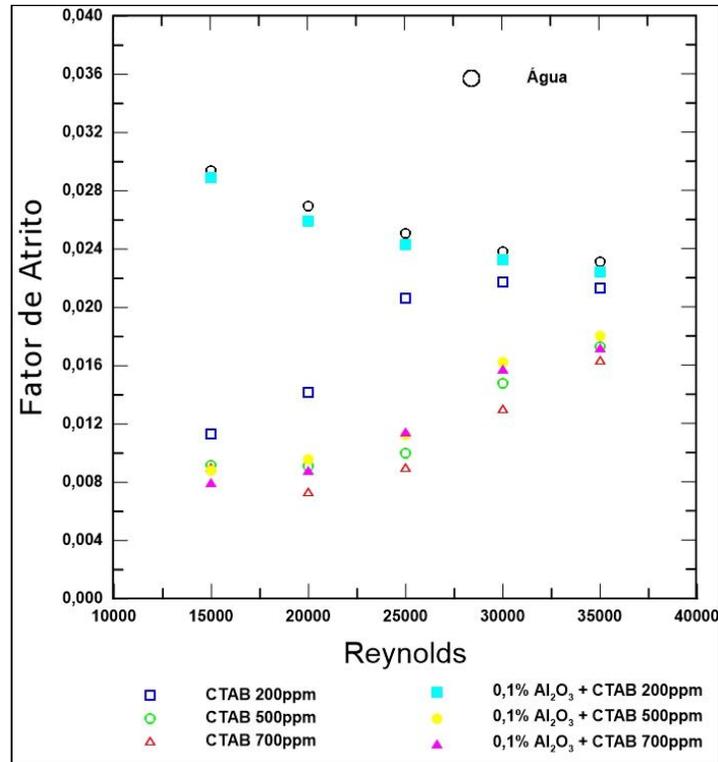


Figura 28 - Dados experimentais do fator de atrito em nanofluidos de Al_2O_3 com diferentes concentrações do surfactante CTAB e para soluções DR do surfactante CTAB em diferentes concentrações.

A comparação quantitativa da redução de arrasto (%DR) em função da concentração e do número de Reynolds entre o nanofluido com surfactante e a solução DR pode ser observada na Figura 29. Tendo em vista, que para os nanofluidos 0,1% em massa de Al_2O_3 com surfactante CTAB nas concentrações de 500 ppm e 700 ppm a redução de arrasto a partir de valores de Reynolds 15000 encontram-se em uma curva descendente no sentido do aumento do número de Reynolds. É provável que o número crítico de Reynolds seja menor ou igual a 15000, enquanto que para solução DR com 700 ppm de CTAB, como mencionado anteriormente, este número crítico de Reynolds pode estar entre 15000 e 25000. Já o nanofluido 0,1% em massa de Al_2O_3 com surfactante CTAB 200 ppm não apresentou redução de arrasto.

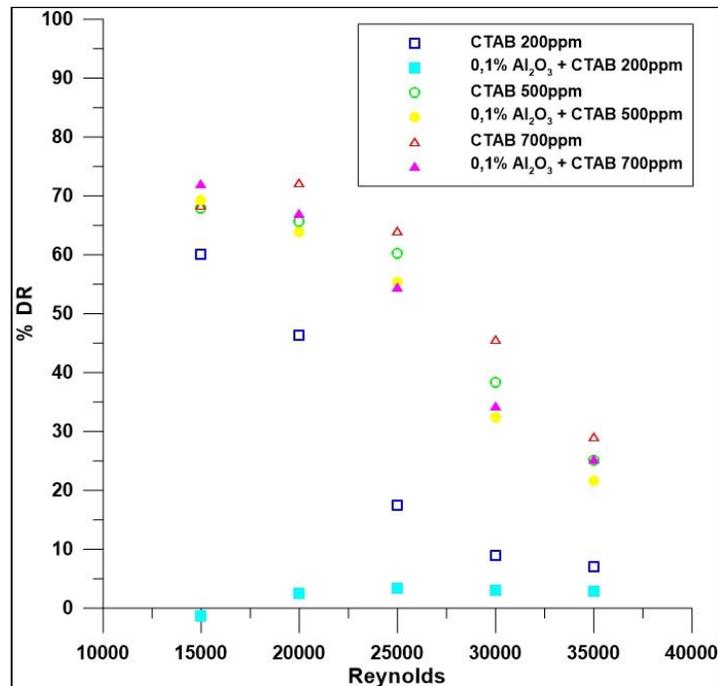


Figura 29 - Dados experimentais da Redução de Arrasto em nanofluido de 0,1% Al₂O₃ com diferentes concentrações do surfactante CTAB e em Soluções DR com diferentes concentrações do surfactante CTAB.

A Figura 30 apresenta a influência da adição de nanopartículas de Al₂O₃ (influência da concentração do nanofluido) para a mesma concentração do surfactante CTAB, 500 ppm, no fator de atrito, f , em função do número de Reynolds, Re . O nanofluido 0,4% em massa de Al₂O₃ + CTAB 500 ppm não apresentou alterações do no comportamento do fator de atrito. O mesmo comportamento foi observado, anteriormente, no nanofluido 0,1% em massa de Al₂O₃ + CTAB 200 ppm, cabendo aqui a mesma justificativa, de que a formação das micelas gigantes, responsáveis pelo efeito de redução de arrasto, não conseguem ser formadas devido à alta concentração das nanopartículas.

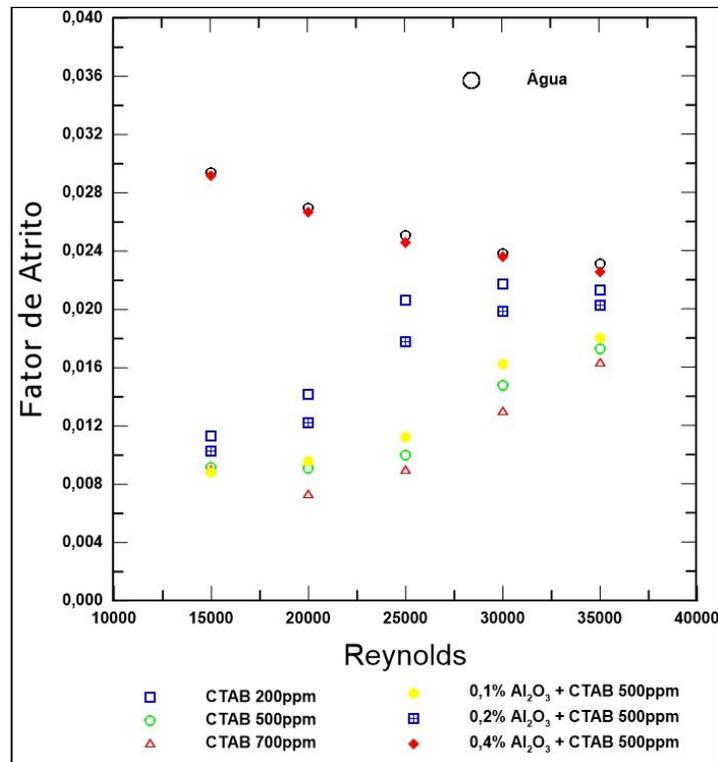


Figura 30 - Dados experimentais do fator de atrito em nanofluido com diferentes concentrações de Al_2O_3 para concentração do surfactante CTAB de 500ppm.

Ainda na Figura 30 observa-se que o fator de atrito do nanofluido 0,2% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm foi menor em relação ao nanofluido 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm. Sendo assim, é possível afirmar que a adição das nanopartículas aumentou o fator de atrito e conseqüentemente reduziu a %DR, como mostra a Figura 31. Este mesmo comportamento foi encontrado por Wang e Liu (2017), onde foi variada a quantidade do surfactante CTAC em nanofluido de CuO com 4% em massa, segundo o autor algumas das moléculas de CTAC são anexadas as nanopartículas e então diminuem a concentração real de CTAC para formar micelas gigantes, portanto, mais surfactante é necessário para conseguir o mesmo efeito de redução de arrasto que o da solução DR sem nanopartículas.

Como conseqüência do comportamento do fator de atrito, apresentado na Figura 30, a Figura 31 apresenta a comparação quantitativa da redução de arrasto (%DR) em função número de Reynolds para diferentes concentrações do nanofluido de Al_2O_3 com a mesma concentração de 500 ppm do surfactante CTAB.

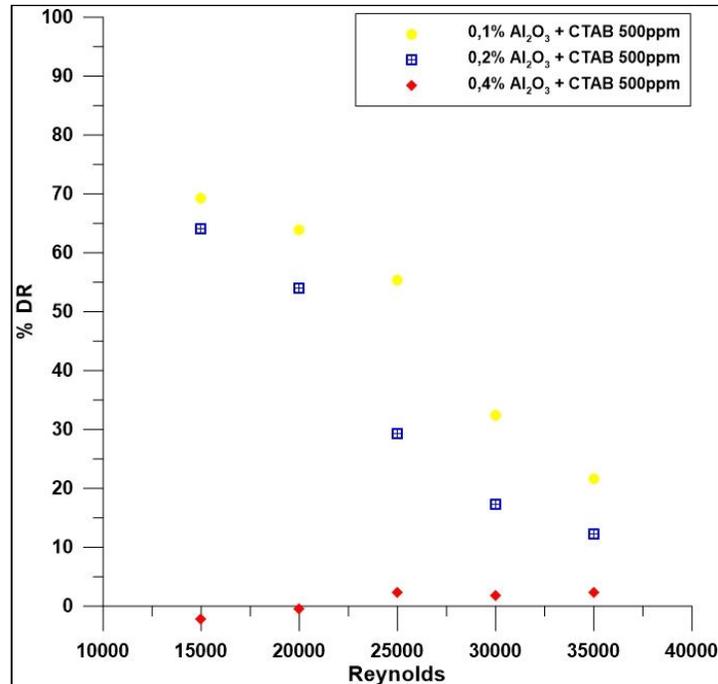


Figura 31 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do número de Reynolds para diferentes concentrações do nanofluido de Al₂O₃ na mesma concentração de 500ppm do surfactante CTAB.

Na Figura 31 é possível verificar que a adição de nanopartículas de Al₂O₃ reduziu o efeito de redução de arrasto e que para o nanofluido 0,4% em massa de Al₂O₃ é necessária uma maior concentração do Surfactante CTAB para que ocorra o efeito de redução de arrasto. O número de Reynolds crítico para os nanofluidos, que apresentaram os efeitos da redução de arrasto, é menor do que 15000.

5.3. Coeficiente de transferência de calor por convecção

Os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , referentes aos testes realizados para os nanofluidos com concentrações de 0,1% e 0,4% em massa estão representados na Figura 32 em função do número de Reynolds, Re . Pode ser observado que o aumento da concentração de Al₂O₃ aumentou os valores do coeficiente de transferência de calor nos mesmos valores de Reynolds em relação ao fluido base. Para o nanofluido com concentração de 0,1% em massa foi possível observar um aumento médio de até 27% no coeficiente de transferência de calor, enquanto que para a concentração de 0,4% em massa este aumento foi de até 43%. Em ambos os casos esse incremento, em relação ao fluido base, ocorreram em Re 30000.

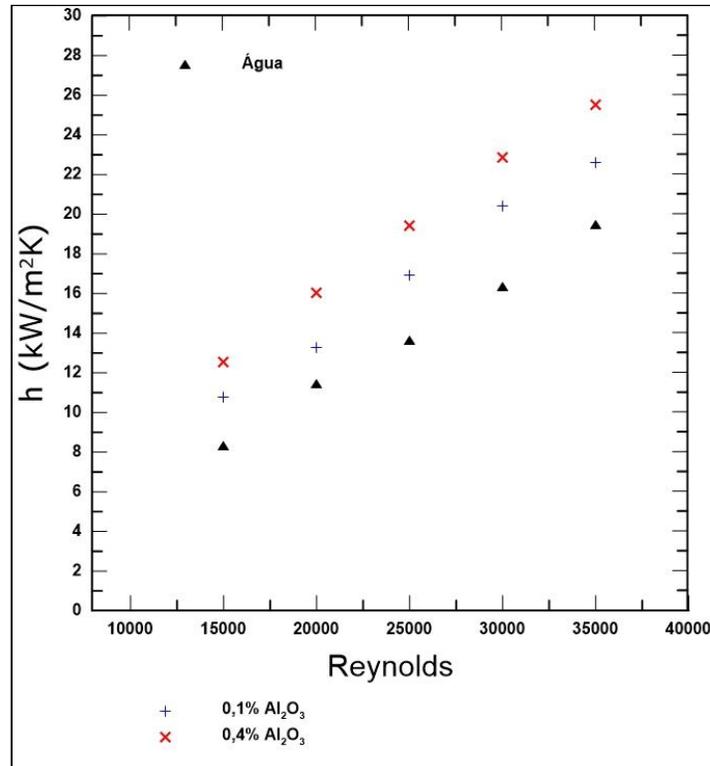


Figura 32 - Influência da concentração de Al_2O_3 no nanofluido no coeficiente de transferência de calor.

Dados apresentados por Sahin e colaboradores (2013) chegam a valores do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção de 37,5% em Re 8000 e uma concentração do nanofluido de Al_2O_3 de 0,5% em volume. Já Pak e colaboradores (2007), cujo o tamanho médio da Al_2O_3 utilizada é igual ao deste trabalho (13 nm), encontraram valores mais significativos do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo este ganho de 45% para a concentração de 0,34% em volume e de aproximadamente 75% para a concentração de 2,78% em volume. O que também demonstra que o aumento da concentração proporciona um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção. Sharma e Sundar (2009) utilizando Al_2O_3 com tamanho médio de 47 nm e concentração em volume de 0,1%, alcançaram um ganho no coeficiente de transferência de calor por convecção de 13,77% para Re 3000 e 23,69% para Re 9000, quando comparado com água como fluido base. A não exatidão entre os resultados apresentados pode estar relacionado não só ao tamanho médio das nanopartículas, mas também ao modo de preparo do nanofluido, que influencia diretamente no tamanho dos aglomerados formados. A Tabela 8 mostra os resultados médios apresentados na Figura 32.

Tabela 8 - Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo (h_{relativo}) para nanofluidos de Al_2O_3 em diferentes tamanhos e Reynolds.

Concentração	Ganho percentual médio do h_{relativo}	Reynolds
0,1%wt (0,025% Vol.)	24%	15000
	18%	20000
	24%	25000
	27%	30000
	23%	35000
0,4%wt (0,1% Vol.)	44%	15000
	43%	20000
	42%	25000
	43%	30000
	39%	35000

Os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , referentes aos testes realizados para as soluções DR com concentrações de 200 ppm, 500 ppm e 700 ppm de CTAB estão representados na Figura 33 em função do número de Reynolds, Re . Pode ser observado que o aumento da concentração de surfactante reduziu os valores do coeficiente de transferência de calor nos mesmos valores de Reynolds em relação ao solvente. Na Tabela 9 é quantificada as perdas percentuais do coeficiente de transferência de calor por convecção apresentados na Figura 33. Conforme se reduz o efeito de redução de arrasto, com o aumento do número de Reynolds (Figura 27), o efeito médio de redução do coeficiente de transferência de calor por convecção é minimizado, chegando a uma redução de 12% na solução de 200 ppm, 38% na solução de 500 ppm e 41% na solução de 700 ppm para Reynolds 35000, sempre em relação ao solvente.

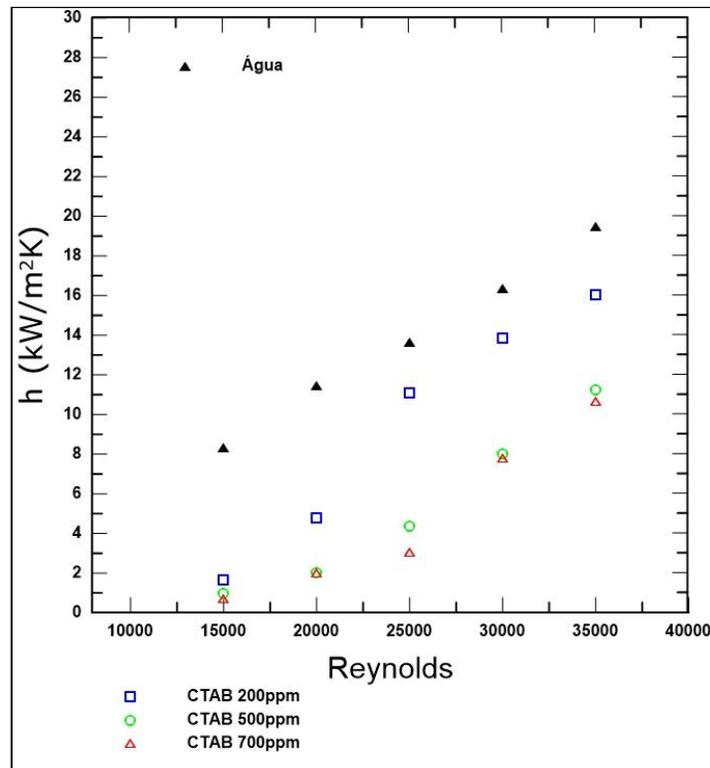


Figura 33 – Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor para as soluções DR com diferentes concentrações do surfactante CTAB.

Na Tabela 9 é possível perceber o efeito do aumento da concentração do surfactante CTAB na redução do coeficiente de transferência de calor por convecção. Ao se analisar nos mesmos Reynolds o efeito do aumento do número de Reynolds é acompanhado do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção na mesma concentração. De acordo com Li e colaboradores (2012), a ocorrência do fenômeno de redução de arrasto em escoamentos turbulentos provoca uma redução na transferência de calor. Isso ocorre devido à supressão dos efeitos da turbulência. Na maioria dos casos a redução da transferência de calor, em soluções DR, é muito maior do que a redução do arrasto e como consequência tem-se uma baixa eficiência na transferência de calor. Tal fato foi comprovado pelos extensivos ensaios medindo a redução do coeficiente de transferência de calor por convecção sempre acompanhado pela redução de arraste nas soluções aditivadas com surfactante, conduzidos por Aguilar e colaboradores (2001), que mostraram que em soluções DR com surfactantes a redução de arrasto é sempre acompanhada da redução do coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo o segundo maior que o primeiro para soluções DR de polímeros e surfactantes.

Tabela 9 - Influência do aumento da concentração do surfactante CTAB e do número de Reynolds no coeficiente de transferência de calor.

Reynolds	% da redução de h		
	CTAB 200ppm	CTAB 500ppm	CTAB 700ppm
15000	81,09%	88,63%	91,42%
20000	57,03%	81,90%	81,71%
25000	18,15%	67,77%	77,31%
30000	12,90%	49,76%	50,83%
35000	11,62%	38,24%	41,28%

A influência da adição das nanopartículas de Al_2O_3 nas soluções DR de surfactantes estão representados na Figura 34 em função do número de Reynolds, Re. Assim como no efeito de redução de arrasto, a adição das nanopartículas de Al_2O_3 também influenciaram no coeficiente de transferência de calor por convecção, entretanto este efeito é contrário, ou seja, ao mesmo tempo que a adição dessas nanopartículas reduzem o efeito de redução de arrasto, essas mesmas nanopartículas aumentam o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido com surfactante em relação a solução DR com as mesmas concentrações do surfactante.

Ainda na Figura 34, para menores valores de Reynolds, 15000 e 20000, os nanofluidos com concentração do surfactante de 500 ppm e 700 ppm de CTAB (0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500ppm e 0,1% em massa Al_2O_3 com CTAB 700ppm) apresentaram valores muito próximos. Para valores de Reynolds 25000 em diante o nanofluido 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm apresentou maiores coeficientes de transferência de calor por convecção em relação ao nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 700ppm. Tal comportamento pode estar relacionado ao fato de que o nanofluido com maior concentração do surfactante tenha maior capacidade da %DR e conseqüentemente menor transferência de calor.

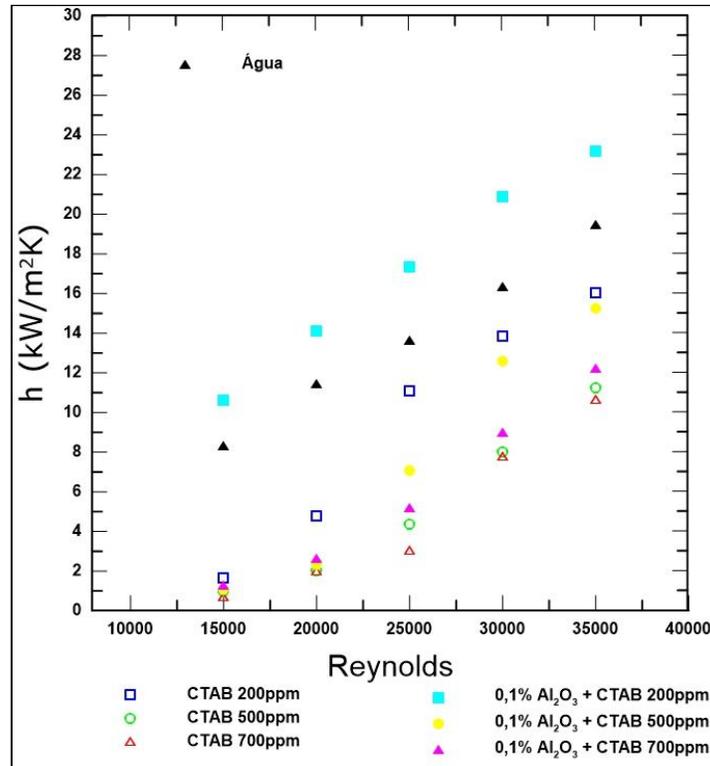


Figura 34 - Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor para nanofluidos com 0,1% de Al_2O_3 com diferentes concentrações do surfactante CTAB e para soluções DR com diferentes concentrações do surfactante CTAB.

Resultados apresentados por Yang e colaboradores (2013) mostram que a adição de nanopartículas de Cu em solução DR com surfactante CTAC:NaSal reduz a formação das estruturas em formato de micelas gigantes, que são responsáveis pelo efeito de redução de arrasto. Tal fato foi observado no nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com 200 ppm CTAB, no qual foi necessária uma maior concentração do surfactante para iniciar os efeitos de redução de arrasto. Ainda de acordo com Yang e colaboradores (2013) e acrescentando os dados coletados por Liu e Liao (2010), onde o segundo utilizou nanotubos de carbonos com adição de CTAC:NaSal como surfactante, ambos condizem com o comportamento apresentado na Figura 34, de maneira que a adição das nanopartículas aumentou o coeficiente de transferência de calor por convecção em relação as soluções DR com mesma concentração do surfactante.

Os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , referentes aos testes realizados para diferentes concentrações do nanofluido (0,1%, 0,2% e 0,4% em massa) na mesma concentração de 500 ppm do surfactante CTAB, estão representados na Figura 35 em função do número de Reynolds, Re . O nanofluido de 0,4% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm, apresentou incremento médio de 35% no coeficiente de transferência de calor por convecção em relação a água deionizada. Como esse nanofluido não apresentou os efeitos de redução de arrasto, já era esperado este incremento. Entretanto, seu comportamento não apresentou a mesma tendência do nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 200 ppm, onde este último apresentou coeficiente de transferência de calor por convecção maior ou igual em relação ao nanofluido de mesma concentração sem surfactante ($h_{(0,1\%Al_2O_3 + CTAB 200ppm)} \geq h_{(0,1\%Al_2O_3)}$ e $h_{(0,4\%Al_2O_3 + CTAB 500ppm)} < h_{(0,4\%Al_2O_3)}$). No caso do nanofluido 0,1% em massa de Al_2O_3

com CTAB 200 ppm a proporção em massa do surfactante CTAB e das nanopartículas de Al_2O_3 é de 1:5, enquanto que essa proporção para o nanofluido de 0,4% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm é de 1:8. Dessa maneira, como a proporção entre nanopartículas e surfactante não são as mesmas, não necessariamente deveria ocorrer o mesmo comportamento.

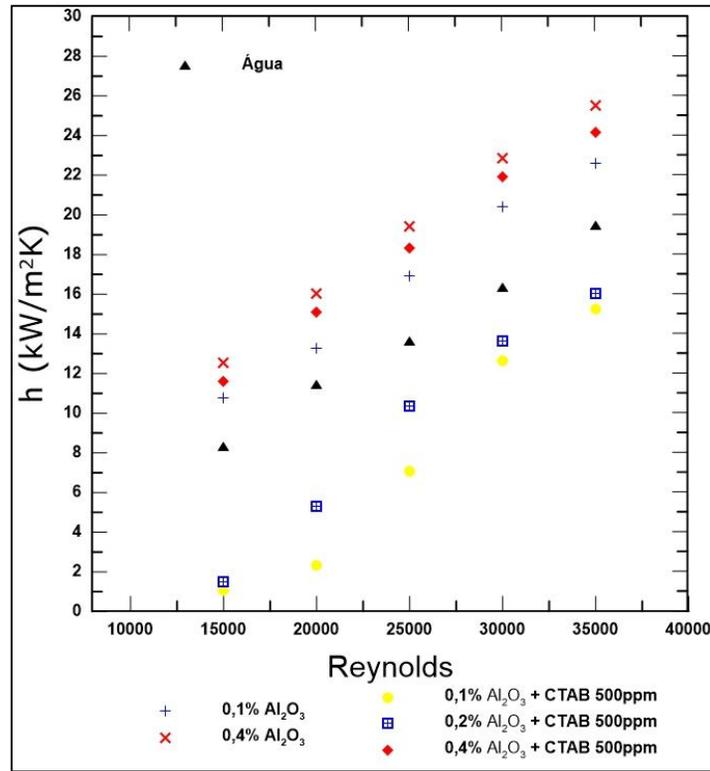


Figura 35 - Dados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção para diferentes concentrações do nanofluido de Al_2O_3 na mesma concentração de 500ppm do surfactante CTAB.

Ainda na Figura 35 é possível notar que o aumento da concentração das nanopartículas de Al_2O_3 aumentou o coeficiente de transferência de calor por convecção para a mesma concentração de 500 ppm do Surfactante CTAB, e que deve existir uma concentração entre 0,2% e 0,4% em massa de maneira que o nanofluido com 500 ppm de CTAB não apresente mais a capacidade de reduzir o arrasto. De acordo com Wang e Liu (2017) isso pode ocorrer não só devido ao aumento da concentração das nanopartículas ser acompanhado de um ganho efetivo da condutividade térmica do fluido, mais também ao movimento térmico das nanopartículas no fluido. Pois, em seus experimentos, ao manter a concentração do surfactante CTAC em 300 ppm e adicionar nanopartículas de CuO em concentrações de 2% e 6% em massa encontrou um aumento do coeficiente de transferência de calor de 24% e 50%, respectivamente.

5.4. Redução de arrasto (%DR) e coeficiente de transferência de calor por convecção relativo ($h_{relativo}$)

Na Figura 36 a linha contínua inclinada indica onde a %DR é igual a taxa da redução do coeficiente de transferência de calor por convecção, de maneira que, os pontos localizados a esquerda dessa linha indicam uma maior %DR em relação a taxa da redução do coeficiente de transferência de calor por convecção ($\%DR > \%h_{relativo}$), e os pontos localizados a direita dessa linha indicam uma menor %DR em relação a taxa da redução do coeficiente de transferência de calor por convecção ($\%DR < \%h_{relativo}$). De acordo com Yang e colaboradores (2013) nanofluidos de Cu com adição de surfactante possuem uma tendência de que $\%DR < \%h_{relativo}$, enquanto que soluções DR do mesmo surfactante apresentam o comportamento contrário, $\%DR > \%h_{relativo}$. Já Liu e Liao (2010) afirmam que para nanofluidos com nanotubo de carbono a $\%DR = \%h_{relativo}$.

A Figura 36 ilustra de maneira conjunta o comportamento do efeito de redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo ($h_{relativo} = \frac{h_{CTAB}}{h_{agua}}$). O decaimento do efeito de redução de arrasto e o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo são acompanhados pelo aumento do número de Reynolds. Pois, de acordo com Li e colaboradores (2012) após um aumento contínuo do número de Reynolds, a partir do número crítico de Reynolds, conterà na solução DR menores quantidades de micelas gigantes, que são responsáveis pelo efeito de redução de arrasto, permitindo assim um retorno gradativo dos efeitos da turbulência que antes eram suprimidos.

Dentre os nanofluidos com adição de surfactante, apenas o nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm apresentou $\%DR < \%h_{relativo}$, nos valores de Reynolds 25000, 30000 e 35000. É possível observar ainda que os nanofluidos com adição de surfactante a %DR é sempre menor em relação a solução DR com mesma concentração do surfactante e no mesmo Reynolds, e que a redução do coeficiente de transferência de calor por convecção foi menor nos nanofluidos com surfactantes em relação as soluções DR com mesma concentração do surfactante e no mesmo Reynolds. É possível verificar dentre os nanofluidos com mesma concentração do surfactante, aquele que possui maior concentração das nanopartículas de Al_2O_3 apresentou maior incremento do coeficiente de transferência de calor por convecção em relação ao de menor concentração de nanopartículas. Entretanto, o efeito contrário é observado para a %DR, onde a adição das nanopartículas interferem de maneira deletéria na formação das micelas gigantes. Como mencionado anteriormente, o nanofluido de 0,4% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm não apresentou comportamento de redução de arrasto, todavia, devido à adição das nanopartículas de Al_2O_3 foi verificado um aumento significativo do coeficiente de transferência de calor por convecção, atingindo aproximadamente 38% de incremento em relação a água deionizada para Reynolds 30000. Para o nanofluido de 0,2% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm é possível verificar que, para Re maior que 15000, a %DR foi menor ou igual a redução percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção ($\%DR < \%h_{relativo}$). Já para o nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm essa relação ocorre em Reynolds 25000 em diante.

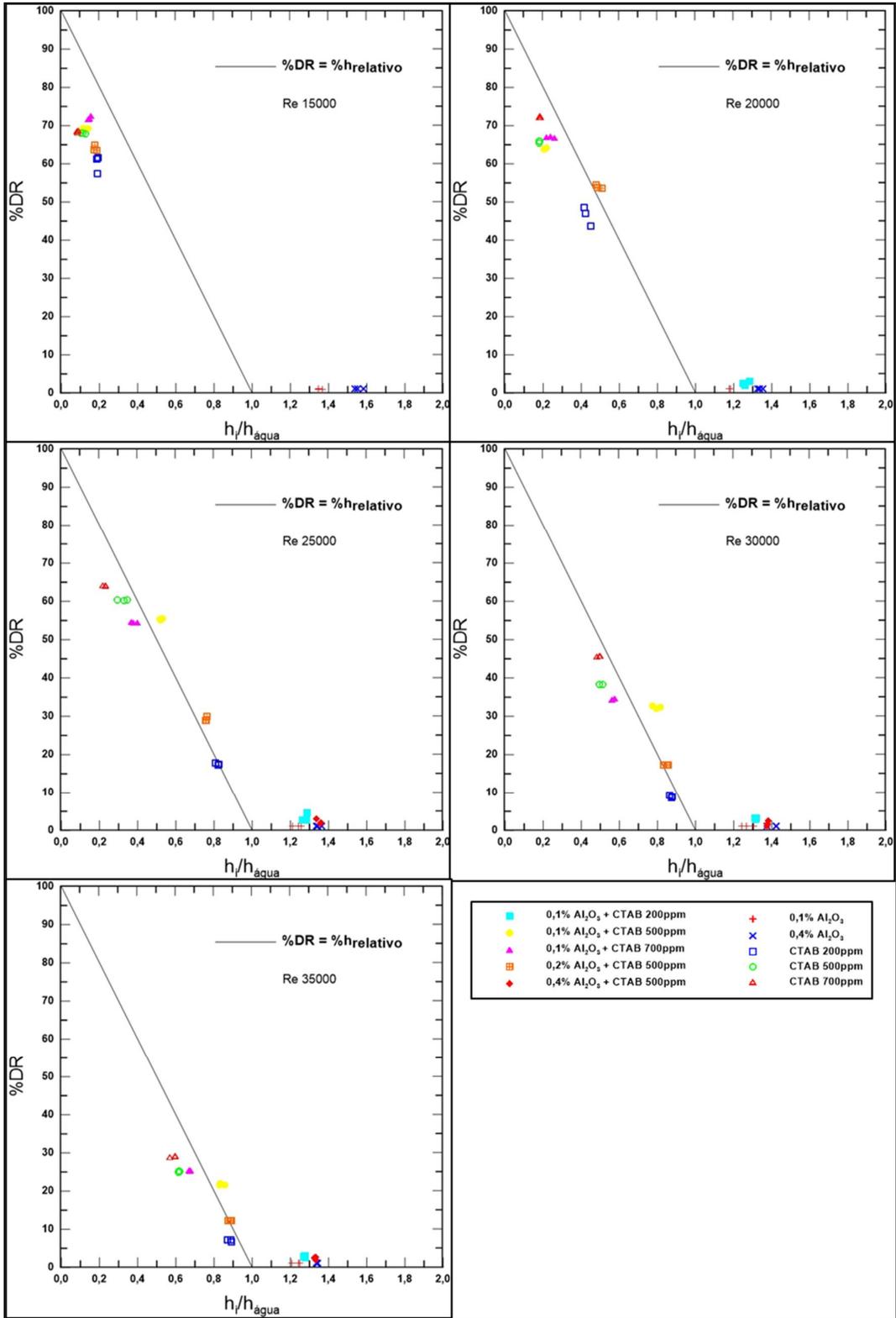


Figura 36 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor relativo para diferentes números de Reynolds.

5.5. Comportamento Termo-hidráulico

De acordo com Williams e colaboradores (2008), os benefícios da utilização dos nanofluidos em determinadas aplicações pode depender da relação entre o aumento da condutividade térmica (relacionado ao aumento da transferência de calor) e o aumento da viscosidade (responsável pelo aumento indesejável da potência de bombeamento). Devido a isso, a avaliação do desempenho termo-hidráulico de todas as amostras foi realizada, especificando o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção em função da potência de bombeamento relativa. A potência de bombeamento foi obtida na seção de teste de pressão (STP) e calculadas conforme a Equação 28. Nesse capítulo 5.5, a potência de bombeamento foi avaliada nos mesmos valores de Reynolds, mesma temperatura de entrada e mesmo fluxo de calor.

$$\dot{W} = \dot{V}\Delta P$$

28

Nas figuras, apresentadas neste capítulo, pode ser observado que existem quatro quadrantes que descrevem o desempenho termo-hidráulico das amostras estudadas, sendo $\frac{h_i}{h_{\text{água}}}$ o coeficiente relativo de transferência de calor e $\frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{\text{água}}}$ a potência de bombeamento relativa em coordenadas vetoriais, onde a coordenada (1,1) representa o fluido base ou solvente (água deionizada) e o índice i representa a amostra estudada (nanofluido, solução com surfactante ou nanofluido com surfactante). De acordo com Vasconcelos e colaboradores (2017), o primeiro quadrante $\left(\frac{h_i}{h_{\text{água}}} > 1, \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{\text{água}}} > 1\right)$ descreve um desempenho termo-hidráulico esperado dos nanofluidos, onde existe um incremento no coeficiente de transferência de calor convectivo e um incremento na potência de bombeamento, ressaltando que um ótimo desempenho para qualquer nanofluido seria $\left(\frac{h_i}{h_{\text{água}}} > 1, \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{\text{água}}} = 1\right)$. O segundo quadrante $\left(\frac{h_i}{h_{\text{água}}} < 1, \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{\text{água}}} > 1\right)$ resulta em uma redução no coeficiente de transferência de calor por convecção e um incremento na potência de bombeamento. O terceiro quadrante $\left(\frac{h_i}{h_{\text{água}}} < 1, \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{\text{água}}} < 1\right)$ resulta tanto na redução do coeficiente de transferência de calor quanto na redução da potência de bombeamento. Finalmente, o quarto quadrante $\left(\frac{h_i}{h_{\text{água}}} > 1, \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{\text{água}}} < 1\right)$ representa um ganho no coeficiente de transferência de calor por convecção e uma redução na potência de bombeamento, sendo este último caso, a melhor situação idealizada, onde ocorre uma aumento da capacidade de transferência de calor e economia de energia para o transporte do fluido.

Hoffmann (2014) aconselha que a comparação do desempenho termo-hidráulico das amostras seja realizada na mesma vazão mássica, mesma temperatura de entrada e mesmo fluxo de calor imposto. Entretanto, neste capítulo 5.5, os experimentos foram realizados no mesmo Reynolds ao invés de serem realizados na mesma vazão mássica. Em um capítulo mais adiante, capítulo 5.7, os experimentos foram conduzidos na mesma vazão volumétrica e mesma temperatura de entrada. A Figura 37 ilustra o comportamento termo-hidráulico das amostras

(nanofluido, solução redutora de arrasto e nanofluido com surfactante) para valores de Reynolds entre 15000 e 35000.

O incremento do coeficiente de transferência de calor relativo e da potência hidráulica relativa observados para os nanofluidos de Al_2O_3 nas concentrações de 0,1% e 0,4% em massa em relação ao fluido base mostrou-se significativo. Como resultado, para os nanofluidos avaliados, a razão encontrada foi $\frac{h_{Al_2O_3}}{h_{água}} > 1$ e $\frac{\dot{W}_{Al_2O_3}}{\dot{W}_{água}} > 1$, para ambas as concentrações. Para a faixa de Reynolds apresentada (15000 – 35000) o nanofluido de Al_2O_3 com concentração de 0,4% em massa, em todos os casos apresentou maior coeficiente de transferência de calor em relação a concentração de 0,1% em massa. Já para a potência hidráulica, o nanofluido com maior concentração apresentou um acréscimo médio de 7% e o nanofluido de menor concentração esse acréscimo foi de aproximadamente 5%, em ambos os casos em relação ao fluido base. Tal comportamento ocorre devido ao aumento da viscosidade do nanofluido, como consequência da adição de um sólido em meio líquido, em relação ao mesmo fluido base quando comparados nos mesmos números de Reynolds. Deste modo, para as duas concentrações, o nanofluido apresentou vantagem em aplicações onde a transferência de calor é prioridade em relação à economia de energia para vencer a perda de carga.

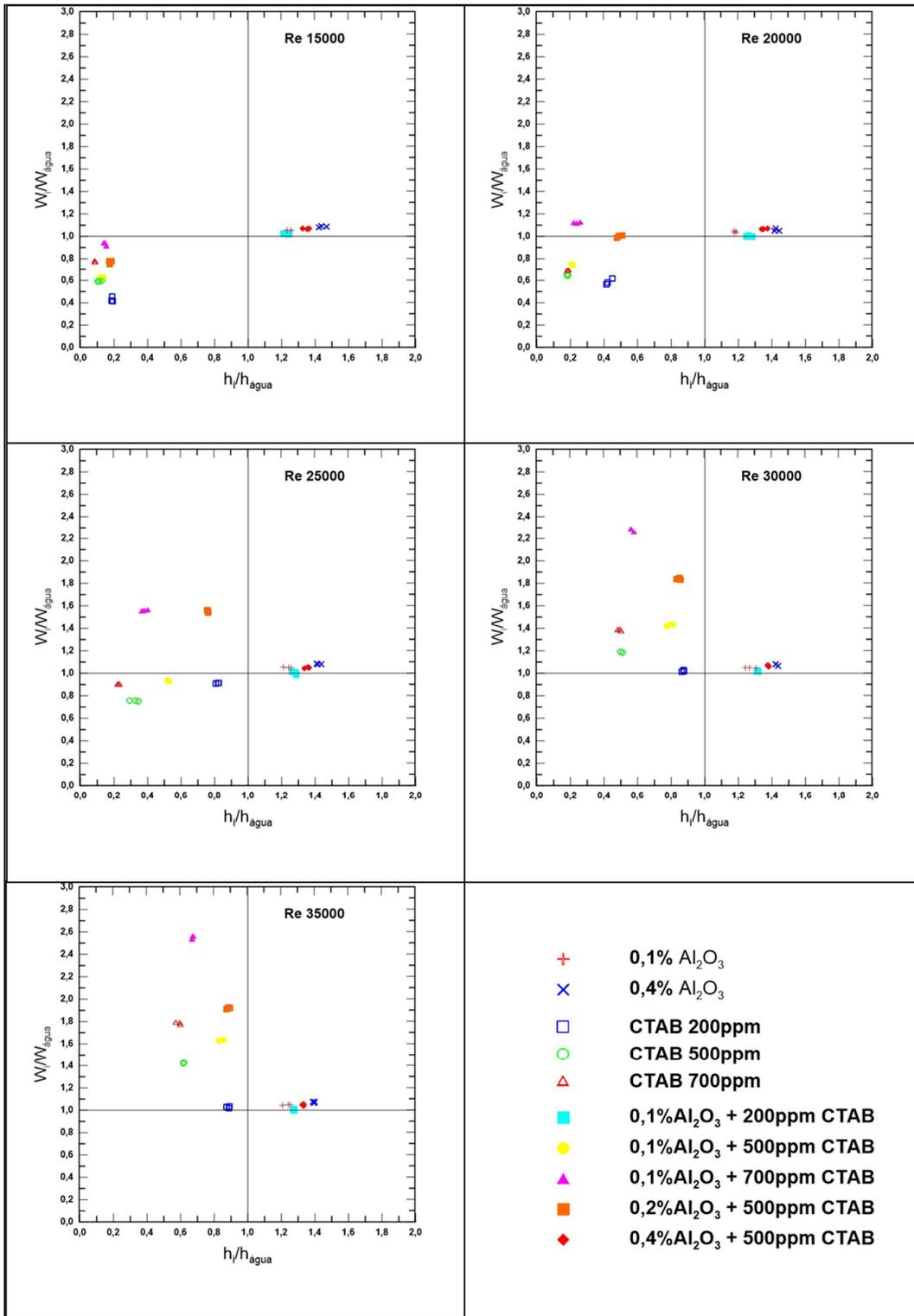


Figura 37 - Desempenho termo-hidráulico das amostras no mesmo número de Reynolds.

Para as soluções redutores de arrasto, em todos os valores de Reynolds, o coeficiente de transferência de calor por convecção relativo encontrado foi $\frac{h_{CTAB}}{h_{\text{água}}} < 1$. É possível verificar que, no mesmo Reynolds, quanto maior a concentração do surfactante menor o coeficiente de transferência de calor por convecção, o que não apresenta uma condição favorável para processos que objetivam a troca térmica. Já para a razão da potência hidráulica relativa é possível perceber que para valores de Reynolds menores do que 30000 a potência hidráulica é menor em relação a água deionizada, proporcionando uma economia de energia no transporte do fluido e com uma vazão superior ao do solvente, no mesmo valor de Reynolds. Já para os valores de Reynolds 30000 e 35000 é observado um aumento dessa potência hidráulica, esse aumento é menos evidente para solução DR de CTAB com 200 ppm, o que não proporciona uma economia de energia no transporte do fluido no mesmo valor de Reynolds, entretanto a vazão é significativamente maior. Tal fato pode estar relacionado ao aumento da vazão e viscosidade. Por exemplo, em Re 15000, a solução com 200 ppm de CTAB apresentou um aumento na vazão de 2,84%, enquanto que na solução com 700 ppm de CTAB esse aumento foi de 35%. O aumento da concentração do surfactante também aumentou a viscosidade aparente da solução, Tabela 5, o que também pode ter contribuído para esse aumento da potência de bombeamento relativa.

A Figura 37 também ilustra que, de maneira geral, a adição das nanopartículas de Al_2O_3 nas soluções redutoras de arrasto aumentou tanto a potência de bombeamento quanto o coeficiente de transferência de calor no mesmo número de Reynolds. Os nanofluidos com surfactante, que apresentaram os efeitos de redução de arrasto, comparados no mesmo valor de Reynolds, a razão encontrada foi $\frac{h_i}{h_{\text{água}}} < 1$. Entretanto, apresentaram um ganho percentual convectivo em relação as suas respectivas soluções redutora de arrasto de mesma concentração do surfactante. Já para a razão da potência hidráulica para o nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm essa relação foi de $\frac{\dot{W}_{(0,1\%Al_2O_3 + CTAB\ 500ppm)}}{\dot{W}_{\text{água}}} < 1$ para valores de Reynolds 15000, 20000 e 25000, enquanto que para Reynolds 30000 e 35000 $\frac{\dot{W}_{(0,1\%Al_2O_3 + CTAB\ 500ppm)}}{\dot{W}_{\text{água}}} > 1$. Para o nanofluido de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 700 ppm a relação foi de $\frac{\dot{W}_{(0,1\%Al_2O_3 + CTAB\ 700ppm)}}{\dot{W}_{\text{água}}} < 1$ apenas para valor de Reynolds 15000, enquanto que para os demais valores de Reynolds, até 35000, essa relação foi $\frac{\dot{W}_{(0,1\%Al_2O_3 + CTAB\ 700ppm)}}{\dot{W}_{\text{água}}} > 1$. O nanofluido de 0,2% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm essa relação foi de $\frac{\dot{W}_{(0,2\%Al_2O_3 + CTAB\ 500ppm)}}{\dot{W}_{\text{água}}} < 1$ para valores de Reynolds 15000 e 20000, enquanto que para Reynolds 25000, 30000 e 35000 $\frac{\dot{W}_{(0,2\%Al_2O_3 + CTAB\ 500ppm)}}{\dot{W}_{\text{água}}} > 1$.

Como já mencionado em capítulos anteriores, o nanofluido de 0,1% de Al_2O_3 com 200 ppm de CTAB e o nanofluido de 0,4% de Al_2O_3 com 500 ppm de CTAB não apresentaram os efeitos de redução de arrasto. Sendo assim, é possível visualizar na Figura 37 que o nanofluido com 0,1% em massa de Al_2O_3 com 200 ppm de CTAB apresentou desempenho termo-hidráulico similar ao nanofluido com 0,1% em massa de Al_2O_3 . Isso apenas evidencia as observações passadas, que a concentração de 200 ppm de CTAB não foi suficiente para a formação das micelas gigantes. Já o nanofluido com 0,4% em massa de Al_2O_3 e 500 ppm de CTAB apresentou um desempenho termo-hidráulico inferior ao nanofluido com 0,4% em massa de Al_2O_3 sem surfactante. Pois, apesar de apresentar praticamente a mesma potência de bombeamento

relativa, apresentou uma menor capacidade convectiva. Isso pode estar relacionado ao fato de que a adição de grandes quantidades de CTAB possa interferir negativamente nas propriedades térmicas.

Conforme sugerido por Hoffmann (2014), fica evidente que a comparação termo-hidráulica, no mesmo valor de Reynolds, permite analisar o ganho convectivo, mas inviabiliza uma análise conclusiva no que tange a potência de bombeamento. Na Equação 28 é possível verificar que nos mesmos valores de Reynolds todas as variáveis da equação serão alteradas, não sendo possível estabelecer um critério de análise. Por isso, no capítulo 5.7, é realizada uma análise mantendo-se a vazão volumétrica (\dot{V}) constante, permitindo assim uma melhor análise desse comportamento termo-hidráulico.

5.6. Comparação dos dados experimentais dos nanofluidos com surfactante (NF + CTAB) em relação as suas respectivas soluções DR.

De acordo com os resultados experimentais já apresentados foi possível verificar que a adição de nanopartículas de Al_2O_3 possui forte influência no efeito DR e HTR em relação as soluções redutoras de arrasto com a mesma concentração de surfactante, sendo essa influência maior no segundo efeito do que no primeiro. Até o presente momento, todo o estudo foi realizado utilizando-se o fluido base ou o solvente (água deionizada) como comparativo. Entretanto, afim de avaliar quantitativamente a influência do nanofluido em soluções redutora de arrasto, a Figura 38 apresenta um comparativo dos efeitos de redução de arrasto e do coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido com surfactante em relação a sua respectiva solução redutora de arrasto de mesma concentração do surfactante CTAB.

Na Figura 38 é possível observar que a adição de 0,1% em massa de Al_2O_3 influenciou de maneira similar nos efeitos de redução de arrasto e h_{rel} nas soluções com as mesmas concentrações do surfactante. Os nanofluidos de 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm e 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 700 ppm apresentaram uma singela redução do efeito de DR em relação as soluções DR de 500ppm e 700ppm, respectivamente. Entretanto, o ganho do coeficiente convectivo aumentou de maneira bem mais significativa. Para o nanofluido de 0,2% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm, foi possível perceber que o aumento da concentração de Al_2O_3 , de 0,1% para 0,2% em massa, proporcionou uma maior penalidade do efeito de redução de arrasto. Entretanto, o ganho do coeficiente convectivo foi maior do que nos casos anteriores, isto é, em relação a solução de 500 ppm de CTAB o nanofluido com maior concentração de nanopartículas apresentou menor efeito de de redução de arrasto e maior efeito do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção. A Tabela 10 demonstra os valores médios em cada número de Reynolds entre a relação da %DR e h_{rel} das comparações apresentadas na Figura 38.

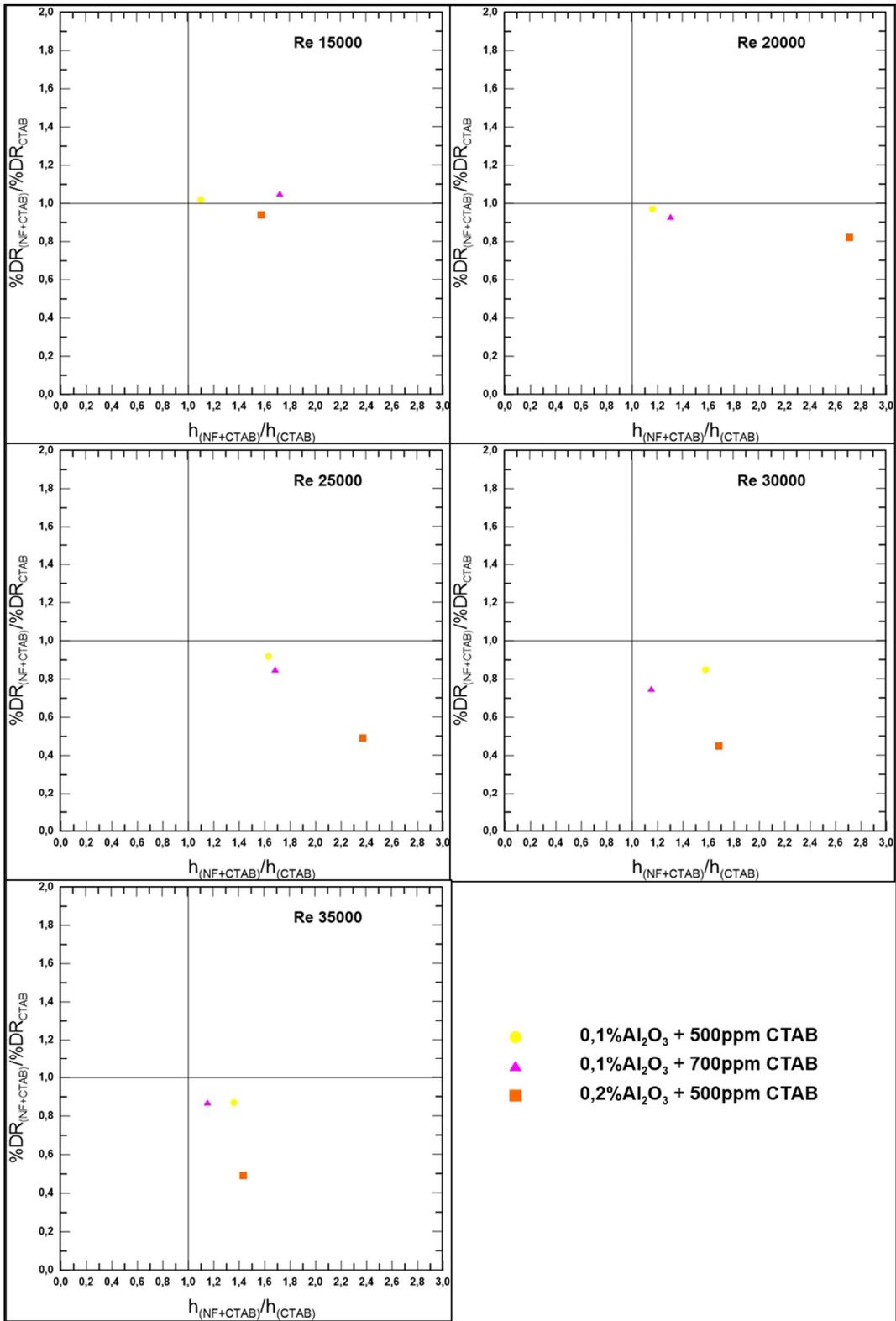


Figura 38 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção para os nanofluidos redutores de arrasto no mesmo valor de Reynolds.

Tabela 10 - Dados experimentais do comportamento do efeito DR e do h_{rel} para nanofluidos com surfactante em relação as suas respectivas soluções DR.

Re	0,1% Al_2O_3 + CTAB 500 ppm	
	CTAB 500 ppm	
	$\frac{\%DR_{(NF+CTAB)}}{\%DR_{CTAB}}$	$\frac{h_{(NF+CTAB)}}{h_{CTAB}}$
15000	1,02	1,10
20000	0,97	1,16
25000	0,92	1,63
30000	0,85	1,58
35000	0,87	1,36
	0,1% Al_2O_3 + CTAB 700 ppm	
	CTAB 700 ppm	
	$\frac{\%DR_{(NF+CTAB)}}{\%DR_{CTAB}}$	$\frac{h_{(NF+CTAB)}}{h_{CTAB}}$
15000	1,05	1,72
20000	0,93	1,30
25000	0,85	1,68
30000	0,75	1,15
35000	0,87	1,15
	0,2% Al_2O_3 + CTAB 500 ppm	
	CTAB 500 ppm	
	$\frac{\%DR_{(NF+CTAB)}}{\%DR_{CTAB}}$	$\frac{h_{(NF+CTAB)}}{h_{CTAB}}$
15000	0,94	1,57
20000	0,82	2,71
25000	0,49	2,37
30000	0,45	1,68
35000	0,49	1,43

5.7. Comparação do comportamento termo-hidráulico nas mesmas vazões.

No capítulo 5.5 foi avaliado a potência hidráulica em relação ao coeficiente de transferência de calor por convecção relativo, para as amostras, e no mesmo número de Reynolds. Foi possível observar que em algumas situações a potência necessária para vencer a perda de carga no trecho da STP foi maior em relação a água deionizada. Isso pode ter ocorrido devido a vazão do fluido em estudo sofrer grandes variações em relação ao fluido base quando efeitos de redução de arrasto são introduzidos no escoamento. A potência da bomba também pode ter sido um fator de grande influência, tendo em vista que o controle de vazão foi realizado por um inversor de frequência, alterando assim a eficiência e a energia entregue ao fluido. Dessa maneira, a comparação da potência hidráulica faria mais sentido se comparados na mesma potência mecânica da bomba ou na mesma vazão de escoamento. Como não foi possível manter a mesma potência mecânica da bomba, foram realizados experimentos, afim de complementar

esse estudo, para três vazões diferentes, nos fluidos que proporcionaram o efeito de redução de arrasto e para o nanofluido de 0,4% em massa de Al_2O_3 .

Na Figura 39, os ensaios foram realizados a uma vazão de $0,4414 \text{ m}^3/\text{h}$, os nanofluidos com surfactantes, 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 500 ppm e 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 700 ppm, e suas respectivas soluções redutora de arrasto, 500 ppm e 700 ppm de CTAB, apresentaram uma economia do consumo de energia em torno de 70% em relação ao fluido base ou solvente (água deionizada). Entretanto, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi muito prejudicado, reduzindo a capacidade de transferência de calor convectiva em torno de 85%. Para a solução com 200 ppm de CTAB ocorreu uma economia no consumo de energia não tão alto quanto dos fluidos anteriores e o coeficiente de transferência de calor convectivo foi reduzido em torno de aproximadamente 20%. Para o nanofluido, sem surfactante, com concentração de 0,4% em massa de Al_2O_3 foi percebido um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção em torno de 35% sem aumento significativo na potência hidráulica.

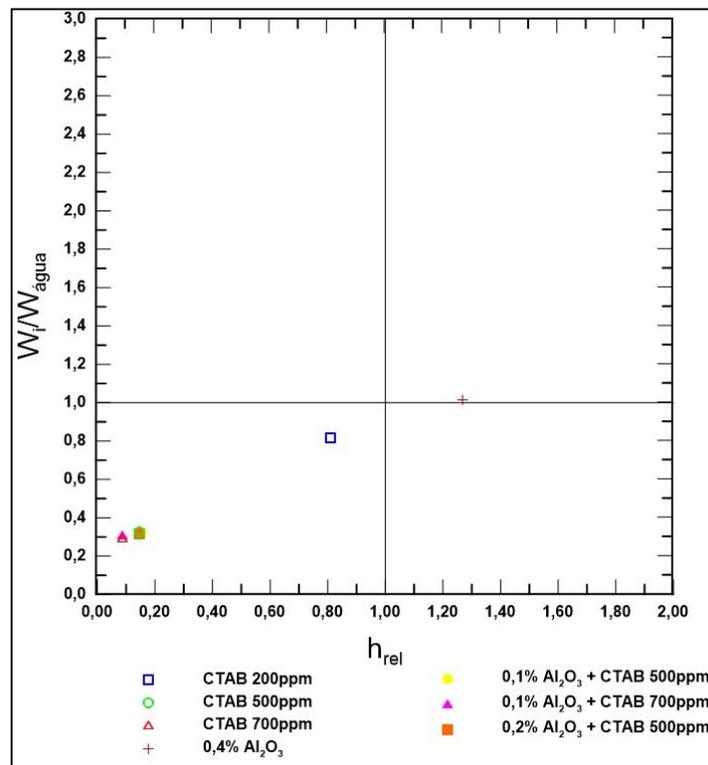


Figura 39 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo para vazão de $0,4414 \text{ m}^3/\text{h}$.

Na Figura 40, os experimentos foram realizados a uma vazão de $0,5518 \text{ m}^3/\text{h}$. É possível perceber que a solução com 700 ppm de CTAB e o nanofluido com surfactante, 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 700 ppm, apresentaram comportamento similar sem mudanças significativas em relação a vazão de $0,4414 \text{ m}^3/\text{h}$. já para a solução de 500 ppm de CTAB é possível avaliar a influência da concentração do nanofluido, no qual o coeficiente de transferência de calor por

convecção aumentou com a adição das nanopartículas sem prejudicar muito o efeito de redução de arrasto. A solução de CTAB 200 ppm aumentou singelamente, em relação a vazão anterior, tanto para a potência hidráulica quanto para o coeficiente de transferência de calor. O nanofluido com 0,4% em massa de Al_2O_3 apresentou um aumento no coeficiente de transferência de calor por convecção sem penalidades na potência de bombeamento.

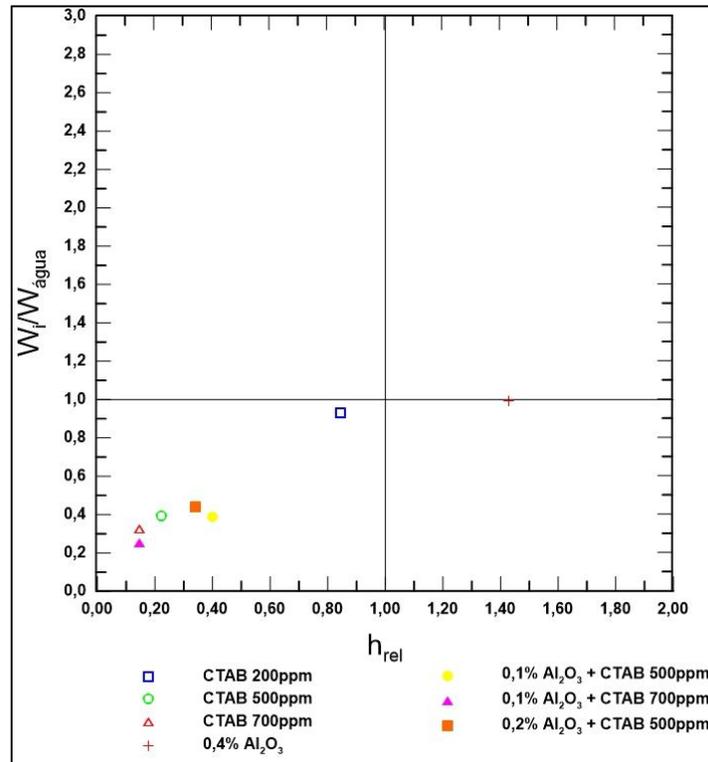


Figura 40 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo para vazão de $0,5518 \text{ m}^3/\text{h}$.

Na Figura 41, os ensaios foram realizados a uma vazão de $0,6622 \text{ m}^3/\text{h}$. Pode-se concluir que para as três vazões já apresentadas, a solução de 700 ppm de CTAB e seu respectivo nanofluido, 0,1% em massa de Al_2O_3 com CTAB 700 ppm, apresentaram comportamento semelhante, variando muito pouco os efeitos tanto do consumo da potência hidráulica quanto do coeficiente de transferência de calor, essa situação apresentada se deve ao fato da alta concentração do surfactante. Para a solução DR com 500 ppm de CTAB ficou mais evidente o efeito da adição das nanopartículas, fazendo com que o aumento da concentração do nanofluido na solução com 500 ppm de CTAB proporcione o aumento do consumo de energia e do coeficiente de transferência de calor por convecção. Já para o nanofluido, sem surfactante, de 0,4% em massa de Al_2O_3 ficou claro que o aumento vazão, na faixa avaliada, apresentou um aumento significativo do coeficiente de transferência de calor com pouco aumento do consumo de energia.

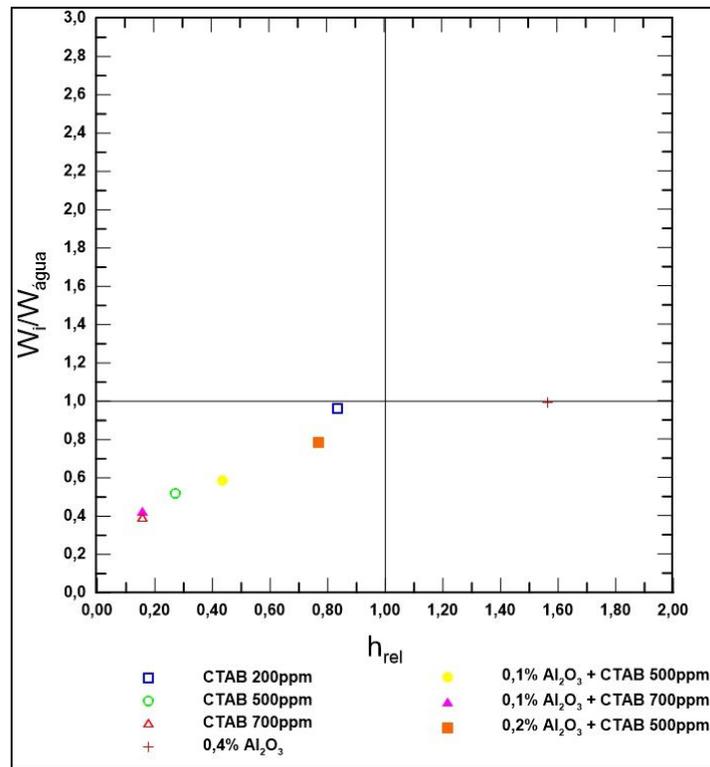


Figura 41 - Dados experimentais da redução de arrasto em função do coeficiente de transferência de calor por convecção relativo para vazão de $0,6622 \text{ m}^3/\text{h}$.

A Tabela 11 apresenta de maneira resumida os valores dos números de Reynolds para os dados experimentais, na mesma vazão, do comportamento relacionado a %DR e ao coeficiente de transferência de calor por convecção. É possível verificar para a menor vazão estudada, a adição das nanopartículas não influenciou de maneira significativa em nenhum dos dois parâmetros avaliados. Entretanto, a influência da concentração de surfactante CTAB é evidente em todas as vazões estudadas, pois, o aumento da concentração do mesmo aumentou em todos os casos a %DR e reduziu a capacidade de transferência de calor por convecção. Na maior vazão estudada, a adição das nanopartículas mostrou-se mais significativa, proporcionando um aumento do coeficiente de transferência de calor.

Tabela 11 – dados experimentais da %DR e do coeficiente de transferência de calor por convecção para os diferentes fluidos nas mesmas vazões.

Fluido	Vazão					
	0,4414 m ³ /h		0,5518 m ³ /h		0,6622 m ³ /h	
CTAB 200 ppm	Re - 22898		Re - 28623		Re - 34348	
	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}
	20%	0,81	9%	0,84	6%	0,84
CTAB 500 ppm	Re - 18685		Re - 23357		Re - 28028	
	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}
	70%	0,15	63%	0,23	51%	0,27
CTAB 700 ppm	Re - 17004		Re - 21255		Re - 25506	
	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}
	73%	0,09	70%	0,15	64%	0,16
0,1% Al ₂ O ₃ + CTAB 500 ppm	Re - 18107		Re - 22633		Re - 27160	
	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}
	70%	0,15	63%	0,40	45%	0,43
0,1% Al ₂ O ₃ + CTAB 700 ppm	Re - 15360		Re - 19200		Re - 23040	
	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}
	72%	0,09	78%	0,15	62%	0,16
0,2% Al ₂ O ₃ + CTAB 500 ppm	Re - 17828		Re - 22285		Re - 26742	
	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}	%DR	h_{rel}
	70%	0,15	59%	0,35	29%	0,75

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As investigações experimentais desse estudo foram realizadas em escoamentos turbulentos e completamente desenvolvido para avaliar o fator de atrito e o coeficiente de transferência de calor em soluções com surfactante CTAB e em nanofluidos de Al_2O_3 -água com e sem adição do surfactante CTAB. Os experimentos foram conduzidos nos mesmos valores de Reynolds, a faixa de Reynolds variou de 15000 a 35000. Além do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor, foram avaliadas a redução de arrasto e a potência hidráulica para vencer a perda de carga no trecho da STP. Para uma melhor avaliação da potência hidráulica foram comparadas algumas condições onde os experimentos foram conduzidos na mesma vazão. Em todas as concentrações do surfactante CTAB foi adicionado NaSal na proporção de 1:2 molar.

Os nanofluidos de Al_2O_3 -água apresentaram um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção com o aumento da concentração, sendo que, para a concentração de 0,1% em massa esse aumento chegou a 27% e para a concentração de 0,4% em massa esse ganho foi de até 44% (Figura 32 e Tabela 8). O fator de atrito apresentou comportamento semelhante a do fluido base. (Figura 25). A potência de bombeamento para vencer a perda de carga apresentou um ligeiro aumento de 5% e 7% para as concentrações de nanopartículas de 0,1% e 0,4% em massa, respectivamente (Figura 37).

Todas as soluções DR apresentaram um comportamento característico, em que o aumento da concentração do surfactante reduziu o fator de atrito e conseqüentemente aumentou o efeito de redução de arrasto (Figura 26 e Figura 27). Como os efeitos de redução de arrasto proporcionam uma redução dos efeitos da turbulência o coeficiente de transferência de calor acompanhou esse efeito, isto é, o aumento da concentração do surfactante reduziu o coeficiente de transferência de calor (Figura 33). Para as soluções com surfactante o efeito da redução do coeficiente de transferência de calor foi sempre maior do que o efeito da redução de arrasto (Figura 36).

Nos casos que ocorreram redução de arrasto, os nanofluidos de Al_2O_3 -água-CTAB apresentaram maior coeficiente de transferência de calor em relação a sua respectiva solução redutora de arrasto e o aumento da concentração de nanopartículas aumentou esse coeficiente convectivo (Figura 38). Entretanto, em relação ao fluido base, não houve ganho do coeficiente de transferência de calor por convecção (Figura 34 e Figura 35). Apesar das nanopartículas aumentarem o coeficiente de transferência de calor por convecção, ficou claro que, a interação entre as nanopartículas e o surfactante interferem dificultando a formação das micelas cilíndricas, gigantes, e conseqüentemente reduziram os efeitos de redução de arrasto (Figura 29 e Figura 31).

As considerações supracitadas neste capítulo foram feitas com base nos mesmos valores de Reynolds. Sendo assim, a comparação da Potência de bombeamento para vencer a perda de carga pode ser feita de outra maneira, pois, a potência fornecida pela bomba e a vazão serão sempre diferentes. Devido a esse fator, foram realizados experimentos na mesma vazão afim de analisar essa potência de bombeamento. Com essa análise, foi possível verificar que, na mesma vazão, a adição do surfactante proporcionou uma maior economia de potência de bombamento nas soluções redutoras de arrasto do que nos nanofluidos com surfactante. Sendo que este último também obteve uma redução do consumo dessa potência em relação ao fluido base.

Com os resultados experimentais obtidos nesse trabalho, foi possível verificar que a utilização de nanofluidos de Al_2O_3 tem a capacidade de aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção penalizando muito pouco a potência de bombeamento. As soluções de surfactante CTAB proporcionam altas taxas de redução de arrasto, reduzindo essa capacidade após valores críticos de Reynolds, e baixa eficiência para transferência de calor. Foi verificado ainda que a adição das nanopartículas nas soluções redutoras de arrasto proporcionaram um aumento do coeficiente convectivo em relação a solução com surfactante. Entretanto, nos mesmo valor de Reynolds o fluido base apresentou maior capacidade de troca térmica do que os nanofluidos com surfactante que apresentaram redução de arrasto.

No que tange os aspectos relacionados a economia de energia e com base nas considerações realizadas até o momento, é possível afirmar que o surfactante CTAB pode apresentar uma considerável economia de energia no transporte do fluido e uma baixa capacidade de troca térmica, enquanto que, os nanofluidos apresentam uma alta eficiência na troca térmica com pouca penalidade no consumo de energia desse transporte. Uma aplicação conjunta, objetivando os efeitos sinérgicos positivos entre nanofluidos (para aumento da transferência de calor) e surfactante (para aumento da economia de energia no transporte do fluido) talvez possa ser atingida utilizando-se técnicas para a quebra das micelas cilíndricas localmente, ao longo do trocador de calor, cessando o efeito de redução de arrasto e aumentando a transferência de calor, permitindo o rearranjo dessas micelas gigantes após o trocador de calor. Essas quebras das micelas podem ser realizadas através do aumento da temperatura ou das tensões do escoamento (adição de uma bomba na entrada do trocador de calor ou redução do diâmetro, por exemplo).

Como sugestões de trabalhos futuros, que possam agregar aos resultados apresentados, pode-se destacar o estudo da influência da temperatura na formação das micelas gigantes, ou seja, determinar a temperatura crítica no qual as micelas gigantes são termodinamicamente instáveis. Outra análise experimental importante poderia estar relacionada em avaliar o efeito de redução do diâmetro (estrangulamento), em que o efeito de redução de arrasto cessaria. A intenção dessas análises, está relacionada na utilização conjunta do surfactante (como redutor de arrasto) com o nanofluido, entretanto, visando avaliar as vantagens de se amplificar cada efeito separadamente, já que neste trabalho foi avaliado as análises desses efeitos foram feitas em conjunto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AGUILAR, Guillermo; GASLJEVIC, Kazimir; MATTHYS, Eric F. Asymptotes of maximum friction and heat transfer reductions for drag-reducing surfactant solutions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 44, n. 15, p. 2835–2843, 2001.

ALASHKAR, Adnan; GADALLA, Mohamed. Thermo-economic analysis of an integrated solar power generation system using nanofluids. **Applied Energy**, v. 191, p. 469–491, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.084>>.

ANDRADE, RAFHAEL MILANEZI DE. Análise experimental da redução de arrasto em soluções com polímeros rígidos e flexíveis em uma geometria rotativa desde os primeiros instantes do escoamento turbulento: efeitos de número de reynolds, concentração, massa molecular, temperatura e salinidade. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO** (2013).

AZEVEDO, Valerio Fernandes et al. Caracterização De Nanofluidos Para Utilização Em Compressores De Refrigeração: Determinação Da Viscosidade Dinâmica, Condutividade Térmica E Estabilidade. **Holos**, v. 8, p. 36, 2017.

BEWERSDORFF, H. W.; OHLENDORF, D. The behaviour of drag-reducing cationic surfactant solutions. **Colloid & Polymer Science**, v. 266, n. 10, p. 941–953, 1988.

CAI, Shu Peng. Drag reduction of a cationic surfactant solution and its shear stress relaxation. **Journal of Hydrodynamics**, v. 24, n. 2, p. 202–206, 2012. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058\(11\)60235-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058(11)60235-7)>.

CHON, Chan Hee et al. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. **Applied Physics Letters**, v. 87, n. 15, p. 1–3, 2005.

DAS, Sarit K. et al. **Nanofluids Science and Technology**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

DAS, Pritam Kumar et al. Experimental investigation of thermophysical properties of Al₂O₃–water nanofluid: Role of surfactants. **Journal of Molecular Liquids**, v. 237, p. 304–312, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.099>>.

DAS, Sarit Kumar et al. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 4, p. 567, 2003. Disponível em: <<http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1446542>>.

DEY, Debashis; KUMAR, Pankaj; SAMANTARAY, Sikata. A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 46, n. 8, p. 1413–1442, 2017.

ELIAS, M M et al. Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al₂O₃ nanoparticles suspended in car radiator coolant ☆. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 48–53, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.03.005>>.

GASLJEVIC, K.; MATTHYS, E F. Experimental Investigation of Thermal and Hydrodynamic Development Regions for Drag- Reducing Surfactant Solutions. **Heat Transfer**, v. 119, n. February 1997, 1997.

GHADIMI, A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, H.S.C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 17–18, p. 4051–4068, ago. 2011. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931011002304>>.

HAMILTON, R. L. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.

HOFFMANN, ANTONIO REMI KIELING. **Análise Experimental do Desepenho Termo-hidráulico de Nanofluidos de Nanotubos de Carbono em Escoamento Monofásico**. 2014. 245 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2014.

HUNG, Yi Hsuan; TENG, Tun Ping; LIN, Bo Gu. Evaluation of the thermal performance of a heat pipe using alumina nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 44, p. 504–511, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.08.012>>.

HWANG, Yujin et al. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. **Powder Technology**, v. 186, n. 2, p. 145–153, 2008.

KAYHANI, M.H. et al. Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube. **Micro & Nano Letters**, v. 7, n. 3, p. 223, 2012.

JCGM - JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, [s.l.], 1st ed., 2008. 120 p.

KHAIRUL, M. A. et al. Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 98, p. 778–787, 2016.

LEE, Ji Hwan et al. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 11–12, p. 2651–2656, 2008.

LEE, S. et al. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. **Journal of Heat Transfer**, v. 121, n. 2, p. 280, 1999. Disponível em: <<http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1443631>>.

LI, Feng-chen et al. Thermochemical Acta Experimental study on the characteristics of thermal conductivity and shear viscosity of viscoelastic-fluid-based nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes. **Thermochemical Acta**, v. 556, p. 47–53, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2013.01.023>>.

LI, Feng-Chen et al. **Turbulent drag reduction by surfactant additives**. 1^a ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012. Disponível em: <www.wiley.com>.

LIU, Min Sheng et al. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 17–18, p. 3028–3033, 2006.

LIU, Zhen-hua; LIAO, Liang. International Journal of Thermal Sciences Forced convective flow and heat transfer characteristics of aqueous drag-reducing fluid with carbon nanotubes added. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 12, p. 2331–2338, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.08.001>>.

LOTFIZADEHDEHKORDI, B. et al. Investigation of viscosity and thermal conductivity of alumina nanofluids with addition of SDBS. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 49, n. 8, p. 1109–1115, 2013.

LUMLEY, J L. Drag Reduction by Additives. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 1, n. 1, p. 367–384, 1969.

MA, Ning; WANG, Jianfeng; WEI, Jinjia. (2011) - Ning Ma - Combined Effects of Temperature and Reynolds Number on Heat Transfer Characteristics of a Cationic Surfactant Solution.pdf. **Advances in Mechanical Engineering**, p. 8, 2011.

MASUDA, Hidetoshi et al. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles. **Netsu Bussei**, v. 7, n. 4, p. 227–233, 1993.

MICHAELIDES, Efstathios E. **Nanofluidics**. Cham: Springer International Publishing, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-05621-0>>.

MICHEL LUIZ COSTALONGA. Redução de arrasto por adição de polímeros em escoamentos turbulentos em espaços anulares. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO** (2017).

MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 1, n. 1, p. 3-17, January 1988. ISSN 0894-1777.

MUKHERJEE, Sayantan; MISHRA, Purna Chandra; CHAUDHURI, Paritosh. Stability of Heat Transfer Nanofluids - A Review. **ChemBioEng Reviews**, v. 5, n. 5, p. 312–333, 2018.

MWESIGYE, Aggrey; MEYER, Josua P. Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios. **Applied Energy**, v. 193, p. 393–413, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.064>>.

MYSKA, Jiri; ZAKIN, Jacques L. Differences in the Flow Behaviors of Polymeric and Cationic Surfactant Drag-Reducing Additives. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 36, n. 12, p. 5483–5487, 1997.

NARAKI, M et al. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO / water nanofluids in a car radiator. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 66, p. 82–90, 2013.

PAK, Bock Choon; YOUNG, &; CHO, I. Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES. **Experimental Heat Transfer**, n. January 2013, p. 37–41, 2007.

PEYGHAMBARZADEH, S.M.; HASHEMABADI, S.H.; HOSEINI, S.M.; et al. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 9, p. 1283–1290, nov. 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S073519331100159X>>.

PEYGHAMBARZADEH, S.M.; HASHEMABADI, S.H.; JAMNANI, M. Seifi; et al. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃/water nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 10, p. 1833–1838, jul. 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431111001104>>.

PORTER, M. R. **Handb. Surfactants**. 1^a ed. Boston, MA: Springer US, 1991. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-1293-3>>.

QI, Cong et al. Experimental Study on Boiling Heat Transfer of α -Al₂O₃-Water Nanofluid. **Nanoscience and Nanotechnology Letters**, v. 5, n. 8, p. 895–901, 2013.

QI, Yunying et al. Enhanced heat transfer of drag reducing surfactant solutions with fluted tube-in-tube heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 44, n. 8, p. 1495–1505, abr. 2001. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001793100002039>>.

_____. Enhancing heat transfer ability of drag reducing surfactant solutions with static mixers and honeycombs. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 26, p. 5161–5173, dez. 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931003002217>>.

RAEI, Behrouz; PEYGHAMBARZADEH, S.M.; SALEHI ASL, R. (2018) - Behrouz Raei - Experimental investigation on heat transfer and flow resistance of dragreducing alumina nanofluid in a fin-and-tube heat exchanger.pdf. **Applied Thermal Engineering**, v. 144, 2018.

RINALDI, Roberto et al. Síntese de biodiesel: Uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1374–1380, 2007.

RODRIGUES, Roberta K.; DA SILVA, Marcelo A.; SABADINI, Edvaldo. Worm-like micelles of CTAB and sodium salicylate under turbulent flow. **Langmuir**, v. 24, n. 24, p. 13875–13879, 2008.

ROSEN, Milton J. **Surfactants and interfacial phenomena**. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. v. 40.

RUSSEL, W. B.; SAVILLE, D. A.; SCHOWALTER, W. R. **Colloidal Dispersions**. 1ª ed. New York: Cambridge University Press, 1989.

S. U. S.CHOI AND J. A. EASTMAN. **Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles**. **American Society of Mechanical Engineers**. San Francisco: ASME International mechanical Engineering Congress & Exposition. , 1995

SAHIN, Bayram et al. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of Al₂O₃-water nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 50, p. 21–28, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.04.020>>.

SAJID, Muhammad Usman; ALI, Hafiz Muhammad. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, n. December 2018, p. 556–592, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057>>.

SHARMA, K. V.; SUNDAR, L. Syam; SARMA, P. K. Estimation of heat transfer coefficient and friction factor in the transition flow with low volume concentration of Al₂O₃ nanofluid flowing in a circular tube and with twisted tape insert. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 36, n. 5, p. 503–507, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.02.011>>.

SILBERMAN, E. THE EFFECT OF DRAG-REDUCING ADDITIVES ON FLUID FLOWS AND THEIR INDUSTRIAL APPLICATIONS PART 1 : BASIC ASPECTS. **Journal of Hydraulic Research**, n. October 2014, 1983. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00221688309499452>>.

SINGH, Pawan K et al. Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 42, p. 174–186, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.05.004>>.

SUN, Bin; ZHANG, Zhimin; YANG, Di. International Journal of Heat and Mass Transfer Improved heat transfer and flow resistance achieved with drag reducing Cu nanofluids in the horizontal tube and built-in twisted belt tubes. **HEAT AND MASS TRANSFER**, v. 95, p. 69–82, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.076>>.

SUNDAR, L. Syam; SHARMA, K. V. Heat transfer enhancements of low volume concentration Al₂O₃ nanofluid and with longitudinal strip inserts in a circular tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 19–20, p. 4280–4286, 2010. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.056>>.

TORII, Shuichi. Turbulent heat transfer behavior of nanofluid in a circular tube heated under constant heat flux. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2010, 2010.

VASCONCELOS, Adriano Akel et al. Experimental evaluation of SWCNT-water nanofluid as a secondary fluid in a refrigeration system. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 1487–1492, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.126>>.

VIRK, P S. Turbulent kinetic energy profile during drag reduction. **Physics of Fluids**, v. 18, n. 4, p. 415–419, 1975.

WANG, Bu Xuan et al. On the specific heat capacity of CuO nanofluid. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2010, 2010.

WANG, Ping-Yang; WANG, Xue-Jiao; LIU, Zhen-Hua. Flow drag and heat transfer characteristics of drag-reducing nanofluids with CuO nanoparticles. **Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 2, p. 377–385, 9 fev. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00231-016-1787-4>>.

WANG, Xian ju; ZHU, Dong sheng; YANG, Shuo. Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. **Chemical Physics Letters**, v. 470, n. 1–3, p. 107–111, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2009.01.035>>.

WANG, Xiang Qi; MUJUMDAR, Arun S. **A review on nanofluids - Part II: Experiments and applications**. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 470, n. 1–3, p. 107–111, 2008

WANG, Yi et al. Review on drag reduction and its heat transfer by additives. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2011, 2011.

WARHOLIC, M D; MASSAH, H; HANRATTY, T J. Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing. **Experiments in Fluids**, v. 27, n. 5, p. 461–472, 1999.

WARHOLIC, Michael D.; SCHMIDT, Gavin M.; HANRATTY, Thomas J. The influence of a drag-reducing surfactant on a turbulent velocity field. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 388, p. 1–20, 1999.

WILLIAMS, Wesley; BUOGIORNO, Jacopo; HU, Lin Wen. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes. **Journal of Heat Transfer**, v. 130, p 1-7, 2008. Disponível em: <[https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/search-results?page=1&q=Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina%2Fwater and zirconia%2Fwater nanoparticle colloids \(nanofluids\) in horizontal tube&fl](https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/search-results?page=1&q=Experimental%20investigation%20of%20turbulent%20convective%20heat%20transfer%20and%20pressure%20loss%20of%20alumina%20water%20and%20zirconia%20water%20nanoparticle%20colloids%20in%20horizontal%20tubes&fl)>.

XIE, Huaqing et al. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 7, p. 4568–4572, 2002.

XUAN, Yimin; LI, Qiang. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 1, p. 151, 2003. Disponível em: <<http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1446264>>.

XUAN, Yimin; ROETZEL, Wilfried. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 19, p. 3701–3707, 2000.

YANG, Juan-cheng et al. International Journal of Heat and Mass Transfer Experimental investigation on the thermal conductivity and shear viscosity of viscoelastic-fluid-based nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 11–12, p. 3160–3166,

2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.052>>.

YANG, Juan-Cheng et al. Experimental study on the characteristics of heat transfer and flow resistance in turbulent pipe flows of viscoelastic-fluid-based Cu nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 62, n. 1, p. 303–313, jul. 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931013001993>>.

YOUSEFI, Tooraj et al. An experimental investigation on the effect of Al₂O₃–H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. **Renewable Energy**, v. 39, n. 1, p. 293–298, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148111005180>>.

YU, Wei; XIE, Huaqing. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, 2012.

ZAKIN, Jacques L.; LU, Bin; BEWERSDORFF, Hans Werner. Surfactant Drag Reduction. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 14, n. 4–5, p. 253–320, 1998.

ZEINALI HERIS, S.; NASR ESFAHANY, M.; ETEMAD, S. Gh. Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 28, n. 2, p. 203–210, 2007.

ZHU, Haitao; ZHANG, Canying; TANG, Yaming. Preparation and thermal conductivity of suspensions of graphite nanoparticles. v. 45, p. 226–228, 2007.

8. APÊNDICE A

8.1. ANÁLISE DE INCERTEZAS

A incerteza dos dados experimentais pode resultar da medição de erros dos parâmetros utilizados. No caso deste trabalho, essa incerteza destina-se em verificar a confiabilidade dos resultados da medição do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor por convecção da bancada experimental. Para o cálculo das incertezas foram utilizadas as especificações dos equipamentos, certificados de calibração, dados de medições anteriores e experiência quanto ao comportamento dos materiais e instrumentos (JCGM, 2008).

De acordo com Santos (2019), o fator de atrito é função do diâmetro do tubo, diferença de pressão, massa específica, vazão e distância entre os transdutores. Em geral, um resultado medido, dado por Y , pode ser expresso pela Equação 29, em que y é o valor real e I é denominado incerteza expandida. A incerteza expandida relativa ao fator de atrito pode ser encontrada através da equação 30 (COLEMAN, STEELE, 2009):

$$Y = y \pm I \quad 29$$

$$\frac{I_f^2}{f^2} = \left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D}\right)^2 \left(\frac{I_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{I_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho}\right)^2 \left(\frac{I_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\dot{V}}{f} \frac{\partial f}{\partial \dot{V}}\right)^2 \left(\frac{I_{\dot{V}}}{\dot{V}}\right)^2 + \left(\frac{l}{f} \frac{\partial f}{\partial l}\right)^2 \left(\frac{I_l}{l}\right)^2 \quad 30$$

A incerteza expandida de cada parâmetro (I_D , $I_{\Delta P}$, I_ρ , $I_{\dot{V}}$ e I_l) é dada pela Equação 31:

$$I = k X i(y) \quad 31$$

Em que k é o fator de abrangência e $i(y)$ é a incerteza padrão combinada de cada parâmetro. Resolvendo os termos de derivada parcial da Equação 30 e substituindo os termos de incertezas expandidas de cada parâmetro pela equação 31, tem-se:

$$\frac{I_f}{f} = k \left[25 \left(\frac{i_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{i_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{i_\rho}{\rho}\right)^2 + 4 \left(\frac{i_{\dot{V}}}{\dot{V}}\right)^2 + \left(\frac{i_l}{l}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad 32$$

Os termos I_D , $I_{\Delta P}$, I_ρ , $I_{\dot{V}}$ e I_l são as incertezas padrão combinadas dos parâmetros diâmetro, queda de pressão, massa específica, vazão e distância entre os transdutores de pressão, respectivamente. Cada termo é encontrado ou calculado de acordo com as especificações técnicas dos instrumentos de medição adequados para cada parâmetro. Por exemplo, a incerteza padrão relativa do diâmetro, $\frac{i_D}{D}$, é calculada pela incerteza do paquímetro, que é de

0,01 mm, e pelo diâmetro do trecho, que é de 7,934 mm. Ao efetuar o cálculo da potência e multiplicar por 25, resulta no fator relativo ao diâmetro, de $3,97 \times 10^{-3}\%$. A incerteza padrão relativa do comprimento, $\frac{i_l}{l}$, é calculada pela incerteza da trena, dada por 0,5 mm, e pela distância média entre os transdutores, de 0,525 m. O fator relativo ao comprimento é de $9,07 \times 10^{-6}\%$. A incerteza padrão relativa da queda de pressão, $\frac{i_{\Delta p}}{\Delta p}$, a qual é dada pela especificação dos transdutores de pressão, é de aproximadamente 0,03%. Os transdutores são da fabricante *Warmer*, modelo WTP-4010. Assim, o fator relativo à queda de pressão fica $9 \times 10^{-6}\%$. A incerteza padrão relativa da vazão, $\frac{i_{\dot{V}}}{\dot{V}}$, é dada pela média do erro relativo apresentado na Tabela 7, sendo de aproximadamente 1,12%. O fator relativo à vazão resulta em $5 \times 10^{-2}\%$. A incerteza padrão da densidade, $\frac{i_{\rho}}{\rho}$, picnômetro, é de aproximadamente 0,1%. O fator relativo à massa específica é de $1 \times 10^{-4}\%$. Logo, as incertezas das características físicas da bancada, como diâmetro e comprimento do trecho de tomada de pressão, representam cerca de $4 \times 10^{-4}\%$. Já as incertezas dos parâmetros variáveis, como queda de pressão, massa específica e vazão, totalizam cerca de $5 \times 10^{-2}\%$. Tomando uma confiabilidade de 95% ($k = 2$), o resultado da Equação 32, ou seja, a incerteza expandida relativa ao fator de atrito, $\frac{I_f}{f}$, é de aproximadamente 4,6%.

Já para as incertezas relacionadas ao coeficiente de transferência de calor por convecção, Xuan e Roetze (2000), utilizam a Equação 33, em que $\frac{\Delta Q}{Q}$, $\frac{\Delta T}{T}$ e $\frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}}$ são as incertezas padrão do fluxo de calor, das medições de temperatura e da vazão. A precisão dos termopares é informado pelo fabricante como sendo de 0,5°C, sabendo que a temperatura média dos ensaios foi de 28°C, o termo quadrático da incerteza padrão da temperatura, $\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2$, foi de $3,18 \times 10^{-2}\%$. O termo $\frac{\Delta Q}{Q}$ surge da leitura da potência elétrica fornecida, bem como da perda de calor do sistema experimental para o ambiente. Para todos os ensaios realizados o fluxo de calor fornecido pela fita térmica foi de 970W, e o fluxo de calor entregue ao fluido variou de 430 W para as maiores vazões até 680 W nas menores vazões. Dessa maneira, a incerteza média padrão relacionada ao fluxo de calor, $\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2$, foi de 6,6%. Sendo assim, a incerteza relacionada ao coeficiente de transferência de calor por convecção, $\frac{I_h}{h}$, é de aproximadamente 2,6%.

$$\frac{I_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}}\right)^2}$$

33