



Luis Carlos Castillo Martinez

**Determinação Experimental dos Coeficientes
de Transporte da Pasta de Gelo em Trocadores
de Calor de Placas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro, março de 2005



Luis Carlos Castillo Martinez

**Determinação Experimental dos Coeficientes
de Transporte da Pasta de Gelo em Trocadores
de Calor de Placas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

Prof. Paulo Roberto de Sousa Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio.

Rio de Janeiro, 04 de março de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luis Carlos Castillo Martinez

Graduou-se em Engenharia Naval no Depto. de Engenharia Mecânica da UNI (Universidad Nacional de Ingenieria, Lima-Perú) em 2002, participando na equipe de estudos sobre Simulação Numérica em Fluidos e Transferência de Calor. Atualmente tem continuado com a linha de pesquisa na área de Termociências, com o estudo de Troca de Calor em Sistemas com Pasta de Gelo, no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento LRA.

Ficha Catalográfica

Castillo Martinez, Luis Carlos

Determinação experimental dos coeficientes de transporte da pasta de gelo em trocadores de calor de placas / Luis Carlos Castillo Martinez; orientador: Sergio Leal Braga. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

108 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Coeficiente de troca de calor. 3. Perda de carga. 4. Pasta de gelo. 5. Mudança de fase. 6. Refrigerantes secundários. 7. Trocador de calor a placas. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

À Nosso senhor
À minha mãe Natalia e meus irmãos
pela confiança e fé, porque são o motor de tudo.

Agradecimentos

A Sergio Leal Braga meu orientador. Obrigado por sua incrível dedicação. Por seu apoio, compreensão, as forças e a amizade.

A minha mãe Natalia Martinez pela confiança. Aos meus irmãos nos quais vi uma motivação pessoal para seguir avançando. A ela, minha bendita razão e na distancia agora, por seu carinho e respeito.

Aos meus amigos, à gente que me fez sentir bem e me ajudaram a manter os pés no solo.

A toda a gente do LRA pelo apoio e a tranqüilidade durante este processo. Por seus conselhos para levar adiante este trabalho, obrigado. Em especial aos companheiros Hugo, Jose, Epifanio e Frank.

À comunidade da PUC-Rio, aos professores e funcionários do Depto. de Engenharia Mecânica, por sua hospitalidade e seu grande trabalho. Por sua disponibilidade a Rosely e Lourenço.

A todos os companheiros de profissão a os que he tido o prazer de conhecer.

À YORK do Brasil, pela cessão do gerador de pasta de gelo, sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao Prof. José Alberto dos Reis Parise pela ajuda na revisão deste texto.

À FAPERJ, ao CNPq e à PUC-Rio pelo apoio financeiro através das bolsas de estudo.

Resumo

A pasta de gelo é uma mistura de água e um aditivo, com finas partículas de gelo, apresentando uma alta densidade de energia térmica. O principal motivo de sua utilização deve-se à combinação do aproveitamento do calor latente na mudança de fase com capacidade de ser bombeado. O presente trabalho trata do estudo experimental sobre a transferência de calor e queda de pressão, com mudança de fase, utilizando uma mistura de propileno glicol– água com 13,8% de concentração em peso, num trocador de calor de placas com arranjo em U para 16 placas. Realizaram-se testes de troca de calor com escoamento em paralelo e contra-corrente, para duas condições de fração mássica de gelo e números de Reynolds para a pasta de gelo entre 150 e 425, com diferentes condições de carga térmica. Dos testes foram observados aumentos de até 25% no coeficiente global de troca calor, ao se incrementar a vazão e, conseqüentemente, o número de Reynolds da pasta de gelo. Com o aumento da fração de gelo melhora-se a capacidade de resfriamento, diminuindo o número de Nusselt da pasta de gelo. O coeficiente global de troca, porém, começa a diminuir. Na literatura esta relação ainda não está bem definida. Alguns autores relatam ganhos, perdas ou indiferença no coeficiente global. Resultados do coeficiente global e do número de Nusselt, nos modos paralelo e contra-corrente, não apresentaram grande diferença. A capacidade de resfriamento em contra-corrente foi maior, apresentando valores de efetividade cerca 10% acima dos resultados observados no modo paralelo. Os fatores de atrito encontrados variaram entre 0,030 a 0,085, o que concorda com os resultados apresentados por outros pesquisadores. Como era de se esperar, o fator de atrito diminui com o aumento da vazão mássica e de maneira inversa com o aumento da fração de gelo.

Palavras-chave

Coeficiente de troca de calor, perda de carga, pasta de gelo, mudança de fase, refrigerantes secundários, trocador de calor a placas.

Abstract

Ice slurry is an aqueous solution from which ice crystals are formed. These crystals possess high energy density, in the form of latent heat. Furthermore, the fact of being a slurry makes it an excellent energy carrier, for it can be easily pumped. The present work presents an experimental procedure to assess the heat transfer and the pressure loss, with phase change, using a mixture of propylene-glycol and water, 13.8% weight, in a U-plate heat exchanger with 16 plates. Tests were carried out for both parallel and counter-flow configurations of the heat exchanger, for two different mass fractions of ice and with Reynolds numbers between 150 and 425 for the slurry. Different thermal loads were considered. The experiments showed increases of up to 25% in the overall heat transfer coefficient when the slurry flow is increased, with consequent increase in the Reynolds number. By increasing the ice fraction the cooling capacity is improved, reducing the Nusselt number. In the literature, this relationship is not clearly defined, as some authors show gains in the heat exchange coefficient, losses, and some others did not observe any influence on this parameter. Regarding the heat exchange configuration, i.e., parallel or counter-flow, neither the heat exchange coefficient, nor the Nusselt number suffered major influence. The effectiveness is up to 10% higher for the counter-flow configuration in comparison with the parallel configuration. The figures found for the friction coefficient, between 0,030 and 0,085, are in good agreement with the literature. As expected, the friction coefficient decreases when the mass flow is increased, and increases when the ice fraction is increased.

Keywords

Heat Exchange coefficient, pressure loss, ice slurry, phase change, secondary refrigerants, plate heat exchanger.

Sumário

1 . Introdução	16
1.1. Motivação	16
1.2. Pesquisa Bibliográfica	18
1.3. Estrutura do Trabalho	21
2 . Conceitos Gerais	23
2.1. Termoacumulação	23
2.1.1. Classificação dos sistemas de termoacumulação	23
2.1.2. Modos de armazenamentos	24
2.1.3. Vantagens da Termoacumulação	26
2.2. A Pasta de Gelo	27
2.2.1. Tipos de Geração de Pasta de Gelo	29
2.2.2. Vantagens da pasta de gelo	31
2.2.3. Propriedades Termofísicas da Pasta de Gelo	32
2.3. Método do Calorímetro	36
2.4. Trocadores de calor de placas	40
2.4.1. Conceitos gerais	40
2.4.2. Configuração do Trocador	43
2.4.3. Vantagens	45
2.4.4. Desvantagens	46
3. Abordagem Experimental	47
3.1. Parâmetros estudados	47
3.2. Modelo Experimental	48
3.2.1. Seção de testes	50
3.2.2. Sistema para a pasta de gelo	53
3.2.3. Sistema de carga térmica	56
3.2.4. Sistema de Aquisição de dados	57
3.3. Procedimento experimental	58
4. Redução de dados – Modelo matemático	60
4.1. Coeficiente global de Troca de calor	60
4.2. Calor Trocado	62
4.2.1. Carga Térmica – Calor cedido	62
4.2.2. Capacidade de Resfriamento da Pasta de Gelo – Calor recebido	62
4.3. Correlações adimensionais	63
4.3.1. Escoamentos sem mudança de fase	63
4.3.2. Testes com Pasta de Gelo	66
5 . Análise dos Resultados	68
5.1. Capacidade de Resfriamento	68
5.2. Coeficiente global de troca de calor	71
5.3. Equivalente da vazão mássica no lugar de pasta de gelo	76
5.4. Efeito da Resistência térmica da placa no número de Nusselt	77
5.4.1. Testes Água–Solução sem cristais	78
5.4.2. Testes Água – Pasta de Gelo	79

5.5. Queda de Pressão e Fator de Atrito	82
5.6. Coeficiente de troca de calor, obtido pelo método da efetividade	84
5.7. Validação e Comparação de resultados	85
5.7.1. Para transferência de calor sem mudança de fase em trocadores de calor	85
5.7.2. Para trocadores de calor de placas utilizando pasta de gelo	87
6 . Conclusões e sugestões	90
Referencia Bibliográfica	94
Apêndice A. Propriedades da Água.	97
Apêndice B. Propriedades das Misturas com Propileno Glicol	98
Apêndice C. Equivalente em Água do Calorímetro.	100
Apêndice D. Cálculo da Fração de gelo	102
Apêndice E. Método da Efetividade.	104
Apêndice F. Mínimos Quadrados.	106
Apêndice G. Coeficiente de correlação R-Quadrado.	107

Lista de figuras

Figura 1 – Tanques de armazenamento térmico por estratificação	24
Figura 2 - Armazenamento térmico utilizando PCMs	25
Figura 3 – Sistema de termo acumulação com pasta de gelo	28
Figura 4 – Tipos de Geração de pasta de gelo	30
Figura 5 – Curvas típicas para uma mostra no calorímetro	37
Figura 6 – Tipos de trocadores de calor de placas	40
Figura 7 – Trocador de calor de placas	41
Figura 8 – Padrões comuns de corrugação de placas	41
Figura 9 – Uma configuração para um trocador com nove placas	43
Figura 10 – Possíveis arranjos num trocador de placas	44
Figura 11 – Esquema da bancada experimental	48
Figura 12 – Bancada de testes no laboratório	49
Figura 13 – Trocador de calor a placas da Alfa Laval	50
Figura 14 – Arranjo em Paralelo, tipo U	50
Figura 15 – Termopares nas entradas, e canais do trocador	51
Figura 16 – Transdutor de pressão diferencial	51
Figura 17 – Esquema do calorímetro e suas partes	52
Figura 18 – Conjunto agitador, resistência, e termopar	52
Figura 19 – Sistema de geração de Pasta de Gelo, da York	53
Figura 20 – Esquema do circuito de geração da pasta de gelo	54
Figura 21 – Tanque de armazenamento primário	55
Figura 22 - Inversor de frequência, e Bomba da pasta de gelo	55
Figura 23 – Potenciômetro, e Banho de temperatura da NESLAB	56
Figura 24 - Sistema de aquisição de dados, e Calorímetro	57
Figura 29 – Coeficiente global, para $m_{ag}=0,215\text{kg/s}$ e $X_g=0,11$	71
Figura 30 – Coeficiente global, para $m_{ag}=0,215\text{kg/s}$ e $X_g=0,14$	71
Figura 31 - Coeficiente global, para $m_{ag}=0,128\text{kg/s}$ e $X_g=0,14$	72
Figura 32 - Coeficiente global, para $Ti_{ag}=32,5^\circ\text{C}$ e $X_g=0,11$	72
Figura 33 - Coeficiente global de troca de calor, para $Ti_{ag}=25,0^\circ\text{C}$ e $X_g=0,11$	73
Figura 34 - Coeficiente global, para $Ti_{ag}=25,0^\circ\text{C}$ e $X_g=0,14$	73
Figura 35 - Cargas térmicas em paralelo versus contra-corrente	74
Figura 36 - Coeficiente global em função da carga térmica, para $Ti_{ag}=32,5^\circ\text{C}$	75
Figura 37 - Coeficiente global em função da carga térmica, para $Ti_{ag}=27,5^\circ\text{C}$	75
Figura 38 – Vazão mássica equivalente para $X_g=0,11$, e $Ti_{ag}=32,5^\circ\text{C}$	76
Figura 39 – Vazão mássica equivalente para $X_g=0,14$, e $Ti_{ag}=32,5^\circ\text{C}$	76
Figura 40 - Efeito no número de Nu se tivesse sido depreciada a resistência térmica da placa, para a solução sem cristais.	77
Figura 41 – Nu vs Re, para a solução.	78
Figura 42 – Nu/Pr ^c vs Re, para a solução.	78
Figura 43 - Nu vs Re da pasta de gelo, para uma vazão de água de $m_{ag}=0,215\text{kg/s}$ e $Ti_{ag}=32,5^\circ\text{C}$.	79
Figura 44 - Nu vs Re, para a pasta de gelo.	79
Figura 45 - Nu/Pr ^c versus Re para a pasta de gelo.	80
Figura 46 - Nu versus Re da pasta de gelo para $X_g=0,11$	81
Figura 48 – Queda de pressão com a vazão mássica da pasta de gelo	82
Figura 49 - Fator de atrito com a vazão mássica da pasta de gelo	82
Figura 50 - Fator de atrito versus Re, para a pasta de gelo com a fração de gelo	83

Figura 51 – Coeficiente global de troca pelo método da LMTD versus o método da efetividade	84
Figura 52 – Comparação de Nu vs Re , para escoamento sem mudança de fase	85
Figura 53 – Comparação de Nu / Pr^c vs Re , para escoamento sem mudança de fase	86
Figura 54 – (a) Capacidade de resfriamento em função do fluxo mássico; (b) Coeficiente global de troca de calor segundo a fração de gelo	87
Figura 55 – Queda de pressão em função do número de Reynolds	88
Figura 56 – (a) Capacidade de resfriamento em função da vazão mássica; (b) Coeficiente global de calor em função da vazão mássica	88
Figura 57 – Coeficiente global de troca de calor e queda de pressão em função da vazão mássica	89

Lista de símbolos

A	Área, [m ²].
b	Espessura do canal do trocador, [m].
C	Capacidade calorífica da vazão mássica, [W / °C].
C _p	Calor específico, [J / kg.K].
C _v	Concentração em volume, [-].
%C	Concentração do propileno em peso, [-].
D	Diâmetro, [m].
D _H	Diâmetro hidráulico, [m].
D _P	Diâmetro de passo de entrada nas placas, [m].
e	Espessura das placas no trocador, [m].
F	Fator de correção da temperatura meia logarítmica, [-].
g	Aceleração da gravidade, [m / s ²].
G _C	Velocidade do fluido num canal do trocador, [m / s].
G _P	Velocidade do fluido na entrada do coletor do trocador, [m / s].
h	Coeficiente de troca de calor por convecção, [W / m ² . °C].
I _m	Intensidade de corrente elétrica meia, [A].
k	Condutividade térmica, [W / m. °C].
L	Calor latente de formação do gelo, [J / kg].
L _H	Comprimento vertical de um passo no trocador de calor, [m].
m	Massa, [kg]
\dot{m}	Vazão mássica, [kg / s].
N	Número de canais por passo, [-].
N _p	Número de passos no trocador de calor, [-].
Nu	Número de Nusselt; Nu = h.D _H / k, [-].
NTU	Número de unidades de transferência de calor, [-].
P	Potência, [W].
Pr	Número de Prandtl; (Pr = μ.C _p / k), [-].
?P	Queda de pressão, [Pa].
Q	Calor trocado, [J].
\dot{Q}	Potência trocada, [W].

\dot{Q}_{gl}	Capacidade de resfriamento da pasta de gelo, [W].
R	Razão de capacidades caloríficas dos fluidos, [-].
Re	Número de Reynolds; $Re = \rho.v.D_H / \mu$, [-].
R_F	Resistência térmica por depósitos, $[W / m^2. ^\circ C]$.
t	Tempo, [s].
T	Temperatura, [$^\circ C$] ou [K].
ΔT	Diferença de temperaturas, [$^\circ C$].
ΔT_{LM}	Temperatura media logarítmica, [$^\circ C$].
u	Velocidade, [m / s].
U	Coeficiente global de troca de calor, $[W / m^2. ^\circ C]$.
v	Velocidade [m/s].
V	Volume, $[m^3]$.
V_m	Voltagem média, [V].
\dot{V}	Vazão volumétrica, $[m^3 / s]$.
w	Largura efetiva da placa para o trocador de calor, [m].
W	Vazão volumétrica do fluido, $[m^3 / s]$.
X_g	Fração de gelo, [-].

Símbolos Gregos

ε	Efetividade, [-]
f	Fator de atrito, [-]
ϕ	Fator de correção de área - área de troca de calor/área projetada da placa, [-]
ρ	Massa específica $[kg / m^3]$
μ	Viscosidade dinâmica $[Pa . s]$

Subscritos

ag	Água
fp	Fluido portador
g	Gelo
pg	Pasta de Gelo
sol	Solução aquosa de propileno glicol
eq	Equivalente
m	Meio
el	Elétrico
sen	Sensível
lat	Latente
i	Inicial
f	Final
e	Entrada
s	Saída
0	Inicial
1	Fluido 1 (Água)
2	Fluido 2
re	Recipiente do calorímetro.
ca	Conjunto agitador e resistência elétrica.
xx	Demais elementos no calorímetro.
plac	Placa.
c	Canal do trocador de calor.
tr	Trocador.
tc	Troca em contra-corrente
tp	Troca em paralelo.

*Descubrir es ver lo que todo el mundo ha visto
y pensar de ello lo que nadie ha pensado.*

Albert Szent-Gyorgyi.