



Juan José Milón Guzmán

**Estudo Experimental do Super-resfriamento da Água
em Cápsulas Cilíndricas**

Tese de doutorado

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

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro
julho de 2004.



Juan José Milón Guzmán

Estudo Experimental do Super-resfriamento da Água em Cápsulas Cilíndricas

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela comissão Examinadora abaixo assinada.

Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Paulo Roberto Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Hélcio Rangel Barreto Orlande

Departamento de Engenharia Mecânica – POLI/COPPE/UFRJ

Carlos Eduardo Reuther de Siqueira

Departamento de Engenharia Mecânica – UCP

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico-PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de julho de 2004

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

Juan José Milón Guzmán

Graduou-se em Engenharia Eletromecânica na UNSA (Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Peru) em 1998. cursou o Mestrado em Engenharia Mecânica na PUC-Rio, concluindo em setembro de 2000. Pesquisador no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento - LRA da PUC-Rio, tem desenvolvido projetos relacionados a termoacumulação em sistemas de Refrigeração e Condicionamento de Ar.

Ficha Catalográfica

Milón Guzmán, Juan José

Estudo Experimental do Super-resfriamento da Água em Cápsulas Cilíndricas

Juan José Milón Guzmán; orientador: Sergio Leal Braga. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

113 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Super-resfriamento. 3. Refrigeração. 4. Gelo dendrítico. 5. Ar condicionado. 6. Nucleação. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica.

CDD: 621

Miente quien escribe el mejor poema,
sin haberte visto, sin saber de ti.
Es tan sólo cuento, vana fantasía,
el poema existe, a partir de ti:...

...¡Mujer, Mujer!

.(Leonardo Favio)

Agradecimentos

Antes de nada, agradeço à bondade de Deus, por permitir-me conhecer o Brasil, país de grandes oportunidades e gente afável.

No final destes cinco anos de desenvolvimento profissional, agradeço ao meu grande amigo Sergio Leal Braga. Desde o início, ele mostrou ser um excelente orientador. Trabalhamos muito, contudo tivemos muitas satisfações profissionais e forjamos uma grande amizade.

Não posso esquecer dos meus amigos do LRA. Com eles surgiram as idéias que deram seus frutos neste trabalho. Agradeço também a todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos e ajuda.

Esta tese experimental não poderia ter sido realizada sem o excelente trabalho do Jandir, obrigado pela bancada e todos os componentes. Ao Lourenço, agradeço o apoio constante. Ao André do laboratório de Metrologia da PUC-Rio agradeço a ajuda incondicional.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora e a todos aqueles que de uma forma incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

Pelos auxílios concedidos, agradeço ao CNPq e à PUC-Rio.

Apesar de ficar longe da minha família, eu estou eternamente agradecido por eles estarem sempre perto..., os meus pais são meu exemplo, inspiração da minha vida. Finalmente agradeço à paciência de Malena, Jorge e Gianella,... meus “niños invencibles”, espero retribuir com o fruto do desenvolvimento, a falta de um filho, um irmão, um companheiro... um pai.

RESUMO

Milón G., Juan José; Sergio Leal Braga (Orientador). **Estudo Experimental do Super-resfriamento da Água no Processo de Termoacumulação em Cápsulas Cilíndricas**. Rio de Janeiro, 2004. 150 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dispositivo experimental foi desenvolvido para o estudo do super-resfriamento da água em cápsulas cilíndricas visando sua utilização em processos de termo-acumulação. A bancada experimental é constituída basicamente por: seção de teste, sistema de resfriamento, sistema de visualização e sistema de aquisição e armazenamento de dados. A temperatura do fluido externo, ou fluido de transferência (FT), uma solução aquosa de álcool a 50% por volume, foi mantida fixa por um banho de temperatura controlada durante cada teste. O trabalho foi dividido em quatro etapas. A primeira trata do estudo estatístico do super-resfriamento e nucleação, onde foram utilizadas 4 cápsulas de materiais distintos (alumínio, bronze, PVC e acrílico) de 45 mm de diâmetro, com diferentes temperaturas do FT. A segunda etapa investiga a Taxa de Resfriamento, parâmetro que quantifica a queda da temperatura e influencia fortemente o super-resfriamento e a nucleação. Na terceira etapa, foi estudada a influência da rugosidade da parede interna da cápsula. Nesta etapa, quatro diferentes cápsulas de alumínio, com diferentes rugosidades, foram utilizadas. Finalmente, na quarta etapa, foram realizadas visualizações do processo de nucleação para posterior processamento e melhor entendimento do fenômeno. Os resultados obtidos indicam que o material da cápsula (condutividade e rugosidade) e a temperatura do FT têm grande influência nos fenômenos de super-resfriamento e nucleação da água em cápsulas cilíndricas, afetando, fortemente, o processo de mudança de fase.

Palavras-chave

Nucleação, mudança de fase, termoacumulação, super-resfriamento, refrigeração, condicionamento de ar.

Abstract

Milón G., Juan José; Sergio Leal Braga (Advisor). **Experimental study of Supercooling Water in Cylindrical Capsules applied to the Thermal Storage**. Rio de Janeiro, 2004. 150 p. D.Sc Tese – Department of Engineering Mechanics, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

An experimental device was developed to investigate the supercooling phenomenon in water inside cylindrical capsules used for cold storage process. The experimental device is formed by the test section, the cooling system, the visualization system and the data acquisition and storage system. The temperature of the transfer fluid (TF), a water-alcohol mixture (50% volume), is controlled by a constant temperature bath (CTB). The work was divided in four stages. The first is the statistical study of the supercooling and nucleation phenomena, where four capsules of 45 mm diameter made with different materials (aluminum, brass, PVC and acrylic) had been used, with different temperatures of the FT. The second stage studies the Cooling Rate, a parameter related to the supercooling and nucleation phenomena. In the third stage, the influence of the superficial roughness of the internal wall was investigated. Four aluminum capsules, with different roughness, were used. Finally, in the fourth stage, visualizations of the nucleation process had carried out, for posterior processing and analysis. The results indicate that the material of the capsule (conductivity and roughness) and the temperature of the TF have a considerable influence in the supercooling and nucleation phenomena of the water inside cylindrical capsules, strongly affecting the phase change process.

Keywords

Cooling rate, nucleation, phase change, supercooling, thermal storage, supercooled water

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Termoacumulação Encapsulada	19
1.2.	Super-resfriamento	20
1.2.1.	Água sem Super-resfriamento e com mudança de fase evidente	21
1.2.2.	Água com super-resfriamento e mudança de fase evidente	22
1.2.3.	Água com super-resfriamento e mudança de fase não evidente	23
1.2.4.	Água com hiper resfriamento e mudança de fase não evidente	24
1.2.5.	Água com super-resfriamento e sem mudança de fase	25
1.2.6.	Água com super-resfriamento duplo	25
1.2.7.	Água com super-resfriamento e dissipação de dendritas	26
1.3.	Introdução à Termodinâmica do líquido metaestável	27
1.3.1.	Super aquecimento e super-resfriamento da água no laboratório	30
1.4.	Máximo de massa específica	32
1.5.	Pesquisa Bibliográfica	34
1.6.	Posicionamento do trabalho e objetivos	41
2	Abordagem Experimental	43
2.1.	Dispositivo Experimental	43
2.1.1.	Seção de teste	44
2.1.2.	Seção de observação e visualização	49
2.1.3.	Seção de aquisição e processamento de dados experimentais	50
2.1.4.	Seção de Resfriamento	51
2.2.	Procedimento experimental	55
2.2.1.	Condições de aquisição de dados	59

2.2.2. Condição Inicial do MMF na cápsula	60
2.2.3. Temperatura do fluido de transferência (FT)	61
2.2.4. Parâmetros estudados	62
c. Influência da rugosidade	64
d. Visualização do super-resfriamento e nucleação	66
2.3. Incertezas envolvidas	66
3 . Resultados	68
3.1. Considerações gerais	68
3.2. Análise estatística do super-resfriamento e nucleação.	
Introdução ao estudo da taxa de resfriamento	69
3.2.1. Curvas características do processo de resfriamento do MMF em cápsulas cilíndricas	70
3.2.2. Análise estatística do super-resfriamento e nucleação	76
3.2.3. Introdução ao estudo da taxa de resfriamento	78
3.3. Estudo da taxa de resfriamento	81
3.3.1. Curvas características	82
3.3.2. Taxa de resfriamento	86
3.4. Influência da rugosidade no super-resfriamento e nucleação	89
3.5. Visualização do super-resfriamento e solidificação	94
4 Conclusões	115
5 Recomendações para trabalhos futuros	118
5.1. Visualização da distribuição de temperaturas no processo de nucleação por meio de partículas em suspensão.	118
5.2. Temperatura inicial do MMF	118
5.3. Rampa com a temperatura do FT	118
5.4. Intervalo de tempo de aquisição de dados	119
6 Referências bibliográficas.	120
7 . Anexos	122
7.1. Considerações de Rugosidade	122

7.1.1. Ra (rugosidade média)	122
7.1.2. Rq (rugosidade média quadrática)	124
7.1.3. Rt (rugosidade total)	124
7.1.4. Critérios para avaliar a rugosidade	125

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama geral do processo de termoacumulação.	20
Figura 2. Modelo de cápsulas de termoacumulação.	20
Figura 3. Diagrama de mudança de fase da água.	21
Figura 4. Água sem super-resfriamento e mudança de fase evidente.	22
Figura 5. Super-resfriamento da água com mudança de fase evidente.	23
Figura 6. Super-resfriamento da água e mudança de fase não evidente.	24
Figura 7. Água com hiper resfriamento e mudança de fase não evidente.	24
Figura 8. Água com super-resfriamento e sem mudança de fase.	25
Figura 9. Água com super-resfriamento duplo.	26
Figura 10. Água com super-resfriamento e dissipação das dendritas.	27
Figura 11. Diagrama pressão temperatura para uma substancia pura.	28
Figura 12. Diagrama pressão volume para uma substancia pura.	29
Figura 13. Diagrama Relaxação do liquido super aquecido.	30
Figura 14. Temperaturas de cristalização para água super resfriada.	30

Figura 15. Compressibilidade isotérmica à pressão atmosférica da água super resfriada.	31
Figura 16. Coeficiente de expansão isotérmica à pressão atmosférica da água super resfriada.	31
Figura 17. Calor específico da água super-resfriada a pressão atmosférica constante. Debeneditti (1996).	32
Figura 18. Massa específica da água à pressão atmosférica	33
Figura 19. Máximo de massa específica da água líquida	33
Figura 20. Variação da temperatura. Chen (1999).	35
Figura 21. Probabilidade de nucleação da água. Chen (1999)	36
Figura 22. Grau de super-resfriamento e a taxa de resfriamento.	36
Figura 23. Probabilidade de nucleação para diferentes volumes da cápsula.	37
Figura 24. Probabilidade de nucleação com adição de nucleadores.	37
Figura 25. Probabilidade de nucleação da água.	38
Figura 26. Variação calor específico com a temperatura para a água super resfriada. Tombari et al (1998).	39
Figura 27. Variação do grau de super-resfriamento	40
Figura 28. A velocidade de crescimento da dendrita da água em função do super-resfriamento; Braslavsky (1999).	40
Figura 29. Esquema da bancada experimental	44
Figura 30. Detalhe da Seção de teste.	45
Fig. 31. Visualização da seção de teste	46
Figura 32. Disposição dos elementos internos na seção de teste.	46
Figura 33. Corte transversal da seção de teste	47
Figura 34. Visualização de uma cápsula.	48
Figura 35. Disposição geral dos sensores de temperatura na cápsula.	48
Figura 36. Detalhe da câmara de nitrogênio	49
Figura 37. Disposição real da seção de visualização.	50

Figura 38. Visualização da seção de aquisição e processamento de dados.	51
Figura 39. Programa de gerenciamento dos equipamentos	51
Figura 40. Banho de temperatura constante (BTC)	52
Figura 41. Painel do banho de temperatura constante	53
Figura 42. Detalhe do reservatório superior	54
Figura 43. Detalhe do reservatório inferior.	54
Figura 44. Visualização da bancada experimental	55
Figura 45. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 1.	56
Figura 46. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 2.	57
Figura 47. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 3.	58
Figura 48. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 4	59
Figura 49. Detalhe do dispositivo para impor a temperatura inicial da cápsula.	60
Figura 50. Dispositivo para condição inicial de temperatura do MMF	61
Figura 51. Tempo de resposta no controle da temperatura do BTC.	62
Figura 52. Modelo das cápsulas e detalhe da distribuição dos termopares	63
Figura 53. Distribuição dos termopares para o estudo da taxa de resfriamento	64
Figura 54. Modelo com diferentes rugosidades. Superfícies superpostas, 0,16; 0,6; 1,3; 2,27 μm	65
Figura 55. Distribuição dos termopares para o estudo da taxa de resfriamento	65
Figura 56. Rugosidade das cápsulas de alumínio de 45 mm de diâmetro.	66
Figura 57. Distribuição dos termopares para o estudo de	

visualização.	66
Figura 58. Definição de termos.	69
Figura 59. Disposição dos termopares.	70
Figura 60. Resfriamento da cápsula de acrílico de 45 mm e $T_{FT} = -4^{\circ}C$	71
Figura 61. Resfriamento da cápsula de PVC D = 45 mm e $T_{FT} = -6^{\circ}C$	71
Figura 62. Resfriamento da cápsula de acrílico D = 45 mm e $T_{FT} = -6^{\circ}C$.	72
Figura 63. Resfriamento da cápsula de bronze de 45 mm e $T_{FT} = -6^{\circ}C$.	73
Figura 64. Resfriamento da cápsula de alumínio de 45 mm e $T_{FT} = -6^{\circ}C$.	73
Figura 65. Resfriamento da cápsula de bronze D = 45 mm e $T_{FT} = -8^{\circ}C$.	74
Figura 66. Resfriamento da cápsula de alumínio D = 45 mm e $T_{FT} = -8^{\circ}C$.	75
Figura 67. Variação do tempo de solidificação para diferentes temperaturas do FT.	75
Figura 68. Probabilidade de super-resfriamento para diferentes temperaturas do FT.	77
Figura 69. Probabilidade de nucleação para diferentes temperaturas do FT	78
Figura 70. Taxa de resfriamento.	79
Figura 71. Variação do tempo de super-resfriamento com a taxa de Resfriamento para diferentes materiais da cápsula.	80
Figura 72. Tempo de super-resfriamento e taxa de resfriamento para diferentes temperaturas do FT	81
Figura 73. Posição angular dos termopares para o estudo da Taxa de Resfriamento	82
Figura 74. Temperaturas para diferentes posições internas $T_{FT} = -6^{\circ}C$	84
Figura 75. Temperatura da parede interna em diferentes	

posições radiais $T_{FT} = -10^{\circ}\text{C}$	85
Figura 77. Variação da taxa de resfriamento com a posição do termopar, alumínio com $T_{FT} = -6^{\circ}\text{C}$.	87
Figura 78. Variação da taxa de resfriamento com a posição do termopar, Alumínio com $T_{FT} = -8^{\circ}\text{C}$.	87
Figura 79. Variação da taxa de resfriamento com a posição do termopar, alumínio com $T_{FT} = -10^{\circ}\text{C}$.	88
Figura 80. Comparação da taxa de resfriamento para diferentes T_{FT}	88
Figura 81. Variação da taxa de resfriamento para diferentes temperaturas do FT, cápsula de alumínio 45mm.	89
Figura 82. Disposição dos termopares para o estudo da rugosidade.	90
Figura 83. Probabilidade de super-resfriamento para diferentes rugosidades.	91
Figura 84. Probabilidade de nucleação para diferentes rugosidades.	91
Figura 85. Comparação da probabilidade de super-resfriamento para diferentes materiais	92
Figura 86. Comparação da probabilidade de nucleação para diferentes materiais	93
Figura 87. Processo de nucleação, diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -18^{\circ}\text{C}$. Tempo referencial igual ao início da nucleação	95
Figura 88. Processo de nucleação, imagens processadas para diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -18^{\circ}\text{C}$. Sem formação do gelo dendrítico. A cor azul é o gelo	96
Figura 89. Processo de nucleação, diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -16^{\circ}\text{C}$. Tempo referencial igual ao início da nucleação.	97
Figura 90. Processo de nucleação, imagens processadas para diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -16^{\circ}\text{C}$	98
Figura 91. Processo de nucleação, diferentes posições dos	

termopares. Acrílico com $T_{FT} = -14^{\circ}C$. Tempo referencial igual ao início da nucleação	99
Figura 92. Processo de nucleação, imagens processadas para diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -14^{\circ}C$. Tempo referencial igual ao início da nucleação.	100
Figura 93. Processo de nucleação, diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -12^{\circ}C$. Tempo referencial igual ao início da nucleação.	101
Figura 94. Processo de nucleação, imagens processadas para diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -12^{\circ}C$	102
Figura 95. Processo de nucleação, diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -10^{\circ}C$	103
Figura 96. Processo de nucleação, imagens processadas para diferentes posições dos termopares. Acrílico com $T_{FT} = -10^{\circ}C$	104
Figura 97. Tempo de bloqueio por formação de gelo dendrítico para diferentes temperaturas do FT, cápsula de acrílico 45 mm.	105
Figura 98. Bloqueio por formação de gelo dendrítico para diferentes temperaturas do FT e materiais da cápsula	106
Figura 99. Processo de nucleação. Acrílico com $T_{FT} = -8^{\circ}C$.	108
Figura 100. Processo de solidificação. Acrílico com $T_{FT} = -8^{\circ}C$	109
Figura 101. Processo de solidificação: Bronze de 45 mm de diâmetro, $T_{FT} = -6^{\circ}C$.	110
Figura 102. Nucleação, cápsula de alumínio de 45 mm. $T_{FT} = -6^{\circ}C$. Parte 1.	111
Figura 103. Nucleação e solidificação, cápsula de alumínio de 45 mm. $T_{FT} = -10^{\circ}C$. Part 2.	112
Figura 104. Formação do gelo dendrítico e solidificação, cápsula de alumínio de diâmetro 45 mm. $T_{FT} = -10^{\circ}C$.	114

Lista de tabelas

Tabela 1. Descrição dos sensores de temperatura na cápsula.	49
Tabela 2. Experiências realizadas para a etapa de análise estatístico.	63
Tabela 4. Incertezas envolvidas	67
Tabela 5. Características das cápsulas para a análise estatística.	69
Tabela 6. Detalhe de testes para o estudo da taxa de resfriamento	82
Tabela 7. Características dos testes, rugosidade.	89
Tabela 8. Testes realizados para visualização da nucleação	94

Lista de símbolos

α_p	coeficiente de expansão isotérmica
BTC	banho de temperatura constante
BTC-CI	banho de temperatura constante para estabelecer a condição inicial de temperatura na cápsula
CC	posição no eixo da cápsula
C_p	calor específico à pressão constante
Dt	tempo total de super-resfriamento
FT	fluido de transferência
GSR	grau de super-resfriamento
K_T	compressibilidade isotérmica
MMF	material com mudança de fase
PI	posição na parede interna da cápsula
pot_{ict}	potência instalada com termoacumulação
pot_{ist}	potência instalada sem termoacumulação
PVC	Polyvinylchloride
R	raio da cápsula
RM	posição no raio meio da cápsula
t_a	intervalo de tempo de aquisição
T_{FT}	temperatura do fluido de transferência
T_i	temperatura inicial do MMF
T_m	temperatura de mudança de fase
T_{mme}	temperatura de máximo de massa específica
T_n	temperatura de nucleação do MMF
T_{PI}	temperatura da parede interna da cápsula
TR	taxa de resfriamento
z	espessura da parede da cápsula
ρ	massa específica

Convenção

Chiller	Equipamento de refrigeração que resfria um líquido (geralmente água o uma solução com ela)
Período de pico	intervalo de tempo onde o consumo de energia elétrica é elevado.
Nucleação	início da formação de gelo (qualquer tipo)
Super-resfriamento	quando a temperatura de um fluido (água pura p.e.) fica abaixo da temperatura de mudança de fase em estado líquido metaestável