

MERCOFRIO 2000 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

TERMOACUMULAÇÃO COM GELO EM ESFERAS

Juan J. Milón G. – josemg@mec.puc-rio.br

Laboratório de Refrigeração e Aquecimento

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,

CEP 22453-900 – Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Sergio L. Braga – slbraga@mec.puc-rio.br

Laboratório de Refrigeração e Aquecimento

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,

CEP 22453-900 – Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

***Resumo.** Um dispositivo experimental foi desenvolvido para investigar o desempenho térmico de um sistema de armazenamento de frio que utiliza água como material com mudança de fase (pcm) em esferas. A esfera é resfriada por um fluxo externo de Mistura Álcool-Água controlado por um banho de temperatura constante. Foram investigadas várias situações para diferentes temperaturas e regimes de fluxo. São monitorados o campo de temperatura, a posição de interface e a transferência de calor dentro das esferas.*

***Palavras-chave:** Refrigeração, Condicionamento de ar, Termoacumulação, Mudança de fase.*

1. INTRODUÇÃO

Economizar energia é um dos temas mais discutidos em toda a indústria nacional. Fala-se da necessidade de buscar meios de conservar todas as formas de energia, conseguindo assim baixar os custos da produção e dos serviços realizados. Em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar, a energia elétrica aparece como o grande custo de operação. Isto obriga o enfoque direto do tema. Sabe-se também por estatísticas que o maior consumo de energia se dá entre as 18:00 e as 22:00 horas, período denominado de “horário de pico” ou “horas de maior demanda”. Na prática, é muito difícil reduzir a demanda durante este período. Com isto, as linhas de transmissão de energia elétrica operam nas suas capacidades máximas e uma das formas encontradas para a redução do consumo é diferenciar o custo da energia neste horário. Em alguns casos este custo pode ser 10 vezes maior do que em outras horas do dia. Como consequência, a utilização ininterrupta de equipamentos elétricos implica em elevados custos. Outro fator a considerar, no caso de sistemas de condicionamento de ar, é a distribuição da carga térmica ao longo do dia. Esta também passa por um pico e, não raro, tais picos podem ter alguma interseção, ou seja, no horário onde a tarifa é mais cara, necessita-se mais energia. Finalmente, sistemas convencionais, sem termoacumulação, são projetados de forma a atender a máxima demanda, o que implica em equipamentos super dimensionados para as demais horas do dia.

A termoacumulação se aplica diretamente a esses casos, permitindo reduzir, em algumas situações quase eliminar, o consumo de energia nestes períodos de maior demanda. Permite ainda distribuir a carga dos equipamentos de refrigeração, fazendo com os mesmos operem de

modo mais uniforme e eficiente, reduzindo a potência instalada. Como consequência eleva-se a eficiência geral do processo. Atualmente desenvolvem-se sistemas de termoacumulação em cápsulas contendo diferentes materiais internos de mudança de fase, mmf, (pcm – phase change material), diferentes geometria (esféricos, paralelepípedos, cilíndricos, etc.) e capacidades diversas (desde 0,5 até 20 dm³ aproximadamente). Este sistema de termoacumulação, além de apresentar grande área transferência de calor; pode também ser facilmente ampliado, variando assim sua capacidade de armazenamento, bastando para isto aumentar o número de cápsulas.

Moore & Bayazitoglu (1982), estudaram a solidificação de parafina dentro de uma esfera usando um modelo matemático validado experimentalmente. Neste trabalho é analisada a posição da interface, o campo de temperatura para diferentes números de Stefan (Ste) e Fourier (Fo), e a energia armazenada durante o processo de solidificação. Arnold (1991), implementa um modelo experimental de um sistema de termoacumulação com esferas, estuda os fenômenos de super resfriamento durante a solidificação, a influência do materiais nucleadores e os efeitos da convecção durante a transferência de calor. Chen e Yue (1991) investigaram a termoacumulação em cápsulas porosas esféricas depositadas em um tanque horizontal. Estudaram a variação da temperatura com o tempo para diferentes pontos do tanque e a fração de gelo formado, comparando o modelo experimental com um modelo matemático. Braga & Viskanta (1992) investigaram, experimentalmente, o efeito da densidade máxima na solidificação da água no interior de cavidades retangulares contendo uma parede vertical resfriada. Foram analisados os perfis de temperatura, a formação do sólido e sua relação com os pontos de mínima temperatura no interior do líquido e as células de convecção. Braga(1993) investiga numericamente a recuperação da energia em capsulas (tubos e esferas), variando o diâmetro, espessura e material do encapsulante. Um programa simula a variação da temperatura para diferentes condições de solidificação. Saitho & Kato (1995) apresentam os resultados de uma simulação numérica para o processo de descarga de energia em um sistema de termoacumulação com capsulas esféricas, estudando o efeito da variação do fluxo de transferência, a temperatura de ingresso e diâmetro das esferas. Chen & Chen (1999) estudaram a influência de agentes nucleadores no processo de solidificação de água no interior de cápsulas cilíndricas de diferentes tamanhos.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Devido à simetria da esfera a ser testada e, visando facilitar o procedimento experimental, optou-se pelo uso de semiesferas no lugar de esferas completas. Estas foram posicionadas de modo que o escoamento se desse paralelamente ao plano de simetria. Detalhes são apresentados a seguir.

a. Fluido de Circulação

Foi utilizada uma mistura de álcool/água destilada a 50% em volume. Concentração esta suficiente para manter a solução líquida em toda a faixa de temperatura dos testes. Sua função é circular através do sistema provocando a solidificação ou fusão do mmf dentro da semiesfera.

b. Seção de teste

É um cubo de 12,5 dm³, feito de Acrílico de 10,0 mm de espessura e isolado com painéis de poliestireno de espessura 25,4 mm. Na entrada e saída da seção foram instalados difusores de fluxo para uniformizar o escoamento (“G” e “H” na fig. 2a). Para o controle da temperatura foi instalado um termômetro de resistência RTD tipo PT-100 (“B” na fig. 1). Dois termopares instalados, respectivamente na entrada e na saída da seção de teste (24 e 26 da fig. 2a) registram a variação da temperatura do fluido de trabalho ao atravessar a seção. Em

uma das paredes verticais foi posicionada uma abertura para instalar diferentes módulos contendo as semiesferas a serem testadas (“L” na fig. 2a). Pode-se observar a numeração adotada e disposição dos termopares dentro da semiesfera na fig. 2 b.

c. Reservatório

Feito de acrílico de 10 mm de espessura, com capacidade de 27,0 dm³, e isolado por painéis de poliestireno de 25,5 mm de espessura, tem a função é armazenar o fluido de circulação enquanto o mesmo é resfriado pelo banho termostático, descrito a seguir, até a temperatura pré-determinada para cada teste. controlado mediante o termômetro de resistência RTD tipo PT-100 (“A” na fig. 1.).

d. Banho termostático

É o equipamento responsável por resfriar, e manter constante, a temperatura do fluido de circulação. Seu sistema de controle (“C” na fig. 1) PID (Proporcional Integral Derivativo) é capaz de manter a temperatura estabelecida numa faixa de +/-0,05 °C. Sua potência de resfriamento a 0 °C é de 500 W. Para o aquecimento conta com uma resistência 800 W.

e. Sistema de direcionamento de fluxo

É um sistema de válvulas esféricas e tubulações com $\phi 25,4$ mm, encarregado de direcionar o fluido de circulação para as diferentes etapas de teste.

f. Sistema de medição e aquisição de dados

Para a aquisição das temperatura usou-se um terminal (“D” na fig. 1), responsável por transmitir os sinais de 18 termopares ao sistema de aquisição de dados modelo Tempscan 1100, da Omega, acoplado a um micro computador, onde os dados eram armazenados. Foram utilizados termopares dos tipos K e T, ambos de diâmetro 0,076 mm, revestidos com teflon, calibrados para a faixa de trabalho de -100 até 150°C, com uma incerteza de 0,1°C.

3. PROCEDIMENTO DE TESTES

Inicialmente, com a seção de teste vazia, a solução álcool/água é resfriada circulando entre o banho termostático e reservatório. O controle é feito com o auxílio do sensor “A”, até que se atinja a temperatura especificada para o teste. Neste instante o fluido de circulação desce à seção de teste, enchendo-a totalmente. A partir daí o banho circula o fluido através da seção de teste, enquanto controla a temperatura mediante o sensor “B”, até finalizar o processo. O fluxo é mantido constante pela bomba “F”, própria do banho. Para o carregamento do reservatório utiliza-se a bomba “E”, de forma a manter o sistema fechado. O registro das temperaturas é feito conectando-se os termopares localizados no modulo “L” ao terminal “D” e este ao sistema de aquisição de dados. Foram investigadas semiesferas de acrílico com diâmetro $\phi 96,94 \pm 0,26$ mm com uma espessura de parede de $1,17 \pm 0,14$ mm. A temperatura inicial da água na semiesfera foi sempre a temperatura ambiente, próxima aos 25,0 °C. As temperaturas do fluido de circulação foram de $-4,8 \pm 0,05$; $-9,6 \pm 0,05$; $-14,7 \pm 0,05$ e $-18,7 \pm 0,05$ °C. Para efeito de comentários futuros, tais testes serão designados, respectivamente como: -5, -10, -15 e -20 °C. O intervalo de tempo decorrido entre medições sucessivas para a aquisição das temperatura foi fixado 3,0 s.

4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

As figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam, respectivamente as distribuições das temperaturas obtidas com os termopares instalados nos diversos pontos apresentados na figura 2. Para cada figura apresentam-se as evoluções no tempo do conjunto das temperaturas obtidas nos seguintes pontos: superfície externa, superfície interna, raios 0,7 R e 0,38 R e finalmente no centro da esfera.

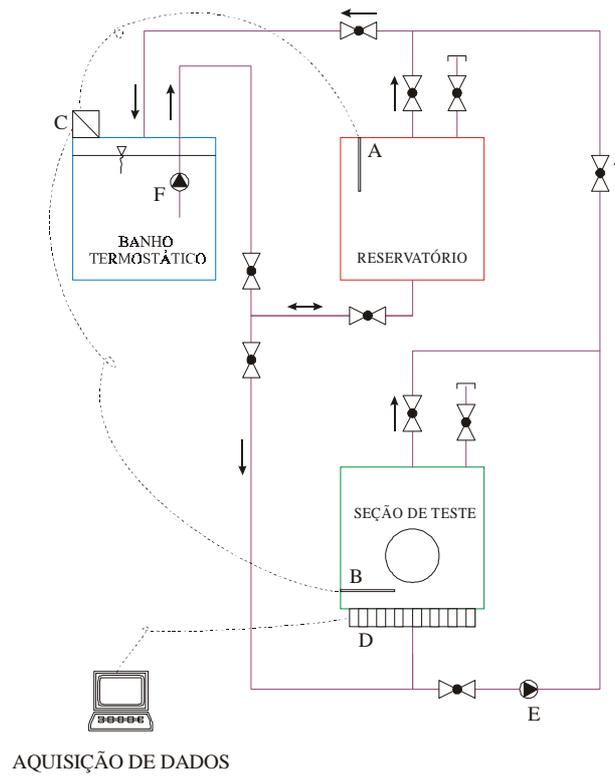


Fig. 1. Dispositivo experimental

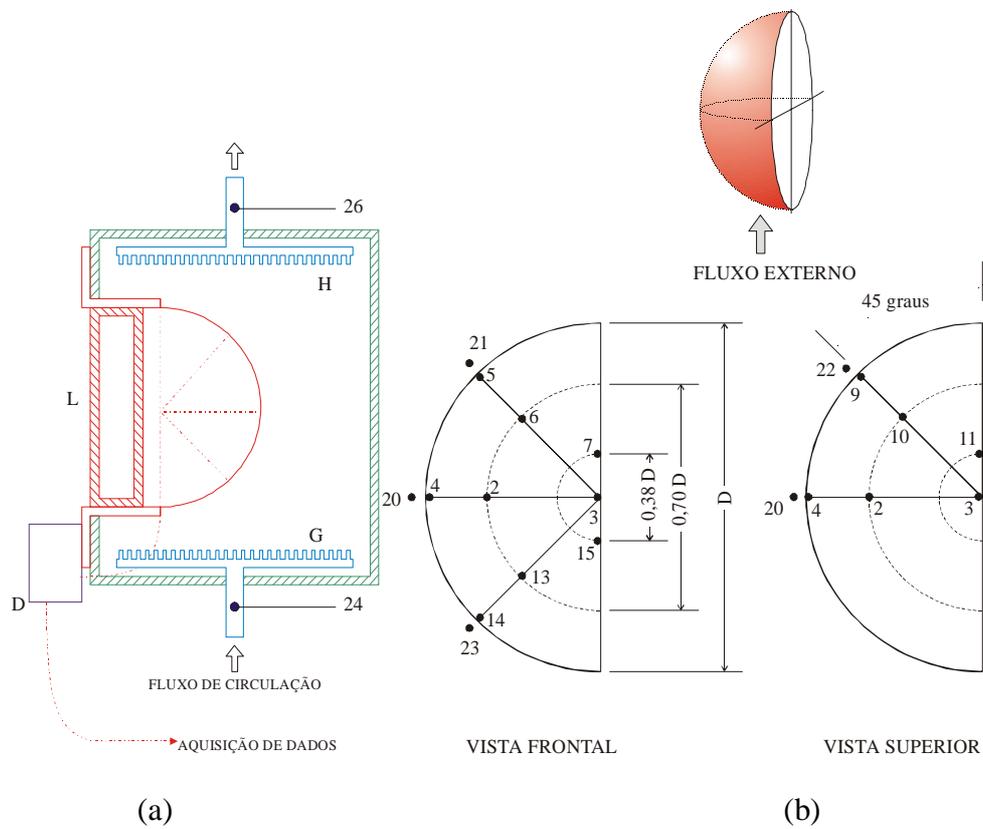


Fig. 2. Seção de teste. (a) Corte da seção. (b) Disposição de termopares na semiesfera

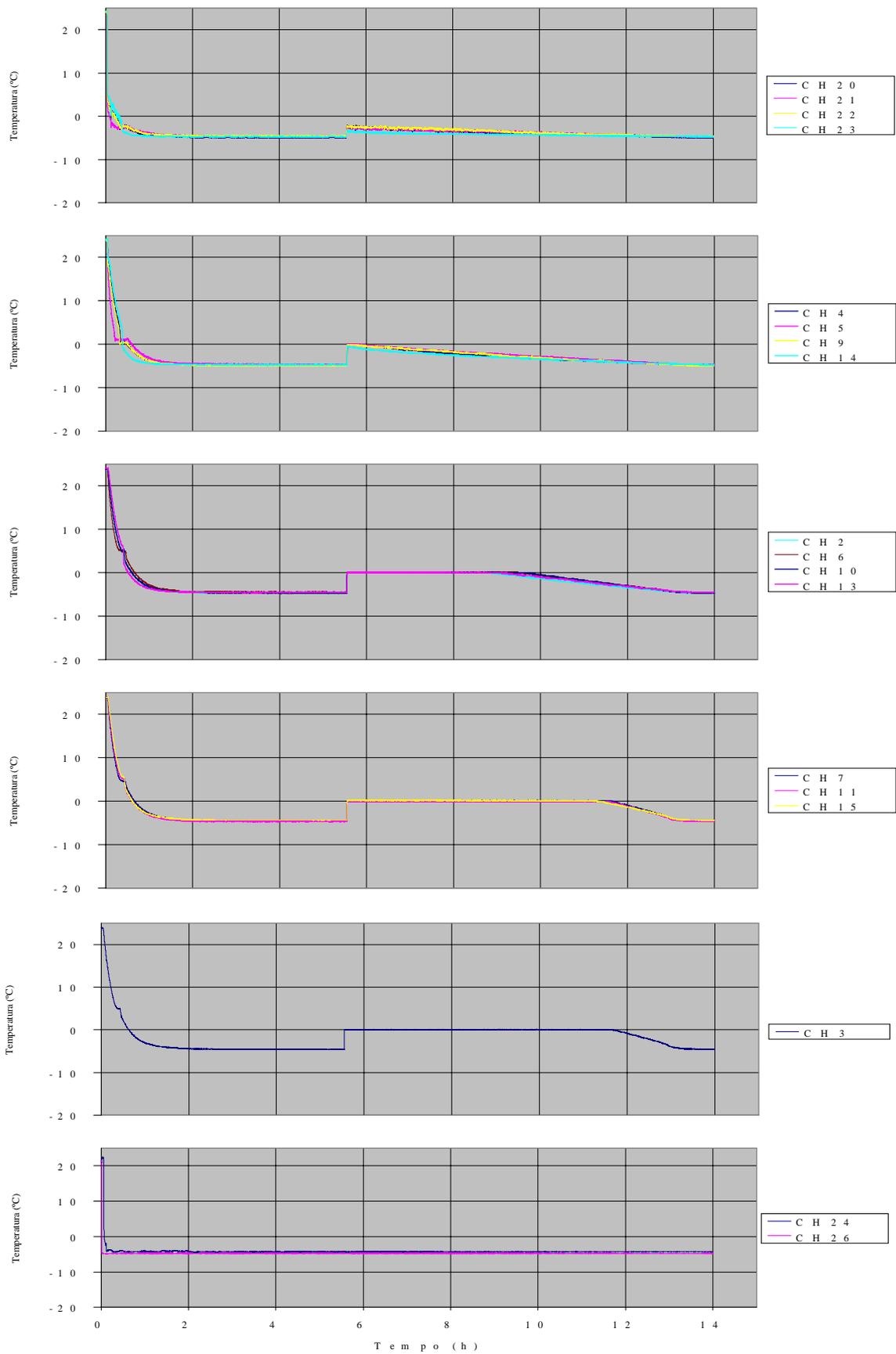


Fig. 3. Variação da temperatura com o tempo para temperatura do banho externo de -5°C

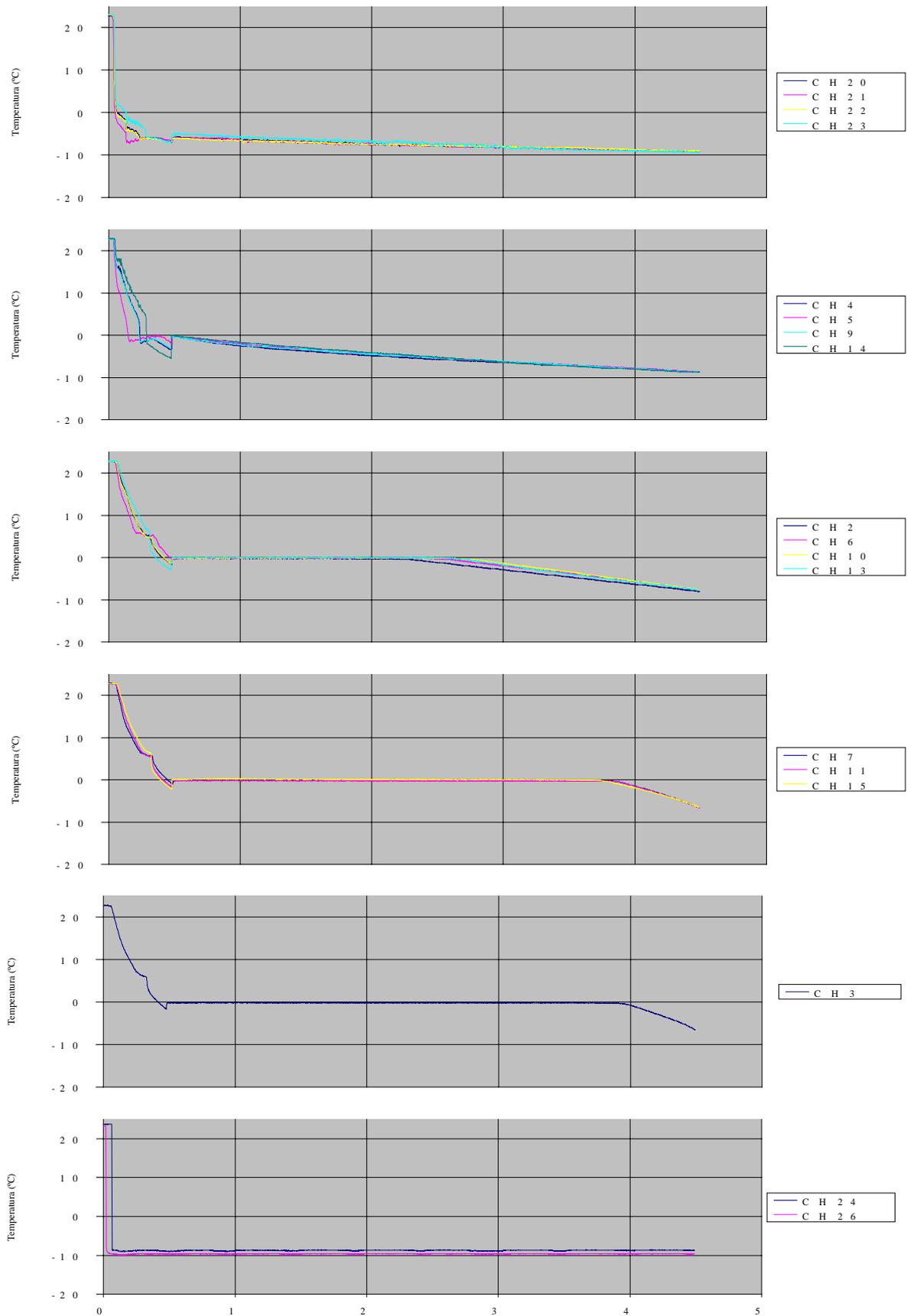


Fig 4. Variação da temperatura com o tempo para temperatura do banho externo de -10°C

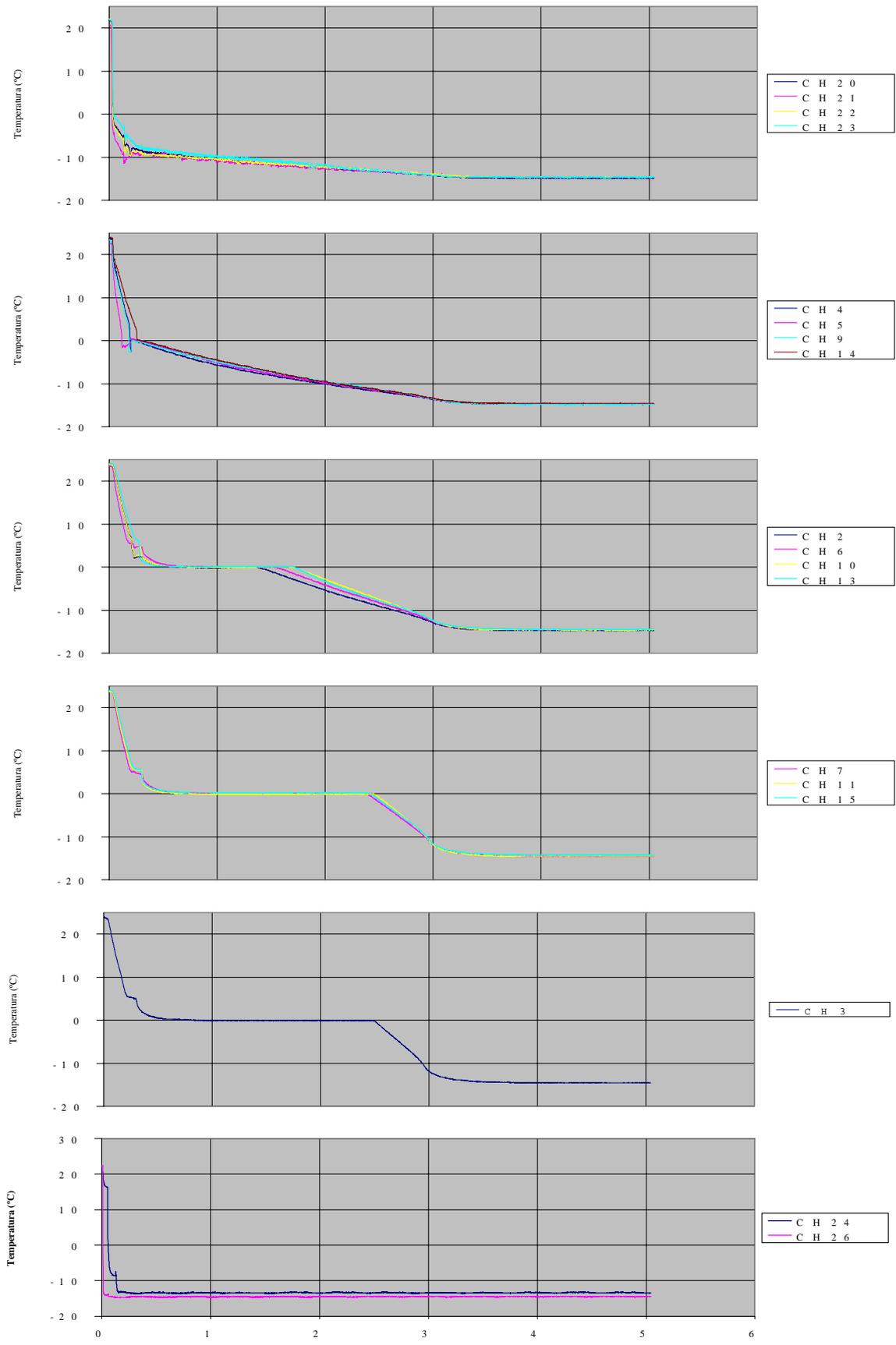


Fig 5. Variação da temperatura com o tempo para temperatura do banho externo de -15°C

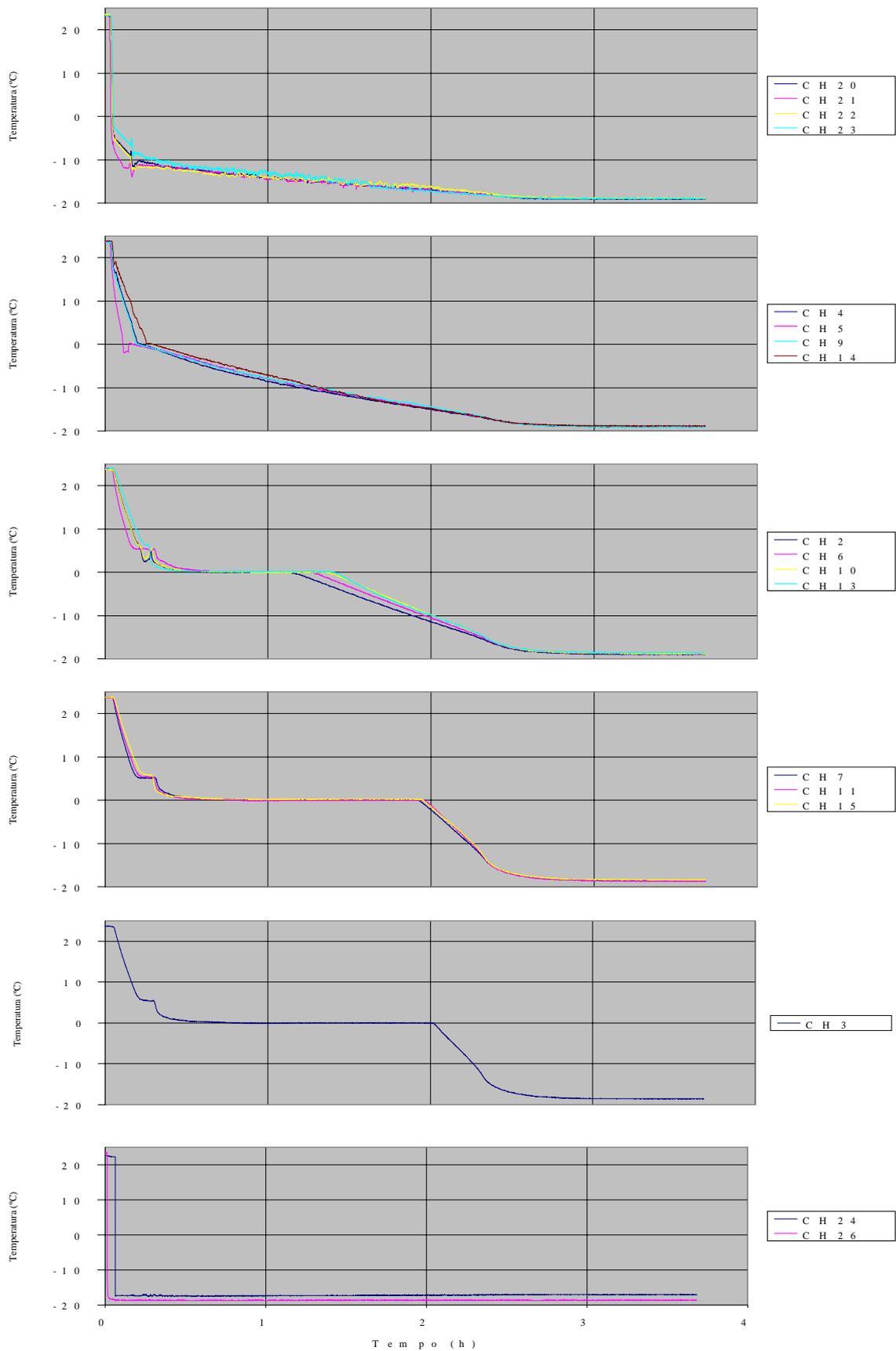


Fig 6. Variação da temperatura com o tempo para temperatura do banho externo de -20°C

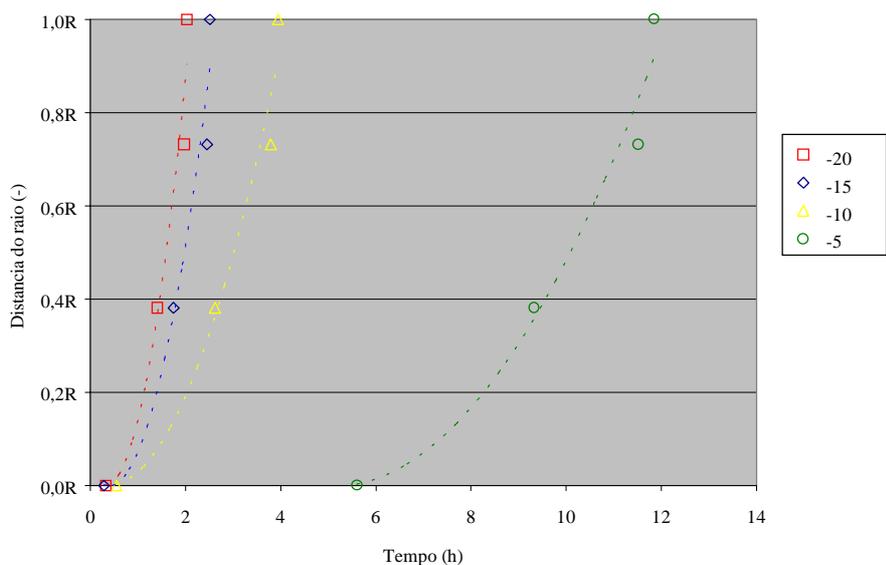


Fig. 7. Posição da interface X tempo

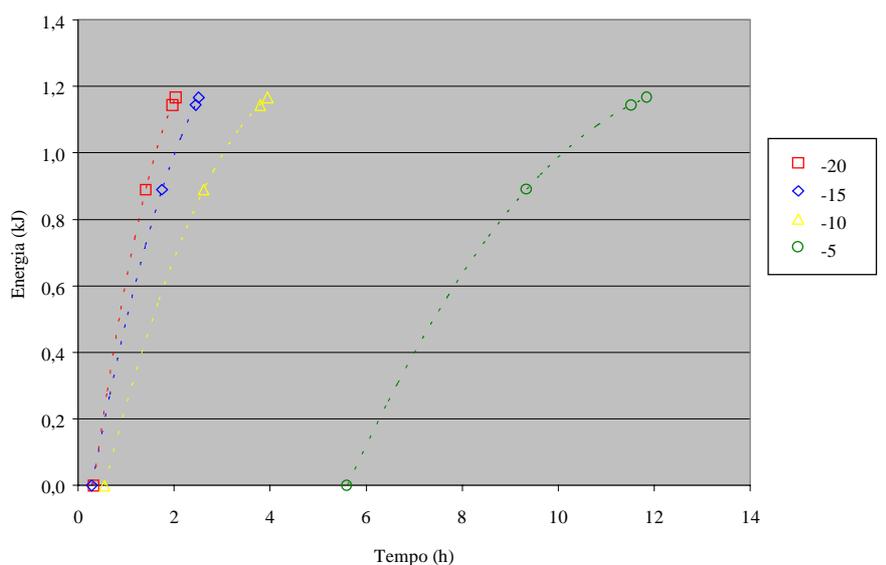


Fig. 8. Energia retirada sob forma de latente X tempo

Para o caso do fluido de circulação a -5°C pode-se observar a ocorrência de super resfriamento, que durou, neste caso, cerca de 5,5 horas, até que, repentinamente, se inicia o processo de solidificação. No segundo caso (-10°C), observa-se novamente um super resfriamento, desta vez mais curto do que o anterior, onde, próximo à parede interna chegam a ocorrer temperaturas da ordem de $-4,0^{\circ}\text{C}$. Nos dois casos mencionados o início da solidificação ocorre de modo abrupto e, em ambos os casos, após esta transformação, o líquido remanescente fica totalmente isotérmico, a $0,0^{\circ}\text{C}$. A partir deste instante a solidificação prossegue em direção ao centro, sendo possível identificar a passagem da interface sólido-líquido pelos termopares, quando as temperaturas dos mesmos volta a decrescer. No primeiro caso o processo dura aproximadamente 13 horas, até que o centro atinge $-4,0^{\circ}\text{C}$. No seguinte são necessárias apenas 4,5 horas para que o termopar central

atinga $-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nos outros casos (-15 e $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) já não ocorre o super resfriamento. Tal já era esperado, conforme visto por Chen & Chen (1999). Os processos são acelerados pela grande diferença de temperatura. Os tempos totais de congelamento são reduzidos para 3,5 e 2,5 horas, com o centro atingindo $-14,0$ e $-17,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

A figura 7 mostra o avanço da frente de solidificação com o tempo para cada uma das temperaturas empregadas no fluido de circulação. É nítida a defasagem do caso de maior temperatura, onde o super resfriamento ocorreu por um longo período. Com o aumento da camada solidificada, decresce a área da interface, o que acaba por imprimir à frente uma maior velocidade de solidificação, apesar dos efeitos isolantes do gelo já formado.

Finalmente a figura 8 apresenta o calor total retirado sob forma de latente da água no interior da esfera. Fica claro que, mesmo com crescimento da velocidade de propagação da frente de solidificação, a taxa de retirada de calor cai com o tempo, face à redução da área desta interface.

4. CONCLUSÕES

Pode-se observar que menores temperaturas para o fluido de circulação reduzem a possibilidade de super resfriamento. Como a quase totalidade do calor retirado refere-se ao latente de solidificação, o super resfriamento pode reduzir drasticamente a capacidade de termoacumulador (ou o transporte de energia).

Em função do aumento da resistência à retirada de calor, com o aumento do volume solidificado, especial atenção deve ser dada também ao tamanho da esfera.

O processo de solidificação no interior de uma esfera apresenta fenômenos que comprometem o armazenamento de energia e, por isto, devem ser estudados independentemente visando a otimização do processo.

REFERÊNCIAS

- Arnold, D. , 1991, Laboratory Performance of Encapsulated-Ice Store, HVAC&R Research, ASHRAE, IN-91-20-3.
- Braga S., 1993, Recuperação de energia armazenada sobre Forma de Calor, XII Congresso de Engenharia Mecânica, Brasília, BRASIL.
- Braga S.& Viskanta, R., 1992, Effect of Density Extremum on the Solidification of Water on the Vertical Wall of a Rectangular Cavity, International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics, Volume 5, Number 6.
- Chen, S and Yue, J., 1991, A simplified analysis for cold storage in poprous capsules with solidification, National Taiwan University, Republica of China.
- Chen, S. & Chen, Ch , 1999, Effect of Nucleation Agents on the Freezing Probality of Supercooled Water inside Capsules, HVAC&R Research, ASHRAE, Vol 5 No 4, pp 339-351.
- Moore, F.E. & Bayazitoglu, Y.,1982, Melting Whitin a Spherical Enclosure, Journal of Heat Transfer, Vol 104, february.
- Roy, S. & Sengupta, S., 1987, The Melting Process Whitin Spherical Enclosures, Transaction of the ASME, Vol 109.
- Saitho, T. & Kato, H., 1995, High-Efficient Thermal Energy Storage System Using Phase-Change Spherical Capsules, 30th IECEC, Florida.