

## 3 Resultados

### 3.1. Introdução do Estudo de Super-Resfriamento e Nucleação

Neste capítulo são mostradas curvas características apresentadas durante a realização dos testes desta pesquisa.

#### 3.1.1. Super-Resfriamento sem Nucleação

Na Fig. 25 se apresenta as curvas características do super-resfriamento sem nucleação. Após atingir a condição inicial de 25°C, o MMF inicia o processo de resfriamento, a temperatura fica abaixo da temperatura de inversão de densidade (4 °C), logo se resfria abaixo da temperatura de mudança de fase (0 °C) e se estabiliza em -4 °C. Nesta situação a água fica em estado metaestável de super-resfriamento durante todo o período de teste. Cabe mencionar que o fenômeno metaestável fica por um tempo indefinido sem alteração alguma. Uma vez que esta situação é observada, depois de 5 horas interrompe-se o teste.

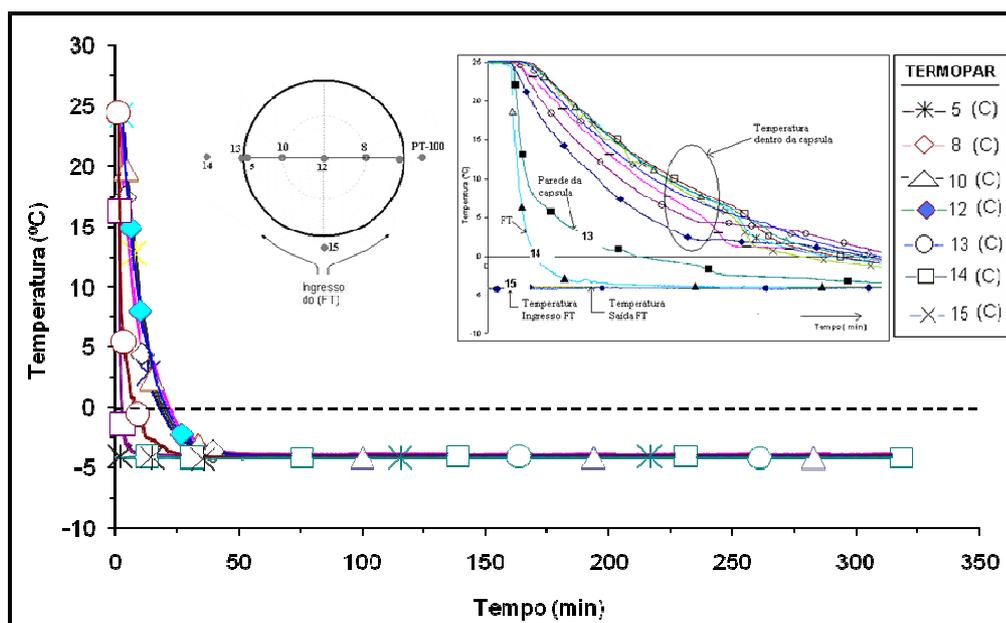


Figura 25. Cápsula de alumínio  $T_{FT} -4^{\circ}\text{C}$ , 30 mm de diâmetro

No caso da Fig. 26, também é mostrado um caso de metaestabilidade da água para cápsulas cilíndricas de 80 mm de diâmetro. Nesta situação a água fica em estado de super-resfriamento sem mudança de fase. Esta curva é característica para materiais isolantes com altas temperaturas do FT (geralmente entre  $-2\text{ °C}$  e  $-4\text{ °C}$ ).

Este tipo de comportamento impede a solidificação do MMF, como consequência, nos processos de termo-acumulação não acontece o armazenamento de energia em forma de calor latente.

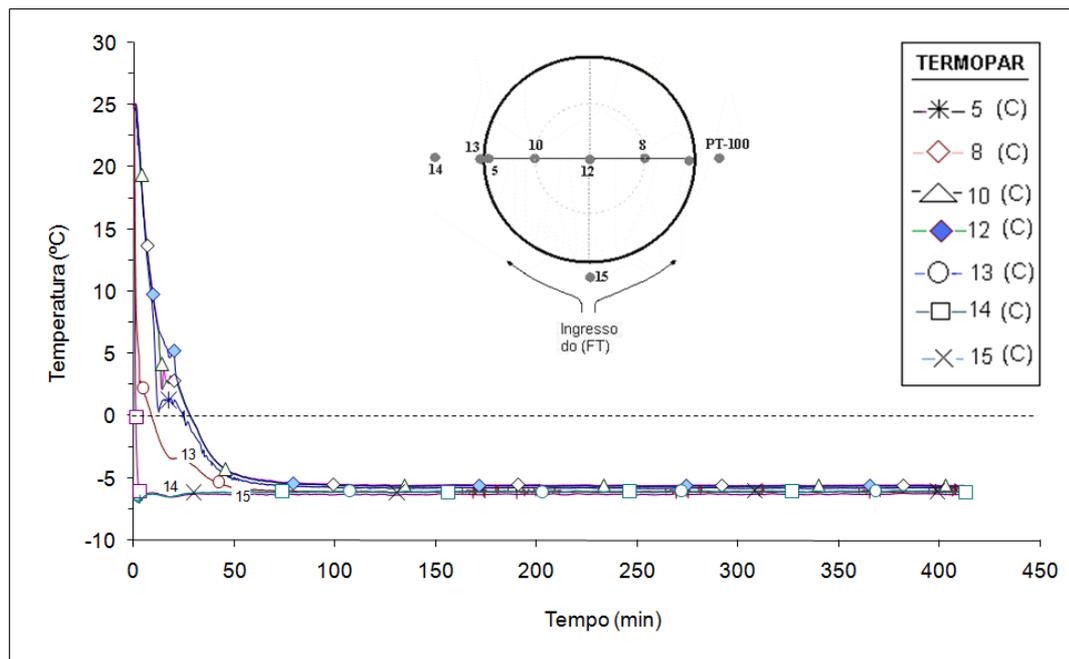


Figura 26. Super-resfriamento em alumínio  $\xi = 2,08\ \mu\text{m}$  FT  $-6\text{ °C}$ , para 80 mm

### 3.1.2. Super-Resfriamento com Nucleação

Nas Figs. 27 e 28, são mostrados gráficos de super-resfriamento com nucleação do MMF. As comparações foram obtidas para distintas cápsulas, tanto de 30 e 80 mm de diâmetro. Esta curva é característica em cápsulas de materiais condutores e temperaturas baixas do FT. O processo de resfriamento inicia com a temperatura do MMF em  $25\text{ °C}$ , logo atinge a temperatura de mudança de fase de  $0\text{ °C}$  e se mantém em estado super-resfriado por um período de tempo considerável, acontecendo depois a nucleação e posteriormente a mudança de fase do MMF.

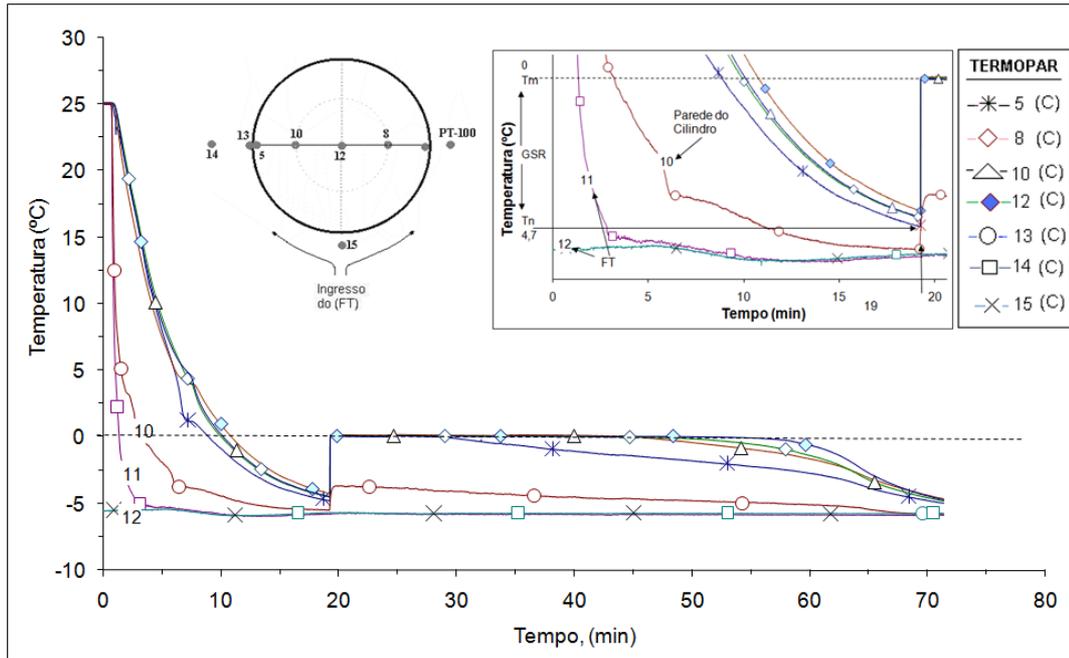


Figura 27. Resfriamento da cápsula cilíndrica de acrílico FT  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $\xi = 2,10 \mu\text{m}$   
 $D = 30 \text{ mm}$

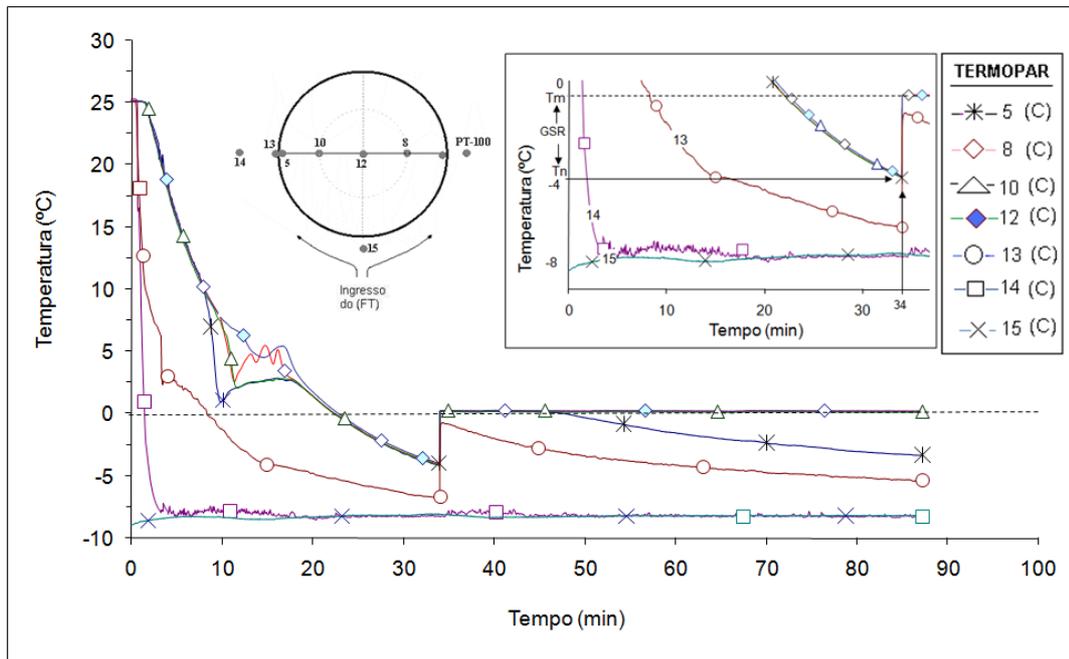


Figura 28. Super-resfriamento em alumínio  $\xi = 9,51 \mu\text{m}$  FT  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $D = 80 \text{ mm}$

### 3.1.3. Hiper- Resfriamento com Nucleação

Curvas típicas do fenômeno de Hiper-resfriamento com nucleação pode ser observadas na Fig. 29. A temperatura do MMF inicia em 25 °C, logo desce, passando pela temperatura de inversão de massa específica (4 °C), posteriormente fica abaixo da temperatura de mudança de fase (0 °C) e em estado de super-resfriamento. Neste processo o MMF (termopar 5) se mantém por um período curto de tempo em estado metaestável, atingindo um grau de super-resfriamento de -1 °C, devido provavelmente a elevada energia armazenada em forma de calor sensível. O MMF da região do termopar 5 muda de fase rapidamente, este fenômeno é chamado de hiper-resfriamento.

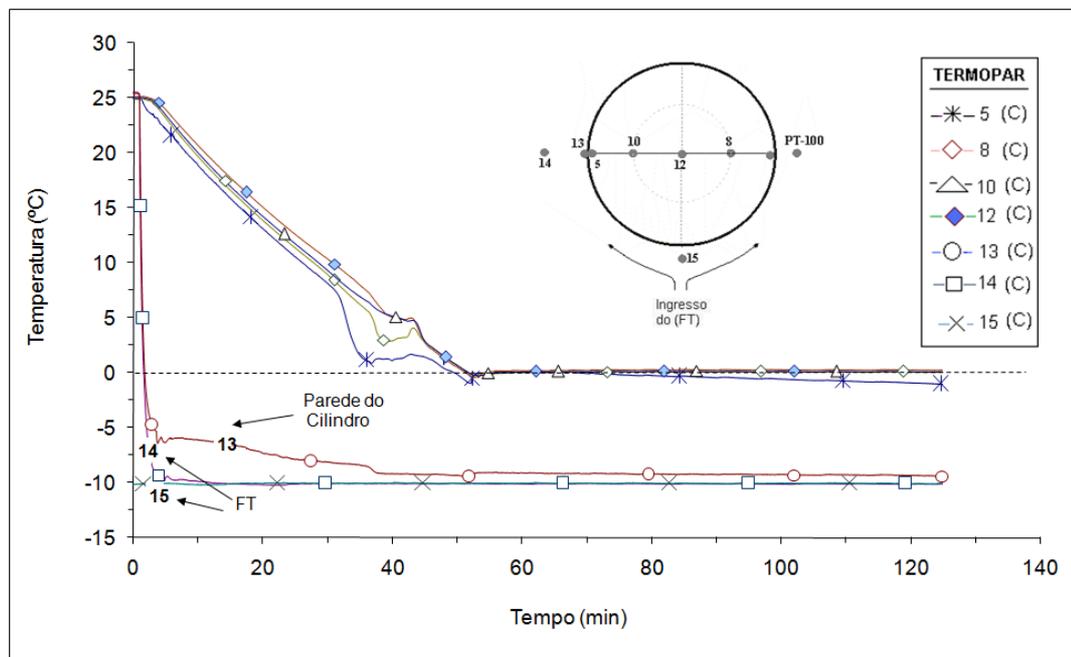


Figura 29. Hiper-resfriamento em acrílico,  $\xi = 0,05 \mu\text{m}$  FT -10°C, 80 mm

### 3.1.4. Super-Resfriamento Duplo

O super-resfriamento duplo é amostrado na Fig. 30, onde a temperatura do início do MMF é de 25 °C, logo desce passando pela temperatura de inversão da massa específica (4 °C) e abaixo da temperatura de mudança de fase, mantendo o estado líquido metaestável. Logo, por algum motivo ainda não determinado, o MMF

sai do estado de super-resfriamento (acima da temperatura de mudança de fase), a temperatura desce novamente atingindo o super-resfriamento (pela segunda vez). Posteriormente acontece a nucleação, atingindo a temperatura de 0 °C, para logo dar início à mudança de fase.

Este fenômeno é apresentado poucas vezes nos testes realizados e pode ser mais uma consequência da mistura de fluidos em diferentes temperaturas do próprio fenômeno de super-resfriamento.

Na Fig. 31 é apresentado outro exemplo de super-resfriamento duplo. Neste gráfico, o efeito da variação da temperatura do termopar 5 mostra o que poderia ser chamado de super-resfriamento duplo.

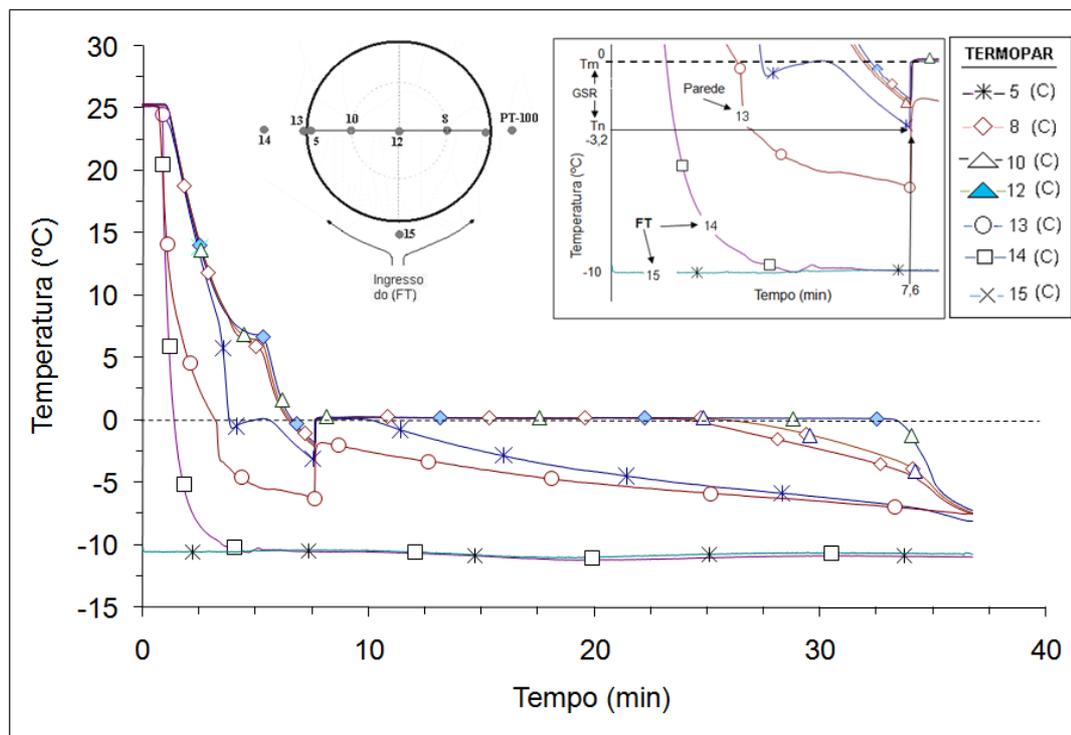


Figura 30. Resfriamento da cápsula de alumínio,  $T_{FT} = -10^{\circ}\text{C}$ ,  $\xi = 2,62 \mu\text{m}$ ,  $D = 30 \text{ mm}$

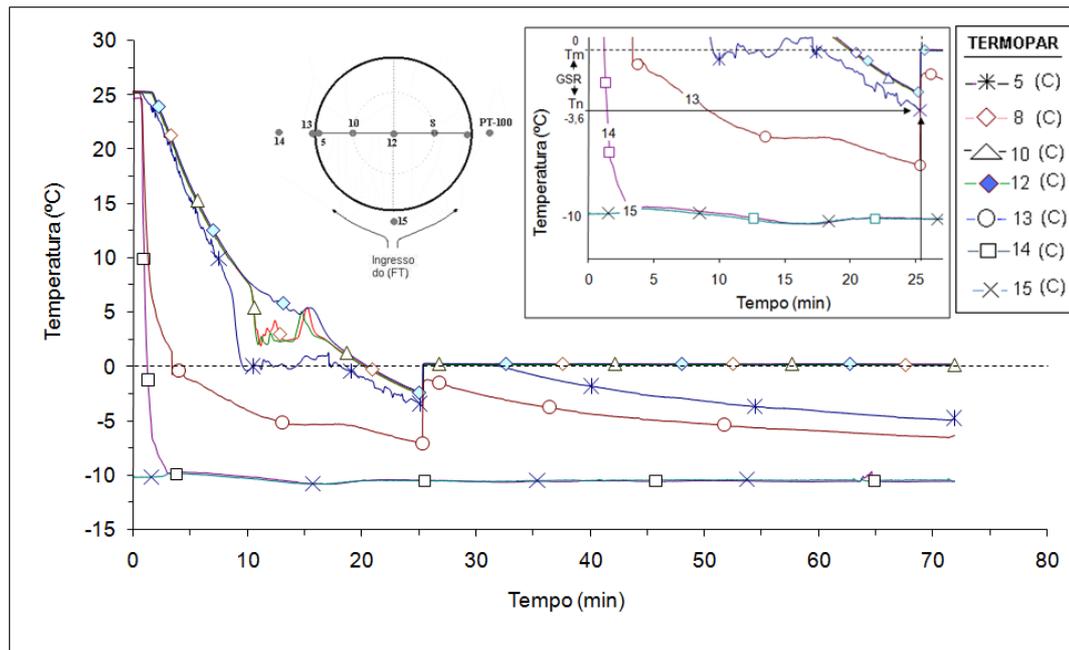


Figura 31. Resfriamento da cápsula de alumínio,  $\xi = 9,51 \mu\text{m}$ ,  $T_{FT} = -10^\circ\text{C}$ ,  $D = 80 \text{ mm}$

As características típicas encontradas mostram concordância com as pesquisas feitas por Milón e Braga (2001, 2003), no caso de cápsulas cilíndricas de 45 mm de diâmetro.

### 3.2. Estudo da Taxa de Resfriamento

Diferentes autores (Gilpin 1975; Lee et al 1996; Tsuyoshi et al, 1998; Chen et al, 1999; Okawa et al, 2001; Milón e Braga (2001-2003); Kousksoo et al, 2004; Arshad Hhan et al 2005; Seiji Okawa et al, 2005; Sébastien Balibar et al, 2006), mostraram que um dos principais fatores de influência nos processos de super-resfriamento e nucleação é a chamada taxa de resfriamento, definida como a relação entre tempo total de super-resfriamento e o grau de super-resfriamento (Fig. 32). Segundo Milón e Braga, a taxa de resfriamento varia com o tipo do material, com a rugosidade da cápsula, e com a temperatura do FT. Esta etapa de pesquisa pretende avaliar a influência do diâmetro da cápsula na determinação da taxa de resfriamento.

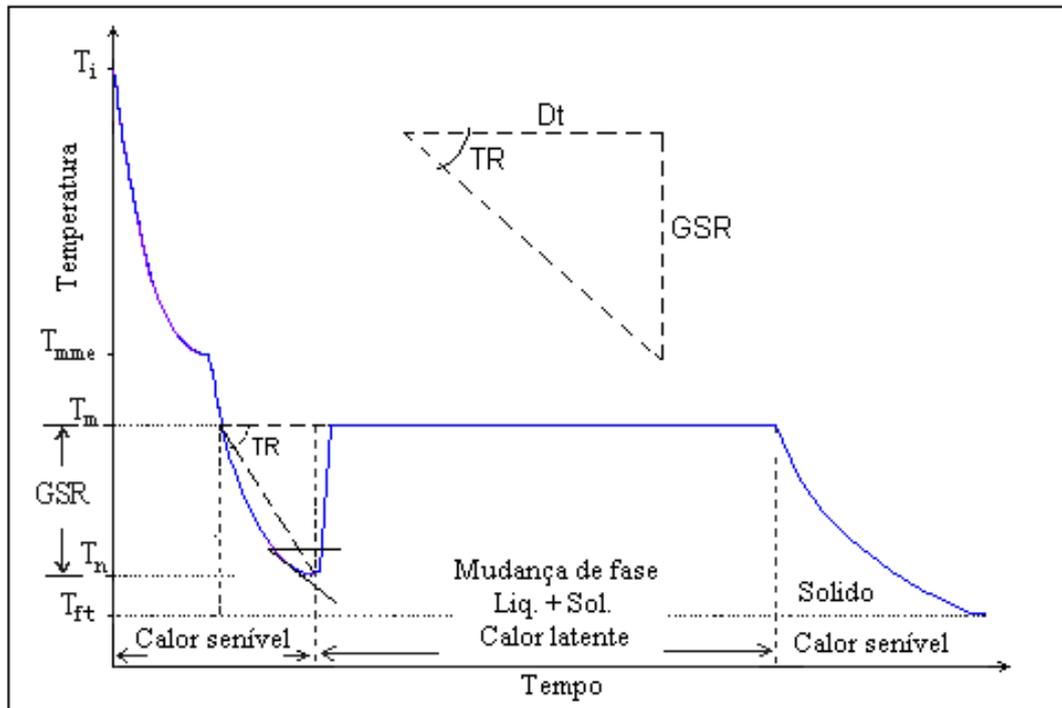


Figura 32. Característica da taxa de resfriamento

Definição:

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^n TR_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - T_{Pi-1})}{n \Delta t_a}$$

$$TR = \frac{GSR}{Dt}$$

$$Dt = n \cdot t_a$$

$$GSR = (T_m - T_n)$$

TR Taxa de resfriamento, [ $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ]

$T_{Pi}$  Temperatura da parede interna, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta t_a$  Intervalo de tempo decorrido entre duas aquisições consecutivas da temperatura, [s]

n Número de intervalo de tempo

Dt Tempo total de super-resfriamento medido desde o instante em que o ponto passa pela temperatura de mudança de fase até a nucleação, [s]

GSR Grau de super-resfriamento, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### 3.2.1. Estudo do Conceito de Taxa de Resfriamento

Para analisar a taxa de resfriamento para o MMF, dentro das cápsulas cilíndricas, foram avaliadas diversas cápsulas cilíndricas de 30 e 80 mm de diâmetro, os testes foram realizados com diferentes temperaturas do fluido de transferência FT ( $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$  e  $-10^{\circ}\text{C}$ ). As Figs. 33 e 34 apresentam resultados resumidos para determinar qual é a posição adequada para a definição da taxa de resfriamento. Chega-se à conclusão que a taxa de resfriamento depende da posição do sensor na parede interna da cápsula. Pode-se observar nas mesmas Figs. 33 e 34 que o grau de incerteza aumenta da parte inferior para a parte superior. Desta análise foi tomada a média dos valores para cada caso, chegando à conclusão que se tem uma menor incerteza para o sensor 7, correspondente ao sensor inferior da superfície interna do cilindro. Esta análise também concorda com a definição estudada por Milón e Braga (2001-2003).

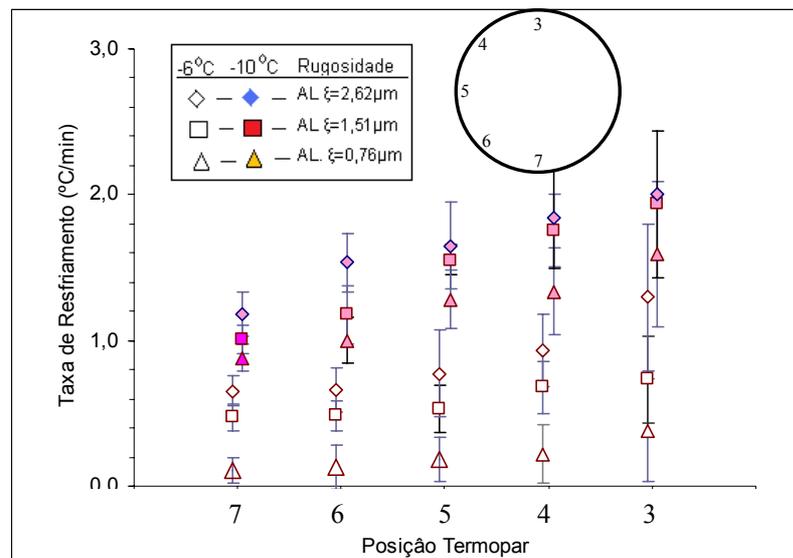


Figura 33. Taxa de resfriamento, cápsula de alumínio e temperaturas  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$  D = 30 mm

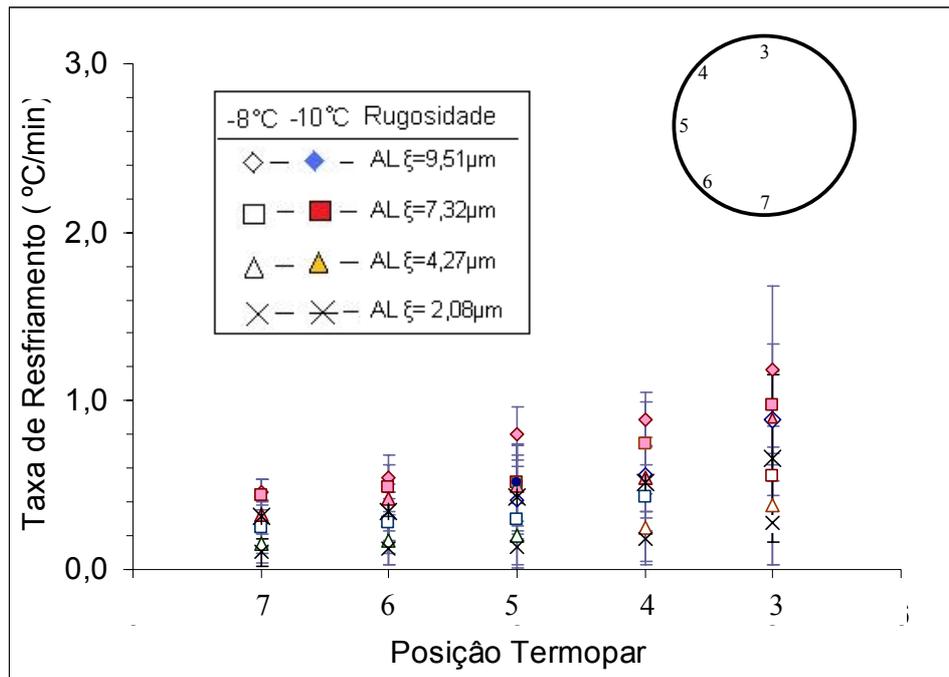


Figura 34. Taxa de Resfriamento, cápsula de alumínio e temperatura  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$   $D=80$  mm

Na Fig. 35, é apresentada a taxa de resfriamento variando com a posição do termopar com diferentes diâmetros da cápsula. Pode-se observar que o espalhamento<sup>1</sup> é sempre maior para as posições superiores do termopar da parede interna. Outra conclusão é que diâmetros maiores correspondem a taxas de resfriamento menores, isto principalmente devido ao fato de que diâmetros maiores correspondem a volumes do MMF maiores, apresentando, em consequência, maior tempo de super-resfriamento.

Na mesma Fig. 35 são apresentados resultados da pesquisa de Milón e Braga (2003), pode-se observar concordância com estes resultados para o diâmetro de 45 mm.

Para os resultados da Fig. 35 é preciso esclarecer que a rugosidade foi um parâmetro que se poderia considerar constante.

<sup>1</sup> Mudança de direção de uma onda (para várias direções), depois de atingir partículas distribuídas aleatoriamente.

De acordo com a análise apresentada, pode-se deduzir que o termopar mais adequado para definir a taxa de resfriamento está localizado na parte inferior da parede interna da cápsula (Termopar 7).

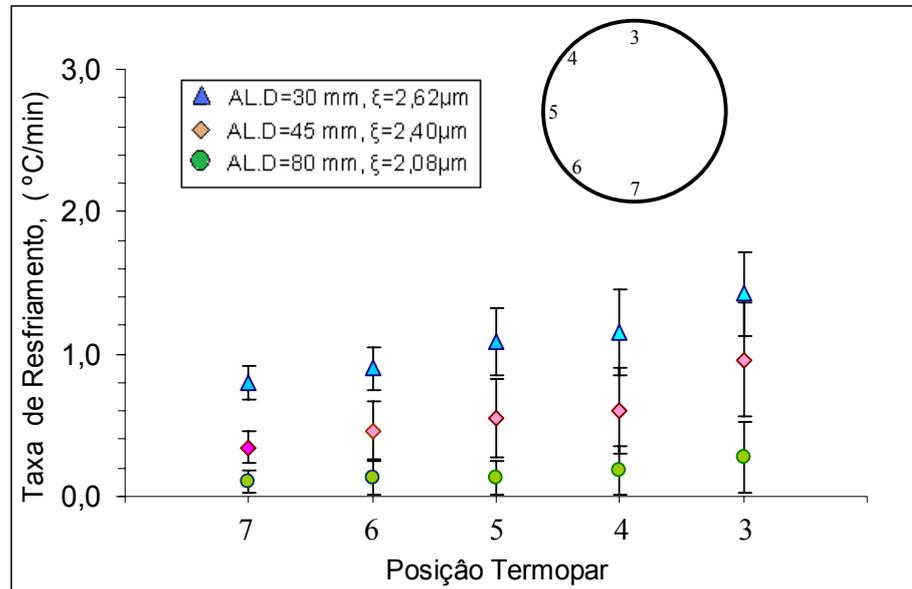


Figura 35. Taxa de resfriamento para FT  $-8^{\circ}\text{C}$  com 30 e 80 mm de diâmetro

Com esta nova definição da taxa de resfriamento, apresentamos na Fig. 36 a variação da TR para diferentes temperaturas do FT, diferentes materiais e rugosidades da parede interna da cápsula. Pode-se concluir que tempos maiores do Dt correspondem a menores temperaturas do FT e menores rugosidades da parede interna da cápsula

Na mesma Fig. 36 é possível observar que maiores rugosidades da parede interna correspondem a maiores taxas de resfriamento, isto devido principalmente, ao aumento da área de troca de calor na parede interna da cápsula.

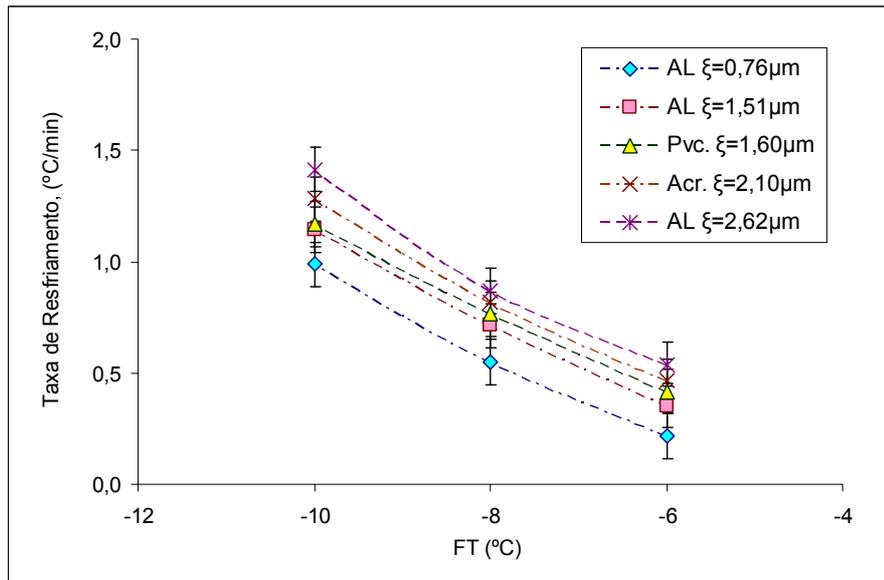


Figura 36. Taxa de Resfriamento para diferentes materiais de 30 mm

### 3.2.2. Estudo da Taxa de Resfriamento

A Fig. 37 mostra a relação entre o tempo total de super-resfriamento e a taxa de resfriamento para cápsulas cilíndricas de alumínio, com  $D = 30$  mm para as diferentes rugosidades:  $\xi=0,76 \mu\text{m}$ , e  $\xi=2,62 \mu\text{m}$ . A taxa de resfriamento está definida para a posição inferior da parede interna da cápsula. Os resultados mostraram que para cápsulas de alumínio a TR aumenta quando menor for a temperatura do FT e maior a rugosidade da parede interna da cápsula. A mesma Fig. 37 indica que tempos maiores do Dt correspondem a menores temperaturas do FT e menores rugosidades da parede interna da cápsula.

Com temperaturas maiores do FT a  $-6^\circ\text{C}$ , o processo de nucleação não acontece e o conceito de TR não pode ser aplicado.

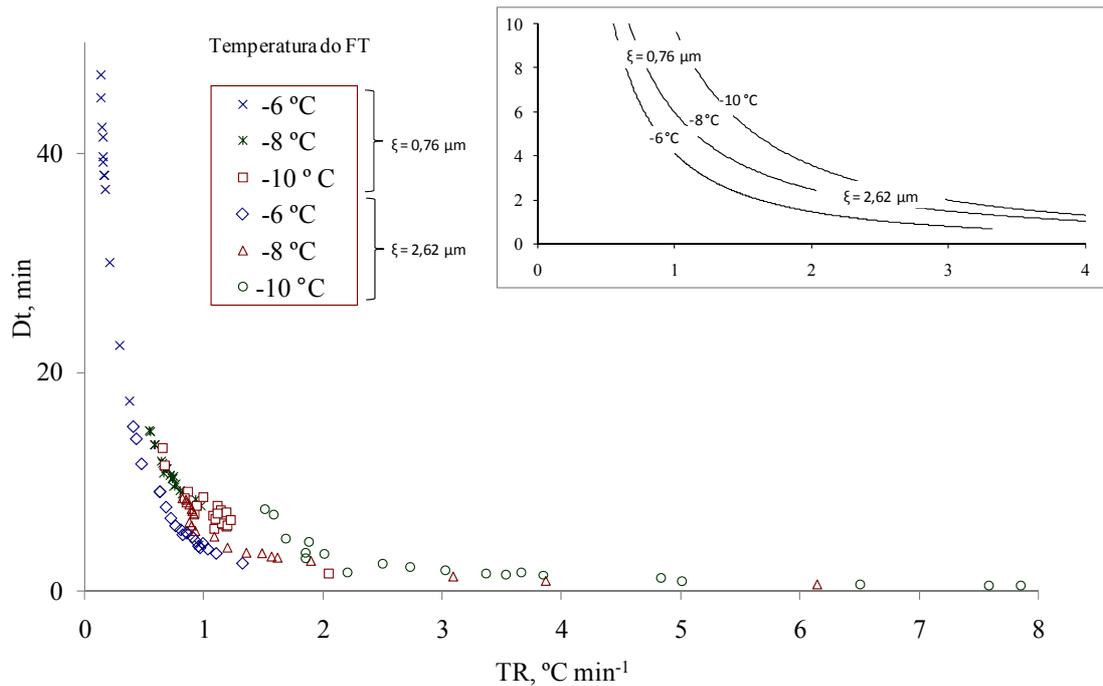


Figura 37. Variação do Dt com a TR para cápsulas de alumínio de 30 mm com diferentes rugosidades

A Fig. 38 mostra a variação do Dt com a taxa de resfriamento para cápsulas cilíndricas de alumínio com  $D = 80$  mm, para as rugosidades de  $\xi = 2,08$  μm,  $\xi = 4,27$  μm, e  $\xi = 9,51$  μm.

Os resultados mostraram que para cápsulas de alumínio a TR aumenta quando menor for a temperatura do FT e maior a rugosidade da parede interna da cápsula. A mesma Fig. 38, indica que tempos maiores do Dt correspondem a menores temperaturas do FT e menores rugosidades da parede interna da cápsula.

Com temperaturas do FT maiores a  $-6^{\circ}\text{C}$ , o processo de nucleação não acontece e o conceito de TR não pode ser aplicado, isto coincide com o o que mostra a Fig. 37.

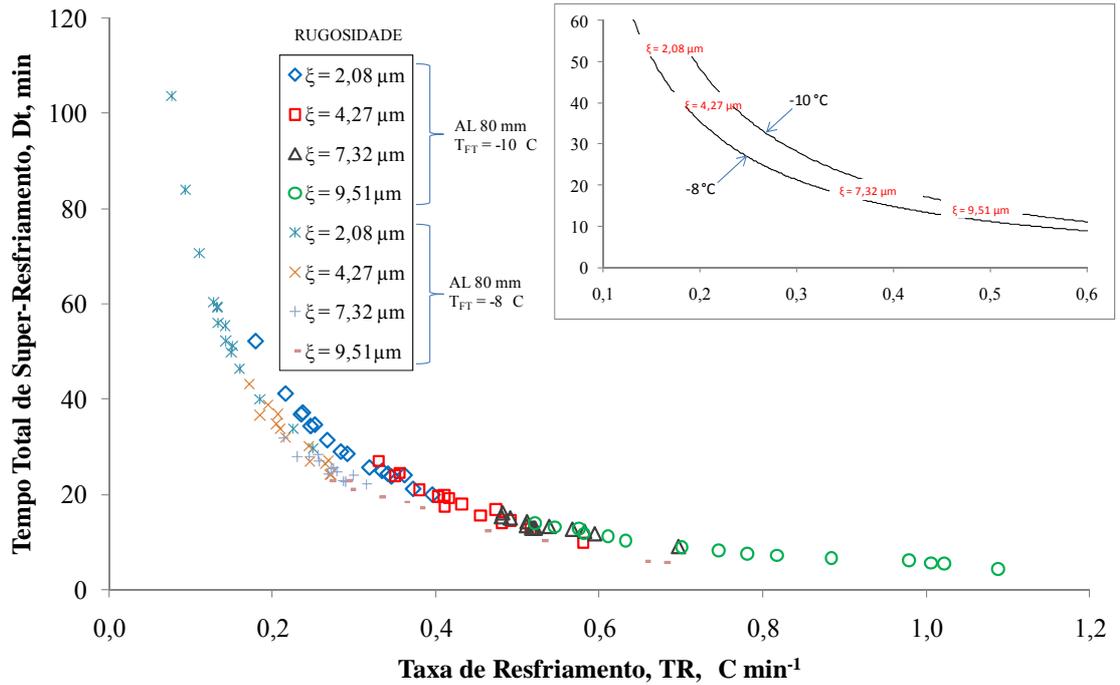


Figura 38. Variação do Dt com a TR para cápsulas de alumínio de 80 mm com diferentes rugosidades

Na Fig. 39 pode-se observar a variação do Dt com a TR para diferentes materiais. Os resultados indicam que para materiais condutores, a taxa de resfriamento é maior. É possível observar também que as curvas do acrílico e do PVC coincidem (condutividades térmicas semelhantes). Se pode concluir que a condutividade térmica é um parâmetro importante na determinação da taxa de resfriamento.

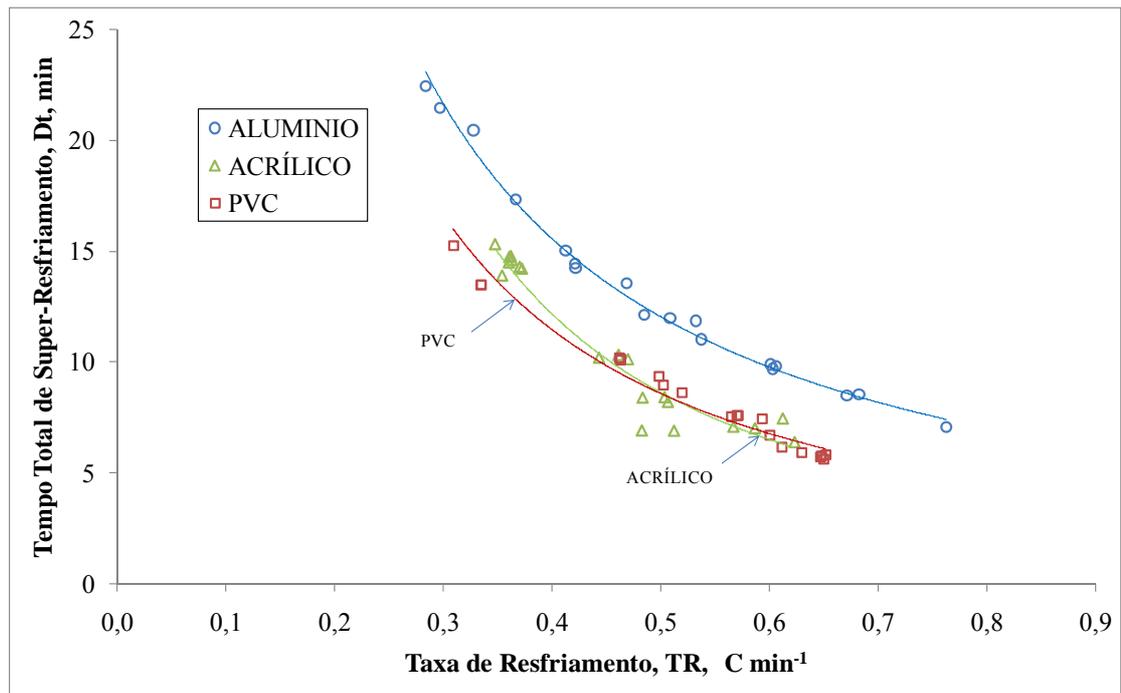


Figura 39. Variação do Dt com a TR para cápsulas de alumínio de 80 mm com diferentes rugosidades

A Fig. 40 mostra a variação do tempo total de super-resfriamento com a taxa de resfriamento para diferentes diâmetros de cápsula. É possível concluir que diâmetros maiores correspondem à taxas de resfriamento maiores. Isto acontece devido, principalmente, aos diâmetros maiores implicarem volumes maiores a serem resfriados em tempos maiores.

Os resultados coincidem com os dados da pesquisa de Milón e Braga (2003) onde mostram o resultado para cápsulas de diâmetro 45 mm.

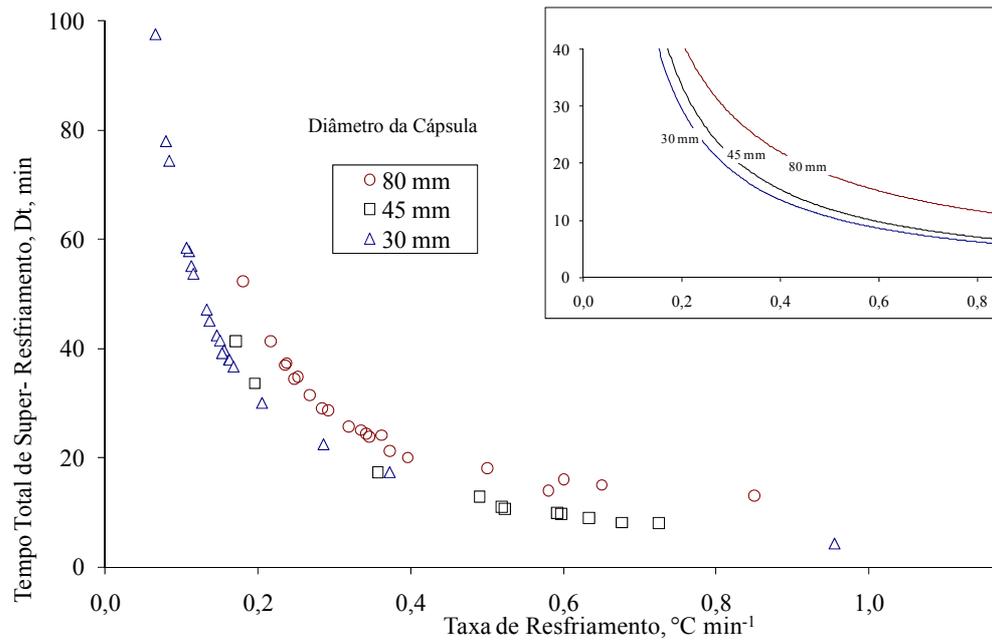


Figura 40. Variação do Dt com a TR para cápsulas de alumínio com diferentes diâmetros

Podemos concluir, no estudo da taxa de resfriamento, que os parâmetros que influenciam na determinação desta variável são: a posição do sensor na parede interna da cápsula, a temperatura do FT, a rugosidade da parede interna da cápsula, o material da cápsula e o diâmetro interno da cápsula.

### 3.3. Análise Estatística do Super-Resfriamento e da Nucleação

O super-resfriamento e a nucleação da água dentro de cápsulas cilíndricas dependem de muitas variáveis. Para realizar um estudo que determine suas relações com outros parâmetros é necessário realizar uma análise estatística.

As Tabelas 8 e 9 mostram as características das cápsulas utilizadas para esta etapa da pesquisa, descrevendo as cápsulas de 30 e 80 mm, respectivamente.

Tabela 8. Características das cápsulas de 30 mm de diâmetro

Diâmetro (mm)	Material	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )
30	Alumínio	0,76
		1,51
		2,62
	Acrílico	2,10
	PVC	1,60

Tabela 9. Características das cápsulas com 80 mm de diâmetro

Material	Diâmetro (mm)	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )
80	Alumínio	2,08
		4,27
		7,32
		9,51
	Acrílico	0,05
	PVC	1,81

Mostra-se na Fig. 41 a variação da probabilidade de super-resfriamento com a temperatura do FT para diferentes materiais e com diâmetro 30 mm. Conclui-se que a probabilidade de super-resfriamento é maior para materiais de menor condutividade térmica, neste caso, o PVC e o acrílico. A Taxa de variação de temperatura é diminuída pela baixa condutividade térmica da cápsula (materiais isolantes), mantendo o MMF super-resfriado por tempos mais longos, quando comparados com materiais de alta condutividade térmica.

Como estudado, por Milón e Braga (2003), a curva é de tendência e do tipo exponencial:

$$PS = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-c \cdot x}} \dots\dots\dots (01)$$

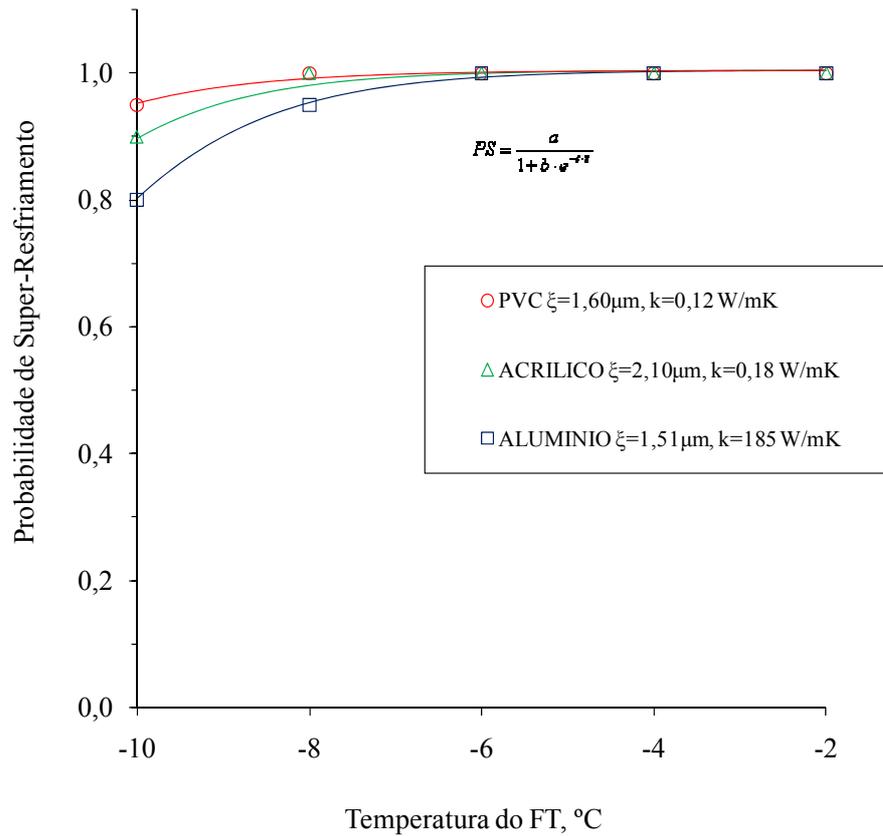


Figura 41. Probabilidade de Super-resfriamento, em diferentes temperaturas em cápsulas de 30 mm de diâmetro

Na Fig. 42, é apresentada a probabilidade de nucleação para cápsulas de alumínio de 30 mm de diâmetro e diferentes materiais. Pode-se observar que para maiores valores de condutividade, a probabilidade de nucleação aumenta seguindo a curva:

$$PN = a + \frac{b}{1 + b \cdot e^{-\left(\frac{x-c}{d}\right)}} \dots\dots\dots(02)$$

Como mostrado na Fig. 42, materiais com alta condutividade apresentam altas TR, e em conseqüência, altas probabilidades para que ocorra nucleação no MMF.

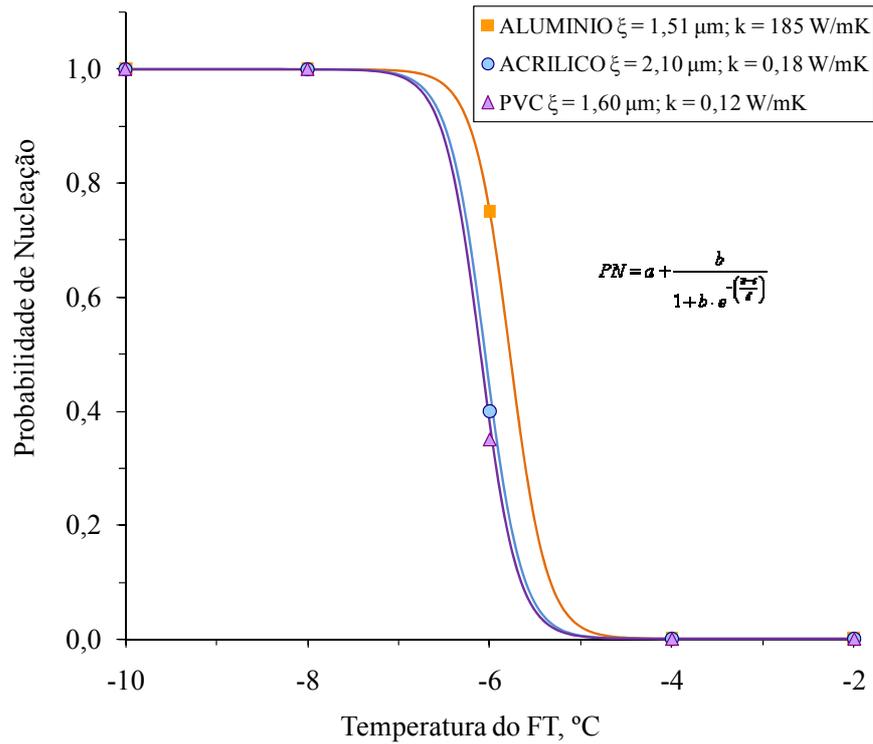


Figura 42. Probabilidade de Super-resfriamento em diferentes temperaturas FT, cápsulas de 30 mm de diâmetro

Na Fig. 43, mostra-se a probabilidade de super-resfriamento para MMF em cápsulas de 80 mm de diâmetro. Contrário ao observado na Fig. 42, para cápsulas de 80 mm, a probabilidade de super-resfriamento aumenta em materiais de alta condutividade térmica, este fenômeno ainda não foi completamente explicado e será proposto para trabalhos futuros.

Na Fig. 44, é apresentada a probabilidade de nucleação para cápsulas de 80 mm de diâmetro em diferentes materiais. Nestes resultados, pode-se observar que para materiais de baixa condutividade a probabilidade de nucleação aumenta.

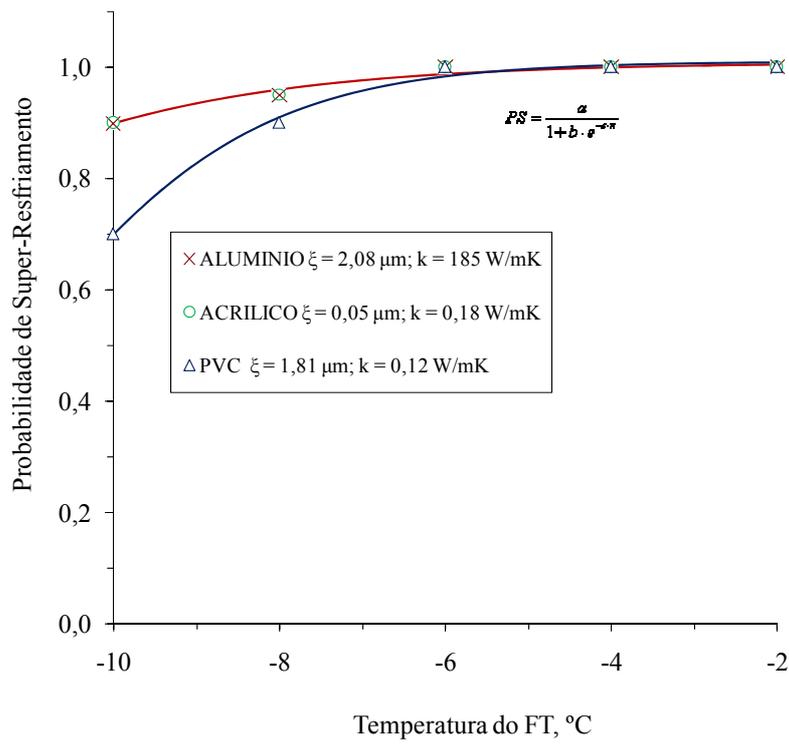


Figura 43. Probabilidade de Nucleação em diferentes temperaturas FT, cápsulas de 80 mm de diâmetro

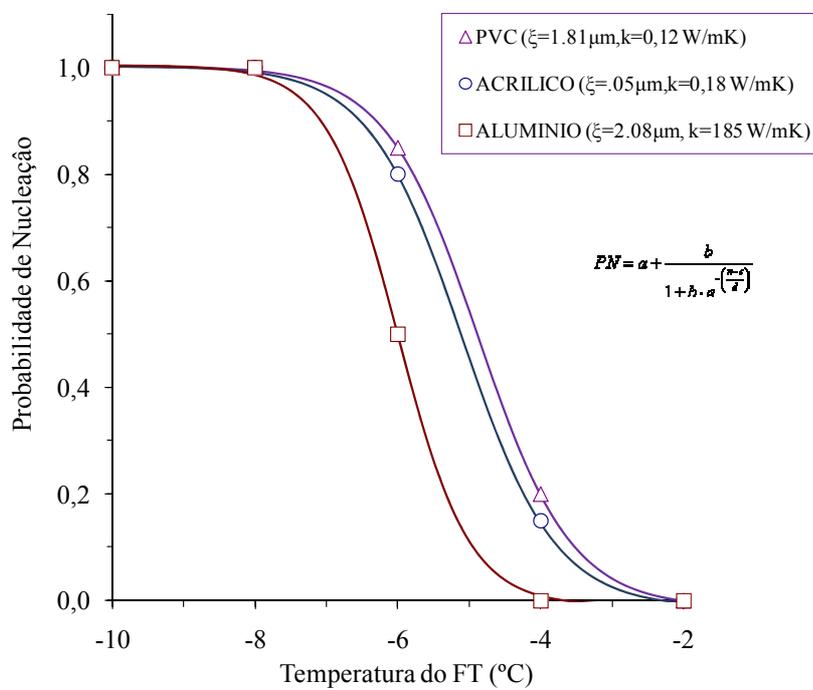


Figura 44. Probabilidade de Nucleação em diferentes temperaturas FT, cápsulas de 80 mm de diâmetro

Nas Figs. 45 e 46 se apresentam testes realizados com o mesmo material e diâmetro da cápsula mais com diferentes rugosidades da parede interna.

Na Fig. 45 pode-se observar a variação da probabilidade de super-resfriamento com a temperatura do FT. É possível concluir que para maiores rugosidades correspondem menores probabilidades de super-resfriamento. O resultado pode ser devido ao fato de que quando há maiores rugosidades, a superfície em contato com o MMF tem mais pontos para a nucleação acontecer, então a probabilidade de super-resfriamento diminui.

A rugosidade da parede interna é uma propriedade física que predomina no fenômeno de super-resfriamento, tornando-se uma possível solução para evitar o super-resfriamento em sistemas de termoacumulação.

Na Fig. 46 é mostrado o fenômeno de nucleação para diferentes rugosidades de cápsulas de alumínio de 30 mm de diâmetro. Como mencionado anteriormente, valores altos da rugosidade correspondem a maiores probabilidades de nucleação.

Os resultados anteriores complementam os estudos realizados por Milón e Braga (2003) e a probabilidade de nucleação e super-resfriamento são definidas para diferentes diâmetros de cápsulas.

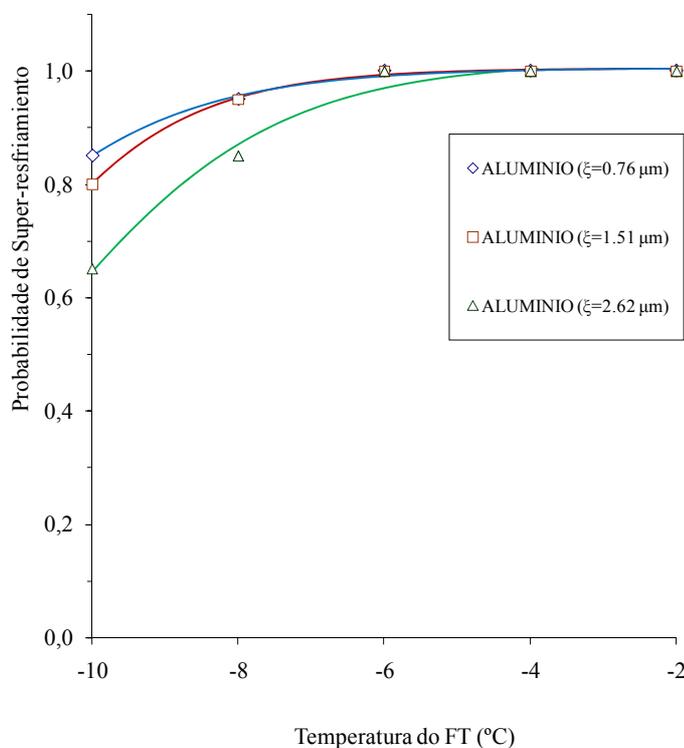


Figura 45. Probabilidade de super-resfriamento em diferentes temperaturas FT em cápsulas de Alumínio de 30 mm de diâmetro

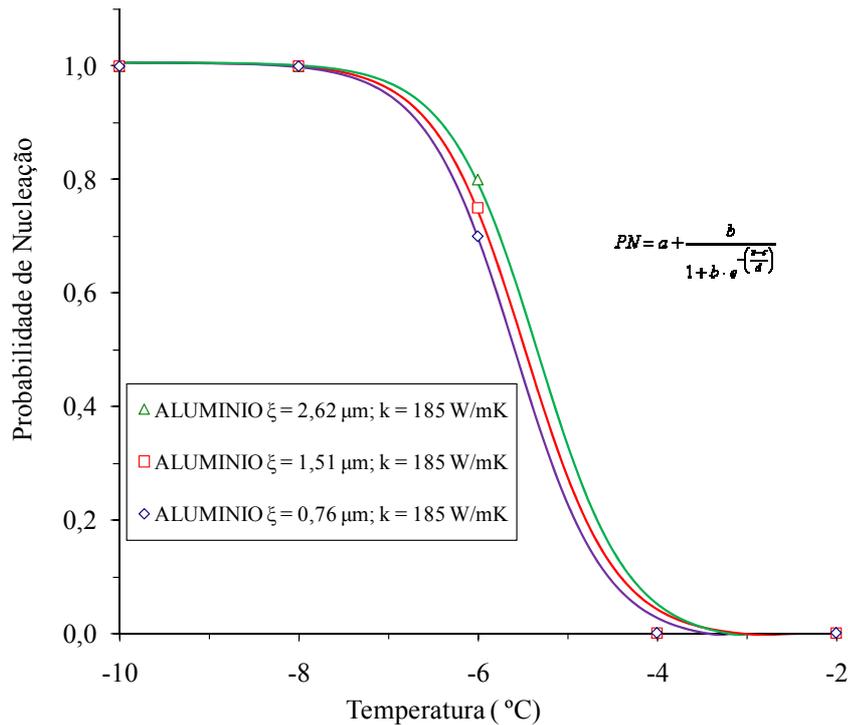


Figura 46. Probabilidade de nucleação em diferentes temperaturas FT em cápsulas de Alumínio de 30 mm de diâmetro

Na Fig. 47 podemos observar a probabilidade de super-resfriamento para cápsulas do mesmo material (alumínio), mesmo diâmetro, e diferentes rugosidades. Os resultados concordam com a Fig. 45, onde se indica que para maiores rugosidades, a probabilidade de super-resfriamento diminui.

A Fig. 48 mostra a probabilidade de nucleação para cápsulas de alumínio de 80 mm de diâmetro com diferentes rugosidades. Os resultados também concordam com os da Fig. 46, a probabilidade de nucleação é maior para maiores rugosidades da parede interna da cápsula.

Das Figs. 45, 46, 47, e 48, podemos concluir que valores altos da rugosidade apresentam menores probabilidades de super-resfriamento e maiores probabilidades de nucleação do MMF, independente do diâmetro da cápsula.

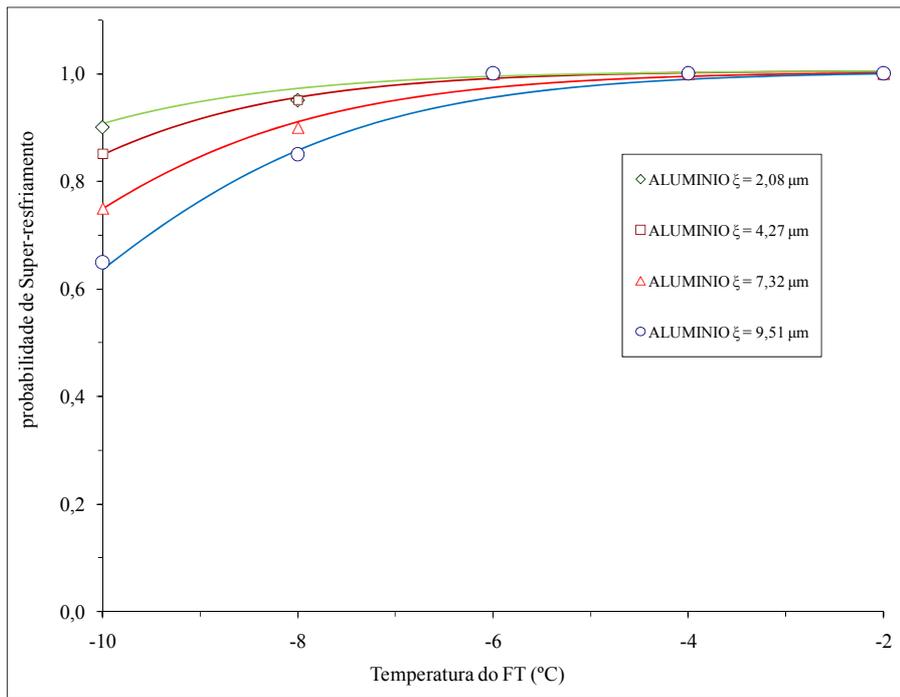


Figura 47. Probabilidade de super-resfriamento em diferentes temperaturas FT, cápsulas de Alumínio de 80 mm de diâmetro

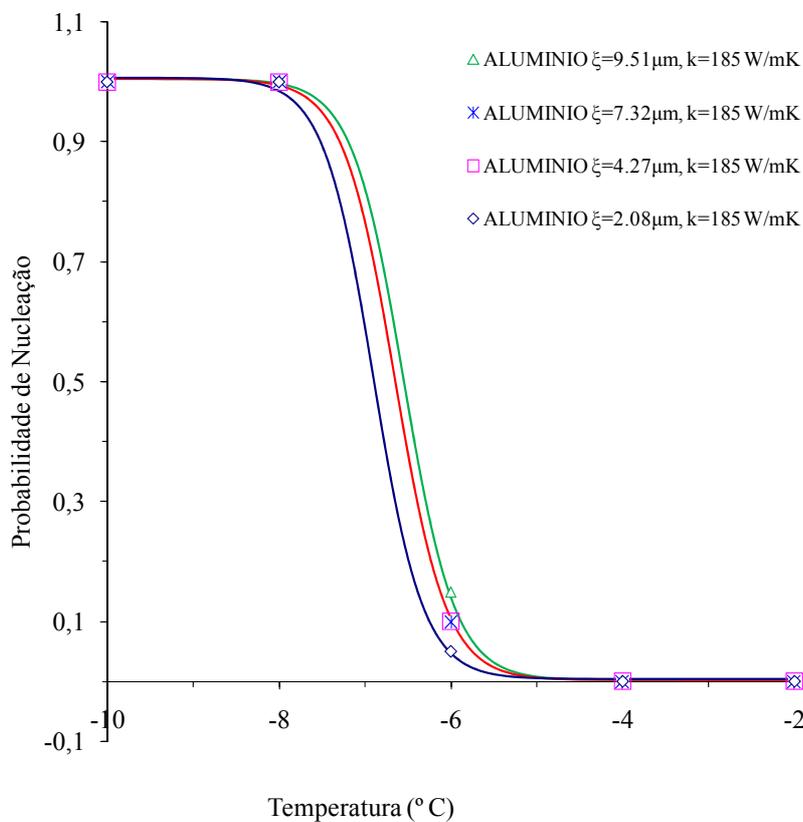


Figura 48. Probabilidade de nucleação em diferentes temperaturas FT, cápsulas de Alumínio de 30 mm de diâmetro

Na Figs. 49 e 50 são apresentados resultados dos testes com cápsulas de alumínio de 30 e de 80 mm.

A Fig. 49 mostra a probabilidade de super-resfriamento para ambos diâmetros. Pode-se observar em termos gerais que para a mesma rugosidade, a cápsula de 80 mm apresenta maiores probabilidades de super-resfriamento. Outra observação é que a cápsula de 80 mm de diâmetro e com rugosidade de 9,51  $\mu\text{m}$  apresenta aproximadamente a mesma probabilidade de super-resfriamento que a cápsula de 30 mm e rugosidade de 2,32  $\mu\text{m}$ . Este último caso corrobora a teoria da alta influência da rugosidade no processo de super-resfriamento, isto é, apesar de que a cápsula de 80 mm apresenta um volume muito maior que a cápsula de 30 mm, a rugosidade elevada da primeira cápsula, faz com que apresente a mesma probabilidade de super resfriamento que a cápsula de 30 mm.

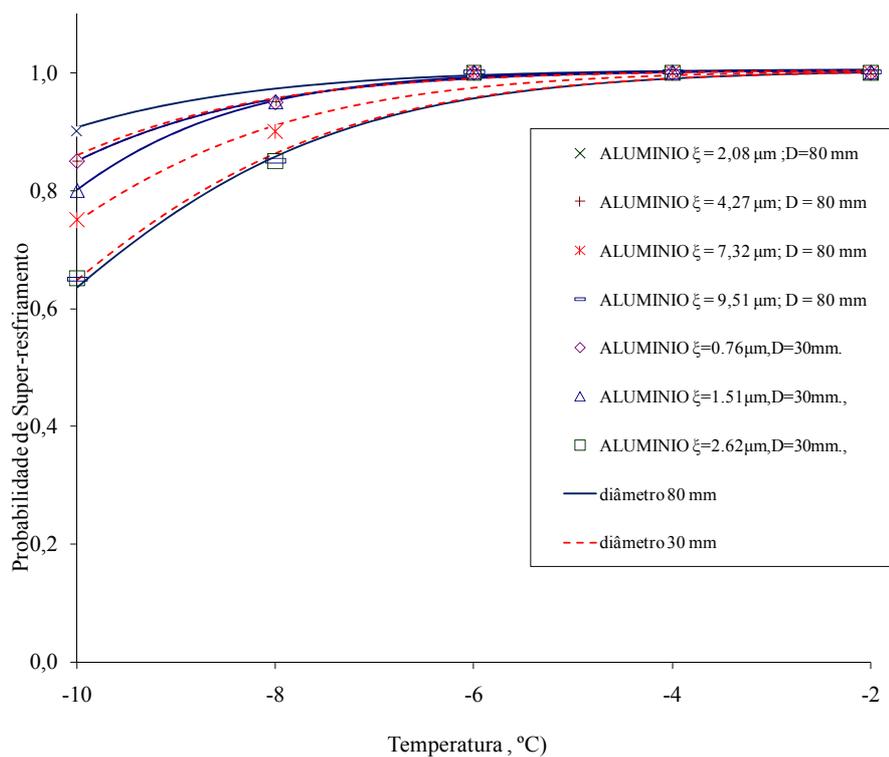


Figura 49. Probabilidade de super-resfriamento em diferentes temperaturas FT, cápsulas de Alumínio de 30 e 80 mm de diâmetro

Na Fig. 50 pode-se observar a probabilidade de nucleação para cápsulas de 80 e 30 mm de diâmetro. Os resultados indicam que para esta faixa de rugosidade, a probabilidade de nucleação é sempre maior em cápsulas de menor diâmetro.

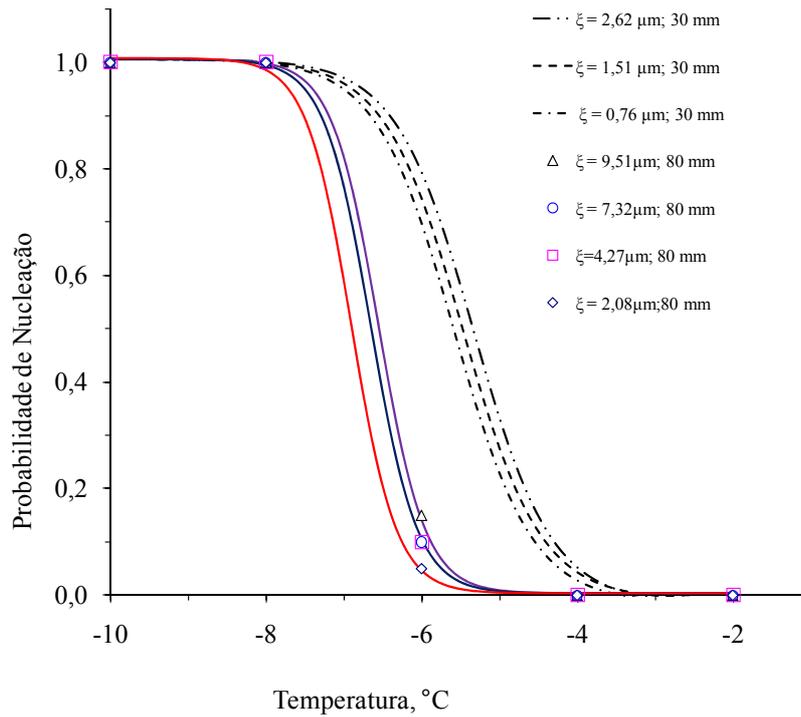


Figura 50. Probabilidade de nucleação em diferentes temperaturas FT, cápsulas de Alumínio de 30 mm e 80 mm de diâmetro

### 3.4. Tempo Total até a nucleação

Na Fig. 51 é observada a variação do tempo desde o início do teste até que aconteça a nucleação ( $t_{TN}$ ), isto para cápsulas de 80 mm e 30 mm de diâmetro com uma temperatura do FT de  $-10^{\circ}\text{C}$ . O tempo  $t_{TN}$  se reduz significativamente para cápsulas de 30 mm em comparação com as cápsulas de 80 mm de diâmetro, deduzindo que o tempo  $t_{TN}$  depende do volume do MMF e da temperatura do FT.

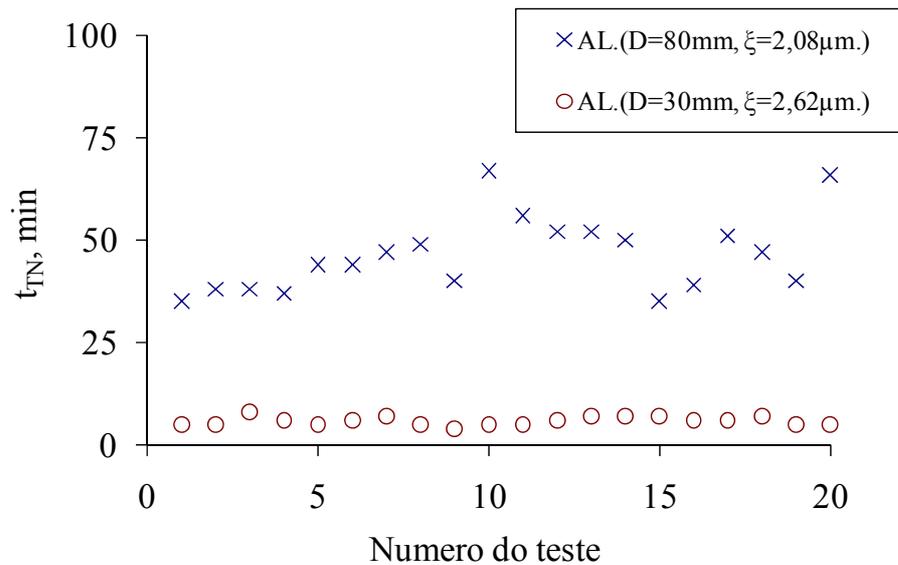


Figura 51. Cápsulas de alumínio 30 e 80 mm de diâmetro para  $T_{FT} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e diferentes rugosidades.

Equivalente à Fig. 51, nas Figs. 52 e 53 é apresentada a variação do tempo desde o início do teste até que aconteça a nucleação ( $t_{TN}$ ), para cápsulas de 80 e 30 mm de diâmetro com  $T_{FT} = -8^{\circ}\text{C}$  (Fig. 52) e  $T_{FT} = -10^{\circ}\text{C}$  (Fig 53). Inclui-se desta vez o resultado da pesquisa de Milón e Braga (2003).

Pode-se concluir que a ocorrência do fenômeno de nucleação ( $t_{TN}$ ) é menor enquanto menor for o volume do MMF concordando com Milón e Braga (2003). É possível observar que a rugosidade da parede interna da cápsula influencia no tempo  $t_{TN}$ , porém, para a cápsula de 45 mm de diâmetro e  $\xi = 0,6\text{ }\mu\text{m}$ , apresenta um  $t_{TN}$  menor do que para a cápsula de 30 mm de diâmetro e  $\xi = 0,6\text{ }\mu\text{m}$ .

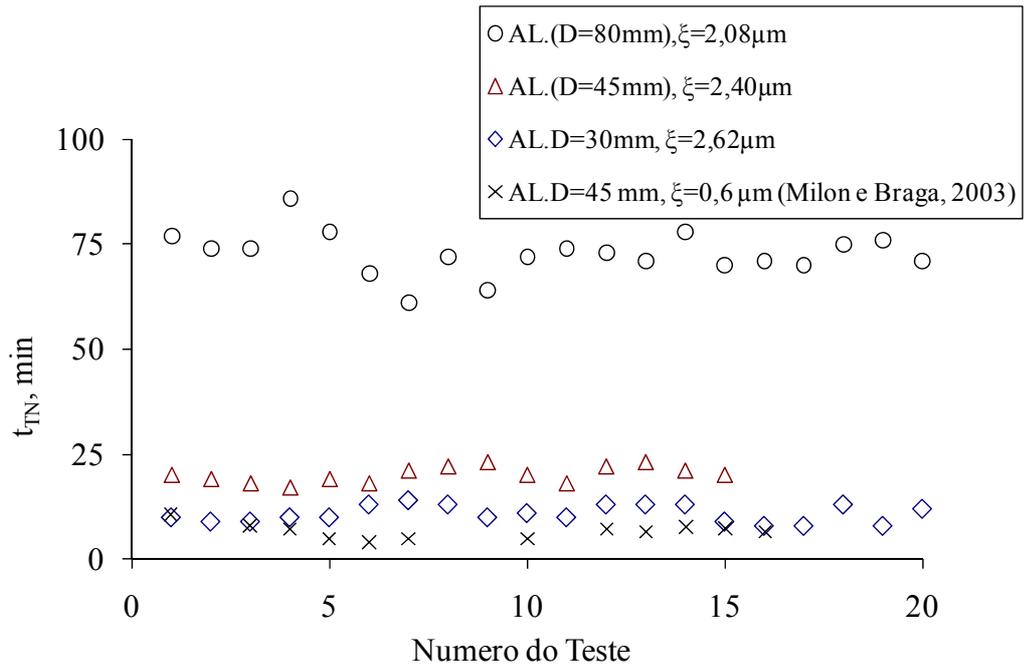


Figura 52. Experiências para FT = -8°C em cápsulas de 30 mm, 45 mm e 80 mm de diâmetro, comparação com Milón e Braga (2003)

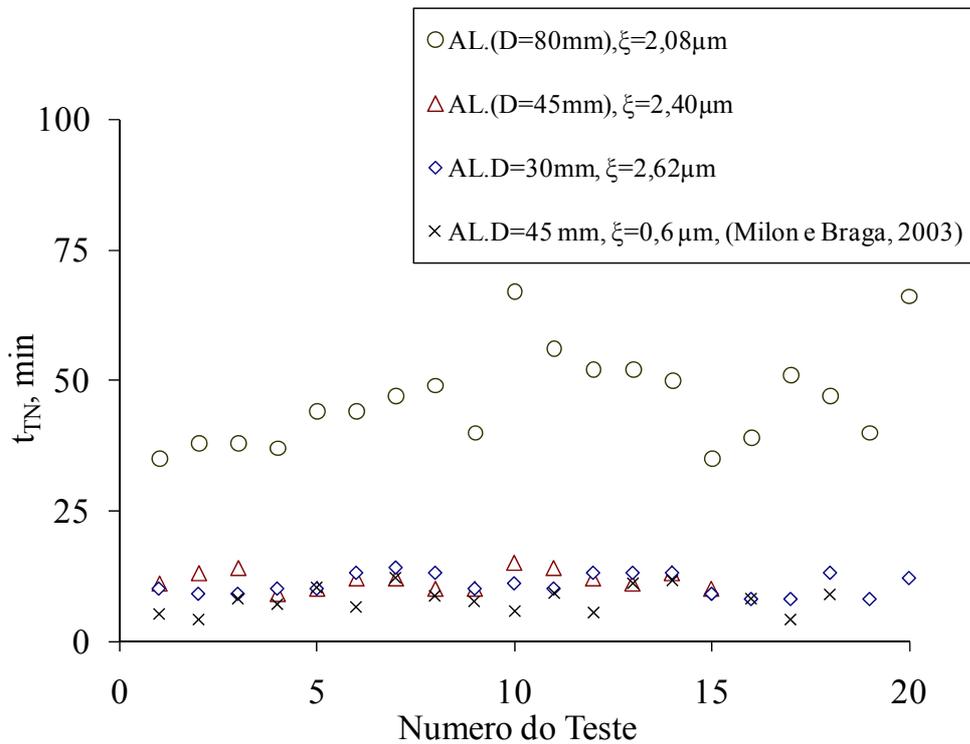


Figura 53. Experiências para FT -10 °C em cápsulas de 30,45 e 80 mm de diâmetro , comparação com Milón e Braga (2003)

### 3.5.

#### Visualização do Super-Resfriamento e Nucleação

Para a visualização dos diferentes testes, foi utilizada a configuração mostrada na Fig. 54. Nesta etapa da pesquisa, são apresentadas experiências representativas dos testes feitos para diferentes casos. São mostradas também, fotografias dos fenômenos de super-resfriamento e nucleações para diferentes diâmetros e materiais de cápsulas, como para diferentes temperaturas do FT.

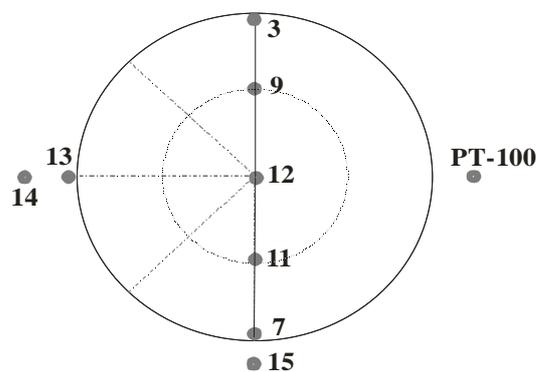


Figura 54. Posição dos sensores dentro da cápsula cilíndrica para estudo da visualização do fenômeno de nucleação

Para o estudo da visualização serão apresentadas imagens da ocorrência da nucleação das cápsulas cilíndricas. Nestes gráficos se mostra a formação de gelo dendrítico até a formação de um bloqueio parcial ou total da seção da cápsula cilíndrica ao término do processo de nucleação do MMF. Estes resultados também são mostrados nas pesquisas de Gilpin (1977) e Milón e Braga (2003). Também são mostrados nas imagens os fenômenos de nucleação em que foram encontradas diferentes características, deduzindo-se que o fenômeno de nucleação se inicia em qualquer ponto dentro da superfície interna da cápsula cilíndrica.

#### 3.5.1.

##### Visualização para cápsulas de 80 mm de diâmetro

É mostrada na Fig. 55 a curva característica do processo de super-resfriamento de cápsulas de acrílico com  $T_{FT} = -8 \text{ } ^\circ\text{C}$ . A  $TR=0,21 \text{ } ^\circ\text{C min}^{-1}$  para o sensor “7”. Nesse

caso em particular, o MMF é resfriado, passando pela temperatura de mudança de fase atingindo o estado de líquido metaestável, isto após um tempo de 29,4 minutos. Logo acontece a nucleação, onde se inicia a formação de gelo dendrítico até completar o bloqueio total no interior da cápsula cilíndrica (ver fotos da Fig. 56).

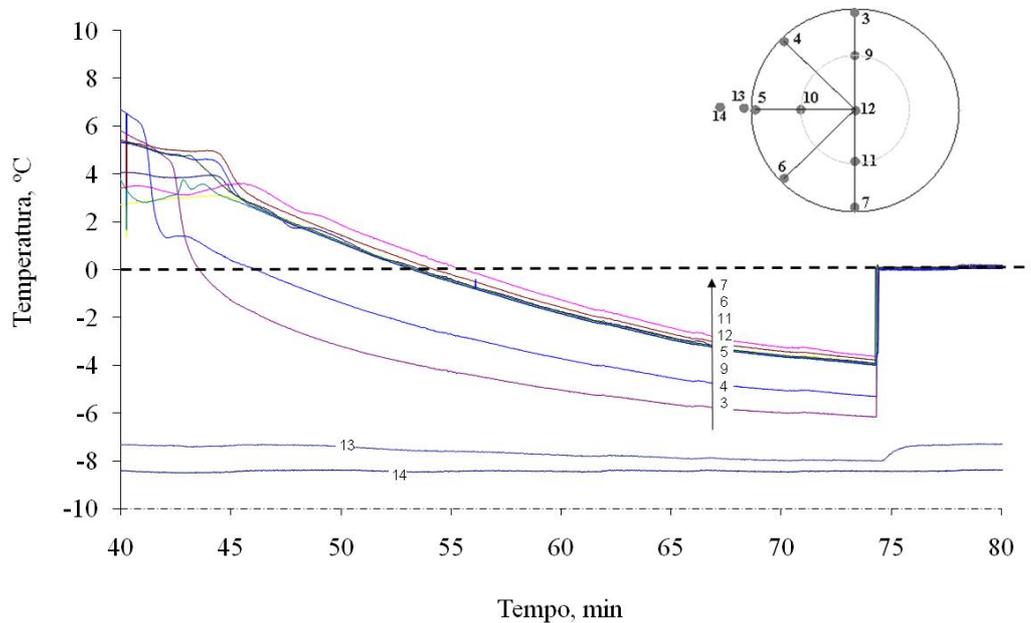


Figura 55. Curva característica do fenômeno de nucleação e posição dos termopares na cápsula de acrílico com  $T_{FT} = -8\text{ °C}$ , para 80 mm de diâmetro

Na Fig. 56 são observadas diferentes tomadas fotográficas do processo de super-resfriamento e nucleação. Para o caso da Fig. 55, podem-se observar as diferentes posições dos sensores dentro da cápsula cilíndrica em relação ao tempo percorrido até que aconteça a nucleação.

É observado que a nucleação acontece em qualquer ponto da superfície interna da cápsula. Neste caso, o início da nucleação acontece na parte superior (sensor “3”), Para este caso, a taxa de resfriamento é de  $TR = 0,21\text{ °C min}^{-1}$ . Decorrido 1 segundo, o processo de bloqueio do gelo dendrítico atinge o sensor na posição “9” e ocorre o processo de solidificação quando alcança a temperatura de mudança de fase a  $0\text{ °C}$ . Em seguida, segue o avanço do bloqueio do gelo dendrítico no sensor na posição “12”, quando o tempo é de 5 segundos, para logo terminar o processo com o bloqueio total em um tempo de 8 segundos. No final da nucleação e do bloqueio por formação de gelo dendrítico, se inicia o processo de mudança de fase a  $0\text{ °C}$ , para, em seguida, iniciar o processo de solidificação.

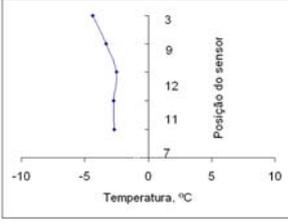
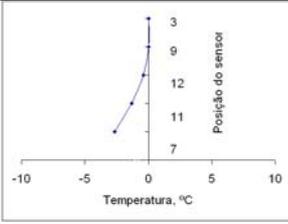
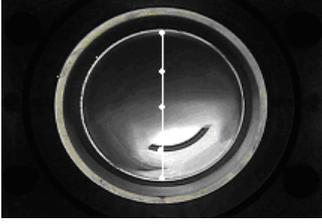
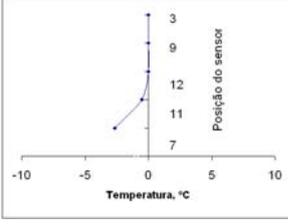
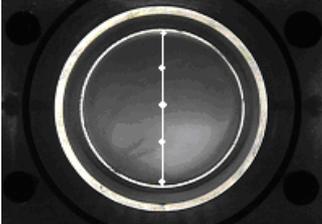
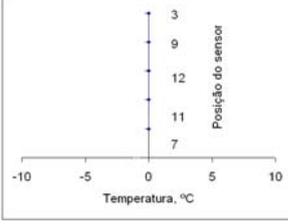
Imagens do teste	Imagem Processada	Tempo, s	Temperatura interna
		0,0	
		3,0	
		5,0	
		8,0	

Figura 56. Processo de nucleação em relação à temperatura de mudança de fase do MMF para  $T_{FT} = -8\text{ °C}$  em cápsulas de acrílico, para 80 mm de diâmetro

Na Fig. 57 é apresentada a curva característica de super-resfriamento para cápsulas de material de alumínio de 80 mm de diâmetro com  $T_{FT} = -8\text{ °C}$  que apresentaram a taxa de resfriamento  $TR = 0,33\text{ °C min}^{-1}$  (sensor “7”), pode-se observar que o fenômeno de nucleação pode acontecer em qualquer ponto.

Como no caso anterior, antes de acontecer a nucleação, todo o volume do MMF ficou super-resfriado, isto traz como consequência um bloqueio total devido a formação do gelo dendrítico (Fig. 58).

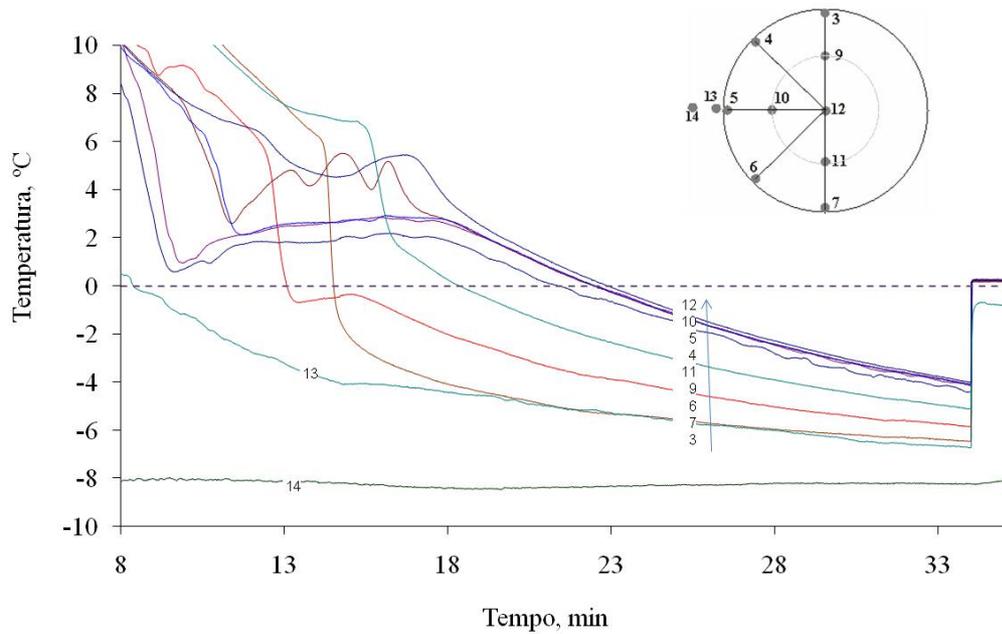


Figura 57. Curva característica do fenômeno de nucleação, posição dos termopares, cápsula de alumínio para  $T_{FT} = -8\text{ °C}$ , 80 mm de diâmetro

Na Fig. 58 são mostradas imagens do processo de nucleação para cápsulas de material de alumínio para  $T_{FT} = -8\text{ °C}$ . Nesta Figura, pode-se observar que o tempo de bloqueio por formação de gelo dendrítico é de 2,25 segundos. Já nas cápsulas de acrílico (Fig. 55), o tempo foi maior (8 s), predominando a condutividade térmica do material.

Na análise das imagens (Fig. 58), a nucleação inicia nos sensores “9” e “7”, para logo terminar no sensor “12”, isto pode ser observado nas imagens do avanço da formação de gelo dendrítico do MMF. Nesse processo a taxa de resfriamento é de  $TR = 0,33\text{ °C min}^{-1}$ .

Os resultados coincidem com o estudo feito por Milón e Braga (2003). Estes autores mostraram que para cápsulas cilíndricas de 45 mm de diâmetro há um bloqueio parcial; para 80 mm de diâmetro, o bloqueio é total.

Imagens do teste	Imagem Processada	Tempo, s	Temperatura interna
		0,0	
		0,5	
		0,75	
		1,0	
		1,50	
		2,25	

Figura 58. Processo de nucleação em relação à temperatura de mudança de fase do MMF para  $T_{FT} = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$  em cápsulas de alumínio

Na Fig. 59 são observadas curvas características de super-resfriamento para cápsulas de alumínio com  $T_{FT} = -10\text{ °C}$  e 80 mm de diâmetro. Neste exemplo também se mostra a temperatura dos sensores dentro da cápsula. Os resultados indicam que a temperatura mais baixa acontece no sensor “3”, como se vê. Em seguida, a temperatura almejada é atingida no sensor “4”, e, finalmente, termina o bloqueio total, no sensor “12”. Para esse teste, a taxa de resfriamento foi de  $TR = 0,52\text{ °C min}^{-1}$  no sensor do ponto “7”.

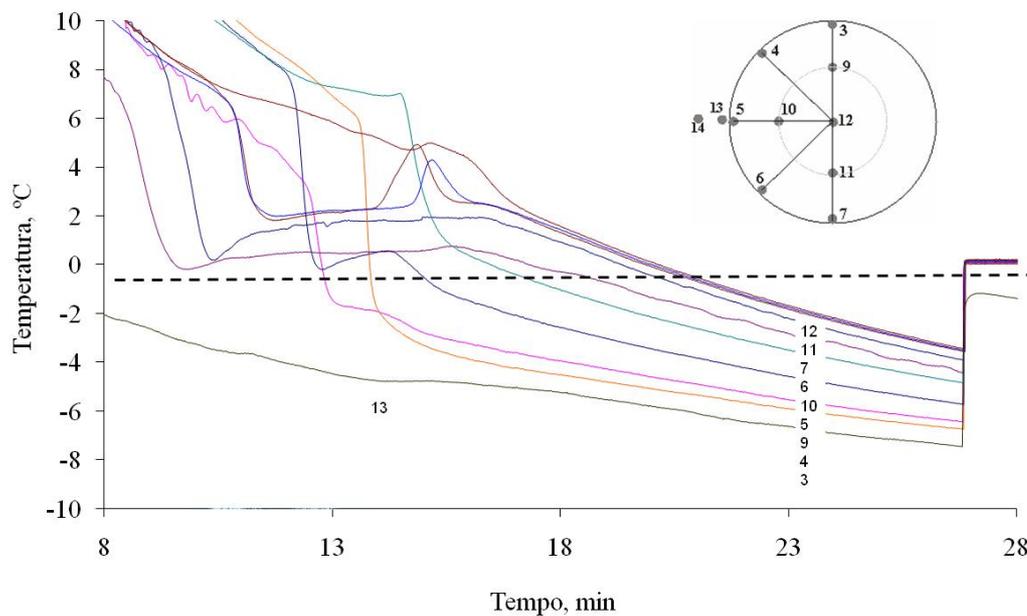


Figura 59. Curva característica do fenômeno de nucleação, posição dos termopares, cápsula de alumínio  $T_{FT} = -10\text{ °C}$ , para 80 mm de diâmetro

Na Fig. 60 são observadas as imagens do processo de nucleação da cápsula de alumínio de 80 mm de diâmetro com  $T_{FT} = -10\text{ °C}$ . Nota-se que o tempo em que ocorreu a nucleação até o bloqueio total do MMF foi de 6 segundos. O bloqueio pela formação de gelo dendrítico é finalizado nos pontos “9 e 12”. A nucleação ocorre com a posição dos sensores dentro da cápsula, obtendo-se uma taxa de resfriamento de  $TR = 0,52\text{ °C min}^{-1}$  para o sensor “7”.

Imagens do teste	Imagem Processada	Tempo, s	Temperatura interna
		0,0	
		1,0	
		2,0	
		3,0	
		4,0	
		6,0	

Figura 60. Processo de nucleação em relação à temperatura de mudança de fase do MMF para  $T_{FT} = -10\text{ °C}$  em cápsulas de alumínio

### 3.5.2. Visualização para cápsulas de 30 mm de diâmetro

A Fig. 61 mostra o fenômeno de nucleação para cápsulas de alumínio de 30 mm de diâmetro com  $T_{FT}$  a  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura mais baixa do processo de resfriamento), iniciado no sensor “3”. A taxa de resfriamento é de  $TR = 0,85\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ . A maior temperatura foi observada no sensor “11”, e seguidamente nos sensores “7”, “12” e “10”.

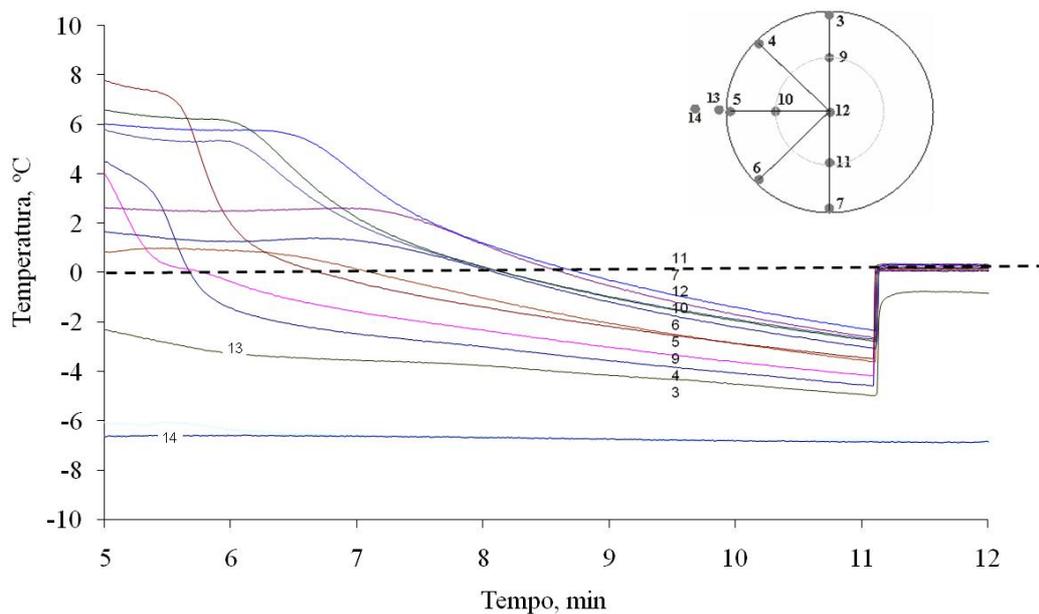


Figura 61. Curva característica do fenômeno de nucleação, posição dos termopares, cápsula de alumínio e  $T_{FT} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para 30 mm de diâmetro

Na Fig. 62 são mostradas as fotografias do processo de nucleação, obtendo-se o tempo de início da nucleação e o bloqueio por formação de gelo dendrítico, obtendo-se um bloqueio total, isto em um tempo total de 7 segundos. O início da nucleação foi observada no sensor “3”. A taxa de resfriamento é de  $TR = 0,85\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ . Logo iniciada a nucleação, o bloqueio por formação de gelo dendrítico avança desde a parte superior até a parte inferior da cápsula. A temperatura de mudança de fase é atingida no ponto “9”, depois no sensor “12” e “7”, e finalmente no sensor “11”.

Imagens do teste	Imagem Processada	Tempo, s	Temperatura interna
		0,0	
		1,0	
		2,0	
		3,0	
		5,0	
		7,0	

Figura 62. Processo de nucleação em relação à temperatura de mudança de fase do MMF para  $T_{FT} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$  em cápsulas de alumínio

Na Fig. 63 é mostrado resfriamento de uma cápsula de alumínio com  $T_{FT} = -8$  °C e uma taxa de resfriamento no ponto “7” de  $TR = 1,09$  °C  $\text{min}^{-1}$ .

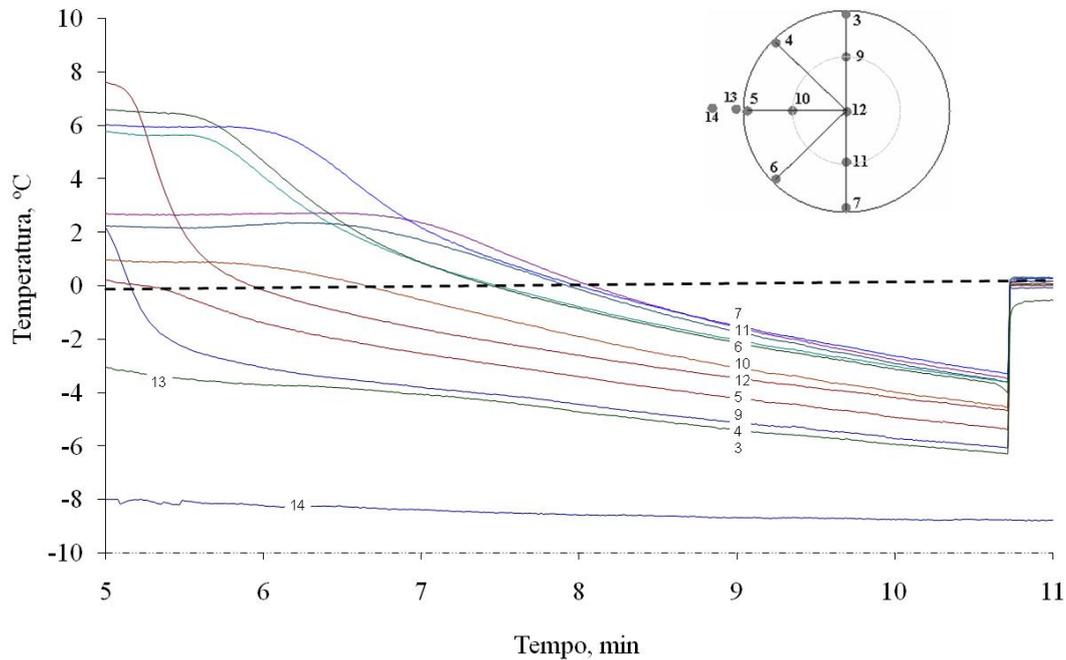


Figura 63. Curva característica do fenômeno de nucleação, posição dos termopares, cápsula de alumínio e  $T_{FT} = -8$  °C, para 30 mm de diâmetro

Na Fig. 64 é observado que o início da nucleação não acontece necessariamente no mesmo lugar exposto nas figuras anteriores, neste caso ela se inicia no sensor “4”, determinando que o avanço da formação de gelo dendrítico envolva os extremos da superfície do cilindro interior, alcançando, quase ao mesmo tempo, o sensor superior e inferior. Também se nota que, simultaneamente, se tem a frente de avanço da formação de gelo no centro da cápsula cilíndrica no ponto “12” (avanço meio lunar até alcançar o bloqueio total da cápsula). Então, é primordial o ponto de onde ocorre a nucleação.

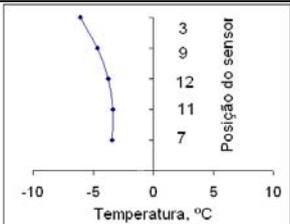
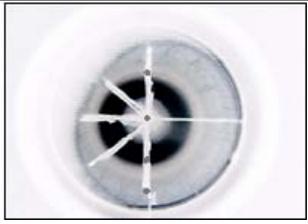
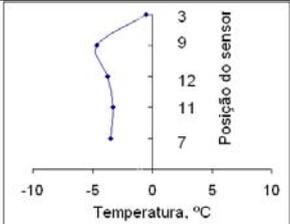
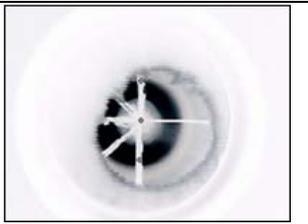
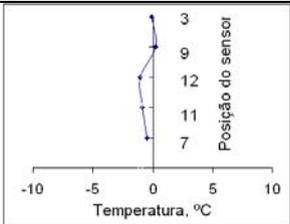
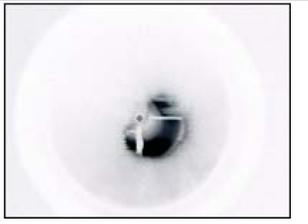
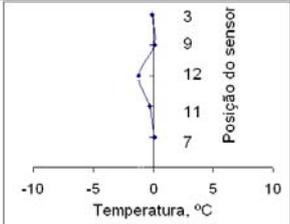
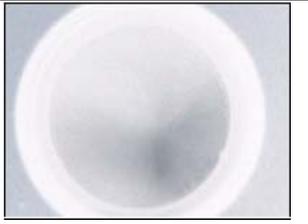
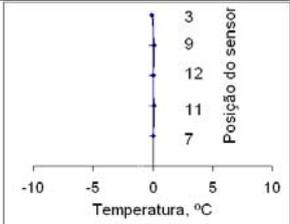
Imagens do teste	Imagens Processado	Tempo, s	Temperaturas internas
		0,0	
		0,25	
		0,50	
		0,75	
		1,25	

Figura 64. Processo de nucleação em relação à temperatura de mudança de fase do MMF para  $T_{FT} = -8\text{ °C}$  em cápsula de alumínio