

2 Abordagem Experimental

Neste trabalho foi desenvolvido um dispositivo experimental para realizar testes de resfriamento com ou sem solidificação da água dentro de cápsulas cilíndricas de diferentes diâmetros, materiais e rugosidades da parede interna, sob distintas condições controladas do fluido de transferência (FT). O dispositivo e o procedimento experimental são descritos a seguir.

2.1. Dispositivo Experimental

Foi implementada uma bancada experimental, dividida em quatro seções (Fig. 6): seção de teste, seção de resfriamento (composta por dois reservatórios e dois banhos de temperatura constante), seção de visualização e, finalmente, seção de aquisição e armazenamento de dados.

O dispositivo experimental foi construído no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento da PUC Rio. Os reservatórios, a seção de teste, a seção de visualização e as cápsulas cilíndricas foram fabricadas a partir de peças padrão. A rugosidade da parede interna da cápsula foi estabelecida com diferentes ferramentas mecânicas.

Na Fig. 7 é apresentada uma fotografia do conjunto, onde se observa a distribuição dos componentes mencionados. A operação sequencial é realizada manualmente e com supervisão permanente.

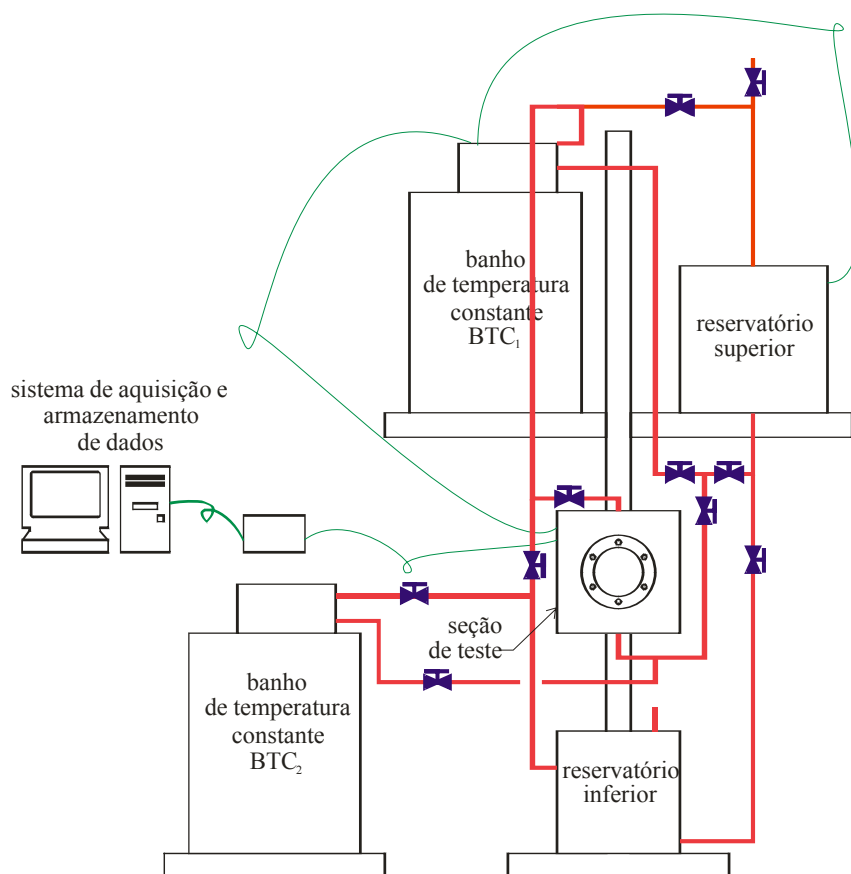


Figura 6. Esquema do modelo experimental



Figura 7. Fotografia da bancada experimental

2.2. Seção de teste

Na seção de teste (Fig. 8) está contida a cápsula a ser estudada com MMF. Construída com material acrílico, tem geometria cúbica e paredes com 10 mm de espessura. As dimensões são suficientemente grandes para abrigar diferentes diâmetros da cápsula (30 mm, 45 mm, e, 80 mm). Na parte externa, isola-se a cápsula com poliestireno de 25,5 mm de espessura. O fluido que entra na seção de teste é chamado fluido de transferência (FT), e tem a função de resfriar a cápsula cilíndrica de acordo com as condições de temperatura requeridas. O fluido de transferência entra pela parte inferior, saindo pela parte superior, mantendo a temperatura da seção de teste constante.

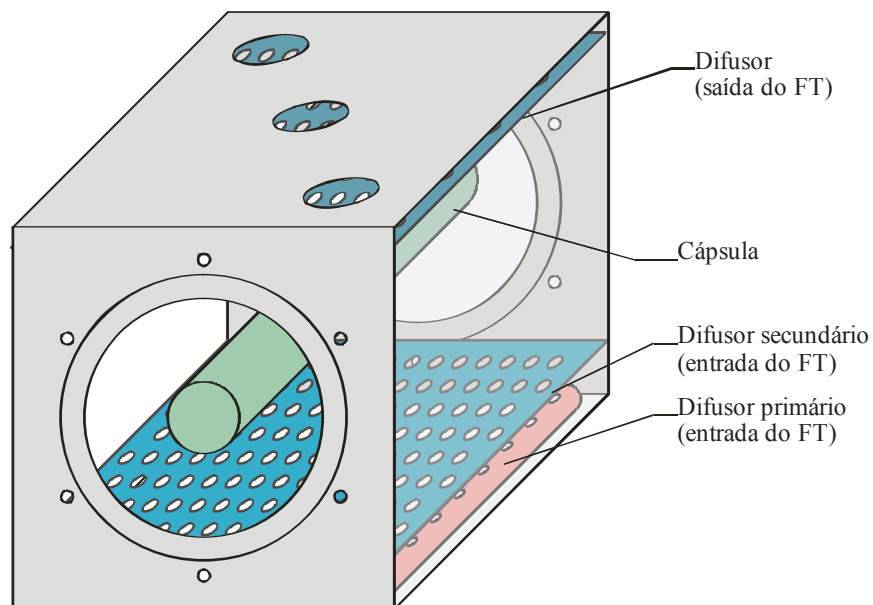


Figura 8. Detalhe da seção de teste

Pode-se observar na Fig. 9 um corte transversal da seção de teste com detalhes da distribuição dos sensores de temperatura. Sensores tipo K com diâmetro 0,076 mm foram instalados para medir as temperaturas no interior da cápsula, ou seja no MMF. Também foram colocados os mesmos termopares para fazer as medições fora da cápsula, tanto na parede externa quanto no FT. Para controle da temperatura do FT é utilizado um sensor tipo RTD PT 100, que envia sinais para o banho de temperatura constante. O volume do cilindro é determinado pelo disco móvel. Também foi

implementado um compensador para absorver a variação do volume durante o resfriamento do MMF, como se mostra na Fig. 9 e na fotografia da Fig 10.

cilíndrica

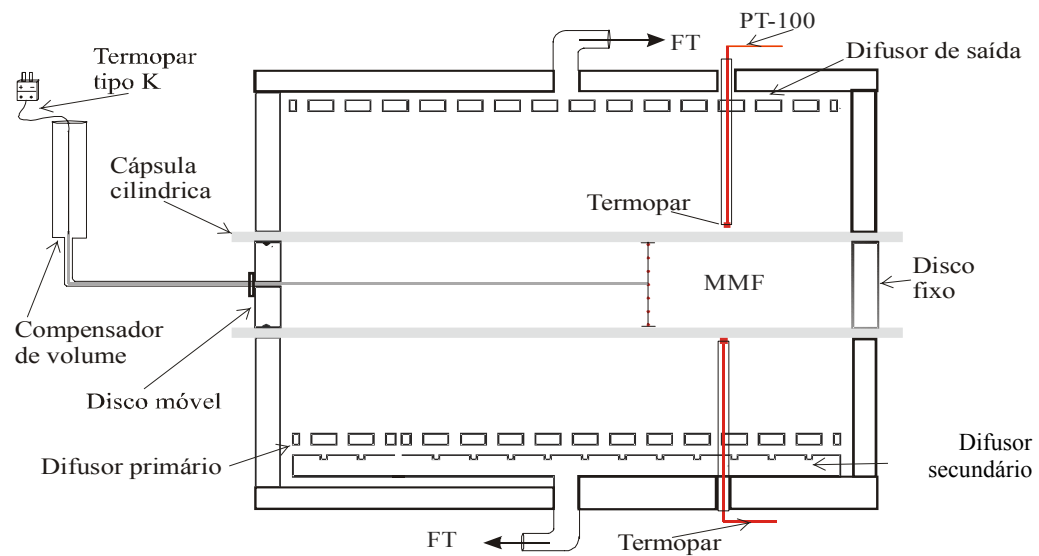


Figura 9. Corte transversal da seção de teste

Na Figura 10, pode-se observar um detalhe do sistema de compensação para absorver a variação de volume do MMF, este método utilizado não interfere no processo de resfriamento.



Figura 10. Fotografia do compensador de volume para o MMF

Nas Figs. 11, 12 e 13 são mostradas as diferentes cápsulas cilíndricas testadas para materiais de PVC, Acrílico, Alumínio, para 30 e 80 mm de diâmetro.



Figura 11. Cápsulas cilíndricas de diferentes materiais e diâmetros



Figura 12. Fotografias das cápsulas de alumínio em diferentes diâmetros



Figura 13. Fotografia das cápsulas de diferentes diâmetros e materiais

Para a medição da temperatura foram colocados nove sensores dentro da cápsula e quatro fora da cápsula (Fig. 14).

A distribuição dos sensores de temperatura, dentro e fora da cápsula, foi a seguinte: dois sensores na parede externa, um sensor para medir a temperatura do fluido de transferência (FT); e para o controle da temperatura do FT foi instalado o PT-100.

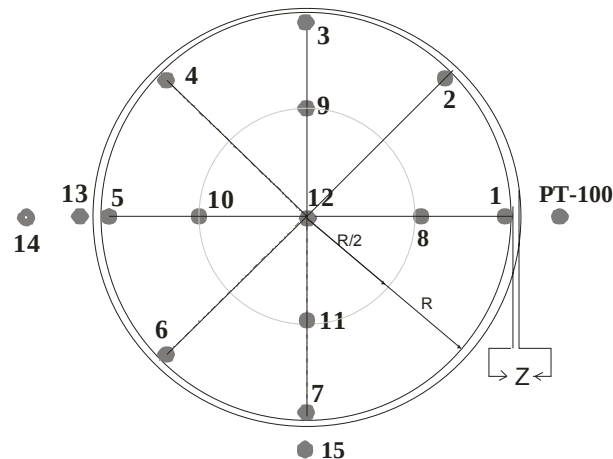


Figura 14. Distribuição dos sensores de temperatura na cápsula

Para avaliar a interferência dos termopares e do suporte no processo de nucleação foram realizadas experiências com e sem termopares. Os resultados mostraram que não há influência no processo de nucleação, e quando ela acontece, sempre é iniciada na parede interna do cilindro.

2.2. Seção de Resfriamento

Esta seção tem a função de estabelecer as condições de temperatura do FT e do MMF. Estão compostos por: dois banhos de temperatura constante (BTC_1 e BTC_2), dois reservatórios, um primário e outro secundário, e finalmente pelo fluido de transferência (FT), fluido que circula através destes equipamentos. Todos estes componentes serão descritos a seguir.

2.2.1. Banhos de Temperatura constante

O Banho de temperatura constante BTC_1 tem a função de estabelecer a temperatura no FT segundo o teste realizado ($T_{FT} = -2; -4; -6^{\circ}\text{C}$, etc.). O Banho de temperatura constante BTC_2 tem a função de estabelecer as condições iniciais do MMF (sempre a 25°C).

Os banhos de temperatura constante têm uma potência de resfriamento de 500 W a 0°C . Com um intervalo de trabalho, essa potência passa a ser de -40 até 150°C . O aquecimento tem uma resistência elétrica de 1000 W. Este equipamento trabalha com um controle PID (proporcional, integral, derivativo), esse controle é realizado por um sensor PT 100.

2.2.2. Reservatórios

O reservatório superior tem a finalidade de armazenar o FT à temperatura de teste. O reservatório inferior tem a função de receber o FT depois de absorver a carga térmica inicial da seção de teste. Cada reservatório é feito de acrílico com espessura de 10 mm e isolado com Armaflex de 25 mm de espessura.

Observa-se na Fig. 15 um corte transversal do reservatório, mostrando o difusor para homogeneizar a temperatura.

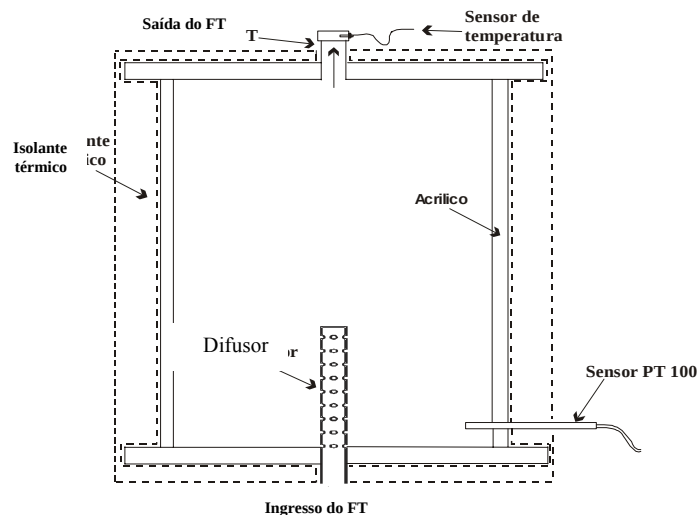


Figura 15. Detalhe do reservatório superior

2.2.3. Fluido de transferência (FT)

O fluido de transferência é uma mistura de água e álcool em 50% (por volume), resfriado pelo BTC_1 a uma determinada temperatura de teste. Sua função é circular através da seção de teste, entrando nesta sempre a uma mesma temperatura. Assim, remove-se a energia térmica do material de mudança de fase do interior da cápsula.

2.3. Sistema de Visualização

Formada por uma câmara digital que registra 30 imagens por segundo, este equipamento é colocado na frente da seção de teste, ao lado do disco fixo, de onde é filmado o interior da cápsula cilíndrica. Para evitar a condensação na parte exterior do disco fixo é montada uma câmara de observação, isolada termicamente em um ambiente de gás inerte (nitrogênio) que desloca o ar úmido deste ambiente, garantindo uma melhor observação. Detalhes são mostrados na Fig. 16.

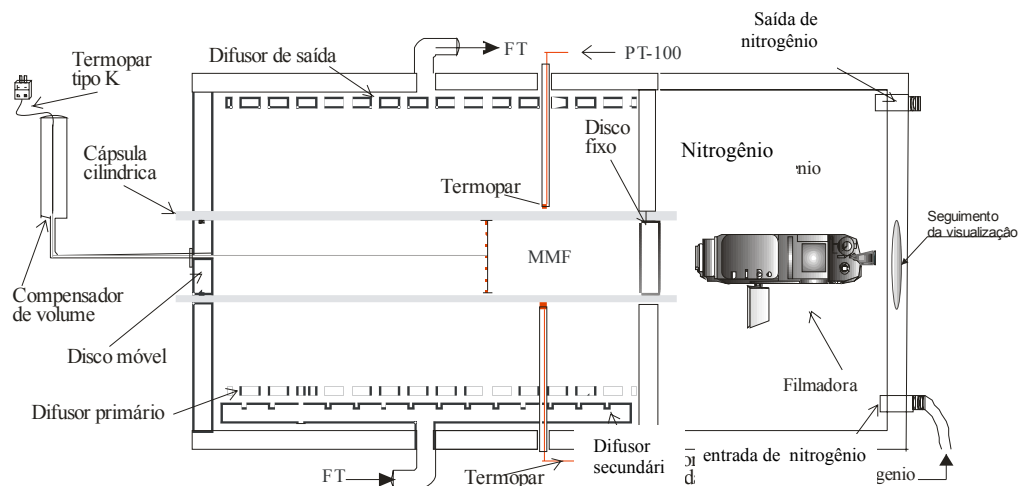


Figura 16. Detalhe da câmara para visualizar

Pode-se observar na Fig. 17 a seção de teste com dispositivo da câmara de observação. A vedação da câmara de observação é feita mediante um *o-ring*.

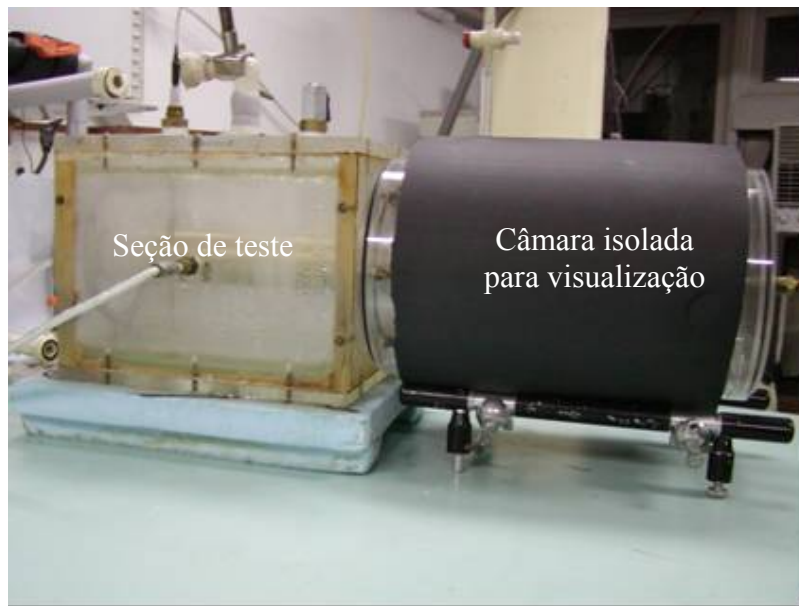


Figura 17. Câmera de isolamento para visualização.

2.4. Sistema de Aquisição e Processamento de Dados

O sistema de aquisição e processamento de dados (Fig. 18) é formado por dois componentes – sistema de aquisição de dados (marca HP – Agilent) e um computador. A comunicação entre os dois componentes é feita mediante uma porta serial do tipo RS-232. Os sinais de temperatura da seção de teste chegam ao sistema de aquisição de dados e posteriormente são enviados ao computador para análise. O programa utilizado é o Bench Link Data Logger. O controle do banho térmico BTC₁ também é feito pelo computador, por meio do programa Nescom 201 do fabricante NESLAB.



Figura 18. Fotografia da seção de aquisição e processamento de dados

2.5. Procedimento experimental

O procedimento experimental é integrado por duas etapas: a preparação das condições iniciais do FT e do MMF, e o processo de resfriamento do MMF.

Na primeira etapa, as condições iniciais do material de mudança de fase (MMF), se uniformizam a uma temperatura de 25°C, tanto da cápsula como da seção de teste. Para isto é utilizado o BTC₂, que é monitorado por sensores dentro e fora da cápsula até que se atinjam as condições almejadas de temperaturas. Simultaneamente, na parte de resfriamento, é condicionado o fluido de transferência (FT) pelo BTC₁ no reservatório superior até atingir a temperatura desejada para o teste. Estes procedimentos são mostrados na Fig. 19.

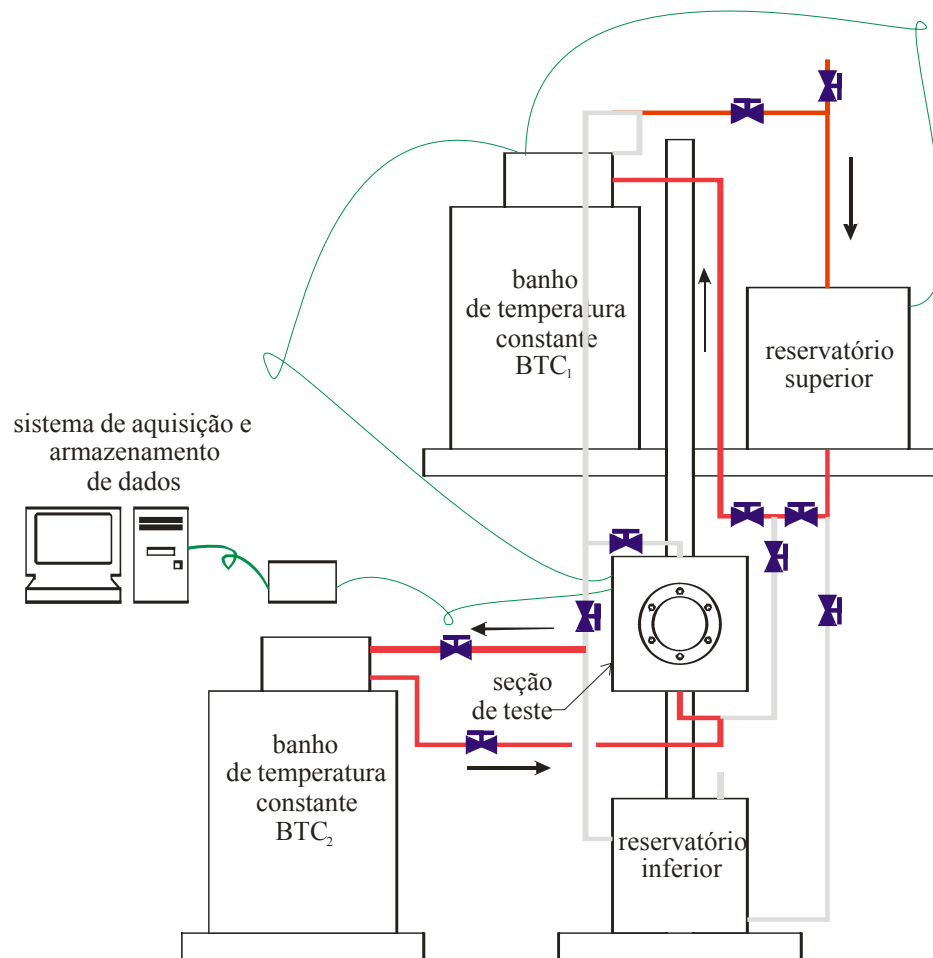


Figura 19. Etapa inicial do procedimento experimental

A etapa final começa quando o FT e o MMF atingem as temperaturas estabelecidas e o sistema de aquisição é ligado. Em seguida, o FT do reservatório

superior é forçado a descer à seção de teste até enchê-la e sair para o reservatório inferior. O fluido de FT que preenche pela primeira vez a seção de teste já não será mais usado neste teste por sair “quente”. O volume do reservatório superior é duas vezes o da seção de teste. Com isso se prevê suficiente FT para os testes. A temperatura do BTC passa então a ser monitorada pelo sensor da seção de teste para manter uma vazão constante do FT. Estes procedimentos são mostrados na Fig. 20.

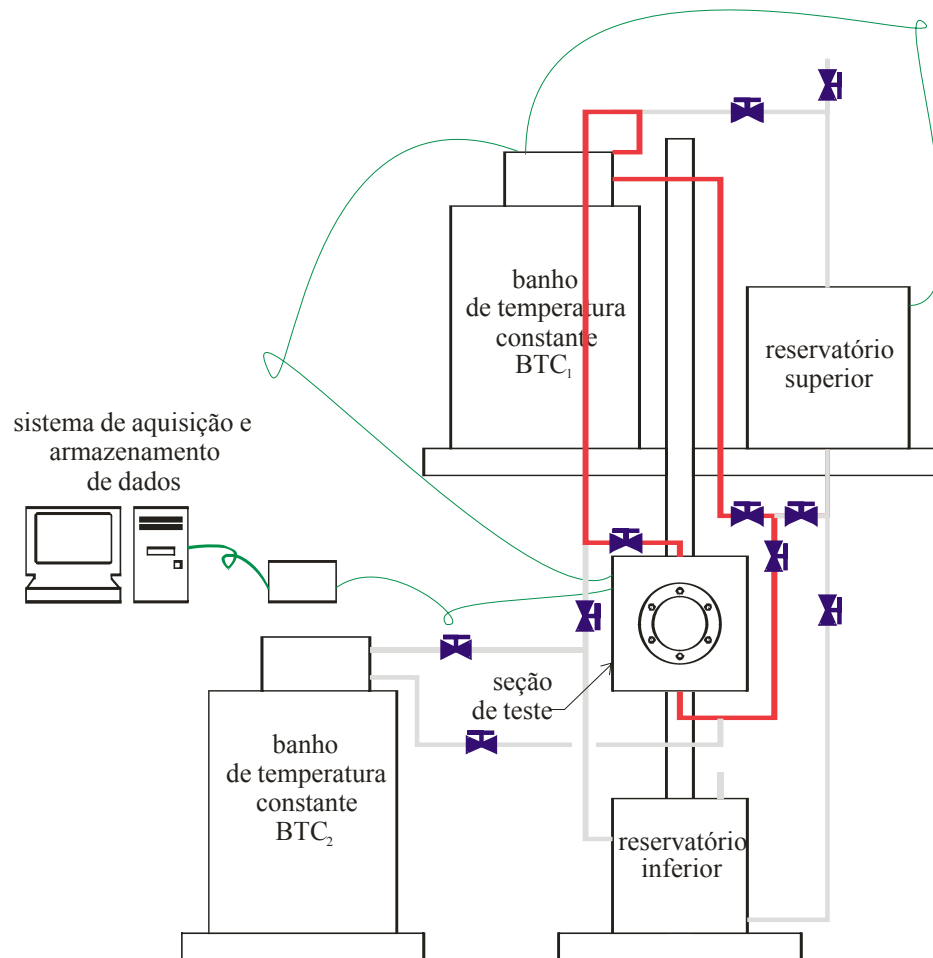


Figura 20. Etapa Final do Procedimento experimental

Na fase final do teste, todo o FT é bombeado de volta ao reservatório superior. Dessa forma, a bancada está pronta para realizar outra experiência. Pode-se observar que o FT escoar em um circuito fechado. Isso é feito para evitar que o FT absorva o calor do meio externo e atinja rapidamente a temperatura de teste para a experiência seguinte.

Todos os testes são iniciados com a mesma temperatura uniforme do MMF (25 °C), mediante o uso do BTC₂. Este processo é controlado pelos sensores de temperatura colocados na parede da cápsula e no MMF.

2.5.1. Temperatura do fluido de transferência (FT)

Para os testes realizados, a temperatura do FT foi mantida estável. Quando a experiência é iniciada, a temperatura do FT na seção de teste precisa de um tempo de recuperação, o que deve ser feito rápido para que se possa manter a temperatura do FT constante durante o teste. O reservatório superior absorve a primeira carga térmica da cápsula que é alta no início das seções de teste (parede, tubulação, etc.). Logo o BTC₁ assume o controle da temperatura de teste, mantendo-a constante e garantindo, assim, as condições necessárias.

Para impor rapidamente as condições iniciais, realizou-se um teste com a cápsula de material de maior condutividade térmica que implica em um maior tempo de resposta do BTC₁ (caso crítico). Esse caso apresentou um valor de Δt inferior a 3 minutos para uma $T_{FT} = -10^\circ\text{C}$, como se mostra na Fig. 21.

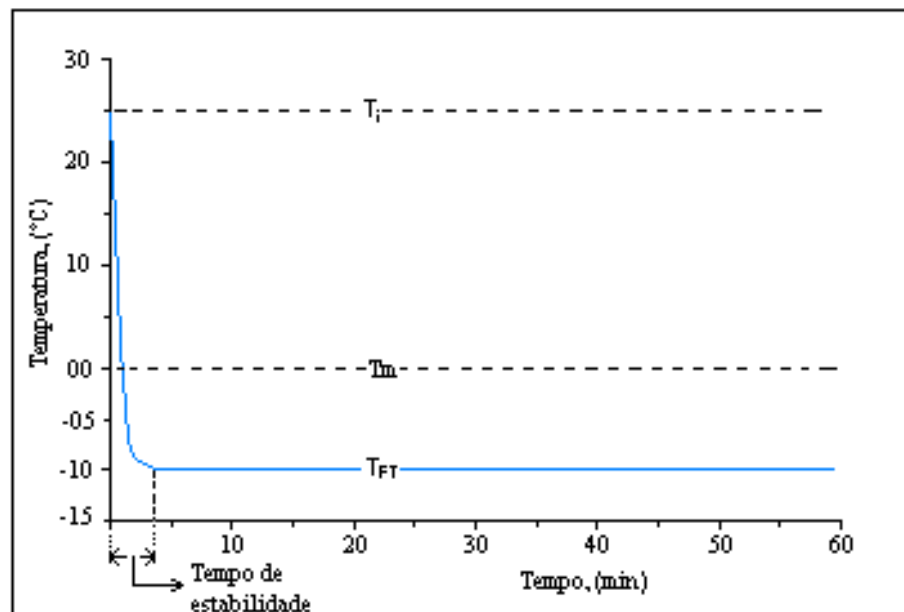


Figura 21. Tempo de resposta do banho de controle BTC₁

2.5.2. Número de Testes Realizados

Para garantir a repetibilidade, cada teste foi realizado 20 vezes, mantendo-se as mesmas características do MMF, do FT e da cápsula. Isto foi realizado em todos os testes.

São apresentados nas tabelas 1, 2, e 3 os testes realizados para diferentes diâmetros, diferentes rugosidades e diferentes temperaturas do FT.

Tabela 1. Número de testes realizados para diâmetro de 30 mm

Material	Diâmetro. (mm)	Temperatura. (°C)	Repetições			Total
			Cápsula I Rugosidade 0,76 µm	Cápsula II Rugosidade 1,51 µm	Cápsula III Rugosidade 2,62 µm	
Alumínio	30	-2	20	20	20	60
		-4	20	20	20	60
		-6	20	20	20	60
		-8	20	20	20	60
		-10	20	20	20	60
		Cápsula IV : Rugosidade 2,10 µm				
Acrílico		-2	20			20
		-4	20			20
		-6	20			20
		-8	20			20
		-10	20			20
		Cápsula V : Rugosidade 1,60 µm				
PVC		-2	20			20
		-4	20			20
		-6	20			20
		-8	20			20
		-10	20			20

Tabela 2. Número de testes realizados para diâmetro de 80 mm

Material	Diâmetro. (mm)	Temperatura. (°C)	Repetições				Total	
			Cápsula VI	Cápsula VII	Cápsula VIII	Cápsula IX		
			Rugosidade 2,08 µm	Rugosidade 4,27 µm	Rugosidade 7,32 µm	Rugosidade 9,51 µm		
Alumínio	80	-2	20	20	20	20	80	
		-4	20	20	20	20	80	
		-6	20	20	20	20	80	
		-8	20	20	20	20	80	
		-10	20	20	20	20	80	
Acrílico			Cápsula X : Rugosidade 0,05 µm					
		-2	20					20
		-4	20					20
		-6	20					20
		-8	20					20
		-10	20					20
			Cápsula XI : Rugosidade 1,81 µm					
PVC		-2	20					20
		-4	20					20
		-6	20					20
		-8	20					20
		-10	20					20

Tabela 3. Número de testes realizados para diâmetro de 45 mm

Material	Diâmetro.(mm)	Temperatura (°C)	Repetições	Total	
			Rug. $\epsilon=0,16$		
Aluminio	45	-2	10	10	
		-4	10	10	
		-6	10	10	
		-8	10	10	
		-10	10	10	
Acrílico		Rug. $\epsilon=1,81$			
		-2	10	10	
		-4	10	10	
		-6	10	10	
		-8	10	10	
		-10	10	10	

O total de experiências realizadas no presente trabalho atingiu o número de 1200 testes aproximadamente.

2.6. Parâmetros Estudados

Os parâmetros estudados e quantificados dentro do processo de resfriamento foram: taxa de resfriamento, rugosidade, diâmetros da cápsula e material da cápsula. A distribuição principal dos termopares para cada estudo é apresentada na Fig. 22.

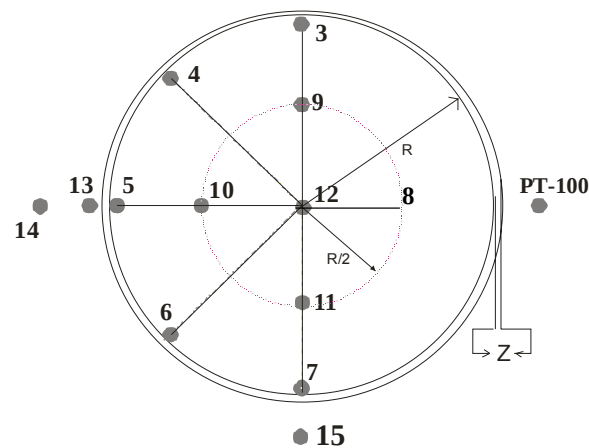


Figura 22. Detalhe da distribuição dos termopares dentro da cápsula

2.6.1. Taxa de resfriamento

O estudo da taxa de resfriamento foi realizado com os termopares da parede interna e da parede externa, conforme mostra a Fig. 22. Foram avaliadas cápsulas de 30 e 80 mm de diâmetro. As temperaturas do Fluido de transferência (FT) foram de: -6°C, -8°C, e, -10°C.

2.6.2. Rugosidade da parede Interna da Cápsula

O fenômeno de super-resfriamento e de nucleação foi estudado variando a rugosidade da parede interna da cápsula.

As características do rugosímetro de contato mecânico são apresentadas na Tabela 4. Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os valores das rugosidades médias (R_a). O método utilizado para as medições foi o da “linha média” (para maiores detalhes, ver o anexo).

Tabela 4. Características do Rugosímetro

Característica da Instrumentação	Medida
Tipo de medição	Rugosidade média (Ra)
Comprimento de medição (cut-off)	0,8 mm
Velocidade de retorno	0,8 mm/s
Capacidade de unidade de leitura	0,01 μm ~ 100 μm
Parâmetro de avaliação	Ra

Tabela 5. Valores da Rugosidade para alumínio, acrílico e PVC D = 30 mm

Materia	Diâmetr (mm)	Rugosidad (μm)
Aluminio	30	0,76
		1,51
		2,62
Acrílic		2,10
PVC		1,60

Tabela 6. Valores da Rugosidade para alumínio, acrílico e PVC, para 80 mm

Material	Diâmetro (mm)	Rugosidade (μm)
Alumínio	80	2,08
		4,27
		7,32
		9,51
Acrílico		0,05
PVC		1,81

2.6.3.**Fenômenos de Nucleação e Super- resfriamento**

Para estudar os fenômenos de super-resfriamento e nucleação foram avaliadas diferentes cápsulas com diferentes temperaturas do FT. Como já foi mencionado, cada teste foi repetido 20 vezes, sob as mesmas condições de resfriamento.

2.6.4.**Visualização do Super-Resfriamento e Nucleação**

Nesta etapa, foi realizada a visualização do fenômeno de super-resfriamento e nucleação, registrando tanto as imagens como os dados dos sensores dentro do MMF.

2.7.**Incertezas Envolvidas**

As incertezas envolvidas e consideradas na parte experimental são mostradas na tabela 7. São detalhados os diferentes parâmetros que influenciam o fenômeno de super-resfriamento e o fenômeno de nucleação.

Na Fig. 23 são apresentados os valores das incertezas das rugosidades para as cápsulas de alumínio estudadas.

Tabela 7. Incertezas envolvidas durante a experiência

Item	Incerteza
Temperatura	0,1°C
Rugosidade	0,01 µm
Comprimento	0,1 mm
Volume	10 mm ³
Rugosidade	0,05 m
Taxa de resfriamento	$\delta TR = \sqrt{\left(\frac{1}{Dt} 0,1\right)^2 + \left(\frac{GSR}{Dt^2} 0,01\right)^2}$

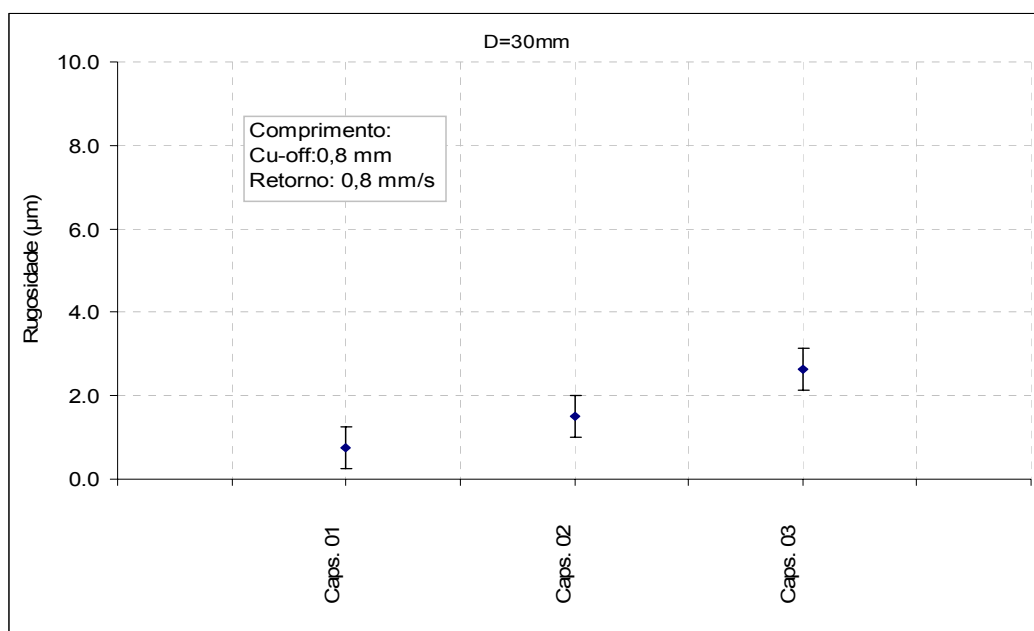


Figura 23. Incerteza da rugosidade em cápsulas de alumínio de 30 mm

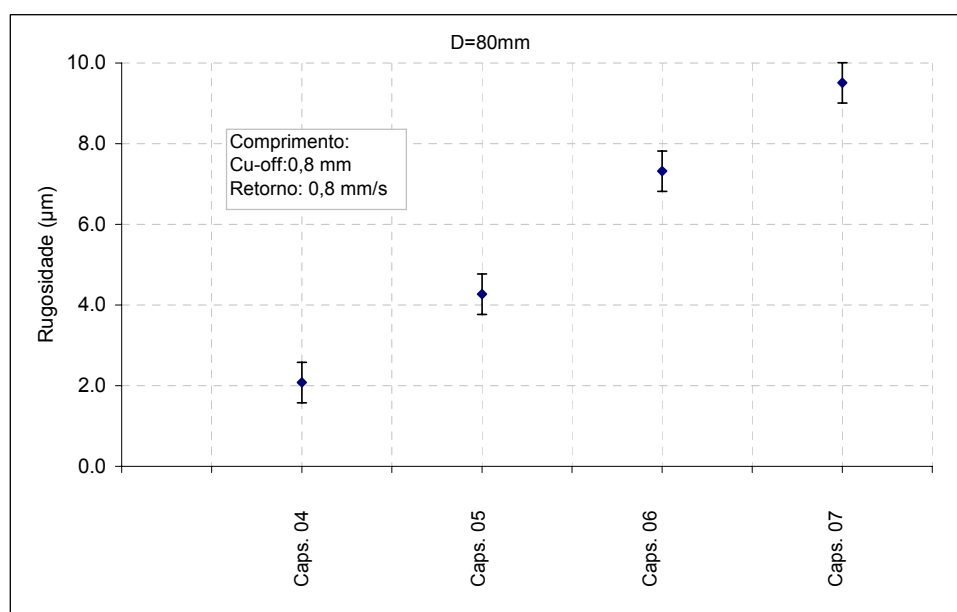


Figura 24. Incerteza da rugosidade em cápsulas de alumínio de 80 mm