

2 Abordagem Experimental

Para realizar o estudo experimental deste trabalho, foi desenvolvido um dispositivo para realizar os diferentes testes de solidificação da água dentro de cápsulas cilíndricas sob condições controladas. Em resumo, isto é alcançado quando um banho de temperatura constante (BTC) resfria o fluido de transferência (FT) dentro de um reservatório. Em seguida, o FT escoar por dentro da seção de teste resfriando a cápsula que contém a água destilada (material de mudança de fase a MMF) que apresenta diferentes fenômenos a serem estudados. Para realizar o monitoramento dos parâmetros são instalados sensores de temperatura dentro e fora da cápsula.

2.1. Dispositivo Experimental

Após analisar diferentes trabalhos, implementou-se um dispositivo experimental formado por quatro seções: *seção de teste*, *seção de resfriamento* (fluido de transferência, reservatório superior, o reservatório inferior e o banho de temperatura constante), *seção de visualização*, e *finalmente a seção de aquisição e armazenamento de dados*. Um esquema é apresentado na Fig. 29, onde pode-se observar a distribuição de cada componente. Pode aí ser visto um segundo banho de temperatura controlada, utilizado para impor a condição inicial de temperatura do MMF dentro da cápsula (BTC-CI).

Cada uma destas seções cumpre objetivos sequenciais para a realização ótima de cada experiência. A coordenação conjunta destas seções é dada por controle manual e requer supervisão constante.

A seção de resfriamento tem como objetivo resfriar e controlar a temperatura do fluido de transferência. Este passa através da seção de teste resfriando exteriormente a cápsula. O sistema de aquisição de dados está sempre

funcionando aquisitando as temperaturas dentro e fora da cápsula. Dependendo do teste realizado a seção de visualização aquisita imagens para pós-processamento.

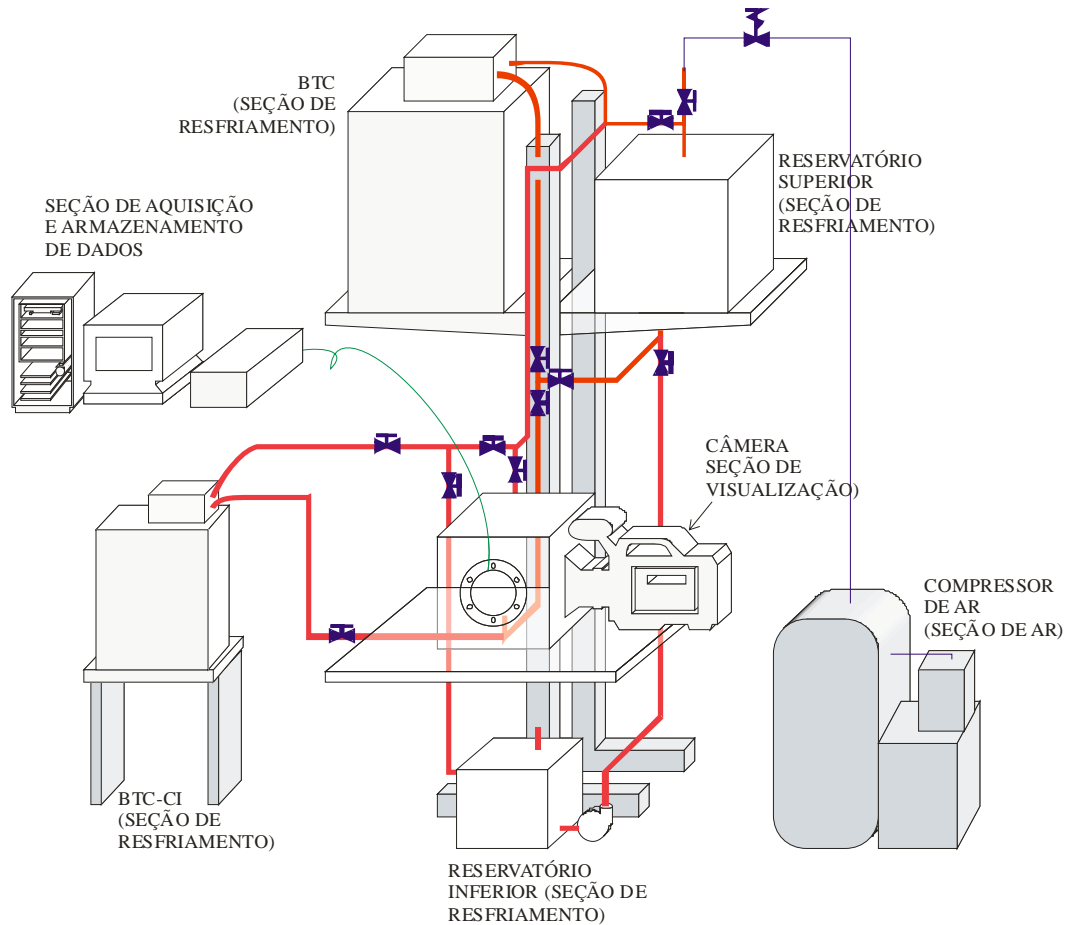


Figura 29. Esquema da bancada experimental

2.1.1. Seção de teste

É a seção que contém a cápsula com o MMF a ser estudado. Foi construída de acrílico com geometria cúbica de 10 mm de espessura, isolado termicamente com placas de poliestireno de 25,5 mm. As dimensões foram determinadas para testar os diferentes diâmetros e materiais das cápsulas (180 x 160 x 223 mm). O fluido de transferência (FT) entra na seção de teste circulando pela superfície exterior da cápsula impondo a condição de temperatura determinada. O FT entra pela parte inferior e sai pela superior. Na Fig. 30 é apresentada uma vista espacial da seção, onde se pode observar a distribuição de cada componente: a *cápsula* e o *sistema de difusão*, que são descritos a seguir.

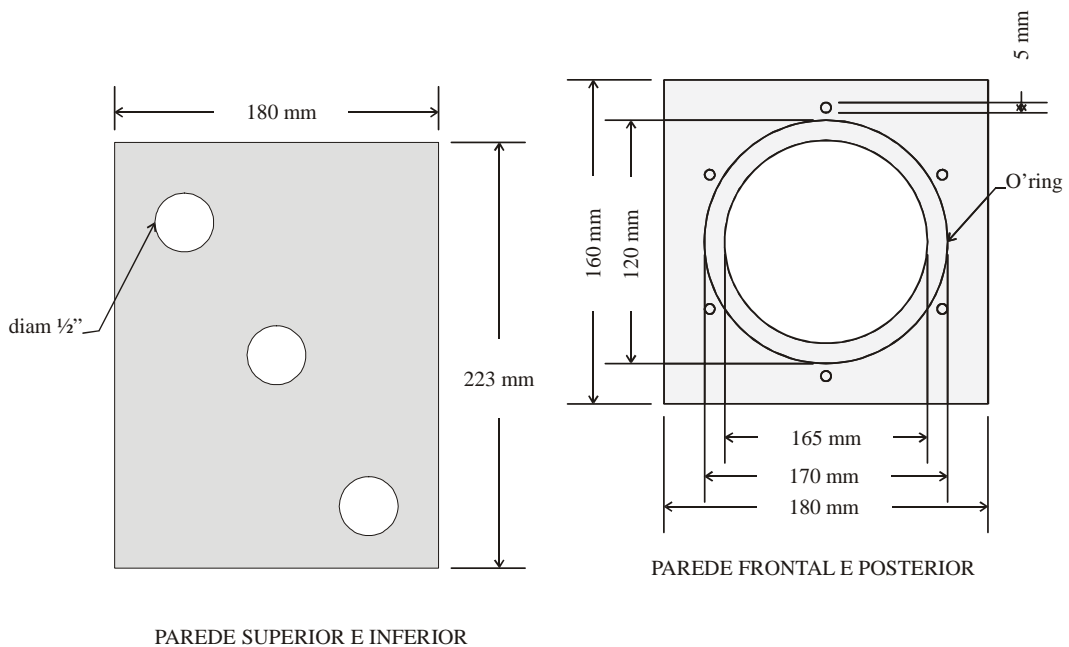
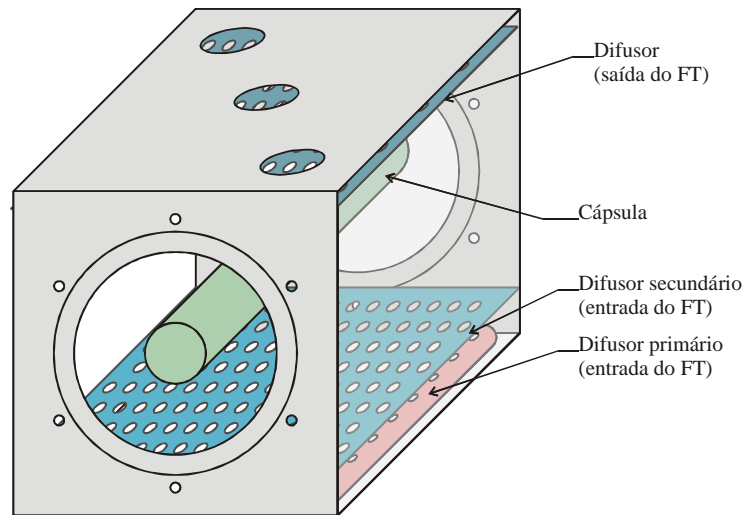


Figura 30. Detalhe da Seção de teste.

O *sistema de difusão* tem a finalidade de homogeneizar o fluxo e a temperatura do FT antes de resfriar a cápsula. Os difusores são placas acrílico, nestas placas foram feitos furos de diâmetro igual a 1 mm localizados cada 10 mm.

Uma fotografia da seção de teste é apresentada na Fig. 32, podendo-se observar a disposição da cápsula e o sensor de controle de temperatura do BTC.

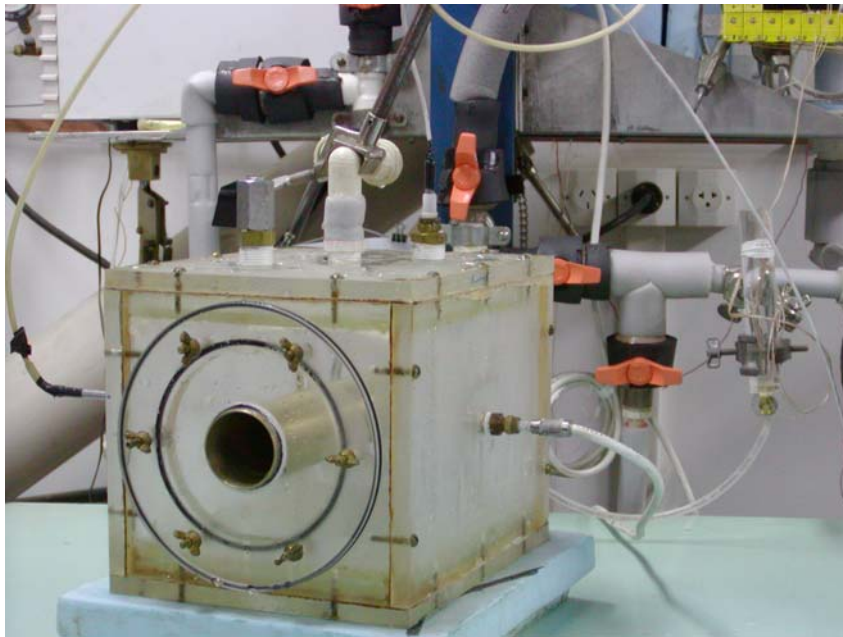


Fig. 31. Visualização da seção de teste

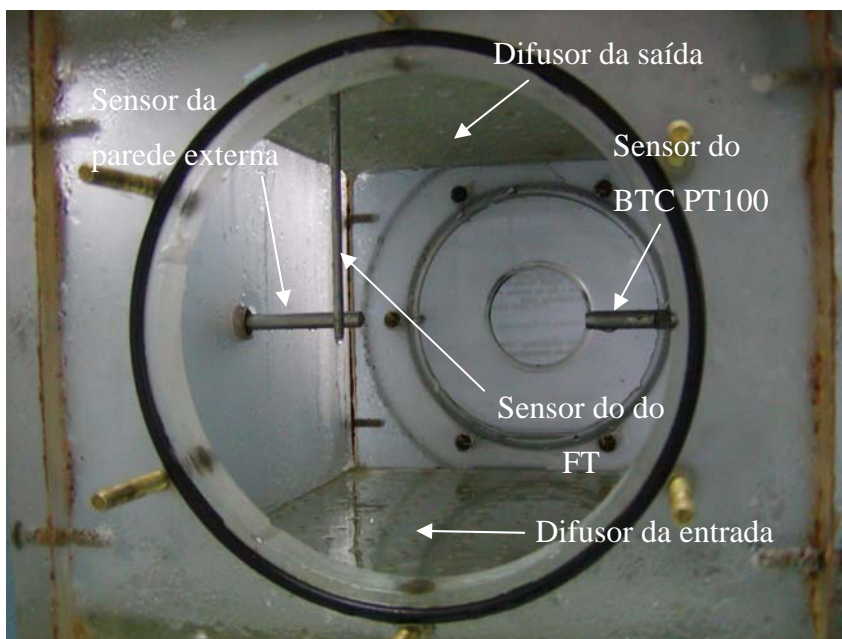


Figura 32. Disposição dos elementos internos na seção de teste.

a.
Cápsulas Cilíndricas

Na Fig. 33 podem-se observar detalhes da *cápsula cilíndrica* que contém o MMF. Dentro desta podem ser visto os *termopares* tipo K de 0,076 mm de diâmetro, revestidos de teflon. Estes têm a função de medir a temperatura do MMF durante cada experiência. O volume do MMF dentro da cápsula é definido

pelo posicionamento do *disco móvel*. Para equilibrar a variação de volume do MMF na mudança de fase, implementou-se um *compensador de volume* o qual também tem a função de indicar as variações do volume do MMF durante a experiência. Para medir as temperaturas fora da cápsula foram instalados sensores de temperatura com termopares tipo K na parede da cápsula e no fluido de transferência, FT. Para o controle da temperatura do FT foi instalado o sensor tipo RTD *PT 100* que envia o sinal para o banho de temperatura constante.

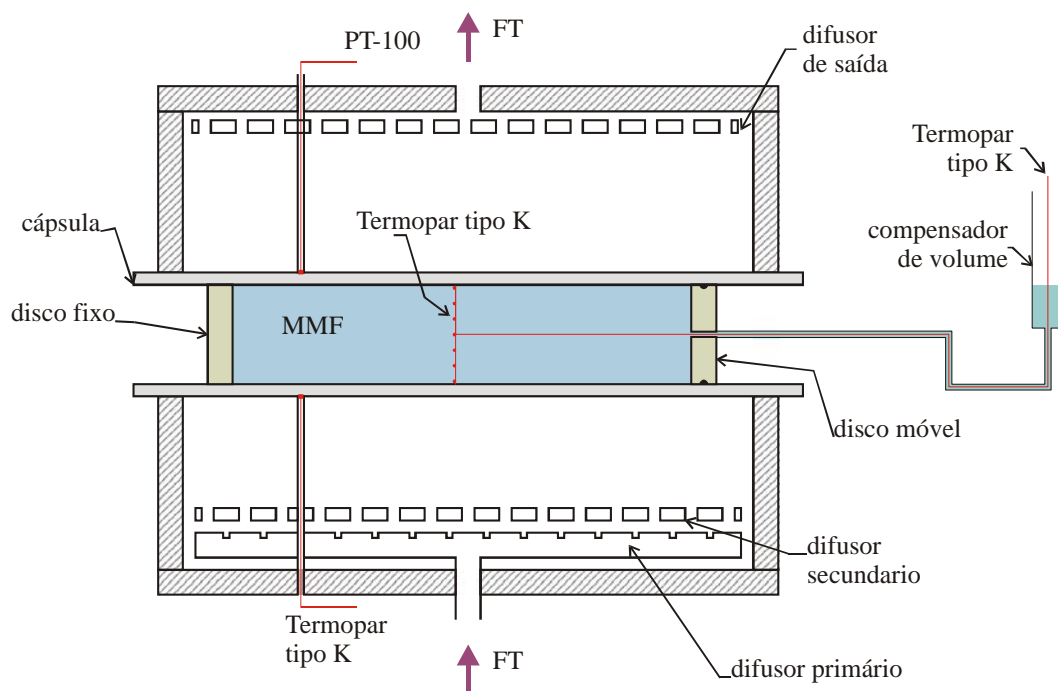


Figura 33. Corte transversal da seção de teste

Um modelo da cápsula pode ser observado na Fig. 34, onde são destacados os dois *discos* que definem o volume do MMF e o *compensador de volume*, cuja função já foi explicada anteriormente. Nesta figura é possível apreciar a função do disco móvel, tanto para definir o volume da cápsula, como para encher o MMF antes de realizar cada teste.

A posição do compensador de volume teve que ser cuidadosa para manter o nível de água sempre à altura da cápsula, isto para evitar aumentos de pressão por coluna de água.

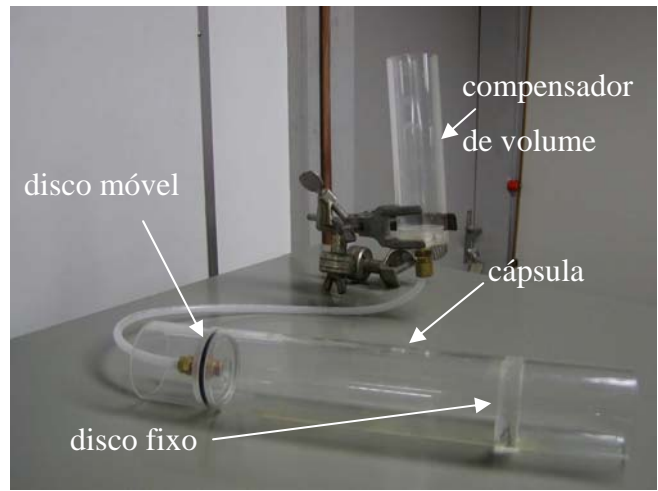


Figura 34. Visualização de uma cápsula.

O posicionamento dos termopares dentro da cápsula varia segundo a etapa de estudo experimental. Pode ser observado, na Fig. 35, a disposição geral destes sensores, são no total nove sensores internos e três externos, os sensores internos foram instalados em um suporte. Os sensores do T1 até o T11 são de tipo K, o P12 é o sensor de temperatura do controle do BTC tipo PT100. Para observar os efeitos de interferência dos termopares no processo de nucleação, foram realizadas experiências prévias com e sem termopares. Estes testes indicaram que a presença dos termopares não influencia o processo de nucleação, isto devido a que a nucleação foi observada na parede interna da cápsula e não nos termopares no suporte destes no cilindro.

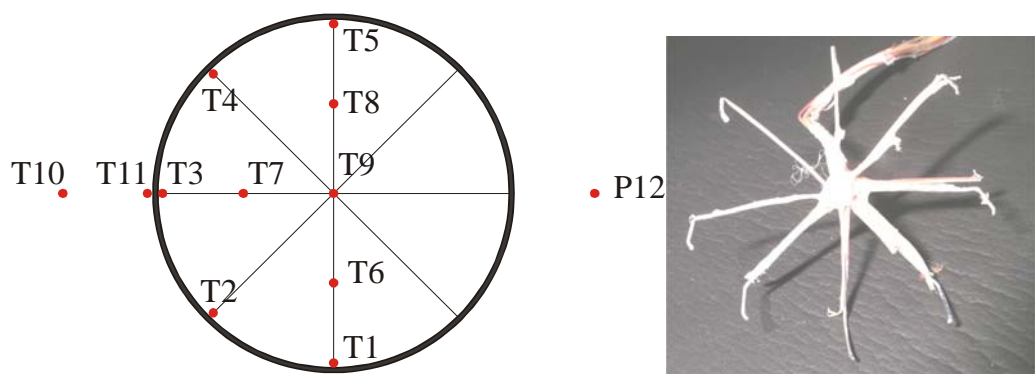


Figura 35. Disposição geral dos sensores de temperatura na cápsula: esquema (esquerda) e foto do suporte com os termopares(direita) .

O posicionamento dos termopares em função do raio da cápsula “R” e da espessura da parede “z”, é apresentado na tabela 1, conforme descrição da Fig. 35.

Tabela 1. Descrição dos sensores de temperatura na cápsula.

Sensor	Tipo	Simb.	Descrição	Distancia do centro do cilindro
T9	K	CC	Centro do cilindro	0
T6, T7, T8	K	RM	Raio médio	R/2
T1, T2, T3, T4, T5	K	PI	Parede interna do cilindro	R
T10	K	FT	Fluido de transferência	1,2*R
P12	PT-100	FT	Fluido de transferência	1,2*R
T11	K	PE	Parede externa do cilindro	R+z

2.1.2. Seção de observação e visualização

A seção de visualização é formada por uma câmera digital, um cubículo de isolamento e uma lâmpada para iluminação. A câmera digital registra 30 imagens por segundo e está colocada na frente da seção de teste (Fig. 36), com a lâmpada iluminando a parte posterior da cápsula. A câmera filma o interior da cápsula durante toda a experiência. Para evitar a condensação no disco fixo da cápsula, a câmera é montada em um ambiente isolado termicamente. Este cubículo é preenchido com nitrogênio, gás inerte, que desloca o ar úmido.

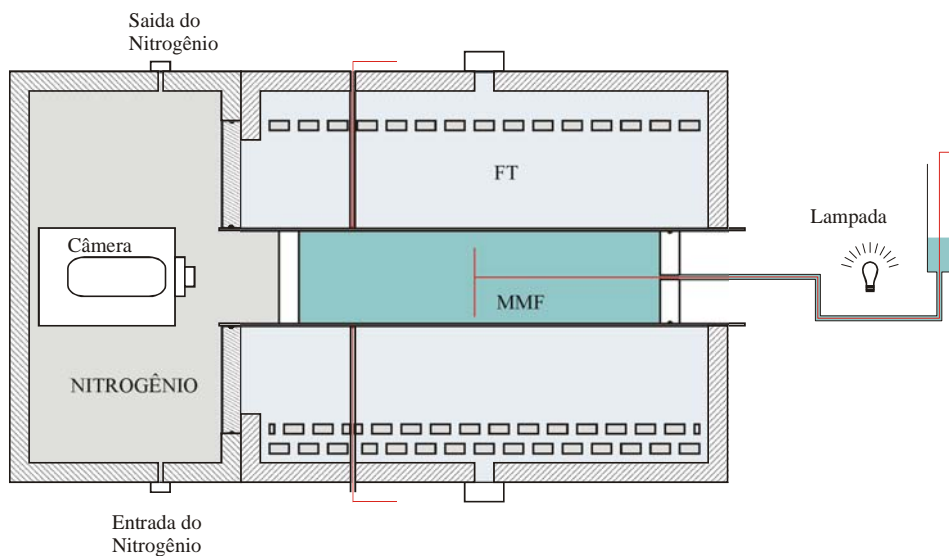


Figura 36. Detalhe da câmara de nitrogênio

Na Fig. 37, pode-se observar a disposição real desta seção. A vedação com a seção de teste se realiza mediante um o'ring e o isolamento térmico é realizado com espuma elastomérica.

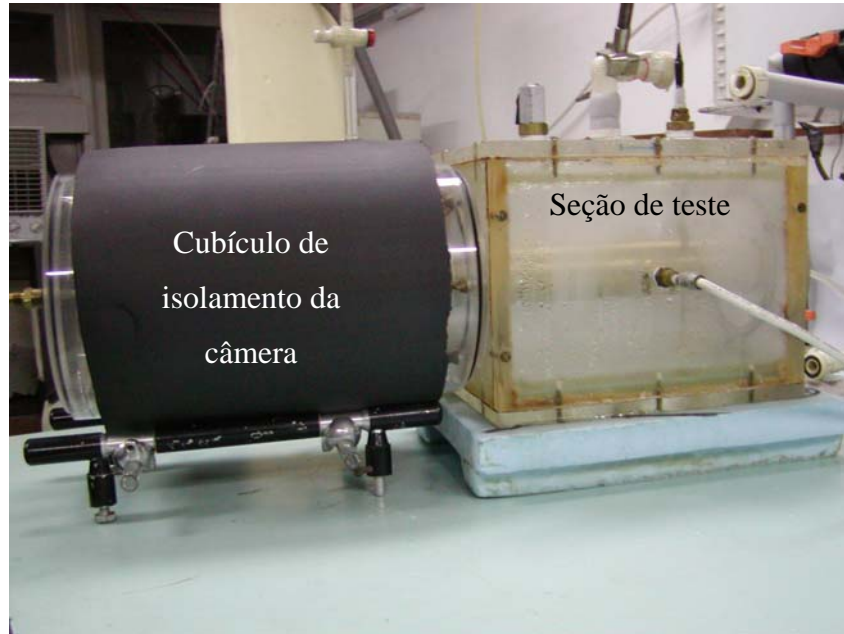


Figura 37. Disposição real da seção de visualização.

2.1.3. Seção de aquisição e processamento de dados experimentais

Esta seção é formada por dois componentes: o sistema de aquisição de dados e um computador. O sistema de aquisição é um equipamento que se comunica com um computador por meio de uma porta serial de tipo RS232, recebe os sinais dos sensores de temperatura e, após processá-los, os envia ao computador para seu armazenamento e posterior processamento. O computador recebe as comunicações do BTC e do aquisitor de dados por meio de portas seriais já descritas. A velocidade de processamento é de 350 MHz e com memória de 64 Mb. Na Fig. 38 pode-se observar o detalhe desta seção. O programa para aquisição de dados é o “HP Bench Link Data Logger” e para o controle do BTC é utilizado o programa “Nescom 201”. Na Fig. 39 pode-se observar a interface destes programas em funcionamento.



Figura 38. Visualização da seção de aquisição e processamento de dados.

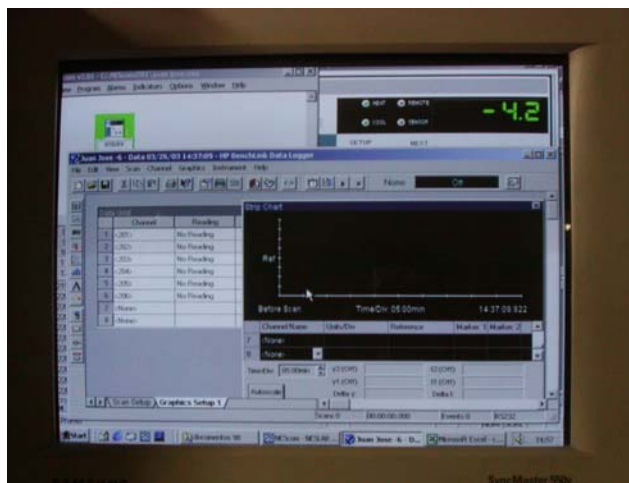


Figura 39. Programa de gerenciamento dos equipamentos

2.1.4. Seção de Resfriamento

A seção de resfriamento é composta pelo fluido de transferência (FT), dois reservatórios e o banho de temperatura constante (BTC).

a.
Banho de temperatura constante (BTC)

O *banho de temperatura constante (BTC)*, Fig 40, tem a função de manter a condição de temperatura constante que resfria a cápsula do FT. O BTC é um equipamento que conta com controle de temperatura PID (proporcional, integral e derivativo), com uma saída para o computador tipo serial RS232. Tem ainda uma saída para controle de referência externa de temperatura tipo RTD PT-100, o qual é gerenciado por um seletor para duas posições: uma para controlar a temperatura no reservatório superior e a outra para controlar a temperatura na seção de teste. A seleção se realiza de acordo com a etapa do processo. A potência de resfriamento do BTC é de 500 W, a 0°C, e para o aquecimento conta com uma resistência elétrica de 1000 W. A faixa de trabalho é de -40 até 150°C.



Figura 40. Banho de temperatura constante (BTC)

O BTC resfria o FT, inicialmente, no reservatório superior. Detalhes sobre o procedimento experimental são apresentados mais adiante. Para acionar automaticamente o BTC em um horário pré-definido foi montado um painel contendo disjuntores, acionador automático (timer) e bobina de arranque, Fig. 41. Este sistema permitia o acionamento automático do banho de forma que a temperatura desejada fosse atingida sem interferência humana.



Figura 41. Painel do banho de temperatura constante

b.
Fluido de transferência (FT)

O fluido de transferência é uma mistura de água destilada e álcool comercial a 50% em volume. Este fluido é resfriado pelo BTC e a sua função é remover a energia térmica do MMF dentro das cápsulas.

c.
Reservatórios

A seção de resfriamento conta com dois reservatórios, o superior e o inferior, fabricados com acrílico de 10 mm de espessura isolado com painéis de poliestireno de 25,5 mm de espessura com volume de 9,5 e 3,0 litros, respectivamente. O reservatório superior tem a função é armazenar o FCE enquanto o mesmo é resfriado pelo banho térmico até atingir a temperatura de teste. Pode-se observar, no esquema da Fig. 42, um corte do reservatório superior, onde são detalhados os difusores para homogeneizar a temperatura dentro deste.

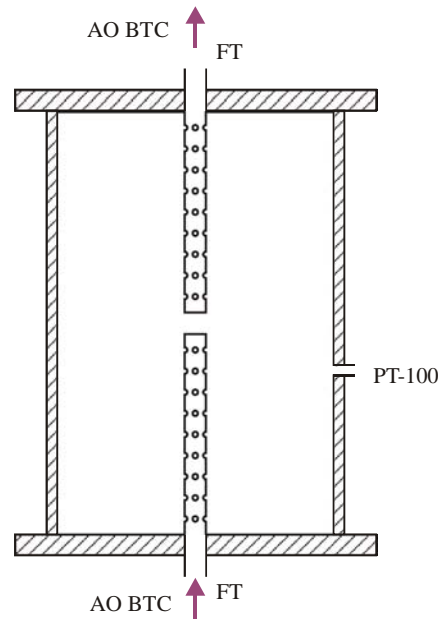


Figura 42. Detalhe do reservatório superior

O reservatório inferior (Fig. 43) tem a função de receber o FT depois deste passar pela seção de teste no início da experiência, quando absorve a primeira parcela da carga térmica, elevada pelo fato de estarem à temperatura ambiente as paredes da seção, tubulação, válvulas, etc. O fluido é bombeado de volta ao reservatório superior ao finalizar cada teste.

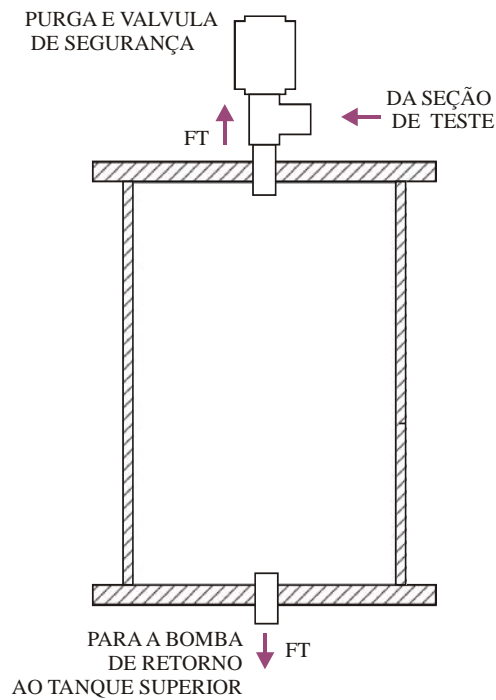


Figura 43. Detalhe do reservatório inferior.

Na Fig. 32, pode-se observar um esquema da bancada e os componentes descritos anteriormente.

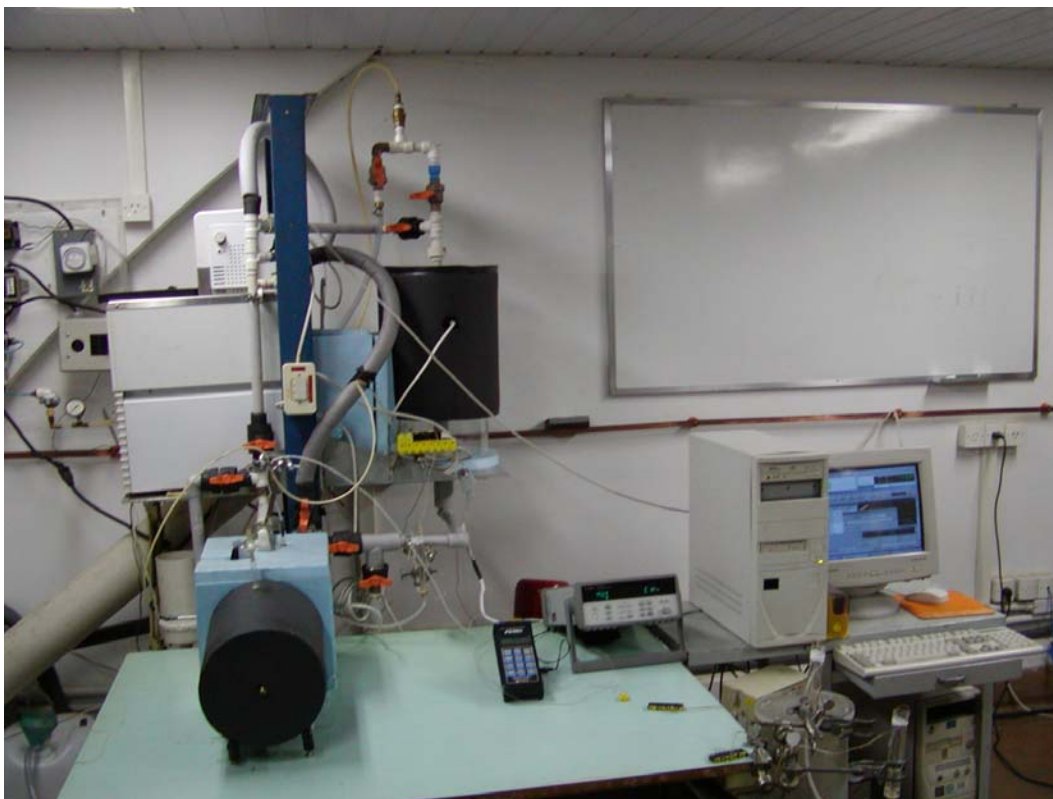


Figura 44. Visualização da bancada experimental

2.2. Procedimento experimental

Basicamente, o objetivo é o monitoramento do super-resfriamento no processo de solidificação. O procedimento experimental está dividido em quatro etapas: a primeira é resfriar o FT até a temperatura de teste, a segunda e a terceira consistem em resfriar a cápsula inicialmente do FT do reservatório superior (2ª etapa) e depois com o BTC (3ª etapa). A quarta e última etapa é retornar o FT do reservatório inferior até o superior para iniciar um novo teste.

Na primeira etapa (Fig. 45), o FT é resfriado pelo BTC no reservatório superior até a temperatura escolhida para o teste. O controle de temperatura é realizado com o sensor PT-100 localizado no reservatório superior. Enquanto isto acontece, o BTC-CI, leva a temperatura do MMF da cápsula (na seção de teste) até a temperatura inicial (condição inicial do MMF). O sistema de aquisição de

dados fica monitorando os sinais dos termopares dentro da cápsula e do FT até que as condições de temperatura desejadas sejam atingidas.

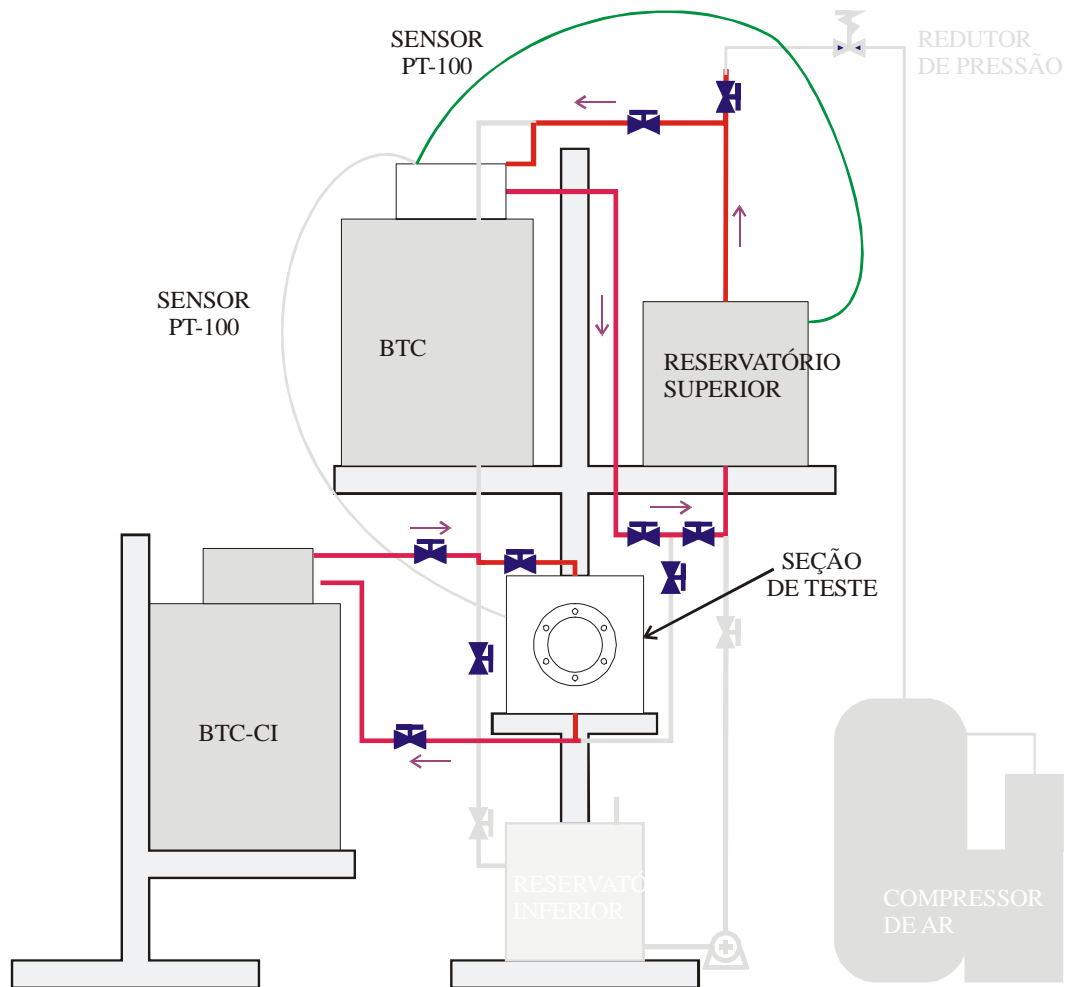


Figura 45. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 1.

Uma vez que o FT e o MMF atingem as temperaturas estabelecidas, o sistema de aquisição é ligado. Logo o FT do reservatório superior é forçado a descer à seção de teste (Fig. 46) até enchê-la e sair da seção até o reservatório inferior. A parcela do 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 volume da seção de teste, com isso se prevê suficiente FT para os testes. O controle de temperatura do BTC passa então a ser realizado pelo sensor da seção de teste. Para manter a vazão constante do FT, nesta primeira etapa, o reservatório superior é mantido sob pressão de ar constante (7 kPa manométrico), assim as condições podem ser consideradas estáveis.

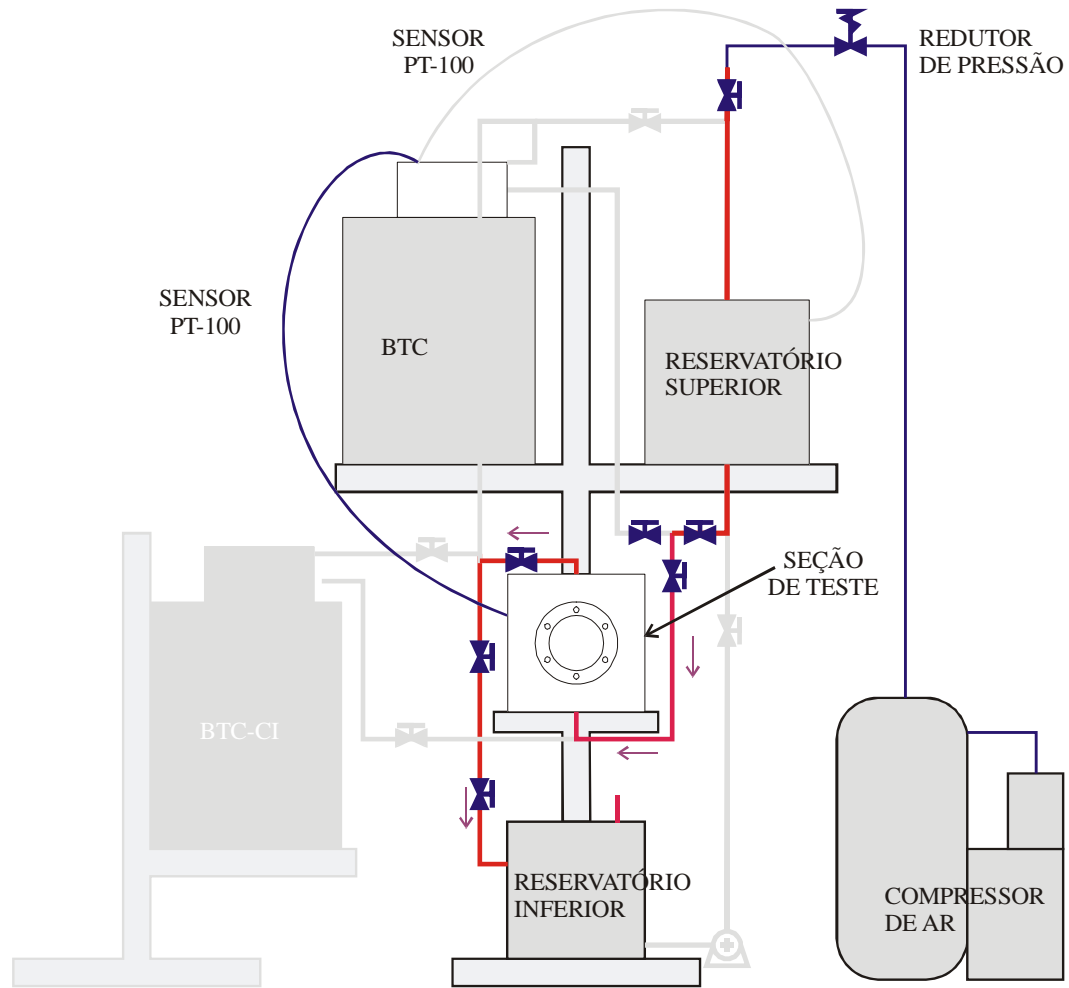


Figura 46. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 2.

Continuando o teste, e uma vez usado o FT do reservatório superior, o BTC continua a tarefa de manter as condições de temperatura do FT (Fig. 47), até a finalização do teste. Pode-se observar que este procedimento faz que o tempo de “recuperação” da temperatura do FT seja mais rápido, já que o BTC recebe FT bem próximo da temperatura de teste.

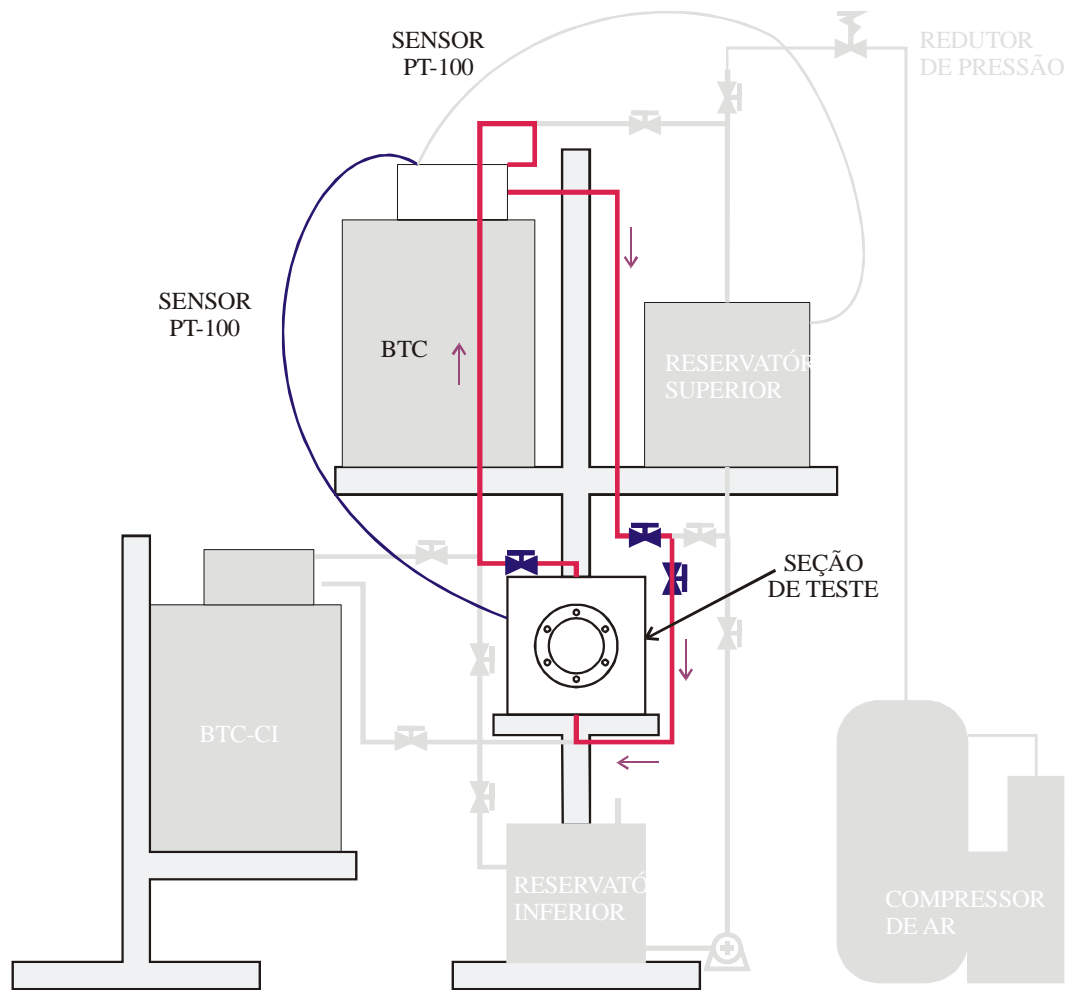


Figura 47. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 3.

No final do teste (etapa 4), o FT é bombeado ao reservatório superior (Fig. 48). Desta forma, a bancada está pronta para realizar outra experiência.

Pode-se observar que o FT escoa em um circuito fechado. Isto é feito para evitar que o FT absorva calor do meio externo e atinja rapidamente a temperatura de teste para a seguinte experiência.

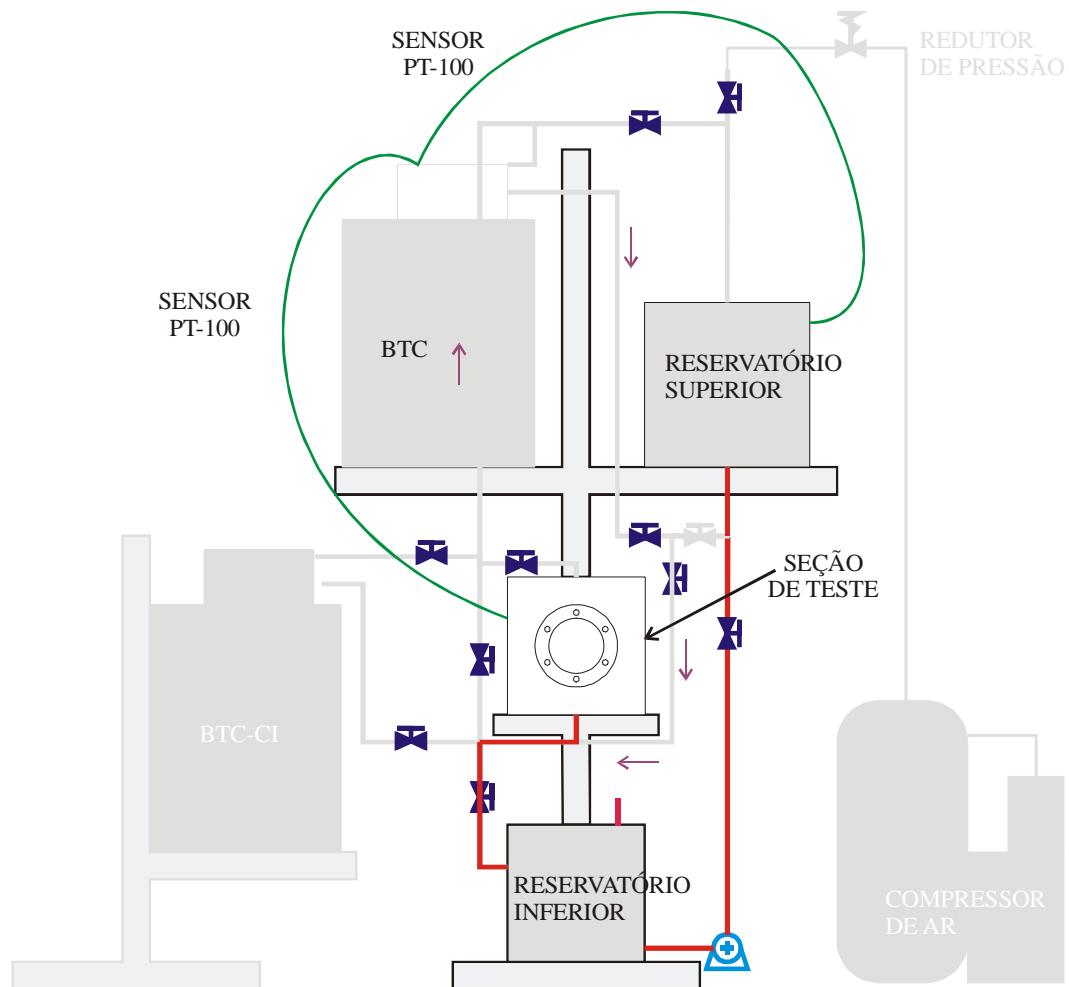


Figura 48. Diagrama de funcionamento do aparato experimental. Etapa 4

2.2.1. Condições de aquisição de dados

O tempo de duração de cada teste varia de 1 até 5 horas, dependendo das condições iniciais do teste. Se a nucleação não acontece em 5 horas, o teste é encerrado. O intervalo de tempo de aquisição de dados é de 1 s. (0,5 s para a parte de visualização).

Em cada teste são visualizados os valores das temperaturas paralelamente à aquisição dos mesmos. Isto, com o objetivo de definir a finalização dos testes, dependendo de parâmetros como: nucleação, fim de solidificação, temperatura de teste, etc.

2.2.2. Condição Inicial do MMF na cápsula

As cápsulas, previamente limpas, são preenchidas com água destilada para garantir sua qualidade e ausência de partículas. Após um repouso de 24 horas, para retirada de ar, está pronta para o início dos testes.

Todos os testes são iniciados a uma temperatura do MMF uniforme (condição inicial). Para reduzir o tempo entre testes, enquanto uma cápsula está sendo testada, uma outra está sendo levada a condições iniciais de temperatura. Assim, quando o teste com a primeira cápsula finaliza, a segunda cápsula está pronta para um teste novo. Esta segunda cápsula é colocada em um dispositivo mostrado na Fig. 49. Pode-se observar que o FT envolve a cápsula até atingir a temperatura inicial desta e iniciar o teste. Para anular todas as possibilidades de contaminação do MMF na cápsula, ao colocar esta no BTC, a cápsula é envolvida por um material plástico que evita o contato direto com o FT.

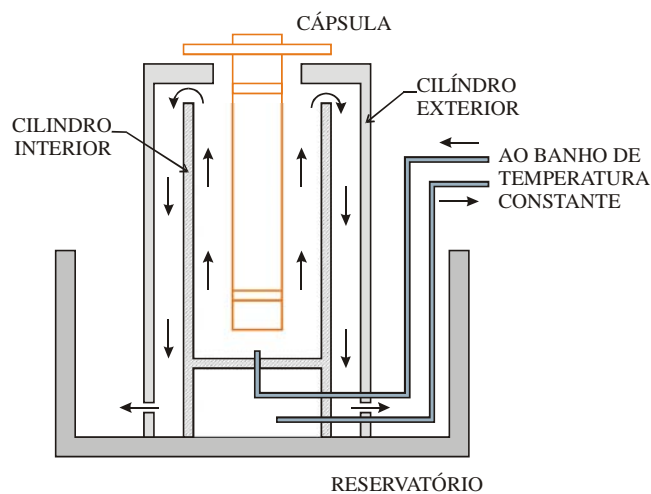


Figura 49. Detalhe do dispositivo para impor a temperatura inicial da cápsula.

Na Fig. 50, pode-se observar uma foto deste componente com uma cápsula sendo levada até a temperatura de teste.



Figura 50. Dispositivo para condição inicial de temperatura do MMF

2.2.3. Temperatura do fluido de transferência (FT)

Para os testes realizados, a temperatura do FT foi mantida fixa. Quando a experiência é iniciada, a temperatura do FT na seção de teste precisa de um tempo de recuperação. Este tem que ser rápido o suficiente para que se possa considerar a temperatura do FT constante durante o teste. O reservatório superior supre a primeira carga térmica da cápsula (que é muito alta no início) e da seção de teste (parede, tubulação, etc.), Logo depois, o BTC assume o controle da temperatura. O tempo de um processo a outro deve ser curto e, no final, a temperatura na seção de teste deve manter-se constante. Para garantir tais condições foi realizado um teste com um caso crítico.

O teste foi realizado com a cápsula de material com maior condutividade térmica, o que significa maior tempo de resposta do BTC (caso crítico). Este caso apresentou valor de Δt (Fig. 51), inferior a 4 minutos para uma $T_{FT} = -10^{\circ}\text{C}$. Este resultado foi considerado razoável para considerações de condição de contorno constante ($T_{FT} = cte.$).

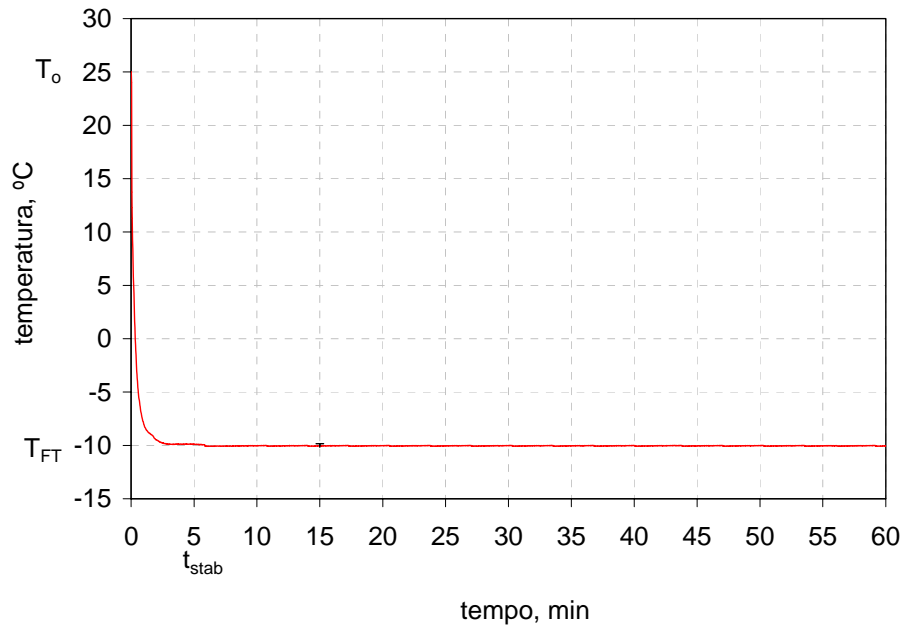


Figura 51. Tempo de resposta no controle da temperatura do BTC.

2.2.4. Parâmetros estudados

O comportamento do fenômeno de super-resfriamento no processo de solidificação da água em cápsulas cilíndricas foi monitorado. Os parâmetros investigados foram: o material e rugosidade da cápsula, a temperatura e a taxa de resfriamento do FT. Nas. As cápsulas foram todas de 45 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura da parede.

a. Análise Estatística do super-resfriamento

Para analisar a probabilidade de super-resfriamento e nucleação da água em cápsulas cilíndricas com diferentes temperaturas do FT e diferentes materiais da cápsula, foram realizados os testes indicados na tabela 2. A repetitividade com as mesmas condições foi de 20 vezes para cada teste. O total de testes foi de 400 aproximadamente. Figs. 52 pode ser observadas, cápsulas com diferentes materiais e a distribuição dos termopares nesta etapa de estudo.

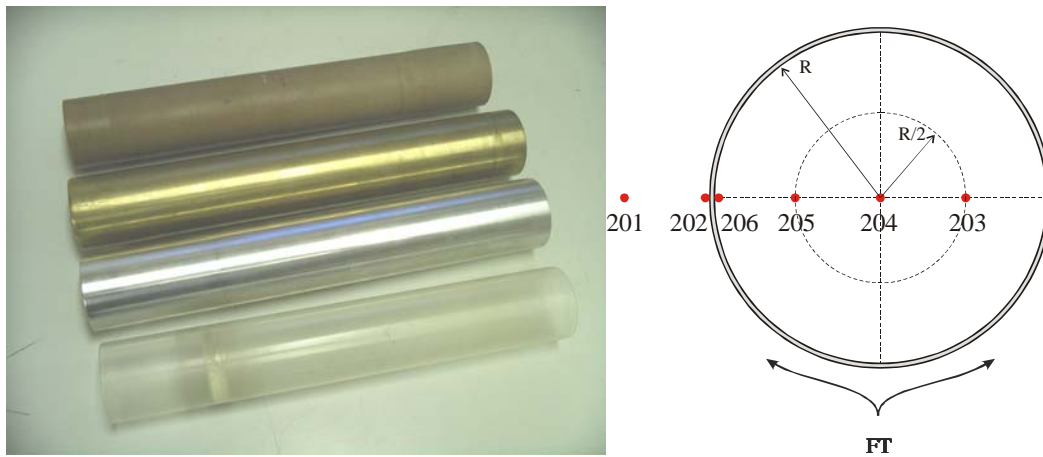


Figura 52. Modelo das cápsulas e detalhe da distribuição dos termopares

Tabela 2. Experiências realizadas para a etapa de análise estatístico.

Diâmetro	Material	Temperatura FT	Repetições
45.0	acrílico	-10	20
		-8	20
		-6	20
		-4	20
		-2	20
	PVC	-10	20
		-8	20
		-6	20
		-4	20
		-2	20
	Bronze	-10	20
		-8	20
		-6	20
		-4	20
		-2	20
	Aluminio	-10	20
-8		20	
-6		20	
-4		20	
-2		20	

b. Influência da Taxa de resfriamento

Foram realizados testes com um mesmo material (alumínio) e um único diâmetro (45 mm), para três diferentes temperaturas do FT (-10, -8 e -6°C). Analisou-se a taxa de resfriamento para diferentes posições no interior do MMF. O total de teste foi de 60. A distribuição dos termopares para esta etapa de estudo pode ser observada na Fig. 53.

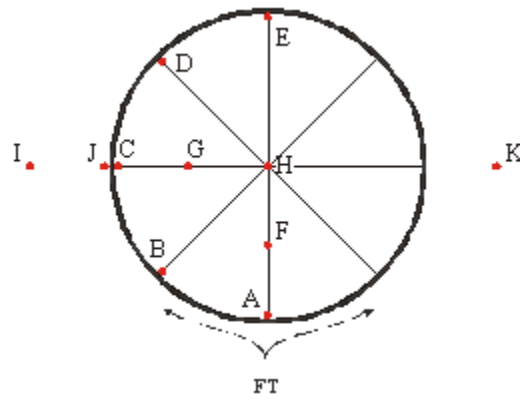


Figura 53. Distribuição dos termopares para o estudo da taxa de resfriamento

c.
Influência da rugosidade

Foram analisadas diferentes rugosidades para um mesmo material (alumínio) da cápsula. Os valores são mostrados na Fig. 54. A “suspeita“ de que este parâmetro influenciava no fenômeno ocorreu no estudo estatístico, posteriormente foi comprovada esta teoria. Os parâmetros usados foram:

Tipo de medição : Ra (rugosidade média)

Comprimento de amostragem : 0.8 mm

Os detalhes destes conceitos estão dados no anexo 1. O numero de testes nesta etapa foi de 400. Os valores de rugosidade estudada foram segundo a tabela 3. Estes valores tentam aproximarse aos valores das cápsulas de PVC, acrílico e bronze.

Tabela 3. Rugosidade das cápsulas de alumínio.

CÁPSULA	Rugosidade (µm)
1	0,16
2	0,60
3	1,30
4	3,27

A localização dos termopares para o estudo da rugosidade é mostrado na Fig. 55.

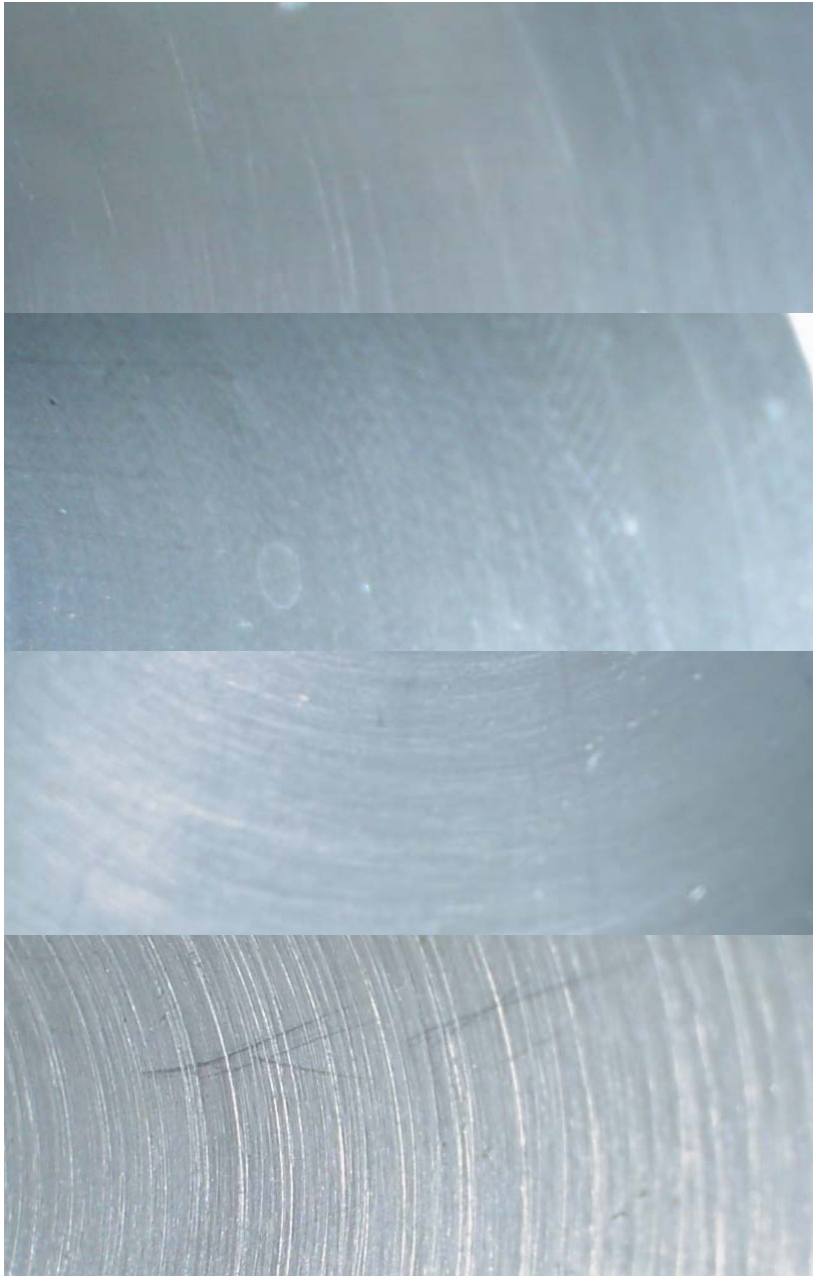


Figura 54. Modelo com diferentes rugosidades. Superfícies superpostas, 0,16; 0,6; 1,3; 2,27 μm

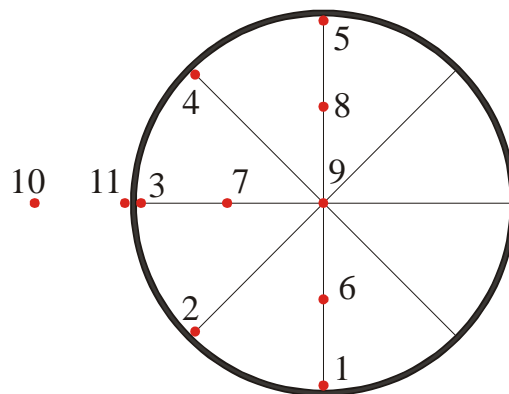


Figura 55. Distribuição dos termopares para o estudo da taxa de resfriamento

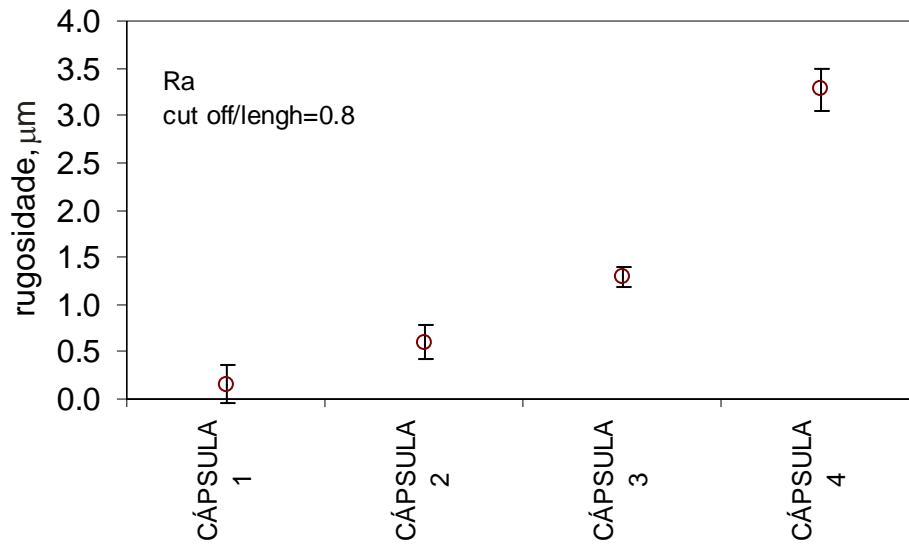


Figura 56. Rugosidade das cápsulas de alumínio de 45 mm de diâmetro.

d. Visualização do super-resfriamento e nucleação

Foram visualizados casos mais relevantes de super-resfriamento e nucleação. Para esta etapa foram instalados os termopares segundo a Fig. 57.

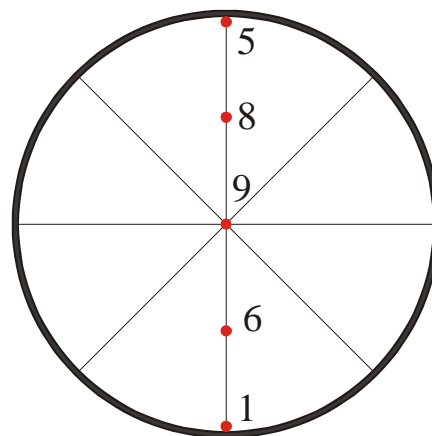


Figura 57. Distribuição dos termopares para o estudo de visualização.

2.3. Incertezas envolvidas

Detalhes sobre a análise das incertezas envolvidas na parte experimental encontram-se no anexo. Um resumo é apresentado a seguir:

Tabela 4. Incertezas envolvidas

Item	Incerteza
Temperatura	0,1°C
Banho Temperatura Constante (BTC)	0,05°C
Dimensões da cápsula	
Diâmetro	0,001 mm
Comprimento	0,001 mm
Volume	10 mm ³
Espessura da parede	0,001 mm
Variação de volume na mudança de fase	0,5 mm ³
Rugosidade	0,05 µm
Taxa de resfriamento	$\delta TR = \sqrt{\left(\frac{1}{Dt} 0,1\right)^2 + \left(\frac{GSR}{Dt^2} 0,01\right)^2}$