

## 6 Referências bibliográficas.

ARNOLD, D. **Laboratory performance of an encapsulated-ice store**, ASHRAE Transactions, 1997, v. 97 (2), pp. 1170 -1178.

BIGG, EE.K. **The supercooling of water**, Proc. Phys. Soc., 1953, v B66, pp. 688 - 694.

BRASLAVSKY I., LIPSON, S.G. **The double-pyramid structure of dendritic ice growing from supercooled water**. Journal of Crystal Growth. 1999, 198/199 pp. 56–61

CHENG K.C. TAKEUCHI M. **Transient natural convection of water in a horizontal pipe with constant cooling rate through 4°C**, Journal of Heat Transfer, 1976, v. 98 pp. 581 - 587.

CHENG K.C. TAKEUCHI M., and R. R. GILPING, **Transient natural convection in a horizontal pipe with maximum density effect and supercooling**, Numerical Heat Transfer, 1978, v.1, pp. 101-115.

CHEN, SIH-LI; WANG, PONG-PING; LEE, TZONG-SHING. **An experimental investigation of nucleation probability of supercooled water inside cylindrical capsules**. Experimental Thermal and Fluid Science, 1999, v.18, pp. 299 - 306.

DEBENEDETTI P. **Metastable Liquids, Concepts and principles**, Princeton Academics Press, 1996

GILPIN R.R. **Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4°C**, Int. J. Heat Mass Transfer, 1975, v. 18, pp. 1307 - 1315.

\_\_\_\_\_. **The effect of cooling rate on the formation of dendritic ice in a pipe with no main Flow**, J. Heat Transfer, 1977, v. 99, pp. 419 - 424.

\_\_\_\_\_. **Modes of Ice Formation and flow blockage that Occur while filling a cold pipe**, Cold Regions Science and Techcology, 1981, v. 5, pp. 163 - 171.

ICHIMIYA K. MOCHIZUKI Y., **The supercooling solidification of liquid droplets-aqueous solution of NaCl**, Transactions of Japanese Association of Refrigeration, 1984, pp. 137 - 42.

KAMAL I. **Bancos de gelo**. Unicamp. 1996.

KASHIWAGI T., HIROSE S., ITOH S., KUROSAKI Y. **Effects of natural convection in a partially supercooled water cell on the release of supercooling**, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1987, v. B53, pp. 1822 - 1827.

KUROSAKI Y., SATOH I. **Freezing of supercooled water on oscillating surface**, Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference, Brighton, UK, 1994, pp. 61 - 66.

LEE T.S., HUNG C.L., CHEN S.L. **Supercooling phenomenon of water inside horizontal cylinders**, J. Chinese Soc. Mech. Engineering, 1996, v. 17(4), pp. 353-364.

MEIJER, P. and CLAUSSE, D. **Rate of ice formation in supercooled water**, Physica, 1983, v. 119B, pp. 243-248.

MISHIMA, o. and STANLEY, E. **The relationship between liquid, supercooled and glassy water**, Nature, 1998, v. 396, pp. 329-335.

MOFFAT, R. J. **Using uncertainty analysis in the planning of na experiment**, J. Fluids Engineering. 1985, v. 107, pp. 173 - 182.

NARUMI A., KASHIWAGI T., SAKATOKU Y., **Cooling and freezing processes of water with a supercooled region in the double horizontal concentric cylinders**, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1990, v. B56, pp. 213 - 220.

OKAWA, S.; SAITO, A.; MINAMI, R.. **The solidification phenomenon of the supercooled water containing solid particles**. International Journal of refrigeration, 2001, v 24, pp. 108 – 117.

OKAWA, S.; SAITO, A.; SUTO, H. **The experimental on freezing of supercooled water using metallic surface**, International Journal of Refrigeration, 2002, v. 25, pp. 514 – 520.

SAITO A., UTAKA Y., OKAWA S., MATSUZAWA K., TAMAKI A., **Fundamental research on the supercooling phenomenon on heat transfer surfaces ± Investigation of an efect of characteristics of surface and cooling rate on a freezing temperature of supercooled water**, Int. J. Heat Mass Transfer, 1990, v.33(8), pp. 1697 –1709.

TOMBARI, E. FERRARI, C.; SALVETTI, G. **Heat capacity anomaly in a large sample of supercooled water**. Chemical Physics Letters, 1999, v 300, pp. 749 – 751.

VAIL G., STANSBURY E.J. **Time dependent characteristics of the heterogeneous nucleation of ice**, Can. J. Phys. 1966 v. 44, pp. 477 - 502.

VAN DER ELSKEN, J. DINGS, J. MICHIELSEN, J. **The freezing of supercooled water**. Journal of molecular Structure, 1991, vol 250, pp. 245-251.

VONNEGUT B. **Nucleation of ice formation by silver iodide**, J. Appl. Phys., 1947, v.18, pp. 593 - 595.

YOON, J. I.; MOON, C. G.; KIM, E.; SON Y. S.; KIM, J. D.; KATO, T.. **Experimental study on freezing of water with supercooled region in a horizontal cylinder**. Applied Thermal Engineering, 2001, v. 21, pp. 657 - 668.

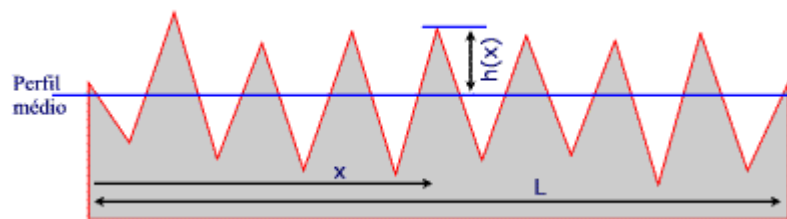
YOON J.I., KIM J.D., **Experimental study for ice formation around two horizontal circular tubes**, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 1995, v1, pp 789 - 797.

## 7. Anexos

### 7.1. Considerações de Rugosidade

#### 7.1.1. Ra (rugosidade média)

Na figura ao lado, o perfil médio é a linha tal que, no comprimento  $L$ , a soma das áreas cheias acima é igual à soma das áreas vazias abaixo (considerando a superfície sem ondulação).



E a rugosidade média é dada por:  $Ra = (1/L) \int_{0,L} | h(x) | dx$

Ra é de longe o método mais usado para indicação da rugosidade. Instrumentos para medir usam circuitos eletrônicos relativamente simples para a operação de integração. Entretanto, Ra não é tudo.

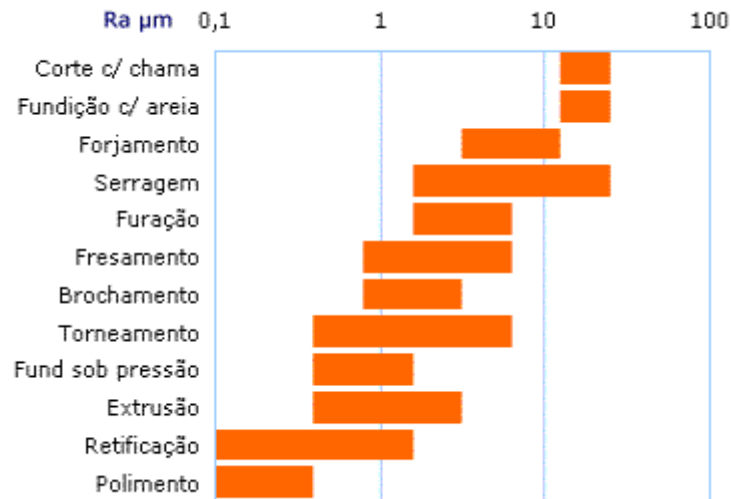
Os perfis ao lado apresentam o mesmo valor de Ra, mas a simples observação visual permite concluir que, a depender da aplicação, os resultados podem ser bastante diferentes.



Se há necessidade de distinção mais rigorosa, outros parâmetros devem ser

considerados, tais como picos e depressões, formas, espaçamentos. E métodos mais sofisticados devem ser considerados.

Na figura abaixo é mostrada a faixa de rugosidades médias típicas para alguns processos.



Obs: notar a escala logarítmica do gráfico. A comparação visual é prejudicada, mas é o recurso que se usa para representar valores em uma faixa tão ampla.

Existem algumas fórmulas para estimar rugosidade de processos de usinagem. Por exemplo, para uma operação de fresagem,

$$Ra = 500 \{ r [r^2 - (a/2)^2]^{1/2} \}.$$

Onde Ra é a rugosidade em µm, r é o raio e mm da ponta da ferramenta e a, o avanço da ferramenta em mm por rotação.

Para torneamento,

$$Ra = 41,66 [a^2 / r]. \text{ Os parâmetros são similares aos da fórmula anterior.}$$

Lembrar que estas fórmulas são estimativas. Os resultados reais dependem de outros fatores, como materiais da peça e da ferramenta, velocidade de corte, lubrificação, temperatura, etc.

### 7.1.2. Rq (rugosidade média quadrática)

É dada por:

$$Rq = [ (1/L) \int_{0,L} h^2(x) dx ]^{1/2}$$

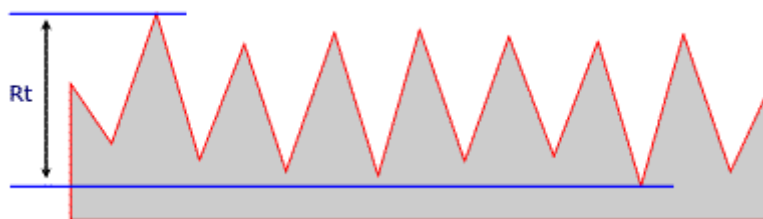
Se a forma do perfil for senoidal, Rq é aproximadamente 1,11 Ra, independente dos parâmetros da senóide. Instrumentos antigos mediam por esta relação, mas, na realidade, os perfis práticos são muito distantes da senóide e, portanto, esta aproximação leva a erros grosseiros. Instrumentos atuais fazem o cálculo por digitalização.

Rq, na prática, é usado apenas para superfícies de sistemas óticos, por ter uma melhor relação com qualidade ótica dos materiais.

### 7.1.3. Rt (rugosidade total)

É dada pela diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa no comprimento considerado.

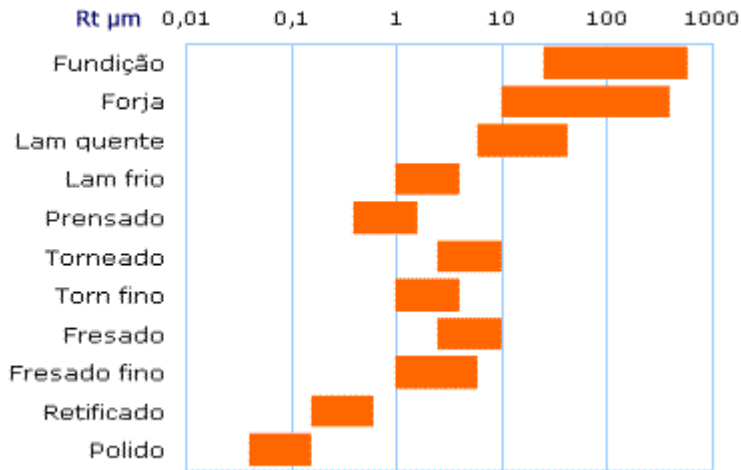
Pode ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação.



O gráfico acima dá uma idéia aproximada da faixa de rugosidade Rt das superfícies obtidas por alguns processos de produção.

Entretanto, essas informações não devem ser consideradas rigorosamente corretas. Servem apenas para comparações aproximadas.

Os processos de produção evoluem e podem apresentar resultados melhores do que os indicados no gráfico.



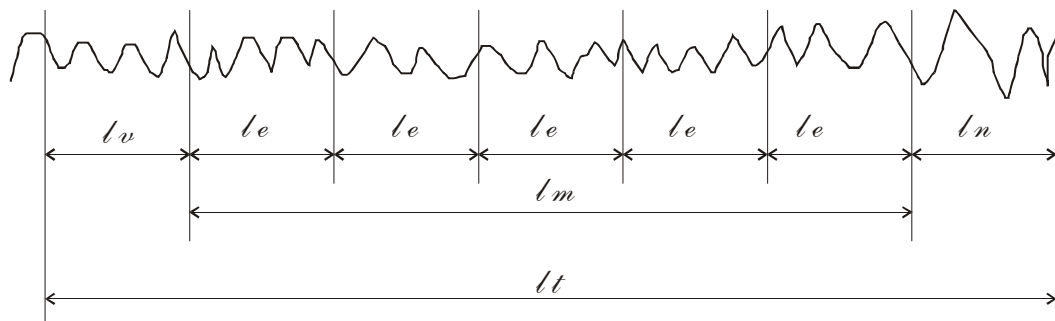
**7.1.4. Critérios para avaliar a rugosidade**

**a. Comprimento de amostragem (Cut off)**

Toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento  $l_m$ , comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento  $l_e$  de comprimento de amostragem (NBR 6405/1988).

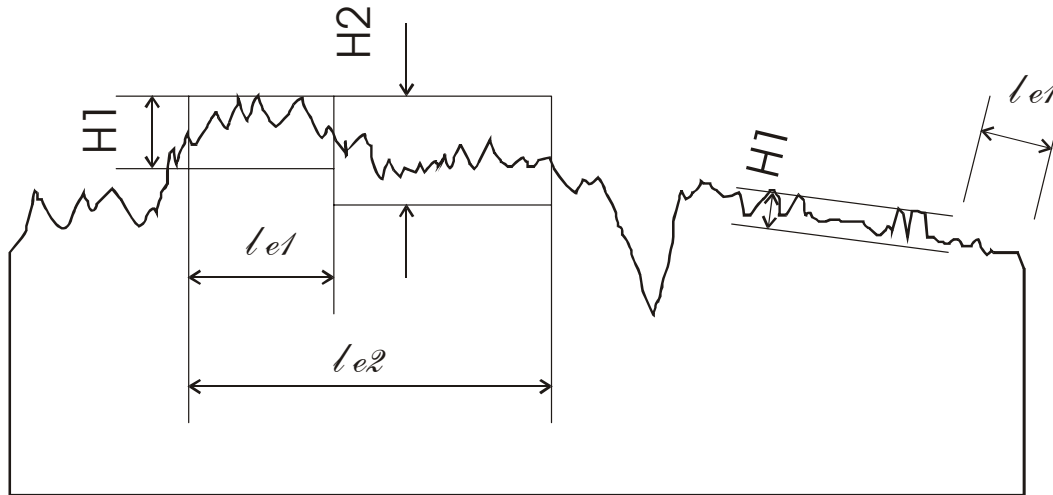
O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de cut-off ( $l_e$ ), não deve ser confundido com a distância total ( $l_t$ ) percorrida pelo apalpador sobre a superfície.

É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros devam medir cinco comprimentos de amostragem e devem indicar o valor médio.



Comprimentos para avaliação de rugosidade

A distância percorrida pelo apalpador deve ser igual a  $5l_e$  mais a distância para atingir a velocidade de mediação  $l_v$  e para a parada do apalpador  $l_m$ . Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, comprimento de amostragem filtra a ondulação.



Rugosidade e ondulação

A rugosidade  $H2$  é maior, pois  $l_{e2}$  incorpora ondulação. A rugosidade  $H1$  é menor, pois, como o comprimento  $l_{e1}$  é menor, ele filtra a ondulação.

## ANEXO 2: PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

O processamento do vídeo para imagens foi realizado mediante diferentes software nos seguintes processos

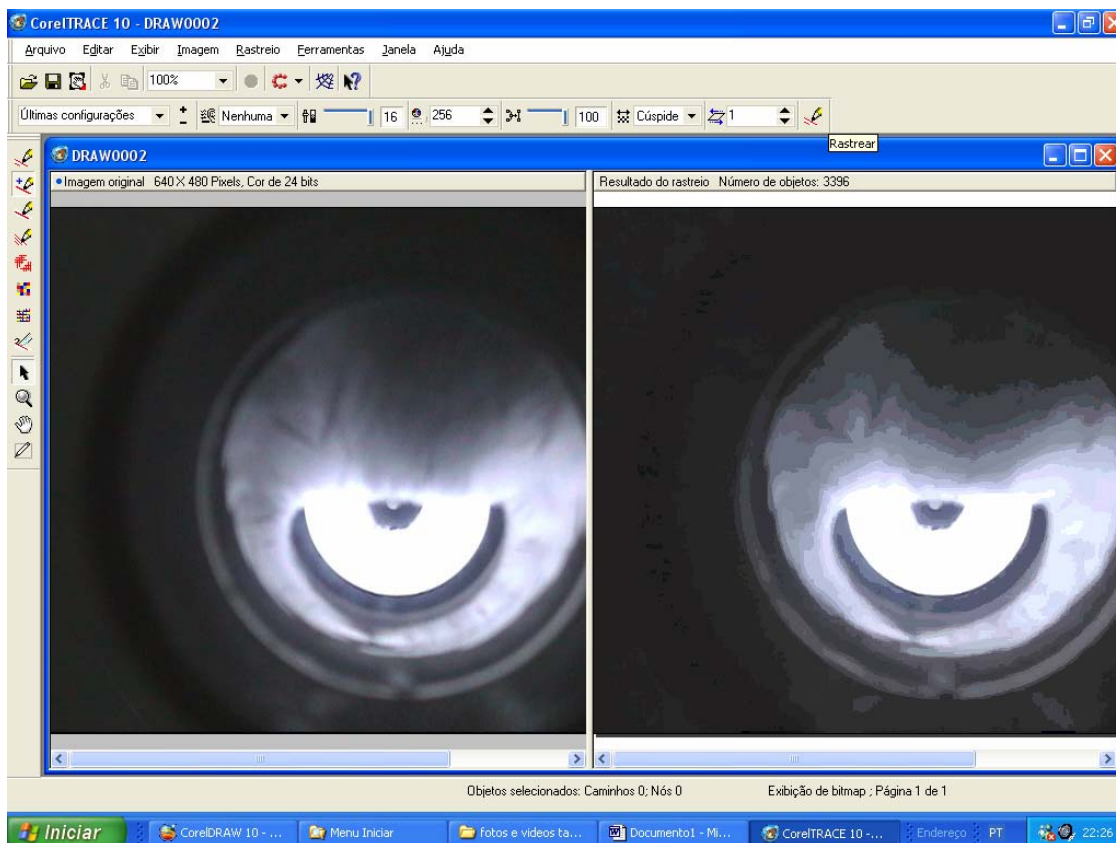
### Etapa 1: Captura da imagem do vídeo.

Mediante o software da câmera digital SONY® Corp.



### Etapa 2: Rastreo da imagem no programa Corel Trace®

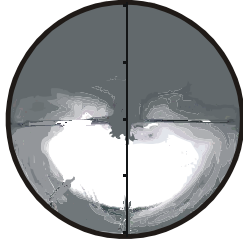
Com a máxima resolução, maior complexidade da figura, máxima gama de cores e mínimo tamanho de objetos foi realizado o rastreo obtendo figuras de até 200000 componentes.





### **Etapa 3: Pos processamento da imagem rastreada no programa COREL DRAW®**

Nesta etapa é isolada parte da imagem que interessa para a futura interpretação.



Para evitar confusões com a coincidência de temperatura em cada posição dos termopares e as imagens respectivas, foram analisadas imagens independentemente para um tempo conhecido, a cada uma destas imagens corresponde-lhe uma distribuição de temperaturas extraídas da planilha Excel correspondente.

#### ANEXO 4: Análise das Incertezas envolvidas

Para a seleção dos instrumentos e a faixa de trabalho destes, foram determinadas as incertezas para valores baixos. Foi utilizado o critério de Moffat (1985). Para a função  $R$  que é função de diferentes variáveis independentes:

Temos:

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$$

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{1/2}$$

Onde:

- $R$         grandeza a ser avaliada  
 $X_i$       variáveis independentes  
 $\delta X_i$     incerteza da variável  $X_i$

#### Incerteza de temperatura

Como já foi dito, os termopares utilizados foram de tipo K. Foi realizado um processo de calibração e determinação das incertezas no Laboratório de medição e instrumentação do ITUC. PUC-Rio.

## IDENTIFICAÇÃO DO INSTRUMENTO CALIBRADO

Termômetro : canal 4com termopar tipo t slot 3  
 Cliente : eng. Mec.  
 Escala : 0 a 65 oC  
 Fabricante : HP  
 Valor de uma Divisão : 0.1 oC  
 Número de casas decimais p/leitura do objeto 2  
 Interpolação dos Valores Corrigidos do Objeto  
     Intervalo de Temperatura 0.5 oC  
     Limite Inferior de Temperatura 30 oC  
     Limite Superior de Temperatura 70 oC  
 Identificação : canal 4 slot 3 com termopar tipo t  
 N/Ordem de Serviço : 57  
 Data de Calibração : 37361  
 Número de Pontos 10

## IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES UTILIZADOS

Temperatura : Termômetro de Resistência de Platina, Identificação Pt100-02, Certificado de Calibração LPT / ITUC 18/01/00, Corrente de Operação 1mA.

## PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Foram colocados num banho de temperatura controlada o objeto e o padrão. Após o estabelecimento do equilíbrio térmico, evidenciado por pelo menos 30 minutos de medições, foram anotados os dois valores ao longo da escala do objeto. Seis (6) medições para cada ponto foram feitas para se determinar a repetitividade.

Profundidade de Imersão do Padrão 110 mm  
 Profundidade de Imersão do Objeto 100 mm

## RESULTADOS : DADOS DE LABORATÓRIO

Identificação : canal 4 slot 3 com termopar tipo t  
 N/Ordem de Serviço : 57  
 Data de Calibração : 37361

## RESULTADOS : VALORES DE INCERTEZA COMBINADA DO OBJETO

		unidade	Ponto de Calibração do Termômetro					Ponto de Calibração do Termômetro			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura do Padrão	up	oC	0.034	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.036	0.036	0.036
Temperatura Indicada do Objeto	uind	oC	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029
Uniformidade do Banho de Calibração	uunif	oC	0.017	0.016	0.014	0.012	0.011	0.009	0.008	0.009	0.010
Temperatura do Objeto	uobj	oC	0.048	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.046	0.047	0.047

## RESULTADOS : COEFICIENTES DA MATRIZ MÍNIMOS QUADRADOS

Identificação : canal 4 slot 3 com termopar tipo t  
 N/Ordem de Serviço : 57  
 Data de Calibração : 37361

	1	2	3	4	5	
1	1E+01	5E+02	2E+04	1E+06	6E+07	5E+02
2	5E+02	2E+04	1E+06	6E+07	4E+09	2E+04
3	2E+04	1E+06	6E+07	4E+09	2E+11	1E+06
4	1E+06	6E+07	4E+09	2E+11	1E+13	6E+07
5	6E+07	4E+09	2E+11	1E+13	8E+14	4E+09

RESULTADOS : COEFICIENTES DO POLINÔMIO DE INTERPOLAÇÃO  $T_{real} = C1 + C2.T_{cor} + C3.T_{cor}^2 + C4.T_{cor}^3 + C5.T_{cor}^4$ 

	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4
C1	-1.156	1.607	8.754	20.290
C2	1.035	0.914	0.438	-0.598
C3		0.001	0.011	0.045
C4			0.000	-0.001
C5				0.000

## RESULTADOS : TEMPERATURA AJUSTADA DO OBJETO POR INTERPOLAÇÃO

Ponto	Indicada Ajustada					Real
	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4		
1	29.50	29.39	29.65	29.80	29.84	29.87
2	32.90	32.91	33.03	33.02	32.99	32.92
3	35.80	35.91	35.93	35.85	35.81	35.79
4	39.50	39.74	39.66	39.55	39.54	39.63
5	42.50	42.84	42.71	42.62	42.63	42.64
6	45.90	46.36	46.19	46.15	46.19	46.12
7	49.60	50.19	50.02	50.05	50.08	50.09
8	54.30	55.06	54.93	55.04	55.04	55.04
9	59.00	59.93	59.89	60.04	59.98	59.99
10	68.50	69.76	70.09	69.98	69.99	69.99

## RESULTADOS : DESVIO MÉDIO QUADRÁTICO DO AJUSTE

Indicada Ajustada					Real
Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4		
0.6852	0.231269782	0.1341	0.0697	0.0628	0

## RESULTADOS : INCERTEZA DA TEMPERATURA INDICADA DO OBJETO INTERPOLADA

Identificação : canal 4 slot 3 com termopar tipo t  
 N/Ordem de Serviço : 57  
 Data de Calibração : 37361

		oC	Ponto de Calibração do Termômetro					Ponto de Calibração do Termômetro				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Temperatura Interpolada pelo Ajuste	Tajuste	oC	29.84	32.99	35.81	39.54	42.63	46.19	50.08	55.04	59.98	
Coeficiente de Sensibilidade	cajuste	oC/oC	0.90	0.95	0.99	1.02	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	
Desvio Médio Quadrático do Ajuste	sajuste	oC	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	
Incerteza Expandida do Ajuste	Uajuste	oC	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	
Incerteza Expandida do Ajuste, Labora	Ulab	oC	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	

Tabela 1 : Calibração de Termômetro com Indicação Direta em oC

Identificação : canal 4 slot 3 com termopar tipo t  
 N/Ordem de Serviço : 57  
 Data de Calibração : 37361

Indicado oC	Correçã oC	Incerteza oC
29.5	0.37	0.10
32.9	0.02	0.10
35.8	-0.01	0.10
39.5	0.13	0.10
42.5	0.14	0.10
45.9	0.22	0.10
49.6	0.49	0.10
54.3	0.74	0.10
59.0	0.99	0.10
68.5	1.49	0.10

**Incerteza do Volume**

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H$$

$$\delta V = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2}$$

$$\delta V = \sqrt{\left( \frac{\pi DH}{2} 0,001 \right)^2 + \left( \frac{\pi D^2}{4} 0,001 \right)^2}$$

$$\delta V = 10 \text{ mm}^3$$

**Incerteza da taxa de resfriamento**

Definindo taxa de resfriamento:

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^n TR_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - T_{Pi-1})}{n t_a}, \text{ ou, } TR = \frac{GSR}{Dt} \dots\dots\dots (5)$$

TR taxa de resfriamento, [°C.min<sup>-1</sup>]

$T_{Pi}$  temperatura da parede interna, [°C]

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

n número de intervalos de tempo

$Dt$  tempo total de super-resfriamento, medido desde o instante que o ponto passa pela temperatura de mudança de fase até a nucleação (= n.  $t_a$ ) [s]

GSR grau de super-resfriamento, ( $T_m - T_n$ ) [°C]

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

$$\delta TR = \sqrt{\left( \frac{1}{Dt} 0,1 \right)^2 + \left( \frac{GSR}{Dt^2} 0,01 \right)^2}$$

para o  $Dt = 0,001$  s.