

5. Referências Bibliográficas

ANATOLIJ R. KAREV; MASOUD FRAZANEH; LÁSZLO E. KOLLAR. “Measuring temperature of the ice surface during its formation by using infrared instrumentation”. International journal of Heat and massa Transfer, Université du Québec á Chicoutimi, Canada. v 50, pp 566-579. 2006.

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

ARSHAD KHAN “Liquid water model: Predicting phase separation and phase characteristics”, Chemistry Department, Pennsylvania State University, DuBois, PA 15801, USA, Journal of Molecular Structure: THEOCHEM 755 (2005) 161–167, 22 August 2005.

BEJAN, A (1993), Convection Heat Transfer, 2nd ed, Wiley, New York, NY, pp.176.

BEJAN, ADRIAN, Heat Transfer John Wiley & Sons, Softcover, 704 Pages, 1993

BENNACER, L. Y. SUN, Y. TOGUYENI, D. GOBIN AND C. BENARD “Structure d'écoulement et transfert de chaleur par convection naturelle au voisinage du maximum de densité”. International Journal of Heat and Mass Transfer, September 1993, Pages 3329-3342.

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

CHEN, SIH-LI, PONG-PING WANG, TZONG-SHING LEE. An experimental investigation of nucleation probability of supercooled water inside cylindrical capsules. Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 18, Issue 4, December 1998, Pages 299-306.

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.

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.

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

GILPIN R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4°C, Int. J. Heat Mass Transfer, 1977, v. 18, pp. 1307 - 1315.

HENEGHAN A.F; HAYMET A.D.J. “Liquid-to-crystal heterogeneous nucleation: bubble accelerated nucleation of pure supercooled water”. Department of Chemistry, University of Houston , USA, Chemical Physics Letters 368, pp 177-182. 2002.

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.

KOUSKSOU T; J.P. BEDECARRATS; A. MIMET. “Dynamic modelling of the storage of an encapsulated ice tank”. Applied Thermal Engineering, Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés , Avenue de l’Université BP 1155. France. v 25, pp 1535-1548. 2004.

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.

LUIS FERNANDO AZEVEDO. “Natural convection in Chaneel flow” Thesis, University of Minnesota, USA, September 1985.

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

MILON G. J.J; BRAGA S.L, “ Estudo de superresfriamento em cápsulas cilíndricas”, Tesis, Pontificia Universidade Catolica do Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

MILON G. J.J; BRAGA S.L, “Superresfriamento em Cápsulas Cilíndricas”, Tesis, Universidade Pontificia Catolica do Rio de Janeiro, Brazil 2003.

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.

RIEGER, H., BEER, H. (1986), "The melting process of ice inside a horizontal cylinder: effect of density anomaly", Journal of Heat Transfer, Vol. 108 pp.166-73.

SAITO A., UTAKA Y., OKAWA S., MATSUZAWA K., TAMAKI A., Fundamental research on the supercooling phenomenon on heat transfer surfaces ± Investigation of an effect 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.

SCALON, V.L., PADILHA, A. E ISMAIL, K.A.R., "Estudo do Processo de mudança de fase em uma cavidade anular", ENCIT 2000, Porto Alegre, Brasil, 2000.

SÉBASTIEN BALIBAR, FRÉDÉRIC CAUPIN ,“Nucleation of crystals from their liquid phase”, Laboratoire de Physique Statistique de l’Ecole Normale Supérieure associé aux Universités Paris, C. R. Physique 7 (2006) 988–999, 29 November 2006.

SEIJI OKAWA, AKIO SAITO, TATSUYUKI MATSUI. “Nucleation of supercooled water on solid surfaces”, Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Tokyo 152-8552, International Journal of Refrigeration 29 (2006) 134–141, Japan, 25 May 2005

SIH-LI CHEN, CHIN-LUNG CHEN, CHUN-CHUH TIN, TZONG-SHING LEE, MING-CHUN KE An experimental investigation of cold storage in an encapsulated thermal storage tank Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 23, Issues 3-4, December 2000, Pages 133-144.

TAKA AKI INADA; XU ZHANG; AKIRA YABE, YOSHIYUKI KOZAWA. Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature. National Institute of advanced Industrial Science and Technology. Journal International. 2001, v 44 pp 4523-4531.

TAKEUCHI M. CHENG K.C. 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.

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.

TSAL, C., YANG, S., HWANG, G., "Maximum density effect on laminar water pipe flow solidification", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41 pp.4251-7. 1998.

TSUYOSHI KAWANAMI, SHOICHIRO FUKUSAKO; MASAHICO YAMADA, KENJI ITOH. "Experiment on melting of slush ice in a horizontal cylindrical capsule". International Journal of Heat and Mass Transfer , Hokkaido University , Japan, v42, pp 2981-2990, 1998.

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

WEBB AND R. VISKANTA, "An experimental and analytical study of solidification of a binary mixture". Heat Transfer 4 (1987), pp. 1739–1744

Wilson T.R.S.; Thomson J.; Tsai C.W.; Yang S.J.; Hwang J. Maximum density effect on laminar water pipe flow solidification. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 41, Number 24, 1 October 1998 , pp. 4251-4257(7)

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.

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.

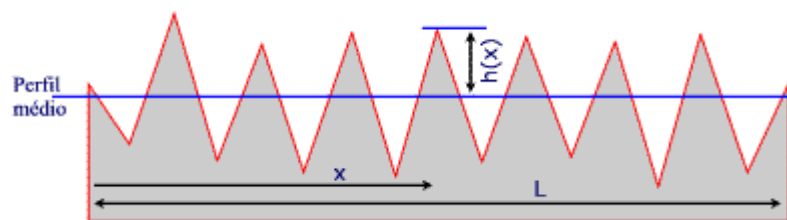
6 Anexos

6.1. Parâmetros da Rugosidade

No presente capítulo são apresentadas as características da rugosidade, as sua influência no processo de nucleação e super-resfriamento, e a forma como foram tomadas as referências para determinar as condições externas da parede interna das cápsulas cilíndricas a testar.

6.1.1. Rugosidade média

Na Fig. 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: $Ra = (1/L) \int_{0,L} |h(x)| dx$

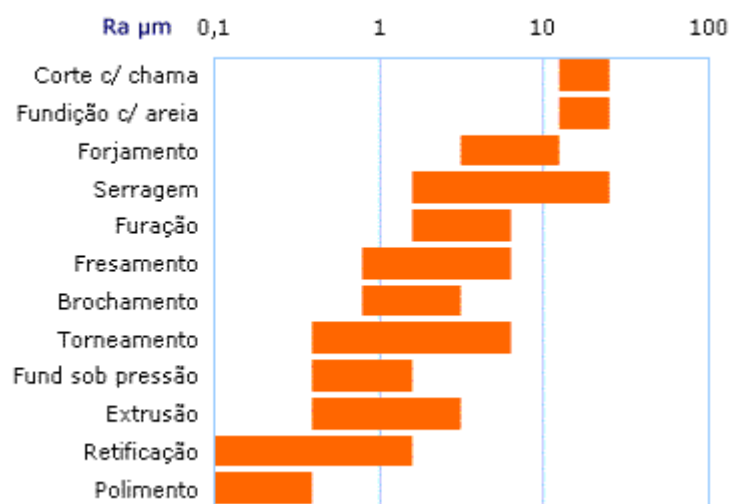
Ra é de longe o método mais usado para indicação da rugosidade. Instrumentos para medir usam circuitos eletrônicos relativamente simples para a operação de integração. Entretanto, Ra não é tudo.

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 uma distinção mais rigorosa, outros parâmetros devem ser considerados, tais como picos e depressões, formas e espaçamentos; e métodos mais sofisticados devem ser considerados.

Na Fig. 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,

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

Em que Ra é a rugosidade em μm; r é o raio em milímetros da ponta da ferramenta; e “a” o avanço da ferramenta em milímetros 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.

6.1.2. Rq (rugosidade média quadrática)

É dada por:

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

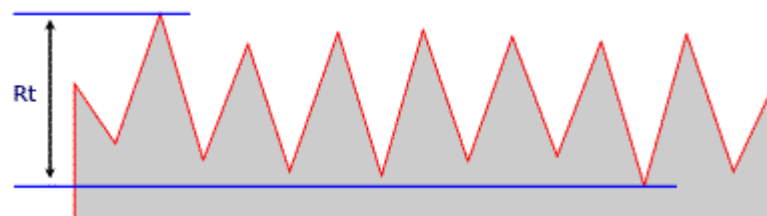
Se a forma do perfil for senoidal (Rq) é aproximadamente 1,11 Ra, independente dos parâmetros da senóide. Instrumentos antigos mediam por esta relação, mas, na realidade, os perfis práticos são muito distantes da senóide e, portanto, esta aproximação leva a erros grosseiros. Instrumentos atuais fazem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

6.1.3. Rt (rugosidade total)

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

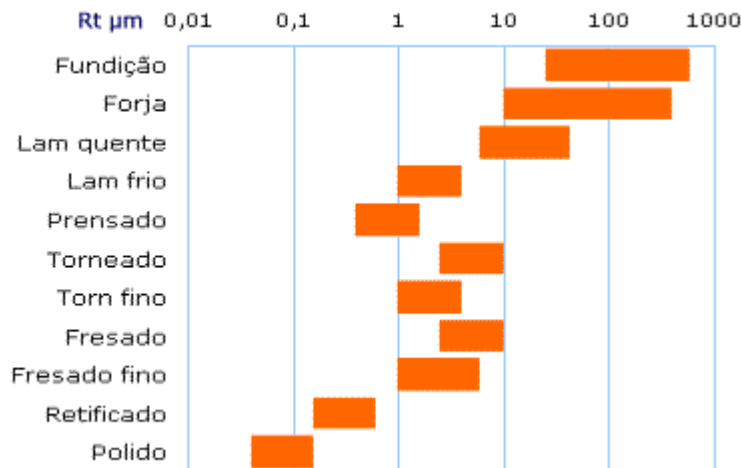
Pode ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação.



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.

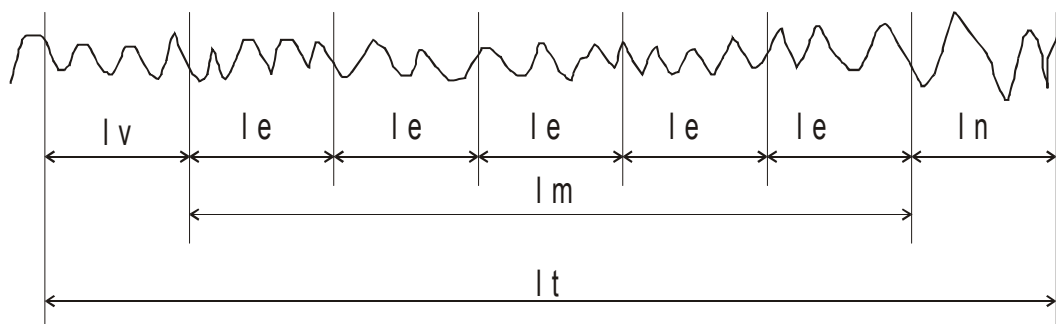


6.1.4. Comprimento de amostragem (Cut off)

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).

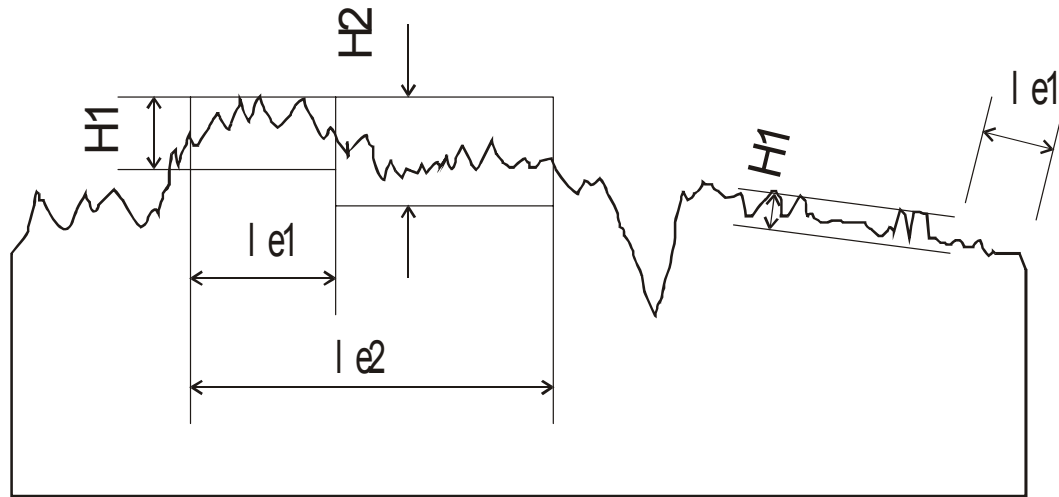
O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de cut-off (l_e), não deve ser confundido com a distância total (l_t) percorrida pelo apalpador sobre a superfície.

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, o comprimento de amostragem filtra a ondulação.



Rugosidade e ondulação

A rugosidade H_2 é maior, pois l_{e2} incorpora a ondulação. A rugosidade H_1 é menor, pois, como o comprimento l_{e1} é menor, ele filtra a ondulação.

6.2. Análise da incerteza

6.2.1. Incerteza de temperatura

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

δX_i incerteza da variável X_i

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 4 com 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

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

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

		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, Laboral	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	Correção 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

6.2.2. Incerteza do Volume

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

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

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

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

6.2.3. Incerteza da taxa de resfriamento

Definindo taxa de resfriamento:

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

TR taxa de resfriamento, [°C.min⁻¹]

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

Δt_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 $Dt = 0,001 \text{ s}$.