cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Uma previsão estatística da microestrutura de solidificação da liga eutética Sn-57%Bi usando planejamento fatorial

Walman Benicio de Castro[1]; Joyce Ingrid Venceslau de Souto[2]; Jefferson Segundo de Lima[3]
[1,2,3]Universidade Federal de Campina Grande, UAEM - PPGEM

Introdução

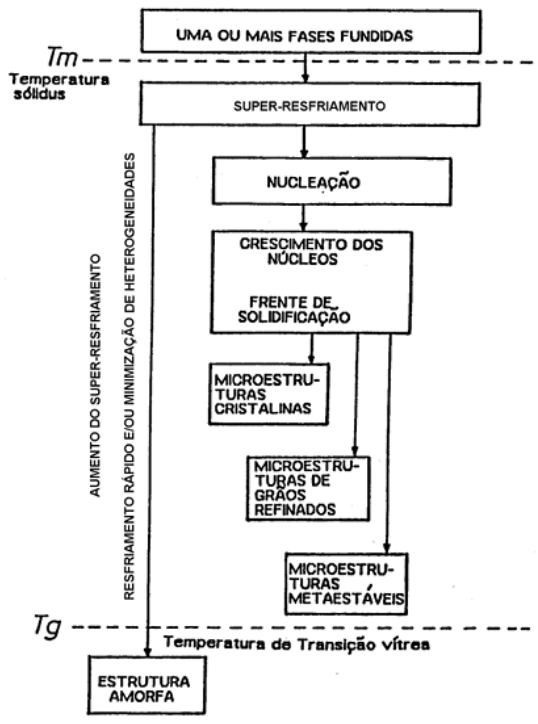


Figura 1. Fluxograma do processo de solidificação rápida. b)

Objetivos

Tabela 1. Variáveis e níveis analisados.

VERIÁVEIS	NÍVEL		
	INFERIOR (-)	PONTO CENTRAL (0)	SUPERIOR (+)
Taxa de resfriamento (A)	0,5	1,0	1,5
Tipo de Fluxo (B)	Vidro P_2O_5-SnO-SnF_2	Vidro P_2O_5-SnO-SnF_2 + Óleo Santovac 5	Óleo Santovac 5
Número de ciclos fusão/solidificação (C)	10	15	20
Superaquecimento (D)	100	150	200

Metodologia

Figura 2. Projeto do sistema experimental.

Resultados e Discussão

Tabela 2. Matriz do projeto fatorial fracionado 2^{4-1}

EXPERIMENTOS	A	B	C	D = ABC	SUPER-RESFRIAMENTO (ΔT) (ºC)
1	-	-	-	-	9,5
2	+	-	-	+	13,5
3	-	+	-	+	10,0
4	+	+	-	-	20,0
5	-	-	+	+	10,5
6	+	-	+	-	14,0
7	-	+	+	-	10,5
8	+	+	+	+	19,5
9	0	0	0	0	12,0
10	0	0	0	0	11,5
11	0	0	0	0	11,0

Tabela 3. Resultados da ANOVA(Triagem) - Statistica 7)

VARIÁVEIS	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	TESTE F	p-valor
Taxa de resfriamento	87,8	1	87,8	20,4	0,004
Tipo de Fluxo	19,5	1	19,5	4,5	0,08
Número de ciclos fusão/solidificação	0,3	1	0,3	0,07	0,8
Superaquecimento	0,03	1	0,03	0,01	0,9
Resíduo	25,8	6	4,3	-	-
Curvatura	8,2	1	8,2	2,3	0,2

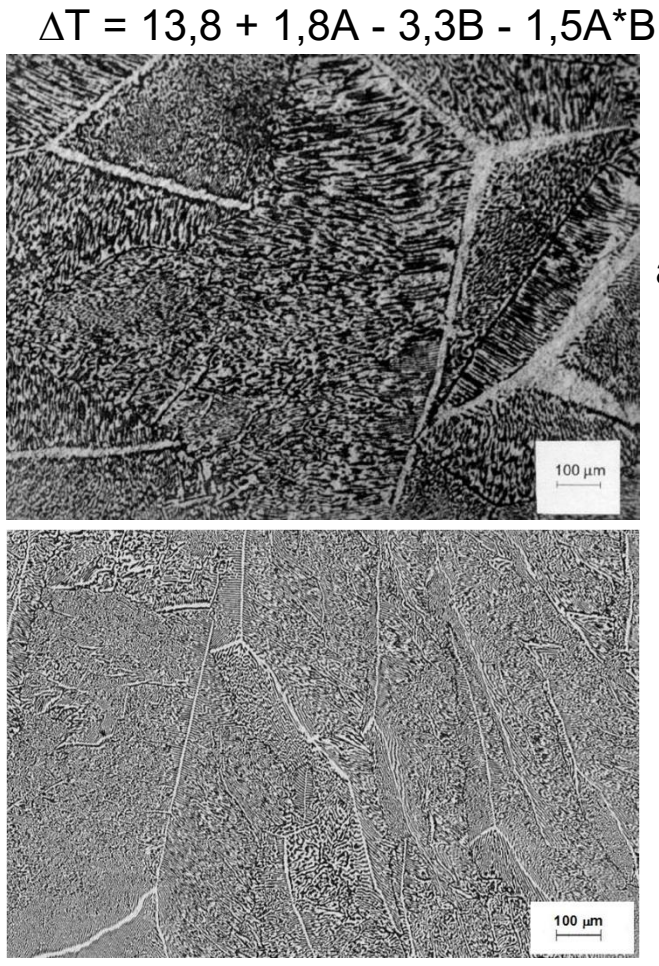
Tabela 4. Matriz do planejamento fatorial completo 2^2

EXPERIMENTO	TAXA DE RESFRIAMENTO (ºC/s)	TIPO DE FLUXO	INTERAÇÃO A x B	(ΔT) (ºC)
1	-	-	+	13,5
2	+	-	-	22,0
3	-	+	-	10,0
4	+	+	+	10,5
5	0	0	0	15,0
6	0	0	0	13,5
7	0	0	0	14,0

Tabela 5. Resultados da ANOVA (otimização).

VARIÁVEIS	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	TESTE F	p-valor
Taxa de resfriamento	42,3	1	42,3	65,7	0,003
Tipo de Fluxo	12,3	1	12,3	19,1	0,02
Interação	9,0	1	9,0	14,0	0,03
Regressão	68,5	3	22,8	38,0	-
Resídua	1,9	3	0,6	-	
Total	70,4	6	-	-	-
Coeficiente de Correlação (R^2)			97%		

$$\Delta T = 13,8 + 1,8A - 3,3B - 1,5A*B$$



a)

b)

Figura 3. Micros da liga: a) ΔT=10 ºC; b) ΔT=22 ºC.

Conclusões

1. Os resultados da ANOVA apresentados indicaram que a taxa de resfriamento e o tipo de fluxo têm um efeito significativo no nível de super-resfriamento;
2. $R^2 = 97\%$ - valores previstos ~ valores obtidos;
3. O modelo gerado é significativo e preditivo.

Referências

YU, Y., MULLIS, A. M. amd COCHRANE, R. F., Rapidly solidified Ag-Cu eutectics: A comparative study using drop-tube and melt fluxing techniques, Materials Science and Engineering, vol. 117, pp. 1-6, 2016.
BOX, G. E. P., HUNTER, W. G. and HUNTER, J. S., Statistics for experiments. An introduction to design, data analysis and model building, Wiley: New York, 1978.
TURNBULL, D., Formation of Crystal Nuclei in Liquid Metals, J. Appl. Phys., vol.21, pp. 1022-1028, 1950.