



**SMM0193 - Engenharia e Ciência dos Materiais I**

Construção do Diagrama de Equilíbrio de Fases do  
sistema Sn-Zn e Análise Microestrutural de ligas de  
Cd-Zn

GABRIEL LUENEBERG - 14746439

PROFESSOR:

LUIZ CARLOS CASTELETTI

18/03/2024

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Materiais e Metodologia</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>4</b>
4.1	Parte 1 . . . . .	4
4.2	Parte 2 . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Referências</b>	<b>12</b>

# 1 Introdução

A análise da microestrutura das ligas em diferentes condições e a construção de diagramas de fases são procedimentos fundamentais para compreender o comportamento dos materiais metálicos em diversas aplicações. Nesse contexto, o estudo dos sistemas binários desempenha um papel crucial na engenharia de materiais. Nesta prática, o foco será na obtenção de diagramas de equilíbrio de sistemas binários utilizando o Método da Curva de Resfriamento Contínuo. Este método permite caracterizar as transformações de fase e os pontos de fusão e solidificação ao longo de um intervalo de temperatura. Além disso, será realizada uma análise da microestrutura de sistemas binários específicos, com o intuito de correlacioná-la com seus respectivos diagramas de equilíbrio. Esta análise permitirá identificar as fases presentes e compreender as relações entre composição química, temperatura e microestrutura. Ao final desta prática, espera-se obter uma compreensão mais profunda do comportamento dos sistemas binários estudados.

## 2 Objetivos

O objetivo desta prática é examinar a estrutura microscópica de sistemas binários e criar seus diagramas de equilíbrio usando o Método da Curva de Resfriamento Contínuo. O intuito é compreender as mudanças nas fases, assim como os pontos de fusão e solidificação em uma faixa específica de temperatura. Também busca-se relacionar as observações na estrutura microscópica com as informações nos diagramas de equilíbrio, identificando as fases presentes e compreendendo como a composição química e a temperatura afetam a estrutura. Em conclusão, é almejado obter uma compreensão mais profunda do comportamento dos sistemas estudados.

## 3 Materiais e Metodologia

Para este experimento os seguintes materiais foram utilizados:

- Amostras de liga Cd-Zn eutética
- Amostras de ligas Sn-Zn (60%, 30%, 8.9% de Zinco);
- Amostras de ligas Sn e Zn puras
- Forno elétrico;
- Termopar;

- Cadinhos de cerâmica;
- Termômetro;
- Registrador gráfico de temperatura;
- Tabela para conversão de mV para  $^{\circ}\text{C}$ ;
- Microscópio óptico.

As ligas Sn-Zn foram submetidas a um processo de fusão, atingindo uma temperatura de aproximadamente  $500^{\circ}\text{C}$  no interior de cadinhos de cerâmica. Então, foram deixadas para resfriar até alcançarem a temperatura ambiente. Os cadinhos cerâmicos proporcionaram um resfriamento gradual, mais próximo do estado de equilíbrio, facilitando a elaboração do diagrama. As variações de temperatura ao longo do resfriamento foram capturadas por um termopar e registradas em mV por um dispositivo de registro, sendo então convertidas em graus Celsius por meio de uma tabela de conversão. Esse procedimento foi repetido para diferentes amostras, cada uma com composições distintas de Zn. Para a segunda parte do experimento, as amostras da liga Cd-Zn foram examinadas através de um microscópio óptico para a visualização das microestruturas.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Parte 1

Para plotar os gráficos, um termopar foi utilizado, permitindo a conversão da diferença de temperatura em uma diferença de potencial elétrico. Posteriormente, as leituras foram capturadas e convertidas em milivolts (mV). Para interpretar os dados e representá-los com precisão, uma tabela de conversão foi empregada, relacionando os valores de milivolts às temperaturas correspondentes em graus Celsius. Essa abordagem possibilitou a criação de gráficos detalhados, demonstrando claramente as variações de temperatura ao longo do período monitorado.

Experiências de ciência dos materiais									
Tabela E-5. Temperatura x F.E.M. para o Termopar Chromel-Alumel									
Graus centígrados					Junção de referência a 0°C				
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32
10	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,12
30	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,52
40	1,60	1,64	1,68	1,72	1,76	1,80	1,84	1,88	1,92
50	2,00	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,24	2,28	2,32
60	2,40	2,44	2,48	2,52	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72
70	2,80	2,84	2,88	2,92	2,96	3,00	3,04	3,08	3,12
80	3,20	3,24	3,28	3,32	3,36	3,40	3,44	3,48	3,52
90	3,60	3,64	3,68	3,72	3,76	3,80	3,84	3,88	3,92
100	4,00	4,04	4,08	4,12	4,16	4,20	4,24	4,28	4,32
110	4,50	4,54	4,58	4,62	4,66	4,70	4,74	4,78	4,82
120	4,90	4,94	4,98	5,02	5,06	5,10	5,14	5,18	5,22
130	5,30	5,34	5,38	5,42	5,46	5,50	5,54	5,58	5,62
140	5,70	5,74	5,78	5,82	5,86	5,90	5,94	5,98	6,02
150	6,10	6,14	6,18	6,22	6,26	6,30	6,34	6,38	6,42
160	6,50	6,54	6,58	6,62	6,66	6,70	6,74	6,78	6,82
170	6,90	6,94	6,98	7,02	7,06	7,10	7,14	7,18	7,22
180	7,30	7,34	7,38	7,42	7,46	7,50	7,54	7,58	7,62
190	7,70	7,74	7,78	7,82	7,86	7,90	7,94	7,98	8,02
200	8,10	8,14	8,18	8,22	8,26	8,30	8,34	8,38	8,42
210	8,50	8,54	8,58	8,62	8,66	8,70	8,74	8,78	8,82
220	8,90	8,94	8,98	9,02	9,06	9,10	9,14	9,18	9,22
230	9,30	9,34	9,38	9,42	9,46	9,50	9,54	9,58	9,62
240	9,70	9,74	9,78	9,82	9,86	9,90	9,94	9,98	10,02
250	10,10	10,14	10,18	10,22	10,26	10,30	10,34	10,38	10,42
260	10,50	10,54	10,58	10,62	10,66	10,70	10,74	10,78	10,82
270	10,90	10,94	10,98	11,02	11,06	11,10	11,14	11,18	11,22
280	11,30	11,34	11,38	11,42	11,46	11,50	11,54	11,58	11,62
290	11,70	11,74	11,78	11,82	11,86	11,90	11,94	11,98	12,02
300	12,10	12,14	12,18	12,22	12,26	12,30	12,34	12,38	12,42
310	12,50	12,54	12,58	12,62	12,66	12,70	12,74	12,78	12,82
320	12,90	12,94	12,98	13,02	13,06	13,10	13,14	13,18	13,22
330	13,30	13,34	13,38	13,42	13,46	13,50	13,54	13,58	13,62
340	13,70	13,74	13,78	13,82	13,86	13,90	13,94	13,98	14,02
350	14,10	14,14	14,18	14,22	14,26	14,30	14,34	14,38	14,42
360	14,50	14,54	14,58	14,62	14,66	14,70	14,74	14,78	14,82
370	14,90	14,94	14,98	15,02	15,06	15,10	15,14	15,18	15,22
380	15,30	15,34	15,38	15,42	15,46	15,50	15,54	15,58	15,62
390	15,70	15,74	15,78	15,82	15,86	15,90	15,94	15,98	16,02
400	16,10	16,14	16,18	16,22	16,26	16,30	16,34	16,38	16,42
410	16,50	16,54	16,58	16,62	16,66	16,70	16,74	16,78	16,82
420	16,90	16,94	16,98	17,02	17,06	17,10	17,14	17,18	17,22
430	17,30	17,34	17,38	17,42	17,46	17,50	17,54	17,58	17,62
440	17,70	17,74	17,78	17,82	17,86	17,90	17,94	17,98	18,02
450	18,10	18,14	18,18	18,22	18,26	18,30	18,34	18,38	18,42
460	18,50	18,54	18,58	18,62	18,66	18,70	18,74	18,78	18,82
470	18,90	18,94	18,98	19,02	19,06	19,10	19,14	19,18	19,22
480	19,30	19,34	19,38	19,42	19,46	19,50	19,54	19,58	19,62
490	19,70	19,74	19,78	19,82	19,86	19,90	19,94	19,98	20,02
500	20,10	20,14	20,18	20,22	20,26	20,30	20,34	20,38	20,42
510	20,50	20,54	20,58	20,62	20,66	20,70	20,74	20,78	20,82
520	20,90	20,94	20,98	21,02	21,06	21,10	21,14	21,18	21,22
530	21,30	21,34	21,38	21,42	21,46	21,50	21,54	21,58	21,62
540	21,70	21,74	21,78	21,82	21,86	21,90	21,94	21,98	22,02
550	22,10	22,14	22,18	22,22	22,26	22,30	22,34	22,38	22,42
560	22,50	22,54	22,58	22,62	22,66	22,70	22,74	22,78	22,82
570	22,90	22,94	22,98	23,02	23,06	23,10	23,14	23,18	23,22
580	23,30	23,34	23,38	23,42	23,46	23,50	23,54	23,58	23,62
590	23,70	23,74	23,78	23,82	23,86	23,90	23,94	23,98	24,02
600	24,10	24,14	24,18	24,22	24,26	24,30	24,34	24,38	24,42

Figura 1: Tabela de conversão utilizada

A seguir estão os gráficos gerados pelo dispositivo e seus respectivos pontos de inflexão, que representam a linha onde o material começa a se tornar sólido ou líquido:

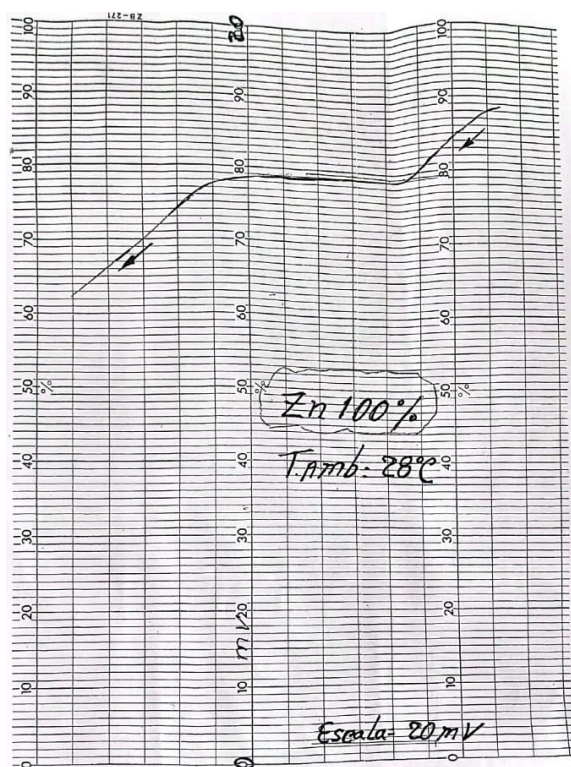


Figura 2: 100% Zn

Para a liga de 100% Zn, o primeiro ponto de inflexão acontece quando ha uma diferença de potencial de 15,8 mV, o que equivale a aproximadamente 386°C. Quando somado a temperatura ambiente de 28°C encontra-se que o ponto de inflexão ocorre em 414°C.

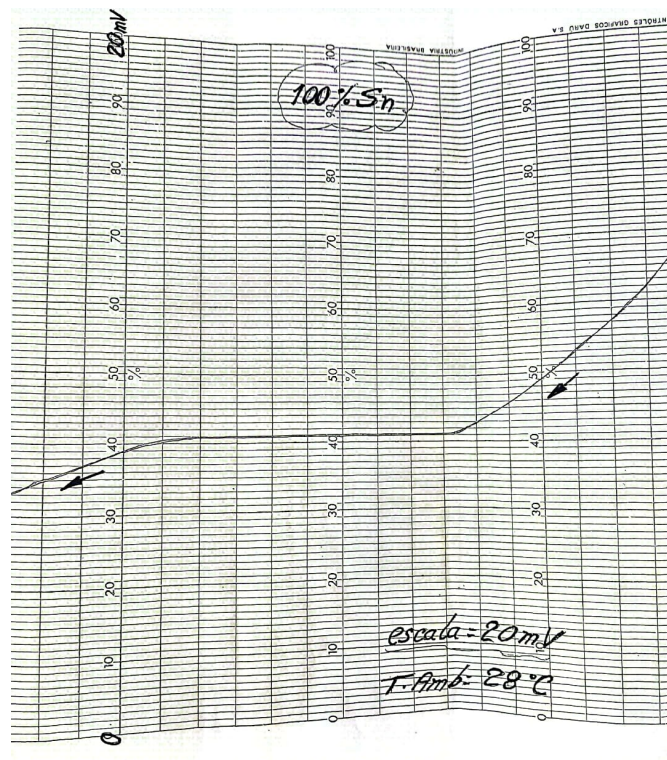


Figura 3: 100% Sn

Para a liga de 100% Sn, o primeiro ponto de inflexão acontece quando ha uma diferença de potencial de 8,2 mV, o que equivale a aproximadamente 202°C. Quando somado a temperatura ambiente de 28°C encontra-se que o ponto de inflexão ocorre em 230°C.



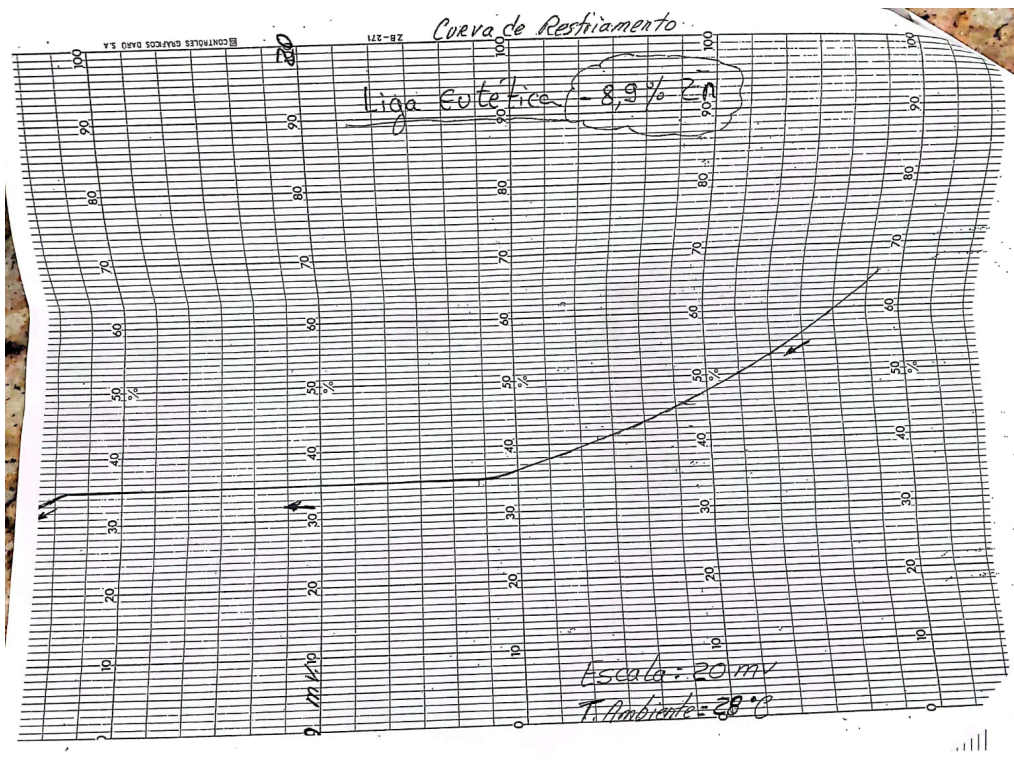


Figura 4: Liga eutética (8,9% Zn e 91,1% Sn)

Para a liga eutética, o primeiro ponto de inflexão acontece quando ha uma diferença de potencial de 7 mV, o que equivale a aproximadamente 172°C. Quando somado a temperatura ambiente de 28°C encontra-se que o ponto de inflexão ocorre em 200°C.

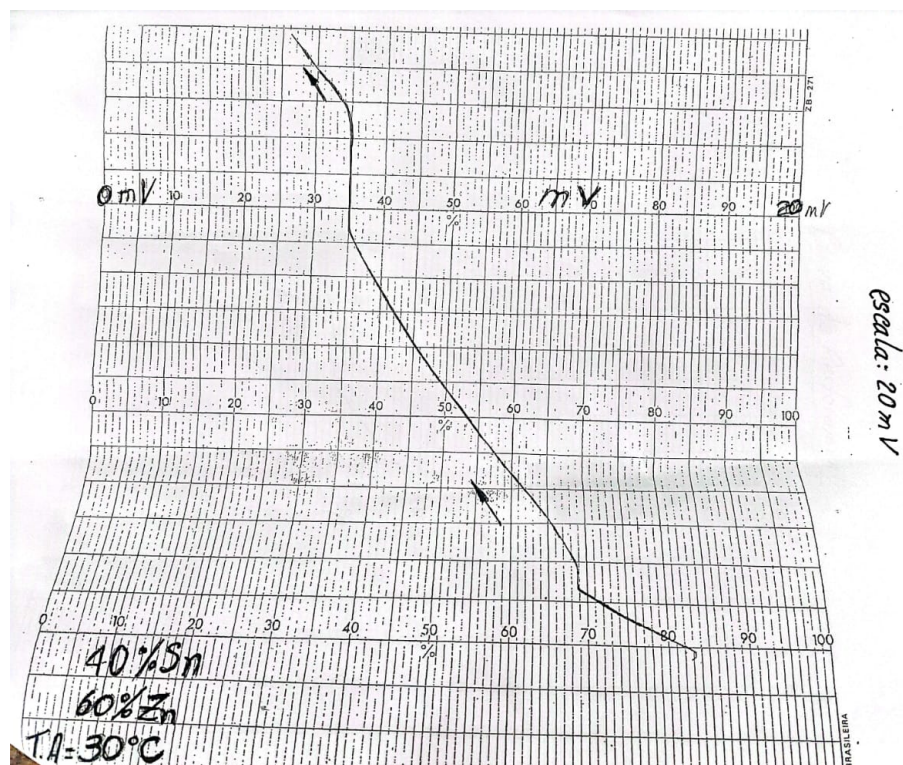


Figura 5: 60% Zn e 40% Sn

Para a liga 60% Zn e 40% Sn, o primeiro ponto de inflexão acontece quando ha uma diferença de potencial de 7 mV, o que equivale a aproximadamente 172°C. Quando somado a temperatura ambiente de 30°C encontra-se que o ponto de inflexão ocorre em 202°C.

Já o segundo ponto ocorre quando o termopar atinge 13,8 mV o que equivale a 338°C, acumulando um total de 368°C quando a temperatura ambiente é considerada

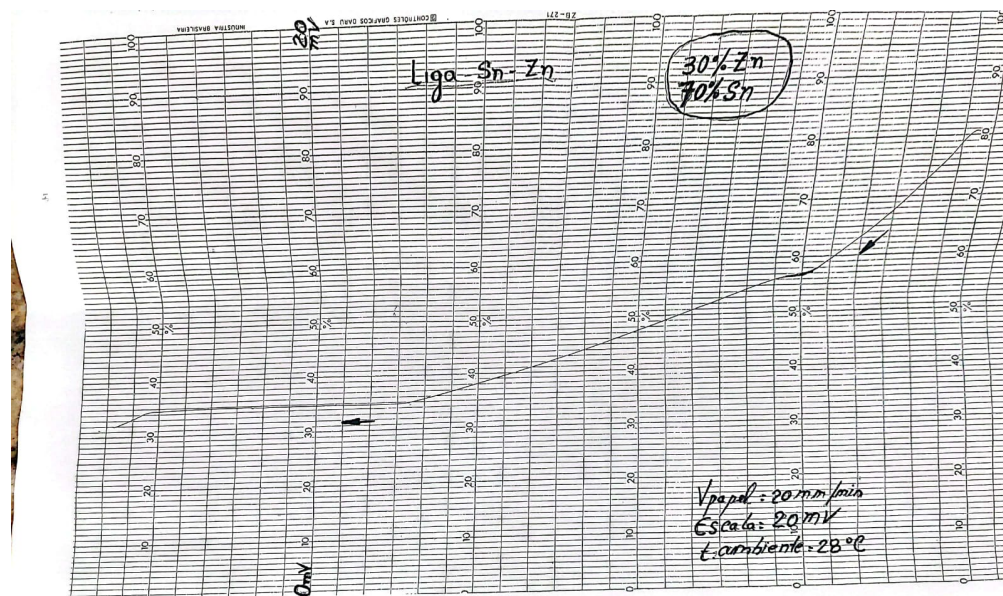


Figura 6: 30% Zn e 70% Sn

Para a liga 30% Zn e 70% Sn, o primeiro ponto de inflexão acontece quando ha uma diferença de potencial de 11,4 mV, o que equivale a aproximadamente 280°C. Quando somado a temperatura ambiente de 28°C encontra-se que o ponto de inflexão ocorre em 308°C.

Já o segundo ponto ocorre quando o termopar atinge 6,9 mV o que equivale a 169°C, acumulando um total de 197°C quando a temperatura ambiente é considerada



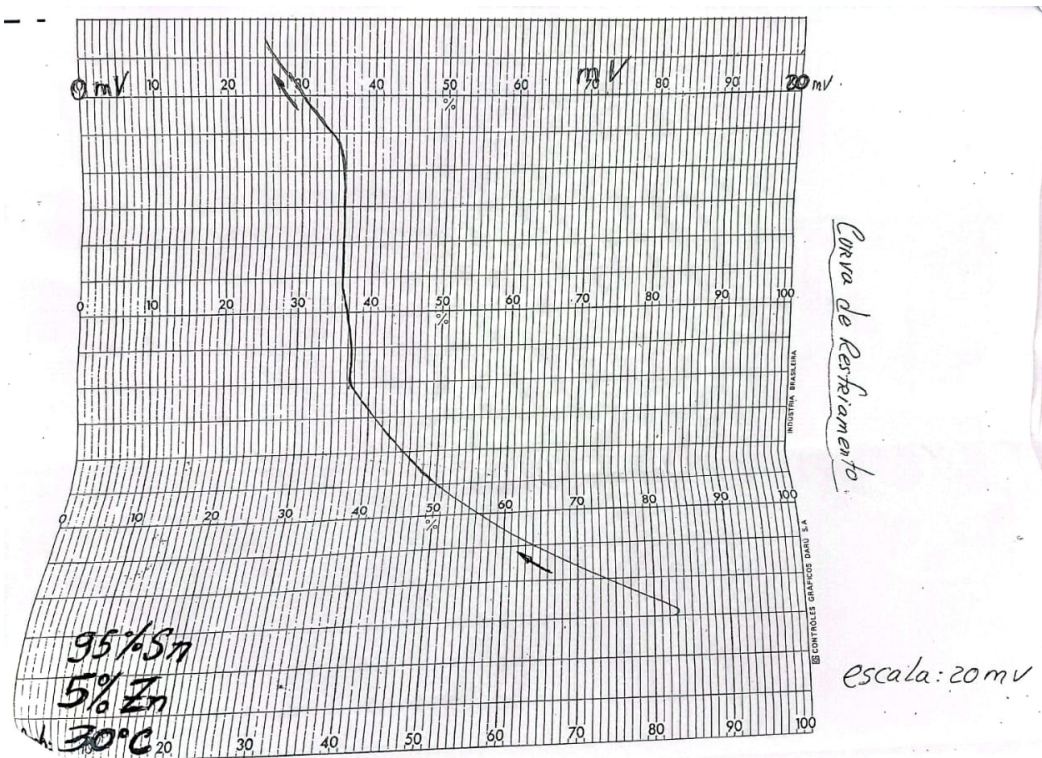


Figura 7: 5% Zn e 95% Sn

Para a liga 5% Zn e 95% Sn, o primeiro ponto de inflexão acontece quando ha uma diferença de potencial de 7,4 mV, o que equivale a aproximadamente 184°C. Quando somado a temperatura ambiente de 30°C encontra-se que o ponto de inflexão ocorre em 214°C.

Já o segundo ponto ocorre quando o termopar atinge 6,9 mV o que equivale a 177°C, acumulando um total de 207°C quando a temperatura ambiente é considerada

Com os dados coletados traçou-se o diagrama de equilíbrio:

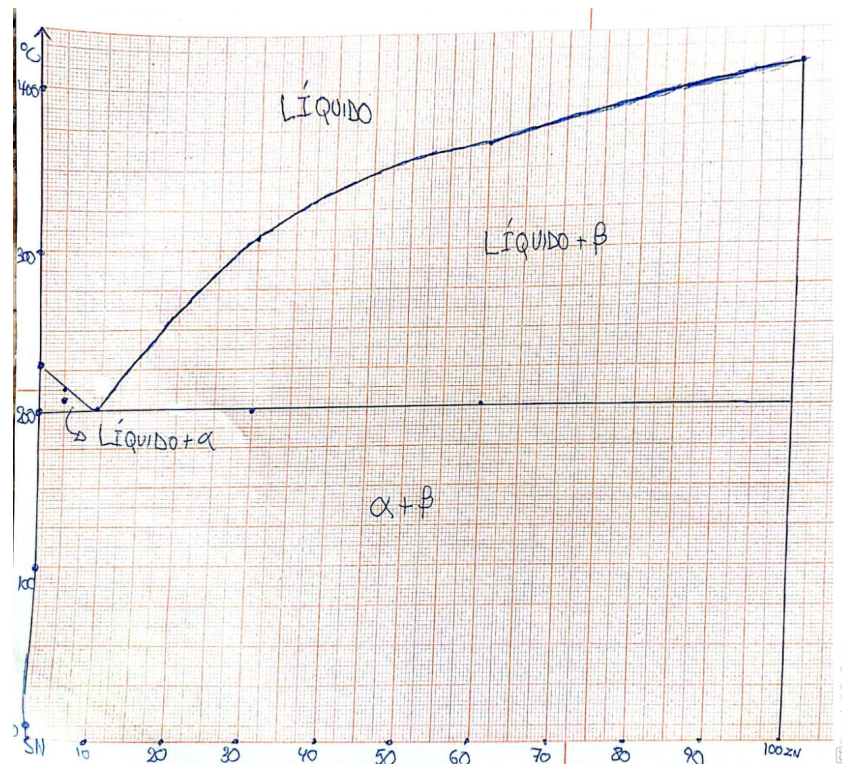


Figura 8: Diagrama de equilíbrio

Na análise desta liga, a microestrutura esperada varia de acordo com a composição. Inicialmente, em uma fase hipoeutética até atingir 8,9% de zinco, observa-se predominantemente a presença de partículas  $\alpha$ . Este padrão persiste até a fase eutética, onde tanto o zinco quanto o estanho estão distribuídos de maneira homogênea. Após essa transição, à medida que o teor de Zn aumenta, a fase torna-se mais hipereutética, com uma maior predominância de partículas  $\beta$ . Em termos de sua estrutura microscópica, é previsto que amostras contendo uma concentração de Zinco superior à eutética (8,9%) solidifiquem inicialmente com a formação de grãos de Zinco, seguida pela formação subsequente de lamelas Zn-Sn, que são estruturas planas e finas que se formam durante o processo de solidificação de uma liga metálica, consistindo em camadas alternadas de diferentes componentes da liga. Já nas amostras com composição eutética, não são observados grãos iniciais, mas sim o aparecimento direto de lamelas Zn-Sn a partir da fase líquida.

## 4.2 Parte 2

Abaixo, estão fotos coletadas das microestruturas encontradas de diferentes ligas Cd-Zn, permitindo a visualização das partículas  $\alpha$  e  $\beta$ .

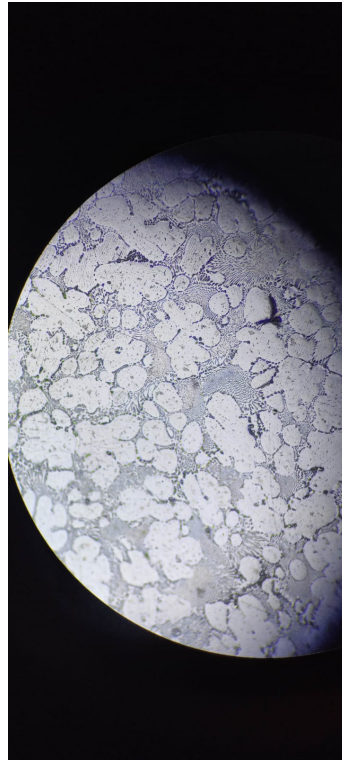


Figura 9: Amostra hipoeutética

Nesta amostra, caracterizada por ser uma mistura hipoeutética, uma distinção clara emerge entre as áreas branca e cinza: a área branca é predominantemente composta por cádmio na fase  $\alpha$ , enquanto a área cinza consiste na liga eutética (fase  $\alpha + \beta$ ).

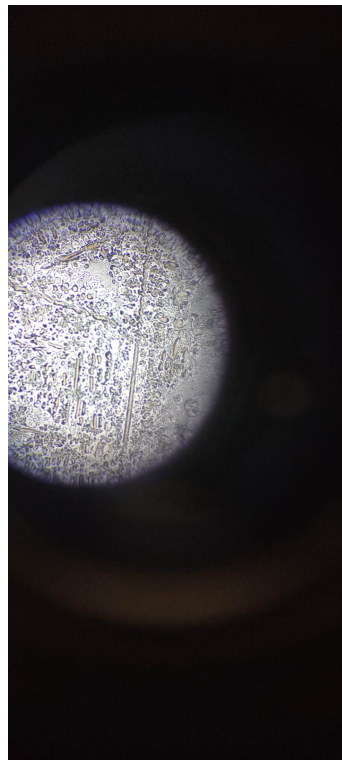


Figura 10: Amostra hipereutética

Na amostra de mistura hipereutética, percebe-se a formação de grânulos de zinco na fase beta, envoltos pela liga eutética na fase  $\alpha + \beta$ .

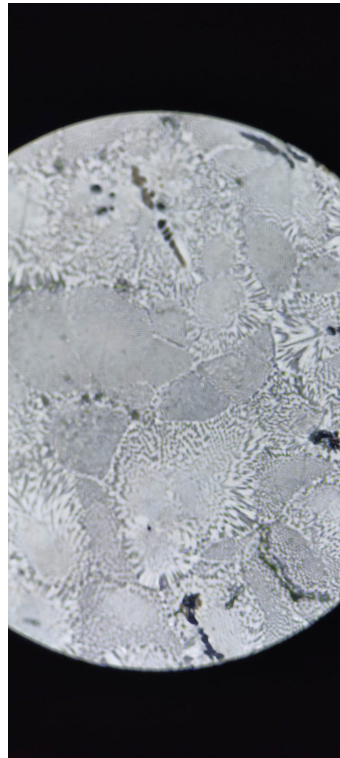


Figura 11: Amostra Eutética

Por fim esta a amostra eutética onde nota-se uma composição uniforme, com a amostra exibindo uma composição homogênea, com grãos de tamanhos semelhantes e uma distribuição equilibrada das fases constituintes.

## 5 Conclusão

A análise microestrutural da liga Cd-Zn proporcionou uma visão concreta das múltiplas fases que surgem conforme as temperaturas e proporções dos elementos da liga são alteradas. Além disso, foi possível adequadamente esboçar o diagrama de fases da liga Zn-Sn, considerando erros experimentais e aleatórios, permitindo o melhor entendimento do diagrama de equilíbrio de uma liga.

## 6 Referências

<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=1058187>

[1] CALLISTER, W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, GEM, segunda edição.