



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**COMPARAÇÃO DE LIGAS COMERCIAIS DE ZINCO ATRAVÉS DE ANÁLISES  
MECÂNICA E MICROESTRUTURAIS**

**CHANG YAU WEN**

Foz do Iguaçu  
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

## **COMPARAÇÃO DE LIGAS COMERCIAIS DE ZINCO ATRAVÉS DE ANÁLISES MECÂNICA E MICROESTRUTURAIS**

**CHANG YAU WEN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Rafael Drumond Mancosu

Foz do Iguaçu  
2022

CHANG YAU WEN

**COMPARAÇÃO DE LIGAS COMERCIAIS DE ZINCO ATRAVÉS DE ANÁLISES  
MECÂNICA E MICROESTRUTURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu

---

Membro: Me. Eng. Aldo Manuel Ramírez González  
Itaipu Binacional

---

Membro: Me. Eng. Adriana Alencar Santos  
UNESP – Bauru

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Chang Yau Wen

Curso: Engenharia de Materiais

	Tipo de Documento
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação
	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais
	<input type="checkbox"/> _____

Título do trabalho acadêmico: Comparação de ligas comerciais de zinco através de análises mecânica e microestruturais.

Nome do orientador(a): Rafael Drumond Mancosu

Data da Defesa: 28/12/2022

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Responsável

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a minha família, meus pais Chang W. H., Lin K. C., e irmão Chang Y. L. pelo incentivo e apoio incondicional em toda a minha trajetória da graduação, sem eles nada seria possível.

Agradeço à minha companheira, Andressa de Azevedo, pela paciência e compreensão nos momentos mais difíceis, por acreditar em mim, nos meus sonhos, sempre me ajudando, apoiando e incentivando, tornando realidade.

Ao Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu, meus profundos agradecimentos por sua orientação e dedicação, sempre apto e disposto a me auxiliar em todos os momentos.

Agradeço a todos os professores envolvidos na minha formação, pelos conhecimentos transmitidos e ensinamentos que levarei para a vida.

Aos Técnicos Luciano Fiamonzini e Paula Santos, por disponibilizar os laboratórios para realizar a preparação das amostras e o ensaio metalográfico.

Ao Técnico Diego e estagiário Hussein, por auxiliar a realizar o ensaio de difração de raios x.

Agradeço ao Parque Tecnológico Itaipu (PTI), e ao Técnico Sandy pela disponibilização dos equipamentos e auxiliar na caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-x por dispersão (EDS).

Agradeço ao Prof. Marciel Viapiana da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), por disponibilizar o laboratório de metalografia para realizar o ensaio de dureza.

Aos meus amigos Dennis Gonzales, Igor Wallace e Luis Garay por ter me auxiliado e acompanhado na realização do meu trabalho.

Aos meus colegas de curso, com quem convivi durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

Enfim, a todos que de alguma forma me ajudaram a concretizar este trabalho, meu muito obrigado.

## RESUMO

O fecho do zíper, cujo principal componente se denomina cursor, é um dispositivo introduzido na vida diária das pessoas e são utilizados em muitas aplicações. A principal matéria prima dos cursores é composta por zinco, em destaque a liga comercial Zamac (ligas Zn-Al-Mg-Cu). São elas ligas hipoeutéticas de Zn-Al com teores de alumínio aproximadamente 4% em peso e, de acordo com sua composição, são identificados por números como, por exemplo: Zamac 3 e Zamac 5. Através da fundição dos lingotes da liga Zamac passando pelo processo de fundição sob pressão os cursores são moldados. Neste trabalho, foram realizados estudos de comparação acerca de liga de zinco com origem chinesa (ZC) utilizada na indústria de zíper, com duas ligas de produção brasileira, Zamac 3 (Z3) e 5 (Z5). As amostras das tais ligas foram comparadas através de caracterizações microestruturais e análise mecânica. As técnicas utilizadas foram: Metalografia utilizando Microscopia Ótica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por energia dispersiva (EDS), Difração de raios-x (DRX) e ensaio de dureza por rebote. Assim, foi possível identificar, em todas as amostras, presença de fases primária de Zn ( $\eta$ ) envolvidas pela fase eutética ( $\eta + \alpha$ ). A amostra Z5 apresentou maior dureza e microestrutura fina e distribuída em relação as outras duas. As ligas de zinco chinesa e Zamac 3 apresentaram resultados similares, podendo indicar uma possível substituição futuramente.

**Palavra-chave:** zíper; microestrutura; Zamac; cursor; ligas de zinco.

## RESUMEN

El tirador de cremallera, cuyo componente principal se denomina cursor, es un dispositivo introducido en la vida cotidiana de las personas y se utiliza en múltiples aplicaciones. La principal materia prima de las correderas es el zinc, destacando la aleación comercial Zamac (aleaciones Zn-Al-Mg-Cu). Son aleaciones hipoeutécticas de Zn-Al con un contenido en aluminio de aproximadamente un 4% en peso y, según su composición, se identifican mediante números como, por ejemplo: Zamac 3 y Zamac 5. Mediante el proceso de fundición a presión se moldean las correderas. En este trabajo, se realizaron estudios comparativos de una aleación de zinc de origen chino (ZC) utilizada en la industria de cremalleras, con dos aleaciones producidas en Brasil, Zamac 3 (Z3) y 5 (Z5). Las muestras de dichas aleaciones se compararon mediante caracterizaciones microestructurales y análisis mecánico. Las técnicas utilizadas fueron: Metalografía utilizando Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS), Difracción de Rayos X (DRX) y ensayo de dureza por rebote. Así, fue posible identificar, en todas las muestras, la presencia de fases primarias de Zn ( $\eta$ ) involucradas por la fase eutéctica ( $\eta + \alpha$ ). La muestra Z5 presentó mayor dureza y microestructura fina y distribuida en relación con las otras dos. Las aleaciones de zinc chinas y Zamac 3 mostraron resultados similares, lo que puede indicar un posible reemplazo en el futuro.

**Palabras clave:** cremallera; microestructura; Zamac; cursor; aleación de zinc.

## ABSTRACT

The zipper puller, whose main component is called the slider, is an item introduced in people's daily lives and is used in many applications. The main raw material of the sliders is zinc, with the commercial Zamac alloy (Zn-Al-Mg-Cu alloys) standing out. They are hypoeutectic Zn-Al alloys with an aluminum content of approximately 4% by weight and, according to their composition, they are identified by numbers such as, for example: Zamac 3 and Zamac 5. Through die casting process the sliders are molded. In this work, comparative studies were carried out on a zinc alloy of Chinese origin (ZC) used in the zipper industry, with two alloys produced in Brazil, Zamac 3 (Z3) and 5 (Z5). Samples of such alloys were compared through microstructural characterizations and mechanical analysis. The techniques used were: Metallography used Optical Microscopy (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), X-Ray Diffraction (XRD) and rebound hardness test. Thus, it was possible to identify, in all samples, the presence of primary phases of Zn ( $\eta$ ) involved by the eutectic phase ( $\eta + \alpha$ ). Sample Z5 showed greater hardness and fine and distributed microstructure in relation to the other two. Chinese zinc alloys and Zamac 3 showed similar results, which may indicate a possible replacement in the future.

**Key words:** zipper; microstructure; Zamak; slider; zinc alloy.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Detalhes do zíper. ....	14
<b>Figura 2</b> – Componentes que se formam o cursor.....	15
<b>Figura 3</b> – Zinco de alta pureza. Ampliação de 100x (escala de 100 $\mu\text{m}$ ). ....	18
<b>Figura 4</b> – Microestrutura Zamac 3. Ampliação de 1000x (escala de 10 $\mu\text{m}$ ). ....	20
<b>Figura 5</b> – Microestrutura Zamac 5. Ampliação de 1000x (escala de 10 $\mu\text{m}$ ). ....	20
<b>Figura 6</b> – Diagrama zinco-alumínio.....	23
<b>Figura 7</b> – Ampliação da região hipoeutética no diagrama de fases Al-Zn.....	23
<b>Figura 8</b> – Seção transversal de uma injetora de câmara quente.....	25
<b>Figura 9</b> – Sequência de operação de um ciclo do processo de fundição sob pressão em câmara quente. ....	26
<b>Figura 10</b> – Microestrutura da liga comercial de zinco-alumínio. 500x. ....	27
<b>Figura 11</b> – Análise de EDS da liga comercial de zinco-alumínio. ....	28
<b>Figura 12</b> – Fenômeno da difração de raios X em um cristal.....	29
<b>Figura 13</b> – Difratoograma do zinco de alta pureza e as ligas de zinco-alumínio com concentrações variando de 0,1 a 2% em massa. ....	31
<b>Figura 14</b> – Ilustração de durômetro portátil digital. ....	33
<b>Figura 15</b> – Materiais de partida, ligas de zinco chinesa (vermelho), brasileiras Zamac 3 e 5 (verde). ....	36
<b>Figura 16</b> – Equipamentos utilizados nas caracterizações dos materiais. a) Microscópio óptico ZEISS, b) DRX PANalytical, c) MEV acoplado com EDS ZEISS, d) Durômetro portátil TH130.....	38
<b>Figura 17</b> – Amostras embutidas na resina acrílica, amostra ZC, Z5 e Z3. ....	40
<b>Figura 18</b> – Amostras preparadas para ensaio de dureza. ....	40
<b>Figura 19</b> – Realizando a medição de dureza.....	41
<b>Figura 20</b> – Micrografias das amostras ZC, Z3 e Z5, obtidas através do MO, regiões destacadas com aumentos de 50x a 1000x.....	43
<b>Figura 21</b> – Micrografia das amostras ZC, Z3 e Z5, obtidos através do MEV. Aumento de 5000x e 10000x.....	46
<b>Figura 22</b> – Análise de EDS da amostra ZC. ....	48
<b>Figura 23</b> – Análise de EDS da amostra Z3.....	49
<b>Figura 24</b> – Análise de EDS da amostra Z5.....	49
<b>Figura 25</b> – Mapeamento dos elementos da amostra ZC. ....	50
<b>Figura 26</b> – Difratoograma das amostras ZC, Z3 e Z5.....	51
<b>Figura 27</b> – Difratoogramas sobrepostos das amostras ZC (preto), Z3 (azul) e Z5 (vermelho). ....	52
<b>Figura 28</b> – Distribuição dos valores de dureza (a) e testes de normalidade para as ligas ZC (b), Z3 (c) e Z5 (d).....	55
<b>Figura 29</b> – Histogramas e distribuições normais ajustadas para cada liga em estudo. ....	56
<b>Figura 30</b> – Representação do Intervalo de Confiança dos valores de dureza Brinell (HB) medidos nas amostras ZC, Z3 e Z5.....	57
<b>Figura 31</b> – Micrografia das impressões realizadas no ensaio de dureza. ....	58

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Nomenclatura para as ligas de zinco-alumínio.....	17
<b>Tabela 2</b> – Composição química (%) das ligas comerciais de zinco-alumínio.....	19
<b>Tabela 3</b> – Especificação técnica do equipamento. ....	34
<b>Tabela 4</b> – Capacidade de teste para cada tipo de material. ....	35
<b>Tabela 5</b> – Denominação para as amostras utilizadas no presente trabalho.....	39
<b>Tabela 6</b> – Análise de composição química realizado pela empresa.....	47
<b>Tabela 7</b> – Lista de picos característicos de zinco e alumínio identificados no difratograma. ....	53
<b>Tabela 8</b> – Valores obtidos no ensaio de dureza das amostras ZC, Z3 e Z5.....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
DRX	Difração de Raios X
EDS	<i>Energy Dispersive System</i> (Espectroscopia por energia dispersiva)
HB	<i>Hardness Brinell</i> (Dureza Brinell)
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Ótico
PSQ	Programa Setorial de Qualidade
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
ZC	Liga de zinco chinesa
Z3	Liga de zinco Zamac 3
Z5	Liga de zinco Zamac 5

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1 O ZÍPER .....	14
3.2 MATERIAIS TÍPICOS PARA A PRODUÇÃO DO CURSOR (ZAMAC) .....	15
3.3 PRODUÇÃO DAS LIGAS COMERCIAIS (ZAMAC) .....	17
3.4 DIAGRAMA ZINCO-ALUMÍNIO .....	21
3.5 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO CURSOR .....	24
3.5.1 Ciclo de Câmara Quente .....	25
3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS ZAMAC .....	26
3.6.1 Metalografia – Ensaio Micrográfico .....	26
3.6.2 Microscopia Eletrônica De Varredura (Mev) .....	27
3.6.3 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) .....	28
3.6.4 Difração de Raios-X (DRX) .....	29
3.6.5 Ensaio de dureza .....	31
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	36
4.2. MÉTODOS .....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
5.1 ANÁLISE METALOGRAFICA – MICROGRAFIA .....	42
5.2 MICROANÁLISES POR MEV E EDS .....	45
5.3 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X .....	50
5.4 ENSAIO DE DUREZA POR REBOTE .....	53
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>59</b>
<b>7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das principais qualidades do zinco é seu alto grau de resistência à corrosão nos mais variados ambientes atmosféricos. Imune a agentes como umidade, acidez, maresia, entre outros. O zinco é utilizado como proteção na superfície de peças metálicas (aço e ferro fundido) (BOAROLI, 2020).

As ligas de zinco são amplamente utilizadas na indústria, desde aplicações em revestimentos até produções de peças, em destaque para processos de fundição sob pressão, essas ligas são comercialmente chamadas de Zamac.

A liga Zamac foi desenvolvida pela *New Jersey Zinc Company* em 1929, ganhando espaço no mercado na década de 1940. Durante a 2ª Guerra Mundial, a utilização do Zamac se difundiu devido à escassez de cobre para manufatura de rolamentos (PALIWA, 1981).

As Zamac são ligas composta por zinco com alumínio, magnésio e cobre. Identificadas por números, dependendo da concentração dos elementos, por exemplo: Zamac 3 e Zamac 5.

De todas as ligas não-ferrosas para a fundição sob pressão, as ligas de zinco são as que possuem maior campo de utilização, devido às suas particulares propriedades físicas, mecânicas e de fundição, associadas a uma capacidade de poderem ser facilmente revestidas (cobreação, niquelação e cromação) ou por pinturas com tintas e vernizes (ICZ, 2022).

Os seus baixos pontos de fusão conferem ao molde permanente longa vida, permitindo a produção de grandes séries de peças fundidas. A grande fluidez dessas ligas facilita a obtenção de peças de formato complexo e de paredes finas. Podem ser usadas também para a fundição por gravidade em moldes permanentes ou em fundição centrifugada (ICZ, 2022).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho foi elaborado com o propósito analisar e comparar as liga de zinco produzidas na china, e utilizadas na indústria de zíper para fabricação de cursores, com as ligas de zinco brasileiras Zamac 3 e Zamac 5 adquiridos comercialmente. A intenção desta comparação é a de verificar as semelhanças entre estas ligas para uma eventual substituição, haja vista os elevados custos de frete marítimo provenientes de importações.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Análises comparativas entre as ligas de zinco comerciais, produzidas na China e no Brasil, utilizadas na produção de cursores de zíperes.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Entre estas três ligas de zinco determinar:

- As microestruturas presentes e compará-las entre si (utilizando a Microscopia Óptica e a Microscopia Eletrônica de Varredura);
- As fases presentes em cada uma delas (utilizando a Difração de Raios-X e posteriormente a Microscopia Eletrônica de Varredura acoplado com Espectroscopia por Energia Dispersiva);
- A resistência mecânica (utilizando ensaios de dureza);
- Utilizar os estudos acima para indicar uma possível semelhança entre as ligas brasileiras e a chinesa.

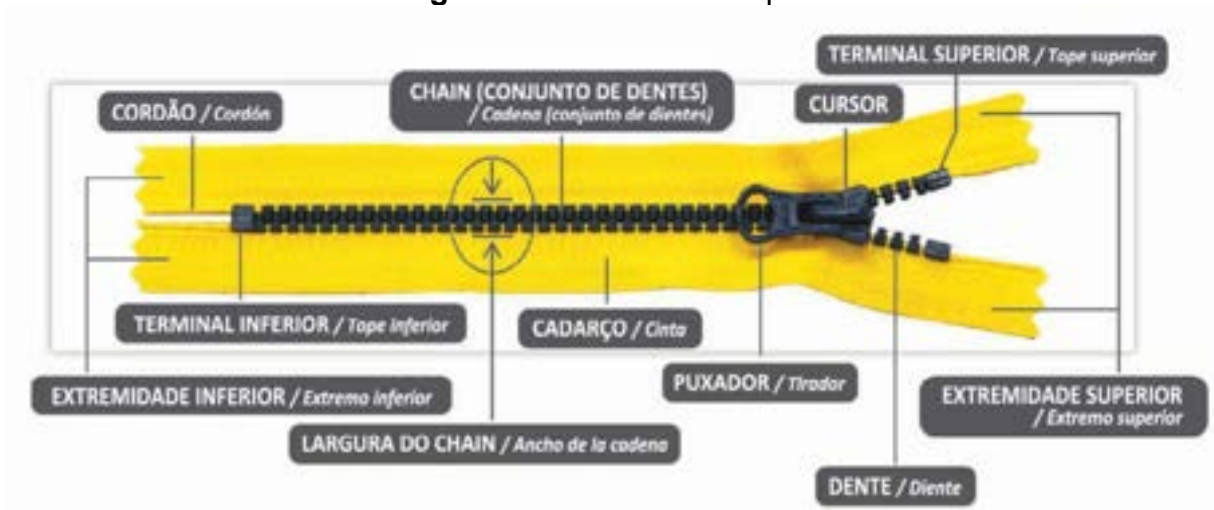
### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O ZÍPER

O zíper é um item que alcançou a unanimidade pós século XX, sendo utilizado em infinitas aplicações, foi apresentado ao público pela primeira vez no ano de 1893, na Exposição Mundial de Chicago, desde então foi incorporado na indústria de maneira quase que absoluta (FERRAZ, 2021).

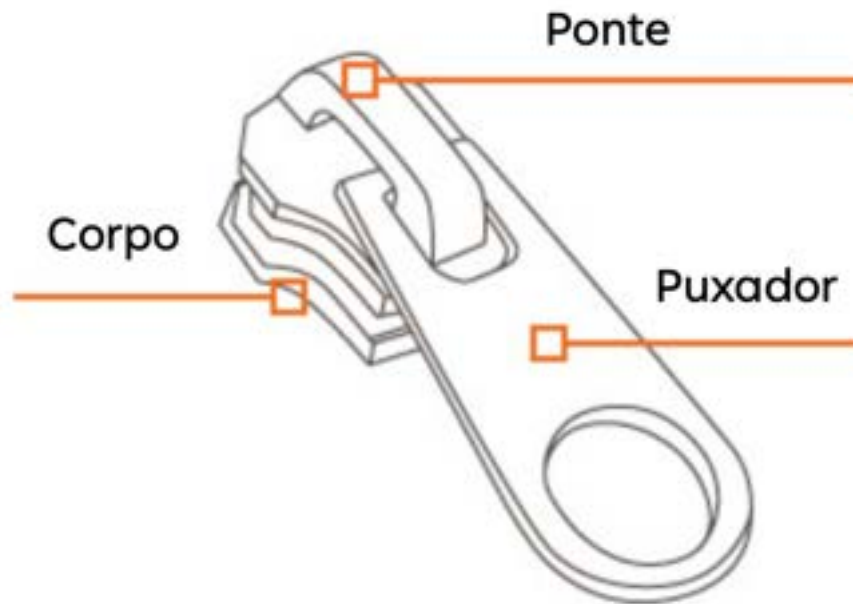
Anos mais tarde na II Guerra Mundial, o zíper foi usado em sacos de dormir, uniformes, malas e sacolas para transporte de mortos. Na década de 1950, a calça da marca *Lee*, procurando concorrer com a *Levi's*, fez a união do zíper com o jeans quando lançou a calça de jeans feminina. O nome popular “zíper” veio da *BF Goodrich Company*, que decidiu usar o aparato em um novo tipo de botas de borracha, conhecidas como “*Zipper Boots*”. Foi este produto que popularizou o fecho deslizante e pelo nome prático, acabou popularizando-o (MARCO, 2019). A Figura 1 apresenta os detalhes e os composto do zíper. A Figura 2 apresenta os componentes que se formam o cursor, são eles: corpo, ponte e puxador.

**Figura 1** – Detalhes do zíper.



Fonte: YKK, 2012.

**Figura 2** – Componentes que se formam o cursor



Fonte: adaptado de KREBAND S.L., 2022.

O processo de fabricação industrial do zíper compreende diferentes etapas (FERRAZ, 2021):

- Primeiramente, os fabricantes escolhem cursores e puxadores feitos de ligas de zinco e cobre, ferro, aço inoxidável ou material plástico de nylon ou poliéster.
- Em seguida, esse material recebe uma pintura em esmalte ou galvanização e polimento final.
- O próximo passo é tecer o cadarço que pode ser em algodão ou poliéster.
- Estando pronto o cadarço, são colocados os ganchos por onde irá correr o puxador. Este puxador pode ser livre, com trava automática, ou mesmo com dupla face, que o permite ser usado dos dois lados da peça.

### 3.2 MATERIAIS TÍPICOS PARA A PRODUÇÃO DO CURSOR (ZAMAC)

Os cursores podem ser produzidos por ligas de zinco e cobre, ligas de zinco e alumínio (Zamac), aço carbono, aço inoxidável, através de processos de fundição, onde posteriormente podem receber um acabamento esmaltado, niquelado,



dourado ou galvânico e em seguida polimento final. Podem ser feitos também por polímeros como nylon ou poliéster em diversas cores.

O cobre é um dos materiais metálicos mais antigos a serem usados pela humanidade. O homem percebeu que o cobre no estado puro era um metal muito leve e fácil de trabalhar. Entretanto, com o tempo o objeto feito a partir dele se tornava muito frágil. Em outras palavras, o material era fácil de se deformar. Porém, misturado a outros metais, produzia o que hoje chamamos de ligas. Sendo muito mais resistentes, as ligas, assim, têm muito mais possibilidades de aplicação (FERRAZ, 2021).

Desse modo, a liga de cobre permite a associação desse metal com outros elementos que lhe conferem outras características. Todavia, conforme o elemento principal ao qual ligamos o cobre temos diferentes famílias de ligas. Dentre elas, por exemplo (FERRAZ, 2021):

- Latão = Cobre + Zinco.
- Bronze = Cobre + outros elementos diferentes do Zinco, principalmente Estanho.
- Alpaca = Cobre + Níquel + Zinco de cor branca.

O zinco caracteriza-se pela sua alta resistência à corrosão, o que permite o seu emprego como revestimento protetor de vários produtos. Sua grande facilidade de combinação com outros metais permite o seu uso na fabricação de ligas, principalmente os latões (ligas cobre-zinco) e as ligas Zamac.

As ligas à base de zinco-alumínio usadas para fundição podem ser classificadas em dois grupos, o das ligas chamadas Zamac e o das ligas ZA (ligas de zinco-alumínio). As ligas Zamac foram desenvolvidas em 1920 para uso em fundição sob pressão, e as ligas ZA em 1970 para uso em fundição por gravidade e a partir de 1980 começaram a ser usadas também em fundição sob pressão. As ligas Zamac são assim denominadas pelos elementos que a constituem: zinco, alumínio, magnésio e cobre, são ligas hipoeutéticas de zinco com percentual de alumínio variando de 3,9 a 4,3% em massa. As principais ligas deste grupo são: Zamac 2, Zamac 3, Zamac 5 e Zamac 7, apresentados na Tabela 1 (METALS HANDBOOK-V2, 1992).

**Tabela 1** – Nomenclatura para as ligas de zinco-alumínio.

<b>Comum</b>	<b>Tradicional</b>	<b>ASTM</b>
Liga 2	Zamac 2	AG 40A
Liga 3	Zamac 3	AG 40B
Liga 5	Zamac 5	AC 41A
Liga 7	Zamac 7	AC 43A

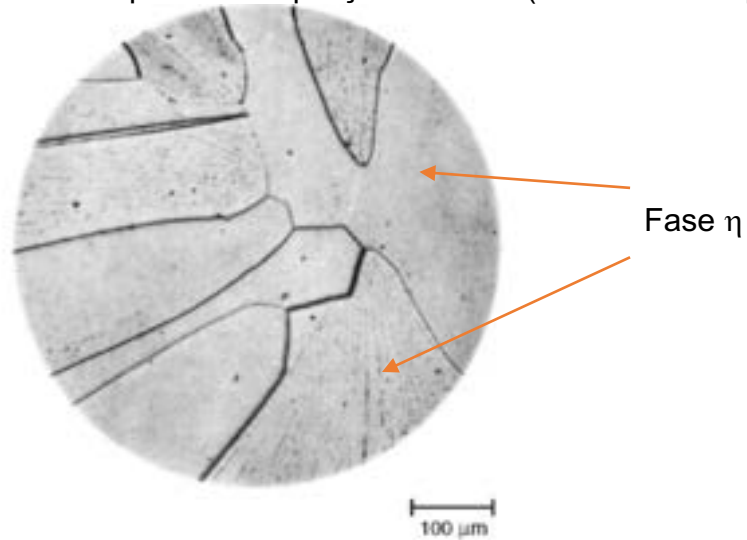
Fonte: Tabela adaptada de ASTM B240-22, 2010.

Segundo gerente nacional do PSQ (Programa Setorial de Qualidade) Gerson Galleazzi, em matéria para AECweb (2022), o desempenho dos produtos finais se deve muito ao material base e tipo de acabamento, mas também ao rigor e características aplicadas ao seu processo de fabricação; A liga Zamac é um material de processamento mais barato, apresenta propriedades mecânicas boas, resistência a corrosão e custo interessantes, o que explica a grande aplicação deste material atualmente nas indústrias.

### 3.3 PRODUÇÃO DAS LIGAS COMERCIAIS (ZAMAC)

As impurezas naturais e os elementos de liga presentes no zinco comercial têm extrema limitação de solubilidade sólida. Sua presença produz alterações imediatas na matriz ou microestrutura e alteram uma ou várias propriedades do material. O zinco de alta pureza, por exemplo, é o Zn 99.99% com limites máximos de 0.003% de chumbo, ferro e cádmio (METALS HANDBOOK-V9, 2004). A Figura 3, mostra a microestrutura de zinco de alta pureza, nota-se somente a presença de grãos da fase  $\eta$ .

**Figura 3** – Zinco de alta pureza. Ampliação de 100x (escala de 100  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: METALS HANDBOOK, 1992.

As ligas fundidas são primariamente de zinco-alumínio com pequenas adições de outros elementos, tais como o cobre e o magnésio. Ligas de zinco para produtos extrudados ou laminados, geralmente contém chumbo, ferro, cádmio, cobre, ou titânio, sozinhos ou combinados e usualmente em concentrações menores que 1%. Na Tabela 2, apresenta a composição química de cada uma das ligas, com porcentagem de máximo e mínimo de cada elemento (METALS HANDBOOK-V9, 2004).

**Tabela 2** – Composição química (%) das ligas comerciais de zinco-alumínio.

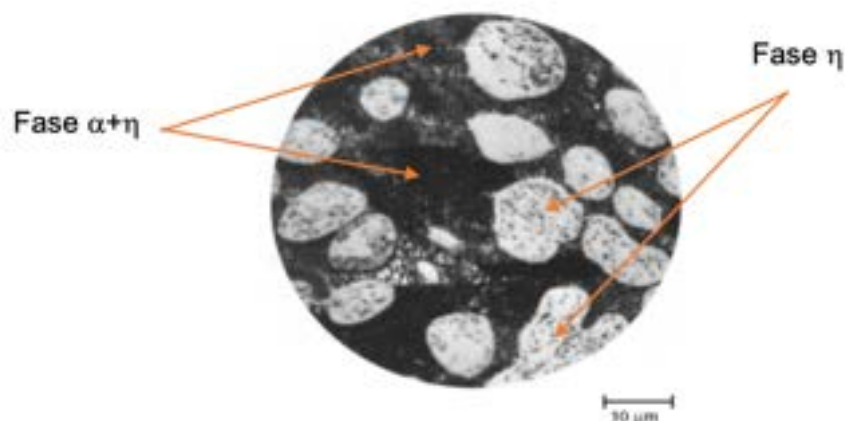
Elementos	Zamac 2	Zamac 3	Zamac 5	Zamac 7
Al	3,9-4,3	3,9-4,3	3,9-4,3	3,9-4,3
Mg	0,025-0,05	0,03-0,06	0,03-0,06	0,01-0,02
Cu	2,7-3,3	0,1 máx	0,7-1,1	0,1 máx
Fe	0,035 máx	0,035 máx	0,035 máx	0,75 máx
Pb	0,004 máx	0,004 máx	0,004 máx	0,003 máx
Cd	0,003 máx	0,003 máx	0,003 máx	0,002 máx
Sn	0,0015 máx	0,0015 máx	0,0015 máx	0,001 máx
Ni	–	–	–	0,005-0,02
Zn	Restante	Restante	Restante	Restante

Fonte: tabela adaptada de ASTM B240-22 (2010).

Com a adição de aproximadamente 4% de alumínio no zinco, é formado um eutético lamelar entre o alumínio ( $\beta$ ) e a solução sólida do zinco ( $\eta$ ) a 382 °C. O componente  $\beta$  do eutético é estável somente acima de 275 °C; em temperaturas mais baixas, transforma-se nas fases  $\alpha$  e  $\eta$  (Figura 4 e 5). Embora a solubilidade sólida do alumínio no zinco na temperatura eutética ser de aproximadamente 1%, ligas fundidas que contêm até 0,10% Al ou menos, mostram uma estrutura eutética na região interdendrítica (METALS HANDBOOK-V9, 2004).

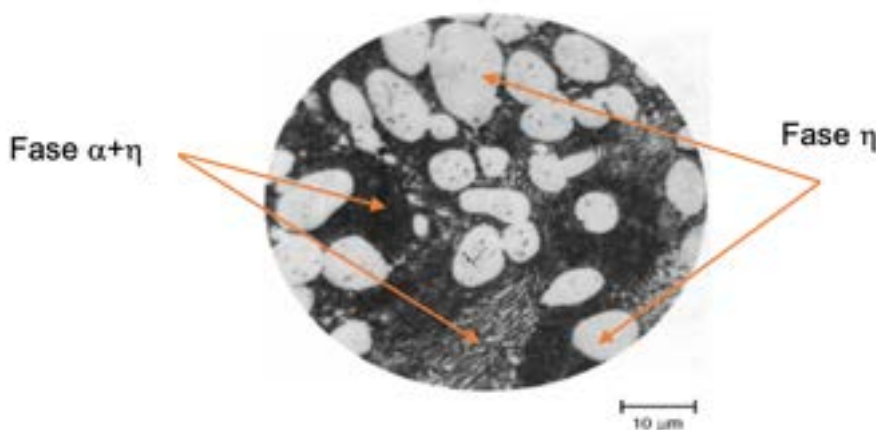
Durante a solidificação das ligas fundidas de zinco hipoeutético que contêm aproximadamente 4% de Al, tal como a Zamac 3 e Zamac 5 mostrada na Figura 4 e 5, respectivamente, o primeiro material a se solidificar aparece como partículas primárias de solução sólida rica em zinco (fase  $\eta$ ). Após, o líquido restante se solidifica como um eutético composto pela fase  $\eta$  e por um composto instável a alta temperatura da fase  $\alpha$ . O alumínio atua como um refinador de grão no zinco fundido; junto com as taxas elevadas da solidificação do processo de fundição, induz a estrutura de grão razoavelmente fina, que é responsável pela resistência, ductilidade, e a dureza do zinco fundido (METALS HANDBOOK-V9, 2004).

**Figura 4** – Microestrutura Zamac 3. Ampliação de 1000x (escala de 10  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: METALS HANDBOOK, 2004.

**Figura 5** – Microestrutura Zamac 5. Ampliação de 1000x (escala de 10  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: METALS HANDBOOK, 2004.

Nas mesmas Figuras 4 e 5, as microestruturas são muito semelhantes, no entanto, se pode observar a Zamac 5 apresenta a fase primária  $\eta$  com tamanhos menores e regiões eutética lamelares mais destacadas do que a Zamac 3.

A fundição em ligas de zinco é uma ótima escolha para inúmeras aplicações, desde as funcionais às decorativas. O zinco é um metal relativamente denso, que apresenta excelente durabilidade. A dureza e a estabilidade dimensional das ligas de zinco as tornam adequadas para o trabalho em componentes mecânicos, como engrenagens, que durariam menos se fossem moldadas em polímeros (EAZALL, 2018). O zinco pode ser fundido a baixas temperaturas, proporcionando economia de energia e processamento em relação aos outros metais e ligas de

engenharia. A seguir são apresentadas algumas características das ligas da família Zamac:

- Zamac 2: Possui boas propriedades de rolamento, é a liga hipoeutética com a maior resistência a tração e deformação. Devido ao seu elevado teor de cobre (3,0% de Cu) ela apresenta instabilidade dimensional (METALS HANDBOOK-V2, 1992);
- Zamac 3: É liga mais utilizada na produção de peças em fundição sob pressão. Apresenta a melhor combinação de resistência, fundibilidade, estabilidade dimensional, acabamento e custo (METALS HANDBOOK-V2, 1992);
- Zamac 5: As peças produzidas a partir desta liga são mais duras e resistentes que aquelas produzidas com liga Zamac 3. No entanto, ocorre a perda de ductilidade devido ao percentual mais elevado de cobre (0,70 a 1,20% em massa). Sua resistência a fluência só é menor que a da liga Zamac 2 (METALS HANDBOOK-V2, 1992);
- Zamac 7: Uma versão de maior pureza da liga Zamac 3, com menor teor de magnésio (0.005 a 0.020% em massa) apresenta melhor reprodução de detalhes na superfície de peças fundidas. É a liga com maior ductilidade entre as ligas hipoeutéticas (METALS HANDBOOK-V2, 1992).

As ligas de zinco Zamac são utilizadas em muitas aplicações em engenharia, principalmente em fundição sob pressão. São materiais competitivos para substituir ligas de alumínio, bronzes, ferros fundidos e aços, devido principalmente a sua elevada resistência ao desgaste, elevada capacidade de amortecimento, excelente moldabilidade e usinabilidade. Contudo, sua baixa resistência à tração e ao impacto, principalmente em produtos fundidos, limitam seu uso (METALS HANDBOOK-V2, 1992).

### 3.4 DIAGRAMA ZINCO-ALUMÍNIO

Segundo Callister Jr. e Rethwisch (2012), o conhecimento e compreensão dos diagramas de fases, está relacionado ao projeto e ao controle dos

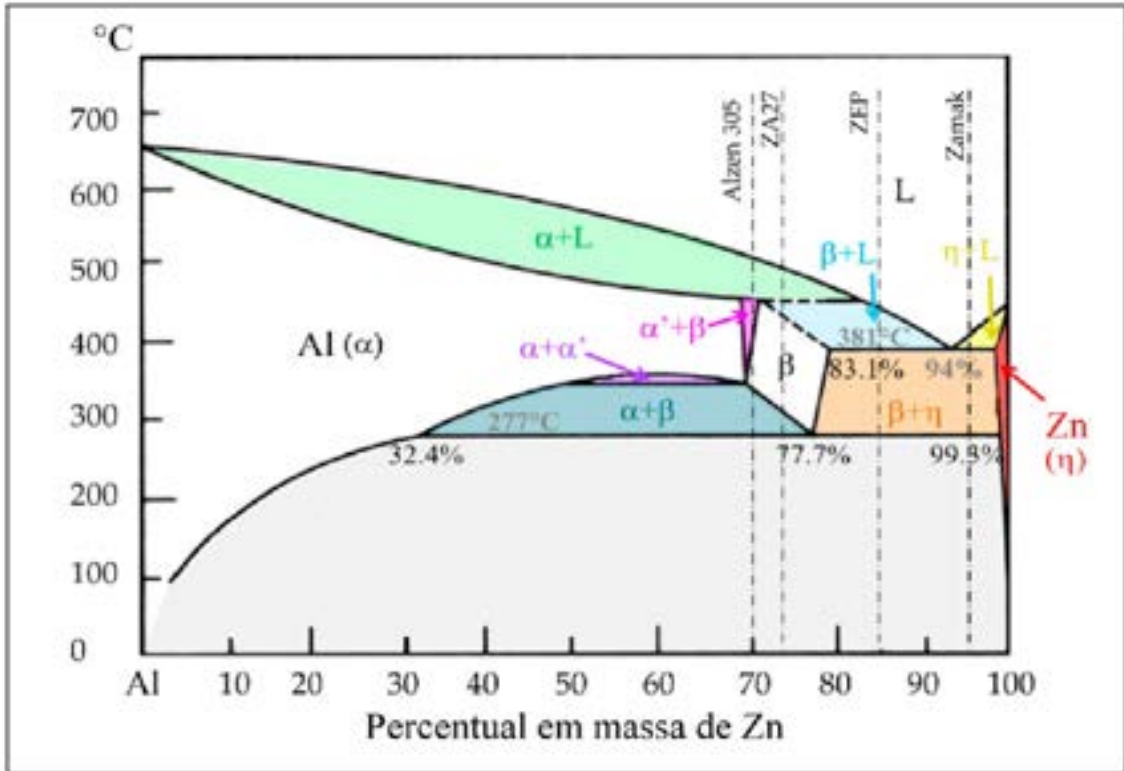
procedimentos dos tratamentos térmicos, pois algumas propriedades dos materiais são funções de suas microestruturas. Eles também apontam que as características do diagrama possuem uma forte correlação com o desenvolvimento da microestrutura, além disso, fornecem informações sobre fusão, fundição e cristalização.

Conforme pode ser observado no diagrama de fases Al-Zn, Figura 6, a solubilidade máxima do alumínio no zinco a 382 °C é de aproximadamente 1% em massa. Zinco e alumínio formam um eutético quando a concentração em massa de alumínio é de aproximadamente 5% a 382 °C. Formam também um eutetoide quando a concentração de alumínio é de aproximadamente 22% a 275 °C, conforme podemos observar no diagrama de fases.

As ligas conhecidas como Zamac possuem percentual de alumínio que podem variar em torno de 4% em massa, ou seja, são hipoeutéticas. Diversos trabalhos (METALS HANDBOOK-V2, 1992; MOJAVER; SHAHVERDI, 2011) evidenciaram que após o resfriamento de ligas hipoeutéticas de Zamac pode ser evidenciado a formação de cristais primários dentríticos da fase rica de zinco indicada no diagrama de fase como fase  $\eta$ , que apresenta estrutura cristalina hexagonal, tendo concentração de zinco de 99% a temperatura de 382 °C, a Figura 7 destaca a região hipoeutética do diagrama de fases Al-Zn.

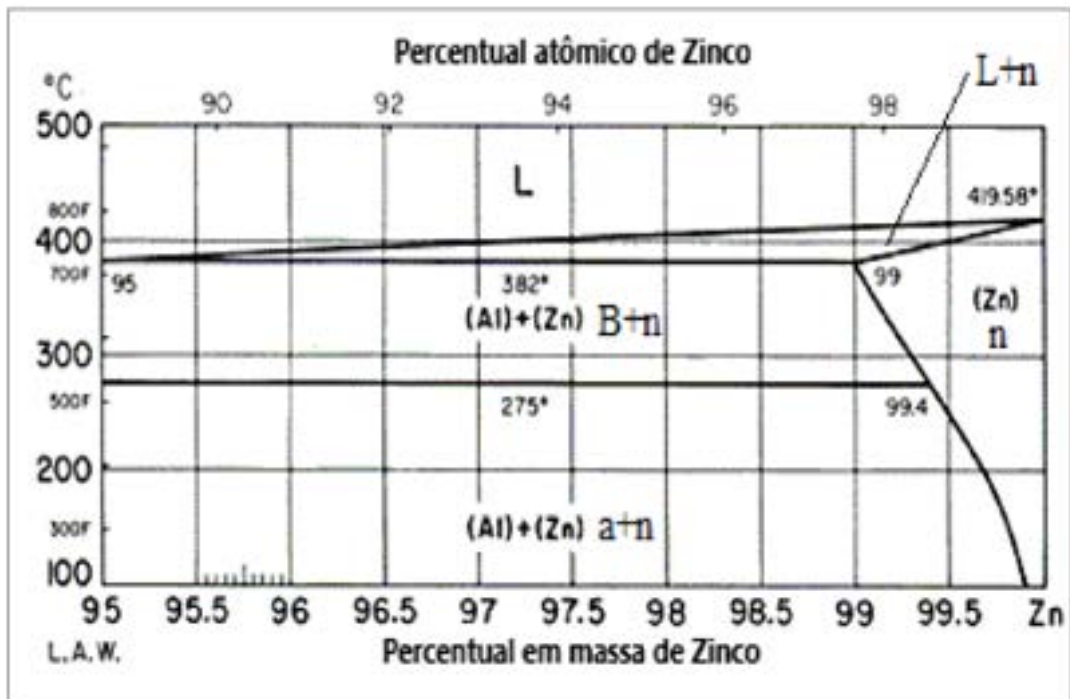
Abaixo desta temperatura, a fase  $\eta$  é envolvida por um eutético formado por esta mesma fase e uma segunda fase denominada fase  $\beta$  que possui estrutura cúbica. A fase  $\eta + \beta$  possui concentração de alumínio em torno de 22% e se mantem até a temperatura de 275 °C. Nesta temperatura, acontece uma reação eutetoide, transformando a fase  $\eta + \beta$  em fase  $\eta + \alpha$ , assim permanece até a temperatura ambiente. (GANIVET, 1987; MOJAVER; SHAHVERDI, 2011).

Figura 6 – Diagrama zinco-alumínio.



Fonte: BOAROLI, 2020.

Figura 7 – Ampliação da região hipoeutética no diagrama de fases Al-Zn.



Fonte: Adaptado de INFOMET, 2022.



### 3.5 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO CURSOR

Segundo Instituto Cadeia do Zinco (ICZ) consumo global de zinco a utilização de ligas de zinco no processo de fundição representa aproximadamente 14% do consumo global de zinco, no entanto o mercado apresenta alto potencial de desenvolvimento mediante às características e versatilidade das ligas utilizadas, sendo o Zamac e as ligas ZA (Zinco-Alumínio) os materiais mais difundidos nessa técnica de fabricação (IZA, 2020).

A fundição sob pressão é um processo de formação no qual o metal fundido é injetado e, a velocidade e pressão controladas em uma cavidade de um molde de aço. A cavidade é usinada com precisão e tolerâncias rígidas, em um bloco de aço resistente ao calor (VOTORANTIM, 2013).

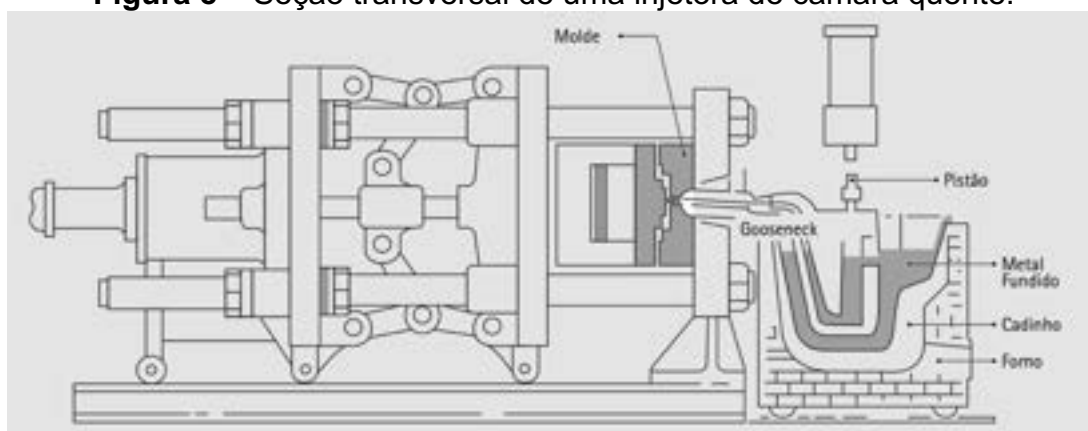
O tempo de preenchimento pode ser de apenas alguns milissegundos para os componentes menores a até meio segundo para os maiores. Esse tempo extremamente curto exigido para preencher o molde minimiza a tendência do metal em solidificar-se prematuramente, e possibilita seu fluxo até o preenchimento de seções muito finas. O molde é mantido a uma temperatura de aproximadamente 150°C abaixo da temperatura de solidificação do metal, fazendo com que ele se solidifique com muito mais rapidez em comparação a outros processos de fundição. Por causa da rápida solidificação, a peça injetada desenvolve propriedades que não podem ser desenvolvidas por outros processos (VOTORANTIM, 2013), como mecânicas ou estruturais, as mecânicas pode-se citar a dureza, o controle mais preciso do crescimento dos grãos, quanto menor o tempo de solidificação, apresenta grãos menores, resultando maior valor de dureza, e para a estrutural, pode-se citar as produções de peças com formatos complexos, espessuras finas e controle das tolerâncias de medidas.

Existem dois ciclos básicos de fundição sob pressão: câmara quente e câmara fria. O processo em câmara quente é normalmente utilizado para as ligas do tipo Zamac 3, 5, 7 e ZA-8. O processo de câmara fria é normalmente utilizado para as ligas ZA-12 e 27 (VOTORANTIM, 2013).

### 3.5.1 Ciclo de Câmara Quente

O processo é chamado de câmara quente porque a câmara de injeção e o pistão estão submersos no metal fundido no cadinho, ilustrado na Figura 8 e 9. A energia para injetar o metal na cavidade de fundição é fornecida por uma bomba hidráulica e armazenada no acumulador, de onde é retirada, conforme desejado, para movimentar o pistão (VOTORANTIM, 2013).

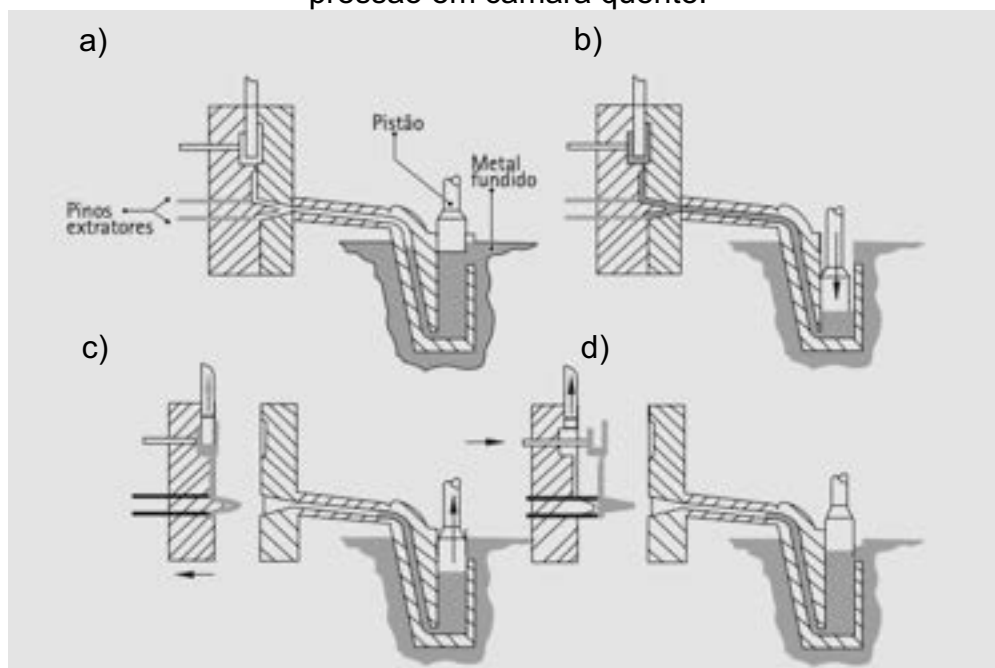
**Figura 8** – Seção transversal de uma injetora de câmara quente.



Fonte: imagem de Votorantim, 2013.

O molde é fechado no início do ciclo. A seguir a Figura 9 apresenta a sequência do processo, o pistão é acionado para baixo (9-a), forçando o metal fundido a sair do cilindro através do *gooseneck*, bocal, canais e entradas para a cavidade do molde, preenchendo-a e mantendo a pressão no metal, à medida que ele se solidifica (9-b). Após a solidificação, o molde é aberto, enquanto o pistão retorna para a posição inicial, recarregando o cilindro de injeção (9-c). A peça é então extraída e o ciclo é repetido (9-d). Um lubrificante pode ser aplicado de tempos em tempos no molde para facilitar a extração da peça (VOTORANTIM, 2013).

**Figura 9** – Sequência de operação de um ciclo do processo de fundição sob pressão em câmara quente.



Fonte: imagem de Votorantim, 2013.

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS ZAMAC

No presente trabalho, foram adotadas as técnicas de caracterização: metalografia – ensaio micrográfico com microscópio ótico (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva (EDS), difração por raios-x (DRX) e ensaio de dureza por rebote.

#### 3.6.1 Metalografia – Ensaio Micrográfico

O ensaio micrográfico consiste na observação, com o auxílio de um microscópio ótico (MO), das fases presentes no produto final, o tamanho dos grãos, além da natureza, forma, qualidade e distribuição dos constituintes. Ainda é possível verificar a qualidade de um tratamento térmico realizado, bem como averiguar a presença de inclusões indesejadas ou outros defeitos microscópicos, com o propósito de evitar problemas futuros e garantir a qualidade das peças (MONFERRATO,2022).

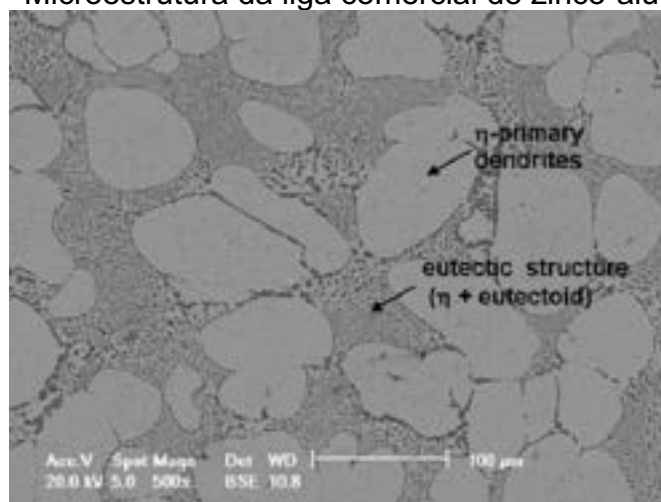
### 3.6.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento muito versátil e usado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos. Apesar da complexidade dos mecanismos para a obtenção da imagem, o resultado é uma imagem de muito fácil interpretação. A microscopia eletrônica aproveita o grande número de fenômenos de interação entre elétrons e metais, para extrair informações importantes de uma amostra. A grande vantagem do MEV em relação ao microscópio ótico é sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm, enquanto no ótico é de 0,5  $\mu\text{m}$  (COLPAERT,2015).

Entretanto, não são apenas estas características que fazem do MEV uma ferramenta tão importante e tão usada na análise dos materiais. A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica (COLPAERT, 2015).

Trabalhos feitos pelos autores Da Costa *et al.* (2009) e Krupinska *et al.* (2010), realizaram investigação nas ligas comerciais de zinco-alumínio utilizando o MEV, revelou a microestrutura de todas as ligas é composta por uma matriz dendrítica correspondendo a uma fase primaria rica em zinco fase  $\eta$ , e um microconstituente interdendrítico eutético Zn-Al, a fase eutético  $\eta+\alpha$ , apresentado na Figura 10.

**Figura 10** – Microestrutura da liga comercial de zinco-alumínio. 500x.



Fonte: imagem de Da Costa, 2009.

### 3.6.3 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

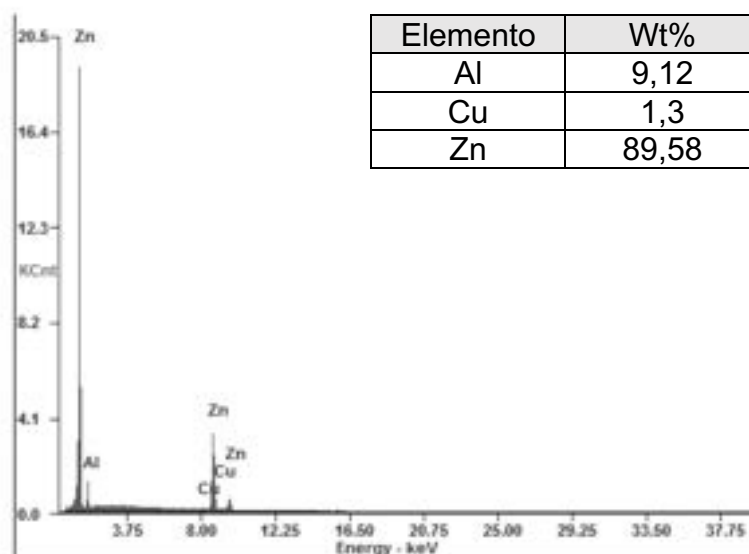
É uma caracterização semi-quantitativa dos elementos químicos de uma amostra, que é baseada na interação de um feixe de alta energia de partículas carregadas gera uma fonte de Raio-X que excita uma amostra.

Seu princípio é que cada elemento tem estrutura atômica única, permitindo um conjunto de picos em seu espectro de emissão. O EDS é acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), sendo útil para conhecer os elementos químicos presentes a nível microscópico em uma amostra.

A possibilidade de determinar a composição química a nível micrométrico é a grande vantagem da análise por energia dispersiva. Dependendo das características do feixe de elétrons e da composição química da amostra, o volume de interação possui dimensões lineares da ordem de 1  $\mu\text{m}$ . Logo, o uso desta técnica permite determinar heterogeneidades a nível microscópico na composição química do material, possibilitando o entendimento do comportamento a nível macroscópico (COLPAERT, 2015).

Os autores Krupinska *et al.* (2010) obtiveram como resultado da microanálise EDS quantitativa algumas informações sobre a massa dos elementos particulares da liga comercial de zinco-alumínio, apresentados na Figura 11.

**Figura 11** – Análise de EDS da liga comercial de zinco-alumínio.

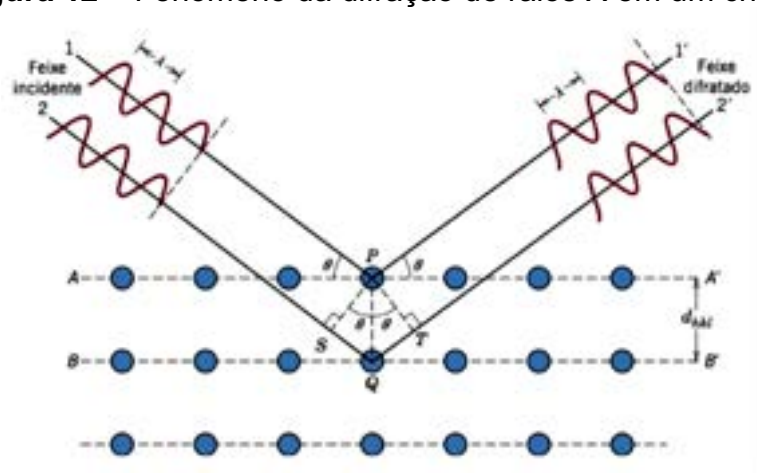


Fonte: imagem adaptada de KRUPINSKA *et al.* (2010).

### 3.6.4 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-X é uma técnica comum para o estudo de estruturas cristalinas e do espaçamento atômico em diversos materiais. Ela baseia-se na interferência construtiva entre os raios-X monocromáticos e uma amostra cristalina. Esses raios-X são gerados por um tubo de raios catódicos (tubos de Raios-X), filtrados para produzir uma radiação monocromática, colimados e direcionados para a amostra. Quando um cristal com uma distância interplanar  $d$  é irradiado pelos feixes de raios-X com um determinado comprimento de onda  $\lambda$ , a difração de raios-X ou a interferência construtiva entre feixes de raios-X elasticamente espalhados, pode ser observada a ângulos específicos  $2\theta$ , quando satisfizer a Lei de Bragg, caso a Lei de Bragg não seja satisfeita, a interferência será de natureza não construtiva e será produzido um feixe difratado de muito baixa intensidade (DA SILVA, 2020).

**Figura 12** – Fenômeno da difração de raios X em um cristal.



Fonte: imagem de Da Silva (2020).

A Figura 12 detalha esse fenômeno: dois feixes de raios-X em fase e paralelos incidem com ângulo  $\theta$  sobre dois planos cristalinos separados por uma distância interplanar  $d$ , caracterizada pelos índices de Miller  $(hkl)$ . O feixe (1) incide no átomo “P” localizado no plano A-A’ e difrata com ângulo  $\theta$ . O segundo feixe continua seu percurso até colidir com o plano cristalino B-B’, difratando da mesma maneira. Para que a difração possa ser registrada num difratograma, os feixes difratados precisam ter o máximo de intensidade, ou seja, a diferença de percurso entre os feixes deve resultar em um número inteiro de comprimento de onda, sendo assim a interferência das ondas construtiva (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

A equação de Bragg pode ser descrita como:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Onde  $n$  é a ordem de difração (número inteiro 1, 2, 3),  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente,  $d$  é a distância entre planos atômicos e  $\theta$  é a orientação desses planos em relação ao feixe, ou seja, o ângulo de incidência (ângulo de Bragg) dos raios-X.

O difratômetro é um aparelho utilizado para determinar os ângulos nos quais ocorre a difração em amostras pulverizadas ou policristalinas. Um dos principais usos da difratometria de raios-X é na determinação de estruturas cristalinas. O tamanho e geometria da célula unitária podem ser obtidos a partir das posições angulares dos picos de difração, enquanto o arranjo dos átomos no interior da célula unitária está associado às intensidades relativas desses picos (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

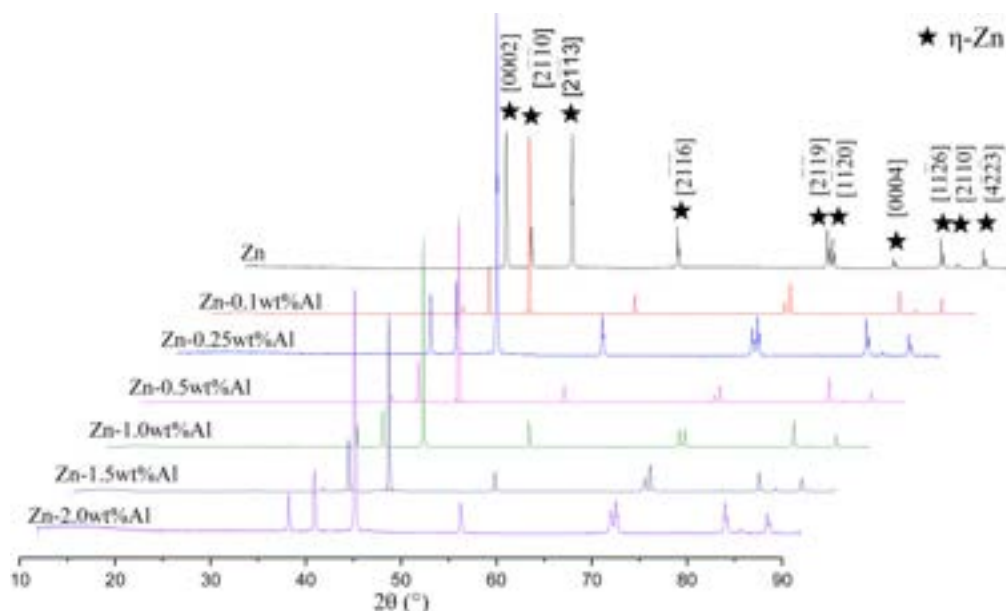
Uma vez que os raios-X são produzidos, eles são colimados e atingem a amostra. A amostra é mantida rotacionada durante todo o tempo de medida, de modo a garantir a estatística de contagem e a homogeneidade do material perante os raios-X incidentes. Durante todo o intervalo de medida, o detector também se movimenta, de modo que a intensidade dos raios-X refletidos seja registrada. Quando a geometria dos raios-X incidentes que colidem com a amostra satisfaz a Lei de Bragg, interferências construtivas ocorrem e picos com uma determinada intensidade aparecem. Um detector registra e processa o sinal dos raios-X, convertendo-o a uma determinada taxa de contagem, o qual é enviado ao sistema de processamento de dados do computador, originando um gráfico  $x$  por  $y$  (onde  $x$  é o ângulo  $2\theta$  e  $y$  é a intensidade dos picos), que chamamos de difratograma de raios-X (DA SILVA, 2020).

O trabalho realizado pelos autores HUANG, Tian; LIU, Zhilin, et al. (2021), utilizaram seis grupos de ligas Zn-Al com concentrações variadas, ou seja, Zn-0,1%Al, Zn-0,25%Al, Zn-0,5%Al, Zn-1,0%Al, Zn-1,5%Al e Zn-2,0wt%Al, os difratogramas de DRX das ligas puras de Zn e Zn-Al são mostrados na Figura 13.

Somente a fase de solução sólida Zn- $\eta$  com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) foi detectada pelo ensaio de DRX. No entanto, não há picos de DRX identificados para os eutéticos  $\eta$ -Zn/ $\alpha$ -Al na Figura 13. Em relação às

presentes ligas Zn-Al, a ausência da identificação da fase do alumínio no DRX, isso provavelmente é atribuído à sua fração de volume muito baixa.

**Figura 13** – Difratograma do zinco de alta pureza e as ligas de zinco-alumínio com concentrações variando de 0,1 a 2% em massa.



Fonte: imagem de HUANG, Tian; LIU, Zhilin, et al. (2021)

### 3.6.5 Ensaio de dureza

Dureza consiste em uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada. A dureza é um conceito físico largamente utilizado nas suas diversas aplicações em todo o mundo (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Esta propriedade mecânica é amplamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas, metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Para medir esta propriedade pode ser por risco, choque ou penetração. Entretanto, o conceito físico de dureza não tem um mesmo significado para todas as áreas, ou seja, a dureza não é uma propriedade absoluta (DE SOUZA, 1982).

Neste trabalho vamos adotar a área da mecânica, é a resistência à penetração de um material no outro, pois esta é a característica que pode ser facilmente medida (DE SOUZA, 1982), com ênfase na parte de dureza por rebote.



## **Ensaio de dureza por rebote**

Esse método é conhecido por dureza escleroscópica ou dureza Shore. A dureza Shore foi introduzida para ensaios em aços endurecidos, onde o método Brinell não podia ser usado por danificar a esfera penetradora (DE SOUZA,1982).

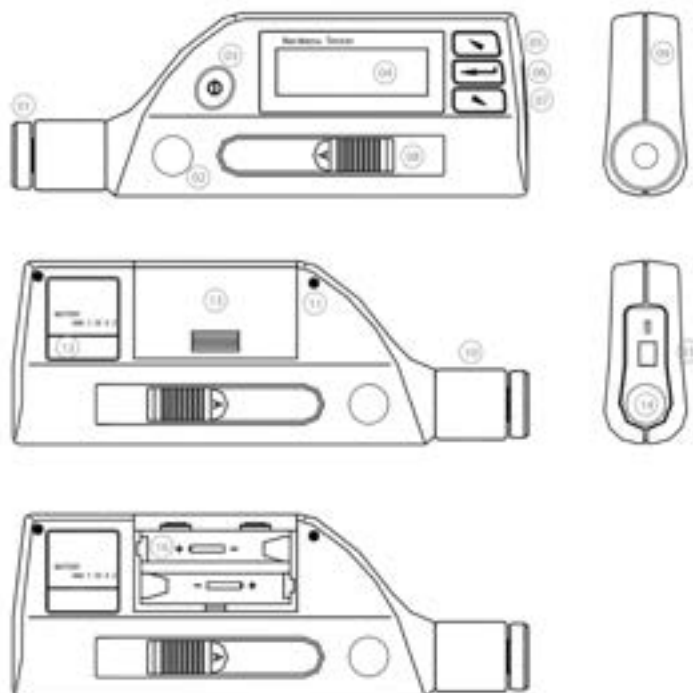
É um ensaio dinâmico cuja impressão na superfície do material é causada pela queda livre de um êmbolo com uma ponta padronizada de diamante ou carboneto de tungstênio e peso conhecido. Nos ensaios de dureza dinâmica, o valor da dureza é proporcional à energia de deformação consumida para formar a marca no material ou corpo de prova, e representada pela altura alcançada no rebote do embolo por meio de um número (GARCIA, 2000).

O tubo graduado deve ser colocado a 90°. Se a fixação do corpo de prova é bem feita, a variação de dureza Shore é pequena. O tubo graduado deve ser colocado perpendicularmente à chapa de fixação do corpo de prova. Recomenda-se fazer pelo menos cinco medidas de dureza em pontos diversos do material para garantir bem o resultado (DE SOUZA,1982).

## **Durômetro portátil digital**

O durômetro portátil apresenta tamanho compacto, alta aplicabilidade e de fácil operação, trabalha em calcular uma ampla faixa de medição em dureza de Leeb (HLD), com habilidade de exibir valores diretos de dureza convertidos em Brinell (HB), Rockwell A (HRA), Rockwell B (HRB), Rockwell C (HRC), Vickers (HV) e Shore (HS), na Figura 14 apresenta a estrutura do durômetro.

**Figura 14** – Ilustração de durômetro portátil digital.



- |                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| 1) Anel de apoio             | 9) Corpo Plástico         |
| 2) Cavidade côncava de apoio | 10) Capa da bobina        |
| 3) Tecla <Liga/Desliga>      | 11) Parafuso de fixação   |
| 4) Display LCD               | 12) Plaqueta informativa  |
| 5) Tecla <Acima>             | 13) Tampa da bateria      |
| 6) Tecla <Enter>             | 14) Botão de disparo      |
| 7) Tecla <Abaixo>            | 15) Saída USB             |
| 8) Dispositivo de gatilho    | 16) Alojamento da bateria |

Fonte: imagem de DIGIMESS, 2021.

O princípio do teste consiste em que o corpo de impacto é disparado contra a superfície a ser testada. A medição é feita através da velocidade do retorno do corpo de impacto quando o mesmo está passando a uma distância de 1 mm da superfície. Os valores da medição derivados das velocidades de impacto e repercussão são processados nos valores de dureza pelo equipamento seguindo o cálculo abaixo da equação de Leeb (DIGIMESS, 2021):

$$HL = 1000 \times Vb/Va \quad (2)$$

Sendo:

HL - Valor de dureza Leeb

Vb - Velocidade de repercussão do corpo de impacto

Va - Velocidade de impacto do corpo de impacto.

As especificações técnicas e as faixas de medição para cada material estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3** – Especificação técnica do equipamento.

<b>Especificação do equipamento</b>	<b>Valores</b>
Energia de impacto	11 mJ
Peso do corpo de impacto	5,5 g
Dureza da esfera	>1600 HV
Diâmetro da esfera	3mm
Material da esfera	Carboneto de tungstênio
Dureza máxima da peça medida	940 HV

Fonte: tabela adaptada de DIGIMESS, 2021.

Segundo METALS HANDBOOK-V2,(1992) a propriedade mecânica de dureza para as ligas comerciais de zinco, classificadas como Zamac 3 e Zamac 5 devem apresentar valores de dureza 82 e 91 Brinell (HB). O trabalho realizado pelos autores Azizi *et al.* (2021) obtiveram a dureza máxima para a liga de zinco Zamac 3 foi de 75 HB, o que representa aproximadamente 91% da dureza baseada na literatura. Outro autor Alzate (2008) no seu trabalho realizou o ensaio de dureza para a liga de zinco Zamac 5, e obteve o valor de aproximadamente 84 Vickers, na tabela de conversão seria o mesmo valor para o Brinell, ou seja, 84 HB, o que representa 92% da dureza baseada na Literatura.

**Tabela 4** – Capacidade de teste para cada tipo de material.

<b>Material</b>	<b>Escala de dureza</b>	<b>Capacidade de medição</b>
Aço e aço carbono	HRC	20~68,4
	HRB	38,4~99,8
	HB	81~654
Aço ferramenta	HRC	20,4~67,1
Aço inoxidável	HRB	46,5~101,7
	HB	85~655
Ferro fundido cinzento	HB	93~334
Ferro fundido nodular	HB	131~387
Ligas de alumínio	HB	19~164
	HRB	23,8~84,6
Bronze	HB	60~290

Fonte: tabela adaptada de DIGIMESS, 2021.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para iniciar o presente trabalho, foram coletados os materiais de partida, como mostrado na Figura 15, sendo um pedaço do lingote da liga de zinco de origem chinesa utilizado na indústria de zíper para a fabricação do cursor, adquiridos em uma empresa do Paraguai, e duas peças de liga de zinco fabricadas no Brasil com a especificação técnica de Zamac 3 e Zamac 5 seguindo a norma ASTM B240.

Para facilitar a leitura e compreensão deste trabalho as amostras serão nomeadas como:

- Liga de zinco comercial Chinesa: ZC;
- Liga de zinco comercial Zamac 3: Z3;
- Liga de zinco comercial Zamac 5: Z5.

**Figura 15** – Materiais de partida, ligas de zinco chinesa (vermelho), brasileiras Zamac 3 e 5 (verde).



Fonte: autoria própria

**Materiais utilizados para metalografia:**

A seguir é listado os materiais utilizados para a preparação metalográfica.

- Resina em pó acrílica – a frio
- Catalizador resina acrílica – a frio
- Vaselina
- Forma
- Lixas de água com granulações de #220, #320, #400, #600, #800 e #1200.
- Alumina em suspensão de 1  $\mu\text{m}$ , 0,3  $\mu\text{m}$  e 0,05  $\mu\text{m}$ .
- Nital 1%

**Equipamentos utilizados para metalografia:**

- Serra fita da marca Elias máquinas
- Politriz da marca Fortel
- Lixadeira metalográfica manual da marca TECLAGO

**Equipamentos utilizados para caracterização:**

- Microscópio óptico metalográfico da marca ZEISS com *software* Axion Vert A1 (Figura 16-a);
- Microscópio Eletrônico de Varredura da marca ZEISS acoplado com Espectroscopia por energia dispersiva (Figura 16-c);
- Difrátômetro de Raios X da marca PANalytical (Figura 16-b);
- Durômetro digital portátil da marca TIME *hardness tester* modelo TH130 (Figura 16-d).

**Figura 16** – Equipamentos utilizados nas caracterizações dos materiais. a) Microscópio óptico ZEISS, b) DRX PANalytical, c) MEV acoplado com EDS ZEISS, d) Durômetro portátil TH130.



Fonte: autoria própria

## 4.2. MÉTODOS

A metalografia de acordo com a mesma norma é definida como o “registro da constituição e da estrutura dos metais, ligas, produtos e compósitos metálicos, com o objetivo de relacioná-lo com as propriedades e processos de fabricação (ABNT, 2007).

O controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O segundo preocupa-se em controlar as dimensões físicas de um determinado produto, denominado Metrologia. O primeiro preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação, etc. Pode ser: físico, químico, metalográfico e especial (ROHDE, 2010).

A definição de micrografia pela norma NBR 15454 (ABNT, 2007) é o “aspecto ou reprodução gráfica de uma amostra do material devidamente preparada

com aumento linear maior que dez vezes. O termo também é utilizado para designar a técnica micrográfica”.

Foram feitas amostras de área aproximadamente 15 mm x 15 mm e espessura de 15 mm cortados com o equipamento serra fita acompanhado por líquido de resfriamento. Posteriormente, as amostras foram embutidas a frio com a mistura da resina acrílica em pó junto com o catalisador dentro do molde, foram identificados para a liga de zinco chinesa como amostra ZC, liga brasileira Zamac 3 como amostra Z3 e a liga brasileira Zamac 5 como amostra Z5, melhor esclarecido na Tabela 5.

**Tabela 5** – Denominação para as amostras utilizadas no presente trabalho.

<b>Liga utilizada</b>	<b>Nomenclatura utilizada no trabalho</b>
Liga de zinco chinesa	Amostra ZC
Zamac 3 brasileira	Amostra Z3
Zamac 5 brasileira	Amostra Z5

Fonte: autoria própria

Após 24 horas do embutimento e secas ao ar livre, as amostras foram retiradas do molde, como mostrado na Figura 17, seguindo para a etapa de lixamento. Utilizando a lixadeira metalográfica manual, as amostras foram lixadas com lixas de carbetto de silício de granulometria #220, #320, #400, #600, #800 e #1200, girando-se 90° a cada troca de lixa, para que fosse possível verificar o desaparecimento dos riscos deixado da lixa anterior. Em seguida, as amostras foram polidas com suspensão de alumina com granulometria de 1 µm, 0,3 µm e 0,05 µm em politriz rotativa com água. Na sequência foi utilizado Nital 1% para realizar o ataque químico durante 7, 10 e 15 segundos, para as amostras ZC, Z3 e Z5, respectivamente, pelo método de imersão para revelação dos grãos.



**Figura 17** – Amostras embutidas na resina acrílica, amostra ZC, Z5 e Z3.



Fonte: autoria própria

Para a micrografia das amostras, foi utilizado o microscópio óptico Metalográfico invertido da marca ZEISS utilizando-se o *software* Axion Vert A1, com ampliação em 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes. Os mesmos foram submetidos para as análises de DRX, MEV e EDS.

Para o ensaio de dureza, foram utilizados o excedente do material de partida, devido o tamanho maior para realizar o ensaio, o ensaio de dureza requer a superfície de contato das amostras esteja plana, essas amostras foram lixadas na lixa de granulometria #220 até #600, conforme mostrado na Figura 18.

**Figura 18** – Amostras preparadas para ensaio de dureza.



Fonte: autoria própria

Os ensaios de dureza foram realizados no laboratório de engenharia mecânica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), com o durômetro digital portátil TH130 configurado para material alumínio e na escala de medição em Brinell (HB), foram efetuadas manualmente 10 medidas de dureza aleatoriamente nas amostras. A Figura 19 mostra o ensaio realizado manualmente.

**Figura 19** – Realizando a medição de dureza.



Fonte: autoria própria

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE METALOGRAFICA – MICROGRAFIA

As imagens foram obtidas pelo microscópio metalográfico ótico inverso e as micrografias das amostras ZC, Z3 e Z5 estão mostradas na Figura 20. As ampliações utilizadas foram de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

Observa-se nas micrografias (Figura 20), que as microestruturas das amostras ZC, Z3 e Z5 apresentam a fase primaria  $\eta$  (grãos claros) e a fase eutética  $\alpha+\eta$  (lamelar). Não se observa a presença de outras fases nas amostras em relação ao cobre e magnésio, como indicado em suas composições químicas. De acordo com as ampliações pode-se fazer as seguintes observações:

Ampliação de 50x: A amostra Z5, comparado com as outras amostras, se destaca pela melhor distribuição de grãos da fase primaria, com tamanhos menores e aspecto mais refinado.

Ampliação de 100x: A amostra ZC, apresenta duas regiões pretas, segundo FUHR, Luciane Thaís et al. são os defeitos de porosidade, devido ao ar ou vapor de água aprisionado no interior da matriz.

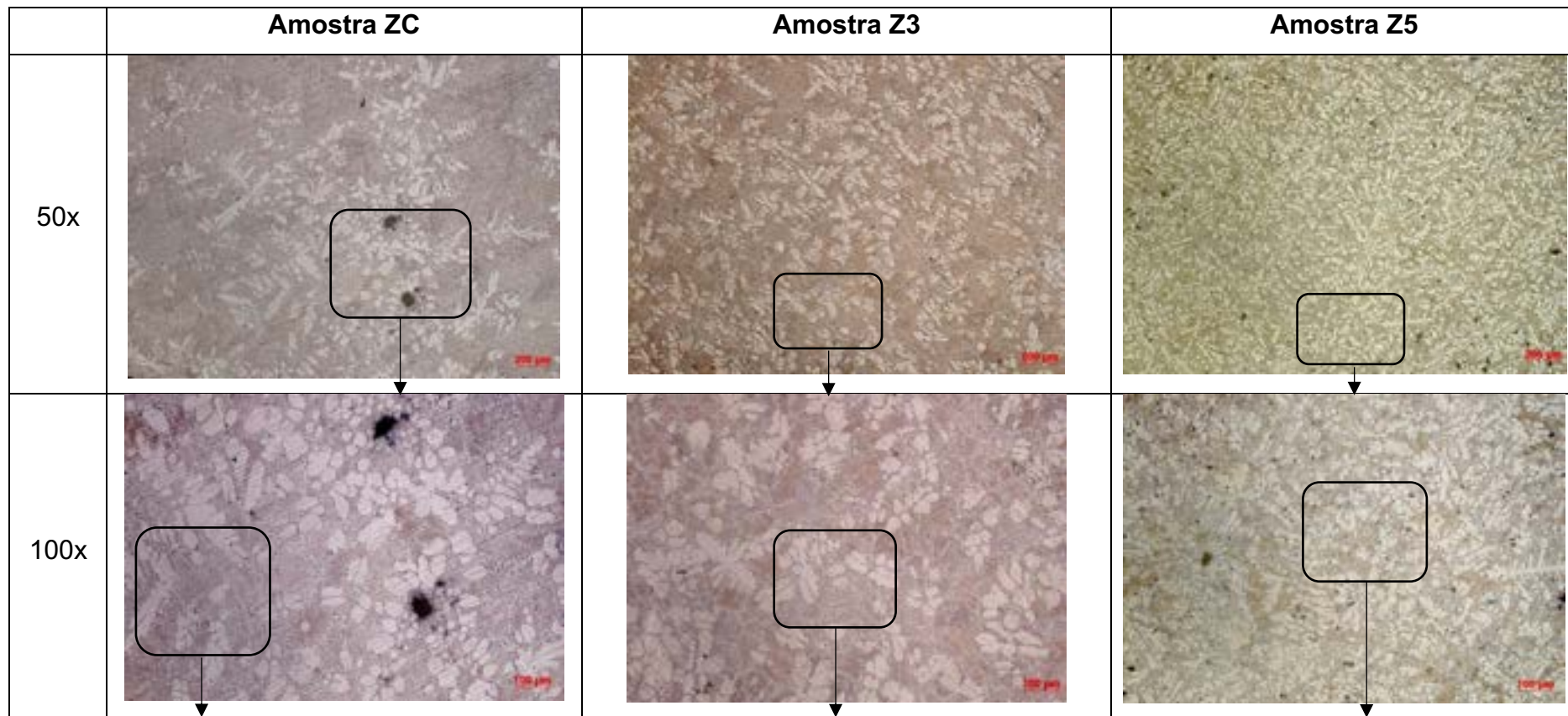
Ampliação de 200x: Nas três amostras pode-se observar melhor as regiões claras envolvidas pelas escuras, identificadas como fase primaria  $\eta$  e a fase eutética  $\alpha+\eta$ .

Ampliação de 1000x: Neste aumento, para as amostras ZC e Z3, algumas regiões não foram possibilitadas a identificar a fase primaria  $\eta$  isolada em grãos, diferente para a amostra Z5, devido seu melhor refinamento e tamanhos dos grãos menores.

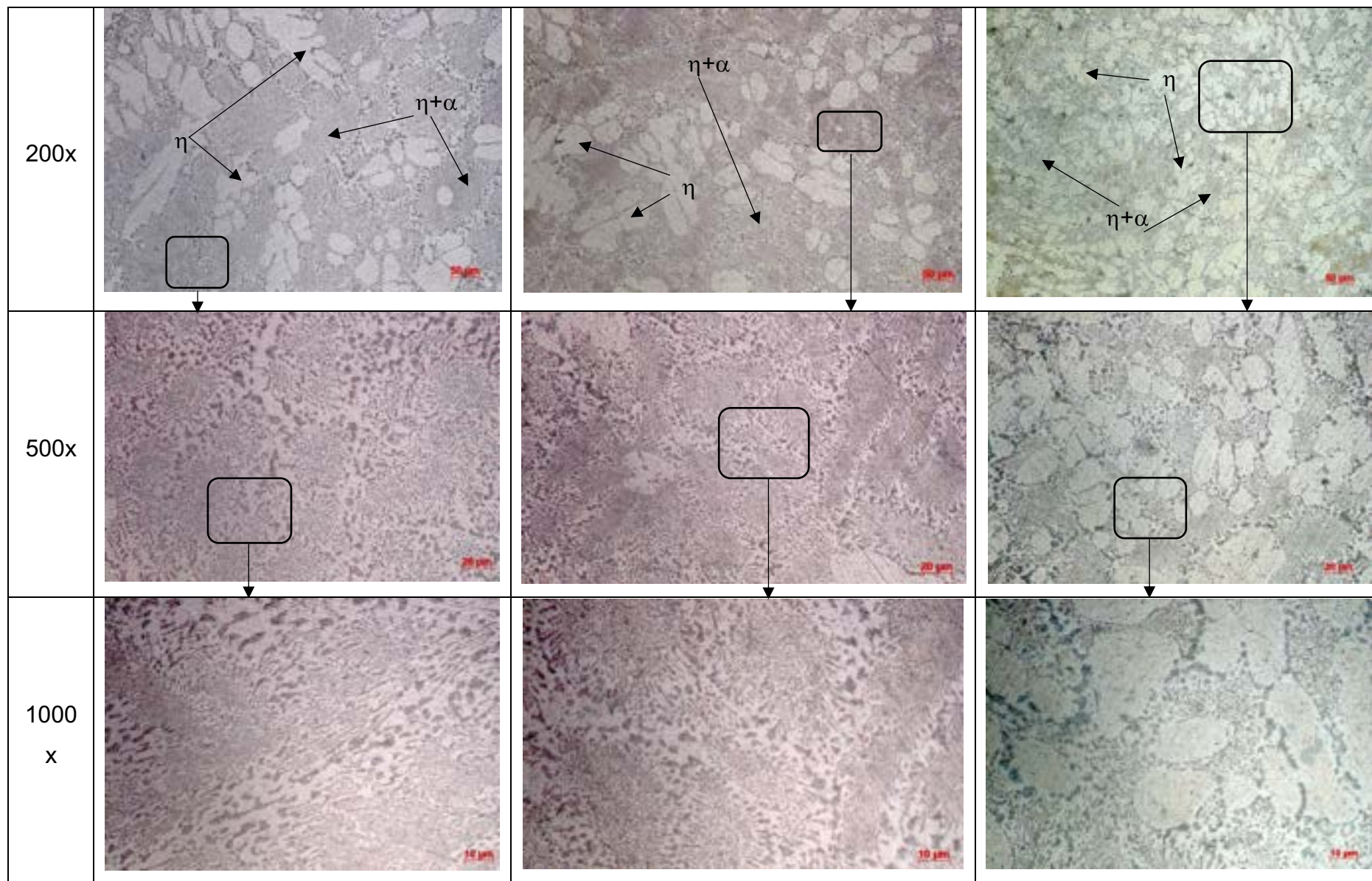
As micrografias das amostras ZC e Z3 são muitos similares, apesar da facilidade de se identificar as fases primaria (regiões claras) e eutética (regiões escuras) nos aumentos de 50, 100 e 200x, é encontrado certa dificuldade de identificar os mesmos com aumento maior em algumas regiões.

De acordo com a Figura 20, a micrografia da amostra Z5, observa-se que exibe certo refinamento e melhor distribuição dos grãos representados pela fase primaria de zinco  $\eta$ , comparado com as amostras ZC e Z3. Este refinamento de grão, segundo RICK (2006) e Ernel, Kunst *et al.* (2022) pode estar relacionado com um maior teor de cobre presente na liga Zamac Z5.

**Figura 20** – Micrografias das amostras ZC, Z3 e Z5, obtidas através do MO, regiões destacadas com aumentos de 50x a 1000x.







Fonte: autoria própria

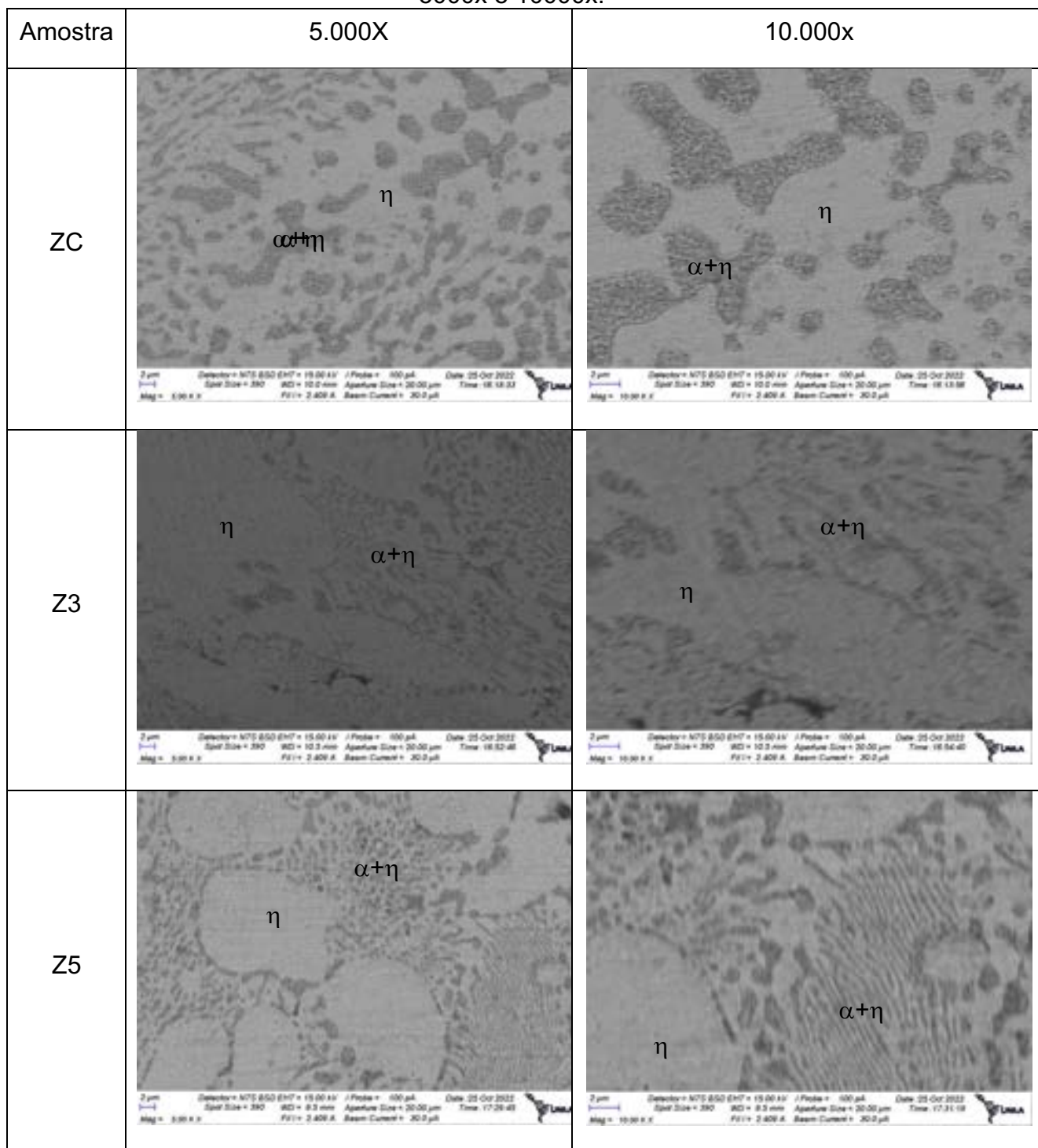
## 5.2 MICROANÁLISES POR MEV E EDS

A Figura 21 apresenta as micrografias das amostras ZC, Z3 e Z5 obtidas pelo MEV, com ampliação de 5.000x e 10.000x. Observa-se que as três amostras apresentam as fases primária e eutética, fase  $\eta$  e a fase  $\alpha + \eta$ , respectivamente, da mesma maneira que apresentada pela microscopia ótica.

Pode-se visualizar nas micrografias das amostras Z3 e Z5 as regiões claras representadas pela fase  $\eta$  (em formatos de grãos) e a fase  $\alpha + \eta$  (em formato de lamelas). Para a amostra ZC, visualiza-se um aspecto diferente, se observa a fase  $\eta$  como a matriz, a fase  $\alpha + \eta$  em lamelas e partículas isoladas mais grosseiras, mas estas características dependem da região da amostra que foi observada.

Segundo Bolibruchová, Bruna e Matejka (2022), a forma morfológica e as dimensões das lamelas dependem da taxa de resfriamento da peça fundida, e para os autores Rick (2006) e Da Costa (2009) esse fator pode ser um indicativo de que o teor de magnésio é o responsável pela formação desse microconstituente isolado (grosso). Por outro lado, o cobre tem uma alta tendência para formar a estrutura interdendrítica em formatos de lamelas (fino).

**Figura 21** – Micrografia das amostras ZC, Z3 e Z5, obtidos através do MEV. Aumento de 5000x e 10000x.



Fonte: autoria Própria

As análises por EDS nas amostras ZC, Z3 e Z5 mostraram a presença de zinco e alumínio na superfície. Nas Figuras 22, 23 e 24 podem ser observados os percentuais (em peso) dos elementos e seus picos característicos. Estas análises foram

feitas para uma magnificação de 1.000x para poder ser obtido um valor médio mais aproximado da real.

A ideia inicial de análise de EDS é a de verificar a composição química média das regiões escolhidas na amostra. Essa análise é semi-quantitativa e, por isso, mostra grande diferença com relação aos valores percentuais mostrados na Tabela 6 de análise química feita pela empresa.

**Tabela 6** – Análise de composição química realizado pela empresa.

Elementos	Z3	Z5
Al	3,9-4,3	3,9-4,3
Cu	0,1 máx	0,7-1,1
Mg	0,03-0,06	0,03-0,06
Fe	0,035 máx	0,035 máx
Pb	0,004 máx	0,004 máx
Cd	0,003 máx	0,003 máx
Sn	0,0015 máx	0,0015 máx
Zn	Restante	Restante

Fonte: Adaptado da empresa.

Foram observadas diferenças percentuais entre os elementos principais Zn e Al das três ligas.



**Figura 22 – Análise de EDS da amostra ZC.**



Fonte: autoria própria

Mediante os resultados apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, pode-se observar que as três amostras apresentam os mesmos picos característicos, dos elementos principais que constituem a liga Zamac, ou seja, zinco e alumínio. Para a amostra ZC, 90% Zn e 10%Al, para a amostra Z3, com 91,6% Zn e 8,4% Al e para a amostra Z5 com 89,6% Zn e 10,4% Al.

Observa-se que dois picos iniciais de menor intensidade, são representados pelos elementos de carbono e oxigênio, respectivamente. É provável que seja a contaminação da câmara de ensaio ou pela contaminação das amostras durante o transporte ou ao contato com o ar.

**Figura 23 – Análise de EDS da amostra Z3.**



Fonte: autoria própria

**Figura 24 – Análise de EDS da amostra Z5.**

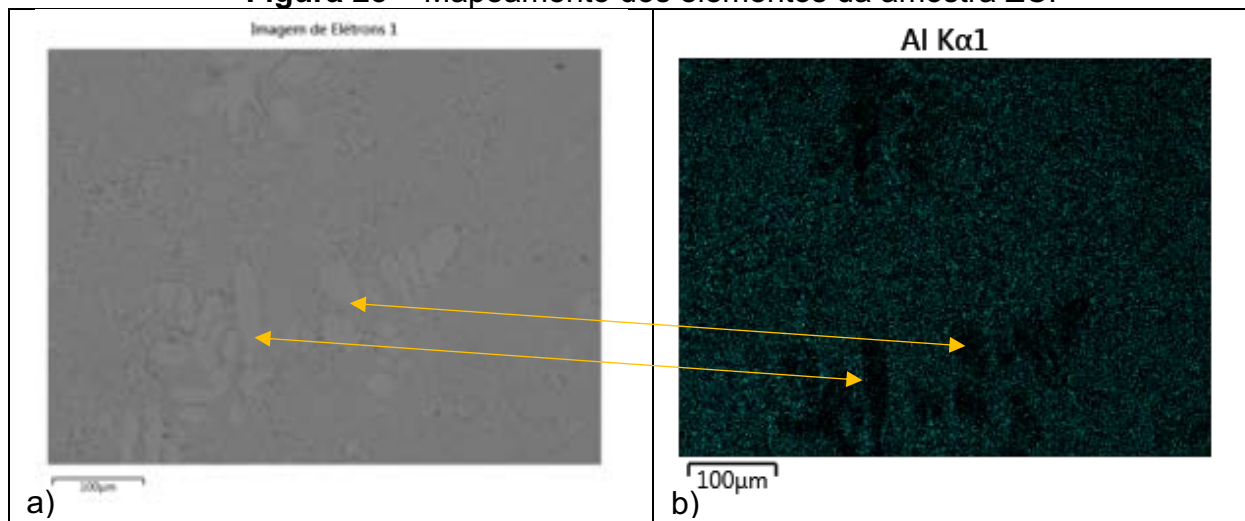


Fonte: autoria própria

Foi selecionada na amostra ZC uma área que mostra as regiões claras e escuras e foram utilizados sinais de raios x para identificação dos elementos zinco e

alumínio. As imagens mostram onde os sinais do alumínio foram identificados. As regiões mais escuras são onde não aparecerem o elemento alumínio e por isso são onde se identifica o zinco. Na Figura 25 de composição é referente a área mais clara, assim como no MO.

**Figura 25** – Mapeamento dos elementos da amostra ZC.

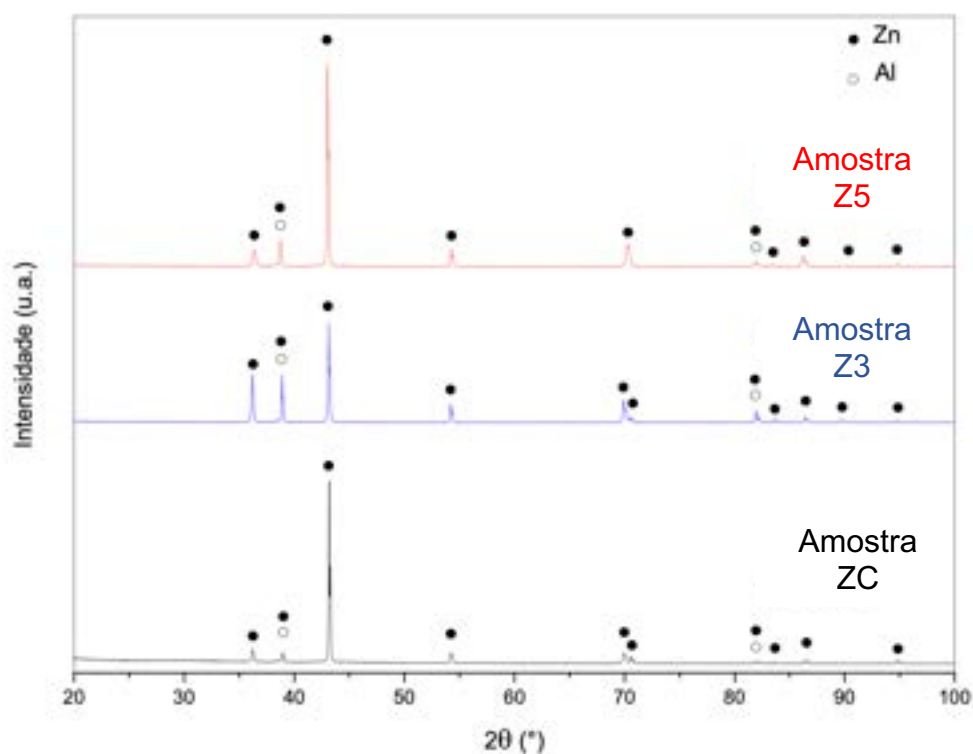


Fonte: autoria própria

### 5.3 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X

A Figura 26, apresenta os resultados das análises de DRX das amostras ZC, Z3 e Z5, realizados com a varredura de 20 a 100 graus na posição angular de  $2\theta$ , com tamanho de passo de 0,0263 graus. Foram identificadas fases presentes de zinco com estrutura hexagonal compacta (HC) e alumínio cúbica de face centrada (CFC) para as três amostras, segundo a ficha de picos característicos disponibilizado pelo *software HighScore*, código de referência 00-004-0787 para alumínio e 96-900-8523 para zinco.

**Figura 26** – Difratoograma das amostras ZC, Z3 e Z5.

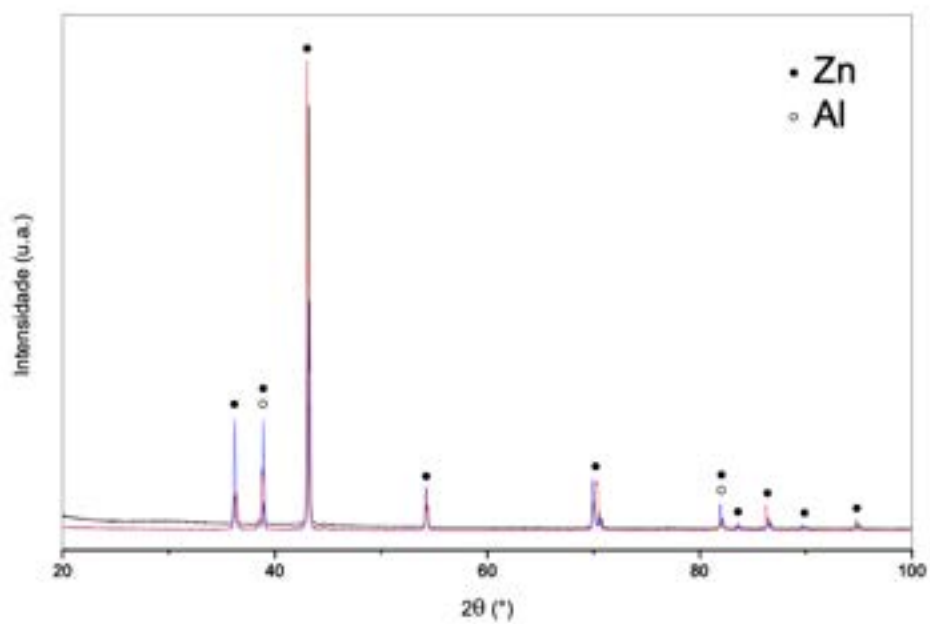


Fonte: autoria própria

Não foi identificado nenhum pico indicativo de outra fase nos difratogramas das amostras. Cabe destacar que segundo a Tabela 6 de composição das ligas Z3 e Z5 a porcentagem dos outros elementos são em inferiores a 1%, com isso encontra-se dificuldades de identificar outras fases, ou estão dissolvidos em solução sólida.

A Figura 27 apresenta os 3 difratogramas das amostras sobrepostos, pode-se observar que todos os picos identificados coincidem. As fichas das fases de Zn e de Al indicam que as amostras possuem as mesmas fases. A Tabela 7 indica quais são os planos difratados para cada uma das fases. Tem-se então a fase de Zn hexagonal, com o plano (101) mais intenso e com parâmetros de rede ( $a = 2.6650 \text{ \AA}$ ,  $b = 2.6650 \text{ \AA}$  e  $c = 4.9470 \text{ \AA}$ ). A fase de Al CFC apresenta o plano (111) como o mais intenso e possui os parâmetros de rede ( $a = 4.0494 \text{ \AA}$ ,  $b = 4.0494 \text{ \AA}$  e  $c = 4.0494 \text{ \AA}$ ). Como as fichas, tanto para o Zn quanto para o Al, foram as mesmas para as três ligas, então não foi possível determinar diferença nos parâmetros de rede destas fases indicando que a quantidade pequena de outros elementos pode estar distribuída de outro modo do que em solução sólida.

**Figura 27** – Difratomogramas sobrepostos das amostras ZC (preto), Z3 (azul) e Z5 (vermelho).



Fonte: autoria própria

**Tabela 7** – Lista de picos característicos de zinco e alumínio identificados no difratograma.

<b>Zinco hexagonal</b>						
N°	h	k	l	d [Å]	2θ [°]	I [%]
1	0	0	2	2,47350	36,290	37,6
2	1	0	0	2,30796	38,994	22,8
3	1	0	1	2,09154	43,221	100,0
4	1	0	2	1,68746	54,321	15,8
5	1	0	3	1,34172	70,075	19,3
6	1	1	0	1,33250	70,632	12,5
7	1	1	2	1,17311	82,087	15,2
8	2	0	0	1,15398	83,751	1,8
9	2	0	1	1,12381	86,540	9,7
10	1	0	4	1,09010	89,923	2,9
11	2	0	2	1,04577	94,883	2,6
<b>Alumínio cúbico</b>						
1	1	1	1	2,33800	38,473	100,0
2	2	2	2	1,16900	82,438	7,0

Fonte: adaptado do *software HighScore*.

#### 5.4 ENSAIO DE DUREZA POR REBOTE

Para obter a dureza das amostras de ligas de zinco, foram realizadas 10 (dez) medidas aleatórias em cada uma delas com o durômetro de rebote (Dureza Brinell). A Tabela 8 mostra estes valores assim como as médias, os desvios padrão e os intervalos de confiança para os valores de dureza. Foram analisadas confiabilidades de 95%.

**Tabela 8** – Valores obtidos no ensaio de dureza das amostras ZC, Z3 e Z5.

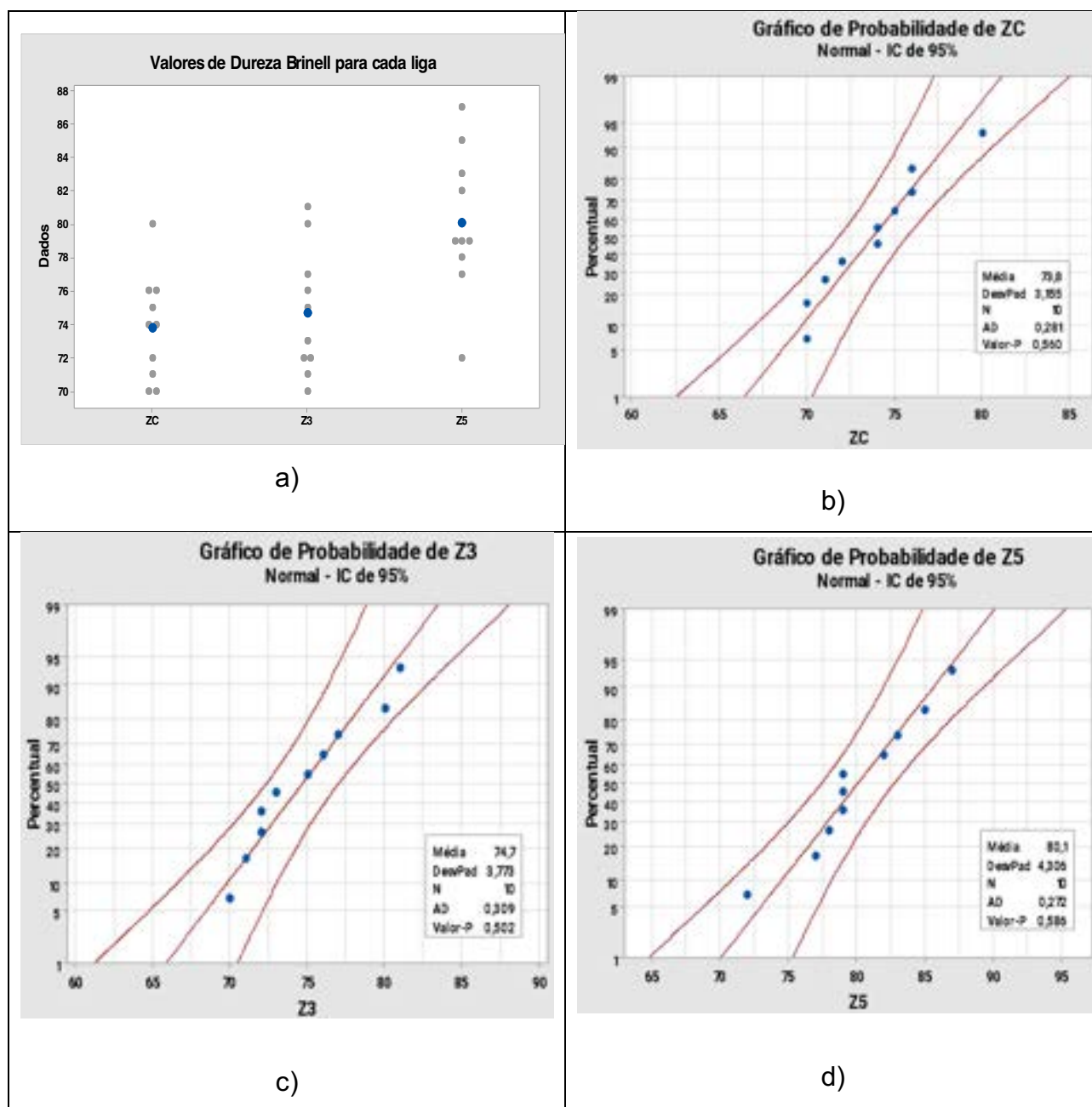
<b>Medição</b>	<b>Amostra ZC (HB)</b>	<b>Amostra Z3 (HB)</b>	<b>Amostra Z5 (HB)</b>
1	72	72	77
2	74	80	83
3	70	76	72
4	71	<b>81</b>	82
5	75	70	<b>87</b>
6	<b>80</b>	71	79
7	74	77	85
8	76	72	78
9	70	75	79
10	76	73	79
<b>Média (HB)</b>	<b>73,8</b>	<b>74,7</b>	<b>80,1</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,15</b>	<b>3,77</b>	<b>4,31</b>
<b>Intervalos de Confiança de 95%</b>	<b>(71,35; 76,25)</b>	<b>(72,25; 77,15)</b>	<b>(77,65; 82,55)</b>

Fonte: autoria própria

Utilizou-se os dados da Tabela 8 para a construção de gráficos para análises de comparações entre as médias. A primeira análise a ser feita é de normalidade. O teorema do valor central, em estatística, indica que toda média tem distribuição normal. Para isto se utiliza testes estatísticos e, um deles, é o *teste de Anderson-Darling*. Este teste indica um *Valor-P* que, se for menor que 0,05 (ou 5%) a distribuição é normal. Se este valor for maior que 0,05 então, não se pode dizer que é uma distribuição normal, mas também não se pode dizer que não é. Sendo assim, para *Valor-P* maiores do que 0,05 deve-se analisar o gráfico de probabilidade normal. Neste gráfico os dados são ajustados entre duas curvas externas e deve-se estar o mais próximo possível da linha central. A Figura 28 mostra a dispersão dos valores de dureza Brinell para as ligas em estudo (em a) e os testes de normalidade destes valores (em b, c e d). Nota-se nestes testes que o *Valor-P* é maior do que 0,05, indicando que não se pode afirmar que os valores formem uma distribuição normal. Então, o segundo passo é analisar estas curvas. Todos os dados estão entre as

curvas externas indicando que a distribuição normal tem um bom ajuste para os dados experimentais de dureza.

**Figura 28** – Distribuição dos valores de dureza (a) e testes de normalidade para as ligas ZC (b), Z3 (c) e Z5 (d).



Fonte: autoria própria

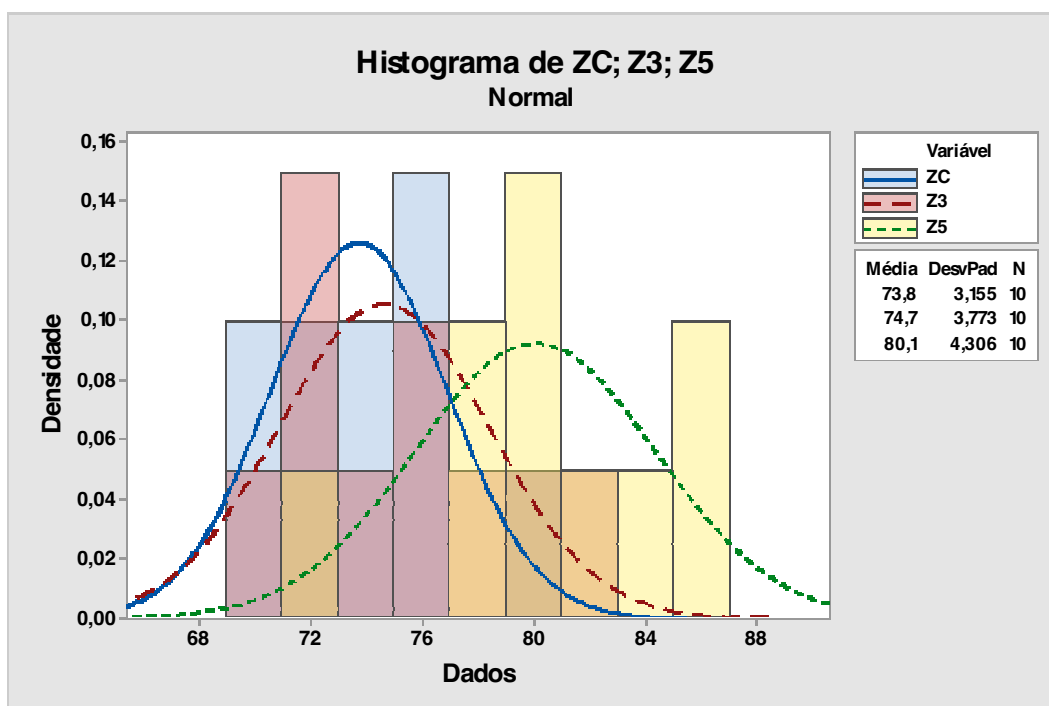
A Figura 29 mostra os histogramas dos valores de dureza Brinell para cada liga ajustada com suas distribuições normais. Nota-se nesta figura que os desvios padrão, associados a cada curva, são percebidos nas distribuições normais. Estes desvios indicam



a abertura das curvas. Quanto maior o desvio padrão maior é a largura da curva e mais baixa ela é. Sendo assim, a liga Z5 apresenta o maior desvio padrão.

Nota-se também nesta Figura 29 que as curvas normais das ligas ZC e Z3 estão quase que sobrepostas. Indicando valores bem próximos de dureza Brinell. A liga Z5 está mais deslocada para a direita indicando um maior valor médio de dureza.

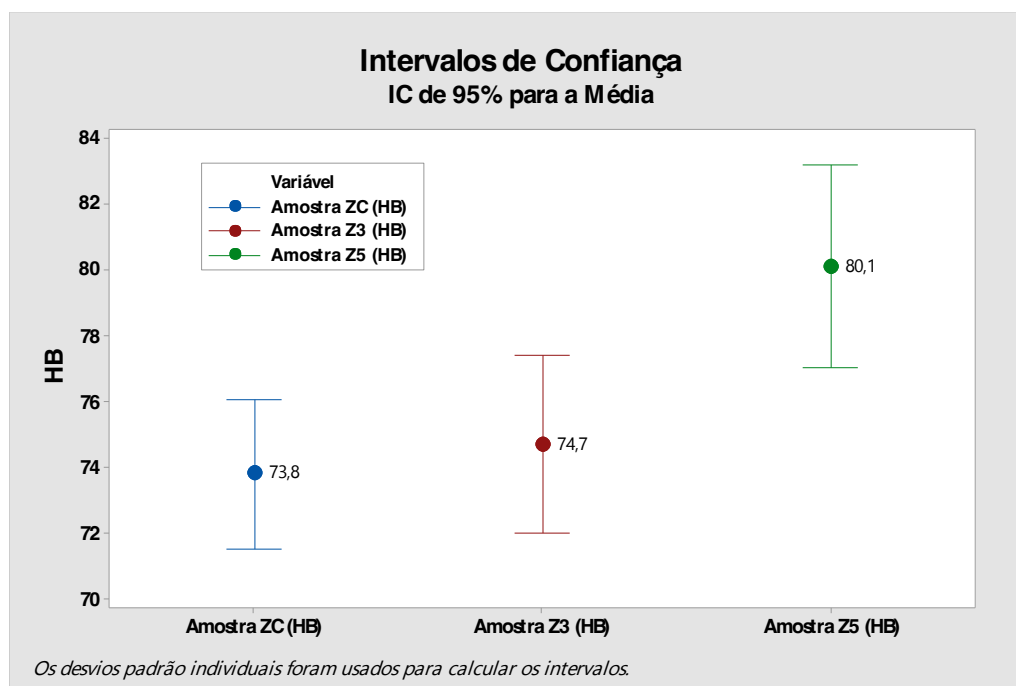
**Figura 29** – Histogramas e distribuições normais ajustadas para cada liga em estudo.



Fonte: autoria própria

Resumidamente a Figura 30 indica os valores médios de dureza Brinell para as três ligas e seus intervalos de confiança para uma confiabilidade de 95%. Nesta figura pode afirmar que as durezas médias para as ligas ZC e Z3 são semelhantes, inclusive em seus intervalos de confiança. Nota-se também que o valor médio de dureza para a liga Z5 é maior. Tem-se então para ZC 73,8 HB, para Z3 74,4 HB e para Z5 80,1 HB.

**Figura 30** – Representação do Intervalo de Confiança dos valores de dureza Brinell (HB) medidos nas amostras ZC, Z3 e Z5.



Fonte: autoria própria

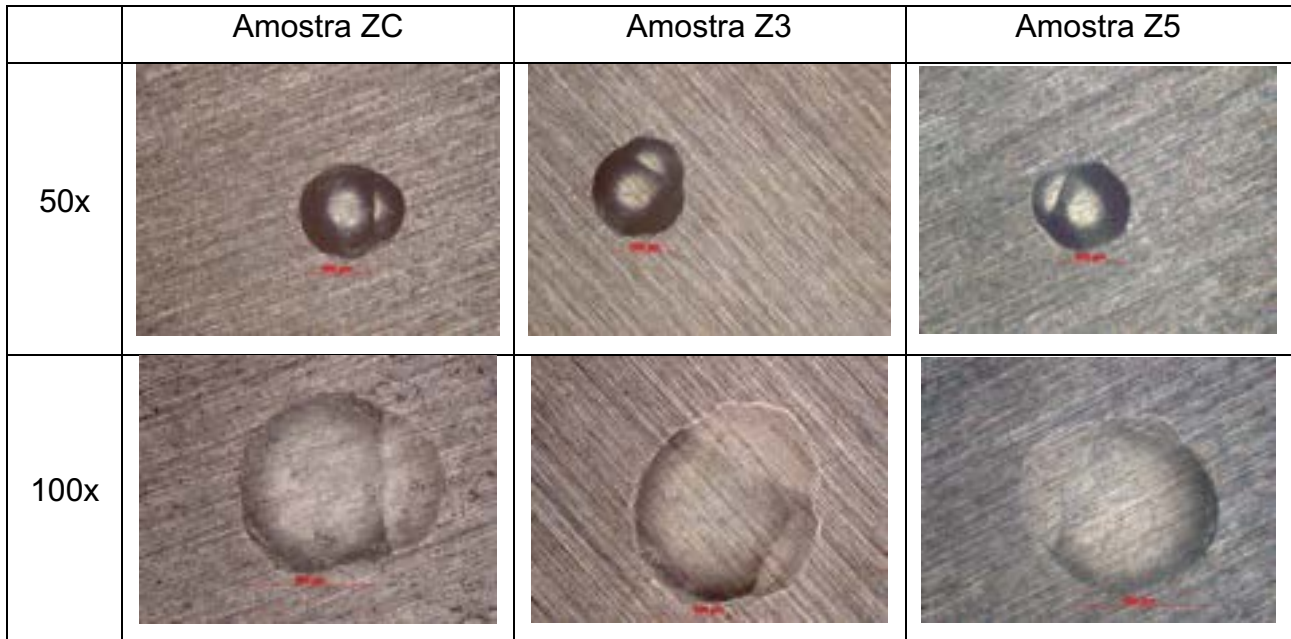
Os resultados de dureza obtidos das amostras Z3 e Z5 ficaram próximos aos valores da literatura. Segundo METALS HANDBOOK (1992) a dureza referencial é de 82 HB e 91 HB, respectivamente.

Nos trabalhos realizados pelos autores Azizi *et al.* (2021) e Alzate (2008), foram obtidas dureza máxima para a liga de zinco Zamac 3 o valor de 75 HB e para a Zamac 5 o valor de 84 HB. Com base nesses resultados deste trabalho pode-se dizer que na amostra Z3 e amostra Z5, o valor médio de dureza 74,7 HB e 80,1 HB, respectivamente, apresentam resultados muito próximo aos deles.

A Figura 31 mostra as micrografias das impressões marcadas nas amostras, com ampliação de 50x e 100x, pode-se observar uma dupla impressão em todas as amostras, isso se deve ao ensaio de dureza por rebote, pelo primeiro impacto da esfera do durômetro onde é realizado a medida na altura do rebote (e/ou velocidade, dependendo do durômetro), e logo em seguida após o rebote as amostras recebem o segundo impacto com a força menor. Essas impressões são devidas as amostras que são formadas por liga de zinco são consideradas moles quando comparadas com o material da esfera do durômetro, composto por carboneto de tungstênio.

Nesta Figura 31, as micrografias acompanham a escala, pode-se observar o tamanho das impressões são aproximadamente de 500  $\mu\text{m}$  em todas as amostras, com isso sabe-se o tamanho da área realizada nos ensaios, onde abrange as fases primária  $\eta$  e a eutética  $\alpha+\eta$ .

**Figura 31** – Micrografia das impressões realizadas no ensaio de dureza.



Fonte: autoria própria

Analisando os valores de dureza das amostras, a amostra ZC e a amostra Z3 apresentam valores mais próximos ao ser comparado, ambos demonstram dureza inferior a amostra Z5.

## 6. CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados acima, pode-se concluir que todas as amostras obtiveram a identificação da presença dos elementos zinco e alumínio, em fase primária  $\eta$  (grãos) e fase eutética  $\alpha+\eta$  (lamelar), com isso é admitido que as 3 amostras analisadas fazem parte da família Zamac;

Através das micrografias obtidas pelo microscópio ótico e o MEV, mostrou-se que os grãos de zinco da fase primária  $\eta$  são melhor distribuídos e mais refinados para a liga Z5, comparado com a liga ZC e a Z3;

A análise semi-quantitativa, realizada pelo EDS, apresentou gráficos semelhantes para as três amostras, identificando os elementos zinco e alumínio. Através do mapeamento de elementos junto a micrografia analisada, também foi possível confirmar as regiões claras identificadas como zinco ( $\eta$ ) e regiões escuras como zinco + alumínio ( $\eta+\alpha$ );

Os resultados obtidos através da análise de DRX indicou que os difratogramas apresentaram muita semelhança para as três amostras analisadas. Foram identificadas fases presentes de zinco com estrutura hexagonal compacta (HC) e alumínio cúbica de face centrada (CFC) para as três amostras, segundo a ficha de picos característicos disponibilizado pelo *software HighScore*;

O ensaio de dureza por rebote apresentou resultados próximos para as amostras ZC (73,8 HB) com a Z3 (74,7 HB), diferente quando comparado com o Z5, que apresentou a dureza mais elevada (80,1 HB);

Com base nos resultados adquiridos de todas as análises realizadas, apesar de alguns resultados apresentar bons indicativos de semelhança para as amostras ZC e Z3, todavia é necessário realizar estudos mais profundos, no entanto ainda não se pode confirmar a substituição entre duas ligas.

## 7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Novas análises de MEV para obter melhores imagens e sinais de EDS;

Analisar mais cuidadosamente a DRX e determinar se houve ou não variação nos parâmetros de rede;

Realização de novos ensaios mecânicos para obter informações afins de comparação das ligas, por exemplo: resistência a tração, alongamento e módulo de elasticidade.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM B240-07, Standard Specification for Zinc and Zinc-Aluminum (ZA) Alloy in Ingot Form for Foundry and Die castings**. 31 de Dez. de 2010. Disponível em: <https://www.astm.org/b0240-07.html>. Acesso em: 03 de nov. de 2022.

AECweb. **Fabricantes de fechaduras devem atender à NBR 14913**. 13 de Jan. de 2020. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/fabricantes-de-fechaduras-devem-atender-a-nbr-14913/1383>. Acesso em: 20 de nov. de 2022.

ALZATE, Gallego; FELIPE, Andrés *et al.* **Análisis y comparación entre el proceso de centrifugado e inyección para la fabricación de piezas en Zamac**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade EAFIT, 2008.

AZIZI, Abdolhamid *et al.* Comparison of ZAMAK 2 and ZAMAK 3 Alloys Produced by Powder Metallurgy Process. **Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production**, 2021.

BOAROLI, D. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO INOCULANTE TiB<sub>2</sub> E DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA ZAMAC 5**. TESE (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2020.

Bolibruchová, D.; Bruna, M.; Matejka, M. **Impact of Remelting on ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> Alloy with Addition of Cd on Selected Technological and Mechanical Properties**. Metals, 2022.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 821 p.

COLPAERT, Hubertus; SILVA, André Luiz V. da Costa e. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Blucher, 2015. 652 p.

DA COSTA, Eleani M; *et al.* **Study of the influence of copper and magnesium additions on the microstructure formation of Zn–Al hypoeutectic alloys**. Journal of Alloys and Compounds, 2009.

DA SILVA, Renato F. **A difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais**. Revista Processos Químicos, 2020.

DE SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo, Edgard Blücher, 1982.

DIGIMESS. **Manual de instruções: Durometro portátil digital**. 2021.

EAZALL. **Eastern Alloys – Zinc Die casting Alloy**. Disponível em: <https://www.eazall.com/zinc-die-casting-alloys>. Acesso em: 22 de nov. de 2022.

MONFERRATO. **Ensaio de metalografia: o que é e para que serve?**, Morro da Fumaça, 15 de set. de 2022. Disponível em: <https://monferrato.com.br/ensaio-de-metalografia-o-que-e-para-que-serve/>. Acesso em: 15 de set. de 2022.

ERMEL, Joni M; KUNST, Sandra Raquel; et al. **Uso de sucata de peças técnicas produzidas em Zamac Z5 para preparação de peças para calçados e acessórios por fundição sob pressão**. Matéria – Rio de Janeiro, 2022.

FUHR, Luciane Thaís et al. **Influência dos defeitos de solidificação na resistência à corrosão do Zamac 5 obtido por injeção sob pressão**. Matéria – Rio de Janeiro, 2020.

FERRAZ, Queila. **História do zíper: criação, fabricação e curiosidades**. 17 de ago. de 2021. Disponível em: <https://www.fashionbubbles.com/historia-da-moda/ziper-historia-processo-fabricacao-curiosidades/>. Acesso em: 15 de nov. de 2022.

GANIVET M. **Metalurgia das ligas de zinco: fundição**. Belo Horizonte: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 1987.

GARCIA, A.; SPIM, J. A. e SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HUANG, Tian; LIU, Zhilin, et al., **Microstructure, mechanical properties, and biodegradation response of the grain-refined Zn alloys for potential medical materials**, Journal of Materials Research and Technology, 2021.

ICZ (Instituto Cadeia do Zinco) – **ZAMAC**. Disponível em: <http://www.icz.org.br/zinco-zamac.php>. Acesso em: 5 de set. de 2022.

INFOMET. **Infomet: Diagrama de fases**. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/diagrama-de-fases-ver.php?cod=60>. Acesso em: 22 de Out. de 2022.

IZA: **International Zinc Association. Engineering in Zinc, Today's Answer**. 2020.

KREBAND, S.L. **Partes de la cremallera**. Disponível em: <https://www.kreband.com/es/zipers-parts/>. Acesso em: 20 de dez. de 2022.

KRUPINSKA, B. *et al.* Cooling rate influence on microstructure of the Zn-Al cast alloy. **Archives of materials science and engineering**, 2010.

MARCO, Natalia. **A história do zíper: como surgiu o acessório mais usado no universo outdoor**. Blogdescalada. 19 de set. de 2019.

METAIS BR. **Zinco em Lingotes**. Disponível em: <https://www.metaisbr.com/produtos/zinco-em-lingotes/>. Acesso em: 25/07/2022.

METALS HANDBOOK. **Metallography and Microstructures of Zinc and Its Alloys, Metallography and Microstructures**, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, 2004.

METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Vol 2, ASM Handbook, ASM International, 1992.

MOJAVER, R; SHAHVERDI, HR. **Relationship between cooling rate, microstructure features and wear behavior in end-chill cast Zn-27% Al alloys containing more than 2% Cu**. Wear, 2011.

PALIWA, D. A. **Casting with Zinc Alloys**. Journal of Metals, 1981.

POLA, A; TOCCI, M; GOODWIN, F. E. **Review of Microstructures and Properties of Zinc Alloys**. Journal Metals 2020. disponível em <<https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/253>> acesso em: 15/09/2022.

RICK, Cristiane F. **Estudo da liga à base de Zn-Al-Cu-Mg aplicada na fabricação de joias folhadas**. Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.

ROHDE, Regis Almir. **METALOGRAFIA: Preparação de amostras**. Rio Grande do Sul: Lemm - Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010.

VOTORANTIM METAIS. **Manual de Fundição sob Pressão**. 2013.

YKK. **SLIDERS CATALOGUE**, .2012. Disponível em [http://www.ykk.com.br/arquivos/catalogos2/3zp9\\_Catalogo-Ziper-YKK.pdf](http://www.ykk.com.br/arquivos/catalogos2/3zp9_Catalogo-Ziper-YKK.pdf). Acesso em: 20 de nov. de 2022.



**ANEXOS**

<b>ANEXO A</b> – Especificação Técnica de Zamac 3 fornecida pela Empresa brasileira .....	65
<b>ANEXO B</b> – Especificação Técnica de Zamac 5 fornecida pela Empresa brasileira .....	66

## ANEXO A – Especificação Técnica de Zamac 3 fornecida pela Empresa brasileira

<b>ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE MATERIAL</b>			
<b>NORMA:</b>	ASTM B 240	<b>DENOMINAÇÃO:</b>	ZAMAC 3
<b>IDENTIFICAÇÃO:</b>	Fardos de aproximadamente 500kg com etiqueta identificando o peso, nº de peças e o lote, quando pintados com uma faixa na cor Verde.		
<b>EMBALAGEM:</b>	Arqueados com 3 fitas metálicas, envolvidas em película de pvc.		
<b>APLICAÇÃO:</b>	Fundição sob pressão e fundição por coquilhas e centrifugação		
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>			
ELEMENTO		MÍNIMO	MÁXIMO
<i>Al</i>	Alumínio	3,900	4,300
<i>Cu</i>	Cobre	0,000	0,100
<i>Mg</i>	Magnésio	0,030	0,060
<i>Fe</i>	Ferro	0,000	0,035
<i>Pb</i>	Chumbo	0,000	0,004
<i>Cd</i>	Cádmio	0,000	0,003
<i>Sn</i>	Estanho	0,000	0,0015
<i>Zn</i>	Zinco	Dif.	Dif.
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>			
Faixa de Fusão	381 -387 °C		
Densidade	6,6 g/cm <sup>3</sup>		
Condutividade Elétrica	27 % IACS		
<b>CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS</b>			
Dureza Brinell	82		
Resistência à Tração	414 MPa		
<b>DESENHO / REPRESENTAÇÃO GRÁFICA (se aplicável)</b>			
Dimensões		Peso Bruto:	Peso Liq
<b>OBSERVAÇÕES</b>			
Os ensaios mecânicos acima descritos são referenciais. Características mecânicas variam de acordo com a peça produzida e o reagrupamento de grãos durante a solidificação do material. Para conhecer/determinar as propriedades mecânicas ou a funcionalidade da peça em resistir às forças mecânicas e/ou transmiti-las, deve-se realizar os ensaios na própria peça, ou retirar o corpo de prova durante a fabricação da mesma.			

## ANEXO B – Especificação Técnica de Zamac 5 fornecida pela Empresa brasileira

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE MATERIAL				
<b>NORMA:</b>	ASTM B 240	<b>DENOMINAÇÃO:</b>	ZAMAC 5	
<b>IDENTIFICAÇÃO:</b>	Fardos de aproximadamente 500kg com etiqueta identificando o peso, nº de peças e o lote, quando aplicável pintados com uma faixa na cor azul.			
<b>EMBALAGEM:</b>	Arqueados com 3 fitas metálicas, envolvidas em película de pvc.			
<b>APLICAÇÃO:</b>	Fundição sob pressão e fundição por coquilhas.			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA				
ELEMENTO		MÍNIMO	MÁXIMO	
<i>Al</i>	Alumínio	3,900	4,300	
<i>Cu</i>	Cobre	0,700	1,100	
<i>Mg</i>	Magnésio	0,030	0,060	
<i>Fe</i>	Ferro	0,000	0,035	
<i>Pb</i>	Chumbo	0,000	0,004	
<i>Cd</i>	Cádmio	0,000	0,003	
<i>Sn</i>	Estanho	0,000	0,0015	
<i>Zn</i>	Zinco	Dif.	Dif.	
PROPRIEDADES FÍSICAS				
Faixa de Fusão	380 - 386 °C			
Densidade	6,6 g/cm <sup>3</sup>			
Condutividade Elétrica	26 % IACS			
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS				
Dureza Brinell	91			
Resistência à Tração	328 MPa			
DESENHO / REPRESENTAÇÃO GRÁFICA (se aplicável)				
Dimensões		Peso Bruto:		Peso Líq
OBSERVAÇÕES				
Os ensaios mecânicos acima descritos são referenciais. Características mecânicas variam de acordo com a peça produzida e o reagrupamento de grãos durante a solidificação do material. Para conhecer/determinar as propriedades mecânicas ou a funcionalidade da peça em resistir às forças mecânicas e/ou transmiti-las, deve-se realizar os ensaios na própria peça, ou retirar o corpo de prova durante a fabricação da mesma.				