

## Avaliação preliminar da influência do cobre oriundo de sucata reprocessada na microestrutura, dureza e resistência à compressão do zamac 5

Preliminary evaluation of the influence of copper from reprocessed scrap on the microstructure, hardness and compressive strength of zamac 5

Jefferson Moraes do Prado<sup>1</sup> , Sandra Raquel Kunst<sup>1</sup> , Luana Góes Soares<sup>1</sup> ,  
Eduardo Luís Schneider<sup>2</sup> , Cláudia Trindade Oliveira<sup>1</sup> , Luciane Taís Fuhr<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Feevale, Instituto de Ciências Criativas e Tecnológicas. Rod. RS239, 2755, Vila Nova, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

e-mail: jeffersonmoraes82@hotmail.com, tessaro.sandra@gmail.com, lugoes.soares@gmail.com, prof.eduardo@ufrgs.br, cto@feevale.br, luciane.fuhr@gmail.com.

### RESUMO

Zamac é uma liga metálica composta de zinco, alumínio, magnésio e cobre. Suas propriedades de processamento, como baixo ponto de fusão e alta fluidez a quente faz com que a indústria reprocessa o refugo da produção de zamac sem enviá-lo a uma usina para refino, podendo ocasionar diferenças de composição química na liga original e conseqüentemente nas suas propriedades mecânicas e microestruturais. Este trabalho visa avaliar as variações oriundas do reprocessamento de zamac 5 na forma de sucata contendo eletrodeposição de cobre alcalino quanto à microestrutura e às propriedades mecânicas. As amostras reprocessadas foram comparadas com amostras de zamac 5 como recebidas e analisadas por meio de ensaios de dureza, resistência à compressão, microestrutura por microscopia eletrônica de varredura e de composição química por EDS. Os resultados de ensaio de resistência à compressão e composição química mostram que houve a formação de uma liga nova, com aumento da concentração de aproximadamente 4% de cobre, muito semelhante à liga ternária Zn-15Al-4Cu. Embora essa liga nova tenha apresentado resultados de dureza alta e resistência à compressão relativamente baixa, preliminarmente, pode-se dizer que é adequada para fabricação de peças que não recebem esforços compressivos significativos, como enfeites para roupas, bolsas, calçados e acessórios.

**Palavras-chave:** Zamac; Reprocessamento; Microestrutura; Propriedades mecânicas.

### ABSTRACT

Zamac is a metallic alloy composed of zinc, aluminum, magnesium and copper. Its processing properties, such as low melting point and high hot fluidity, make the industry reprocess the waste from zamac production without sending it to a plant for refining, which can cause differences in chemical composition in the original alloy and consequently in its mechanical and microstructural properties. This work aims to evaluate the variations arising from the reprocessing of zamac 5 in the form of scrap containing alkaline copper electrodeposition in terms of microstructure and mechanical properties. The reprocessed samples were compared with zamac 5 samples as received and analyzed using hardness, compressive strength, microstructure tests using scanning electron microscopy and chemical composition tests using EDS. The results of the compressive strength and chemical composition tests show that a new alloy was formed, with an increase in copper concentration of approximately 4%, very similar to the ternary alloy Zn-15Al-4Cu. Although this new alloy has shown results of high hardness and relatively low compressive strength, preliminarily, it can be said that it is suitable for manufacturing parts that do not receive significant compressive stresses, such as decorations for clothes, bags, shoes and accessories.

**Keywords:** Zamak; Reprocessing; Microstructure; Mechanical properties.

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, as indústrias que trabalham com peças fundidas, buscam alta qualidade e bom desempenho dos seus materiais, da mesma forma que buscam pela redução de custo para a manutenção da sustentabilidade empresarial. Segundo ERMEL [1], um dos principais custos que as empresas possuem é relacionado com a matéria-prima.

A busca pela redução de custo com matéria prima, faz com que o uso do Zamac venha crescendo cada vez mais dentro das empresas. Ele apresenta propriedades mecânicas semelhantes às do latão, que é uma das matérias primas utilizadas nas indústrias, porém possui custo cerca de 4 vezes menor [2]. A liga possui baixo ponto de fusão (cerca de 380 °C), alta fluidez a quente, pode ser revestido facilmente por eletrodeposição ou pintura [3] e é também um material mais leve que o latão, por exemplo, o que permite fabricar peças com espessuras mais finas [4].

O Zamac é uma liga metálica não ferrosa, que tem como componentes principais o Alumínio e o Zinco, entretanto, para melhorar suas características físicas como dureza, proteção à corrosão e ductibilidade são adicionados à liga os elementos Cobre e Magnésio [5]. Devido a isso, injeção sob pressão de Zamac é um processo de alta produtividade e seu uso está sendo cada vez mais comum dentro das indústrias, permitindo seu uso nos setores automotivos [2], de joias [6], artesanatos, brinquedos, moveleira, da construção civil, de metais sanitários [4], na fabricação de acessórios para calçados, bolsas, vestuário [1] e em aparelhos auditivos [7].

Pelo fato do ponto de fusão de Zamac ser baixo, normalmente as próprias empresas fazem o reprocessamento do refugo da produção de Zamac, sem enviá-lo a uma usina para refino. O reprocessamento direto gera uma grande diminuição na necessidade de matéria-prima virgem, tendo em vista que o rejeito de fundição (massalotes, canais de injeção e refugos de produção por diversas falhas, por exemplo) pode corresponder em até 40% do material virgem, diminuindo assim, a quantidade de matéria virgem a ser adquirida [8]. O re-refino seria o mais correto, porém as próprias empresas optam por realizar essa “reciclagem direta” tendo em vista que o processo se torna mais acessível. Entretanto, a prática pode acarretar diferenças nas características de composição química quando comparado à liga original, causando variações nas propriedades mecânicas e microestruturais. Com isso, a liga de Zamac pode não apresentar o mesmo desempenho da liga original, pois, quando é reutilizada diretamente, uma parte significativa dos seus componentes pode oxidar-se à alta temperatura e migrar para a escória de fundição [9, 10], além da possibilidade de outros elementos serem agregados em quantidades não controladas. Neste trabalho foram avaliadas algumas propriedades mecânicas e a microestrutura do Zamac reprocessado diretamente com a adição de Cobre eletrodepositado, a fim de verificar se a liga reprocessada apresenta desempenho adequado para a produção industrial.

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1. Descrição da peça utilizada para fundição

Para realização da fundição do Zamac 5 com eletrodeposição de cobre, foram utilizadas fivelas de calçados, com área de 5,24 cm<sup>2</sup> e volume de 1,048 cm<sup>3</sup>, conforme Figura 1.



**Figura 1:** Fivela de calçado (Zamac 5 com eletrodeposição de cobre) utilizada para fundição.

As peças utilizadas neste trabalho continham recobrimento de cobre alcalino cianídrico, que foi eletrodepositado com o tempo de 30 minutos, e continha espessura média de 9  $\mu\text{m}$ . Para melhor entendimento, os dois diferentes materiais utilizados neste estudo (Zamac sem e com recobrimento de cobre alcalino) receberam nomenclaturas de acordo com a seguinte descrição: Z5 – Lingote de Zamac 5 como recebido da empresa comercial, fundido por gravidade, resfriado ao ar e Z5RC – Zamac 5 com recobrimento de cobre alcalino por eletrodeposição.

## 2.2. Fundição do zamac 5 com eletrodeposição de cobre

Para realizar a fundição da amostra Z5RC foram utilizadas 57 fivelas. As peças foram colocadas dentro de um cadinho de porcelana e em seguida inseridas dentro do forno elétrico marca Sanchis, modelo BTT, para a fundição controlada.

Após a fundição o material foi vazado em moldes de areia de fundição de 50  $\text{cm}^3$ , equipado com sensor de temperatura tipo K para obtenção das curvas de análise térmica. Para controle das curvas de solidificação foi utilizado computador com software específico, o Novus Fieldchart 1.80, que realiza a leitura dos dados para gerar gráficos.

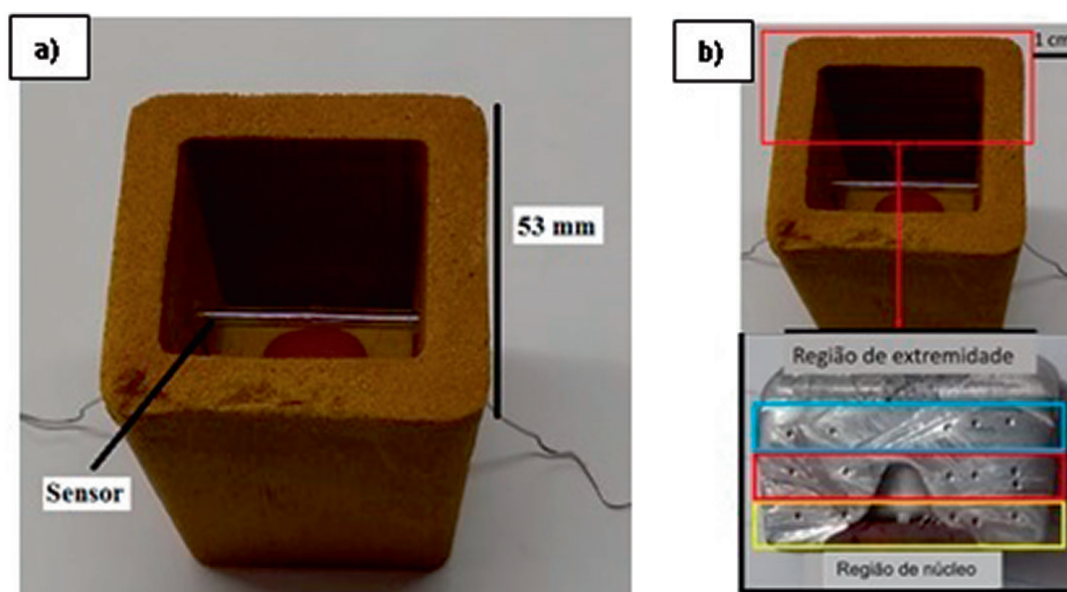
## 2.3. Ensaio de dureza

Após a fundição do material, o tarugo obtido foi cortado ao meio para as análises de dureza. A máquina utilizada foi um durômetro da marca Arms Find modelo HBRV – 900L V2, seguindo a metodologia para dureza Rockwell B proposta por VILLEGAS-CARDENAS *et al.* [11]. O penetrador utilizado foi de aço com base esferoidal de 2,5 mm de diâmetro. Durante a análise foi aplicada uma carga de 100 kgf durante 5 segundos na amostra, e uma pré-carga de 10 kgf durante 5s. Na Figura 2-a é mostrado o molde de areia com sensor de temperatura e a medida. No ensaio de dureza, foi realizado o mapeamento, por meio de quinze indentações em diferentes regiões da amostra, conforme mostrado na Figura 2-b. Após isso, foi calculada a média aritmética para cada região e para a amostra individualmente.

Para comparação, foi realizado também ensaio de dureza em um lingote de Zamac 5 como recebido (Z5), de onde se obteve uma amostra em corte transversal com área de 2,15  $\text{cm}^2$  e volume de 2,53  $\text{cm}^3$ . A metodologia aplicada seguiu o padrão descrito para Z5RC, com seis indentações em diferentes regiões da amostra, de forma aleatória.

## 2.4. Caracterização microestrutural obtida ao Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Para a verificação da microestrutura foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura de topo. Para a análise, uma amostra da região de núcleo (vide Figura 2b) foi preparada por meio de método metalográfico na



**Figura 2:** Amostra de Zamac 5 utilizada para ensaio de dureza. a) Molde de areia com sensor de temperatura e b) Mapeamento, por meio de quinze indentações em diferentes regiões da amostra.

**Tabela 1:** Dimensões dos corpos de provas para o ensaio de compressão.

DIMENSÕES ZAMAC 5 (Z5) (mm)			
CORPO DE PROVA	ALTURA	COMPRIMENTO	ESPESSURA
1	22	9,33	13,41
2	20,5	10,5	11,78
DIMENSÕES ZAMAC 5 (Z5RC) (mm)			
CORPO DE PROVA	ALTURA	COMPRIMENTO	ESPESSURA
1	23,74	11,78	15,6
2	22,66	13,69	15,5

sequência de lixas de SiC de granulometria # 240, #600, #1200, #2400 e #4000 e polida com pasta de alumina 1  $\mu\text{m}$ . Após, a superfície foi atacada com Nital 2% por 5 s, para revelação da microestrutura. A amostra foi metalizada com um filme fino de ouro. O equipamento utilizado para a microscopia foi um Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JEOL-JSM 6510CV com resolução de 129 eV. A tensão de análise (aceleração de elétrons) utilizada foi de 20 kV, sendo que o vácuo de análise foi de  $10^{-4}$  Pa. As micrografias foram obtidas em ampliações de 500 e 100 vezes.

Para determinação semiquantitativa da composição química da amostra foi realizada análise por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy* – Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x) utilizando o módulo específico acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura.

### 2.5. Ensaio de compressão

Para realizar o ensaio de compressão, foram utilizados quatro corpos de provas, dois de Zamac 5 eletrodepositado em Cobre (Z5RC) e dois de Zamac 5 como recebido (Z5), cujas dimensões estão descritas na Tabela 1. Para o ensaio de compressão foi utilizado o procedimento descrito na norma NBR 15174 – Componentes metálicos e plásticos para calçados e artefatos – fivelas, enfeites e reboques/para-lamas: Determinação da resistência à tração e compressão [12]. De acordo com a norma, o corpo de prova deve apresentar resistência mínima à compressão de 250 N para qualquer tipo de geometria de componente, sem fixar dimensional específico para o corpo de prova. Para este ensaio, os corpos de prova obtidos do lingote de Z5 e do fundido Z5RC continham altura que não excedia em até 2 vezes seu comprimento, Tabela 1 [13].

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Curva de solidificação

Na Figura 3, é mostrado o gráfico da análise térmica da amostra Z5RC durante o resfriamento. Observa-se na Figura 3 que a temperatura da liga, em estado líquido, diminuiu de cerca de  $354\text{ }^{\circ}\text{C}$  (*Linha liquidus* – *ponto LL*) até aproximadamente  $332\text{ }^{\circ}\text{C}$  (*Linha solidus* – *LS*). Na região de *solidus*, a amostra exibe certa estabilidade térmica, com taxa de resfriamento de  $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , indicando a mudança de fase. Aqui, a transferência de calor é muito mais devida ao calor latente de solidificação do que ao simples resfriamento. De fato, é nesta região de temperatura que se inicia a solidificação, com formação da fase eutética conforme indicam os trabalhos de MURPHY [14] e LIANG e SCHMID-FETZER [15].

A taxa de resfriamento encontrada é semelhante àquela obtida por ERMEL *et al.* [16], de cerca de  $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , para Zamac Z5 com eletrodeposição de cromo (cujas camada de cobre é intermediária ao acabamento cromado). E SAVAŞKAN [17] compararam taxas de resfriamento de ligas de Zn-Al sem e com adição de cobre. A liga contendo 3% de cobre, Zn-40Al-3Cu, apresentou taxa de resfriamento de  $5,45\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , enquanto aquela sem adição de cobre, Zn-40Al, apresentou  $4,09\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , o que representou uma redução de 25% na taxa de resfriamento com a adição de cobre, corroborando com os resultados de Z5RC. Já MOJAVER e SHAHVERDI [18] mostraram, em seu estudo, que cerca de 2 a 4% de cobre na liga Zn-Al causa uma redução de cerca de 2,5% na temperatura de solidificação comparada à liga comercial Z5 como recebida (cerca de  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de acordo com ERMEL *et al.* [16]), o que concorda com os dados obtidos nesse trabalho. Após 4 minutos, a temperatura diminui numa taxa maior, em cerca de  $13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , o que indica o final da solidificação, com transferência de calor sensível para a atmosfera com rearranjo microestrutural e resfriamento.

### 3.2. Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados com intuito de verificar a influência do Cobre na amostra Z5RC, comparando com Z5. O gráfico da Figura 4 mostra os resultados gerais obtidos bem como o seus respectivos desvios padrões.

Observando os resultados mostrados na Figura 4, percebe-se que a amostra Z5RC mostrou aumento na dureza (74,27 HRB) em comparação à liga da amostra Z5 (29,09 HRB), o que representa cerca de 68%. Esses resultados estão de acordo com a literatura [19], pois, o efeito da adição de cobre na liga de Zn-Al é costumeiramente aumentar a resistência à corrosão, à dureza e a resistência mecânica.

SAVAŞKAN [20] avaliaram o efeito da concentração de cobre em ligas ternárias e quaternárias de Zn-Al e verificaram que a adição de cada 1% de cobre na liga tende a aumentar entre 2 e 3% a microdureza média (em HRF<sup>1</sup>), até um valor limite (avaliado) de 5% de cobre. Já o trabalho de SAVAŞKAN [17] mostrou que o incremento de 1% de cobre na liga tende a aumentar a dureza em escala Rockwell B em 12,5%. Com isso, pode-se inferir que a incorporação de cobre na amostra Z5RC deve ter sido de aproximadamente 5% na sua composição química.

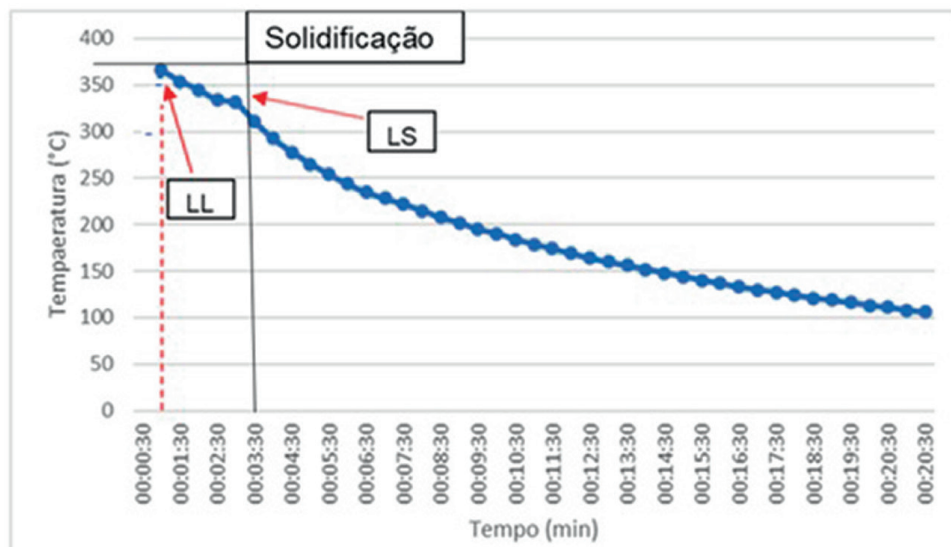


Figura 3: Curva de solidificação da amostra Z5RC em estudo.

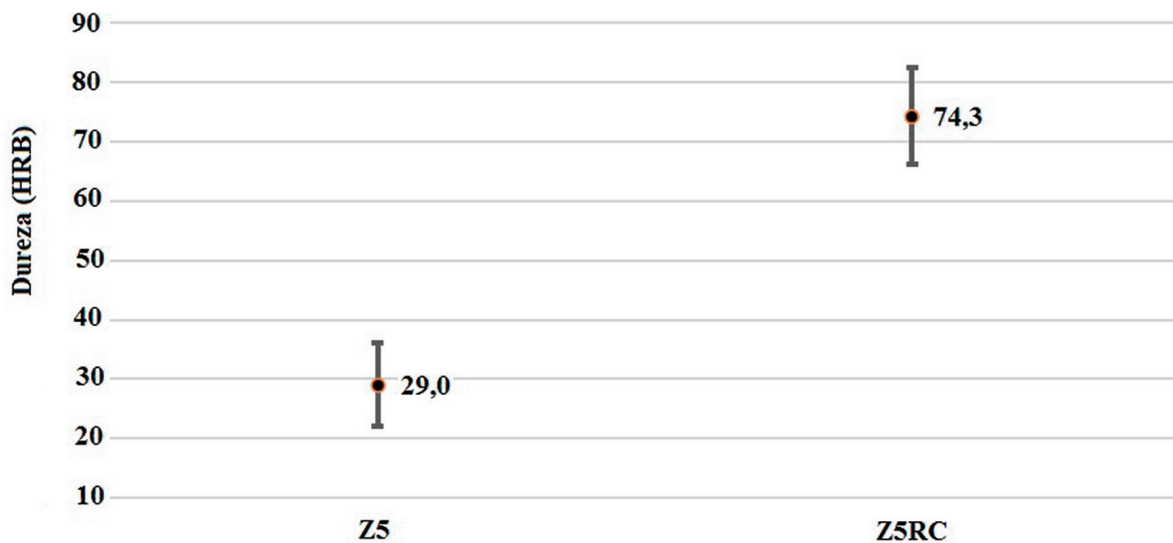


Figura 4: Resultado geral do ensaio de dureza das amostras Z5RC e Z5 e o desvio padrão.

<sup>1</sup> HRF – hardness Rockwell F; ou dureza Rockwell F; ensaio normalmente conduzido para cobre e ligas de cobre, ou chapas finas de metais dúcteis. Nele, aplica-se pré-carga de 60 kfg, com penetrador esférico de aço de 1,5875 mm.

A dureza não apenas é influenciada pela composição química, mas também pela microestrutura da liga metálica. Microestruturas refinadas (de grãos pequenos) tendem a ter maior dureza do que grãos maiores. Fases eutéticas também apresentam durezas diferenciadas em relação a regiões de interstícios de grãos ou fases homogêneas [21]. Assim, foi realizado mapeamento de dureza transversal ao corpo de prova fundido da amostra Z5RC, partindo-se do núcleo para a extremidade conforme mostrado na Figura 2-b. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 5.

Como esperado, a região de núcleo apresentou dureza menor em relação à região de extremidade. Conforme GARCIA [21], o fluxo de calor estabelecido no resfriamento de uma peça fundida tem sentido do núcleo para as extremidades. Neste caso, as extremidades resfriam mais rapidamente, pois é nelas que se estabelece um fluxo de calor por convecção tendo normalmente (mas não exclusivamente) a atmosfera como interface de fluido frio. Por isso, é comum que peças fundidas mostrem duas zonas estruturais: uma junto à extremidade, de grãos equiaxiais, mais refinada, que encontram condições de nuclear e crescer dentro da massa ainda fluida; e outra colunar, mais próxima ao núcleo, de crescimento mais lento [21]. Zonas equiaxiais costumam apresentar perfil de dureza maior que as zonas colunares [22]. Assim, justifica-se o incremento de dureza nas regiões intermediária e de extremidade na amostra Z5RC.

### 3.3. Ensaio de compressão

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de compressão realizados nas amostras. Observando os dados obtidos na Figura 6, nota-se que os resultados mostraram-se inversos ao que ocorreu nos ensaios de dureza: a amostra Z5, apresenta uma carga máxima em compressão cerca de 66% maior que a amostra Z5RC. Para fins de melhor entendimento, embora a normativa utilizada reporte-se apenas à carga máxima como parâmetro, foi também mostrado o resultado em termos de tensão máxima. Para este parâmetro, também houve uma diminuição significativa de resistência à compressão, em cerca de 40%. Este não era um resultado esperado, visto que a literatura reporta aumento na resistência à compressão com a adição de cobre às ligas hipoeutéticas de Zn-Al [17, 23].

Contudo, WU *et al.* [24] mostraram que a diminuição da resistência à compressão ou tração (fenômeno que os autores chamam de “amaciamento”) pode acontecer em decorrência da plasticidade do contorno de grãos de estruturas eutéticas e eutetóides finas nas ligas hipoeutetóides de Zn-Al-Cu-Mg, o que pode explicar a menor resistência à compressão da amostra Z5RC. Este fato pode também ter relação direta com a concentração de cobre, que interfere na formação da microestrutura da liga.

SAVAŞKAN [20], por exemplo, verificaram que a solubilidade máxima de cobre nos dendritos de fase  $\beta$  era de 2%. Acima de 2% de cobre, há a formação de fase  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ), um intermetálico que precipita no contorno de grão. Como este intermetálico possui resistência mecânica inferior, é possível que tenha forte influência na diminuição da resistência à compressão da amostra Z5RC em relação à amostra Z5.

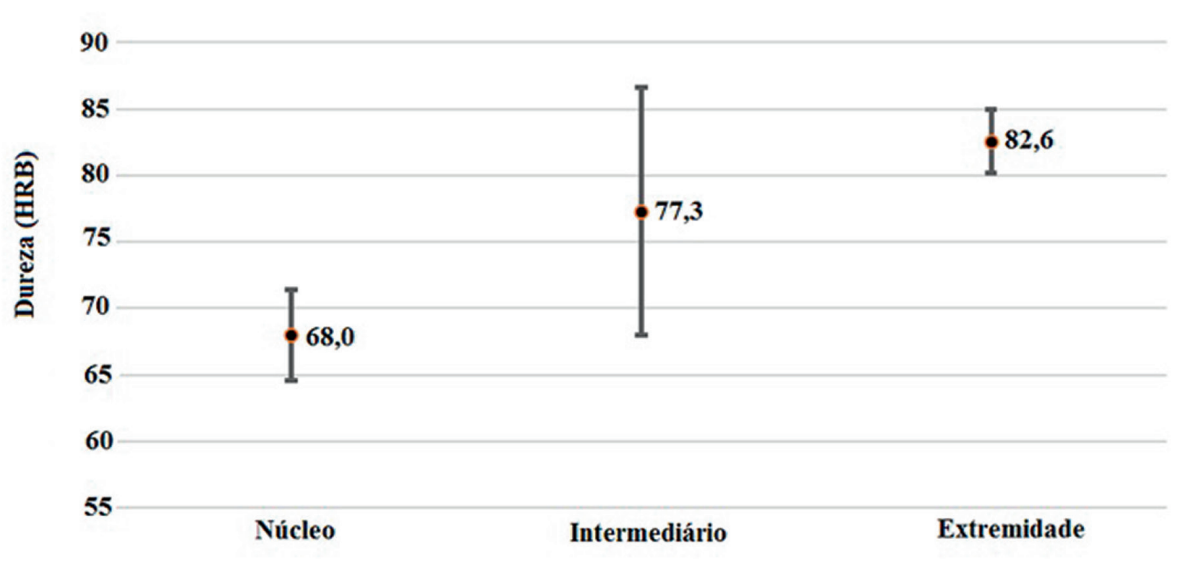


Figura 5: Resultado do ensaio de dureza por meio do mapeamento transversal ao corpo de prova fundido da amostra Z5RC, partindo-se do núcleo para a extremidade.

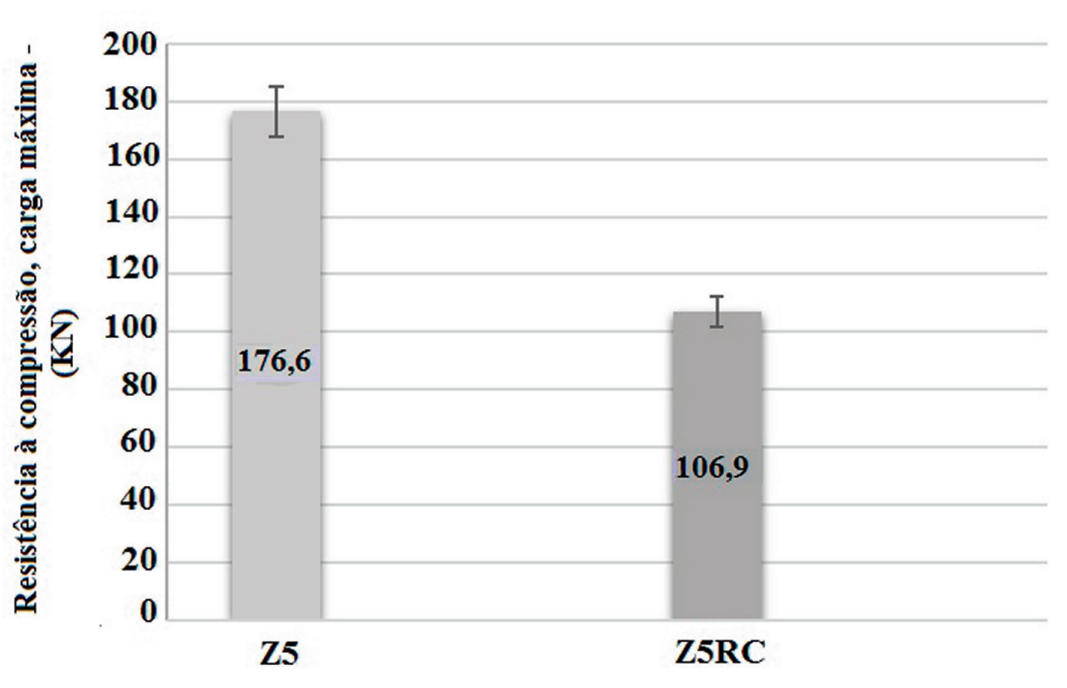


Figura 6: Resultados dos ensaios de compressão das amostras Z5 e Z5RC.

### 3.4. Análise da microestrutura

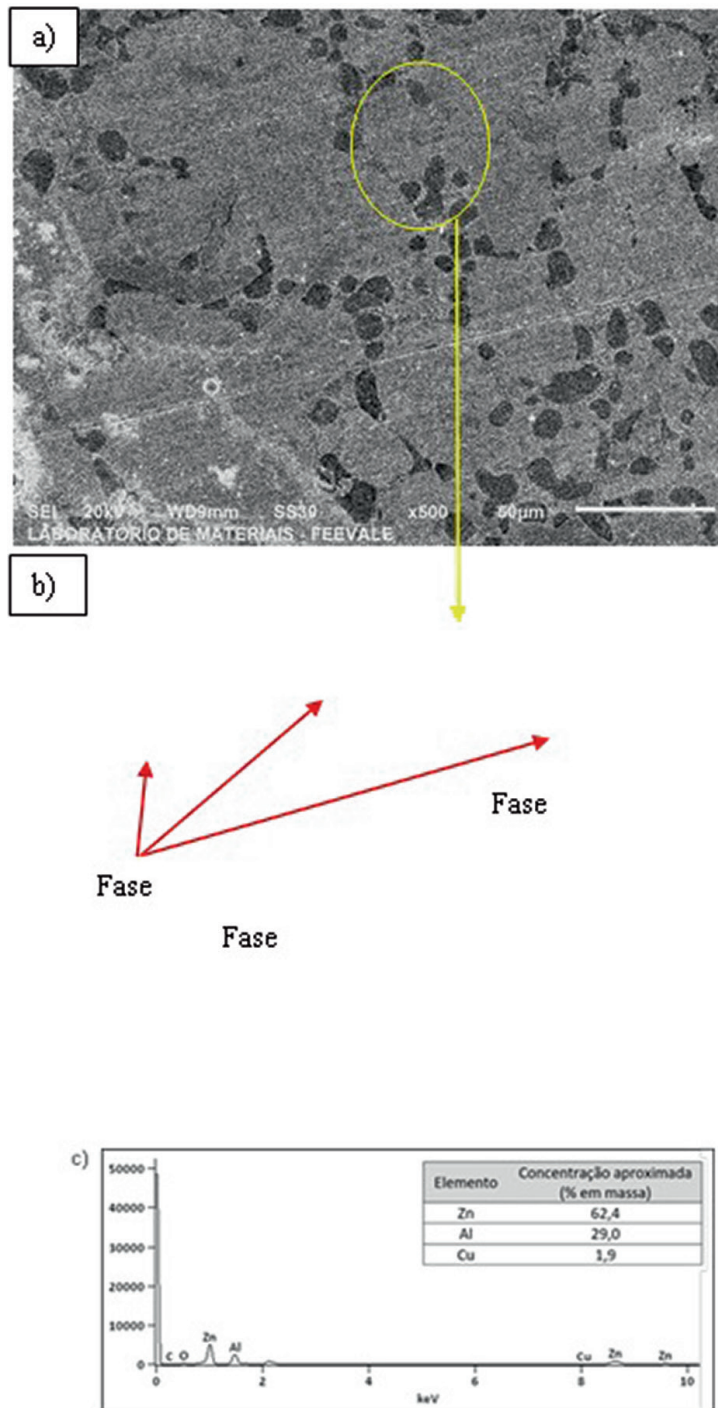
Para melhor compreender a formação de fases, foi realizada avaliação da microestrutura. A Figura 7 mostra as micrografias obtidas da amostra Z5RC com magnitudes de  $500\times$  (a) e  $1000\times$  (b) com identificação das fases bem como o espectro de EDS e a composição química aproximada da fase ternária intersticial.

O cobre é solúvel na fase dendrítica  $\beta$  até cerca de 3%, e confere aumento da dureza e da resistência mecânica a essa fase. Acima disso, tende a precipitar na forma de fase  $\epsilon$ , que é um intermetálico de  $\text{CuZn}_4$  relativamente duro e quebradiço [20]. Assim, a distribuição mais homogênea do cobre sobre toda a matriz metálica (Figura 7) é coerente com o descrito na literatura. Os pontos mais escuro (marcados com as setas em vermelho na Figura 7) provavelmente denotam locais onde a formação da fase  $\epsilon$  é mais intensa ou tem partículas de maior volume, já que segundo a literatura [11, 20], acima de 2% de cobre pode haver precipitação da fase metaestável  $\epsilon$ , cuja formação é maior quanto maior for a concentração de cobre. SAVAŞKAN [20] também demonstraram que, embora o cobre aumente a resistência à compressão, uma concentração do elemento acima de 3% tem efeito contrário, o que corrobora com os resultados de resistência à compressão verificados para a amostra Z5RC (Figura 6).

A microestrutura da amostra Z5RC (Figura 7a) é formada por grãos grandes dispersos em uma matriz eutética e com presença de grãos intersticiais. Os grãos grandes de fase primária  $\eta$ , rica em zinco (Figura 7b), mostram um padrão já esperado para ligas hipoeutéticas de zinco oriundas de fundição por gravidade, com resfriamento lento [4]. A estrutura lamelar é formada pela fase eutética, que para uma liga com as proporções de Zn/Al verificadas na amostra Z5RC é composta das fases  $\beta + \eta$ . A fase  $\beta$  interdendrítica é rica em alumínio. Os grãos intersticiais, conforme avaliado pelo espectro de EDS da Figura 7c, são uma formação eutetóide de fase  $\beta + \eta + \epsilon$ . Esse arranjo faz com que os grãos intersticiais de fase eutetóide tenham influência direta nas propriedades mecânicas da liga. Esses grãos representam uma descontinuidade nos planos de escorregamento para distribuição das forças compressivas impostas ao material no ensaio de resistência à tração. Além disso, o grão eutetóide apresenta a fase  $\epsilon$  presente, que segundo SAVAŞKAN [20] é dura e quebradiça; assim, os resultados tanto de resistência à compressão (Figura 6) quanto de dureza (Figura 5) são corroborados por conta desses fatos.

A Figura 8 mostra o mapeamento em EDS para a avaliação da composição química aproximada da amostra Z5RC.

Verifica-se pelo mapeamento químico de EDS (Figura 8) que o zinco é elemento majoritário na liga, como esperado, distribuído de forma bastante homogênea na microestrutura. Contudo, fica evidente que está

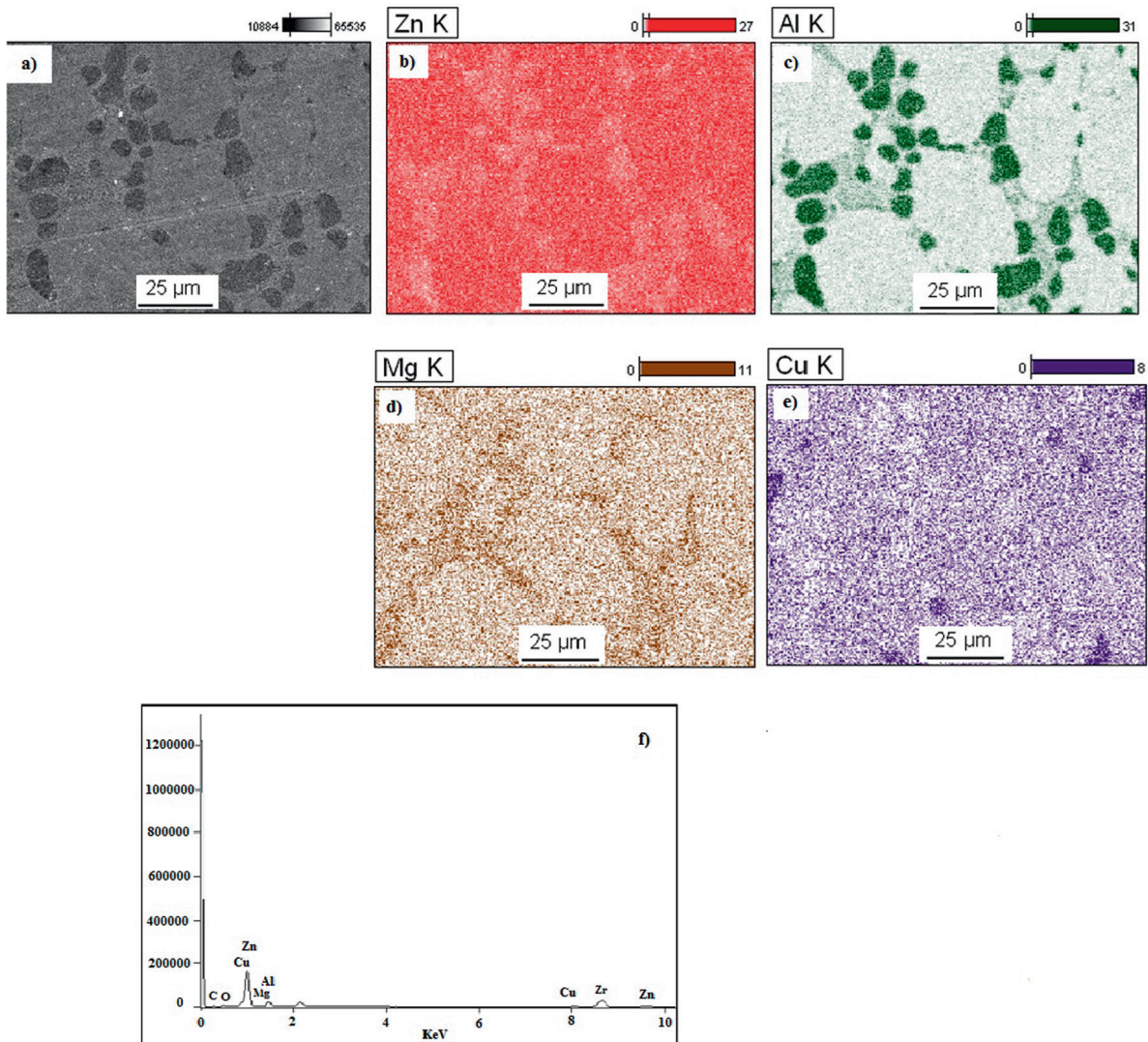


**Figura 7:** Microestrutura da amostra Z5RC: a) magnificação de 500×; b) magnificação de 1000× com identificação das fases presentes; c) espectro de EDS e composição química aproximada da fase ternária intersticial.

presente em maior quantidade nos grãos grandes, de provável fase primária. Já o alumínio concentra-se nos interstícios dos grãos, como grãos menores (mais escuros) e menos concentrado na estrutura que parece ser a matriz eutética, de aspecto lamelar e que circunda todos os grãos, preenchendo os espaços. O cobre e o magnésio apresentam-se em menor concentração estimada (fato também esperado) do que o zinco e o alumínio. O magnésio está preferencialmente localizado na matriz eutética, onde tem maior solubilidade [25].

O cobre, por sua vez, está homoganeamente distribuído, tanto na fase primária, quanto na eutética, quanto nos grãos intersticiais. Isso pode ser atribuído ao fato de que o cobre é solúvel de maneira relativamente uniforme nas fases presentes em concentração até cerca de 3% [20]. Observando o espectro de EDS, a composição química estimada pode ser evidenciada e está apresentada na Tabela 2.





**Figura 8:** Espectro em EDS da amostra Z5RC em relação aos componentes da liga original. a) Micrografia de topo, b) composição de Zn, c) composição de Al, d) composição de Mg, e) composição de Cu e f) espectro da composição.

**Tabela 2:** Composição química aproximada da amostra Z5RC.

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO APROXIMADA (% EM MASSA)	ESPECIFICAÇÃO ASTM B240-07 (% EM MASSA)
Zn	86,40 ± 0,3	>95
Al	9,40 ± 0,06	3,90 – 4,3
Cu	3,91 ± 0,09	0,7 – 1,1
Mg	0,06 ± 0,05	0,03 – 0,06

A composição química, Tabela 2, mostra que a liga da amostra Z5RC não se adequa à especificação de uma liga de Zamac 5, sendo mais semelhante à liga ternária Zn-15Al-4Cu [20]. O aumento da concentração de cobre já era esperado, devido à introdução de cobre por meio da camada eletrodepositada nas fivelas, mas não houve previsão de quanto poderia ser essa incorporação. A fusão do Zamac 5 com eletrodeposição de cobre parece ter “desbalanceado” a liga. Uma hipótese para isso, é de que esse desbalanceamento possa ter ocorrido pela migração de elementos para a escória [16]. Neste trabalho, contudo, não foi avaliada a geração de escória, nem sua proporção em relação à massa inicial posta em fusão para a amostra Z5RC.

Chama a atenção o magnésio, metal que facilmente gera óxidos voláteis [26], manter-se em proporção adequada à especificação para Zamac 5. Tal fato também foi observado por ERMEL *et al.* [16], em trabalho de refusão direta de peças em Zamac 5 com eletrodeposição de cromo, e foi associado ao tempo de fusão utilizado, que parece não ter sido suficiente para permitir a cinética de oxidação do magnésio, o que provavelmente também ocorreu com a amostra Z5RC.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo mostram que a refundição direta de Zamac 5 com eletrodeposição de cobre provoca alterações na sua composição química, microestrutura e propriedades mecânicas (dureza e resistência à compressão), gerando uma liga metálica diferente, que por sua vez se assemelha à liga ternária Zn-15Al-4Cu. Preliminarmente, pode-se dizer que a refundição direta pode ser indicada para fabricação de peças sem características estruturais, que não vão ser submetidos a esforços compressivos significativos, como enfeites para bolsas, roupas e acessórios.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX 88881.844968/2023/1061/2023) pelo apoio financeiro.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ERMEL, J.M., “*Uso de sucata para fundição sob pressão de peças para calçados e acessórios*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- [2] SOARES, O.J.A., “*Melhorias de produto/processo pela utilização de ligas de Zamac*”, Tese de M.Sc., Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.
- [3] PENHA, F.J.R., *Apresentação sobre ligas de Zinco para fundição*, São Paulo, Grupo Votorantim, 2008.
- [4] MARCOLIN, P., LONGHI, M., ZINI, L.P., *et al.*, “Effects of the casting temperature in the leakage of Zamak 5”, *Materials Science Forum*, v. 899, pp. 458–462, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.899.458>.
- [5] COSTA, E.M., COSTA, C.E., VECCHIA, F.D., *et al.*, “Study of the influence of copper and magnesium additions on the formation of the microstructure of hypoeutectic Zn-Al alloys.”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 488, n. 1, pp. 89–99, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.08.125>.
- [6] PAGNAN, A.S., LANA, S.L.B., MIRANDA, P.C.S., *et al.*, “Materiais e processos produtivos utilizados no design de joias: análise histórica, evolutiva e comparativa”, *Revista de Design, Tecnologia e Sociedade*, v. 5, n. 2, pp. 84–98, 2018.
- [7] GHEORGHE, C., “Corrosion behaviour of zamak components in a hearing aid”, *Scientific Bulletin Upb, Romania*, v. 83, n. 4, pp. 251–262, 2021.
- [8] HOFFMEISTER, S.C., “*Avaliação da liga comercial zamac após reprocessamento com a utilização de escorificantes e corretores de liga*”, Tese de M.Sc., Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2016.
- [9] GUSIEVA, K., DAVIES, C.H.J., SCULLY, J.R., *et al.*, “Corrosion of magnesium alloys: the role of alloying”, *International Materials Reviews*, v. 60, n. 3, pp. 169–194, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1179/1743280414Y.0000000046>.
- [10] YANG, Y., XIONG, X., CHEN, J., *et al.*, “Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020”, *Journal of Magnesium and Alloys*, v. 9, n. 3, pp. 705–747, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2021.04.001>.
- [11] VILLEGAS-CARDENAS, J.D., SAUCEDO-MUÑOZ, M.L., LOPEZ-HIRATA, V.M., *et al.*, “Effect of phase transformations on hardness in Zn-Al-Cu Alloys”, *Materials Research*, v. 17, n. 5, pp. 1137–1144, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.228913>.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15174: Componentes metálicos e plásticos para calçados e artefatos – Fivelas, enfeites e reboques/para-lamas – Determinação da resistência à tração e compressão*, Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- [13] OTMZA, *Ensaio de compressão*, <https://www.otmza.com.br/ensaio-de-compressao/>, acessado em junho de 2022.
- [14] MURPHY, S., “Solid-phase reactions in the low-copper part of the Al-Cu-Zn system”, *International Journal of Materials Research*, v. 71, n. 2, pp. 96–102, 1980. doi: <http://dx.doi.org/10.1515/ijmr-1980-710207>.

- [15] LIANG, S.M., SCHMID-FETZER, R., “Thermodynamic assessment of the Al–Cu–Zn system, Part III: Al–Cu–Zn ternary system”, *Calphad*, v. 52, pp. 21–37, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2015.11.001>.
- [16] ERMEL, J.M., KUNST, S.R., KELSCH, A.F., *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)*, v. 27, n. 1, pp. 1–14, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620220001.1335>.
- [17] SAVAŞKAN, T., HEKIMOĞLU, A.P., “Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys”, *International Journal of Materials Research*, v. 107, n. 7, pp. 646–652, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.3139/146.111390>.
- [18] MOJAVER, R., SHAHVERDI, H.R., “Relationship between cooling rate, microstructure features and wear behavior in end-chill cast Zn-27%Al alloys containing more than 2% Cu”, *Wear*, v. 271, n. 11–12, pp. 2899–2908, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.014>.
- [19] BRESCIANI FILHO, E., GOMES, M.R., *Propriedades e usos de metais não ferrosos: alumínio, chumbo, cobre, estanho e zinco*, São Paulo, Editora ABM, 1976.
- [20] SAVAŞKAN, T., HEKIMOĞLU, A.P., PÜRÇEK, G., “Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys”, *Tribology International*, v. 37, n. 1, pp. 45–50, 2004. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(03\)00113-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(03)00113-0).
- [21] GARCIA, A., “Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes”, *Revista Projeções*, v. 23, pp. 13–32, 2005.
- [22] ARES, A., RODRIGUEZ, C.M., MÈNDEZ, C.M., *et al.*, “Microhardness, corrosion behaviour and microstructures of directionally solidified Al-Cu alloys”, *Light Metals*, v. 2013, pp. 469–473, 2003. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1\\_81](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_81).
- [23] SAVAŞKAN, T., TURHAL, M.Ş., “Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys”, *Materials Characterization*, v. 51, n. 4, pp. 259–270, 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2003.12.003>.
- [24] WU, Z., SANDLÖBES, S., WU, L., *et al.*, “Mechanical behaviour of Zn-Al-Cu-Mg alloys: deformation mechanisms of as-cast microstructures”, *Materials Science and Engineering A*, v. 651, pp. 675–687, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.020>.
- [25] FAN, C.H., CHEN, Z.H., HE, W.Q., *et al.*, “Effects of the casting temperature on microstructure and mechanical properties of the squeeze-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 504, n. 2, pp. 42–45, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.012>.
- [26] TAN, Q., ATRENS, A., MO, N., *et al.*, “Oxidation of magnesium alloys at elevated temperatures in air: a review”, *Corrosion Science*, v. 112, pp. 734–759, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.06.018>.