

Uso de sucata de peças técnicas produzidas em Zamac Z5 para preparação de peças para calçados e acessórios por fundição sob pressão

Use of scrap of technical parts produced in Zamac Z5 for the preparation of parts for shoes and accessories by pressure casting

Joni Moisés Ermel¹, Sandra Raquel Kunst², Augusto de Freitas Kelsch³, Luciane Taís Fuhr², Fernando Dal Pont Morisso², Guilherme José Schneider², Cláudia Trindade Oliveira², Alexandre da Silva Rocha¹

¹PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Universidade Feevale, ICCT, Rod. RS239, 2755, Bairro Vila Nova, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

³Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Av. Unisinos, 950, CEP: 93022-750, Cristo Rei, São Leopoldo, RS, Brasil.

e-mail: Joniermel@gmail.com, tessaro.sandra@gmail.com, augustokelsch@hotmail.com,

luciane.fuhr2@feevale.br, morisso@feevale.br, guilherme14_16@hotmail.com, cto@feevale.br, Alexan-

dre.rocha@ufrgs.br

RESUMO

Empresas fornecedoras de Zamac reciclam sucatas de peças técnicas provenientes do processo produtivo de zamac injetado sob pressão e revestido por eletrodeposição. No entanto, somente 35% da sucata enviada para beneficiamento é reciclada e retorna para o processo produtivo como matéria-prima. Levando em consideração que a matéria-prima é um dos principais custos das empresas, o reaproveitamento de sucata representa uma oportunidade de economia para o processo fabril. Com isso, o objetivo desse trabalho foi verificar a viabilidade de fundição de sucatas de peças técnicas como matéria-prima para a fabricação de peças para o mercado da moda. A sucata foi analisada quanto à composição química, microestrutura e características térmicas. A sucata foi fundida sob pressão para produção de componentes para calçados e acessórios (elementos estéticos como fivelas e enfeites). Para comparação, enfeites e fivelas foram obtidos com matéria-prima virgem. Os enfeites e fivelas foram analisados quanto à microestrutura, resistência à corrosão e propriedades mecânicas. As amostras fundidas com uso de sucata responderam de forma satisfatória a todos os ensaios e, em alguns casos, de maneira superior às peças de controle, que foram fundidas com matéria-prima virgem. Assim, constatou-se que a sucata oriunda de peças técnicas pode ser usada como matéria-prima para produção de peças e acessórios para o setor de moda e, neste contexto, representa uma possibilidade de redução de custo de fabricação.

Palavras-chave: Sucata. Redução de custos. Zamac. Fundição Sob Pressão. Calçados e acessórios.

ABSTRACT

Zamak supplier companies recycle scraps of technical parts from the production process of zamak injected under pressure and coated with electrodeposition. However, only 35% of the scrap sent for processing is recycled and returns to the production process as raw material. Taking into account that raw material is one of the main costs of companies, the reuse of scrap represents an opportunity to save the manufacturing process. With that, the objective of this work was to verify the viability of casting scraps of technical parts as raw material for the manufacture of parts for the fashion market. The scrap was analyzed for chemical composition, microstructure and thermal characteristics. The scrap was melted under pressure to produce components for shoes and accessories (aesthetic elements such as buckles and ornaments). For comparison, ornaments and buckles were obtained from virgin raw material. The ornaments and buckles were analyzed for microstructure, corrosion resistance and mechanical properties. Samples cast using scrap responded satisfactorily to all

tests and, in some cases, better than control parts, which were cast with virgin raw material. Thus, it was found that scrap from technical parts can be used as raw material for the production of parts and accessories for the fashion sector and, in this context, it represents a possibility of reducing manufacturing costs.

Keywords: Scraps. Cost reduction. Zamac. Squeeze Casting. Shoes and accessories.

1. INTRODUÇÃO

Componentes para calçados e acessórios para moda possuem uma enorme diversidade de formatos, tamanhos e modelos, que apresentam um ciclo de vida relativamente curto e que dificilmente são produzidos de forma seriada [1, 2]. Assim, torna-se importante que os custos de produção sejam os mais baixos possíveis com a preservação da mais alta qualidade.

O material utilizado para confecção destas peças é a liga de zinco, alumínio, magnésio e cobre, conhecida comercialmente como Zamac, que é designada como Z5 com composição química usualmente comercializada (Zn 95% - Al 4%) [3]. Esta liga possui características e propriedades importantes para aplicação na confecção de elementos estáticos para o setor da moda. Uma delas é o baixo ponto de fusão, de cerca de 400°C, que implica em uma baixa demanda de energia durante o processo de fundição quando comparado com bronze e latão, por exemplo [4, 5]. A liga também aceita facilmente tratamentos superficiais de eletrodeposição [6, 7] e acabamentos mecânicos como polimento e usinagem [8], permitindo a obtenção de diversos aspectos visuais requeridos pelo mercado da moda. Além disso, o Zamac Z5 também apresenta menor valor de mercado comparado a outras ligas comercialmente disponíveis, como latão e bronze [6, 7].

As empresas buscam sustentabilidade econômica para manterem-se competitivas frente à concorrência no mercado consumidor. Assim, em empresas que processam Zamac, é comum o reaproveitamento de matéria-prima, visando diminuir custos de produção da liga. Em uma empresa metalúrgica da região do Vale do Rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul, a sucata da produção de peças técnicas eletrodepositadas com cromo não é reaproveitada diretamente no processo produtivo. Neste sentido, a empresa encaminha sua sucata para rebeneficiamento e recebe de retorno apenas 35% da sucata para ser utilizada novamente no processo produtivo. Durante o processo de reprocessamento são realizadas adições de componentes da liga para ajuste da composição química para Zamac Z5, visando a manutenção das propriedades do material [9, 10]. Cabe salientar que a linha de moda (produtos para calçados e acessórios) possui menor complexidade e exigências que a linha de peças técnicas. Porém, o volume de vendas de peças de moda é superior ao de peças técnicas, o que representa maior consumo de Zamac Z5.

Assim, este trabalho teve o objetivo de avaliar o comportamento da sucata reutilizada diretamente como matéria-prima para a produção de componentes de função decorativa para calçado, evitando o envio para beneficiamento externo.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Obtenção da matéria-prima a partir da sucata de Zamac contendo revestimento de cromo eletrodepositado

O Quadro 1 mostra os modelos de peça cuja sucata, contendo revestimento de cromo obtido por eletrodeposição, foi utilizada como matéria-prima. Estas peças foram definidas a partir da máxima e mínima relação área/volume de acordo com o catálogo da empresa.

Peça	Ref.	Imagem	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Área/Volume	
Volante para Torneira	VT		106,09	8,13	13,05	MAIOR relação área/volume
Cruzeta para Torneira	CT		73,05	25,54	2,86	MENOR relação área/volume

Quadro 1: Modelos de peças de sucata utilizadas na obtenção de enfeites para calçados.

A obtenção das peças que serviram como matéria prima, volante de torneira (VT) e cruzeta para torneira (CT) foi realizada de maneira controlada. Não foram utilizadas peças já existentes no processo, devido à incerteza de sua composição química. Para tanto, foram produzidas peças novas que, ao final do processo de produção, foram separadas e classificadas como sucata, independentemente se apresentavam defeito ou não.

As peças volante e cruzeta foram produzidas em uma injetora sob pressão com câmara quente marca Agrati, modelo HC120 e em seguida, foram lixadas e polidas. Nesta etapa foram separadas amostras sem e com revestimento de cromo por eletrodeposição. Para diferenciação das amostras, foi utilizada a nomenclatura apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Nomenclatura utilizada para referenciar as amostras no trabalho

Nomenclatura	Descrição da amostra
Zamac virgem	Zamac Z5 bruto, sem adição de sucata
VT	Volante de torneira
CT	Cruzeta de torneira
VTSE	Volante de torneira sem eletrodeposição de cromo
VTCE	Volante de torneira com eletrodeposição de cromo
CTSE	Cruzeta para torneira sem eletrodeposição de cromo
CTCE	Cruzeta para torneira com eletrodeposição de cromo

No processo de eletrodeposição, as peças foram submetidas aos banhos galvânicos de cobre alcalino, cobre ácido, níquel e cromo, respeitando o desengraxe, ativações e lavagens necessárias entre os processos. Nos processos galvânicos, as peças são colocadas em gancheiras (peça construída de metal condutor utilizado como suporte para suspender as peças no banho galvânico) e eletrodepositadas simultaneamente. Salienta-se que parâmetros de processo tais como distância entre a peça e o anodo, composição química do eletrólito e densidade de corrente elétrica podem influenciar no processo de eletrodeposição, fazendo com que o revestimento não seja depositado de maneira homogênea em todas as peças da gancheira [11, 12]. Parâmetros como distância entre a peça e o anodo, composição química do eletrólito e densidade de corrente elétrica podem influenciar no processo de eletrodeposição. Visando minimizar o efeito destas variáveis, as peças foram alocadas na gancheira, nas posições de maior densidade de corrente (posições 1, 2, 4 e 5 na Figura 1) e de menor densidade de corrente (posição 3 na Figura 1).

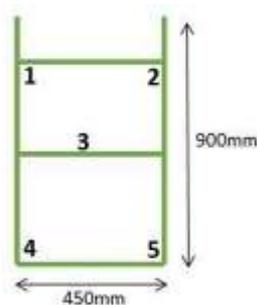


Figura 1: Representação esquemática da gancheira com posição em que as peças VT e CT foram colocadas para posterior eletrodeposição.

As peças foram pesadas antes e após o processo de eletrodeposição para medida da quantidade de metal eletrodepositado em cada peça, respeitando as suas posições na gancheira. As medidas foram realizadas em balança semianalítica com incerteza de $\pm 0,001\text{g}$. Depois do processo de eletrodeposição, as peças foram fundidas por gravidade para análise térmica, de composição química e de microestrutura.

2.2 Fundição por gravidade

Na fundição por gravidade, 20 peças VTCE, 21 peças de VTSE, 8 peças de CTCE e 8 peças de CTSE foram utilizadas. As peças dos dois modelos, VT e CT, foram pesadas antes do processo e fundidas separadamente.

Essas peças foram colocadas em cadinho de grafite, em forno elétrico marca Sanchis para fusão controlada. Como parâmetro de comparação um lingote de Zamac virgem também foi fundido. A escória sobrenadante na fusão foi removida manualmente, separada e pesada; o metal líquido foi vazado em moldes de areia de fundição de 50 cm³, equipados com sensor de temperatura tipo K (Figura 2) para obtenção das curvas de análise térmica. Os dados de temperatura foram coletados por meio de sensor e transmitidos a um computador, utilizando o software Novus FieldChart 1.80.

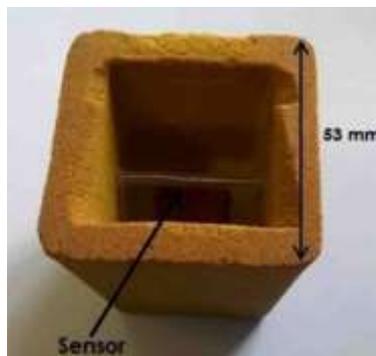


Figura 2: Molde de areia para fundição com sensor de temperatura.

2.3 Composição química

Para realização das análises de composição química, uma amostra fundida com cada tipo de material foi analisada (Tabela 1). Estas amostras foram submetidas à análise de espectroscopia de emissão óptica com uso de equipamento Stationary Metal Analyser - Spectromaxx Benchtop Unit. Para comparação foi utilizado Zamac Z5 virgem, cuja composição química está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do Zamac Z5 em % (p/p) [12].

Elementos	Concentração percentual	
	Mínimo	Máximo
Al	3,9	4,3
Mg	0,03	0,06
Cu	0,7	1,1
Fe	-	0,035
Pb	-	0,004
Cd	-	0,003
Sn	-	0,0015
Zn	Restante	

2.4 Obtenção da fivela e do enfeite por fundição sob pressão

As sucatas dos volantes e cruzetas foram fundidas para obtenção de fivelas e enfeites (Figura 3) usados no mercado de calçados e acessórios. A fivela possui características funcionais e o enfeite é usado apenas como adorno, mas possui área superficial lisa maior que a fivela e gravações em baixo relevo.



Figura 3: Fivela e enfeite selecionados para avaliação do comportamento da sucata como matéria-prima.

O processo de injeção sob pressão foi feito em uma injetora com câmara quente marca Lalos, modelo LM-150, com 13 toneladas de pressão de fechamento, em molde de aço carbono temperado e refrigeração forçada a água. O material fundido foi mantido na temperatura entre 430°C a 440°C e a matriz entre 100° a 120°C. Peças dos mesmos modelos (enfeite e fivela) e parâmetros de processo foram produzidas com Zamac Z5 virgem, para comparação.

2.5 Análise da microestrutura

A análise da microestrutura foi realizada nas peças de Zamac virgem, VTCE e CTCE fundidas por gravidade (as mesmas utilizadas para análise da composição química). A mesma análise foi realizada nas amostras fivela e enfeite obtidos pelo processo de fundição sob pressão produzidos com material virgem e com sucata. Para tanto, as amostras foram lixadas mecanicamente com água, com lixas de SiC na seguinte sequência: # 400, 600, 800, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000 e 4000. Depois de lixadas, as amostras foram polidas em politriz rotativa com feltro, pasta de diamante de 0,5 micrômetros e álcool. Em seguida as peças foram atacadas com nital a 5% para revelar a microestrutura. As micrografias das microestruturas das amostras foram obtidas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio modelo JEOL-JSM 6510CV.

2.6 Acabamentos superficiais das Fivelas e dos Enfeites

Os acabamentos superficiais em componentes para calçados e acessórios são utilizados para aumentar resistência à corrosão e proporcionar características decorativas, provendo à peça cor, tonalidade, textura e brilho. Para verificar se o uso de sucata na fabricação de componentes metálicos comprometeria o processo de tratamento superficial, foram aplicados dois tipos distintos de acabamentos superficiais nas fivelas e nos enfeites. Um deles corresponde à eletrodeposição de níquel em banho rotativo como acabamento e com posterior aplicação de verniz incolor a base de resina epóxi. O outro acabamento utilizado foi a pintura à base de resina epóxi aplicada sobre as peças após fosfatização.

2.7 Testes de desempenho das Fivelas e dos Enfeites

Os testes de desempenho foram realizados nas fivelas e enfeites com acabamento superficial, com o objetivo de verificar o atendimento às exigências de qualidade do mercado consumidor. As propriedades mecânicas das fivelas foram avaliadas por meio de ensaios específicos baseados na norma ABNT NBR 15174:2020 [13]. Os ensaios de resistência mecânica não foram realizados nos enfeites, pois são usados apenas como adorno decorativo e não exercem características funcionais.

2.7.1 Ensaios mecânicos – resistência à tração e resistência à compressão

Para os testes de tração e compressão, foi utilizado o procedimento de ensaio descrito na norma NBR 15174 [14]. No ensaio de resistência à tração é avaliada a resistência do eixo central de fivelas, pois está mais sujeito à esforço durante o processo de montagem no calçado e principalmente durante o uso pelo consumidor final. Os defeitos podem gerar problemas não apenas estéticos, mas de ordem funcional para a peça, o que pode representar riscos durante seu uso. No ensaio de resistência à compressão também é avaliada a resistência no eixo central da peça, pois está exposto a forças de compressão principalmente nas prensas pneumáticas de colagem de sola e conformação da parte traseira do calçado.

Conforme a NBR 15174 [14], a resistência mínima tanto à tração quanto à compressão é de 250 N para qualquer tipo de calçado. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios. Para cada tipo de ensaio, tração e compressão, foram analisadas 12 amostras com eletrodeposição de níquel: 6 produzidas de matéria-prima virgem e 6 produzidas com uso de sucata.

2.7.2 Ensaio de resistência a corrosão por névoa salina acética

Para a avaliação da resistência à corrosão, as peças foram submetidas a ensaio de resistência à corrosão por névoa salina acética. Neste ensaio é produzida uma atmosfera úmida controlada com cloreto de sódio e ácido acético, em que as amostras são expostas. O ensaio foi realizado em uma câmara marca Equilam, com volume interno de 600 litros. Como solução geradora da névoa, foi utilizada uma solução de NaCl 5%, cujo pH foi ajustado potenciométricamente em 3,1 com solução de ácido acético 1 mol.L⁻¹. A pressão do ar comprimido utilizado na geração da névoa foi regulado em 170 kPa e a temperatura da câmara foi mantida em 35°C.

As peças foram identificadas e suspensas no interior da câmara do equipamento, separadas pelo tipo de material (virgem e sucata) e tipo de peça (fivela e enfeite). O ensaio de resistência à corrosão foi feito em 24 amostras, das quais 12 produzidas com uso de sucata (6 fivelas e 6 enfeites) e 12 produzidas com material virgem (6 fivelas e 6 enfeites). Todas as amostras foram revestidas com níquel com verniz à base de resina epóxi. Ao final de 72 horas de ensaio, as amostras foram retiradas da câmara, lavadas com água corrente e

água deionizada (sem esfregar) e secas com soprador de ar frio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição química

O acompanhamento das amostras VT e CT durante o processo de eletrodeposição permitiu determinar a massa em gramas de cobre, níquel e cromo depositados nas peças. O gráfico comparativo das massas das amostras antes e depois dos processos de eletrodeposição é apresentado na Figura 4.

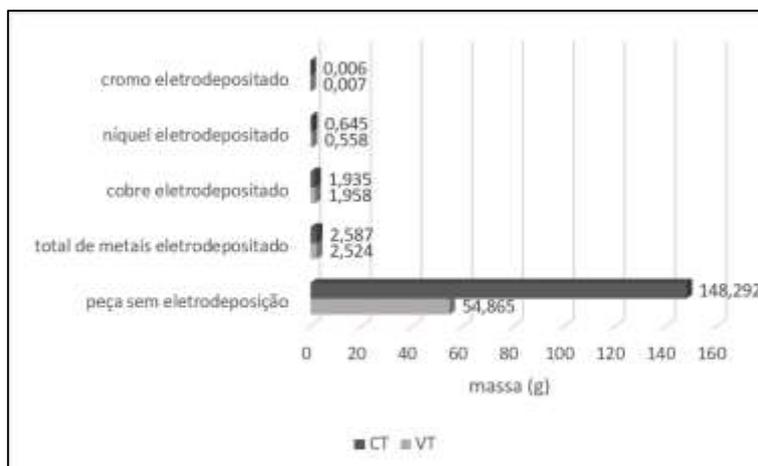


Figura 4: Gráfico comparativo das massas dos metais eletrodepositados nas amostras VT e CV.

A Figura 4 mostra que a massa total dos metais eletrodepositados nas duas amostras é bastante semelhante, o que pode estar associado à geometria de cada peça. Enquanto VT apresenta uma superfície plana, CT tem extremidades que configuram áreas de concentração de corrente elétrica. Estes pontos podem facilitar a eletrodeposição e, conseqüentemente, favorecer o maior acúmulo de metal eletrodepositado nestas regiões [14]. A relação entre a massa dos metais eletrodepositados e a massa de matéria-prima mostra que VT apresenta cerca de 5% em massa de metais eletrodepositados, enquanto a amostra CT apresenta 1,7%. A Tabela 3 apresenta a composição química do zamac virgem e das amostras VT e CT sem e com eletrodeposição [13].

Tabela 3: Composição química do zamac virgem e das amostras VT e CT sem e com eletrodeposição.

Amostra	Componentes (concentração percentual)					
	Zn	Al	Mg	Cu	Ni	Cr
Especificações ASTM B240-07 [13]	restante	3,9 - 4,3	0,03 - 0,06	0,75 - 1,25	<0,020	<0,020
Zamac virgem	95,000	3,790	0,040	1,120	0,015	0,001
VTSE	95,250	3,570	0,037	1,030	0,002	0,002
VTCE	92,100	3,480	0,036	3,600	0,060	0,009
CTSE	95,200	3,480	0,038	1,110	0,013	0,001
CTCE	93,800	3,450	0,039	2,280	0,038	0,003

A amostra de Zamac virgem usada como controle apresentou composição conforme especificação [13]. Já as amostras VTSE e CTSE apresentaram redução em seus componentes de liga (alumínio, magnésio e cobre), o que pode estar associado à oxidação durante o processo de fundição. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos com processos de fundição por gravidade [15].

A adição de metais à liga original pelo processo de eletrodeposição ocasionou aumento no percentual de cobre, níquel e cromo na composição química de VTCE e CTCE. A amostra VTCE apresentou incremento percentual maior de cobre, níquel e cromo em comparação à amostra CTCE e isto, possivelmente, devido a relação área superficial/massa da peça. O aumento do percentual de cobre na liga tende a aumentar a dureza,

que está associada a formação de compostos bimetálicos interdendríticos na sua microestrutura [16]. Porém o magnésio, metal que facilmente forma óxidos voláteis e que costumeiramente tende a se depositar na escória [17, 18], manteve concentração percentual praticamente constante em todas as amostras. Esta observação pode estar associada ao tempo de fusão utilizado, que sugere não ser suficiente para que o processo de oxidação do elemento evolua com perda de massa [20]. A Tabela 4 mostra os resultados de incorporação de elementos à liga com a utilização de sucata. A Figura 5 permite a comparação da quantidade dos elementos de liga que incorporam-se à liga e que migraram para a escória durante a fundição de sucata, percentualmente. Os percentuais foram calculados por meio da relação entre a massa incorporada à liga e a massa que foi previamente eletrodepositada na amostra. Neste caso, considerou-se que a quantidade eletrodepositada de cada metal avaliado que não incorporou à liga migrou para a escória.

Tabela 4: Incorporação de elementos à liga original na fundição de sucata (massa em gramas).

Peça	Elemento	Massa na amostra sem eletrodeposição	Massa eletrodepositada na amostra	Massa total presente após fundição por gravidade	Massa incorporada à liga (vindo da eletrodeposição)
VT	Cu	0,565	1,958	2,066	1,501
	Ni	0,001	0,558	0,034	0,033
	Cr	0,001	0,007	0,005	0,004
CT	Cu	1,646	1,935	3,44	1,794
	Ni	0,019	0,645	0,057	0,038
	Cr	0,001	0,006	0,005	0,004

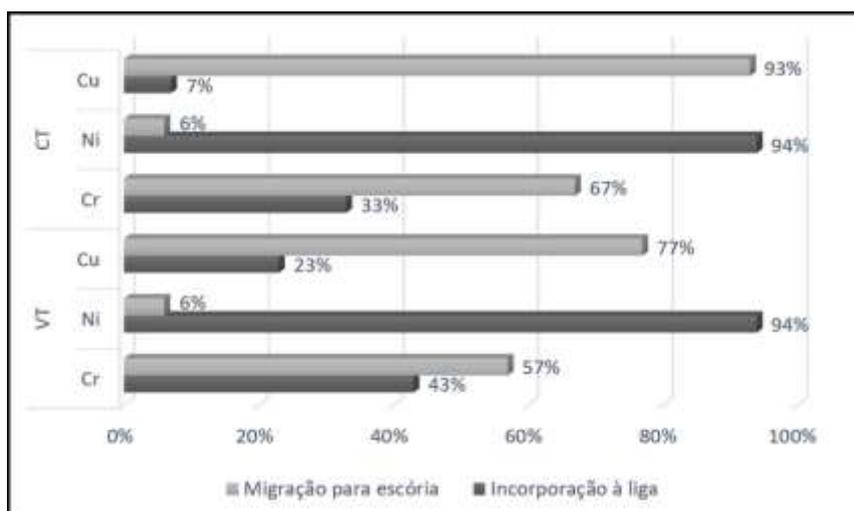


Figura 5: Comparação entre a Incorporação de elementos a liga fundida por gravidade e a migração destes para a escória com o uso de sucata como matéria-prima.

Enquanto uma grande parte do cobre eletrodepositado foi incorporado à liga, o níquel e o cromo migraram preferencialmente para a escória (Figura 5). Este fato pode estar associado ao grau de solubilidade dos metais na composição da liga. O cobre tem uma solubilidade maior dentro do reticulado cristalino do zinco [19, 20], na ordem de cerca de 1% [20], em relação ao cromo e níquel; o cobre também apresenta tendência à formação de precipitados metálicos interdendríticos [22] maior do que o níquel e o cromo, podendo alojar-se nestes espaços. O níquel, por sua vez, tende a formar compostos metálicos ternários, dentro da matriz eutética, mas com pequena participação (numa fração molar de cerca de 0,12) [21]. Já o cromo tem uma solubilidade menor do que os demais metais em análise, tendendo a formar composto intermetálico Cr/Zn [22, 23], numa proporção atômica de 1:17 respectivamente. Além disso, o cromo parece ter maior afinidade pelo oxigênio do que por outros metais da liga, o que justifica sua migração preferencial para escória [24]. Com o aumento do cobre incorporado pela fusão da sucata, a liga tende a apresentar menores propriedades de resistência mecânica [25]. Assim, o reprocessamento de sucata com eletrodeposição de cromo parece ser indicado para peças que demandem baixa resistência mecânica. Neste caso, fivelas e enfeites para calçados e acessórios poderiam ser confeccionados com o uso de sucata, uma vez que não possuem função estrutural

significativa.

3.2 Estudo do processo de fundição por gravidade das amostras,

A Tabela 5 mostra os dados utilizados no estudo do processo de fundição e geração de escória.

Tabela 5: Massa de escória gerada na fusão das amostras Zamac virgem, VT e CT sem e com eletrodeposição.

Amostra	Massa total antes da fusão (g)	Massa total de escória retirada (g)	Percentual de escória gerada (massa escória/massa peças)
Zamac virgem	1281,0	14,0	1,1
VTSE	1141,0	91,5	8,0
VTCE	1140,0	176,0	15,4
CTSE	1201,0	136,0	11,3
CTCE	1217,0	181,0	14,9

A Tabela 5 mostra que o material virgem apresentou menor percentual de escória dentre todas as amostras. As amostras VTCE e CTCE apresentaram o percentual de escória maior que o material virgem. Este comportamento era esperado, pois durante na fundição sob pressão (para obtenção das peças) os elementos de liga e impurezas se oxidam, formando escória [18]. Além desta maior quantidade, provavelmente a escória também contém mais metais relacionados aos processos galvânicos.

A Figura 6 mostra o gráfico da análise térmica das amostras durante resfriamento, das amostras zamac virgem, VT e CT sem e com eletrodeposição, na fundição por gravidade.

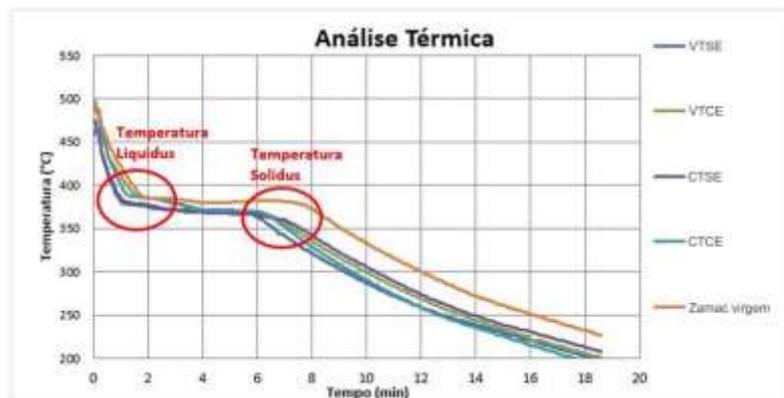


Figura 6: Análise térmica durante o resfriamento, das amostras de Zamac virgem, VT e CT sem e com eletrodeposição, na fundição por gravidade.

Observa-se na Figura 6 que o comportamento de todas as amostras é semelhante. A temperatura da liga, em estado líquido, diminui de cerca de 500°C até aproximadamente 390°C, região na qual ocorre a solidificação. Nesta região de temperatura inicia o processo de solidificação, com formação da fase eutética. A partir de cerca de 7 minutos após o início do resfriamento, a temperatura diminui numa taxa maior, o que indica o final da solidificação [26]. A Tabela 6 exibe os parâmetros numéricos relacionados ao gráfico apresentado na Figura 5.

A análise da Figura 6 e da Tabela 6 evidencia que a amostra de Zamac virgem apresenta taxa de resfriamento menor que as demais amostras. As amostras VTSE e CTSE apresentam taxa de resfriamento maior que a amostra de Zamac virgem, o que provavelmente ocorre devido à oxidação dos elementos de liga durante o processo de fundição sob pressão. Esta oxidação dos componentes foi evidenciada na quantidade de escória gerada na fundição por gravidade, Tabela 5.

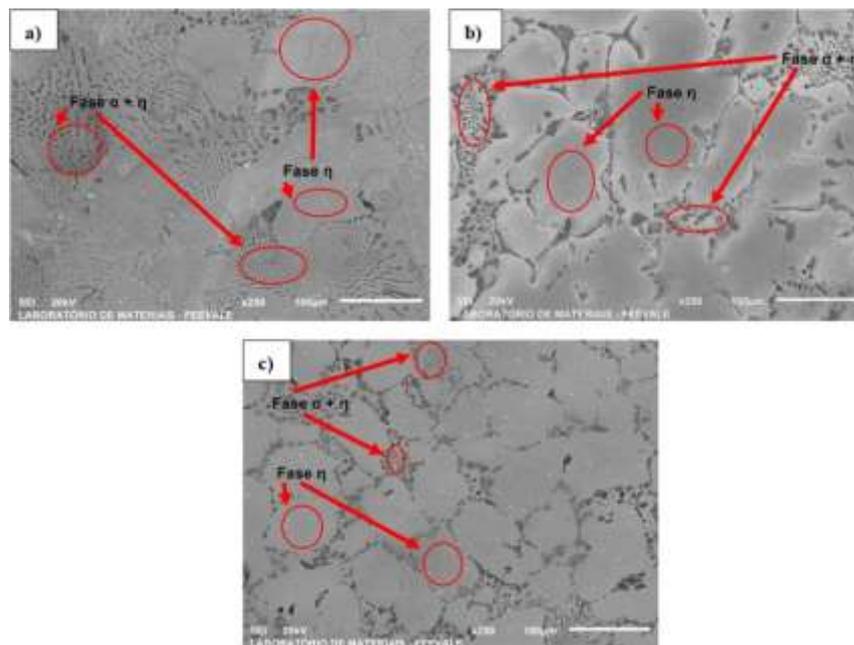
Tabela 6: Avaliação da taxa de resfriamento do processo de solidificação da fundição por gravidade

Amostra	Ponto no gráfico	Temperatura (°C)	Varição de temperatura (°C)	Varição tempo (min)	Taxa de resfriamento (°C/min)
Zamac virgem	<i>Liquidus</i>	390	10	5,63	1,78
	<i>Solidus</i>	380			
VTSE	<i>Liquidus</i>	388	19	4,70	4,04
	<i>Solidus</i>	369			
VTCE	<i>Liquidus</i>	395	27	4,70	5,74
	<i>Solidus</i>	368			
CTSE	<i>Liquidus</i>	384	22	5,80	3,79
	<i>Solidus</i>	362			
CTCE	<i>Liquidus</i>	397	27	4,83	5,59
	<i>Solidus</i>	370			

Observa-se também que as amostras VTCE e CTCE apresentaram durante o intervalo de solidificação taxa de resfriamento cerca de 1,4 vezes maior que as respectivas amostras sem eletrodeposição. Neste sentido, acredita-se que este comportamento esteja relacionado com a adição de contaminantes à liga, principalmente cobre, oriundo do processo de eletrodeposição. A literatura [27, 29] demonstra que adição de cobre na liga causa uma redução de cerca de 2,5% na temperatura de solidificação comparado à liga comercial virgem, o que concorda com os dados obtidos neste trabalho.

3.3 Análise da microestrutura

A Figura 7 mostra a microestrutura das amostras produzidas por meio de fundição por gravidade (controle). Observa-se em todas as amostras a presença da fase eutética $\alpha+\eta$ (lamelar) e a fase primária η (grãos); não se observa, contudo, a presença de novas fases nas amostras de peças VTCE e CTCE. As amostras fundidas com sucata (Figura 7-b e 7-c) apresentaram redução na proporção de estrutura lamelar eutética e, consequentemente, aumento da fase η , evidenciado pelo aumento no tamanho dos grãos. Este fato parece estar associado ao aumento do percentual de cobre na liga [29].


Figura 7: Microestrutura das amostras fundidas por gravidade. Zamac virgem (a), VTCE (b) e CTCE (c).

A Figura 8 apresenta micrografias das peças fivela e enfeite, virgens (a e c respectivamente) e com sucata (b e d, também respectivamente).

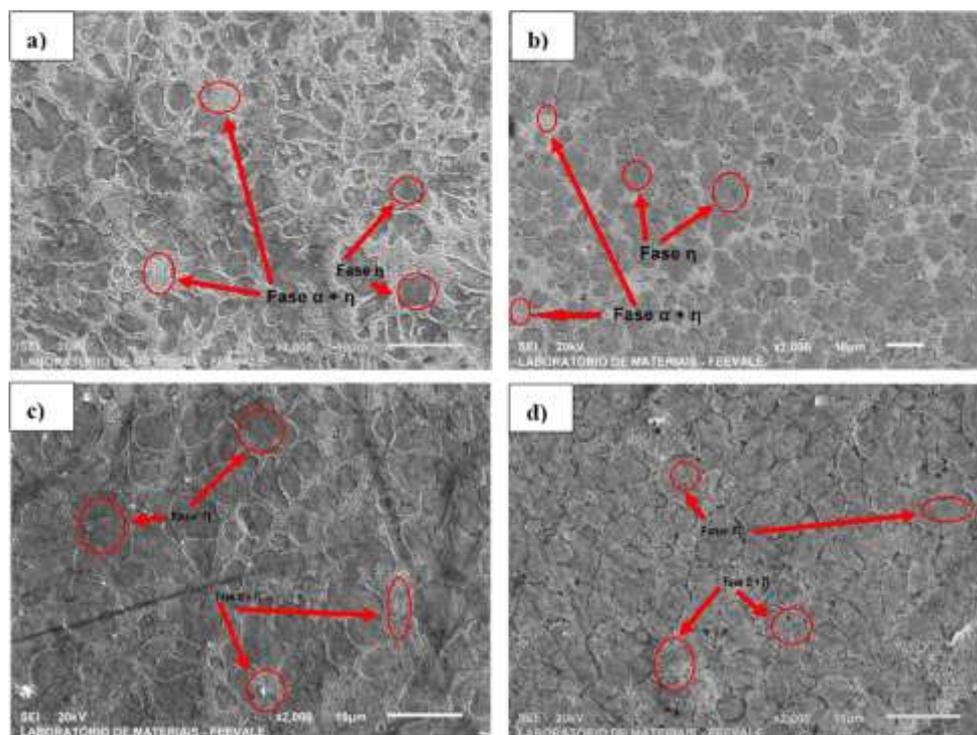


Figura 8: Micrografias das amostras de fivela produzida por fundição sob pressão (a) com material virgem e (b) com sucata (b); e do enfeite produzido por fundição sob pressão (c) com material virgem e (d) com sucata.

De acordo com a Figura 8, observa-se visualmente que as amostras produzidas por fundição sob pressão exibem certo refinamento da microestrutura. Neste sentido a fase η mostrou a formação de grãos menores, (observados visualmente nas micrografias) que os apresentados na fundição por gravidade (Figura 7) [27]. Isto provavelmente se deve à velocidade de resfriamento na fundição sob pressão, promovida por refrigeração da matriz com uso de água a 25°C. Da mesma forma que nas amostras produzidas em fundição por gravidade, as peças produzidas em fundição sob pressão com uso de sucata apresentaram menor quantidade de estruturas eutéticas e maior quantidade de fase primária que as amostras produzidas com material virgem. Esta observação pode estar relacionada ao aumento do teor de cobre na liga proveniente do uso de sucata (Tabela 4) [28].

3.4 Ensaios mecânicos: resistência à tração e resistência à compressão

A Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados dos ensaios mecânicos de tração e compressão realizados nos enfeites para calçado. Os dados estão apresentados conforme a orientação de relatório aplicada pela norma utilizada na obtenção dos resultados [14].

Tabela 7: Resultados dos ensaios de tração realizados nas peças fivela produzidas com material virgem e com sucata.

Com Material virgem			Com sucata		
Amostra	Força (N)	Deformação (mm)	Amostra	Força (N)	Deformação (mm)
1	513	0,99	1	1163	1,98
2	476	1,02	2	842	2,05
3	445	1,03	3	1156	2,1
4	457	0,96	4	1031	1,97
5	450	0,96	5	935	1,97
6	468	0,98	6	971	1,99
Média	468	0,99	Média	1016	2,01
Mínimo	445	0,96	Mínimo	842	1,97
Desvio padrão	25	0,03	Desvio padrão	127	0,05

Tabela 8: Resultados dos ensaios de compressão realizados nas peças fivelas produzidas com material virgem e com sucata.

Com material virgem			Com sucata		
Amostra	Força (N)	Deformação (mm)	Amostra	Força (N)	Deformação (mm)
1	512	1,55	1	530	1,9
2	485	1,52	2	517	1,85
3	497	1,53	3	518	1,83
4	507	1,52	4	523	1,84
5	507	1,56	5	525	1,80
6	500	1,52	6	519	1,88
Média	501	1,53	Média	522	1,85
Mínimo	485	1,52	Mínimo	517	1,80
Desvio padrão	10	0,02	Desvio padrão	5	0,04

Os ensaios de tração evidenciam que todas as amostras atendem à exigência mínima de resistência à tração para componentes para calçado, que é de 250 N [14]. A deformação média até a ruptura das amostras fundidas com uso de sucata (2,01 mm) foi cerca de duas vezes maior que a de material virgem (0,99 mm). Tal fato pode estar associado tanto ao aumento do teor de cobre na liga (Tabela 4), já que este é um metal maleável [29], quanto à mudança na sua microestrutura (Figura 8-b), conforme também apontam estudos anteriores [30, 31].

No ensaio de compressão, por sua vez, as amostras atenderam a exigência mínima de resistência à compressão para componentes para calçado, que é de 250 N [14]. Todas as amostras apresentaram desempenho semelhante em resistência à compressão, mostrando que a microestrutura e a composição química da liga parecem não influenciar esta propriedade.

3.6 Ensaio de resistência à corrosão em névoa salina acética da fivela e enfeite

As Figuras 9 e 10 mostram fotografias das amostras após a realização do ensaio de corrosão.



Figura 9: Fotografias da frente das amostras fivela e enfeite após ensaio de corrosão.

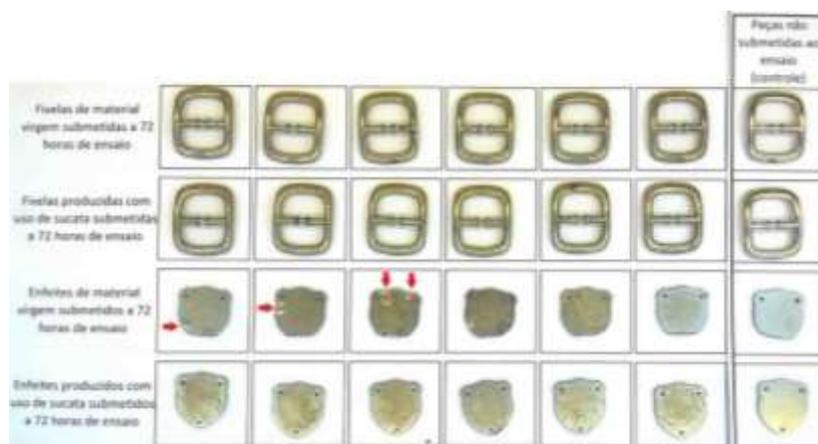


Figura 10: Fotografias do verso das amostras fivela e enfeite após ensaio de corrosão.

As Figuras 9 e 10 mostram o escurecimento das amostras, o que indica que o revestimento de níquel pode ter sido afetado pelos componentes do eletrólito utilizado [32, 33]. Contudo, não houve formação de pontos de corrosão branca, o que indicaria corrosão do Zamac [34, 35]. Assim, os resultados indicam que a interação entre o revestimento e o substrato apresentam boa aderência, salvo a formação de bolhas no revestimento em alguns pontos das amostras de enfeite, como indicado pelas setas na Figura 9.

4. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios e testes para validação do uso de sucata com eletrodeposição de cromo como matéria-prima para fabricação de fivelas e enfeites para calçados e acessórios por meio de fundição sob pressão permitem chegar às seguintes conclusões:

- a análise térmica mostra que as amostras VTSE e CTSE apresentam taxa de resfriamento maior que a amostra de material virgem, o que ocasiona uma alteração de microestrutura com diminuição da presença da fase eutética;

- as análises da composição química das amostras VT e CT demonstram que as peças, mesmo sem eletrodeposição, apresentam perda nos elementos de liga por oxidação durante os processos de fundição. A amostra VT, que possui maior relação área/volume em comparação com a amostra CT, apresentou maior percentual de contaminantes e cobre após o processo de eletrodeposição;

- as análises morfológicas mostram que nas amostras produzidas com uso de sucata ocorreu aumento da quantidade da fase primária na microestrutura, bem como a diminuição da estrutura eutética, que está associada ao aumento da quantidade de cobre na liga;

- os testes de desempenho mecânico e resistência à corrosão demonstraram resultados positivos para as fivelas e enfeites para calçado produzidos com uso de sucata.

Portanto, conclui-se que, mesmo com as alterações de composição química e microestruturais evidenciadas, é tecnicamente viável a utilização direta de sucata com eletrodeposição de cromo como matéria-prima na fundição sob pressão de fivelas e enfeites para calçados e acessórios.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES, entidade do governo brasileiro focada na formação de recursos humanos. Os autores também agradecem ao apoio financeiro de agências brasileiras: CNPq, FAPERGS e Instituto Nacional de Engenharia de Superfície - INCT.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICO, G.A., COSTA, C.A., “Planejamento e controle da produção em um ambiente de produção sob encomenda”. In: *Scientia Cum Industria*, v. 7, n. 2, pp. 68-75, 2019.
- [2] CLIFTON-CUNNINGHAM, A., GWILT, A., “Fragments: methodologies of making fashion”. In: *Fragments: methodologies of making fashion*, 2008.
- [3] GEIGER, M.A.H., SCHEFFEL, L.F., CARONE, C.L.P., *et al.*, “Avaliação de revestimento de cromo por sputtering como alternativa à galvanização”. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, pp. 1-16, 2020.

- [4] GOBIEN, J.M., SCATTERGOOD, R.O., GOODWIN, F.E. *et al.*, “Mechanical behavior of bulk ultra-fine-grained Zn–Al die-casting alloys”. *Materials Science and Engineering: A*, v. 518, n. 1-2, pp. 84-88, 2009.
- [5] PAGE, M.A.M., HARTMANN, S., “Experimental characterization, material modeling, identification and finite element simulation of the thermo-mechanical behavior of a zinc die-casting alloy”. *International Journal of Plasticity*, v. 101, pp. 74-105, 2018.
- [6] ARNOLD, S., KUNST, S.R., FUHR, L.T., OLIVEIRA, C.T. “Resistência a corrosão em diferentes tratamentos de superfície sobre ligas de zinco utilizados em metais sanitários”. *Revista Tecnologia e Tendências*, v. 10, n. 2, pp. 185-209, 2019.
- [7] REVEKO, V., MOLLER, P., “Special Aspects of Electrodeposition on Zinc Die Castings”. *Nasf Surface Technology White*, v. 82, n. 8, pp. 1-9, 2018.
- [8] PURCEK, G., KARAMAN, I., YAPICI, G.G. *et al.*, “Enhancement in mechanical behavior and wear resistance of severe plastically deformed two-phase Zn–Al alloys”. *International journal of materials research*, v. 98, n. 4, pp. 332-338, 2007.
- [9] WENFEI, M.O., WU, G., ZHANG, Y. *et al.*, “Effects of processing parameters on microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Mg–12Zn–4Al–0.5 Ca alloy”. *Materials & Design*, v. 63, pp. 729-737, 2014.
- [10] ANTREKOWITSCH, J. “Zinc and residue recycling”. In: *Handbook of Recycling*. Elsevier, 2014. pp. 113-124.
- [11] KANANI, N. “Electroplating: basic principles, processes and practice”. In: *Elsevier*, 2004.
- [12] ASTM INTERNATIONAL. “ASTM B240: Standard Specification for Zinc and Zinc-Aluminum (ZA) Alloys in Ingot Form for Foundry and Die Castings”. In: *West Conshohocken: ASTM*, 2007, 4 p.
- [13] 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”. In: *Rio de Janeiro: ABNT*, 2020, 9 p.
- [14] HUANG, Yanjun; OHTA, Makoto; PEDERSON, Tara; MILLIGAN, Orit (Baron). Effects of As-Cast Surface Conditions and Local Geometry on Plating Deposition. *Sae Technical Paper Series*, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-9, 14 nov. 2018. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/2018-01-5045>.
- [15] RICK, C.F., *et al.*, “Estudo da liga à base de Zn-Al-Cu-Mg aplicada na fabricação de jóias folhadas. 2006.
- [16] COSTA, E.M., COSTA, C.E., VECCHIA, F.D., *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*, v. 488, n. 1, pp. 89-99, 2009.
- [17] CZERWINSKI, F., “The reactive element effect on high-temperature oxidation of magnesium”. *International Materials Reviews*, v. 60, n. 5, pp. 264-296, 2015.
- [18] 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.
- [19] MYKURA, N.; MURPHY, S.; ZHU, Y.H., “Volume Change in Ternary Zn-Al-Cu Alloy”. *Mrs Proceedings*, v. 21, pp. 1-10, 1983.
- [20] GUO, W.T., LIANG, C.L., LIN, K.L., “The effects of Cu alloying on the microstructure and mechanical properties of Zn-25Sn-xCu (x = 0–1.0 wt%) high temperature Pb-free solders”. *Materials Science And Engineering: A*, v. 750, pp. 117-124, 2019.
- [21] GANDOVA, V.D., BROZ, P., BURLÍK, J., *et al.*, “Thermochemical and phase diagram studies of the Sn–Zn–Ni system”. *Thermochimica Acta*, v. 524, n. 1-2, pp. 47-55, 2011.
- [22] SU, X., LIU, Y., LIU, D.Y.H., *et al.*, “Experimental investigation and thermodynamic assessment of the Zn–Cr system”. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 496, n. 1-2, pp. 159-163, 2010.
- [23] TANG, N.Y., YU, X.B. *et al.* “Study of the zinc-rich corner of the Zn-Fe-Cr system at galvanizing temperatures”. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, v. 26, n. 1, pp. 50-54, 2005.
- [24] RYAN, M.P., WILLIAMS, D.E., CHATER, R.J. *et al.*, “Why stainless steel corrodes”. *Nature*, v. 415, n. 6873, pp. 770-774, 2002.
- [25] MORENO, Cristian Daniel Bohorquez; VELÁSQUEZ, Sandra Patricia Pérez; SANTOS, Armando Sarmiento; OLIVEROS, Martin Emilio Mendoza. Efecto del contenido de titanio en la porosidad y dureza de un compuesto Cu-Ti-TiC sinterizado por descarga luminiscente anormal. *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 1-12, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1026>.
- [26] MARCOLIN, P., ZINI, L. P., KUNST, S. R., *et al.*, “Effects of the Casting Temperature in the Leakage of Zamak 5”. *Materials Science Forum*, v. 899, pp. 458-462, 2017.
- [27] FUHR, L.T., BIANCHIN, A.C.V., VECCHIA, F.D., *et al.*, “Influência dos defeitos de solidificação na resistência à corrosão do Zamak 5 obtido por injeção sob pressão. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, e-

12630, 2020.

[28] 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.

[29] SHEN, Y.F.; LU, L.; LU, Q.H.; JIN, Z.H.; LU, K.. Tensile properties of copper with nano-scale twins. *Scripta Materialia*, [S.L.], v. 52, n. 10, p. 989-994, maio 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.01.033>.

[30] 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, p. 259-270, 2003.

[31] SAVAŞKAN, T., PÜRÇEK, G., HEKIMOĞLU, A.P., “Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys”. *Tribology Letters*, v. 15, n. 3, p. 257-263, 2003.

[32] FLINT, G.N., “The Effect of Deformation on the Corrosion Resistance of Nickel + Chromium Coatings: a metallographic study”. *Transactions of The Imf*, v. 40, n. 1, pp. 98-103, 1963.

[33] MEDELIENE, V., GLADKOVAS, M., MATULIONIS, E., “Corrosion of Nickel Electroplates in Neutral and Acidic Salt-Spray-Fog”. *Protection of Metals*, v. 37, n. 4, p. 331-336, 2001.

[34] TOMACHUK, C.R., BALLESTER, M., FREIRE, C.M.A. *et al.*, “Características morfológicas, estruturais e de resistência à corrosão da liga ZnCo obtida por corrente pulsada”. *Revista Matéria*, v. 7, n. 1, p. 20, 2002.

[35] SANTOS, F.R., PANOSSIAN, Z. “Estudo comparativo da conformabilidade e da resistência à corrosão de eletrodepósitos de zinco obtidos em banho de cloreto com aditivos e em banho de sulfato/cloreto sem aditivos. Parte 2: resistência à corrosão dos revestimentos”. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, v. 15, n. 2, p. 137-143, 2018.

ORCID

Joni Moisés Ermel

<https://orcid.org/0000-0002-5313-1771>

Sandra Raquel Kunst

<https://orcid.org/0000-0002-8060-3981>

Augusto de Freitas Kelsch

<https://orcid.org/0000-0002-5338-3792>

Luciane Taís Fuhr

<https://orcid.org/0000-0001-8053-3613>

Fernando Dal Pont Morisso

<https://orcid.org/0000-0002-9653-9857>

Guilherme José Schneider

<https://orcid.org/0000-0001-9910-3111>

Cláudia Trindade Oliveira

<https://orcid.org/0000-0002-4472-5359>

Alexandre da Silva Rocha

<https://orcid.org/0000-0002-4086-5389>