



DESENVOLVIMENTO DE APARATO PARA REOFUNDIÇÃO DE LIGAS DE MAGNÉSIO

Richard S. Martins^{1*}, Igor Zimpel¹, Vinicius K. Barcellos¹

1 - Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, CEP 91501970 - Porto Alegre, RS.

richard.martins@ufrgs.br

RESUMO

Magnésio, com seu peso específico de 1,74 g/cm³, é o material estrutural mais leve. Com base nessa propriedade e em suas boas características mecânicas, as ligas de magnésio estão crescendo em importância nas aplicações em componentes de peso crítico. Setores industriais como automotivo, aeroespacial, de bens de consumo (smartphones, computadores portáteis, entre outros) são nichos de destaque na aplicação dessas ligas. Além disso, a tecnologia de processamento semissólido dos metais vem sendo aplicada nessas ligas em busca de contribuir com melhoria em suas propriedades mecânicas. Uma das técnicas de reofundição, comprovadamente benéfica, é a Rheocasting Semi-Solid (SSR). Nela a liga metálica é aquecida acima da temperatura liquidus e resfriado com auxílio de uma haste de agitação até a região entre a temperatura liquidus e a temperatura solidus para, em seguida, ser solidificada em molde metálico. Por outro lado, como ponto desafiador ao processamento, o magnésio é um material muito reativo em estado líquido, estando sujeito a oxidação e eventualmente à combustão. O objetivo dessa investida constitui-se em projetar um equipamento em escala laboratorial para processamento de ligas de magnésio por reofundição. A metodologia de desenvolvimento de produtos foi aplicada como alicerce ao trabalho. Assim, um olhar sobre o contexto de aplicação do equipamento, as possibilidades de configuração e a decisão baseada em critérios são o escopo da concepção. Inicialmente foi observado aspectos técnicos-operacionais da técnica SSR bem como as características do metal a ser processado com aplicação da ferramenta de requisitos do equipamento; em seguida, a identificação dos principais desafios foi realizado; após, a busca por modelar soluções foi explorada com a seleção da alternativa de solução adequada; o auxílio de softwares de CAD e de simulação foi utilizado como ferramenta de apoio a etapa; A alternativa de integração das etapas de processamento foi adotada como solução. Por fim, a materialização da solução com avaliação dos resultados alcançados por meio de confecção física do equipamento foi atingida de modo a caracterizar a validação da solução. As atividades de projeto mecânico e metalúrgico foram efetuadas com base nos softwares SolidWorks® e Inspire Cast®. Já as atividades de projeto elétrico ocorreram com aplicação dos softwares CADE SIMU® e SolidWorks electrical®. Os resultados dos testes práticos com o equipamento demonstraram que a solução elaborada atendeu aos parâmetros de processamento de ligas de magnésio por reofundição, evitando sua oxidação/combustão e atingindo a moldagem de peças. Portanto, conclui-se afirmando que o desenvolvimento aplicado gerou solução satisfatória, pois aplicou concepção de integração das etapas do processo baseado na utilização do gás de proteção para a realização do movimento do metal para a etapa de moldagem e otimização por meio da implementação de semiautomação no equipamento.

Palavras-chave: *Refundição, liga de magnésio, processamento semissólido, projeto de equipamento, projeto de produto.*

INTRODUÇÃO

O magnésio possui símbolo Mg, é um metal alcalino-terroso com número atômico 12. Possui estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). O elemento livre (metal) não é encontrado naturalmente na Terra, pois é altamente reativo. Possui densidade de 1,738 g/cm³, ponto de fusão em 650°C e ponto de ebulição em 1091°C. O magnésio é considerado o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre e é considerado o material estrutural mais leve. As ligas baseadas em magnésio têm chamado a atenção e nos últimos tempos sua aplicação vem sendo ampliada, principalmente em aplicações de peso crítico⁽¹⁾.

Todavia, as ligas de magnésio com excelentes propriedades ainda são raras e a tecnologia de processamento dessas ligas ainda necessita desenvolvimento⁽²⁾. Os desafios no processamento do magnésio passam pelas características microestruturais, nesse quesito essencialmente pela estrutura cristalina hexagonal compacta, e pela característica de reatividade em estado líquido, estando sujeito a oxidação e eventualmente à combustão.

A reofundição, fundição de metal semissólido, é uma alternativa aos processos de fabricação convencionais quando se pretende otimizar o processamento em termos energético e de eficiência. Nela a tecnologia de processamento semissólido (SSM) é aplicada. O objetivo da tecnologia de SSM é desenvolver uma microestrutura uniforme e refinada, com alto fator de forma e propriedades mecânicas aprimoradas, visando o aumento da tenacidade e da ductilidade⁽³⁾.

A técnica *Semi-Solid Rheocasting* (SSR) é aplicada na reofundição em estudo. Essa técnica combina agitação vigorosa por poucos segundos com rápida extração de calor em um banho metálico a temperatura levemente superior à Temperatura *liquidus*⁽⁴⁾. Dessa forma, o potencial da aplicação de SSR em liga de magnésio é grande quando se pretende produzir material leve com a melhoria nas propriedades mecânicas das peças produzidas, pois a intervenção é rápida e com pouco empreendimento de tempo e energia no processamento.

Tendo em mente os desafios do processamento das ligas de magnésio o objetivo dessa investida se constitui em projetar um equipamento em escala laboratorial para o processamento de liga de magnésio pela técnica SSR.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do projeto do equipamento atenta para as características da metodologia de projeto apresentada por Pahl *et al*⁽⁵⁾. Assim, um olhar sobre o contexto de aplicação do equipamento, as possibilidades de configuração e a decisão baseada em critérios são o escopo da concepção.

Inicialmente se estabeleceu as características e funcionalidades necessárias a solução com aplicação da ferramenta de requisitos do equipamento; em seguida a identificação dos principais problemas foi realizado com modelamento de estrutura de funções; após, a busca por modelar soluções foi explorada com a seleção da alternativa de solução adequada. O auxílio de softwares de CAD e de simulação foi utilizado como ferramenta de apoio a etapa; por fim, a

materialização da solução com avaliação e resultados alcançados. Sinteticamente pode-se tratar o processo de cada etapa partindo de informações de entrada para se estabelecer um conceito e em seguida gerar requisitos de projeto até a atingir a solução. A calibração dos instrumentos ocorreu por meio de testes experimentais. A figura 1 apresenta as etapas de desenvolvimento.

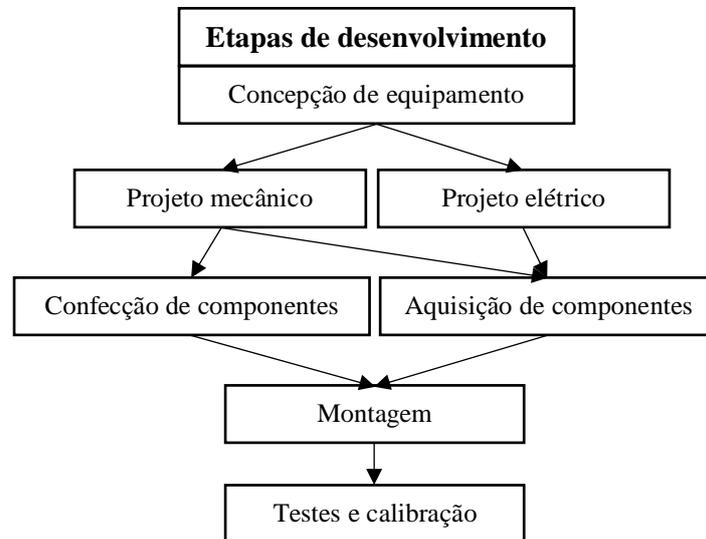


Figura 1: Etapas de desenvolvimento aplicadas ao desenvolvimento de aparato para Reofundição de liga de magnésio.

As atividades de projeto mecânico foram efetuadas com base nos softwares SolidWorks® e Inspire Cast®. Já as atividades de projeto elétricos ocorreram com aplicação dos softwares CADe SIMU® e SolidWorks electrical®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando-se as características do processamento SSR e também do metal base para o processamento, essencialmente a condição de ignição pela reação com o oxigênio do ar, uma solução integrada e com movimentação do metal em processamento do forno para a coquilha por meio de injeção de gás pressurizado na câmara de fusão foi idealizada.

A lista de requisitos foi gerada considerando o objetivo e as funcionalidades do equipamento. A partir da lista de requisitos os principais desafios são percebidos e a busca por solução modelada com auxílio do software. A lista de requisitos é ilustrada na tabela 1.

Tabela 1: Lista de Requisitos para o aparato de processamento para Reofundição de liga de magnésio.

Critério	Descrição
Funcionamento	Processar liga de magnésio semissólido em quantidade suficiente para produzir peças com características metalúrgicas e mecânicas avaliáveis por testes e ensaios.
Segurança	Proteger banho da ação do oxigênio presente na atmosfera.
Confiabilidade	Possuir possibilidade de controlar, modificar e coletar informações de processo (temperaturas do banho, do forno e da coquilha, rotação de agitação, tempo de processo, viscosidade do material).
Operação/ Ergonomia	Operação simples; Eficiência energética; Integração das etapas de processamento.

Fabricação/ Material	Utilização de fonte de energia simples e estrutura em materiais comuns/tradicionais.
Geometria/ Manutenção	Compacta; fácil aquisição de peças para reposição.

Com base na lista de requisitos, o modelamento de estrutura de funções foi efetuado e as atividades de projeto do equipamento concentraram-se no desenvolvimento para a integração das etapas de processamento. Foi elaborado uma concepção de estrutura contendo: estrutura de integração, sistema de agitação, forno e coquilha.

Se estabeleceu como meta quatro corpos de prova para ensaio de tração, conforme norma ASTM B557-15, para produção pelo sistema. Em função disso, a coquilha foi projetada e atingiu volume de 64,09 cm³. Simulações do comportamento de preenchimento da mesma pelo metal bem como da solidificação foram estudadas observando os parâmetros: temperatura do metal, temperatura da coquilha, pressões de processo, posições da coquilha e do canal de alimentação. O preenchimento completo da coquilha foi atingido considerando uma inclinação de 45° e temperatura na faixa de 300°C para a mesma.

Após, partindo das características da coquilha o sistema de fusão foi projetado em dependência do volume de metal necessário ao processo; assim como as características do agitador observando sua geometria e troca térmica para geração da pasta semissólida. As dimensões adotadas para o cadinho são 60 x 100 mm (diâmetro x altura), sendo que a coluna de metal foi estabelecida em 60 mm, conseqüentemente, um volume aproximado de 157 cm³ de pasta semissólida. Isso para manter o nível mínimo de pasta semissólida no fundo do cadinho de modo a prevenir o acesso do gás diretamente ao tubo de condução.

Um agitador em grafite foi utilizado com diâmetro de 15mm. As equações (A) e (B) foram aplicadas para determinação a quantidade de calor a ser removido e a troca térmica entre a haste de agitação e o metal em processamento. Na equação (A) se percebe a energia térmica (quantidade de calor) envolvida no processo, e na equação (B) a energia removida em função do tempo.

$$\Delta H = m \cdot \Delta f_s H_f + m \int_{T_i}^{T_f} C_p dT \quad (\text{A})$$

$$q = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{B})$$

Em função da troca térmica se estabeleceu o tempo de agitação de aproximadamente 38 segundos para geração de 0,2 de fração sólida, considerando-se os parâmetros termodinâmicos de uma liga MRI230 (Mg-Al-Ca-Sr-Sn). A partir disso, a construção do equipamento foi realizada. Na figura 2 são apresentadas a concepção na imagem (a) e a estrutura do aparato confeccionada na imagem (b).

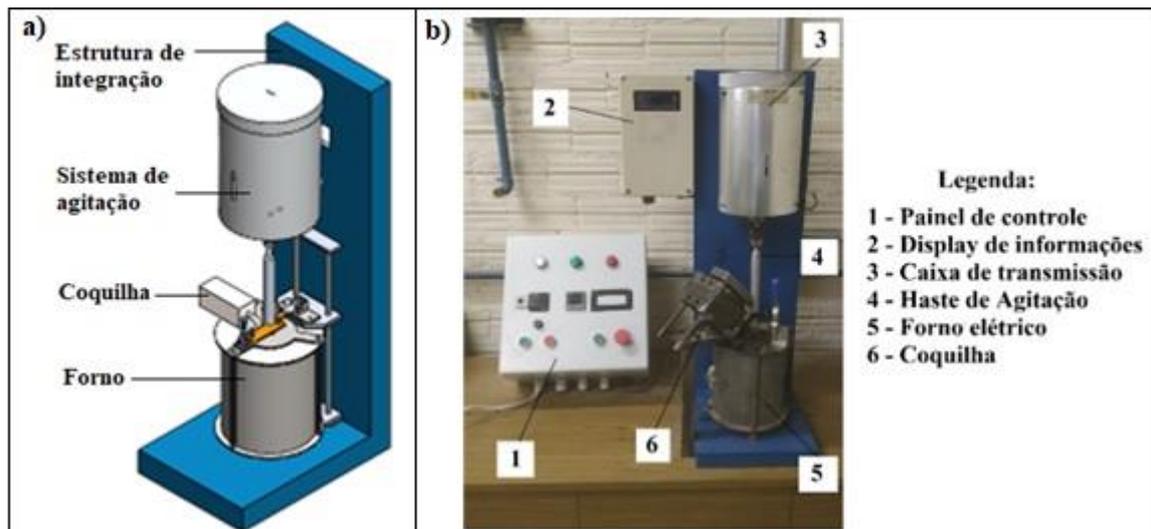


Figura 2: Aparato para Reofundição de liga de magnésio.

Os testes experimentais foram aplicados considerando obter o preenchimento completo da coquilha. Inicialmente, lingotes da liga de magnésio cortados foram colocados no forno e aquecidos até atingir a temperatura de 690 °C, mantidos a essa temperatura por cerca de 30min para completa fusão e homogeneização. Após ocorreu o desligamento do forno. Quando a temperatura atingiu 648 °C, correspondendo a 2°C acima da temperatura de fusão, foi introduzido o agitador de grafite no cadinho. O agitador em temperatura ambiente, em torno de 20 °C. O processo de agitação ocorreu com 1000 rpm durante aproximadamente 38s. Após, procedeu-se ao fechamento do forno e a abertura completa da válvula de pressão do gás de proteção para dar início ao processo de injeção da pasta semissólida na coquilha. A temperatura da coquilha foi de 300 °C.

CONCLUSÕES

O processamento de liga de magnésio por meio do aparato desenvolvido foi realizado.

A integração da estrutura permitiu simplicidade na operação do equipamento, pois os comandos no cilindro de gás de proteção, no painel de controle e na movimentação vertical do forno com auxílio dos guias lineares são as intervenções necessárias.

Portanto, o desenvolvimento aplicado gerou solução satisfatória, pois aplicou concepção de integração das etapas do processo baseado na utilização do gás de proteção para a realização do movimento do metal para a etapa de moldagem e otimização por meio da implementação de semiautomação no equipamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto Federal Sul-rio-grandense pelo incentivo ao projeto de pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

1. FARUK, O.; TJONG, J.; SAIN, M. Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications. Nova Iorque: CRC Press, 2017.
2. SONG, J.; SHE, J.; CHEN, D.; PAN, F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. Journal of Magnesium and Alloys, v. 8, p. 1-41, 2020.
3. ZIMPEL, I.; BARTEX, L. T.; DE BARCELLOS, V. K. Effects of Stirring Time and Cooling Rate on the Rheocast Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy MRI 230D. Materials Research, v. 24, p. 1-11, 2021.
4. YURKO, J. A.; MARTINEZ, R. A.; FLEMINGS, M. C. Commercial Development Of The Semi-Solid Rheocasting (SSR) Process. Metallurgical Science and Technology, v. 21, junho 2003.
5. PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produto, Metodos e Aplicações. 6. ed. São paulo: Blucher, 2005.

DEVELOPMENT OF APPARATUS FOR REFUNDING OF MAGNESIUM ALLOYS

ABSTRACT

Magnesium, with its specific gravity of 1.74 g/cm³, is the lightest structural material. Based on this property and their good mechanical characteristics, magnesium alloys are growing in importance in applications for weight-critical components. Industrial sectors such as automotive, aerospace, consumer goods (smartphones, portable computers, among others) are prominent niches in the application of these alloys. In addition, semi-solid metal processing technology has been applied to these alloys in an attempt to improve their mechanical properties. One of the proven beneficial rheocasting techniques is Semi-Solid Rheocasting (SSR). In it, the metallic alloy is heated above the liquidus temperature and cooled with the aid of a stirring rod to the region between the liquidus temperature and the solidus temperature, and then it is solidified in a metallic mold. On the other hand, as a challenging point for processing, magnesium is a very reactive material in a liquid state, being subject to oxidation and eventually to combustion. The objective of this venture is to design a laboratory-scale equipment for processing magnesium alloys by rheocasting. The product development methodology was applied as a foundation for the work. Thus, a look at the equipment application context, the configuration possibilities and the decision based on criteria are the scope of the design. Initially, technical-operational aspects of the SSR technique were observed, as well as the characteristics of the metal to be processed with the application of the equipment requirements tool; then the identification of the main challenges was carried out; afterwards, the search for modeling solutions was explored with the selection of the appropriate solution alternative; the aid of CAD and simulation software was used as a support tool for the stage; The alternative of integrating the processing steps was adopted as a solution. Finally, the materialization of the solution with evaluation of the results achieved through the physical fabrication of the equipment was achieved in order to characterize the validation of the solution. Mechanical and metallurgical design activities were carried out based on SolidWorks® and Inspire Cast® software. The electrical design activities took place with the application of CADe SIMU® and SolidWorks electrical® software. The results of practical tests with the equipment showed that the elaborated solution met the parameters of processing magnesium alloys by rheocasting, avoiding their oxidation/combustion and reaching the molding of parts. Therefore, it is concluded by stating that the applied development generated a satisfactory solution, as it applied the concept of integration of the process steps based on the use of shielding gas to carry out the movement of the metal to the molding and optimization step through the implementation of semi-automation on the equipment.

Keywords: Rheocasting, magnesium alloy, semi-solid processing, equipment design, product design.