

## Projeto e execução de ferramental de fundição com uso de Manufatura Aditiva para obtenção de barras cilíndricas de metais fundidos

### Design and execution of foundry tooling using Additive Manufacturing to obtain cast metal cylindrical bars

#### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um projeto do ferramental e do molde para fundição em areia-verde para a obtenção de barras cilíndricas para fabricação de corpos de prova para ensaios de tração e fadiga em metais fundidos. Para a elaboração do projeto, iniciou-se pela seleção da geometria da peça final, conforme a Norma ASTM E8/E8M. O dimensionamento de canais e massalotes foi desenvolvido com base no conceito da solidificação direcional ou no método do módulo de Chvorinov. Utilizou-se do processo de Manufatura Aditiva para confeccionar os modelos. Como resultado obteve-se um bom preenchimento das peças, com poucos defeitos superficiais, os quais não interferem na integridade estrutural da peça. Com resultado o ferramental de fundição projetado apresentou um rendimento metalúrgico de 64,2%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundição. Intermetálico. Manufatura aditiva.

#### ABSTRACT

The objective of this work is the design and execution of the casting tooling and mold for green sand casting, intending to obtain round bars for the production of specimens destined for tensile testing and fatigue of cast metals. To prepare the project, it began by selecting the geometry of the final part, according to ASTM E8 / E8M. The sizing of channels and risers was developed based on the concept of directional solidification or the Chvorinov module method. We used the process of Additive Manufacturing to make the models. As a result, a tasty filling of the parts was obtained, with few superficial defects, which do not interfere with the structural integrity of the piece. As a result, the designed casting tooling presented a metallurgical yield of 64,2%.

**KEYWORDS:** Casting. Intermetallic. Additive Manufacturing.

**Gian Carlo Ranzan**  
[gian\\_eaw35@hotmail.com](mailto:gian_eaw35@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Dalmarino Setti**  
[dalmarino@utfpr.edu.br](mailto:dalmarino@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Maria Nalu Verona**  
[nalu@utfpr.edu.br](mailto:nalu@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Silvana Patrícia Verona**  
[silvanaverona@utfpr.edu.br](mailto:silvanaverona@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Ronaldo Ariati**  
[Ronaldo.ariati@gmail.com](mailto:Ronaldo.ariati@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Intermetálicos são compostos formados pela ligação entre metais com razão estequiométrica (por exemplo, NiAl, TiAl, FeAl) e sua ligação é tipicamente uma combinação das ligações metálicas, iônicas e/ou covalentes. Em relação as propriedades mecânicas e físicas, os intermetálicos ocupam uma posição entre os metais e cerâmicas (LI, 2008, citado por VERONA, 2016).

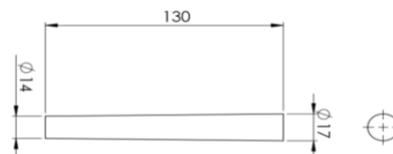
A produção de aluminetos de ferro está associado com altas temperaturas devido ao calor liberado pela reação altamente exotérmica entre o alumínio e o ferro. O processo de fusão Exo-Melto aproveita esta energia liberada para fundir a carga de Fe e Al, se caracteriza pela redução do tempo de fusão, minimização da oxidação de elementos de liga, facilita a fusão a vácuo e elimina os problemas de segurança na fusão de aluminetos de ferro (DEEVI, S. C., SIKKA, V. K. 1997). Como a produção de intermetálicos é um processo que envolve reações exotérmicas, para efeito de testes iniciais e validação do ferramental, foi utilizado ferro fundido cinzento.

Deste modo, este trabalho tem por objetivo a elaboração de um projeto de ferramental e molde para fundição em areia-verde, com o objetivo de obter metais fundidos no formato de barras cilíndricas, com geometria propícia para fabricação de corpos de prova destinados aos ensaios de tração e fadiga

## MATERIAIS E MÉTODOS

Objetivou-se uma geometria cônica para garantir a solidificação direcional dos corpos de prova, com sobremetal de usinagem de no mínimo 1 mm em cada face. A geometria cônica foi projetada para garantir o fluxo de fundido por todo o corpo, ou seja, com uma variação da seção transversal suficiente para que o Módulo de Chvorinov aumentasse em direção ao canal de descida. Para facilitar a montagem do modelo considerou-se a utilização de um modelo bipartido. Seguindo a Norma ASTM E8/E8M de ensaio de tração para materiais metálicos, a geometria dos modelos para a confecção dos corpos de prova é demonstrada pela Figura 1.

Figura 1 – Desenho do projeto de modelo (unidades em milímetro).



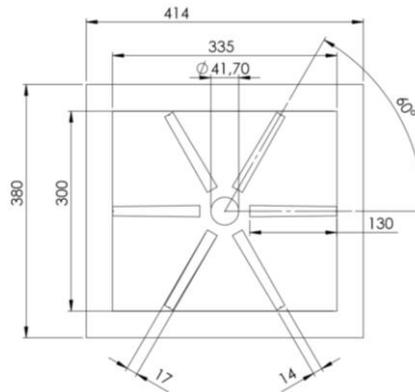
Fonte: Autoria própria (2019).

O volume e a área superficial de cada modelo de corpo de prova podem ser calculados considerando o formato de um troco de cone. Com as duas propriedades geométricas é possível calcular o módulo de Chvorinov dos corpos de prova, expressa pela Eq. (1).

$$M_{cp} = \frac{V_{cp}}{A_{sup}} \quad (1)$$

Para manter a distribuição simétrica e garantindo que a parede do molde tenha resistência mecânica suficiente para suportar o vazamento do fundido, utilizou-se uma distribuição com o massalote no centro da caixa e 6 corpos de prova espaçados de tal forma que suas linhas de simetria ficassem a 60° uma das outras. Mostrado conforme a Figura 2.

Figura 2 – Distribuição dos corpos de prova na caixa de fundição (unidades em milímetro).



Fonte: Autoria própria (2019).

Como referência para o projeto de fundição, mais especificadamente para o dimensionamento de canais e massalotes, seguiu-se a metodologia do módulo de Chvorinov para o dimensionamento do massalote e o dimensionamento dos canais foi desenvolvido com base nas equações de mecânica dos fluidos.

Para a determinação das dimensões do massalote, há duas formas de determina-las. Com base no requisito volumétrico, em que o massalote deverá atender o volume da seção, correspondente a 6 corpos de prova. Outra forma é com base no requisito de módulo da seção, sendo que o massalote proposto deverá possuir um módulo de Chvorinov superior ao módulo da seção com o objetivo de ser o último elemento a solidificar. O módulo do massalote e o volume são determinados pelas Eq. (2) e (3).

$$M_{massalote,m} = 1.2 \cdot M_{cp} \quad (2)$$

$$V_{massalote,m} = 179 \cdot (M_{massalote,m})^3 \quad (3)$$

Para o requisito volumétrico foi definido um massalote cilíndrico com rendimento de  $\eta = 0,14$ , considerou-se a contração volumétrica de solidificação  $b = 0,05$ . Em sequência calculou-se o volume do massalote necessário para atender os 6 corpos de prova e seu módulo, conforme as Eq. (4) e (5) respectivamente.

$$V_{massalote,v} = V_{seção} \cdot \frac{b}{\eta - b} \quad (4)$$

$$M_{massalote,v} = \left( \frac{V_{seção}}{179} \right)^{1/3} \quad (5)$$

As informações referentes aos dois métodos da determinação do massalote estão condensadas na tabela 1 para uma melhor comparação de valores. Com isso, é perceptível que pelo requisito do módulo da seção o volume do massalote não é suficiente para atender a demanda dos 6 corpos de prova. Portanto assumiu-se o

volume do massalote e seu respectivo módulo fornecidos pelo requisito volumétrico.

Tabela 1 – Volume e módulo de Chvorinov do massalote para cada abordagem.

Requisito	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Módulo [cm]
Volumétrico	82,22	0,771
Módulo	15,165	0,4392
Seção	147,639	0,366

Fonte: Autoria própria (2019).

A partir do volume definido, calculou-se as dimensões de um massalote cujo diâmetro e altura são dados pelas Eq. (6) e (7).

$$D_{\text{massalote}} = 5,35 \cdot M_{\text{massalote}} \quad (6)$$

$$H_{\text{massalote}} = 1,5 \cdot D \quad (7)$$

A massa do conjunto é importante para determinar a área da seção transversal mínima do canal de alimentação, devendo ser suficientemente grande para atender a vazão de massa em um período de tempo em que não ocorra a solidificação do fundido. A massa total do conjunto foi calculada pela Eq. (8), sendo a massa igual ao volume multiplicado pela massa específica, que é igual a 6,72 g/cm<sup>3</sup> (CINCA, 2013).

$$P_{\text{conjunto}} = P_{\text{seção}} + P_{\text{massalote}} \quad (8)$$

A velocidade de vazamento é definida por meio da Eq. (9), em que  $g$  é a aceleração da gravidade em cm/s<sup>2</sup>,  $H_{ef}$  é a altura efetiva de vazamento, que é igual a altura do massalote em cm, e  $\alpha$  é o coeficiente de perdas (varia entre 0,25 – 0,45 para sistemas convergentes), definido como 0,35. Logo em seguida foi determinada a área da seção transversal pela Eq. (10), foi considerado um tempo de vazamento de 5 segundos.

$$v = \alpha \cdot (2 \cdot g \cdot H_{ef})^{0,5} \quad (9)$$

$$S1 = \frac{P_{\text{conjunto}}}{(\rho \cdot t \cdot v)} \quad (10)$$

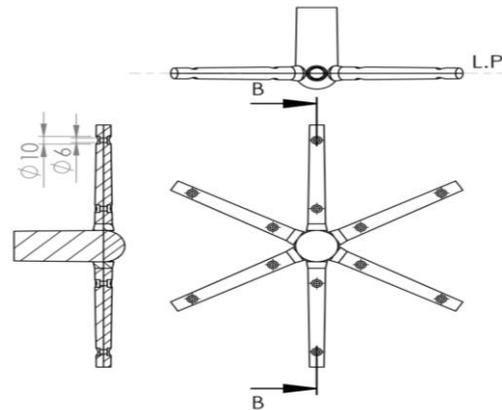
Neste projeto foi considerado que as peças estão conectadas diretamente ao massalote, logo não foram necessários os canais de distribuição e de ataque, para tal, utilizou-se de um pescoço conectando o massalote o massalote as peças. Com o módulo do pescoço de 0,408 cm, tal que  $M_{cp} < M_{pesc} < M_{\text{massalote}}$  e ainda uma relação superior a 1 : 1,1 : 1,2 garantem o suprimento de material do massalote para a peça.

Após o dimensionamento e optando por um sistema de fixação com pinos, o projeto final do modelo é demonstrado pela Figura 3, em que a linha de partição (L.P.) passa pelo centro de simetria dos corpos de prova. Com os pinos de fixação de 6 mm de diâmetro e os rebaixos nas extremidades, destinados ao aperto, de 10 mm. A construção física do modelo se deu por Manufatura Aditiva também conhecida por Impressão 3D utilizando filamento de copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno (ABS). Após a modelagem computacional, os arquivos foram encaminhados para o laboratório de informática da UTFPR – PB, com o equipamento necessário para a impressão. Após o preparo superficial, os elementos foram fixados a uma placa de compensado de madeira por meios dos pinos, e em seguida a aplicação de massa plástica e material impermeabilizante.

O Rendimento Metalúrgico ( $\epsilon$ ) pode ser determinado pela Eq. (11), em que o  $P_{conjunto} = 1544,65$  g e o  $P_{líquido} = 992,13$  g correspondente a 6 corpos de prova.

$$\epsilon = \frac{P_{líquido}}{P_{conjunto}} = 64,2\% \quad (11)$$

Figura 3 – Montagem completa do modelo bipartido (unidades em milímetro).



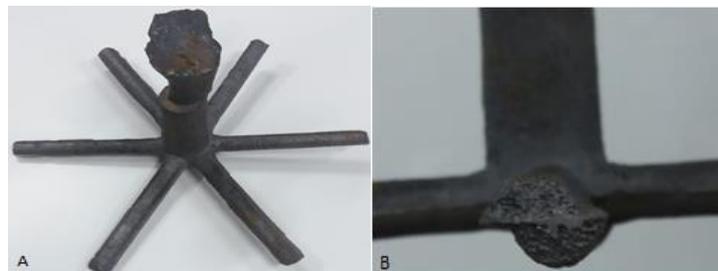
Fonte: Autoria própria (2019).

Para a validação do ferramental foi realizado o vazamento do molde em ferro fundido cinzento, isso ocorreu pela indisponibilidade do intermetálico Fe-Al no período de conclusão desta pesquisa. O processo de fabricação do molde e o vazamento em ferro fundido cinzento ocorreu na empresa de fundição Fersul, situada na cidade de Pato Branco – PR.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a fundição, figura 4(a), verificou-se que ocorreu um sério problema com relação a montagem do modelo na placa de compensado, como principal fator o desalinhamento dos corpos de prova, ocasionado em peças com defasagem de cerca de 3 mm, conforme a figura 4(b), que poderia ser evitado com maior atenção durante a montagem e com a utilização de equipamentos de maior precisão.

Figura 4 – (a) Resultado do processo de fundição com ferro fundido. (b) Deslocamento da linha de simetria entre as partes superior e inferior.



Fonte: Autoria própria (2019).

Também foi possível perceber algumas imperfeições superficiais na peça fundida inerentes ao processo. Entretanto, estando na camada superior e com pequena profundidade, essas falhas seriam removidas pelo processo de usinagem,

dessa forma, não comprometendo as propriedades mecânicas dos corpos de prova.

## CONCLUSÕES

A manufatura aditiva apresentou-se como uma excelente alternativa de produção, comparando com o convencional em que o modelo seria construído de madeira pelo processo de usinagem, garantindo melhor precisão dimensional e facilidade de confecção. Com relação ao projeto, este surgiu com a necessidade de um melhor aproveitamento no consumo de tempo e materiais com a inserção de 6 corpos de prova por caixa, anteriormente a produção das amostras era realizada aos pares. Como resultado obteve-se bom preenchimento do molde, em que não foi possível perceber ausência de material nas regiões necessárias.

Com isso, conclui-se que o modelo atendeu aos requisitos desejados apresentando um rendimento metalúrgico de 64,2 %. Visando a obtenção de um melhor rendimento metalúrgico, recomenda-se pesquisas futuras levando em consideração a variação da disposição das peças na placa e/ou mudança na geometria do massalote.

## REFERÊNCIAS

LI, Z; GAO, W. High Temperature corrosion of Intermetallics. Intermetallics Research Process. Editor: Yakov N. Berdovsky, p 1-64, 2008.

VERONA, M. N. Desenvolvimento de Compósito de  $Fe_3Al - k$  Nanométrico em Matriz de Alumínio para Revestimento Depositado por Aspersão Térmica chama a Pó. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016. Disponível em: [http://www.prppg.ufpr.br/pgmec/wp-content/uploads/2018/04/Tese\\_049\\_Maria-Nalu-Verona-Gomes.pdf](http://www.prppg.ufpr.br/pgmec/wp-content/uploads/2018/04/Tese_049_Maria-Nalu-Verona-Gomes.pdf). Acesso no dia 14 de Agosto de 2019.

CINCA, N.; LIMA, C. R.; GUILMANY, J. M. An Overview of Intermetallics Research and Application: Status of Thermal Spray. Journal of Materials Research and Technology, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.03.013>. Acesso no dia 15 de Agosto de 2019.

LIMA, FELIPE B, F. Tratamento Superficial de Peças Fabricadas por Prototipagem Rápida. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26512/2015.07.D.21529>. Acesso no dia 10 de Maio de 2019.

DEEVI, S. C., SIKKA, V. K. Exo-Melt™ process for melting and casting intermetallics. Intermetallics, v. 5, p. 17-27, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(96\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(96)00067-2). Acesso no dia 18 de Agosto de 2019.