

# PROCESSAMENTO DE LIGAS METÁLICAS NO ESTADO SEMISSÓLIDO: FENÔMENOS, CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DE SUA UTILIZAÇÃO

Luis Vanderlei Torres (IFSP e DEMM/FEM/UNICAMP) E-mail: torres@ifsp.edu.br; torres@fem.unicamp.br

**Resumo:** O processamento de ligas metálicas no estado semissólido é amplamente conhecido como uma tecnologia que utiliza ligas metálicas entre as temperaturas *solidus* e *liquidus*, apresentando uma microestrutura formada por grãos quase globulares rodeados por uma matriz líquida. Esta tecnologia apresenta diversas vantagens em comparação com os processos tradicionais de fabricação, a saber: menor consumo de energia, possibilidade de uso de diversas ligas, aumento da vida útil de matrizes, obtenção de peças com excelente acabamento superficial e qualidade dimensional e produção de componentes próximos à geometria final. Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre os mecanismos de formação de estruturas globulares semissólidas, ou seja, os mecanismos que levam às alterações microestruturais durante a preparação da matéria-prima para o processamento semissólido, comportamento reológico das ligas metálicas no estado semissólido e as vantagens de se utilizar este processo, demonstrando a importância deste processo de fabricação no ambiente industrial.

**Palavras-chave:** ligas metálicas, metal semissólido, estrutura globular.

## METAL ALLOYS PROCESSING IN THE SEMISOLID STATE: PHENOMENA, CHARACTERISTICS AND ADVANTAGES OF THEIR USE

**Abstract:** The metal alloys processing in the semisolid state is widely known as a technology that uses metal alloys between *solidus* and *liquidus* temperatures, presenting a microstructure formed by almost globular grains surrounded by a liquid matrix. This technology has several advantages compared to traditional manufacturing processes, namely: lower energy consumption, possibility of using several alloys, increases die lifetime, obtaining parts with excellent surface finish and dimensional quality and production of components near net shape. Therefore, this work aims to present a literature review on the mechanisms of semisolid globular structures formation, that is, the mechanisms that lead to microstructural changes during the preparation of the raw material for semisolid processing, rheological behavior of metal alloys in the semisolid state and the advantages of using this process, demonstrating the importance of this manufacturing process in the industrial environment.

**Keywords:** metal alloys, semisolid metal, globular structure.

### 1. Introdução

Ao longo da história a sociedade tem necessitado de um contínuo desenvolvimento tecnológico como forma de enfrentar os desafios que a própria evolução humana impõe. Um dos fatores de desenvolvimento sempre foi a criação e o aperfeiçoamento de novos materiais e/ou processos com características necessárias a vencer os desafios que se apresentam e as necessidades associadas a esse avanço (GATAMORTA, 2009). Em virtude deste intenso desenvolvimento, surge o processamento do metal no estado semissólido que se divide nos processos de refundição e tixoconformação, sendo aplicados à obtenção de componentes a partir da conformação de ligas metálicas. No processo de refundição, o metal líquido é resfriado controlando-se a temperatura até a janela de conformação ideal no estado semissólido e em uma única etapa de processamento o produto é obtido; no processo de tixoconformação, a matéria-prima é aquecida até a janela de conformação para posterior

conformação e, portanto, em duas etapas de processamento (FLEMINGS, 1991; ATKINSON, 2005; KIRKWOOD *et al.*, 2010; DE PAULA, 2018).

Spencer, no ano de 1972, foi o primeiro pesquisador a observar o comportamento reológico de ligas metálicas no estado semissólido, quando desenvolvia sua tese de doutorado sob a supervisão do professor Merton Flemings do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), relacionados com a formação e desenvolvimento de trincas por contração durante a solidificação da liga Sn-15wt%Pb sob ação de forças cisalhantes. Seu experimento consistia em manter a liga fundida em um viscosímetro de *Couette*, composto de uma câmara cilíndrica rotativa contendo um eixo fixo no seu centro e então era iniciada a solidificação da liga a distintas taxas de resfriamento e de deformação, observando a formação e desenvolvimento de trincas por contração. Spencer notou que a viscosidade da liga em solidificação nestas condições apresentava um comportamento interessante, mantendo elevada fluidez, mesmo para altas frações sólidas presentes na pasta, além de apresentar um comportamento tixotrópico; o efeito das forças cisalhantes sobre a liga em solidificação faz sua natural formação dendrítica romper-se e as partículas sólidas remanescentes deste processo de rompimento ficam suspensas no líquido em movimento e quando mantida a temperatura da liga num valor intermediário entre as temperaturas *solidus* e *liquidus*, estas partículas sólidas suspensas no líquido tendem a assumir uma geometria aproximadamente globular (SPENCER *et al.*, 1972). Atualmente, este processo encontra aplicações em vários setores industriais devido à sua capacidade de fornecer peças de alta qualidade quando comparados com os processos tradicionais de fabricação (MOHAMMED *et al.*, 2013).

## 2. Fundamentação teórica

Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o processamento de ligas metálicas no estado semissólido devido às diversas vantagens em comparação com os processos tradicionais de fabricação, a saber: menor consumo de energia, possibilidade de uso de diversas ligas, aumento da vida útil de matrizes, obtenção de peças com excelente acabamento superficial e qualidade dimensional e produção de componentes próximos à geometria final. Para tanto, este capítulo foi dividido em três partes: a primeira parte apresenta os mecanismos de formação de estruturas globulares semissólidas, a segunda parte apresenta o comportamento reológico das ligas metálicas no estado semissólido e a terceira parte apresenta as vantagens da utilização deste processo de fabricação.

### 2.1. Mecanismos de formação de estruturas globulares semissólidas

Diversos mecanismos foram propostos por diferentes pesquisadores ao longo dos anos, assim as matérias-primas podem ser obtidas através do processamento durante a solidificação e do processamento posterior à solidificação, visando à modificação da morfologia da microestrutura em formação ou já formada de dendrítica para globular, conforme visto na Figura 1.

No processo que ocorre durante a solidificação, há uma subdivisão entre processos que interferem no crescimento e processos que interferem na nucleação. Os processos que interferem no crescimento são os mecanismos de globularização e o engrossamento, atuando no líquido em solidificação de maneira a inibir o crescimento dendrítico através de uma grande agitação que gera a ruptura da estrutura já formada e sua globularização por mecanismos de redução de energia superficial (FLEMINGS, 1991; TORRES, 2019).

O mecanismo de globularização ocorre a partir do engrossamento das dendritas em meio líquido. Este fenômeno ocorre a partir de dendritas equiaxiais que estão em crescimento no líquido, resultantes de ramos desprendidos ou mesmo dendritas originais, sendo engrossadas pelos mecanismos de transferência de massa. Segundo Flemings (1991), a origem desta dendrita pode ocorrer pela recristalização do material, pela quebra de braço de outras dendritas ou pela refusão de braços dendríticos.

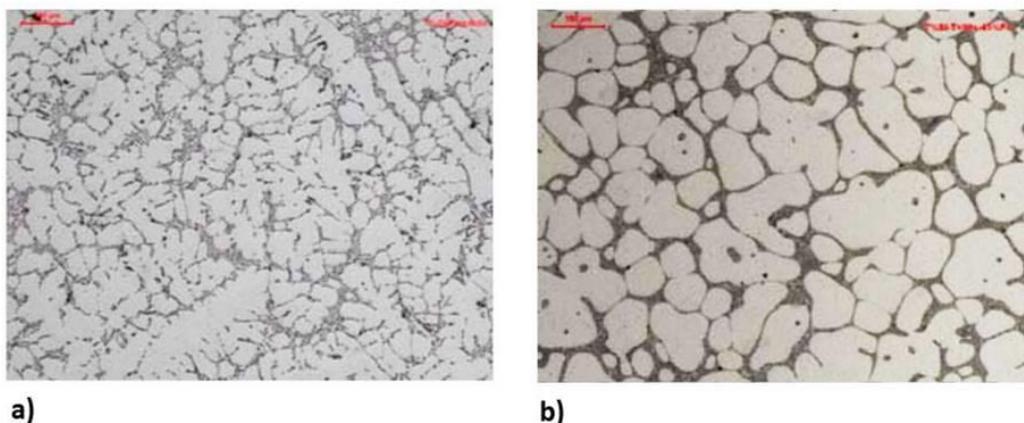


Figura 1 - Microestrutura da liga Al-Si-Mg com morfologia (a) dendrítica e (b) globular (LOURENÇATO, 2008).

O mecanismo de engrossamento apresenta dois tipos: *ostwald ripening* e coalescência, esses mecanismos ocorrem quando o material é reaquecido ao estado semissólido. O mecanismo de engrossamento por *ostwald ripening* consiste na dissolução de ramos menores, incorporação de soluto nos ramos maiores e difusão de soluto no líquido, tendo como resultado uma redução do número de ramos dendríticos e o aumento da distância entre eles, conforme visto nos três modelos propostos por Kattamis e Flemings (1967) e Kahlweit (1968) apresentados na Figura 2.

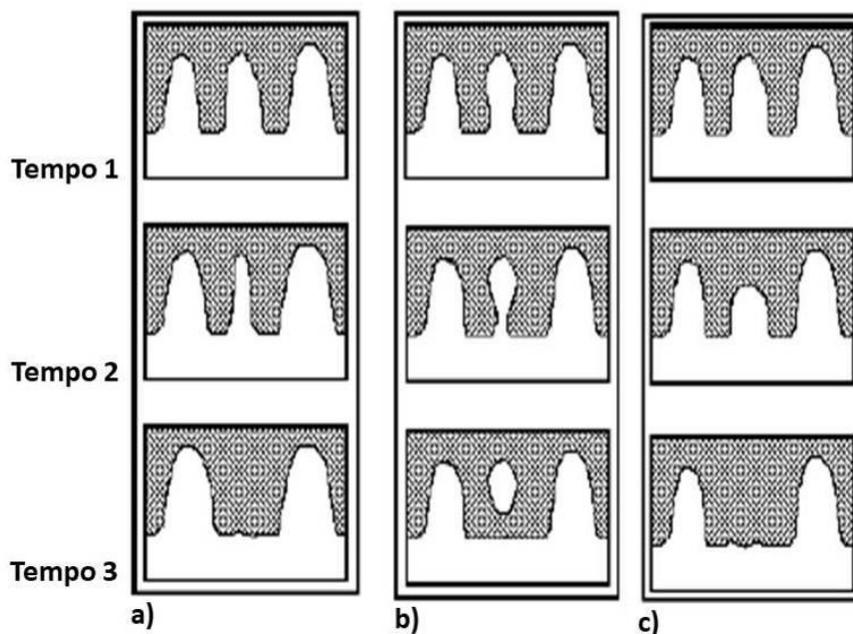


Figura 2 - Esquema geral dos mecanismos de engrossamento dendrítico de *ostwald ripening*: (a) e (b) Kattamis e Flemings (KATTAMIS *et al.*, 1967) e (c) Kahlweit (KAHLWEIT, 1968).

O mecanismo de engrossamento por coalescência consiste na aglomeração de ramos dendríticos secundários, esse mecanismo foi proposto por Young (1992) e Kirkwood (1994) e Genda, Yoyon e Geing (1987), conforme visto na Figura 3. Esta aglomeração resulta na supressão de superfícies de separação, levando a coalescência de dois ou mais braços em apenas um com maior dimensão. Tanto o mecanismo de coalescência exposto por Kirkwood (1994) quanto o possível mecanismo proposto por Genda (1987) são amplamente aceitos pela literatura, porém, para o caso das estruturas semissólidas o mecanismo proposto por Genda tem sido o mais aceito uma vez que este mecanismo explica a formação do *entrapped liquid* apresentado por Flemings. Em todas as estruturas semissólidas pesquisadas até o momento, a presença de uma quantidade de segunda fase (eutética ou não) na forma de *entrapped liquid* foi reportada.

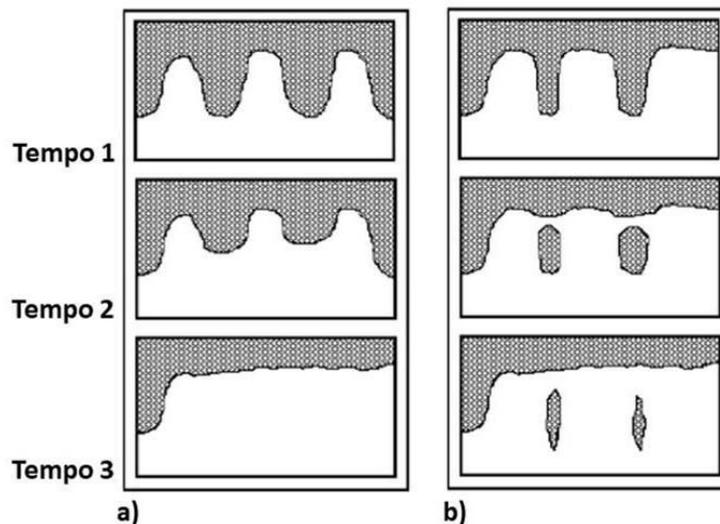


Figura 3 - Esquema geral dos mecanismos de engrossamento dendrítico por coalescência: (a) Young e Kirkwood (YOUNG, 1992; KIRKWOOD, 1994) e (b) Genda (GENDA *et al.*, 1987).

Os processos que interferem na nucleação consistem em aumentar a taxa de nucleação inicial, isto é, a quantidade de núcleos em função do tempo e do volume do líquido, restringindo assim seu crescimento e resultando em uma estrutura sólida de grãos finos. Trata-se, portanto, de incentivar uma nucleação extensiva em todo o volume do líquido quando associada à elevada taxa de resfriamento (PAES, 2004). Existem diversas rotas para a produção de matéria-prima semissólida e cada uma baseia-se na ativação de fenômenos metalúrgicos que determinam a formação da estrutura final. Tendo em vista que a estrutura globular do material semissólido é o resultado do rompimento de ramos dendríticos e sua globularização no líquido é sob forte agitação, pode supor que tais fenômenos possam ser promovidos também a partir de uma estrutura dendrítica; várias pesquisas viabilizaram a produção de materiais semissólidos a partir do material solidificado convencionalmente via processamento posterior à solidificação, pela fusão parcial seletiva de fases via tratamento térmico. A fusão parcial controlada envolve o aquecimento do material a temperaturas superiores à temperatura *solidus*, promovendo a liquefação de fases de baixo ponto de fusão e a fase primária remanescente, envolta por líquido, tende naturalmente a globularizar devido a fenômenos de redução da energia superficial; como resultado, tem-se uma estrutura final com morfologia globular, geralmente irregular, resultado dos fenômenos de coalescência dos ramos dendríticos adjacentes e de glóbulos em contato, conforme visto na Figura 4 (ROBERT *et al.*, 1987; ROBERT, 1989; ZOQUI, 2001).

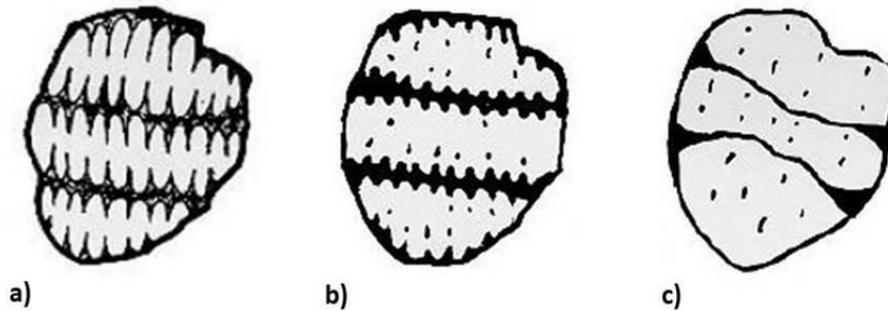


Figura 4 - Evolução de uma estrutura dendrítica durante a globularização: (a) grão com fragmentos dendríticos iniciais, (b) fusão parcial dos contornos de grão e contornos interdendríticos e (c) globularização dos braços dendríticos (ZOQUI, 2001).

## 2.2. Comportamento reológico das ligas metálicas no estado semissólido

Viscosidade é a resistência que um fluido apresenta ao seu escoamento e está diretamente ligada à Lei de Newton. Os fluidos newtonianos apresentam a tensão de cisalhamento proporcional à taxa de cisalhamento, tornando a viscosidade como uma constante de proporcionalidade. Como os fluidos não-newtonianos não apresentam essa relação, a viscosidade é chamada de aparente, tornando-a dependente da taxa de cisalhamento, pressão, temperatura e tempo de processamento (ATKINSON, 2005; DE PAULA, 2018). Em outras palavras, o material no estado semissólido é considerado um material não-newtoniano e apresenta características reológicas distintas.

Esse material em repouso apresenta comportamento pseudoplástico, por outro lado, em estado transiente, o comportamento apresentado é o tixotrópico. Ou seja, a pseudoplasticidade de um material é definida como a dependência da viscosidade em relação à taxa de cisalhamento aplicada. Desta forma, quanto maior a taxa de cisalhamento aplicada no material semissólido, menor será a sua viscosidade aparente. A tixotropia é definida como a dependência da viscosidade em função do tempo em que a taxa de cisalhamento foi aplicada (JOLY *et al.*, 1976; FAN, 2002; DE PAULA, 2018). Ainda sobre estas definições, Flemings (1991) salientou que os materiais no estado semissólido se comportam como um sólido durante baixas taxas de cisalhamento e se comportam como um fluido viscoso, sob altas taxas de cisalhamento.

## 2.3. Vantagens da utilização do processamento do metal no estado semissólido

As vantagens da utilização do processamento de ligas metálicas no estado semissólido, com relação aos processos convencionais de fabricação são oriundas das características reológicas do material semissólido; como sólido, o material mantém sua integridade estrutural, sendo fácil de ser movimentado a diferentes partes do maquinário e como líquido, permite o escoamento na matriz (PRONI, 2014). As vantagens da utilização do processamento de ligas metálicas no estado semissólido são (ATKINSON, 2005):

- Eficiência energética, uma vez que não há necessidade de manter o material no estado líquido por muito tempo como no processo de fundição;
- Utilização de pressões menores, pelo fato do material semissólido estar parcialmente liquefeito, portanto, mais maleável em comparação ao processo de conformação plástica tradicional, tendo como consequência menores esforços sobre a matriz;

- Aumento da vida útil da matriz devido ao uso de temperaturas de processo mais baixas quando comparadas com os processos convencionais, reduzindo assim o desgaste nas matrizes;
- Devido à menor viscosidade, pelo material se encontrar no estado semissólido o fluxo se mantém quase laminar, ou seja, minimiza-se a turbulência, tendo como efeito pouca introdução e retenção de ar, gerando menos porosidades, bolhas e óxidos;
- Preenchimento suave do molde sem aprisionamento de ar, conferindo ao produto uma melhor qualidade;
- Diminuição do tempo total do ciclo de produção por volta de 20 a 25% menor, devido ao fato de que o material já se encontra parcialmente solidificado e necessita de menos tempo para chegar à solidificação completa;
- Obtenção de microestruturas refinadas que melhoram as propriedades mecânicas das ligas;
- Peças próximas ao formato final pelo fato do material já estar no estado semissólido e também a produção de peças com formas complexas e com pequenas tolerâncias dimensionais.

### **3. Conclusões**

Tem-se que ao longo dos anos houve uma grande compreensão na tecnologia aplicada no processamento de ligas metálicas no estado semissólido, principalmente em relação à transformação da morfologia e nos parâmetros de processo devido ao trabalho de diversos pesquisadores pelo mundo. Assim, este trabalho de revisão da literatura traz algumas considerações, a saber:

- O processamento de ligas metálicas no estado semissólido divide-se nos processos de reofundição e tixoconformação, sendo que no processo de reofundição o controle da temperatura é realizado na transição do estado líquido para o estado sólido e no processo de tixoconformação o controle é realizado na transição do estado sólido para o estado líquido.
- A morfologia mais adequada para o processamento de ligas metálicas no estado semissólido e que apresenta propriedades mecânicas elevadas são aquelas que possuem grãos pequenos, homogêneos e globulares.
- Esta tecnologia apresenta diversas vantagens em comparação com os processos tradicionais de fabricação, a saber: menor consumo de energia, possibilidade de uso de diversas ligas, aumento da vida útil de matrizes, obtenção de peças com excelente acabamento superficial e qualidade dimensional e produção de componentes próximos à geometria final.

### **Agradecimentos**

O autor agradece ao DEMM/FEM/UNICAMP - Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas e ao IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Bragança Paulista.

**Referências**

- ATKINSON, H.V.** *Modelling the semisolid processing of metallic alloys*. Progress in Materials Science. Vol. 50, pp. 341-412, 2005.
- DE PAULA, L.C.** *Otimização do refino de grão, via tratamento por ultrassom da liga de alumínio 355 para tixoconformação*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2018.
- FAN, Z.** *Semisolid metal processing*. International Materials Reviews. Vol. 47(2), pp. 49-85, 2002.
- FLEMINGS, M.C.** *Behavior of metal alloys in the semisolid state*. Metallurgical Transactions. Vol. 22A, pp. 957-981, 1991.
- GATAMORTA, F.** *Obtenção de espumas sintáticas da liga AA2011 a partir do metal no estado semissólido e sua caracterização metalúrgica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2009.
- GENDA, G.; YUYON, C. & GEING, A.** *Mechanism of coarsening of dendrite during solidification*. In: Proceedings of the Solidification Processing Conference. Sheffield, p. 416-419, 1987.
- JOLY, P.A. & MEHRABIAN, R.** *The rheology of a partially solid alloy*. Journal of Materials Science, Vol. 11(8), pp. 1393-1418, 1976.
- KATTAMIS, T.Z.; COUGHIN, J.L. & FLEMINGS, M.C.** *Influence of coarsening on dendritic arm spacing of Al-Cu alloys*. Transactions of the Metallurgical Society of AIME. Vol. 239, p. 1504-1511, 1967.
- KAHLWEIT, M.** *On the ageing of dendrites*. Scripta Metallurgica. Vol. 2, pp. 251-254, 1968.
- KIRKWOOD, M.C.** *Semi-solid metal processing*. International Materials Reviews. Vol. 39, pp. 173-189, 1994.
- KIRKWOOD, D.H.; SUÉRY, M.; KAPRANOS, P.; ATKINSON, H.V. & YOUNG, K.P.** *Semisolid processing of alloys*. Springer Series in Materials Science. Vol. 124, pp. 1-172, 2010.
- LOURENÇATO, L.A.** *Tixoformabilidade e tixoforjamento de ligas Al-Xwt%Si-0,5wt%Mg em prensa excêntrica com matriz aberta*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2008.
- MOHAMMED, M.N.; OMAR, M.Z.; SALLEH, M.S.; ALHAWARI, K.S. & KAPRANOS, P.** *Semisolid metal processing techniques for nondendritic feedstock production*. The Scientific World Journal. Vol. 2013, Article ID 752175, 2013.
- PAES, M.** *Obtenção e caracterização de novas ligas Al-Si-Mg para tixoconformação*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.
- PRONI, C.T.W.** *Efeito da taxa de aquecimento no desmantelamento e na globularização da microestrutura para propiciar a tixoconformação*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2014.
- ROBERT, M.H. & KIRKWOOD, D.H.** *Alloy slurry formation by partial melting*. In: Proceedings of the Solidification Processing Conference, Sheffield, p. 373-376, 1987.
- ROBERT, M.H.** *Proposição de um novo processo para a obtenção de pastas metálicas reofundidas*. Tese de Livre Docência em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1989.
- SPENCER, D.B.; MEHRABIAN, R. & FLEMINGS, M.C.** *Rheological behavior of Sn-15%Pb in the crystallization range*. Metallurgical Transactions. Vol. 3, p. 1925-1932, 1972.
- TORRES, L.V.** *Uma revisão sobre a tecnologia de processamento de ligas metálicas no estado semissólido*, In: Holzmann, H.A.; Biscaia, R.V.B. (eds), Impactos das tecnologias na engenharia de materiais e metalúrgica, 1 ed., capítulo 12, Ponta Grossa, Brasil, Atena Editora, 2019.
- YOUNG, K.** *Semi-solid metal forming alloy and composites*. In: Proceedings of the Minerals, Metals and Materials Society Symposium on Nature and Properties of Semisolid Materials. San Diego, p. 245-266, 1992.
- ZOQUI, E.J.** *Obtenção e caracterização de ligas Al-Si reofundidas*. Tese de Livre Docência em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2001.