

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GABRIEL LIMA BORGES

THIXOFORMING: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

GABRIEL LIMA BORGES

THIXOFORMING: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Thixoforming: Uma revisão sistemática de literatura.

Gabriel Lima Borges

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 02/07/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dra. Maria Nalu Verona Gomes
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Valdir Celestino da Silva
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor, doutor Dalmarino Setti, por ter permanecido como meu orientador, mesmo com todas as adversidades ocorridas. Agradeço também a Tramontini Ferramentaria, pela doação de material, para execução de matriz.

RESUMO

BORGES, Gabriel L. Thixoforming: Uma revisão sistemática de literatura. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

O processamento semissólido se apresenta como uma rota promissora na produção de componentes mecânicos, e aplicações na indústria aeroespacial. Possuindo diversas opções para aplicações em processos produtivos, o *thixoforming* é um meio de processamento semissólido capaz de produzir microestrutura esférica, e refinar o grão. O presente trabalho faz uma revisão sistemática de literatura, obtendo 64 artigos como base para caracterizar os principais meios de produção de matéria semissólida, evidenciando os mecanismos de formação da microestrutura esférica, apresenta as principais rotas de *thixoforming* e analisa as ligas que foram mais estudadas nos últimos 20 anos, em que a liga de alumínio A356 é a que possui maior número de estudos no tema, sendo possível se obter uma resistência a tração 90% maior (338 MPa) quando comparada com a liga processada por fundição em areia (172 MPa). Também foi realizada uma análise comparativa entre os parâmetros de processamento e as propriedades mecânicas obtidas, afim de averiguar esta correlação e o comportamento da matéria-prima semissólida enquanto processada. Os resultados obtidos nesse trabalho mostram a importância da pesquisa em processamento semissólido e como esta pode ser uma rota de produção com menores custos, para se obter componentes mecânicos com propriedades mecânicas superiores.

Palavras-chave: Semissólido. *Thixoforming*. Processamento semissólido.

ABSTRACT

BORGES, Gabriel L. Thixoforming: An sistematic overview of literature. 2019. Completion of course work– Mechanical engeneering course, Federal TechnologiclUniversity of Paraná. Pato Branco, 2019.

Semisolid processing presents itself as a promising route in the production of mechanical components and applications in the aerospace industry, having several options for applications in manufacturing processes. Thixoforming is a semisolid processing capable of producing spherical microstructure, and refining the grain. The present work presents a systematic review of the literature 64 papers were obtained as a basis to characterize the primary means of production of semisolid material. These papers showing the mechanisms of formation of the spherical microstructure presents the main routes of thixoforming and analyzes the alloys that were most studied in the last 20 years. The A356 aluminum alloy is the one with the most significant number of studies on the theme, being able to obtain 90% greater tensile strength (338 MPa) when compared with the alloy processed by sand casting (172 MPa). A comparative analysis was also performed between the processing parameters and the mechanical properties obtained to ascertain this correlation and the behavior of the semisolid raw material while processed. The results obtained in this work show the importance of the research in semisolid processing and how it can be a route of production with lower costs, to get mechanical components with superior mechanical properties.

Keywords: SSM. Semi-solid. Thixoforming. Semi-solid Processing.

LISTA DE FÍGURAS

Figura 1 - Mecanismos de formação.....	13
Figura 2- Diâmetro equivalente X velocidade de agitação (a), fator de forma X velocidade de agitação (b), para 3 concentrações de fração sólida (fs).....	15
Figura 3 - Esquema de agitador eletromagnética, horizontal (a), vertical (b), helicoidal (c).....	16
Figura 4 - Microestrutura de amostra agitada a 1000 RPM sem uso de abafador (a) e com uso de abafador (b)	17
Figura 5 - Micrografia ótica de: (a) Lingote de alumínio A 356, (b) derramado diretamente, (c) usando uma rampa de resfriamento, (d) temperatura de derrame de 925 K.....	17
Figura 6 - (a) Evolução do grão, (b) taxa da tensão cisalhante, (c) fração líquida relativa, (d) fração sólida relativa durante o escoamento do fundido pela rampa de resfriamento.	18
Figura 7 - Esquema de produção por Spray Casting	19
Figura 8- Processo de rheocasting utilizando uma rampa de resfriamento (a) e com baixo teor de superaquecimento	22
Figura 9 - Processo de Thixoforging usando Rampa de Resfriamento (a) e por <i>near-liquidus casting</i> (b).....	24
Figura 10 - Fluxograma de pesquisa.....	277
Figura 11 - Gráfico: Número de publicações por ano.	29
Figura 12 - Gráfico: Material X Número de publicações	31
Figura 13 - Efeito da pressão de injeção na resistência à tração (a) e na deformação (b)	35
Figura 14 - Efeito da temperatura do molde na resistência a tração (a) e deformação (b).	35
Figura 15 - Efeito da temperatura de derrame na resistência a tração (a) e na deformação (b).....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 MICROESTRUTURA.....	12
2.1.1 Fração sólida.....	12
2.1.2 Formação e evolução.....	12
2.2 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA SEMISSÓLIDA	14
2.2.1 Técnica da Agitação Mecânica.....	14
2.2.2 Técnica da Agitação Magnetohidrodinâmica.....	16
2.2.2.1 Uso de abafador no cadinho	17
2.2.3 Técnica da Rampa de Resfriamento	17
2.2.5 Técnica do Spray Casting	19
2.2.6 Técnica do Refino Químico de Grãos	20
2.2.7 Técnica do Near-Liquidus Casting	20
2.2.8 Técnica de Ativação por Fundição Induzida por Tensão (SIMA).....	21
2.3 PROCESSOS DE THIXOFORMING	21
2.3.1 Processo de reofundição (rheocasting).....	22
2.3.2 Processo de tixoforjamento (thixoforging)	23
2.4 CONDIÇÕES DO MATERIAL PARA PROCESSAMENTO SEMISSÓLIDO	24
3 METODOLOGIA	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....	28
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	31

4.2.1 Liga A356	31
4.2.2 Liga AA 7075	32
4.2.3 Liga A357	33
4.2.4 Efeito dos parâmetros de processamento	34
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O estudo de semissólidos em processos de fundição tem início no MIT (Massachusetts Institute of Technology) em 1970, entretanto, foi em 1971 que se descobriu que uma microestrutura não-dendrítica se formava quando a mistura (sólido-fundido) era agitada antes do derrame. Tornou-se possível utilizar semissólidos em processos de fundição, sem que houvesse formação de segregados ou fissuração (FLEMINGS, 1976).

Processos de fundição sob pressão são utilizados em produção seriada de pequenos componentes, ou que necessitem de alta precisão dimensional, devido a capacidade de reprodutividade. Entretanto, as principais desvantagens da fundição sob pressão são a extrema turbulência durante o enchimento, tendo um impacto negativo na qualidade da peça (LEE, 2006).

Os pesquisadores do MIT criaram dois termos que descrevem a rota de processamento do semissólido, reofundição (*rheocasting*), processo onde o metal semissólido é usado diretamente como uma “mistura”, sem que ocorra resfriamento intermediário, e tixoforjamento (*thixoforging*), onde o semissólido é produzido por meio de tempera e é reaquecido subsequentemente (CARR, 2007). A fundição por meio de rheocasting produz resultados bons em várias ligas de fundição; entretanto, seu potencial total só pode ser explorado por interligação entre o processo de refinamento com a adaptação das ligas adequadas e tratamento térmico adequado (GRIMMING, 2006).

Para Flemings (1991) as dendritas são afetadas pela convecção do fluxo nos estágios iniciais de solidificação, estabelecendo-se um limite de agitação vigorosa com uma taxa de resfriamento lenta, o grão se torna esferoidal e passa apresentar comportamento tixotrópico, com uma grande variação de viscosidade dependendo das condições do processo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma revisão sistemática de literatura por meio de um processo estruturado para se determinar os principais autores, processos, ligas e propriedades mecânicas obtidas com o processamento semissólido.

1.1.2 Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral os seguintes objetivos específicos são apresentados: (i) apresentar os mecanismos envolvidos na formação da microestrutura globular; (ii) apresentar as diferentes técnicas utilizadas na obtenção de matéria-prima semissólida; (iii) apresentar as principais rotas de fabricação utilizando matéria semissólida; (iv) realizar um processo de revisão sistemática de literatura; (v) apresentar informações dos autores, ligas e propriedades mecânicas das ligas semissólidas processadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Kim (2008) em suas pesquisas, ressalta a importância do processamento semissólido para se obter propriedades mecânicas superiores, sem a necessidade de um processo com muitas etapas, tornando a produção seriada de componentes melhor e mais barata. Lu *et al.* (2003) caracteriza o processamento semissólido como de vital importância para indústria aeroespacial, uma vez que possibilita produzir ligas leves com propriedades mecânica superior.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho se justifica pela contribuição científica, abordando trabalhos existentes na literatura e disponibilizando informações obtidas no contexto desta pesquisa. Assim, fornecerá fundamentos teóricos que nortearão análises futuras no âmbito da seleção de materiais que envolvam ligas semissólidas processadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICROESTRUTURA

2.1.1 Fração sólida

Flemings (1991) propõe que as frações sólida e líquida sejam calculadas por um balanço de massa, neste caso a relação entre a fração de peso líquido f_L , e a composição líquido C_L , é dada pela equação de Scheil:

$$f_L = \left(\frac{C_L}{C_0} \right)^{-1/(1-k)} \quad (1)$$

Com C_0 sendo a composição inicial, e k o coeficiente de partição. Uma vez que a temperatura e a composição líquida são relacionadas, pode-se rescrever a equação da seguinte forma:

$$f_L = \phi^{-1/(1-k)} \quad (2)$$

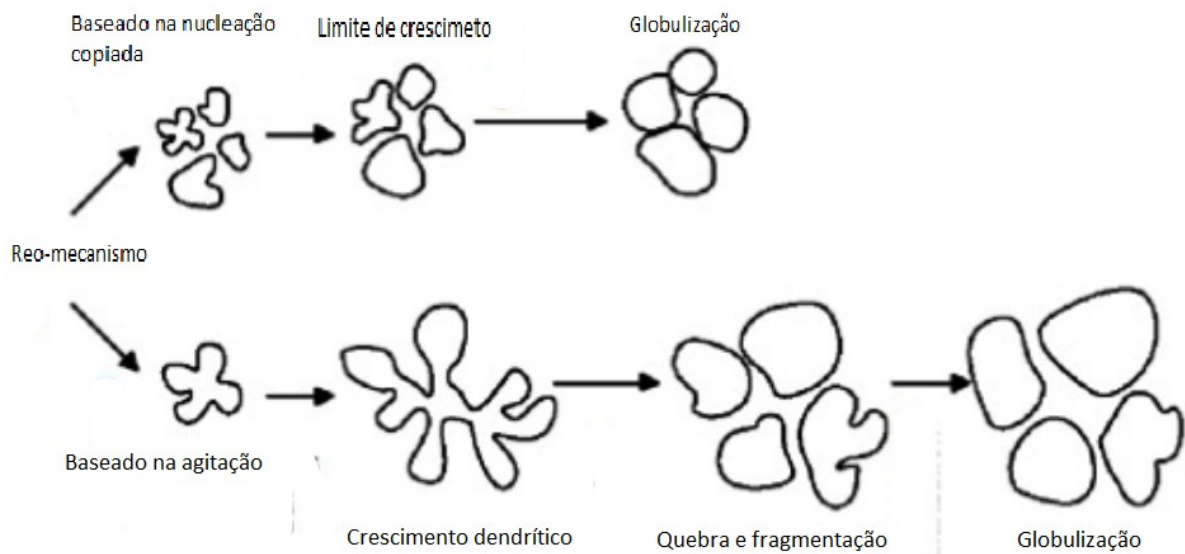
Com ϕ sendo a temperatura adimensional $(T_M - T)/(T_M - T_L)$, e T_M e T_L são o ponto de fundição do solvente puro e a temperatura liquidus da liga de composição C_0 , respectivamente, tal equação é utilizada para se calcular a fração sólida local.

2.1.2 Formação e evolução

Canyook (2010) *et al.* estudaram o mecanismo de formação e evolução da microestrutura em misturas semi-sólidas aplicadas num processo de “Reofundição”, a partir das teorias de nucleação copiada, e fragmentação. Foi observado que a microestrutura é formada por uma mistura de partículas globulares, equiaxiais, e dendríticas, durante os estágios iniciais de solidificação.

As estruturas se formam por meio do mecanismo de fragmentação pelo qual os braços dendríticos secundários e terciários são quebrados e empurrados pelo fluido através da massa, como mostrado na figura 1 formando pontos de nucleação. As partículas esféricas (globulares e equiaxiais) se formam pela refundição dos braços dendríticos, e se tornam pontos de nucleação, também foi detectado que as partículas sofrem sinterização, a qual tem mais chances de acontecer quando a porção de sólido aumenta (CANYOOK et al. 2010).

Figura 1- Mecanismos de formação.



Fonte: Nafisi (2000)

Hong (2006) investigou o método do mecanismo de nucleação, pelo qual, partículas de dendritas primárias são prevenidas de se formar no metal líquido, por meio do controle da taxa de resfriamento, e temperatura do fundido, durante a solidificação do metal líquido.

A solidificação inicial, que ocorre durante a preparação da mistura enquanto o fundido é mantido na faixa de temperatura de semissólido, é responsável pelas estruturas dendríticas grosseiras, que inicia a formação assim que a temperatura é

reduzida inferiormente à temperatura de líquido, e evolui até a fração de sólido ditada pela temperatura da mistura sólido-líquido (BIROL, 2010).

Mohammed (2013 *apud* Vogel *et al.* 1979) sugere que os braços dendríticos tem plasticidade suficiente para que eles possam dobrar sob forças cisalhantes, o que causa grande desorientação dentro dos braços dendríticos formando deslocamentos; quando aquecido a temperatura de fusão os deslocamentos se reorganizam para formar contornos de grão.

Lee (2006) propõe que o fator principal para o crescimento de grãos equiaxiais são o número de núcleos, gradiente de temperatura e taxa de solidificação, no método investigado por meio do resfriamento se obtém a fração sólida pelo endurecimento dos braços esféricos das dendritas primárias. Uma estrutura semissólida, de grãos não-dendríticos, pode ser obtida por reaquecimento de material com microestrutura dendrítica equiaxial com um tamanho de grão fino o suficiente, com um tempo curto para materiais de grão muito fino (MARTINEZ, 2005).

2.2 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA SEMISSÓLIDA

Os desenvolvimentos recentes em processos de metal semissólido são capazes de produzir microestrutura globular por meio do gerenciamento das condições de solidificação (CARR, 2007). Influenciam na habilidade de enchimento do molde a temperatura, pressão de injeção e velocidade, quanto maior os parâmetros anteriores, maior é habilidade de enchimento da mistura e mais facilmente a cavidade do molde é preenchida (MAO, 2006).

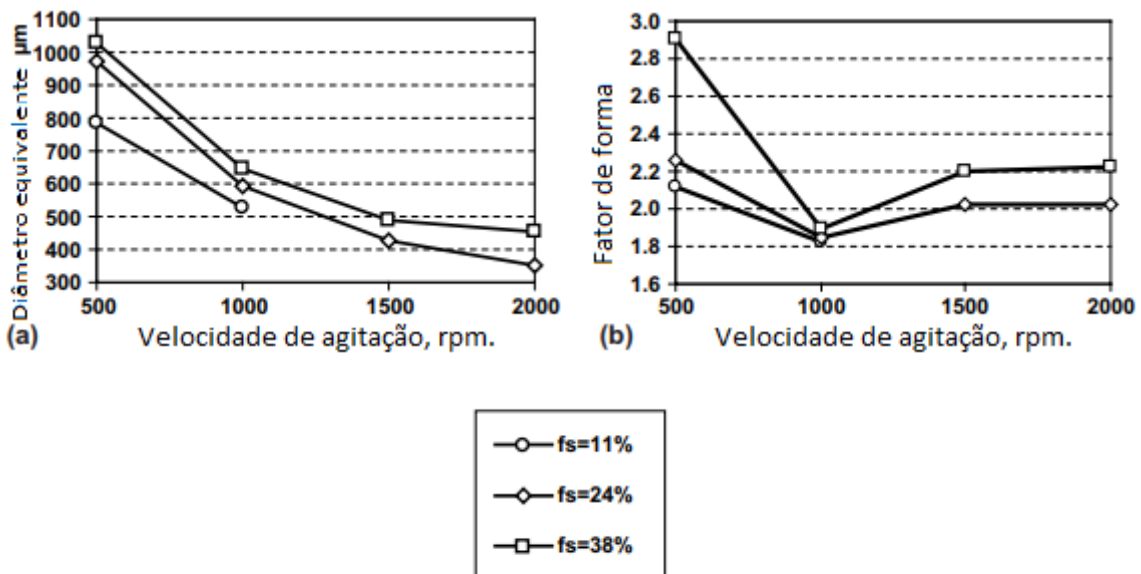
2.2.1 Técnica da Agitação Mecânica

A agitação vigorosa, enquanto a solidificação começa, resulta na formação de novos grãos. Devido ao contínuo cisalhamento a dendrita se torna uma roseta como resultado da abrasão com outros grãos, com o resfriamento lento e alto cisalhamento tais partículas se tornam esferoidais (FLEMINGS, 1991).

Segundo Melali *et al.* (2015) conforme a velocidade de agitação aumenta, os diâmetros médios grãos diminuem, entretanto, ainda há influência das partículas dendríticas iniciais, formadas na parede do cadinho no início do resfriamento, formando uma microestrutura não-uniforme. Em velocidades menores a microestrutura é composta por grãos dendríticos, rosetas e grãos esféricos, e em velocidades maiores as rosetas se tornam esféricos, todavia, o fator de forma de grão aumenta devido ao refinamento.

Niroumand (1997 apud FALAK e NIROUMAND, 2005) prôpos que estruturas dendríticas deformadas e amadurecidas se agrupavam, formando pseudo-grãos, com geometria complexa. Falak e Niroumand (2005) concluíram que os pseudo-grãos também se refinavam com o aumento de velocidade, e seu fator de forma diminui devido a regularização da forma (Figura 2).

Figura 2- Diâmetro equivalente X velocidade de agitação (a), fator de forma X velocidade de agitação (b), para 3 concentrações de fração sólida (fs).



Fonte: Falak e Niroumand (2005), adaptado.

Para Birol (2010), agitar a mistura enquanto a mesma se resfria abaixo da temperatura de líquido melhora as características da mistura; entretanto, a imersão de resfriamento conjuntamente com a agitação produz as melhores características, pois, agitar a mistura produz resfriamento uniforme e nucleação da massa.

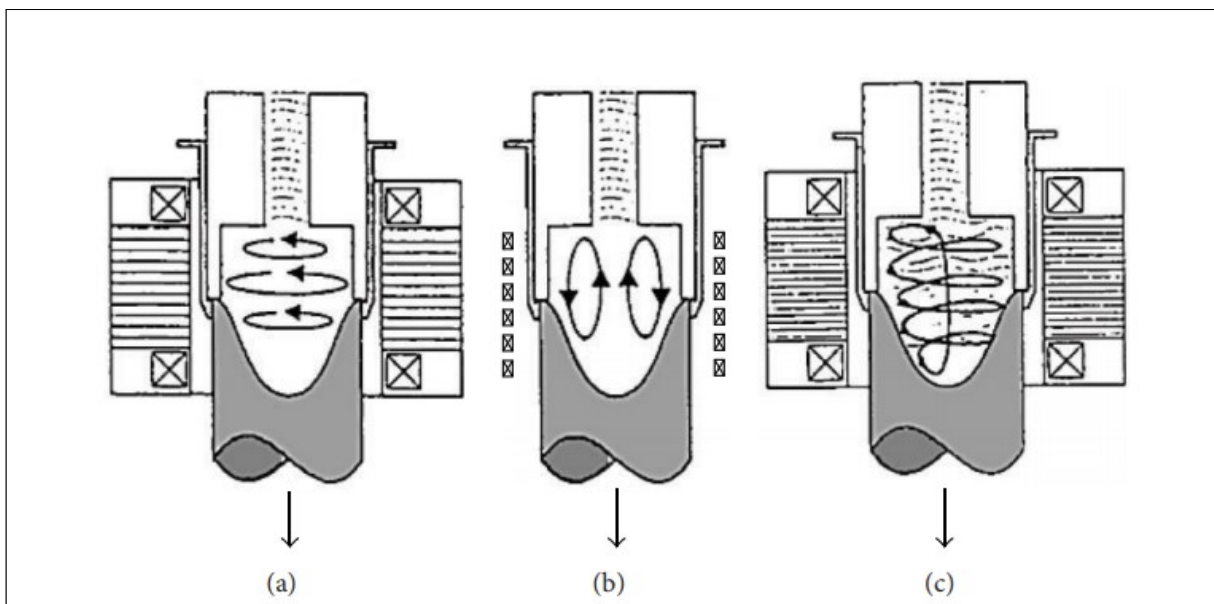
O resfriamento rápido em conjunto com vigorosa agitação da mistura, durante os estágios iniciais da solidificação, pode resultar em uma alta densidade de grãos, suficiente para que o crescimento seja esferoidal desde estágios iniciais da solidificação, sem que esses grãos apresentem sinais de eutéticos presos, ou microsegregações contendo isoconcentrados que poderia indicar uma prematura estrutura dendrítica (MARTINEZ, 2005).

O uso de agitador mecânico não é desejável em aplicações comerciais, devido a formação de rosetas e partículas sólidas, o risco de se prender gás no metal, e contaminação por erosão do agitador por reações químicas (MOHAMMED, 2013).

2.2.2 Técnica da Agitação Magnetohidrodinâmica

Para superar os problemas encontrados anteriormente desenvolveu-se o processo de agitação Magnetohidrodinâmica, que produz ligas não-dendríticas através da rotação de campos eletromagnéticos (Figura 3). O aprisionamento de gás na mistura é minimizado, tal qual, a contaminação, a mistura também é filtrada, gerando grandes quantidades de grãos refinados. Mas existem alguns problemas como a formação de rosetas por partículas sólidas, levando a um aumento no tempo de reaquecimento (MOHAMMED, 2013).

Figura 3 - Esquema de agitador eletromagnética, horizontal (a), vertical (b), helicoidal (c)

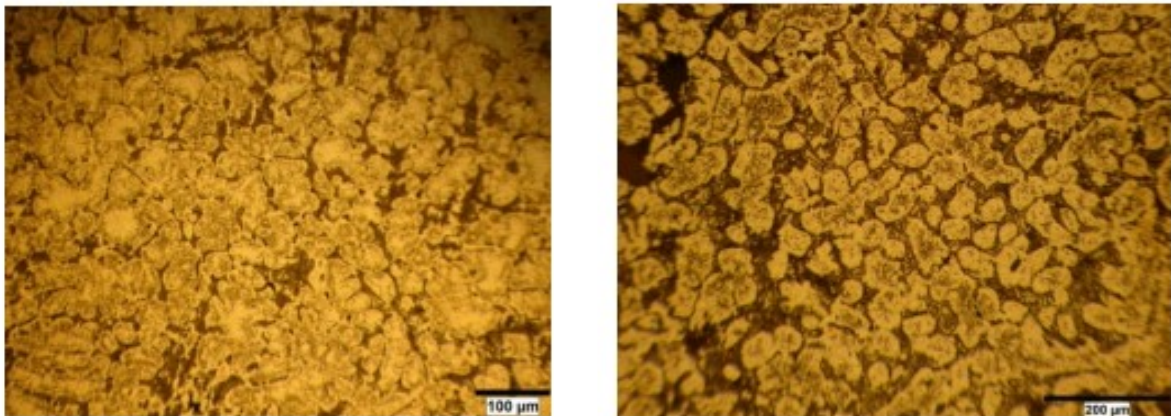


Fonte: Mohammed (2013).

2.2.2.1 Uso de abafador no cadinho

O uso de abafador refina o grão, e as estruturas dendríticas primárias não existem, com a microestrutura composta por rosetas e esfera, como apresentado na Figura 4. Sendo o abafador mais importante que a agitação mistura (MELALI *et al.* 2015).

Figura 4 - Microestrutura de amostra agitada a 1000 RPM sem uso de abafador (a) e com uso de abafador (b)

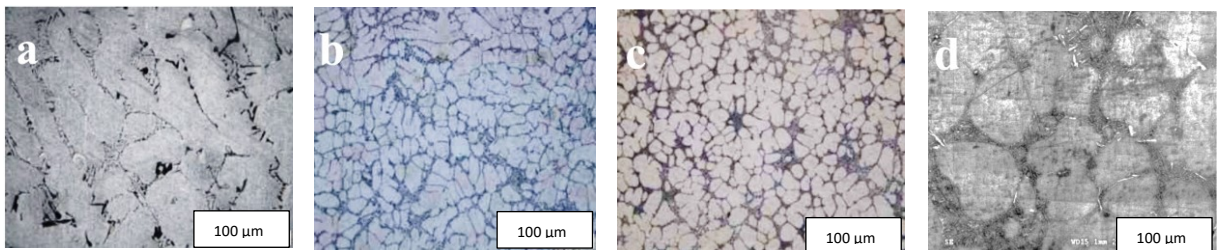


Fonte: Melali et al. (2015)

2.2.3 Técnica da Rampa de Resfriamento

Esta é a técnica mais simples que pode ser utilizada e consiste em aplicar baixo superaquecimento ao metal perto ou logo acima da temperatura de líquido, o fluxo é alcançado durante o derrame na rampa de resfriamento (MOHAMMED, 2013).

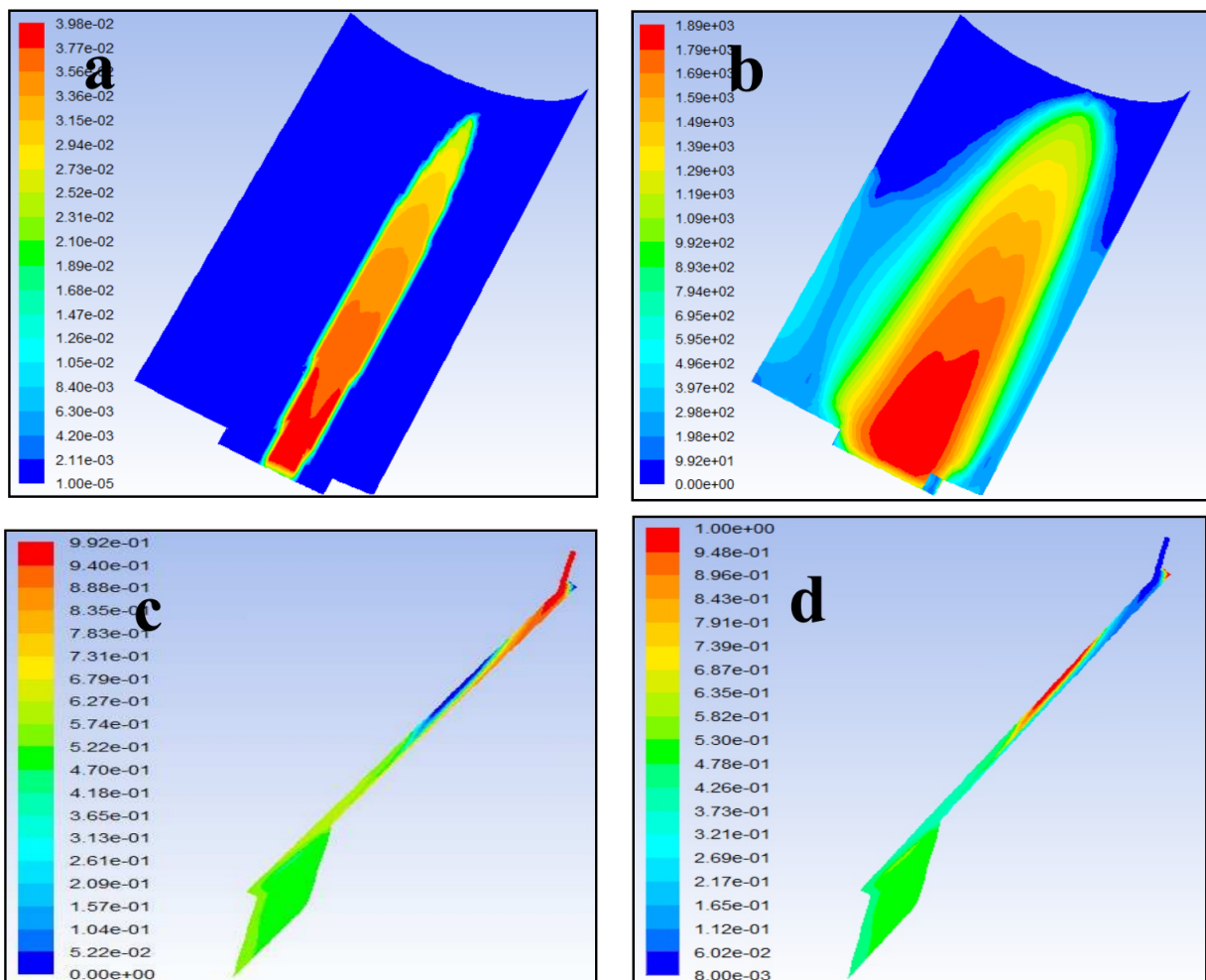
Figura 5 - Micrografia ótica de: (a) Lingote de alumínio A 356, (b) derramado diretamente, (c) usando uma rampa de resfriamento, (d) temperatura de derrame de 925 K.



Fonte: Das et al. (2013).

Das (2013) estudou os efeitos do uso de uma rampa de resfriamento, onde o fundido tenha o resfriamento necessário para que haja a nucleação pelo contato com a superfície da rampa, que facilita novas nucleações e o desprendimento dos cristais de morfologia primária, a partir as tensões cisalhantes pela força da gravidade e inercia do fluido, tornando-se semissólido na saída da rampa. Os resultados apresentados nas figuras 5 e 6 revelam que o uso da rampa de resfriamento causa um refinamento de grão.

Figura 6 - (a) Evolução do grão, (b) taxa da tensão cisalhante, (c) fração líquida relativa, (d) fração sólida relativa durante o escoamento do fundido pela rampa de resfriamento.



Fonte: Das et al. (2013)

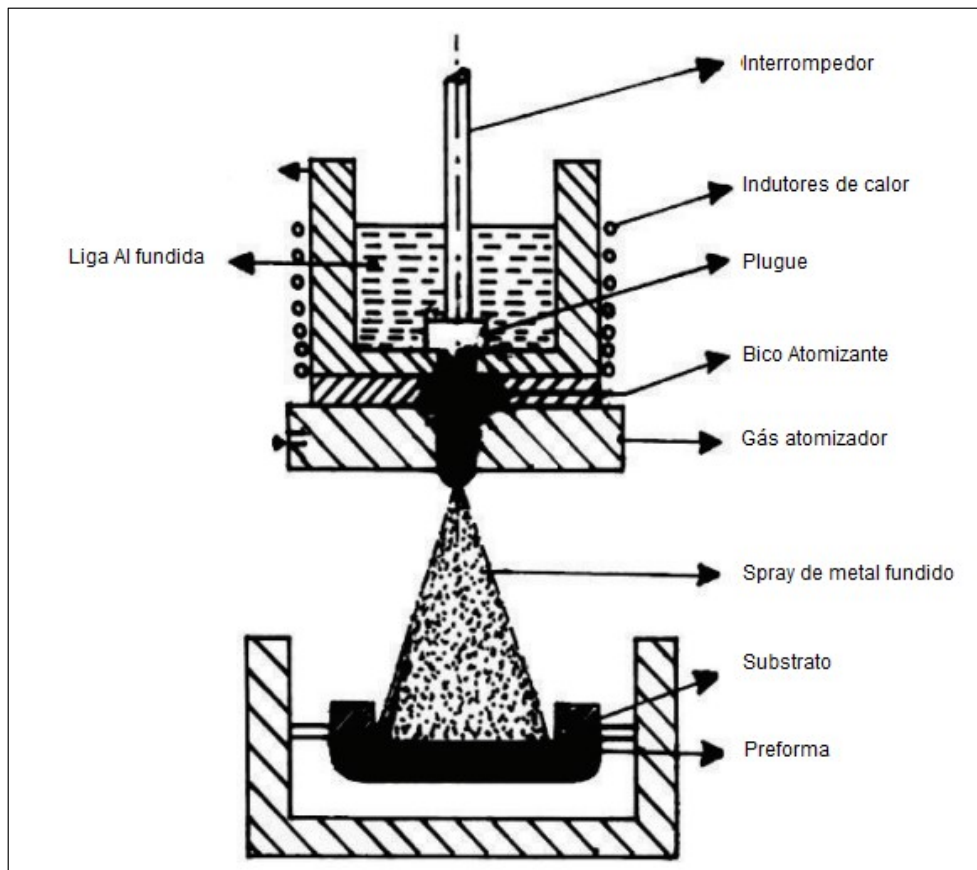
2.2.4 Técnica do Cadinho

O cadinho aquecido desencoraja a rápida perda de calor para o ambiente e ajuda a manter a temperatura uniforme (BIROL, 2010). Baseada no fato da existência de uma transição massa/mistura no fundido, que tem seu controle na forma do sólido e na energia relativa entre energia interfacial sólido-líquido, e a energia de contorno de grão de ângulo alto, a microestrutura não dendrítica poderia ser obtido apenas com resfriamento na concha (LEE, 2006).

2.2.5 Técnica do Spray Casting

É utilizado em ligas que não podem produzir microestrutura não-dendrítica de outra maneira, e consiste em um jato de gás que atomiza o fluxo em minúsculas gotículas (Figura 7), esta é uma rota cara e produz tarugos pequenos (MOHAMMED, 2013).

Figura 7 - Esquema de produção por Spray Casting



Fonte: Mohammed (2013), adaptado.

Existem vários parâmetros de processo como: fundir na mesma proporção de gás, taxa de fluxo do metal fundido, pressão de atomização do gás, a distância entre bico e superfície e a orientação da superfície. Tais parâmetros independentes podem ser controlados diretamente no processo, e tem relação direta com o refinamento de grão (RAJU et al. 2008).

2.2.6 Técnica do Refino Químico de Grãos

Agentes de nucleação heterogênea são adicionados a massa para suprimir o crescimento dendrítico e produzir grãos equiaxiais, finos, e melhor distribuídos. Entretanto, este processo deve ser aplicado juntamente com algum outro processo, e os agentes nucleantes só podem agir em alguns tipos de ligas, tornando essa rota aplicável a ligas metálicas específicas (MOHAMMED, 2013).

Nafisi e Ghomashchi (2006) averiguando os efeitos da adição de nucleadores Ti-B em uma liga Al-Si, constataram que a concentração de Ti cresce na interface, ao ponto que novos agente nucleantes possam se formar dentro da camada de interface. A presença de nucleadores (TiB_2) e nucleantes (Al_3Ti) dentro da liga mestra encoraja a formação de partículas equiaxiais, tais partículas rejeitam Ti as ovas interfaces formadas enquanto crescem, sendo a repetição desse mecanismo garante a constituição de um grão fino e mais equiaxiais.

2.2.7 Técnica do Near-Liquidus Casting

A deformação e refundição dos braços dendríticos ocorre durante o derrame do metal fundido devido ao entorno da massa que ainda contém áreas superaquecidas líquidas, a nucleação toma lugar no fundido onde apenas pequenas quantidades de partículas existem, se desenvolvendo em uma microestrutura globular fina (MOHAMMED, 2013). Apesar dos efeitos da taxa de resfriamento e composição serem importantes, o parâmetro principal para se obter a microestrutura desejada é a temperatura, o derrame realizado com parâmetros iguais e apenas alguns graus acima da temperatura de líquido resulta na formação de dendritas (Xia e Tausig, 1997).

2.2.8 Técnica de Ativação por Fundição Induzida por Tensão (SIMA)

Flemings (1991) caracteriza esse processo por um tarugo que sofre trabalho a frio a uma quantidade crítica tal que, durante o reaquecimento até a zona sólido-líquido se obtém a microestrutura esferoidal.

É um dos processos mais efetivos que estão disponíveis comercialmente, e a evolução da microestrutura nesse caso é resultado da refundição parcial do metal. Uma vez iniciada a recristalização, o metal líquido, com alto fluxo de infiltração de energia através dos contornos de grão, envolve partículas sólidas globulares na matriz líquida (MOHAMMED, 2013).

Jiang *et al.* (2003) propõe que como resultado do tratamento térmico isotérmico, primeiro o líquido apresenta uma alta energia de contorno, e então penetra nos novos sub-grãos e contorno de grão finalizando rapidamente o processo de fragmentação dendrítica, e a esferoidização começa assim que os grãos deformados se desintegram em novos grãos menores.

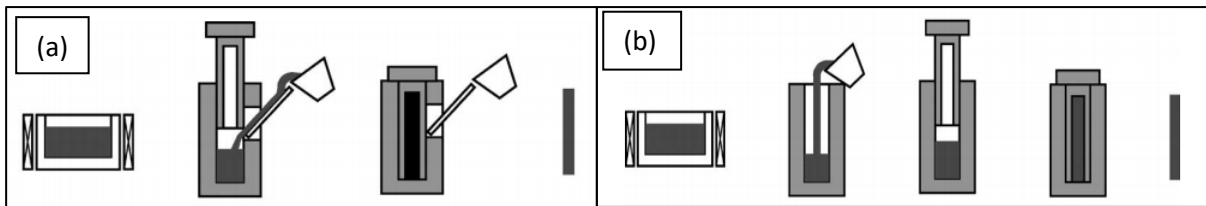
2.3 PROCESSOS DE THIXOFORMING

Os processos de thixoforming se agrupam em duas categorias principais, reofundição (*rheocasting*) e tixoforjamento (*thixoforjng*). A primeira, pela qual a matéria prima é utilizada diretamente no estado líquido logo após sua produção, sem necessidade de aquecimento posterior. A segunda categoria necessita de uma etapa de reaquecimento do metal, ou seja, a matéria prima é solidificada em tarugos e reaquecidas para ser conformadas, necessitando assim de uma etapa a mais.

2.3.1 Processo de reofundição (rheocasting)

Dois processos simples de rheocasting foram propostos por Haga e Kapranos (2002). Um processo usa um declive de resfriamento (Figura 8 (a)), onde se dá a formação da mistura sólido-líquido, e o segundo que utiliza uma baixa temperatura de sobreaquecimento (Figura 8 (b)), de 10 °C, para formar a mistura.

Figura 8 - Processo de reofundição com uso de rampa de resfriamento (a) e com baixo teor de superaquecimento (b).



Fonte: Haga e Kapranos (2002).

O estudo tem a finalidade de averiguar a influência da temperatura da cavidade inferior, na microestrutura formada no inserto superior e os resultados são apresentados na Tabela 1 (HAGA e KAPRANOS, 2002). A cavidade inferior foi pré-aquecida em um forno elétrico, e o inserto superior foi mantido em temperatura ambiente, no processo com baixo sobre-aquecimento a cavidade inferior foi mantida em 400°C.

Haga e Kapranos (2002) averiguaram que os cristais primários eram menores no processo usando um declive de resfriamento, bem como, possui propriedades mecânicas superiores. Os processos apresentados se tornam atrativos devido a simplicidade, não havendo necessidade de controle de temperatura. Ou agitação da mistura.

Tabela 1 – Efeito da temperatura da cavidade inferior em um inserto de cavidade superior e a microestrutura do lingote.

Rampa de resfriamento	Temperatura da cavidade inferior (°C)	Temperatura do metal fundido (°C)	Inserção de uma cavidade superior na cavidade inferior	Cristais primários esféricos
Sim ^a	350	620	Não	Sim
Sim ^a	350	650	Sim	Sim
Sim ^a	400	620	Sim	Sim
Sim ^a	450	620	Sim	Sim
Sim ^a	500	620	Sim	Sim
Não ^b	350	620	Sim	Sim

^a Processo usando uma rampa de resfriamento

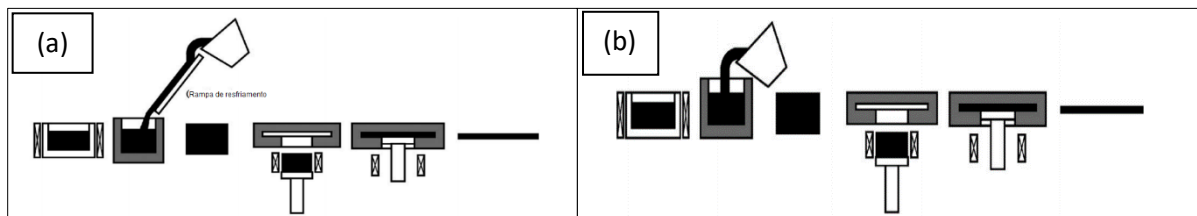
^b Processo usando baixo teor de superaquecimento

Fonte: Haga e Kapranos (2002).

Independente dos meios utilizados para se produzir a fase primária globular, a principal direção de desenvolvimento dos métodos de rheocasting podem ser resumidos em, não requerer equipamento de processamento adicional, nenhum procedimento adicional de refinamento de grão e nenhum ciclo adicional para se produzir a mistura (KIM, 2008).

2.3.2 Processo de tixoforjamento (thixoforging)

Figura 9 - Processo de Thixofforming usando rampa de resfriamento (a) e por *near-liquidus casting* (b).



Fonte: Haga e Kapranos (2002).

Haga e Krapanos (2002) propuseram também um processo simples de tixoforjamento, onde o preparo do tarugo por *near-liquidus casting* (Figura 9 (b)), ou por uso de rampa de resfriamento (Figura 9 (a)), foi estudado a fim de se obter a influência do preparo do tarugo de matéria prima na microestrutura final obtida. Os

tarugos solidificados foram então reaquecidos até a fração sólida aproximada de 50%, e então conformados na forma desejada . O que se averigua no estudo, é que a produção de tarugos por liquidus casting pode não esferoidizar os cristais primários durante o reaquecimento, necessitando de maior controle das operações, quando comparado com o método de produção por rampa de resfriamento.

2.4 CONDIÇÕES DO MATERIAL PARA PROCESSAMENTO SEMISSÓLIDO

Young (2000) caracteriza pelo aquecimento indutivo para reaquecer buchas a maior fração sólida possível, para que se obtenha uma performance mecânica máxima, sendo a estabilidade do processo e o controle elementos críticos para que se obtenha sucesso. A partir disso é proposto uma averiguação do material a ser utilizado:

- Química: Não influencia somente as propriedades mecânicas, mas também o comportamento de reaquecimento e fração sólida versus temperatura.
- Qualidade de superfície: Importante para que defeitos não sejam incluídos nas peças e também causa impacto na perda de radiação durante o reaquecimento, causando diferença na fração sólida atingida.
- Inclusões: Limitam o arrastão de efeitos nocivos as partes formadas.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica, afim de se averiguar o melhor método de produção utilizando semissólidos, bem como, ter base nas microestruturas esperadas, e parâmetros a ser utilizados.

Primeiro, realizou-se uma busca na plataforma do google acadêmico (scholar.google.com) com os termos *semi-solid metal (SSM)*, *semi-solid metal forming*, *thixoforming*. Em ordem de se obter revisões sobre o processamento semissólido, e se estabelecer a rota de pesquisa.

Após apuração do material obtido estabeleceu-se um mecanismo de busca, onde as palavras-chave foram agrupadas em quatro eixos de busca apresentados a seguir:

Eixo 1: Comportamento tixotrópico (*thixotropic behavior*): Para caracterização da formação e evolução da microestrutura reológica, e o caracterização do material no estado semissólido.

Eixo 2: Estrutura não-dendritica (*Non-dendritic structure*), rampa de resfriamento (*cooling slope*), Agitação (*stirring*), Fundição por spray (*spray casting*), refino químico (*chemical refinamento*): Modos de obtenção da microestrutura não-dendritica na produção de matéria prima.

Eixo 3: Processos de *thixoforming* (*thixoforming process*): Obtenção das rotas de produção de *thixoforming*.

Eixo 4: Reofundição (*rheocasting*), tixoforjamento (*thixoforging*): Caracterização das rotas de *thixoforming*.

Para cada palavra-chave pesquisada se realizou uma filtragem por data, estipulando o período de 19 anos entre 2000 e 2018, e por meio da combinação de palavras chave foi possível selecionar os principais títulos para leitura. Durante a leitura houve a necessidade de buscar por autores bases que são citados em diversos artigos, a busca então foi feita a partir da titulação do artigo disponível nas referências de títulos lidos. Na Tabela 2, estão presentes os valores de retorno para cada palavra chave.

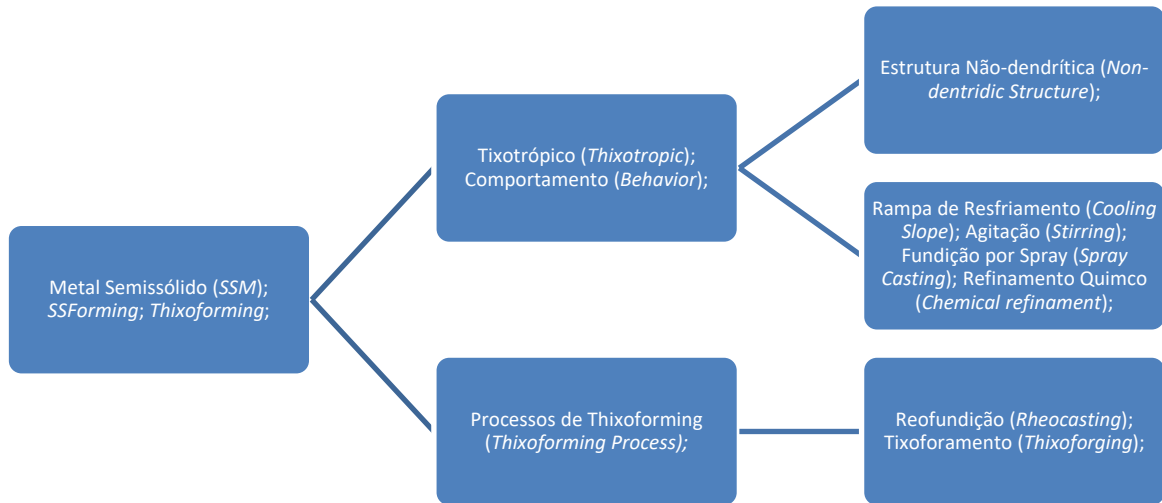
Tabela 2 – Número de retorno para cada palavra chave, e o retorno filtrado.

Palavra Chave	Retorno	Retorno Filtrado
Metal Semissólido (<i>SSM</i>);	393000	152000
<i>SSMForming</i> ;	37700	17300
<i>Thixoforming</i> ;	5390	4670
Tiotrópico (<i>Thixotropic</i>); Comportamento (<i>Behavior</i>);	34800	18400
Não dendrítica (<i>Non-dendritic</i>); Estrutura (<i>Structure</i>);	5190	4150
Resfriamento (<i>Cooling</i>); Rampa (<i>Slope</i>);	1050000	214000
Agitação (<i>Stirring</i>);	2440000	735000
<i>Spray</i> ; Fundição (<i>Casting</i>);	327000	108000
Químico (<i>Chemical</i>);Refinamento (<i>Refinement</i>); Grão (<i>Grain</i>);	206000	20000
Processo (<i>Process</i>); <i>Thixoforming</i> ;	4870	4260
Reofundição (<i>Rheocasting</i>);	4940	3750
Tixoforjamento (<i>Thixoforging</i>);	1730	1580

Fonte: O autor.

Como a plataforma do Google Acadêmico permite ranquear por relevância de publicação, estipulou-se que para as palavras chave com retorno na ordem de centenas de milhares, ou milhões, a relevância deveria ser de no mínimo 100 citações, e para palavras chave com retorno na ordem de milhares, a relevância mínima adotada foi de 10 citações. Após a filtragem e leitura dos resumos 64 artigos foram selecionados para a leitura, com base na contribuição e no retorno de citações gerados pela publicação. A Figura 12 mostra o fluxograma seguido para a obtenção de material bibliográfico.

Figura 10 - Fluxograma de pesquisa



Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

A pesquisa se baseou na obtenção de publicações relevantes que contribuíram no avanço de pesquisas a respeito do processamento semissólido. No Quadro 1 estão identificadas todas as publicações que serviram como base para esta revisão.

Durante o processo de busca, evidenciou-se que M. C. Fleming é o autor com maior relevância no tema, por ter sido pioneiro no estudo da matéria semissólida. E o maior desenvolvimento de pesquisas em processamento semissólida, ocorreu durante as duas últimas décadas, em países do oriente, como Irã, Índia, China e Japão.

Quadro 1 – Conjunto de artigos Obtidos na Revisão Sistemática de Literatura.

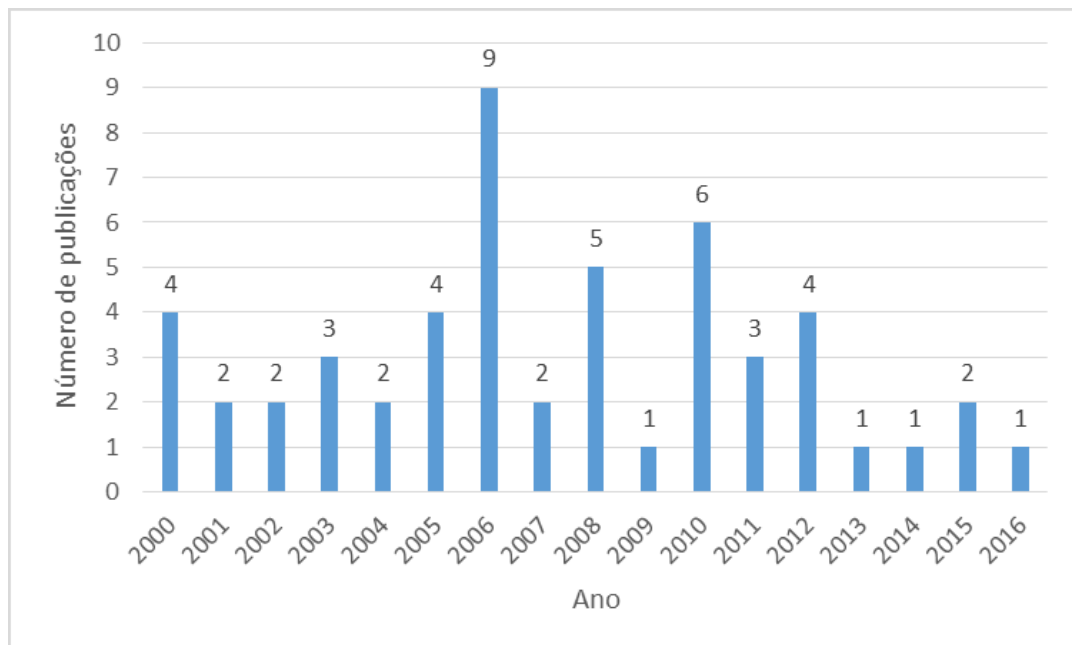
Processo	Autor
Reofundição	Li <i>et al.</i> (2010); Flemings <i>et al.</i> (1976);
Reofundição por fundição por spray	Raju <i>et al.</i> (2008);
Reofundição por <i>near-liquidus casting</i>	Pahlevani <i>et al.</i> (2006); Pyandeh (2015); Browne <i>et al.</i> (2010); Lee <i>et al.</i> (2006); Guo <i>et al.</i> (2006); Falak e Niroumand (2005); Haga e Kapranos (2002);
Reofundição utilizando a técnica do cadinho	Carr <i>et al.</i> (2007); Birol (2010);
Reofundição utilizando agitação magnetohidrodinâmica	Mao <i>et al.</i> (2006); Kin e Lee (2008); Grimmig <i>et al.</i> (2006);
Reofundição sob-pressão	Curle <i>et al.</i> (2011); Peter J. (2004); Yue (1996); Lu <i>et al.</i> (2012); Mao <i>et al.</i> (2010); Guan <i>et al.</i> (2016); Dao <i>et al.</i> (2012);
Reofundição utilizando refino químico de grão	Hong e Kim (2006);
Reofundição utilizando agitação mecânica	Giroto <i>et al.</i> (1987); Campillo <i>et al.</i> (2010); Melali <i>et al.</i> (2015); Kang <i>et al.</i> (2008); Canyook <i>et al.</i> (2010);
Reofundição utilizando uma rampa de resfriamento	Das <i>et al.</i> (2012); Guan <i>et al.</i> (2016);
Tixoforjamento	Lapkowski (1998); Kang e Jung (2000); Kang <i>et al.</i> (2001); Kim e Kang (2000); Modigell e Koke (2001); Modigell <i>et al.</i> (2004); Cezard e Sourmail (2008); Bleck <i>et al.</i> (2007);
Tixoforjamento por <i>near-liquidus casting</i>	Chayong <i>et al.</i> (2005); Kliauga e Ferrante (2005); Dong <i>et al.</i> (2003); Jiang e Luo (2006); Xia e Tausig (1998); Birol (2008); Becker <i>et al.</i> (2010);
Tixoforjamento por processo SIMA	Atkinson <i>et al.</i> (2008); Bolouri <i>et al.</i> (2011); Vaneetveld <i>et al.</i> (2006); Bolouri <i>et al.</i> (2010); Binesh e Aghaie-Khafri (2015); Jiang <i>et al.</i> (2014); Liu <i>et al.</i> (2003); Jiang <i>et al.</i> (2003);
Tixoforjamento com refino químico de grão	Nafisi e Gomashchi (2006);
Tixoforjamento com uso de rampa de resfriamento	Haga e Kapranos (2002);

Quadro 1 – Continuação.

Processo	Autor
Processamento semissólido	Nafisi e Gomashchi (2005); Young <i>et al.</i> (2000); Martinez e Flemings (2005); Birol (2009); Kang e Jung (1999); Chou <i>et al.</i> (2006); Rhaman <i>et al.</i> (2011); Mohammed <i>et al.</i> (2013); Hallstedt <i>et al.</i> (2006);

Fonte: O autor.

Em relação ao ano em que a publicação ocorreu, na Figura 11 fica evidenciado que o maior desenvolvimento de pesquisas nessa área se deu entre 2006 e 2010, sendo 2006 o ano com o maior número.

Figura 11 - Gráfico: Número de publicações por ano.

Fonte: O autor

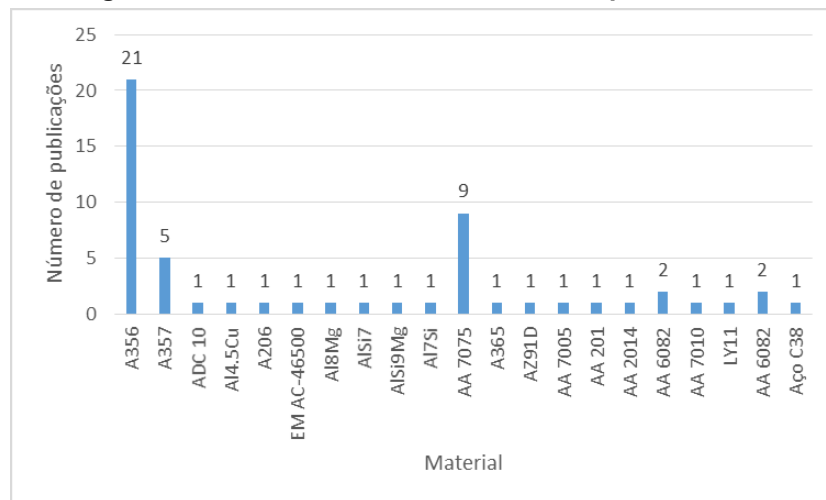
No Quadro 2 são apresentados os materiais processados por cada autor, e como fica evidenciado, as ligas de alumínio A356, A357 e AA 7075, foram as mais investigadas, devido a suas aplicações na indústria aeroespacial e na produção de peças para indústria automobilística. Todavia, encoraja-se a investigação do comportamento tixotrópico de outras ligas, e o estudo da melhor forma de processá-las.

Quadro 2 – Relação de autores e as ligas investigadas.

Autor	Liga
Pahlevani <i>et al.</i> (2006); Mao <i>et al.</i> (2006); Kim e Lee (2008); Grimmig <i>et al.</i> (2006); Hong e Kim. (2006); Lee <i>et al.</i> (2006); Carr <i>et al.</i> (2007); Das <i>et al.</i> (2013); Guo <i>et al.</i> (2006); Canyook <i>et al.</i> (2010); Yue e Chadwick (1996); Wu <i>et al.</i> (2012); Mao <i>et al.</i> (2010); Guan <i>et al.</i> (2016); Haga e Kapranos (2002); Kliauga e Ferrante (2005); Kang e Jung (2000); Canyook <i>et al.</i> (2010); Yue e Chadwick (1996); Wu <i>et al.</i> (2012); Mao <i>et al.</i> (2010); Guan <i>et al.</i> (2016); Dao <i>et al.</i> (2012); Falak e Niroumand (2005); Haga e Kapranos (2002); Chayong <i>et al.</i> (2005); Kliauga e Ferrante (2005); Kang e Jung (2000); Kang <i>et al.</i> (2001); Kang e Jung (1999); Nafisi e Ghomashchi (2006); Haga e Kapranos (2002);	A356
Birol (2010); Kang <i>et al.</i> (2008); Chen <i>et al.</i> (2012); Jiang <i>et al.</i> (2014); Basner (2000); Kim e Kang. (2000)	A357
Chayong <i>et al.</i> (2005); Dong <i>et al.</i> (2003); Atkinson <i>et al.</i> (2008); Bolouri <i>et al.</i> (2011); Vaneetveld <i>et al.</i> (2006); Bolouri <i>et al.</i> (2010); Binesh e Aghaie-Khafri (2015); Liu <i>et al.</i> (2003); Li <i>et al.</i> (2010);	AA 7075
Liu <i>et al.</i> (2003); Birol (2008);	AA 6082
Hong e Kim. (2006);	ADC 10
Martinez e Flamings (2005);	Al4.5Cu
Lee <i>et al.</i> (2006);	A206
Campillo <i>et al.</i> (2010);	EM AC-46500
Melali <i>et al.</i> (2015);	Al8Mg
Dao <i>et al.</i> (2012);	AlSi9Mg
Falak e Niroumand (2005);	Al7Si
Jiang e Luo (2007);	AZ91D
Jiang <i>et al.</i> (2014);	AA 7005
Liu <i>et al.</i> (2003);	AA 201
	AA 2014
	AA 6082
	AA 7010
Jiang <i>et al.</i> (2003);	LY11
Birol (2008);	AA 6082
Becker (2009);	Aço C38

Fonte: O autor.

Na Figura 12 é apresentada a relação entre as ligas pesquisadas e o número de publicações encontrados sobre as mesmas, demonstrando a necessidade de maior pesquisa nas demais ligas.

Figura 12 - Gráfico: Material X Número de publicações

Fonte: O autor

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.2.1 Liga A356

Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades mecânicas do alumínio A356, fundido em areia e processado por *thixoforming* por 5 rotas diferentes. O que se evidencia é o aumento significativo na resistência a tração e na ductilidade do material, uma vez que é possível maiores deformações até a ruptura. Através dos processos de refundição é possível obter propriedades mecânicas superiores quando comparado com os processos de tixoforjamento, mas fica evidente que a rota de produção da matéria prima semissólida é mais importante que seu processamento, uma vez que a produção de matéria-prima com o uso da rampa de resfriamento gerou resultados superiores quando comparado com a produção com o baixo teor de superaquecimento (*near-liquidus casting*). A produção por refundição sob-pressão (RSC) é a que obtém a maior resistência à tração, porém, a ductilidade diminui devido ao refino de grão que ocorre.

Tabela 3 - Propriedades da liga A356.

Produção	Tratamento Térmico	Resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)
Fundição em areia (METAL HANDBOOK, 1988)	T6	172	3

Tabela 3 –Continuação.

Produção	Tratamento Térmico	Resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)
Reofundição com rampa de resfriamento (HAGA e KAPRANOS, 2002)	-	310	18
Tixoforjamento com rampa de resfriamento (HAGA e KAPRANOS, 2002)	-	293	15
Reofundição com baixo teor de superaquecimento (HAGA e KAPRANOS, 2002)	-	290	12
Tixoforjamento com baixo teor de superaquecimento (HAGA e KAPRANOS, 2002)	-	291	12
Reofundição sob pressão RSC (rheo-squeeze casting) (LIU ET AL. 2012)	-	338	8

Fonte: O autor.

4.2.2 Liga AA 7075

Na tabela 4, comparando as propriedades da liga processada por fundição em areia com as propriedades da liga tixoforjada por *near-liquidus casting*, ambas tratadas termicamente, se observa um aumento superior a 80% na resistência a tração enquanto a ductilidade é mantida. O tixoforjamento com uso de rampa de resfriamento causa um refino de grão, o que aumenta a resistência a tração mas diminui a ductilidade do material. Bolouri *et al.* (2010) justifica a diminuição da ductilidade quando a liga é processada por reofundição sob alta pressão, pela presença de poros grandes, o que reduz a deformação até a fratura, todavia é possível obter um aumento de mais de 100% na resistência à tração, sendo necessário resolver problemas de enchimento do molde.

Tabela 4 – Propriedades da liga AA 7075

Produção	Tratamento Térmico	Resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)
Fundição em areia (METAL HANDBOOK, 1988)	T6	220-250	17
Tixoformada por <i>near-liquidus casting</i> (DONG et al. 2003)	-	357	9,3
	T6	468	17
Tixoformada com uso de rampa de resfriamento (Liu et al. 2003)	T6	570	11
Reofundição sob alta pressão (BOLOURI et al. 2010)	T6	468	17

Fonte: O autor.

4.2.3 Liga A357

A liga A357, como demonstrado na Tabela 5, atinge melhores propriedades mecânicas quando processada pela técnica de ativação por fundição induzida (SIMA), devido a capacidade de se produzir grãos globulares com microestrutura homogênea, sem a presença de dendritas, produzindo um material mais resistente e dúctil quando comparado com a liga processada por reofundição. Todavia, o material processado por reofundição possui uma resistência à tração 90% maior que a liga processada por fundição em areia, com pouca alteração na deformação do material até a ruptura.

Tabela 5 - Propriedades da liga A357

Produção	Tratamento Térmico	Resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)
Fundição em areia (METAL HANDBOOK, 1988)	-	172	5
Tixoforjado por processo SIMA (CHEN et al., 2012)	-	382	21,2

Tabela 5 – Continuação.

Produção	Tratamento Térmico	Resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)
Reofundição (BASNER, 2000).	-	242-251	6,5-8,6
	T6	335	4

Fonte: O autor.

4.2.4 Efeito dos parâmetros de processamento

Dao *et al.* (2012) estudou o efeito da variação de parâmetros no processamento semissólido de alumínio AlSi9Mg, por meio de *Squeeze Casting*, na fabricação de bielas, na Tabela 6 são apresentados os parâmetros utilizados.

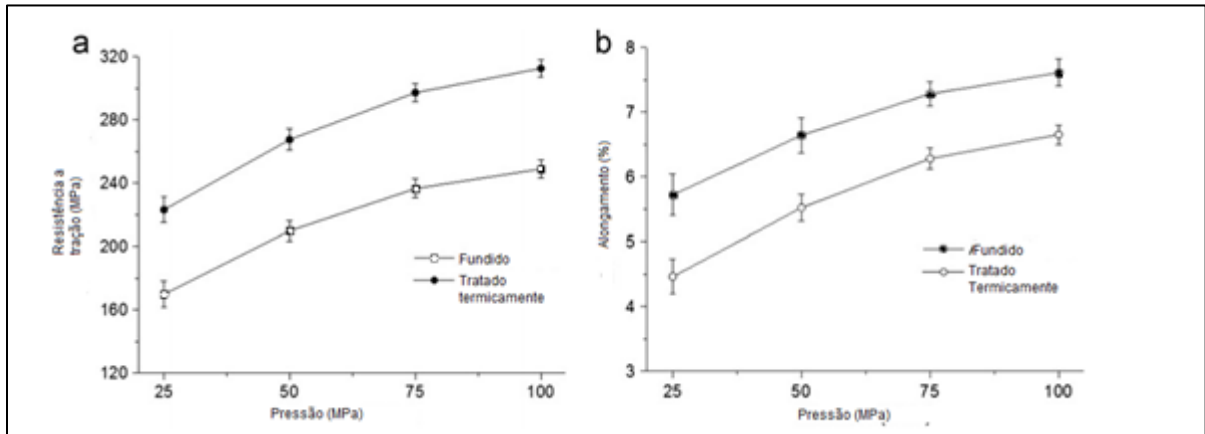
Tabela 6 - Parâmetros experimentais utilizados

	Parâmetros Variáveis	Parâmetros Fixos
Pressão de injeção. (Mpa)	20, 50, 75, 100	Tp=575°C; Td=250°C
Temperatura de derrame, Tp . (°C)	570, 575, 580	Td=250°C; p=100MPa
Temeratura do molde, Td. (°C)	200, 250, 300 , 350	Tp=575°C; p=100MPa

Fonte: Dao *et al.* (2012), adaptado.

Na Figura 13 são apresentadas as propriedades mecânicas obtidas de acordo com a variação da pressão de injeção. Nota-se que, o aumento de resistência a tração, e a taxa de alongamento tende-se a normalizar em preções acima de 100 MPa. Apesar de ser um fator variável de acordo com o metal processado, toda liga possui um ponto máximo de pressão de injeção. Lu *et al.* (2012) chega em resultados próximo, e postula que com pressões superiores os dispositivos de processamento podem ser severamente afetados.

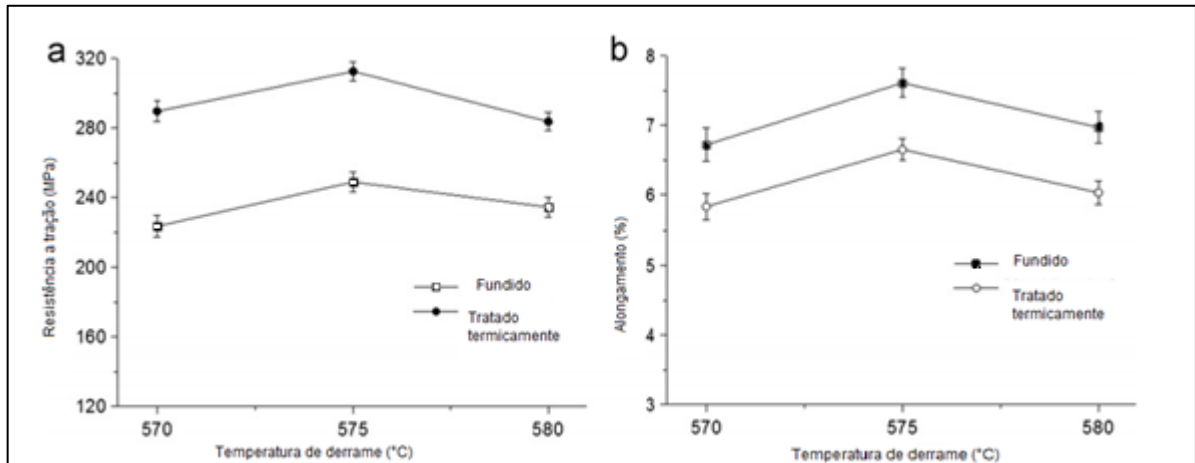
Figura 13 - Efeito da pressão de injeção na resistência à tração (a) e na deformação (b)



Fonte: Dao et al. (2012).

A variação da temperatura (Figura 14) de derrame revela que existe um ponto ótimo de derrame, onde a microestrutura esférica é alcançada, como demonstrado na Figura 16. Nota-se uma queda de propriedades com temperatura de derrame superior a 575°C, isso se deve ao fato de haver pouca fração sólida, e poucos nucleadores na mistura, o que acarreta em perda de características obtidas na produção da matéria prima (DAO *et al.* 2012).

Figura 14 - Efeito da temperatura de derrame na resistência a tração (a) e na deformação (b).

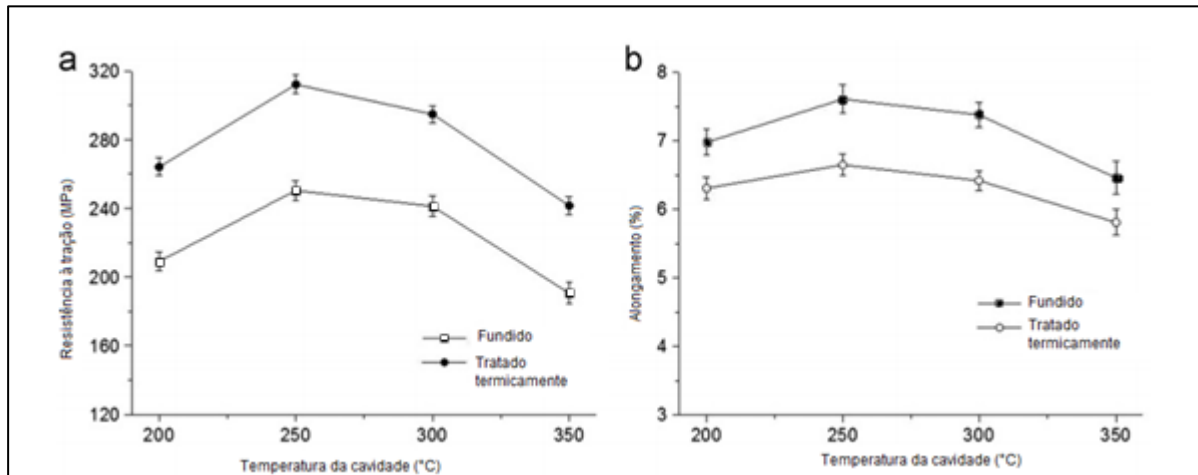


Fonte: Dao et al. (2012).

O efeito da temperatura da cavidade do molde é demonstrado na Figura 15. Constata-se que, assim como para a temperatura de derrame, existe um ponto ótimo de temperatura para a cavidade do molde. Temperaturas inferiores irão ocasionar um resfriamento muito rápido, o que acarreta na formação de partículas

primárias não esféricas. Por outro lado, temperaturas superiores ao ponto ótimo reduz a taxa de resfriamento, produzindo grãos maiores, porém esféricos (DAO *et al.* 2012).

Figura 15 - Efeito da temperatura do molde na resistência a tração (a) e na deformação (b)



Fonte: Dao *et al.* (2012), adaptado.

Como é possível observar, existe um ponto ótimo para os parâmetros de processamento, sendo necessário averiguar quais os melhores parâmetros de processamento de um material antes da execução, para que se obtenha as melhores propriedades mecânicas possível.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de desenvolver revisão sistemática de literatura por meio de um processo estruturado para se determinar os principais autores, processos, ligas e propriedades mecânicas obtidas com o processamento semissólido se destacam as seguintes conclusões:

O processamento semissólido possui grande aplicação na produção de peças com formatos complexos com melhores propriedades mecânicas, devido ao comportamento reológico e o refino de grão. Entretanto os passos para produção de matéria prima devem ser realizados sob forte controle dos parâmetros de produção em ordem de obter o tamanho de grão desejado, e evitar o aprisionamento de gases e incrustações.

Os estudos nessa área devem seguir o princípio de barateamento dos custos de produção, eliminando etapas, e diminuindo a necessidade de equipamentos, para que se obtenha grãos refinados e equiaxiais. Seguindo alguns passos antes da escolha de processo:

Os passos recomendados pela literatura antes da escolha do processo semissólido são: análise do comportamento tixotrópico do material, escolha do meio de produção da matéria-prima, controle do material para produção de matéria-prima, escolha do processo de *thixoforming* para que se obtenha uma peça de alta qualidade, estabelecimento de parâmetros de processamento da matéria-prima semissólida para que se alcance as propriedades mecânicas desejadas.

Foram obtidos 64 artigos na revisão sistemática de literatura, esses trabalhos compreendem o período de 2000 a 2018, foram observadas 20 ligas, das quais, 18 são ligas de alumínio, e duas de aço. Dentre as ligas observadas, a liga de alumínio A356 é a que foi mais estudada em processamento semissólido, sendo possível obter um aumento de 100% na resistência a tração, e quadruplicar a ductilidade do material. A segunda liga com maior número de publicações é a liga de alumínio AA 7075, onde foi possível se obter um ganho maior que 100% na resistência a tração. Tais ligas, tem sido, amplamente estudadas no processamento semissólido por sua aplicação comercial, entretanto o estudo de outras ligas faz-se necessário

uma vez que o processamento semissólido é uma técnica promissora para aplicações industriais.

Como sugestão de trabalhos futuros, sugere-se a produção de uma matriz para processamento semissólido, com o material doado, e a execução de maiores estudos experimentais nessa área.

REFERÊNCIAS

ATINKINSON, H. V.; BURKE, K.; VANEETVELD, G. Recrystallisation in the semi-solid state in 7075 aluminium alloy. **Materials Science and Engineering**. Bélgica, v.A490, p.266-276, 2008.

BASNER, Tim. Rheocasting of semi-solid A357 aluminum. **SAE 2000 world congress**. Detroit, Michigan, 2000

BOLOURI, Amir. SHAHMIRI, Mohammad. KANG, C.G. Study on the effects of the compression ratio and mushy zone heating on the thixotropic microstructure of AA 7075 aluminum alloy via SIMA process. **Journal of alloys and Compounds**. República da Coreia, v. 509, p. 402-408, 2011.

BOLOURI, A.; SHAHMIRI, M.; CHESHMEH, E. N. H. Microstructural evolution during semisolid state strain induced melt activation process of aluminum 7075 alloy. **Trans Nonferrous Metals Society of China**. China, v.20, p.1663-1671, 2010.

BIROL, Yucel. Internal cooling process to prepare aluminium rheocasting feedstock. **International journal of cast metals research**. Turquia, v.23, n.01, p. 55-59, 2010.

BIROL, Yucel. Semi-solid processing of the primary aluminium die casting alloy A365. **Journal of Alloys and Compounds**. Turquia, v.473, p.133-138, 2009.

BIROL, Yucel. Thixoforging experiments with 6082 extrusion feedstock. **Journal of Alloys and Compounds**. Turquia, v.445, p.178-185, 2008.

BINESH, B.; AGHAIE-KHAFRI, M. Microstructure and Texture Characterization of 7075 Al Alloy during the SIMA Process. **Materials Characterization**. Irã, 2015.

BLECK, W.; HIRT, G.; PÜTTGEN, W. Thixoforming of Steels – A Status Report. **Materials Science Forum**. Alemanha, v.539-543, p.4297-4302, 2007.

BROWNE, D. J.; HUSSEY, M. J.; CARR, A. J. Towards Optimisation of the Direct Thermal Method of Rheocasting. **University College Dublin**. Irlanda.

CAMPBELL, J. **Complete casting handbook**: Metal casting process, metallurgy, techniques and design. Kidlington: Oxford, 2011.

CAMPILLO, M.; BAILE, M. T.; MENARGUES, S.; FORN, A. The Effect of Injection Conditions on the Structural Integrity of the Components Produced by Semi-solid Rheocasting. **Intj Mater Form**. Espanha, v.3, p.751-754, 2010.

CANYOOK, R. et al. Evolution of microstructure in semi-solid slurries of rheocast aluminum alloy. **Transaction of nonferrous metals society of China**. China, v.20, p.1649-1655, 2010.

CARR, A. J. et al. Modelling and experimental development of the direct thermal method of rheocasting. **International journal of cast metals research**. Dublin, v.20, n.06, p.325-332, 2007

CEZARD, P.; SOURMAIL, T. Thixoforming of Steel: A State of the Art from an Industrial Point of View. **Solid State Phenomena**. França, v.141-143, p.25-35, 2008.

CURLE, U. A.; MOLLER, H.; WILKINS, J. D. Shape rheocasting of unmodified Al-Si binary eutectic. **Materials Letters**. Africa do Sul, v.65, p. 149-1472, 2011.

CHEN, Gang. DU, Zhiming. CHENG, Yuansheng. Effect of mechanical conditions on the microstructures and mechanical properties of thixoformed Al-Cu-Si-Mg alloy. **Materials and Design**. China, v.35, p. 774-781, 2012

DAO, Vanluu.; ZHAO, Shengdun.; LIN, Wenjie.; ZHANG, Chenyang. Effect of process parameter on microstructure and mechanical properties in AlSi9Mg connecting-rod fabricated by semi-solid squeeze casting. **Materials Science & Engineering A**. China, v.558, p.95-102, 2012

DAS, Prosentijit et al. Studies on rheocasting using cooling slope. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.192-193, p. 341-346, 2013.

DONG, J. et al. Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075. . **Materials science and engineering**. China, v.A345, p.234-242, 2003.

FALAK, P.; NIROUMAND, B. Rheocasting of Al-Si alloy. **Scripta Materialia**. Irã, n.53, p.53-57, 2005.

FLEMINGS, M. C.; RIEK, R. G.; YOUNG, K. P. Rheocasting. **Materials science and engineering**. Países Baixos, n.25, p.103-117, 1976.

Ghomashchi, M. R.; Vikhrov, A. Squeeze casting: an overview. **Journal of Materials Processing Technology**. Austrália, v.101, p.1-9, 2000.

GIROT, F. A.; ALBINGRE, J. M. et al. Rheocasting Al Matrix Composites. **Journal of Metals**. França, 1987.

GOVENDER, G.; CHOU, Hsis-Nan; IVANCHEV, L. Opportunities and Challenges for Use of SSM Forming In The Aerospace Industry. **Solid State Phenomena**. Africa do Sul, v.116-117, p.92-95, 2006.

GRIMMING, T. et al. Potential of the rheocasting process, demonstrated on different aluminum based alloy systems. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.116-117, p.484-488, 2006.

GUAN, R. G. et al. Microstructure and properties of squeeze cast A356 alloy processed with a vibrating slope. **Journal of Materials Processing Technology**. China, v.229, p. 514-519, 2016.

GUO, H. M.; YANG, X. J.; HU, B. Rheocasting of A356 Alloy by Low Superheat Pouring with a Shearing Field, **ACTA Metallurgica Sinica**. China, v.19, n.5, p.328-334, 2006.

HAGA, Toshio; KAPRANOS, P. Simple rheocasting processes. **Journal of Materials Processing Technology**. UK, v.130-131, p. 594-598, 2002.

HAGA, Toshio; KAPRANOS, P. Billetless simple thixoforming process. **Journal of Materials Processing Technology**. UK, v.130-131, p. 581-586, 2002.

HONG, C.P.; KIM, J.M. Development of an advanced rheocasting process and its applications. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.116-117, p. 44-53, 2006.

JIANG, ju-fu.; LUO, Shou-jing. Preparation of semi-solid billet of magnesium alloy and its thixoforming. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. China, v.17, p.46-50, 2007.

JIANG, Jufu.; WANG, Ying.; ATKINSON, H. V. Microstructural coarsening of 7005 aluminum alloy semisolid billets with high solid fraction. **Materials Characterization**. China, v.90, p.52-61, 2014.

JIANG, Haitao; LI, X.; XIONG, A.; LI, M. Fabrication and Microstructure Evolution of Semi-Solid LY11 Alloy by SIMA. **Journal of Materials Engineering and Performance**. China, v.12, p.249-253, 2003.

KANG, Yonglin et al. Study on Microstructure-Processing Relationship of a Semisolid Rheocasting A357 Aluminum Alloy. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.141-143, p.157-162, 2008.

KANG, C. G.; JUNG, H. K. A Study on a Thixoforming Process Using the Thixotropic Behavior of an Aluminum Alloy with an Equiaxed Microstructure. **Journal of Materials Engineering and Performance**. China, v.9, p.530-535, 2000.

KANG, C. G.; JUNG, H. K.; JUNG, K. W. Thixoforming of an aluminum component with a die designed by process simulation. **Journal of Materials Processing Technology**. Coreia do Sul, v.111, p.37-41, 2001.

KANG, C. G.; CHOI, J. S.; KIM, K. H. The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semi-solid aluminum alloy. **Journal of Materials Processing Technology**. Coreia do Sul, v.88, p.159-168, 1999.

KAPRANOS, Plato et al. Thixo-extrusion of 5182 Aluminum Alloy. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.141-143, p.115-120, 2008

KIM, Shae K.; LEE, Young-Chul. Development of in-mold rheocasting process. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.141-143, p. 181-184, 2008.

KIM, N. S.; KANG, C. G. An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixoforming process. **Journal of Materials Processing Technology**. Coreia do Sul, v.103, p.237-246, 2000.

KLAUGA, A. M.; FERRANTE, M. Liquid formation and microstructural evolution during re-heating and partial melting of an extruded A356 aluminium alloy. **Acta Materialia**. Brasil, v.53, p.345-356, 2005.

LEE, Jin-Kyu et al. Development of in-ladle direct thermal control (DTC) rheocasting process. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.116-117, p. 518-521, 2006.

LI, Nan; XING, Shuming; BAO, Peiwei. Simulation and research on the rheocasting process of 7075 aluminum alloy. **Advanced Materials Research**. China, v.129-131, p.482-489, 2010.

LIU, D. et al. Microstructura evolution and tensile mechanical properties of thixoformed high performance aluminium alloys. **Materials Science and Engineering**. v. A361, p. 213-224, 2003

LÜ, Shulin et al. The indirect ultrasonic vibration process for rheo-squeeze casting of A356 aluminum alloy. **Journal of Materials Processing Technology**. China, v.212, p.1281-1287, 2012.

MAO, Weimin, Research on the composite slurry preparation and rheocasting of aluminum alloy. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.116-117, p. 410-416, 2006.

MARTINEZ, R.A.; FLEMINGS, M. C. Evolution of particle morphology in semisolid processing. **Metalurgical and Material Transaction**. v. 36A, p. 2205-2210, 2005.

MELALI, P.; ASHTIJOO, P.; NIROUMAND, B. Effects of stirring speed and flow pattern on the microstructure of a rheocast Al- Mg alloy. **Association of Metallurgical Engineers of Serbia**. Servia, v.21, n.01, p. 35-43, 2015.

METAL HANDBOOK, 9ª ED. VOL.15, 1988, **ASM International, Materials Park**, p. 767.

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**. Volume 2013, ID do artigo 752175.

MODIGELL, M.; KOKE, J. Rheological modelling on semi-solid metal alloys and simulation of thixocasting processes. **Journal of Materials Processing Technology**. Alemanha, v.111, p.53-58, 2001.

MODIGELL, M.; HUFSCHMIDT, M.; PETERA, J. Two-Phase Simulations as a Development Tool for Thixoforming Processes. **Fundamentals of Thixoforming Processes**. Alemanha, v.75, n. 8/9, p.513-518, 2004.

NAFISI, S.; GHOMASHCHI. Semi-solid metal processing routes: An overview. **Canadian Metallurgical Quarterly**. Canada, v.44, n.03, p.289-304, 2005.

NAFISI, S.; GHOMASHCHI, R. Grain refining of conventional and semi-solid A356 Al-Si alloy. **Journal of Materials Processing Technology**. Canada, v.174, p.371-383, 2006.

PAHLEVANI, F. et al. Development of cup-cast method; semi-solid slurry preparation without external stirring force. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.116-117, p.358-361, 2006.

PAYANDEH, Mostafa. Rheocasting of Aluminium Alloys: Slurry Formation, Microstructure, and Properties. **School of Engineering Jonkoping University**. Suécia, 2015.

RAHMAN, M. M. et al. Powder material parameters establishment through warm forming route. **Materials and Design**. Malásia, v.32, p.264-271, 2011.

RAJU, K.; OJHA, S. N.; HARSHA, A. P. Spray forming of aluminum alloys and its composites: an overview. **Journal of Material Science**. Índia, v.43, p.2509-2571, 2008.

VANEETVELD, G. et al. Thixoforming of 7075 aluminium alloys at high solid fraction. **Solid State Phenomena**. Suíça, v.116-117, p.762-765, 2006.

UGGOWITZER, Peter J.; KAUFMANN, Helmut. Evolution of Globular Microstructure in New Rheocasting and Super Rheocasting Semi-Solid Slurries. **Steel Research int**. Suíça, v.75, n. 8/9, p.525-530, 2004.

XIA, K.; TAUSIG, G. Liquidus casting of a wrought aluminum alloy 2618 for thixoforming. **Materials Science and Engineering**. Austrália, v.A246, p.1-10, 1998.

YOUNG, K. SSM (semi-solid metal) Technological alternatives for different applications. **Metallurgical Science and Technology**. EUA, v.18, n.02, p.11-15, 2000.

YUE, T. M.; CHADWICK, G. A. Squeeze casting of light alloys and their composites. **Journal of Materials Processing Technology**. EUA, v.58, p.302-307, 1996.