

A INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS LIGAS DE FeSiMg NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO FERRO FUNDIDO NODULAR.

Márcio A. Rocha Júnior
Taner Vitor Souza Lelis
Failon da Silva Mendonça

Resumo

Este estudo investiga a influência da granulometria das ligas de FeSiMg na microestrutura, propriedades térmicas e mecânicas do ferro fundido nodular. Foram avaliadas duas faixas de granulometria, 2-12 mm e 10-25 mm, utilizando as ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611, em condições controladas de processos de fundição. Os resultados mostram que ambas as granulometrias podem produzir um material com nível satisfatório de nodularidade e propriedades similares, sugerindo que a granulometria menor pode ser uma alternativa viável na indústria. A análise térmica, metalográfica e de ensaios mecânicos revelou que a granulometria mais fina favorece uma rápida dissolução e redução na volatilização do magnésio, contribuindo para maior controle do processo de nodularização. Recomenda-se a realização de estudos adicionais com diferentes massas térmicas e adição de elementos nucleantes, como o zircônio, para otimizar ainda mais o desempenho do ferro fundido nodular.

Abstract

This study explores the influence of FeSiMg alloy granulometry on the microstructure and thermal-mechanical properties of ductile iron. Two granulometry ranges, 2-12 mm and 10-25 mm, were evaluated using RIMAlloy 911 and RIMAlloy 611 alloys under controlled casting conditions. Results indicate that both granulometries can produce ductile cast iron with comparable nodularity levels and mechanical properties, suggesting that the finer granulometry may serve as a viable alternative in industry. Thermal analysis, metallography, and mechanical testing demonstrated that smaller particles facilitate faster dissolution and reduce magnesium volatilization, enhancing process control during nodularization. Further studies involving different thermal masses and the addition of nucleating elements such as zirconium are recommended to optimize the performance of ductile iron production.

1 Introdução

O ferro fundido nodular é amplamente utilizado na indústria devido à sua excelente combinação de resistência mecânica, ductilidade e usinabilidade, tornando-se um material essencial para diversos setores, como automotivo, ferroviário e de bens de capital. A obtenção dessas propriedades está diretamente ligada ao processo de nodularização, no qual o magnésio é o elemento mais utilizado na formação de grafita esferoidal, influenciando diretamente a microestrutura e o desempenho mecânico do material.

Dentre as diversas ligas nodularizantes disponíveis, o ferro-silício-magnésio (FeSiMg) se destaca como a principal opção industrial, sendo amplamente utilizado devido ao seu custo competitivo e à eficiência na introdução do magnésio na matriz metálica. Essa liga apresenta diferentes formulações e granulometrias, que afetam diretamente o processo de absorção do magnésio, a nucleação da grafita e, conseqüentemente, as propriedades térmicas e mecânicas do ferro fundido nodular. A escolha da granulometria adequada é um fator crítico para otimizar a eficiência do tratamento e garantir a repetibilidade dos resultados metalúrgicos.

Com o crescente aumento da demanda por peças em ferro fundido nodular, há uma busca constante por soluções que equilibrem qualidade e custo de produção. A Rima Industrial, uma das principais fornecedoras de FeSiMg no mercado, oferece diferentes composições e granulometrias para atender às necessidades específicas da indústria. Tradicionalmente, a granulometria 10-25 mm é amplamente utilizada, pois oferece boas condições de absorção do magnésio e estabilidade no processo de fusão. No entanto, a granulometria 2-12 mm, apesar de ser menos utilizada no mercado, pode apresentar desempenho semelhante em relação à eficiência de nodularização e às propriedades finais do material.

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o desempenho das ligas de FeSiMg denominadas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611 em duas granulometrias distintas (2-12 mm e 10-25 mm), verificando sua influência nas propriedades térmicas, microestruturais e mecânicas do ferro fundido nodular. A partir da análise térmica, ensaios mecânicos e caracterização metalográfica, pretende-se demonstrar que a granulometria 2-12 mm pode oferecer condições equivalentes às da granulometria 10-25 mm, possibilitando novas opções de escolha para a indústria de fundição.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Princípios da Inoculação e do Tratamento com FeSiMg no Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro fundido dúctil, destaca-se por suas propriedades mecânicas superiores, como elevada resistência e ductilidade, em comparação ao ferro fundido cinzento. Sua principal característica microestrutural é a presença de grafita em forma esferoidal, que confere melhor resistência ao impacto, maior capacidade de absorção de energia e melhores propriedades de usinabilidade (MALFATTI; CUNHA, 2019).

A obtenção dessa estrutura esferoidal ocorre por meio do processo de nodularização, no qual elementos nodularizantes são adicionados ao ferro fundido líquido. O ferro-silício-magnésio (FeSiMg) é a liga nodularizante mais amplamente utilizada na indústria devido à sua eficiência na introdução de magnésio, custo e estabilidade no processo de fusão (MALFATTI; CUNHA, 2019).

Durante o tratamento nodularizante, o FeSiMg é introduzido no metal líquido, onde o magnésio atua reduzindo a tensão interfacial entre a grafita e a matriz metálica, promovendo a nucleação esferoidal da grafita. Esse processo deve ser cuidadosamente controlado para evitar a queima excessiva do magnésio e garantir uma taxa de absorção eficiente. A reação entre o magnésio e o ferro fundido pode ser intensa, com desprendimento de gases e formação de escórias, tornando necessário o uso de técnicas adequadas para minimizar perdas e garantir a reprodutibilidade do processo (KISS, 2021).

A eficiência do tratamento com FeSiMg depende de fatores como a composição da liga, a temperatura do metal líquido, o método de adição e a granulometria da liga nodularizante. Diferentes formulações e granulometrias influenciam a taxa de dissolução do magnésio, afetando a formação da grafita e a qualidade final do ferro fundido nodular (KISS, 2021).

2.2 Influência das Ligas de Magnésio

2.2.1 Efeito da Composição Química das Ligas de FeSiMg na Absorção do Magnésio

A liga RIMAlloy 911 e a RIMAlloy 611 são variações de ligas FeSiMg desenvolvidas para o tratamento nodularizante do ferro fundido. A principal diferença entre essas duas ligas reside no teor de magnésio, que é ajustado conforme as necessidades específicas do processo. As diferenças na composição química de ambas as ligas estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química das Ligas.						
RIMAlloy 911 (Liga 1)	Mg	Ca	TR	Al	MgO	Si
Faixa de especificação %	8,50-9,50	0,8-1,5	0,8-1,2	< 0,8	< 0,5	43-48
RIMAlloy 611 (Liga 4)	Mg	Ca	TR	Al	MgO	Si
Faixa de especificação %	5,50-6,50	0,8-1,5	0,8-1,2	< 0,8	< 0,5	43-48

*TR é a nomenclatura convencionalmente utilizada no setor de fundição para se referir às terras raras, normalmente representadas pela combinação dos elementos cério (Ce) e lantânio (La).

As ligas nodularizantes desempenham papel fundamental no controle da morfologia da grafita em ferros fundidos nodulares, influenciando diretamente a absorção do magnésio, a formação de escória e a qualidade final da peça fundida. Dentre as ligas amplamente utilizadas no setor metalúrgico, destacam-se a RIMAlloy 911 e a RIMAlloy 611, ambas desenvolvidas para atender diferentes demandas operacionais em processos de nodularização. Na Figura 1 apresenta-se um comparativo visual das duas granulometrias, 10-25 mm e 2-12 mm utilizadas no processo.

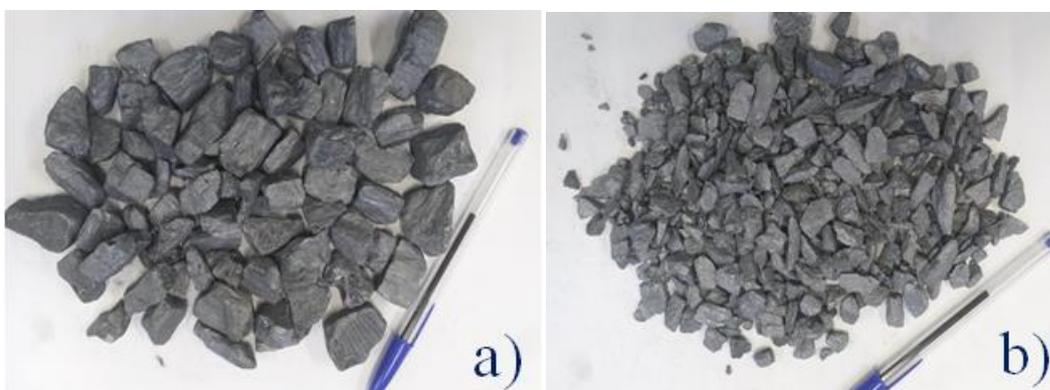


Figura 1 – a) Liga de FeSiMg com granulometria 10-25mm; b) Liga de FeSiMg com granulometria 2-12mm.

RIMAlloy 911

A liga RIMAlloy 911 é uma composição de FeSiMg com teor médio-alto de magnésio, além de um balanço otimizado de cálcio e elementos terras raras. Esta formulação visa maximizar a eficiência de absorção do magnésio no ferro fundido líquido, ao mesmo tempo em que minimiza perdas por volatilização.

Entre suas principais características, destacam-se:

- **Teor médio de magnésio**, que assegura uma boa taxa de recuperação com baixa volatilização;
- **Baixa reatividade química**, contribuindo para a redução da formação de escória e promovendo maior estabilidade da reação de nodularização em comparação com outros tipos de liga com maior teor de magnésio;
- **Indicação para processos de inoculação controlada**, nos quais é essencial equilibrar a eficiência de absorção do magnésio e a minimização de perdas metálicas e escorificadas.

A RIMAlloy 911 é particularmente indicada para aplicações em que a absorção precisa do magnésio é crítica, minimizando a ocorrência de reações intensas e a formação de escória densa, que podem comprometer a fluidez do metal e gerar defeitos metalúrgicos na peça fundida.

RIMAlloy 611

A liga nodularizante RIMAlloy 611 apresenta uma formulação diferenciada, caracterizada por um teor de magnésio ligeiramente inferior em relação à RIMAlloy 911, além da presença de elementos estabilizantes que favorecem sua dissolução e interação com o ferro fundido líquido. Essa configuração tem como principal finalidade mitigar os efeitos da elevada reatividade do magnésio metálico quando em contato com o ferro fundido líquido, fenômeno diretamente associado ao seu baixo ponto de ebulição (1.107 °C). Como consequência, podem ocorrer reações metalúrgicas intensas, formação excessiva de escória, elevada volatilização do magnésio e, conseqüentemente, perdas significativas desse elemento, comprometendo a eficiência do processo de nodularização.

Para contornar essas limitações e assegurar maior estabilidade operacional, são utilizadas ligas nodularizantes à base de FeSiMg, contendo teores controlados de magnésio e cerca de 45% de silício. O silício, além de sua reconhecida função como agente grafitizante, favorece a formação de silicatos complexos, que desempenham um papel fundamental na atenuação da violência das reações exotérmicas, contribuindo para uma absorção mais controlada do magnésio no ferro fundido líquido. Essa estratégia permite reduzir a intensidade das reações metalúrgicas, minimizando a formação de escória e melhorando a eficiência do processo de transferência de magnésio.

Corroborando essa abordagem, Vicente et al. (s.d.) destacam que o controle rigoroso da composição química da liga, da granulometria e da reatividade dos elementos presentes exerce influência direta sobre os mecanismos de nucleação e crescimento dos nódulos de grafita no ferro fundido nodular.

As principais propriedades desta liga incluem:

- **Reatividade mais branda**, resultando em uma reação de nodularização mais controlada;
- **Melhor fluidez da escória**, o que facilita a sua remoção e contribui para a redução de inclusões não metálicas;
- **Indicação para processos que requerem controle rigoroso da nucleação de grafita esferoidal**, promovendo maior uniformidade na distribuição dos nódulos e melhores propriedades mecânicas finais.

A escolha entre a RIMAlloy 911 e a RIMAlloy 611 deve ser baseada nas especificações do processo de fundição, na geometria das peças e nos requisitos metalúrgicos do produto final. Enquanto a RIMAlloy 911 se mostra mais eficiente em condições que exigem rápida e eficaz absorção do magnésio, a RIMAlloy 611 é mais apropriada quando se busca uma reação controlada, estável e com menor geração de escória.

2.2.2 Impacto das Ligas na Nucleação e na Estabilidade Térmica do Ferro Fundido

As diferenças na composição química entre RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611 impactam diretamente no tipo de processo presente na fundição. Isso ocorre porque a taxa de

absorção do magnésio influencia a nucleação, afetando a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas da peça fundida.

A RIMAlloy 911, com seu teor mais elevado de magnésio, gera uma reação maior que a liga com menor teor de magnésio, formando os nódulos de grafita que permitem que o ferro fundido nodular tenha um alongamento maior que outros tipos de ferro fundido. No entanto, um controle preciso da temperatura e do tempo de reação é essencial para evitar a volatilização excessiva do magnésio e garantir uma distribuição homogênea dos nódulos.

Por outro lado, a RIMAlloy 611, com um teor de magnésio ligeiramente menor, favorece um crescimento mais estável da grafita esferoidal, o que pode resultar em melhor uniformidade da microestrutura e maior estabilidade térmica do material. Essa característica pode ser vantajosa em aplicações onde a resistência ao choque térmico e a ductilidade são fatores críticos.

2.2.3 Influência da Granulometria da Liga em Função do Peso de Metal Tratado

A granulometria das ligas nodularizantes à base de FeSiMg exerce influência direta sobre a eficiência do tratamento do ferro fundido nodular, sobretudo em função da massa metálica envolvida no processo. As diferentes faixas granulométricas, com destaque para as distribuições 2–12 mm e 10–25 mm, apresentam comportamentos distintos em relação à taxa de dissolução, absorção do magnésio e reatividade global da reação nodularizante.

Granulometria 2–12 mm

Esta faixa é composta por partículas de menor diâmetro, o que resulta em uma dissolução mais rápida da liga no ferro fundido líquido. Tal característica é particularmente vantajosa em tratamentos de controle ajustados, nos quais a cinética da reação pode ser influenciada pela densidade *Bulk*, conhecida como densidade aparente do FeSiMg (uma propriedade física que indica a massa de um material por unidade de volume total, incluindo os vazios entre as partículas, a granulometria de 2 a 12 mm tende a ter uma densidade aparente (bulk) maior do que a granulometria de 10 a 25 mm, considerando o mesmo material), e pelo tipo da panela de tratamento. A rápida solubilização contribui para a redução da perda de magnésio por volatilização e melhora

o aproveitamento do elemento ativo. Contudo, em processos de larga escala, essa granulometria pode induzir reações excessivamente rápidas, dificultando o controle térmico e metalúrgico da nodularização.

Granulometria 10–25 mm

Por conter partículas de maior dimensão, essa granulometria apresenta uma taxa de dissolução mais lenta e progressiva, tornando-a flexível para uma ampla variedade de volumes de tratamento de ferro fundido líquido. Essa característica favorece uma reação mais estável e homogênea, reduzindo a variabilidade na absorção do magnésio e proporcionando maior consistência microestrutural nas peças fundidas. É a faixa preferencial em ambientes industriais que requerem reações controladas e contínuas, com maior previsibilidade no desempenho metalúrgico.

Considerações sobre a Escolha Granulométrica

A seleção da faixa granulométrica ideal deve ser orientada pela escala do processo de fundição, considerando aspectos como o peso do metal tratado, o método de tratamento e o dimensionamento da panela de tratamento, bem como pelas exigências de controle sobre a absorção do magnésio. Em operações de menor porte, a granulometria de 2 a 12 mm oferece vantagens em termos de reatividade e eficiência, enquanto, em processos industriais de grande volume, a faixa de 10 a 25 mm proporciona maior estabilidade e previsibilidade do tratamento nodularizante.

O presente estudo pretende demonstrar que existe uma faixa de trabalho no processo de fundição em que ambas as granulometrias poderiam ser utilizadas apresentando um desempenho similar.

3. Metodologia

3.1 Materiais e Procedimentos

Os testes foram realizados utilizando um forno com capacidade de 2500 kg de metal líquido, vazados em uma panela com aproximadamente 450kg de fundido. Durante dois dias consecutivos, foram tratadas 16 panelas no total, seguindo um planejamento rigoroso de controle de temperatura, peso das ligas e de metal tratado, análises térmicas

e químicas, retirados os corpos de prova Y e ômega para avaliar o efeito das diferentes granulometrias das ligas nodularizantes.

O método de tratamento utilizado foi o *Tundish Cover*, representado na Figura 2. Trata-se de uma técnica amplamente empregada no tratamento do ferro fundido nodular, na qual o agente nodularizante é colocado no fundo de um cadinho ou panela. O metal líquido é então vertido no lado oposto do nodularizante geralmente coberto por sucata, iniciando a reação do magnésio com o ferro fundido, o que promove a nodularização da grafita. Uma característica distintiva desse método é a utilização de uma tampa que cobre o cadinho durante o processo. Essa cobertura tem a função de reter os vapores de magnésio, minimizar perdas térmicas e proteger a reação contra interferências externas, aumentando a eficiência da nodularização.

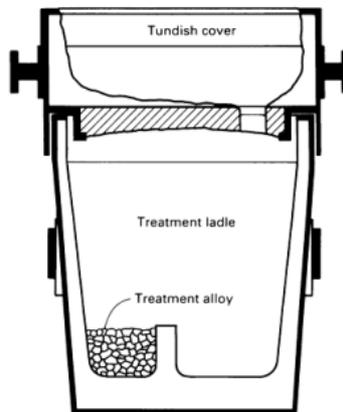


Figura 2 – Representação esquemática de uma panela do tipo *Tundish Cover*. (STEFANESCU, 1990).

O inoculante InoZr utilizado da Rima Industrial S/A para a realização do teste com granulometria 0,6–3,0 mm. A especificação do Inoculante com zircônio pode ser visualizada na Tabela 2, representada abaixo:

Tabela 2 - Composição Química do Inoculante.				
InoZr	Si	Al	Ca	Zr
Faixa de especificação %	68-79	< 1,5	1,0-3,0	1,0-2,5

O inoculante deve possuir uma granulometria específica, devidamente ajustada à etapa do processo na qual será incorporado. Quando adicionado à panela de transferência, a granulometria recomendada tipicamente varia entre 0,6–3 mm. Por outro lado, na inoculação realizada diretamente no jato metálico, a granulometria predominante situa-

se geralmente entre 0,2–0,7 mm. A Figura 3 evidencia a distinção dimensional entre esses dois intervalos granulométricos, ressaltando a importância do controle desta variável para a eficácia do processo de inoculação.

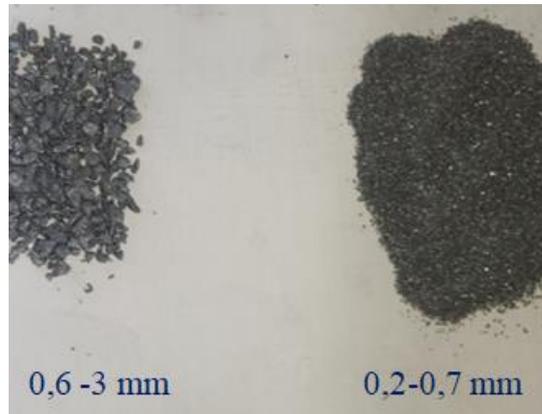


Figura 3 – À esquerda, InoZr com granulometria de 0,6 a 3 mm, utilizado no teste. À direita, InoZr com granulometria entre 0,2 e 0,7 mm, granulometria comumente empregada em processos de fundição.

3.2 Descrição dos Testes

Primeiro Teste

Realizaram-se duas cargas completas de 2.500 kg, totalizando 12 panelas de tratamento. Cada panela continha entre 451 kg e 464 kg de ferro fundido. O procedimento seguiu a seguinte sequência:

1. Liga RIMAlloy 911:
 - Tratamento com granulometria de 2-12 mm em uma panela.
 - Tratamento com granulometria de 10-25 mm em outra panela.
 - Quantidade de liga utilizada: 6,750 kg (1,5%).
2. Liga RIMAlloy 611:
 - Tratamento com granulometria de 2-12 mm em uma panela.
 - Tratamento com granulometria de 10-25 mm em outra panela.
 - Quantidade de liga utilizada: 7,650 kg (1,7%).

Esse ciclo de tratamento foi repetido até o término das 12 panelas.

Segundo Teste

Foi realizada uma única carga de 2.500 kg, abrangendo o tratamento de 4 painéis. Cada painel continha entre 494 kg e 504 kg de metal. O procedimento seguiu a mesma abordagem adotada no primeiro teste:

1. Liga RIMAlloy 911:
 - Tratamento com granulometria de 2-12 mm em um painel.
 - Tratamento com granulometria de 10-25 mm em outro painel.
 - Quantidade de liga utilizada: 7 kg (1,4%).
2. Liga RIMAlloy 611:
 - Tratamento com granulometria de 2-12 mm em um painel.
 - Tratamento com granulometria de 10-25 mm em outro painel.
 - Quantidade de liga utilizada: 8 kg (1,6%).

Os percentuais de liga foram determinados devido a condição de conservação do refratário do painel de tratamento, bem como do fosso de alocação da liga (painel com maior desgaste, maior percentual).

3.3 Inoculação e Análises Realizadas

Em ambos os dias, foi utilizado o inoculante RIMA InoZr na proporção de 0,6% sobre o peso do metal. Para cada painel tratado, foram realizadas as seguintes análises:

1. Análise térmica do metal base, do metal nodularizado e do metal inoculado.
2. Corpos de prova:
 - 1 corpo de prova Y para ensaio de tração.
 - 1 corpo de prova ômega.
 - Pastilha para análise química.

Os resultados obtidos foram posteriormente correlacionados para avaliar a influência das granulometrias das ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611 na absorção de magnésio, na nucleação da grafita esferoidal e nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.

4. Resultados e Discussão

4.1 Análises Química

Composição Química e Influência da Granulometria

A composição química final do ferro fundido nodular está diretamente relacionada à eficiência da absorção do magnésio durante o processo de nodularização. A granulometria da liga FeSiMg utilizada pode impactar significativamente essa absorção, influenciando não apenas o teor final de magnésio no metal tratado, mas também a quantidade de elementos residuais que desempenham um papel na nucleação da grafita esferoidal.

A granulometria 2-12 mm, devido à sua maior área de contato e taxa de dissolução mais rápida, pode apresentar uma eficiência diferenciada na absorção do magnésio em comparação com a granulometria 10-25 mm, que se dissolve de forma mais controlada e lenta. Essas diferenças podem resultar em variações na composição química final do ferro fundido, impactando a quantidade de elementos como o magnésio e enxofre, que são fundamentais para a formação e estabilização dos núcleos de grafita.

4.1.1 Liga RIMAlloy 911

Após o tratamento do metal líquido na panela com a liga FeSiMg, o magnésio introduzido não permanece em totalidade na forma de magnésio residual. Parte do elemento é vaporizada durante a reação, enquanto outra parte reage com o oxigênio e o enxofre, contribuindo para a dessulfuração e desoxidação do fundido. Apenas uma fração permanece efetivamente como magnésio residual no banho metálico. O magnésio considerado ideal para a produção do ferro fundido nodular está na faixa de 0,03 a 0,06% (SANTOS, 1987).

O Gráfico 1 apresenta os valores de magnésio residual obtidos com a liga RIMAlloy 911 na faixa granulométrica de 2 a 12 mm, enquanto o Gráfico 2 mostra os resultados correspondentes para a granulometria de 10 a 25 mm. A média dos valores obtidos em todos os testes com a RIMAlloy 911 foi de 0,052% de magnésio residual.

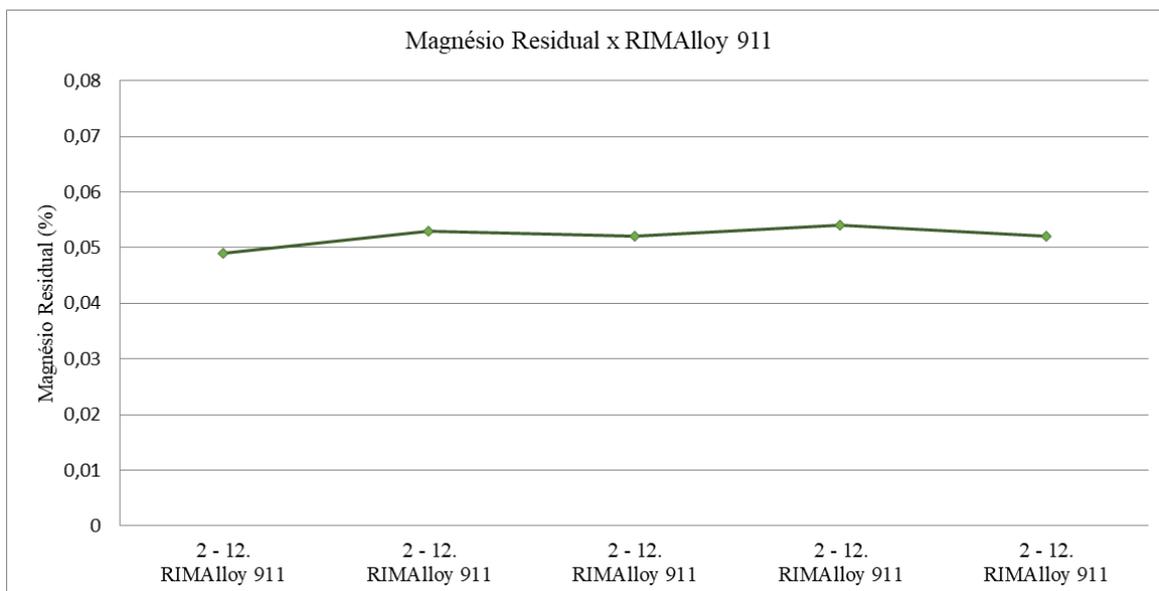


Gráfico 1 – Magnésio Residual obtido utilizando a RIMAlloy 911, granulometria 2-12 mm.

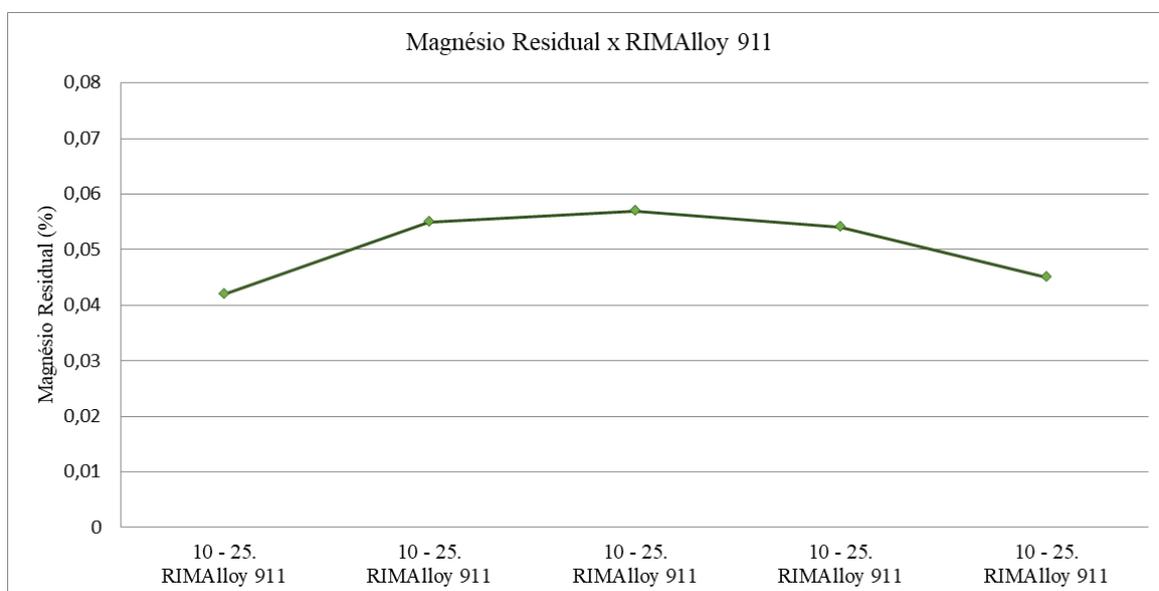


Gráfico 2 – Magnésio residual obtido utilizando a RIMAlloy 911, granulometria 10-25 mm.

4.1.2 Liga RIMAlloy 611

O Gráfico 3 apresenta os valores de magnésio residual obtidos com a liga RIMAlloy 611 na faixa granulométrica de 2 a 12 mm, enquanto o Gráfico 4 mostra os resultados correspondentes para a granulometria de 10 a 25 mm.

Os testes realizados com a RIMAlloy 611 apresentaram resultados similares aos obtidos com a RIMAlloy 911 em relação aos teores de magnésio residual. A média global de magnésio residual obtida nos testes com a RIMAlloy 611 foi de 0,051%.

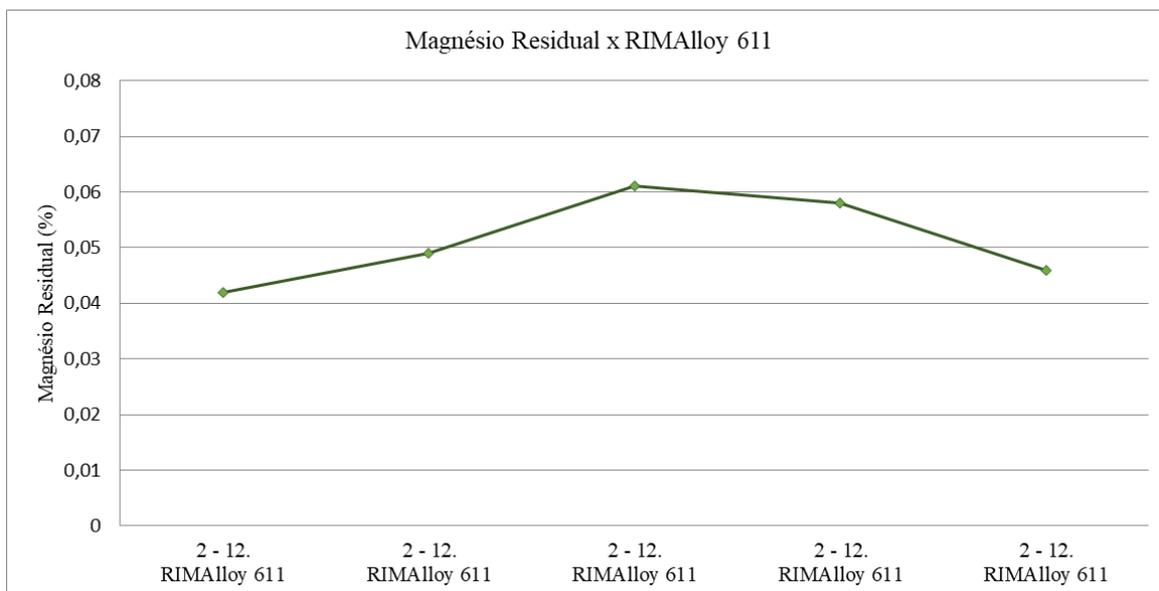


Gráfico 3 - Magnésio residual obtido utilizando a RIMAlloy 611, granulometria 2-12mm.

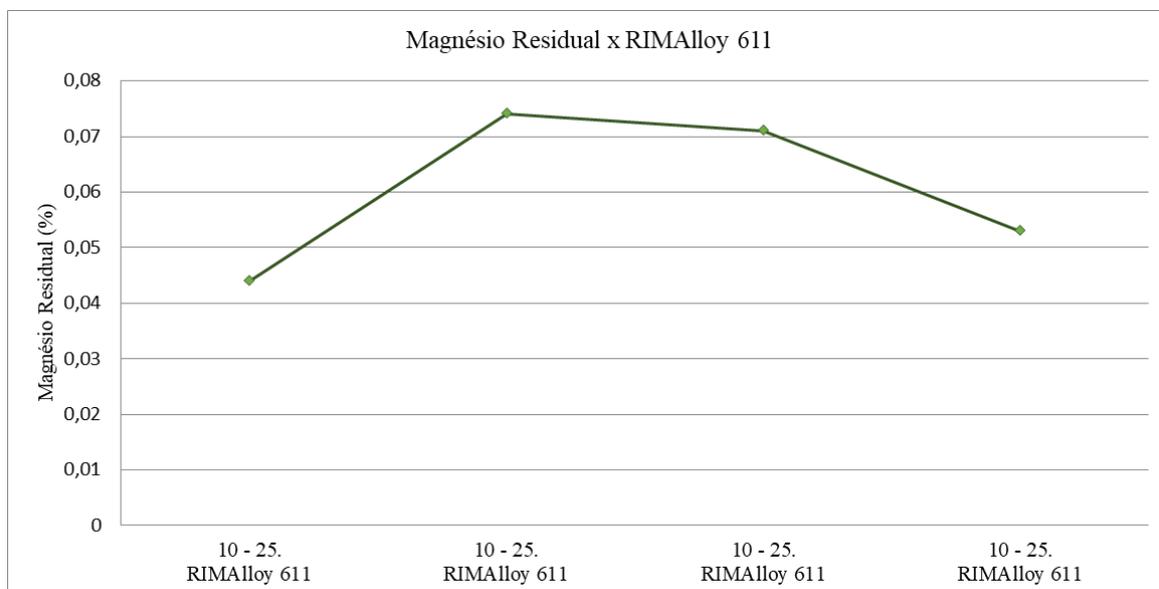


Gráfico 4 - Magnésio residual obtido utilizando a RIMAlloy 611, granulometria 10-25mm.

A análise dos valores de magnésio residual para as diferentes granulometrias permitiu avaliar a influência do tamanho das partículas na eficiência da absorção do magnésio em cada liga.

Para a RIMAlloy 911, a granulometria 2-12 mm apresentou um magnésio residual médio de 0,052%. Já para a granulometria 10-25 mm, o magnésio residual médio foi

0,051%. Esses valores sugerem que a granulometria não teve efeito para a absorção do magnésio no tamanho de panela utilizada durante o experimento

Para a RIMAlloy 611, o comportamento foi distinto. Na granulometria 2-12 mm, o magnésio residual médio foi de 0,051%. Já na granulometria 10-25 mm, o magnésio residual médio foi de 0,060%. O resultado indica uma boa absorção de magnésio para esse tipo de liga para ambas as granulometrias, a maior variação dos resultados para o RIMAlloy 611 em comparação com o RIMAlloy 911 está relacionada com o fato do processo do teste estar mais adaptado a ligas com maior teor de magnésio, entretanto, independente da granulometria os resultados foram maiores que 0,03% de magnésio o que demonstra um bom comportamento da liga.

De forma geral, a granulometria 2-12 mm demonstrou maior previsibilidade na absorção do magnésio, para ambas as ligas analisadas, enquanto a granulometria 10-25 mm apresentou dispersão nos valores, onde o aumento do magnésio residual foi acompanhado de uma maior variabilidade ainda dentro do escopo de trabalho. Esses fatores devem ser considerados na seleção da granulometria ideal para cada aplicação, buscando um equilíbrio entre eficiência da absorção e controle do processo.

4.2 Análise Térmica

A análise térmica é uma ferramenta essencial para avaliar o comportamento do ferro fundido nodular durante a solidificação, permitindo correlacionar os parâmetros térmicos com a eficiência do tratamento nodularizante. Neste estudo, foram analisadas as temperaturas características de solidificação (TL - Temperatura Liquidus e TSE - Temperatura de Superresfriamento Eutético) para duas granulometrias distintas (2-12 mm e 10-25 mm) das ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611.

Os parâmetros térmicos ajustados influenciam diretamente a absorção do magnésio, o que pode afetar a estabilidade térmica do ferro fundido tratado. A avaliação da taxa de resfriamento e da estabilidade térmica permite identificar possíveis variações no processo de nucleação da grafita esferoidal, impactando a microestrutura final e as propriedades mecânicas da peça fundida.

Além disso, a curva térmica obtida para cada granulometria será analisada para compreender como a dissolução das ligas afeta o comportamento do ferro fundido

durante a solidificação. O efeito da granulometria na estabilidade do ferro fundido pode ser fundamental para otimizar o desempenho do tratamento nodularizante e garantir maior reprodutibilidade do processo.

Abaixo, a tabela 3 apresenta os resultados dos parâmetros térmicos obtidos para cada granulometria:

Tabela 3 - Valor Médio dos Parâmetros de Análise Térmica.			
Rimalloy 911 - 2x12mm	Temperatura em Celsius	Rimalloy 611 - 2x12mm	Temperatura em Celsius
TL início	1133,8 °C	TL início	1133,0 °C
TSE início	1133,4 °C	TSE início	1132,2 °C
TL nodularizado	1135,2 °C	TL nodularizado	1137,2 °C
TSE nodularizado	1134,0 °C	TSE nodularizado	1136,0 °C
TL inoculado	1147,0 °C	TL inoculado	1147,6 °C
TSE inoculado	1146,4 °C	TSE inoculado	1147,2 °C
Rimalloy 911 - 10x25mm	Temperatura em Celsius	Rimalloy 911 - 10x25mm	Temperatura em Celsius
TL início	1134,0 °C	TL início	1134,4 °C
TSE início	1133,2 °C	TSE início	1132 °C
TL nodularizado	1137,8 °C	TL nodularizado	1132 °C
TSE nodularizado	1136,4 °C	TSE nodularizado	1131 °C
TL inoculado	1147,6 °C	TL inoculado	1145,8 °C
TSE inoculado	1147,0 °C	TSE inoculado	1145,4 °C

A análise térmica das ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611 evidenciou a influência da granulometria do FeSiMg sobre os parâmetros térmicos do ferro fundido nodular. Os resultados indicam que, embora a granulometria possa causar pequenas variações nos valores absolutos, a estabilidade térmica da liga e a eficiência do tratamento nodularizante permanecem consistentes.

Para a RIMAlloy 911 na granulometria 2x12 mm, os valores iniciais foram de 1133,8 °C para TL e 1133,4 °C para TSE. Após o tratamento nodularizante, as temperaturas aumentaram para 1135,2 °C (TL) e 1134,0 °C (TSE). Na condição inoculada, os valores atingiram 1147,0 °C para TL e 1146,4 °C para TSE.

Na RIMAlloy 911 com granulometria 10x25 mm, os valores no estado inicial foram de 1134,0 °C (TL) e 1133,2 °C (TSE). Após o nodularizante, aumentaram para 1137,8 °C (TL) e 1136,4 °C (TSE). Com a inoculação, registraram-se 1147,6 °C para TL e 1147,0 °C para TSE.

Para a RIMAlloy 611 na granulometria 2x12 mm, TL e TSE iniciais foram de 1133,0 °C e 1132,2 °C, respectivamente. Após o nodularizante, subiram para 1137,2 °C (TL) e

1136,0 °C (TSE). Na condição inoculada, os valores chegaram a 1147,6 °C (TL) e 1147,2 °C (TSE).

Por fim, a RIMAlloy 611 na granulometria 10x25 mm apresentou valores iniciais de 1134,4 °C (TL) e 1132,0 °C (TSE). Após o tratamento nodularizante, observou-se uma redução para 1132,0 °C (TL) e 1131,0 °C (TSE). No estado inoculado, os valores aumentaram para 1145,8 °C (TL) e 1145,4 °C (TSE).

De maneira geral, os resultados indicam que a inoculação promove um incremento significativo nas temperaturas liquidus (TL) e de super resfriamento eutético (TSE) em todas as ligas e granulometrias avaliadas, evidenciando uma maior estabilidade térmica do metal líquido após o tratamento. Observa-se que a variação na granulometria do FeSiMg exerce influência marginal sobre os valores absolutos de TL e TSE, sendo que a eficácia do processo de inoculação se mantém independente desse parâmetro. Este comportamento sugere uma nucleação eutética mais eficiente da grafita, fator determinante para a obtenção de uma microestrutura otimizada e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas no ferro fundido nodular.

Ademais, a convergência dos valores de TSE na condição inoculada entre as diferentes ligas reforça a robustez e a consistência dos tratamentos de nodularização e inoculação empregados. Este resultado demonstra a efetividade dos procedimentos adotados na promoção de condições termicamente estáveis para a solidificação, independentemente da granulometria do agente nodularizante utilizado.

4.3 Ensaio Mecânicos

A avaliação dos ensaios mecânicos das ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611 permitiu analisar a influência da granulometria do FeSiMg sobre as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Os resultados apresentados na Tabela 4 e Tabela 5 abaixo comparam os valores obtidos para as granulometrias 2-12 mm e 10-25 mm para o RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611, respectivamente, destacando três aspectos fundamentais: resistência a tração, escoamento e alongamento.

A análise comparativa dos resultados evidencia que a granulometria do nodulizante exerce influência direta sobre a resistência mecânica do material, fornecendo subsídios para a seleção da faixa granulométrica mais adequada em função das exigências de cada

aplicação. No que se refere ao limite de escoamento, observa-se que a granulometria impacta significativamente a capacidade do material em suportar tensões antes da ocorrência de deformação plástica permanente.

Da mesma forma, os resultados de alongamento revelam que a variação granulométrica afeta diretamente a ductilidade e a tenacidade do ferro fundido nodular. Esse comportamento pode ser diretamente correlacionado às características microestruturais formadas em cada condição de tratamento, especialmente no que se refere à morfologia da grafita, à distribuição dos carbonetos e à matriz metálica resultante.

4.3.1 Liga RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611

Tabela 4 - Resultados ensaio de tração da liga RIMAlloy 911

Granulometria	Limite de Resistência (média)	Escoamento (média)	Alongamento (média)
2-12mm	524,63 MPa	374,96 MPa	17,26%
12-25mm	523,74 MPa	368,93 MPa	14,10%

Tabela 5 - Resultados ensaio de tração da liga RIMAlloy 611

Granulometria	Limite de Resistência (média)	Escoamento (média)	Alongamento (média)
2-12mm	503,72 MPa	355,85 MPa	16,62%
12-25mm	490,96 MPa	360,03 MPa	13,07%

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos das ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611, apresentados nas Tabelas 4 e 5, permitiram avaliar a influência da granulometria do nodularizante nas propriedades do ferro fundido nodular. De modo geral, verificou-se que a granulometria de 2–12 mm proporcionou um desempenho mecânico superior, ainda que discreto, em comparação à granulometria de 10–25 mm.

Para a liga RIMAlloy 911, a granulometria mais fina apresentou valores médios de resistência à tração (524,63 MPa) e limite de escoamento (374,96 MPa) levemente superiores à granulometria mais grossa (523,74 MPa e 368,93 MPa, respectivamente). No entanto, o destaque foi o alongamento, com ganho significativo na condição 2-12 mm (17,26%) frente aos 14,10% da granulometria 10-25 mm, evidenciando maior ductilidade e tenacidade do material.

Na RIMAlloy 611, os resultados seguiram a mesma tendência, apresentando resistência à tração de 503,72 MPa, limite de escoamento de 355,85 MPa e alongamento de 16,62% para a granulometria 2-12 mm, enquanto para a granulometria 10-25 mm os valores foram de 490,96 MPa, 360,03 MPa e 13,07%, respectivamente. Observou-se ainda uma menor dispersão nos dados da liga 611, especialmente no limite de escoamento, indicando maior estabilidade no processo.

4.4 Análise Metalográfica

A avaliação metalográfica das amostras produzidas com as ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611, representado na Figura 2, possibilitou uma análise detalhada da influência da granulometria do nodularizante nas características microestruturais do ferro fundido nodular.

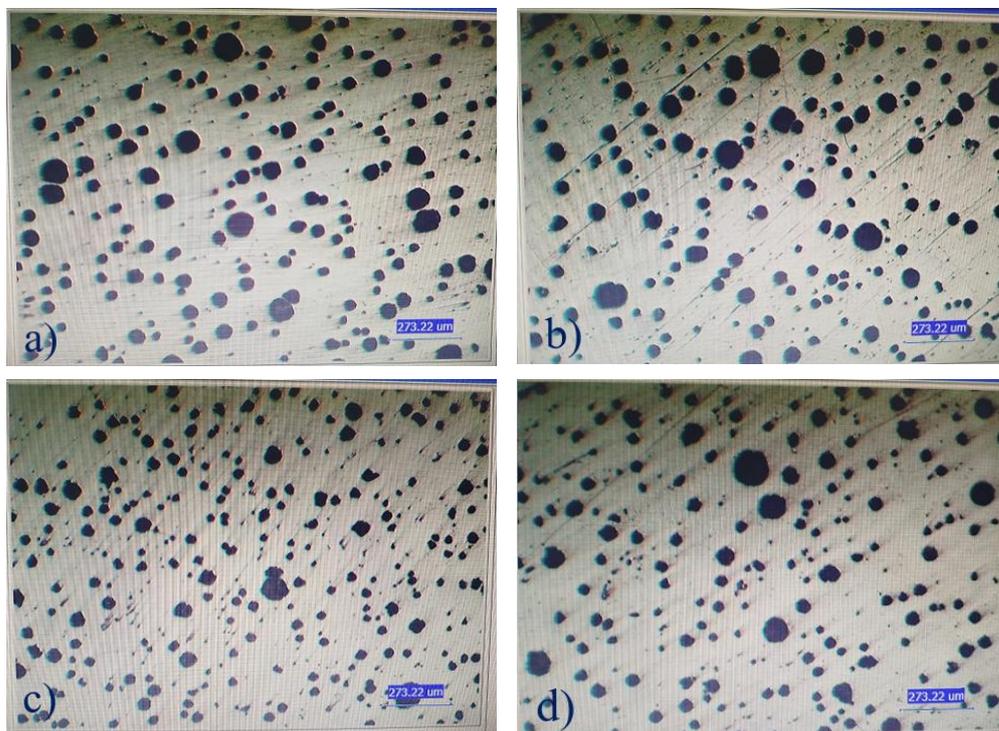


Figura 3 – a) Metalografia RIMAlloy 611 2-12 mm; b) Metalografia RIMAlloy 911 12-25 mm; c) Metalografia RIMAlloy 911 2-12 mm; d) Metalografia RIMAlloy 911 12-25 mm.

Para cada condição de granulometria (2-12 mm e 10-25 mm), foi realizada a quantificação do número de nódulos de grafita esferoidal por milímetro quadrado e o percentual de nodularização, parâmetros fundamentais para a avaliação da eficiência do

tratamento nodularizante. Adicionalmente, foi analisada a morfologia da grafita, sua distribuição no interior da matriz e a presença relativa de ferrita e perlita.

A microestrutura resultante foi comparada para ambas as granulometrias, individualmente, em cada liga, a fim de identificar possíveis variações no processo de nucleação e crescimento da grafita esferoidal. Essa comparação visa evidenciar o impacto da granulometria do FeSiMg na formação da estrutura final do material, com implicações diretas em suas propriedades mecânicas e estabilidade operacional.

Abaixo, apresenta-se a Tabela 6 com os resultados obtidos, permitindo uma análise comparativa entre as diferentes condições de granulometria para cada uma das ligas utilizadas neste estudo.

Tabela 6 - Análise Metalográfica.			
Rimalloy 911 (média)	2x12mm	Rimalloy 611 (média)	2x12mm
Grau de nodularização	96,77%	Grau de nodularização	97,63%
Ferrita	74,23%	Ferrita	76,78%
Perlita	25,77%	Perlita	23,22%
Número de nódulos (mm ²)	160,00	Número de nódulos (mm ²)	195,00
Rimalloy 911 (média)	10x25mm	Rimalloy 611 (média)	10x25mm
Grau de nodularização	96,21%	Grau de nodularização	97,51%
Ferrita	73,70%	Ferrita	76,69%
Perlita	26,30%	Perlita	23,31%
Número de nódulos (mm ²)	165,00	Número de nódulos (mm ²)	195,00

A análise metalográfica realizada para as ligas RIMAlloy 911 e RIMAlloy 611 demonstrou resultados consistentes e satisfatórios quanto à qualidade estrutural do ferro fundido nodular produzido. Ambas as ligas apresentaram um elevado grau de nodularização, atingindo, em média, 96,49% para a RIMAlloy 911 e 97,57% para a RIMAlloy 611, o que confirma a eficiência do tratamento de esferoidização com FeSiMg e do processo de inoculação aplicado nas condições operacionais adotadas.

A liga RIMAlloy 611 apresentou uma microestrutura predominantemente ferrítica, com um teor médio de 76,74% de ferrita e 23,26% de perlita, o que favorece propriedades como elevada ductilidade, boa resistência ao impacto e tenacidade. O elevado grau de nodularização (97,57%) reforça a qualidade do processo de esferoidização, enquanto a contagem média de nódulos, após a inoculação, foi de 195 nódulos/mm². Esses valores indicam uma excelente nucleação e distribuição dos nódulos de grafita na matriz metálica.

Da mesma forma, a liga RIMAlloy 911 também apresentou uma microestrutura de alta qualidade, com 73,97% de ferrita e 26,03% de perlita, oferecendo um equilíbrio entre tenacidade e resistência mecânica, características desejadas em diversas aplicações industriais. O grau médio de nodularização foi de 96,49%, evidenciando a estabilidade do processo de esferoidização. A contagem média de nódulos, após o processo de inoculação, foi de 163 nódulos/mm², sendo 160 nódulos/mm² na ampliação de 2x12 mm e 165 nódulos/mm² na ampliação de 10x25 mm, o que demonstra uma boa eficiência na formação e na distribuição da grafita esferoidal na matriz metálica, embora ligeiramente inferior à da RIMAlloy 611.

Esses resultados corroboram a robustez do processo e a confiabilidade das ligas RIMAlloy avaliadas na obtenção da microestrutura desejada no ferro fundido nodular, independentemente das variações na granulometria do nodularizante.

5 Conclusão

O presente estudo demonstrou que tanto a RIMAlloy 911 quanto a RIMAlloy 611 apresentam excelente desempenho na nodularização do ferro fundido, independentemente da granulometria utilizada (2–12 mm ou 10–25 mm). Os resultados mostraram alta estabilidade nos parâmetros térmicos, controle adequado da composição química, bom rendimento na absorção de magnésio, e propriedades mecânicas e microestruturais dentro dos padrões exigidos pela indústria.

A influência da granulometria do FeSiMg sobre os diferentes parâmetros avaliados foi mínima, indicando paridade de desempenho entre as frações granulométricas testadas. Isso representa uma vantagem prática para a indústria, pois flexibiliza a escolha da granulometria disponível, sem comprometer a qualidade do produto final ou a estabilidade do processo.

Do ponto de vista metalúrgico, a formação de microestrutura predominantemente ferrítica com alto grau de nodularização e número adequado de nódulos por mm² reforça a eficiência das ligas avaliadas, sendo ambas adequadas para aplicações que demandam boa ductilidade e tenacidade.

Sugestões para estudos futuros incluem a avaliação do desempenho dessas ligas em condições de resfriamento mais severas, a fim de compreender os efeitos na estabilidade

da nodularização e na evolução microestrutural. Além disso, torna-se relevante investigar o impacto da granulometria em peças de maior massa térmica, considerando que variações no tamanho da seção podem influenciar significativamente os mecanismos de nucleação e crescimento da grafita, bem como a formação da matriz metálica.

Recomenda-se, ainda, a realização de testes com a adição de zircônio diretamente no forno como elemento nucleante, visando otimizar ainda mais a nucleação da grafita e, conseqüentemente, melhorar a qualidade estrutural do ferro fundido nodular. Paralelamente, seria pertinente conduzir estudos avaliando o desempenho das ligas utilizando granulometrias intermediárias, tais como 6x12 mm, 2x6 mm e 2x20 mm. A inclusão dessas granulometrias no escopo experimental permitirá aprofundar o entendimento sobre a influência do tamanho da massa térmica no controle microestrutural, contribuindo para a definição de parâmetros mais robustos e versáteis para diferentes aplicações industriais.

6 Revisão Bibliográfica

AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. *Ductile Iron Handbook*. Des Plaines, Illinois: AFS, 1993.

KISS, I. Magnesium treatments in ductile iron production - Part 2. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/296529323_Magnesium_treatments_in_ductile_iron_production_-_Part_2. Acesso em: 23 maio 2025.

MALFATTI, Célia de Fraga; CUNHA, Lucas. Efeito da adição de terras raras em conjunto com o agente nodularizante FeSiMg na microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular J434 D4512. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 16, n. 3, p. 334–339, 2019. DOI: 10.4322/2176-1523.20191727.

SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C.; HAYDAT, Carlos. *Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares*. 5. ed. São Paulo: IPT, 1987. 241 p.

STEFANESCU, Doru M. *Classification of Ferrous Casting Alloys*. University of Alabama, p. 50.

VICENTE, A. de A. et al. *Estudo sobre a nucleação e crescimento de nódulos de grafita em ferros fundidos nodulares.* Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/estudo-sobre-a-nucleacao-e-crescimento-de-nodulos-de-grafita-em-ferros-fundidos-nodulares>. Acesso em: 5 jun. 2025.