CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
ETEC TRAJANO CAMARGO
CURSO DE TÉCNICO EM METALURGIA

JOSÉ RICARDO MARTINS

MURILO RAFAEL PEDRO

A IMPORTÂNCIA DO INOCULANTE NO FERRO FUNDIDO NODULAR.

LIMEIRA - SP
2024

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
ETEC TRAJANO CAMARGO
CURSO TÉCNICO EM METALURGIA

JOSÉ RICARDO MARTINS

MURILO RAFAEL PEDRO

A IMPORTÂNCIA DO INOCULANTE NO FERRO FUNDIDO NODULAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora, como exigência parcial para a obtenção de título de Técnico em Metalurgia da Escola Técnica Trajano Camargo sob a orientação do Professor João Augusto Montesano.

LIMEIRA - SP
2024

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) teve por objetivo analisar os efeitos dos inoculantes sobre as propriedades mecânicas e a caracterização microestrutural das ligas de ferro fundido nodular. O foco da análise foi a liga de ferro fundido GGG-40, conforme especificado pela norma DIN 1693, devido à sua ampla utilização na empresa em que realizamos a pesquisa. Os corpos de prova fundidos foram preparados nas seguintes condições: sem inoculante, com inoculante de Cálcio-Bário e com inoculante de Zircônio. O objetivo foi realizar comparações detalhadas por meio de ensaios mecânicos de tração, avaliando o impacto de cada tipo de inoculante nas propriedades de alongamento, tensão de escoamento e limite de resistência dos corpos de prova. Foi estabelecida a caracterização microestrutural por meio de microscopia óptica para cada condição de preparação da liga. A análise dos resultados permitiu quantificar as diferenças entre as amostras e avaliar a viabilidade da substituição de inoculantes na liga, com o objetivo de otimizar as propriedades do material e reduzir os custos de produção do produto.

Palavras-chave: Inoculante, Ferro fundido, Ferro fundido nodular.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 5
1.1 OBJETIVO GERAL 5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
1.3 JUSTIFICATIVAS 5
2. DESENVOLVIMENTO 7
2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7
2.2. METODOLOGIA 9
2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS 13
3.CONCLUSÃO 21
REFERÊNCIAS 22

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, nossa empresa recebeu a visita técnica de um fornecedor especializado em inoculantes para ferro fundido nodular, com o objetivo de realizar novos testes do produto oferecido. Atualmente, utilizamos o inoculante à base de cálcio bário, e a visita foi uma oportunidade valiosa para explorar alternativas que possam potencializar ainda mais a qualidade de nossos produtos.

Durante a visita, o representante do fornecedor apresentou uma visão geral dos diferentes tipos de inoculantes disponíveis, destacando um novo produto que contém zircônio em sua composição. Ele explicou como essa formulação pode contribuir para a melhoria das características do ferro fundido, como a tenacidade, a resistência à corrosão e a ductilidade. Esses fatores são cruciais para atender aos rigorosos padrões de qualidade exigidos em nossos processos de produção.

1.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos dos inoculantes nas propriedades mecânicas das ligas de ferro fundido nodular.

1.2 Objetivos Específicos

- Elaboração das ligas de ferro fundido com três diferentes condições de uso de inoculantes.
- Preparação das amostras para análise metalográfica por microscopia óptica.
- Realização de ensaios mecânicos de tração para avaliar as propriedades de alongamento, limite de escoamento e limite de resistência.

1.3 Justificativas

A pesquisa sobre inoculantes em ferros fundidos é de suma importância devido à sua relevância na indústria metalúrgica e suas ramificações em diversas aplicações.

O entendimento profundo dos efeitos dos inoculantes permite otimizar os processos de produção, garantindo materiais com propriedades mecânicas superiores, maior resistência à fadiga, melhor usinabilidade e menor susceptibilidade a defeitos.

Além disso, em um contexto de busca por materiais mais sustentáveis e eficientes, o uso eficaz de inoculantes pode contribuir para a redução do consumo de energia e dos resíduos gerados durante a produção de ferros fundidos. Portanto, este trabalho visa preencher uma lacuna no conhecimento atual, fornecendo insights valiosos para aprimorar os processos de fabricação e promover avanços na indústria metalúrgica.

Na situação apresentada pela empresa temos um novo tipo de inoculante para ser testado, hoje utilizamos Cálcio e Bário e em visita técnica de um outro fornecedor foi nos ofertados Zircônio. Com isso iremos fazer todos os testes para sabermos se a troca deste insumo é viável, precisamos analisar se há alterações nas propriedades mecânicas dos nossos itens fabricados e se o custo-benefício trará resultados satisfatórios.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fundamentação teórica

O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro dúctil, é um tipo de ferro fundido que se destaca pela sua estrutura interna única, caracterizada pela presença de grafita em forma de nódulos. Essa configuração é obtida através da adição de inoculantes específicos durante o processo de fundição, que promovem a transformação do carbono em grafita esferoidal, em vez de lamelar, como ocorre no ferro fundido convencional.

Esse material possui diversas propriedades que o tornam altamente desejável em aplicações industriais. Uma das suas principais características é a alta ductilidade, que confere ao material uma maior capacidade de deformação sem fraturar, permitindo a fabricação de peças que podem ser moldadas e trabalhadas mais facilmente. Além disso, o ferro fundido nodular apresenta resistência ao impacto, tornando-o ideal para aplicações que requerem resistência a choques e cargas dinâmicas.

Outra vantagem é a boa usinabilidade, já que, apesar de ser mais resistente que o ferro fundido convencional, ele pode ser usinado com facilidade, facilitando a produção de componentes complexos. Dependendo da composição e dos tratamentos térmicos aplicados, o ferro fundido nodular também pode apresentar boa resistência à corrosão e ao desgaste, aumentando sua durabilidade em ambientes adversos. (ABERTIN, 1984).

A norma German Standard for Cast Irons (GGG) classifica o ferro fundido nodular em diferentes categorias, levando em consideração suas propriedades mecânicas e a microestrutura. As classificações principais começam com o GGG 40, que possui uma resistência mínima à tração de 400 MPa e uma alongamento mínimo de 15%. Esse tipo é frequentemente utilizado em peças que requerem uma combinação equilibrada de resistência e ductilidade (ABERTIN, 1984).

Avançando para o GGG 50, este tipo apresenta resistência mínima à tração de 500 MPa e alongamento mínimo de 5%, o que o torna adequado para aplicações que exigem maior resistência mecânica, como componentes estruturais e automotivos. Em seguida, o GGG 60 é caracterizado por uma resistência mínima à tração de 600 MPa

e alongamento mínimo de 3%, sendo utilizado em peças que necessitam de alta resistência, como eixos e engrenagens. O GGG 70, por sua vez, possui resistência mínima à tração de 700 MPa e alongamento mínimo de 2%, tornando-se ideal para aplicações críticas que requerem alta durabilidade e resistência ao desgaste. Já o GGG 80, com resistência mínima à tração de 800 MPa, é empregado em aplicações que necessitam de resistência extrema, como componentes de máquinas pesadas e estruturas de alta performance (ABERTIN, 1984).

Por fim, o GGG 90 é um dos graus mais altos, com resistência mínima à tração de 900 MPa, sendo utilizado em aplicações que exigem a máxima resistência e durabilidade. Essas classificações asseguram que o ferro fundido nodular atenda às exigências específicas de cada aplicação, tornando-o uma escolha versátil e confiável em diversas indústrias (ABERTIN, 1984).

A diferença no alongamento entre os materiais mencionados decorre da variação na porcentagem de elementos perlitizantes presentes em suas composições químicas, como cobre (Cu), manganês (Mn) e, em alguns casos, estanho (Sn). Esses elementos influenciam a formação da matriz microestrutural e, consequentemente, afetam as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. O controle na adição desses elementos permite a otimização das características de ductilidade e resistência, ajustando a resposta do material a diferentes condições de carga e aplicação.

Para o desenvolvimento do nosso TCC, optamos por utilizar a liga GGG-40, uma vez que é a mais empregada em nossa empresa. Essa escolha se justifica pelo fato de a liga GGG-40 conter uma quantidade reduzida de elementos de liga em sua composição, o que possibilita a minimização das variáveis a serem analisadas. Dessa forma, podemos obter resultados mais consistentes e representativos, facilitando o entendimento das propriedades e comportamentos do material em estudo.

Um inoculante é um insumo utilizado em ferros fundidos com o objetivo de melhorar o banho e promover a nucleação e o crescimento da grafita. Esse processo favorece a formação de uma estrutura mais refinada, conhecida como grafita tipo A, resultando em propriedades mecânicas mais desejadas para o produto. O uso dessa matéria prima desempenha um papel crucial na indústria metalúrgica, influenciando diretamente as propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais. Os inoculastes são agentes de tratamento que promovem a formação de grãos finos e

uniformes na matriz metálica, melhorando significativamente a qualidade e as características finais dos ferros fundidos. (SANTOS ABS, Branco CHC,1991)

Os inoculantes geralmente contêm silício (Si) como o principal elemento 60-75 %, seguido de outras ligas base conforme o tipo específico de inoculante. Os tipos mais comuns de inoculantes incluem aqueles à base de cálcio (Ca), bário (Ba), alumínio (Al), lantânio (La), zircônio (Zr), bismuto (Bi) e estrôncio (Sr). Estes são os inoculantes mais comercializados e utilizados na indústria (SANTOS, 2009). Sendo eles divididos em alguns grupos: convencionais a base de Si, Ca, Ba, Al, - aumento do número de nódulos:

- Os a base de estrôncio: Si, Ca, Ba, Al, Sr – maior número de nódulos
- A base de Zircônio: Si, Ca, Ba, Al, Sr e Zr – elevado número de nódulos

A base de bismuto e cério: Si, Ca, Ba, Al, Bi, Ce – superior número de nódulos (SANTOS, 2009).

2.2. Metodologia

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo analisar os efeitos dos inoculantes nas propriedades das ligas de ferro fundido nodular, tais como resistência a tração, ductilidade, tenacidade, usinabilidade, resistência ao desgaste e corrosão, e boa capacidade de fundição.

Com foco específico na liga GGG-40, conforme especificado pela norma DIN 1693. Essa escolha se justifica pela ampla utilização dessa liga na empresa em que a pesquisa foi realizada. A proposta é realizar comparações detalhadas por meio de ensaios mecânicos, avaliando o impacto de cada tipo de inoculante nas propriedades materiais dos corpos de prova.

A análise dos resultados permitirá quantificar as diferenças entre as amostras e avaliar a viabilidade da substituição de inoculantes na liga, com o intuito de otimizar as propriedades do material e reduzir os custos de produção. Essa investigação não apenas contribuirá para o entendimento das interações entre inoculantes e propriedades do ferro fundido nodular, mas também pode oferecer insights valiosos para a melhoria dos processos de fabricação na indústria.

A empresa nos ofereceu toda a infraestrutura e suporte necessários para a realização dos testes requeridos para a conclusão do TCC. Essa colaboração foi fundamental para garantir a qualidade e a precisão das análises realizadas,

permitindo-nos avançar com segurança em nossa pesquisa. Os corpos de provas serão projetados para retirar as amostras necessárias para cada tipo de ensaio, que vai desde o projeto do fundido até o desenho CP usinado para o teste de tração. Os testes de tração serão feitos na escola e os demais na empresa.

A escolha do inoculante adequado desempenha um papel crucial na qualidade do ferro fundido, influenciando suas propriedades mecânicas e microestruturais, somente com a confecção dos CP's conseguiremos mostrar as diferenças ou não dos inoculantes no nosso processo.

A perda gradual do efeito de inoculação durante o trabalho com o metal ainda líquido é conhecida como Fading. Este processo pode resultar na formação de carbonetos e estruturas pobres em grafita, principalmente se transcorrer um significativo tempo entre a inoculação e vazamento dos moldes. O tempo de Fading para os principais inoculantes varia de 5 a 12 minutos, dependendo das variáveis de processo.

A razão desta perda de eficiência é o aumento do tamanho dos núcleos. Este Fading é mais rápido justamente depois da inoculação, quando a distância entre as micropartículas diminui. Observa-se maiores perdas de qualidade do fundido devido ao Fading, quando os níveis de magnésio residuais são baixos.

O tipo e as quantidades de inoculantes necessárias para um efetivo processo de inoculação dependem de onde e como o inoculante é utilizado. Muitas fundições utilizam somente uma inoculação, que é realizada juntamente com o processo de nodularização. Porém, tem se tornado prática comum, devido aos bons resultados, a pós-inoculação. A pós-inoculação é feita já na panela de transferência ou diretamente no jato do metal durante o vazamento da peça. As quantidades de inoculante necessárias na pós-inoculação podem ser até 10 vezes menores e com resultados mais eficientes de inoculação (SANTOS, 1991).

Nos valemos de nosso estudo e experiência em campo, de modo a demostrarmos na prática a aplicação do inoculante no ferro fundido nodular, conduzimos esses experimentos para comparar os diferentes tipos de inoculantes e suas aplicações em propriedades mecânicas e microestrutura.

O primeiro passo consistiu no estudo da norma para a confecção do corpo de prova, visando garantir a obtenção de todas as amostras necessárias para os ensaios de tração, metalografia, análise química e dureza. O modelo do corpo de prova para

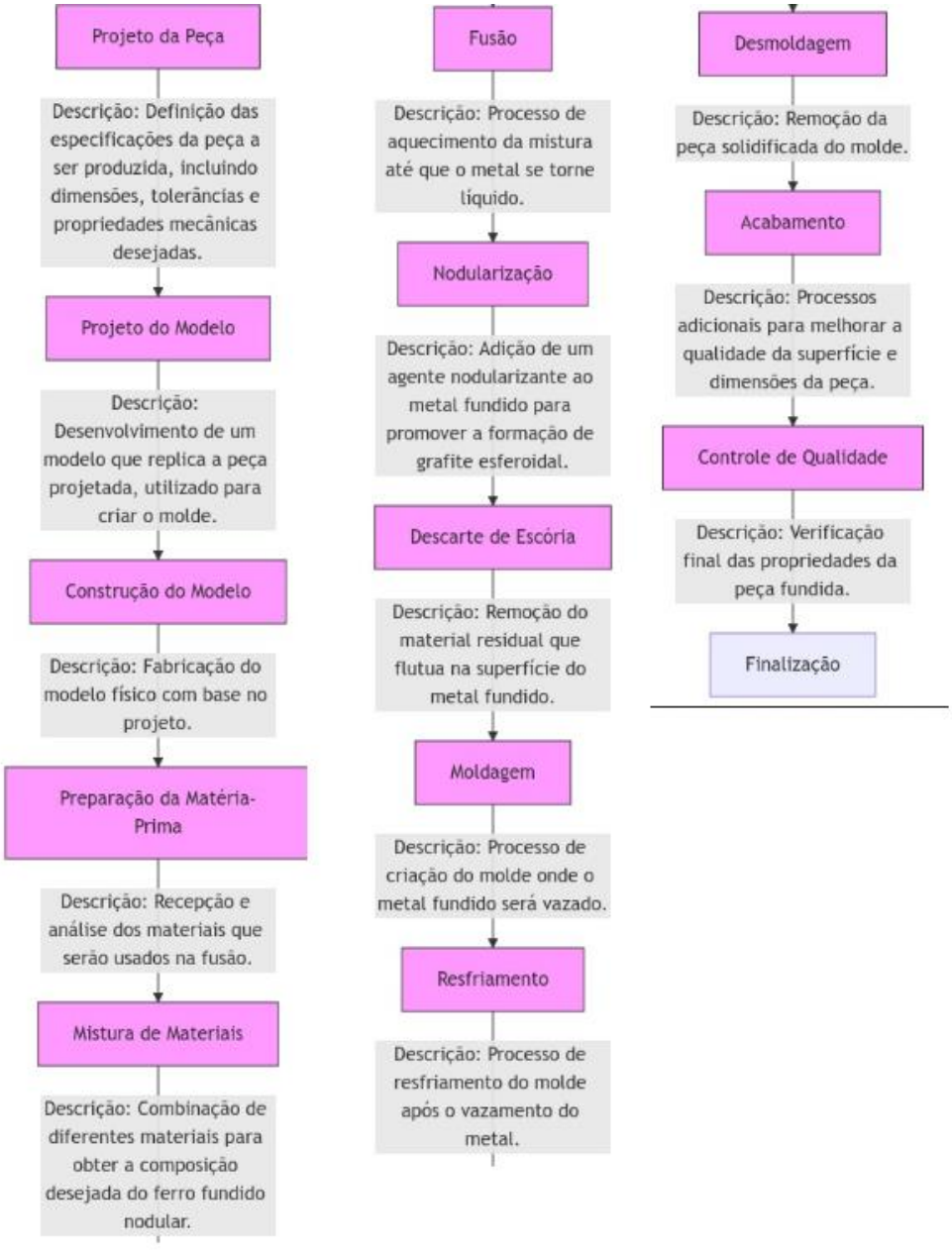
ferro fundido nodular, conhecido como "bananinha", é especificado pela norma ASTM E8/E8M, que aborda os métodos de ensaio de tração de materiais metálicos e é amplamente utilizada para a caracterização das propriedades mecânicas, incluindo o ferro fundido nodular.

Após a elaboração do corpo de prova, este foi enviado para a produção, onde teve início o processo de moldagem em areia de resina de cura a frio. Com o molde pronto e curado, foram realizados o acabamento e a pintura necessários.

Uma etapa crucial foi a preparação da carga fria, planejada com a seguinte composição: 60% de gusa, 30% de retorno e 10% de sucata. Essa formulação foi cuidadosamente definida para minimizar a interferência de variáveis e garantir a homogeneidade da liga final.

Após o vazamento do molde, foram retidas as amostras necessárias para análise metalográfica, que foram realizadas na empresa. Os resultados mostraram pouca variação entre as amostras, exceto naquelas que não receberam inoculante, que apresentaram uma estrutura perlítica, conforme o esperado. O ensaio de tração foi conduzido na Escola Trajano Camargo, permitindo a avaliação das propriedades mecânicas das amostras, após realizar os testes foi discutido a viabilidade ou não da implementação do uso deste novo inoculante.

Figura 1: Fluxograma processo de fundição F°F° Nodular



Para concluirmos todas as etapas propostas para o desenvolvimento desse projeto, organizamos o seguinte cronograma:

Figura 2: Cronograma das etapas do projeto de TCC

	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
Explicação da metodologia										
Pesquisa do tema										
Revisão bibliográfica										
Escolha do tema										
Plano de Pesquisa										
Vazamento CP										
Preparação das Amostras										
Realização dos Ensaios										
Discução de Resultados										

Fonte: Os autores (2024).

2.3. Análise de resultados

O Primeiro deles foi a análise química, utilizado para o controle da qualidade do material na etapa de vazamento do metal. Conforme abaixo segue composições dos três teste.

Tabela 1: Composição química dos testes realizados

AMOSTRAS	%C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Cu	% Mg
SEM INOCULAÇÃO	3,71	1,75	0,30	0,11	0,01	0,03	0,08	0,059
INOCULANTE COM CALCIO E BARIO	3,68	2,14	0,31	0,10	0,00	0,03	0,09	0,047
INOCULANTE C/ ZIRCÔNIO	3,68	2,11	0,30	0,11	0,00	0,03	0,08	0,051

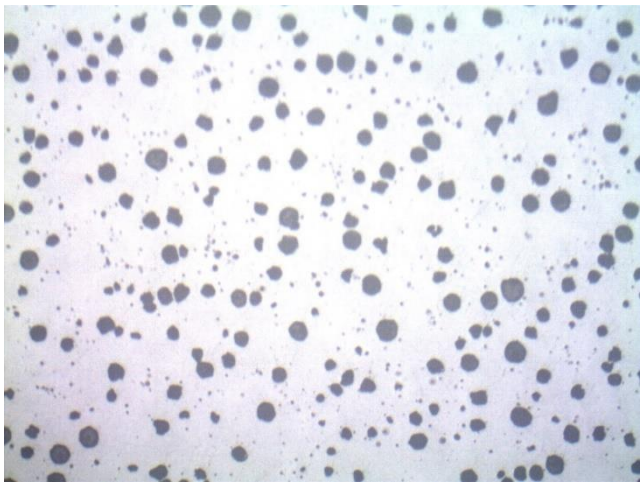
Fonte: Valores cedidos pela empresa após análise via espectrômetro

Dito isso, visando deixar os elementos com a composição mais similar para comparação dos resultados dos testes, exceto o silício do sem inoculante pois havia

feito a inoculação com isso elemento apresenta teor do ferro base (antes de inoculação)

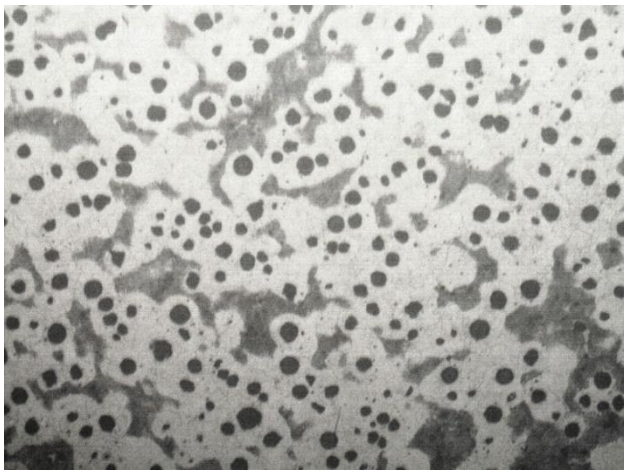
Esta análise foi realiza na empresa via espectrômetro de via óptica. Após os corpos de prova fundidos foram retiradas amostras para o ensaio metalográfico, ensaio realizado na empresa, conforme exposto abaixo:

Figura 3: Análise metalográfica das amostras retiradas do teste do inoculante já em uso



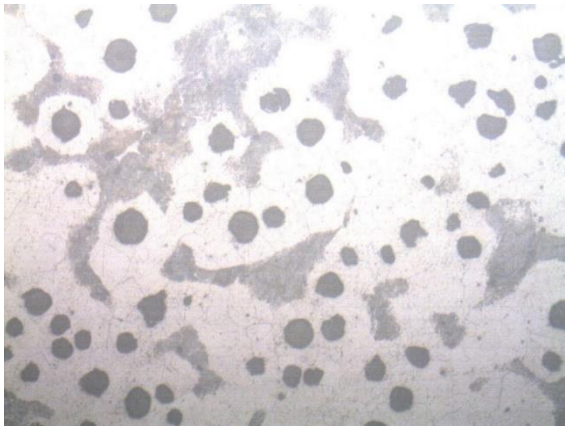
Fonte: Os autores (2024).

Figura 4: Amostra sem ataque com reagente químico



Fonte: Os autores (2024).

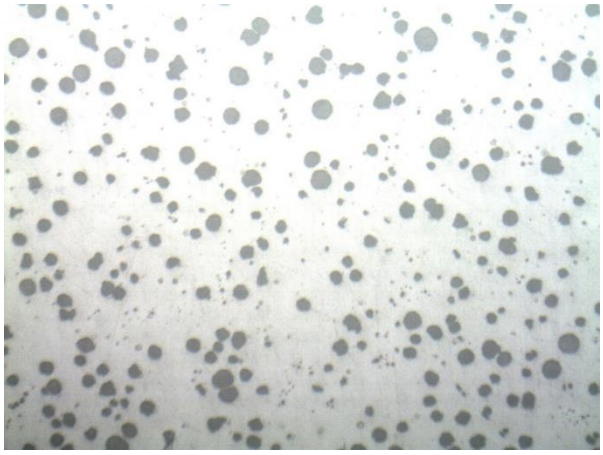
Figura 5: Amostra com ataque químico com nital 3% com 100X



Fonte: Os autores (2024).

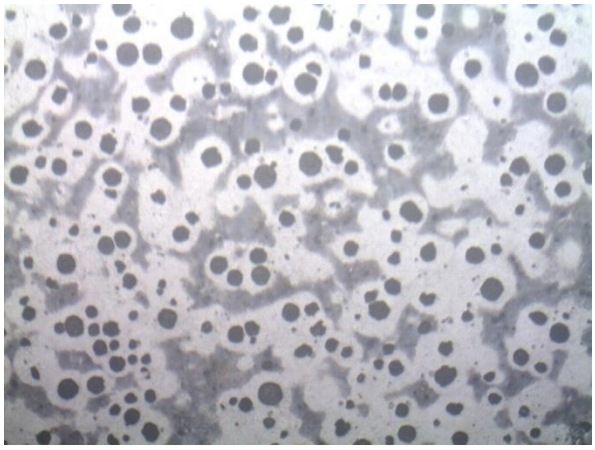
Amostra com ataque químico com nital 3% com 200x.
A microestrutura apresenta uma predominância significativa da matriz ferrítica, acompanhada por nódulos de grafite bem formados. Essa configuração é crucial para as propriedades mecânicas do material, proporcionando um equilíbrio entre resistência e ductilidade.

Figura 6: Análise metalográfica das amostras retiradas do teste do inoculante de zircônio testado



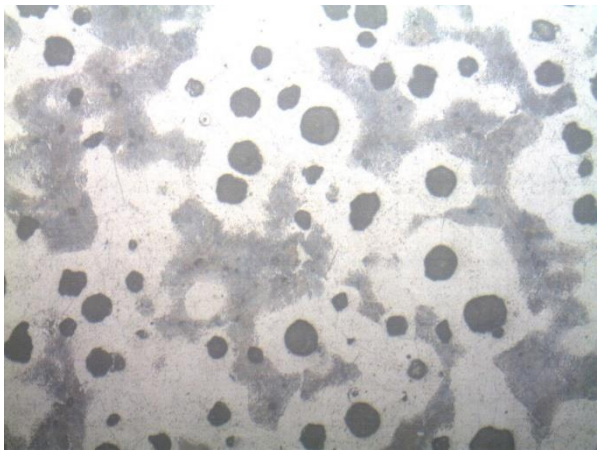
Fonte: Os autores (2024)

Figura 7: Amostra sem ataque com reagente químico



Fonte: Os autores (2024).

Figura 8: Amostra com ataque químico com nital 3% com 100X

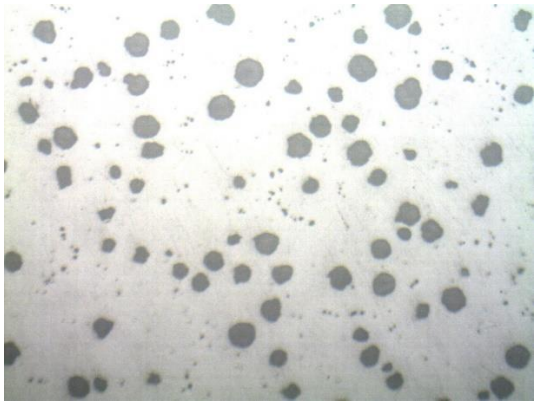


Fonte: Os autores (2024).

Amostra com ataque químico com nital 3% com 200x

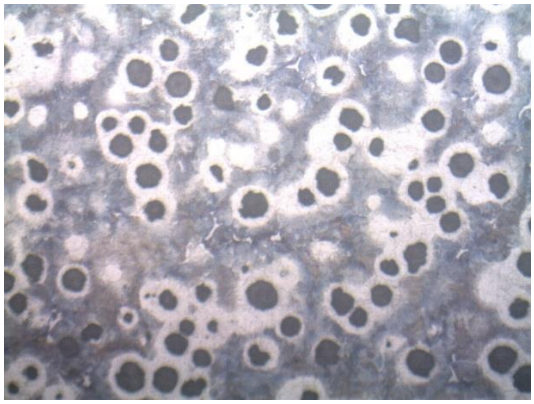
Análise: Apresenta uma microestrutura com predominância da matriz ferrítica, caracterizada por nódulos de grafite bem formados. Essa configuração é essencial para otimizar as propriedades mecânicas do material.

Figura 9: Análise metalográfica das amostras retiradas do teste sem o uso de inoculante



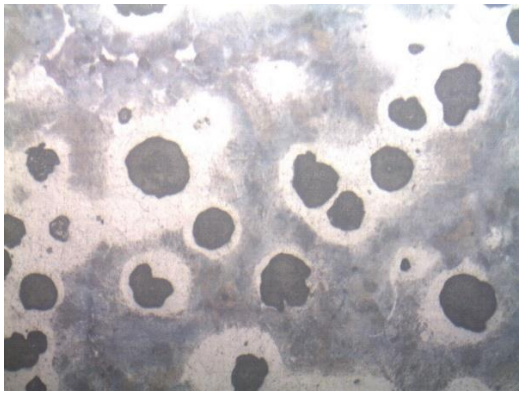
Fonte: Os autores (2024).

Figura 10: Amostra sem ataque com reagente químico



Fonte: Os autores (2024).

Figura 11: Amostra com ataque químico com nital 3% com 100X



Fonte: Os autores (2024).

Amostra com ataque químico com nital 3% com 200x

Análise: Apresenta uma microestrutura com predominância da matriz perlítica, intercalada por pontos de matriz ferrítica e nódulos bem formados. É importante ressaltar que a formação dessa matriz perlítica se deve à ausência de inoculante durante o processo, o que influenciou diretamente nos resultados do teste.

Posteriormente, o ensaio de dureza foi realizado na ETEC Trajano Camargo com auxílio dos professores Darci José Mestre e José Augusto Montessano conforme tabela abaixo:

Tabela 2: Teste de Dureza dos materiais.

MATERIAL	DUREZA ENCONTRADA
Sem inoculação	225 HB
Inoculante com cálcio e bário	195 HB
Inoculante c/ zircônio	191 HB

Fonte: Os autores (2024).

Foi realizado a medição em três pontos e calculada a média dos valores. Por fim, realizamos os testes de resistência, escoamento, alongamento e redução de área, que assim como o de dureza foram realizados na ETEC Trajano Camargo, com auxílio dos professores citados acima. Os dados encontrados estão expressos nas tabelas abaixo:

Tabela 3: Teste de Resistência dos materiais.

MATERIAL	LIMITE DE RESISTÊNCIA (Mpa)		
Amostras	1	2	3
Sem inoculação	476	393	378
Inoculante com cálcio e bário	480	489	495
Inoculante c/ zircônio	569	570	562

Fonte: Os autores (2024)

Tabela 4: Teste de Escoamento dos materiais.

MATERIAL	LIMITE DE ESCOAMENTO (Mpa)		
Amostras	1	2	3
Sem inoculação	261	248	225
Inoculante com cálcio e bário	265	251	222
Inoculante c/ zircônio	249	247	242

Fonte: Os autores (2024).

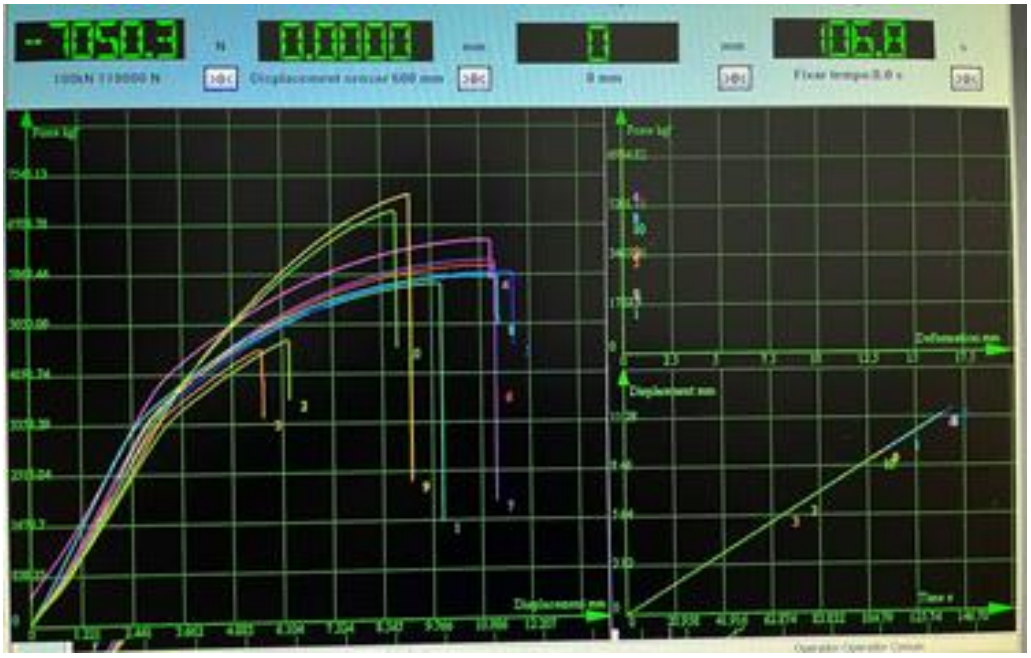
Tabela 5: Teste de Alongamento dos materiais.

MATERIAL	LIMITE DE ALONGAMENTO		
Amostras	1	2	3
Sem inoculação	4,5	2,0	4,87
Inoculante com cálcio e bário	10,51	9,95	9,98
Inoculante c/ zircônio	11,77	11,56	11,12

Fonte: Os autores (2024).

Desenvolvimento dos Ensaios (IMAGENS)

Fonte: Os autores (2024).



Fonte: Os autores (2024).

3.CONCLUSÃO

Este trabalho evidencia a importância essencial do uso de inoculantes no ferro fundido nodular, elemento-chave para otimizar suas propriedades mecânicas e assegurar a qualidade do material. Os inoculantes desempenham papel crucial na formação de grafite esferoidal, característica que confere ao ferro fundido nodular qualidades como alta resistência à tração, ductilidade e tenacidade.

A análise detalhada dos efeitos da inoculação revela não apenas as consequências adversas de sua ausência, mas também os riscos associados à modificação de formulações já estabelecidas. O processo de seleção de inoculantes é altamente específico e baseado em extensa validação técnica; qualquer alteração pode comprometer o desempenho do ferro fundido e gerar falhas nos produtos finais.

Os resultados não apresentaram diferença significativa nos ensaios de tração e metalografia como eram esperados, portanto reforça a inviabilidade técnica e econômica (visto que o custo de um inoculante para o outro aumenta 30%) de alterar os inoculantes utilizados e oferece insights indispensáveis para a prática da metalurgia, promovendo processos que assegurem a confiabilidade, durabilidade e excelência dos materiais empregados em aplicações industriais de alta exigência.

Conclui-se, portanto, que a substituição dos inoculantes se mostrou inviável, uma vez que não resultou em alterações significativas nas propriedades metalográficas e mecânicas da estrutura avaliada.

REFERÊNCIAS

ABERTIN, E. **Obtenção de ferro fundido nodular ferrítico no estado bruto de fundição**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

BOHÓRQUEZ, C. E. N. **Recuperação de inoculante na fabricação de peças de ferro fundido em moldes de areia**. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244738. Acesso em: 16 out. 2024.

SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares.** São Paulo: IPT, 1991.

VILELA, F. J. **Efeito de algumas variáveis de processo na obtenção do ferro fundido nodular ferrítico no estado bruto de fundição**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2010. Disponível em: https://maua.br/files/dissertacoes/efeitos-de-algumas-variaveis-de-processo-na-obtencao-do-ferro-fundido-nodular-ferritico-no-estado-bruto-de-fundicao.pdf. Acesso em: 16 out. 2024.