

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

VITÓRIA APARECIDA GUEDES DE OLIVEIRA

**SUBSTITUIÇÃO DO COQUE CALCINADO DE PETRÓLEO POR GRAFITE SINTÉTICO
NA FABRICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

MANAUS - AM

2025

VITÓRIA APARECIDA GUEDES DE OLIVEIRA

**SUBSTITUIÇÃO DO COQUE CALCINADO DE PETRÓLEO POR GRAFITE SINTÉTICO
NA FABRICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de bacharelado em Engenharia de Materiais, da Escola Superior de Tecnologia como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Roger Hoel Bello

MANAUS - AM

2025

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

O48s

Oliveira, Vitória Aparecida Guedes de

Substituição de coque calcinado de petróleo por grafite sintético na fabricação de ferro fundido cinzento : estudo de caso na fabricação de ferro fundido cinzento a ser aplicado em peças internas de motores à combustão de empresas do pim / Vitória Aparecida Guedes de Oliveira. Manaus : [s.n], 2025.

21 f.: il.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Materiais- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025.

Orientador: Bello, Roger Hoel.

1. carburante. 2. coque calcinado de petróleo. 3. grafite sintético. 4. ferro fundido cinzento. I. Bello, Roger Hoel (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)66.03


**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

VITÓRIA APARECIDA GUEDES DE OLIVEIRA


**SUBSTITUIÇÃO DO COQUE CALCINADO DE PETRÓLEO POR GRAFITE SINTÉTICO
NA FABRICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de bacharelado em Engenharia de Materiais,
da Escola Superior de Tecnologia como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ROGER HOEL BELLO**
Data: 08/12/2025 20:23:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roger Hoel Bello – orientador
Universidade do Estado do Amazonas - UEA/EST

Documento assinado digitalmente
 **JOSE COSTA DE MACEDO NETO**
Data: 08/12/2025 22:01:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto – membro externo
Universidade do Estado do Amazonas - UEA/EST

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO DE LIMA MESQUITA**
Data: 08/12/2025 18:47:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio de Lima Mesquita – membro interno
Universidade do Estado do Amazonas - UEA/EST

Manaus, 01 de dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha fé, que me deram força e sabedoria ao longo desta jornada. Ao meu orientador, Professor Roger Bello, pela orientação e pela dedicação ao desenvolvimento deste trabalho, bem como aos membros da banca examinadora. Aos meus colegas de trabalho, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste projeto.

Ao meu pai, Paulo, especialmente, pelos ensinamentos e por todo incentivo aos meus estudos. À minha mãe, Eugênia, pelo amor e apoio incondicional. Aos meus professores do curso de Engenharia de Materiais, pela formação e pela contribuição essencial no meu crescimento acadêmico.

À minha amiga Luciana, que esteve comigo, me apoiou, me motivou e tornou a caminhada mais leve.

Finalmente a todos que contribuíram de alguma forma, deixo o meu sincero agradecimento.

RESUMO

Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia das indústrias de fundição, os materiais focados na produção de peças para a indústria automobilística, como o ferro fundido têm estimulado importantes atividades de pesquisa. Os ferros fundidos (FoFo) possuem um percentual de carbono superior a 2,1 % em massa e são uma liga ternária de Fe-C-Si (Ferro-Carbono-Silício), com percentual superior a 1% em massa de silício. O FoFo cinzento é um material muito selecionado nessa indústria para uma infinidade de partes internas de motores a combustão por possuir elevada resistência à tração e dureza em condições severas. Esse aumento de carbono na matriz é conseguido através da adição extra de carbono (carburação) com o coque calcinado de petróleo entre outros. Para aperfeiçoar o processo da fabricação do ferro fundido no aumento da concentração de carbono de uma maneira mais eficaz e contribuir com um menor desperdício dessa matéria-prima foi escolhido o grafite sintético nesse trabalho, pois além do carburante se dissolver mais rápido e de forma mais uniforme possui uma estrutura cristalina. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a substituição do coque calcinado de petróleo por grafite sintético na fabricação de peças internas de motores a combustão de ferro cinzento da indústria do PIM. As técnicas de análise térmica, espectrometria para análise de composição química de metais, ensaio mecânico de tração, dureza, metalografia e microscopia ótica foram utilizadas. De acordo com os testes iniciais o grafite sintético é um potencial carburante substituto para coque calcinado de petróleo, pois utilizando a mesma quantidade de coque padrão (17 + 3 kg) foram atingidas as propriedades mecânicas adequadas das especificações da fábrica para o ferro fundido cinzento (FC250), ou seja, ferro fundido cinzento com matriz ferrítica e carbono tipo “A” > 70%. Os testes com menores quantidades, 16 e 14 kg estão em andamento para as propriedades mecânicas, porém a composição de carbono foi atingida em ambos os testes e com valores superiores ao coque e com maior homogeneidade. Para a carga de 16 kg de grafite sintético foi obtida uma composição 8,2% maior. Enquanto que para a menor carga foi obtida 5,5 % maior que o coque calcinado de petróleo. Assim, o grafite sintético pode ser substituto do coque calcinado de carbono como carburante para a fabricação do ferro fundido cinzento.

Palavras-chave: carburante; coque calcinado de petróleo; grafite sintético; ferro fundido cinzento.

ABSTRACT

Currently, with the development of foundry industry technology, materials focused on the production of parts for the automotive industry, such as cast iron, have stimulated significant research activities. Cast irons have a carbon percentage greater than 2.1% by mass and are a ternary alloy of Fe-C-Si (Iron-Carbon-Silicon), with a silicon percentage greater than 1% by mass. Gray cast iron is a highly selected material in this industry for a multitude of internal parts of combustion engines due to its high tensile strength and hardness under severe conditions. This increase in carbon in the matrix is achieved through the extra addition of carbon (carburization) with calcined petroleum coke, among other methods. To improve the cast iron manufacturing process by increasing carbon concentration more effectively and contributing to less waste of this raw material, synthetic graphite was chosen in this work because, in addition to dissolving the carburizer faster and more uniformly, it has a crystalline structure. Thus, this work aimed to evaluate the substitution of calcined petroleum coke with synthetic graphite in the manufacture of internal parts of gray cast iron combustion engines in the PIM industry. Thermal analysis, spectrometry for chemical composition analysis of metals, tensile mechanical testing, hardness testing, metallography, and optical microscopy techniques were used. According to initial tests, synthetic graphite is a potential substitute fuel for calcined petroleum coke, since using the same quantity of standard coke (17 + 3 kg) the adequate mechanical properties of the factory specifications for gray cast iron (FC250) were achieved, i.e., gray cast iron with a ferritic matrix and “type A” carbon > 70%. Tests with smaller quantities, 16 and 14 kg, are ongoing for mechanical properties; however, the carbon composition was achieved in both tests with values higher than coke and with greater homogeneity. For 16 kg charge of synthetic graphite, an 8.2% higher composition was obtained. While for the lowest charge, a 5.5% higher yield was obtained compared to calcined petroleum coke. Thus, synthetic graphite can be a substitute for calcined carbon coke as a fuel for the manufacture of gray cast iron.

Keywords: cooking fuel; calcined petroleum coke; synthetic graphite; gray cast iron.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS	10
2.1 OBJETIVO GERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1 MATERIAIS	11
3.2 PREPARAÇÃO DA LIGA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO	11
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA (VALIDAÇÃO).....	11
3.3.1 Análise térmica	11
3.3.2 Composição química	12
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	12
3.4.1 Metalografia	12
3.4.2 Ensaio de tração	13
3.4.3 Ensaio de dureza	13
3.4.4 Microscopia óptica	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1 TRY OUT (HOMOGENEIZAÇÃO DA LIGA).....	14
5 CONCLUSÃO	19
6 REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Manaus-AM abriga um dos polos industriais mais avançados do País, o Polo Industrial de Manaus (PIM), também chamado de Zona Franca de Manaus (ZFM) administrado pela SUFRAMA. O PIM abriga várias indústrias, concentradas nos setores eletroeletrônicos (Polo Eletroeletrônico), plástico (Polo Plástico), e principalmente de motocicletas (Polo Duas Rodas).¹ Segundo Abraciclo (2018) existem inúmeros fabricantes de motocicletas instalados no PIM, sendo liderados pelas empresas Moto Honda e Yamaha Motor e estando entre os oito complexos industriais do setor no mundo.

Atualmente, houve um aumento expressivo da produção de motocicletas devido à inflação dos valores dos combustíveis fósseis. Adicionalmente, com o desenvolvimento da tecnologia das motocicletas, as indústrias de fundição estão focadas na produção de peças internas para os motores à combustão cada vez mais precisas utilizando materiais clássicos como o ferro fundido. As camisas de cilindro, por exemplo, são peças fabricadas por ligas de ferro fundido cinzento, pois esse material oferece facilidade na fusão e na moldagem, boa resistência mecânica à compressão, boa usinabilidade e resistência ao desgaste e baixo custo de produção.

De acordo com Chiaverini (2008), os ferros fundidos são uma liga ternária de Fe-C-Si (Ferro-Carbono-Silício), com teores de carbono superiores a 2,11% em massa e percentual de silício superior a 1% em massa. Esse teor de carbono é o limite da solubilidade do carbono na austenita. As principais matérias-primas usadas na produção de ferros fundidos são o ferro-gusa, a sucata de aço (*scrap*), carburantes, inoculantes, elementos de ligas, como o silício entre outros. Podem ser classificados como cinzentos, brancos, nodulares e maleáveis. Quando se solidificam na fase estável (Fe-Grafita) com o carbono na microestrutura na forma parcialmente livre (grafita), na forma de veios ou lamelas de grafita são chamados de ferros fundidos cinzentos. Dependendo da taxa de resfriamento podem ter a matriz perlítica ou ferrítica.

O silício atua como elemento grafitizante favorecendo a decomposição da cementita, com um poder de atuação de 1/3 da reatividade do carbono. Assim, as ligas ternárias podem ser estudadas como binárias em um sistema Fe-C utilizando o conceito de “Carbono Equivalente” (C_{EQ}) seguinte equação, $C_{EQ} = \%C + 1/3 (\%Si)$. O ferro gusa é uma das principais fontes de ferro e carbono do ferro fundido, porém é necessária a suplementação (correção) de carbono através do uso de carburantes como o coque calcinado de petróleo, grafite, carboneto de silício (SiC), entre outros. A carburação pode ser realizada de diversas maneiras: a) sobre o metal líquido, após a retirada da escória (mais utilizada); b) junto com a carga sólida aquecida; e c)

com o metal no estado pastoso; cada uma possui suas vantagens e desvantagens. A aplicação de carburantes ajuda a garantir a formação da estrutura lamelar da grafita, assegurando que o teor de carbono esteja dentro da especificação para a formação da grafita e evitando a formação de subprodutos indesejados (BATISTA, 2022; HUPALO et al., 2010; VERRAN, s.d.). A distribuição da grafita e sua morfologia são fatores fundamentais nas propriedades dos ferros fundidos cinzentos e determinam suas características mecânicas. Algumas normas classificam os ferros fundidos cinzentos por avaliando a morfologia, distribuição e o tamanho das grafitas, por exemplo, a ASTM A 247 (Figura 1). Para a produção das camisas de cilindros, o ferro fundido ferrítico com o carbono/grafita tipo A é o selecionado.

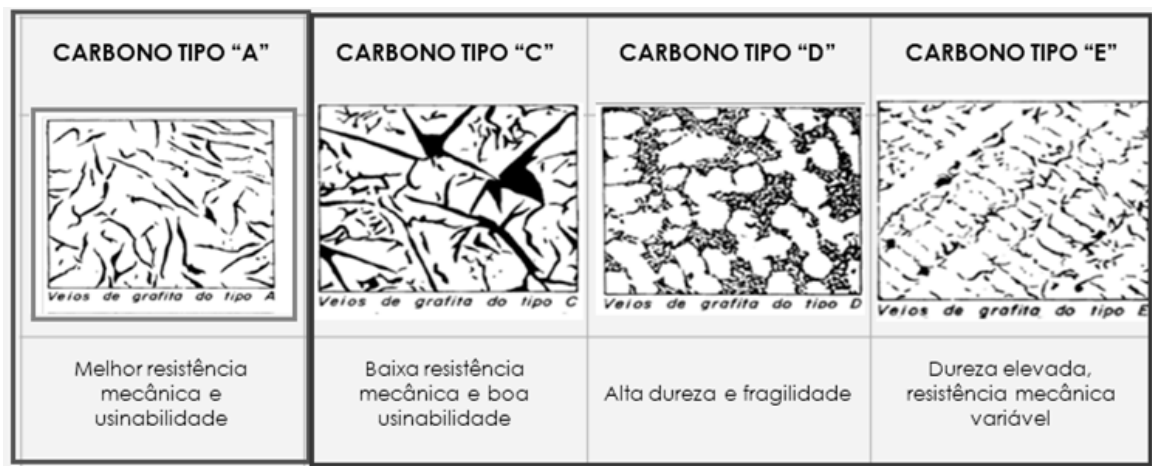


Figura 1 - Ilustração dos tipos de grafita: Grafita tipo A, Grafita tipo C, Grafita tipo D e Grafita tipo E. (Fonte: Adaptado de ASTM A 247-16a, 2016).

O coque calcinado de petróleo é o mais utilizado nas indústrias de fundição, por ser um carburante mais barato. Porém apresenta em sua composição maior presença de nitrogênio que pode contribuir, em certas condições, para o surgimento de defeitos de fundição. Adicionalmente está acarretando em um problema de alto consumo desse carburante no forno fusor da indústria. Principalmente para ajustar a composição de carbono na liga do ferro fundido cinzento para a produção da camisa do cilindro. O grafite sintético é uma alternativa ao coque calcinado de petróleo. É produzido industrialmente em fornos elétricos a aproximadamente 2.500 °C, utilizando coque de petróleo calcinado como matéria-prima principal (CHIAVERINI, 2008; EDALATI, et al., 2005) As propriedades finais do material são fortemente influenciadas pelo tempo de permanência no forno. Trata-se da forma mais pura de carbono empregada em processos metalúrgicos, caracterizada por alta concentração de grafita e teores extremamente baixos de voláteis e enxofre. Por isso, é considerado o carburante de maior desempenho para

ferros fundidos nodular e cinzento, bem como para aços especiais. Neste contexto, este trabalho buscou solucionar o problema de excesso de carburante buscando substituir o coque calcinado de petróleo por grafite sintético na fabricação do ferro fundido cinzento de matriz ferrítica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar a substituição do carburante coque calcinado de petróleo por grafite sintético na produção de ferro fundido cinzento a ser aplicado em peças internas de motores à combustão de empresas do PIM.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aumentar o tempo de homogeneização do banho (forno fusor) para elevar a formação do carbono tipo A;
- Trocar o tipo de carburante na fabricação da liga para melhorar homogeneização química do banho;
- Escolher o melhor carburante grafite sintético na fabricação da liga;
- Analisar e avaliar o efeito da adição do grafite sintético nas propriedades finais do ferro fundido cinzento ferrítico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

A própria empresa realiza a fabricação da liga FC250 com matérias-primas próprias de outros setores e/ou compradas por fornecedores nacionais. Os carburantes utilizados neste trabalho são o coque calcinado de petróleo, com carbono fixo superior a 98 % e teor de cinzas de 0,23 %. Grafite sintético, com carbono fixo superior a 99 % e teor de cinzas de 0,10 %, ambos obtidos da empresa Grupo Unimetal, Brasil.

3.2 PREPARAÇÃO DA LIGA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

A liga FC250 (ferro fundido cinzento) foi preparada em um forno de indução INDUCTOTHERM® (forno fusor) com capacidade de 1.000 kg de metal fundido, porém cada batelada de material é de 900 kg. O forno de fusão foi carregado com uma carga sólida composta por *scrap* (rejeitos do processo de fundição), ferro gusa, elementos de liga. O forno foi aquecido a 1.550-1.580 °C e após completa fusão da carga o banho foi preparado para atender as especificações definidas com adição de carburante (coque calcinado de petróleo ou grafite sintético).

Após a remoção da escória e ajuste da temperatura do banho, uma amostra de metal líquido foi coletada para as análises simultâneas da composição química e análise térmica. Após a validação da faixa de composição química a massa metálica fundida passa pelo forno vazador que controla a temperatura (1.380-1.420 °C) e o tempo de retenção do metal líquido. Finalmente dosa a quantidade de metal para o processo de fundição chamado de *spincast*.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA (VALIDAÇÃO)

3.3.1 Análise térmica

Uma porção de metal líquido foi vazada em um recipiente contendo um termopar. Este termopar, acoplado a um equipamento de registro de dados, grava a evolução da temperatura. A técnica se baseia na análise da curva de resfriamento de uma amostra de metal líquido. Durante a solidificação, ocorrem mudanças de fase que liberam calor latente, resultando em patamares ou mudanças de inclinação na curva de temperatura versus tempo. É uma técnica

crucial e rápida na fundição de ferros fundidos para determinar e controlar o teor de carbono equivalente ($\%C_{EQ}$), carbono ($\%C$) e silício ($\%Si$), baseando-se nas temperaturas críticas de solidificação da liga. Na empresa é realizada logo após a saída da liga do metal fundido do forno fusor para validar a entrada no forno vazador.

3.3.2 Composição química

Uma porção de metal líquido foi inserida em um recipiente metálico resfriado a água, para obter um disco de ferro fundido cinzento. Após a solidificação da amostra foi encaminhado para a análise de composição química utilizando o método de espectrometria óptica de emissão (OES) para medição da composição química do material.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

3.4.1 Metalografia

A metalografia é um estudo para determinar a microestrutura dos materiais. Para verificar se a peça de ferro fundido cinzento fabricada está de acordo com as especificações da fábrica, isto é, FC250 com matriz ferrítica e carbono tipo A. O tubo fabricado pela centrífuga é cortado em três posições (início, meio e fim) conforme ilustra a Figura 2. Então, passa por todos os processos de embutimento, lixamento, polimento, ataque ácido e então microscopias ótica e/ou eletrônica.

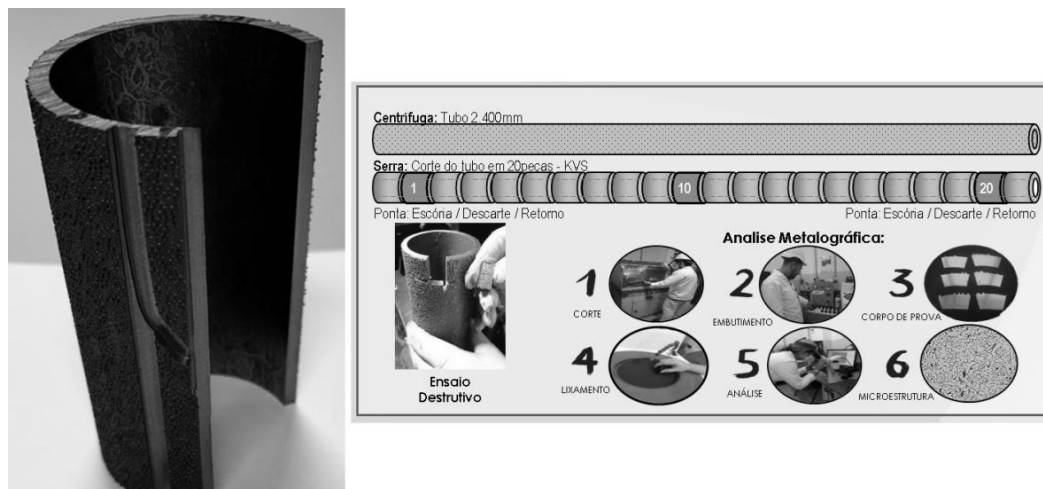


Figura 2 – Parte do tubo fundido e o esquema mostrando os passos para executar o processo de metalografia.

3.4.2 Ensaio de tração

A caracterização mecânica dos corpos de provas como resistência à tração, ductilidade e tensão de ruptura pode ser realizada por ensaio de tração. Oito corpos de prova de tração no formato de gravata (Figura 3) foram produzidos conforme a norma ASTM A48/A48M, e analisados em uma máquina universal de ensaios mecânicos (EMIC DL2000), com velocidade de ensaio de controlada, extensômetro (Trd 1) e célula de carga Trd 26 (20 kN).



Figura 3 – Corpos de provas para o ensaio de tração.

3.4.3 Ensaio de dureza

As análises de dureza do tipo Rockwell B uma carga de 100 kg e uma esfera de aço temperado de diâmetro de 1,58 mm para penetrar o material. É apropriado para materiais menos duros, como o ferro fundido. Foram coletadas aleatoriamente um total de 5 amostras O resultado da dureza de cada amostra foi obtido pela média de dureza de cinco indentações para cada amostra. A especificação é de valores de dureza na faixa de 93 ~ 104

3.4.4 Microscopia óptica

Microscopias podem ser utilizadas com o objetivo de caracterizar visualmente a microestrutura do material. A microscopia óptica (Leica, DM750 M) foi utilizada para revelar a microestrutura do material fabricado. Após o ensaio de metalografia, a peça embutida de fundido cinzento FC250 deve estar de acordo se possuir a matriz ferrítica e carbono tipo A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TRY OUT (HOMOGENEIZAÇÃO DA LIGA)

Foram realizados testes iniciais para tentar solucionar o consumo excessivo de carbono na liga metálica no forno fusor. O forno tem a capacidade de 1.000 kg, porém cada batelada de produção é calculada para 900 kg de liga. Como mencionado no capítulo inicial, a liga de ferro fundido possui uma porcentagem superior de carbono ($> 2,11\%$) então é necessário realizar a suplementação para adequar a composição da liga. Na fábrica são produzidas camisas de cilindro para motores de combustão interna de motocicletas (MP-2R) e automóveis (MP-4R). Para as peças da MP-2R a faixa de composição de carbono é de 3,4-3,7%. Já para a MP-4R a composição inicial é ligeiramente superior 3,6-3,7% em massa, conforme ilustra o esquema da Figura 4.

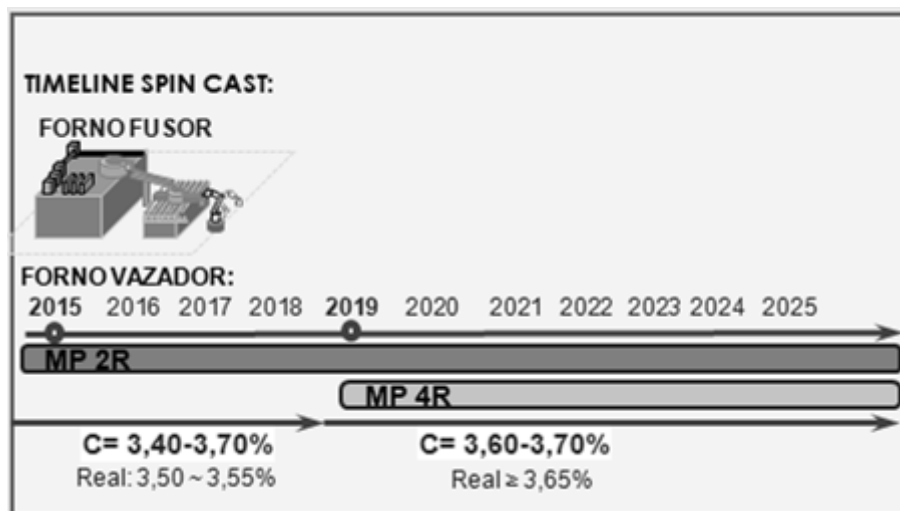


Figura 4 – Composição da liga para a indústria 2R e 4R.

Ao final do preparo da liga de ferro fundido, após as correções com o carburante, seria ideal que a massa de carbono (derivada do coque calcinado de petróleo) estivesse próxima a 14,5 kg. Porém foi constatado durante o período de três meses um consumo elevado desse material. Houve um aumento de 37,9% em relação ao plano da empresa. A Figura 5 ilustra os valores teóricos e reais da composição de carbono no forno fusor. Os valores da composição real estão muito abaixo do esperado, indicando que a homogeneização do carbono no forno esteja parcialmente dispersa.

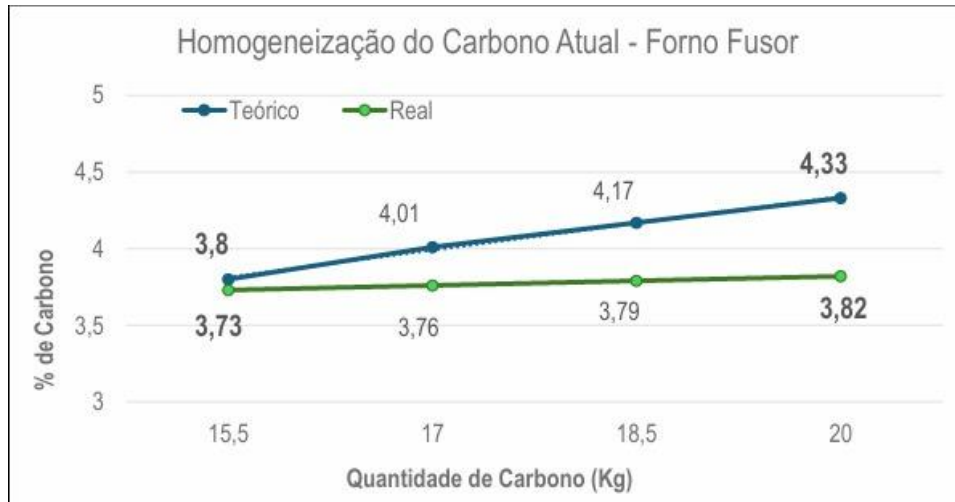


Figura 4 – Composição de carbono teórica e real na liga de FC250.

Dentro deste contexto é preciso reduzir a quantidade do consumo de carbono, atendendo a especificação e garantindo a qualidade do carbono tipo A. Foram propostas três medidas para tentar atender as especificações: Proposta 1: Aumentar o tempo de homogeneização do banho manualmente; Proposta 2: Aumento da bobina do forno fusor e Proposta 3: Trocar o tipo de carbono para a fabricação da liga. Cada uma passou por criteriosas diretrizes e análises como, por exemplo: segurança, gerenciamento, qualidade, custo, entrega e meio ambiente.

A primeira proposta para aumentar o tempo de homogeneização do banho foi reprovada em 3 dos 6 requisitos. Existe um alto risco de queimadura para o operador, pois haverá agitação do banho, bem como alto risco de problema ergonômico. Com a homogeneização manualmente o colaborador não consegue misturar o banho (900 kg) completamente e assim não garante a homogeneização completa na liga.

A segunda proposta de aumento da bobina do forno fusor para realizar a mistura de forma mais homogênea foi reprovada também por questões técnicas. O fabricante atual não garante a segurança do forno mediante alterações e não realiza a alteração no projeto. A terceira proposta e que foi a escolhida por unanimidade é a mais adequada para um retorno mais rápido e com baixo custo de produção. Existem diversos estudos mostrando a substituição de carburantes no processo de fundição (TEWARY et al. 2022; TSCHIPTSCHIN e GUESSER, 2022; THEUWISSEN et al., 2016). A substituição do atual coque de carbono calcinado por grafite sintético é um bom candidato. Chiaverini (2008) indica esse carburante como a mais pura forma de carbono para a indústria metalúrgica, devido à alta concentração de grafita e baixos níveis de voláteis. Além disso, se dissolve mais rápido e de forma mais uniforme, além de ser um material cristalino, em comparação ao coque calcinado ser amorfo. A Figura 5 ilustra

melhor um comparativo entre os dois tipos de carburantes. De acordo com a Figura 5 é possível observar que todas as propriedades, homogeneização, dissolução, pureza e controle metalúrgico são mais favoráveis para o grafite sintético, quando comparado ao coque calcinado de petróleo.

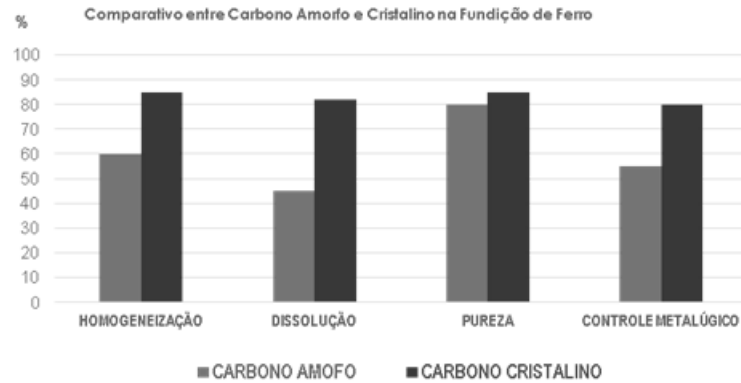


Figura 5 – Comparativo entre os carburantes na liga de FC250.

O próximo item irá tratar das caracterizações realizadas na liga FC250 produzida com o carburante grafite sintético e a comparação com o coque calcinado de petróleo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA FC250

Foram previstos três testes de adição do carburante grafite sintético, T1=14 kg, T2=16 kg e T3= 17 kg adicionados no forno fusor por batelada. Primeiramente foi realizado o T3 com 17 kg. Foi iniciado por esse teste, pois é a receita padrão da empresa, i.e., todos os ingredientes e massas padrões, porém trocando o carburante para grafite sintético. A Figura 6 ilustra os valores teóricos da composição de carbono, no mínimo de 3,80 ~ 4,00 % na liga após mistura no forno fusor e passagem pelas análises térmica e química. O controle rigoroso da operação do forno fusor é essencial para garantir a formação de Carbono tipo A.

De acordo com a Figura 6 é possível observar que os valores teóricos para o carburante grafite sintético no T3 foi de 4,01 %, enquanto o real 4,00 % no forno fusor. Os valores teórico e real estão praticamente iguais e estão no limite superior do estabelecido no forno fusor. Vale salientar que utilizando o coque calcinado de petróleo o valor real obtido no forno fusor foi de 3,76 %, por isso a adição de mais 3 kg de material, ou seja, o problema do excesso de material que a empresa quer solucionar. A carga final de coque calcinado foi de 20 kg de material para atender as especificações mínimas.

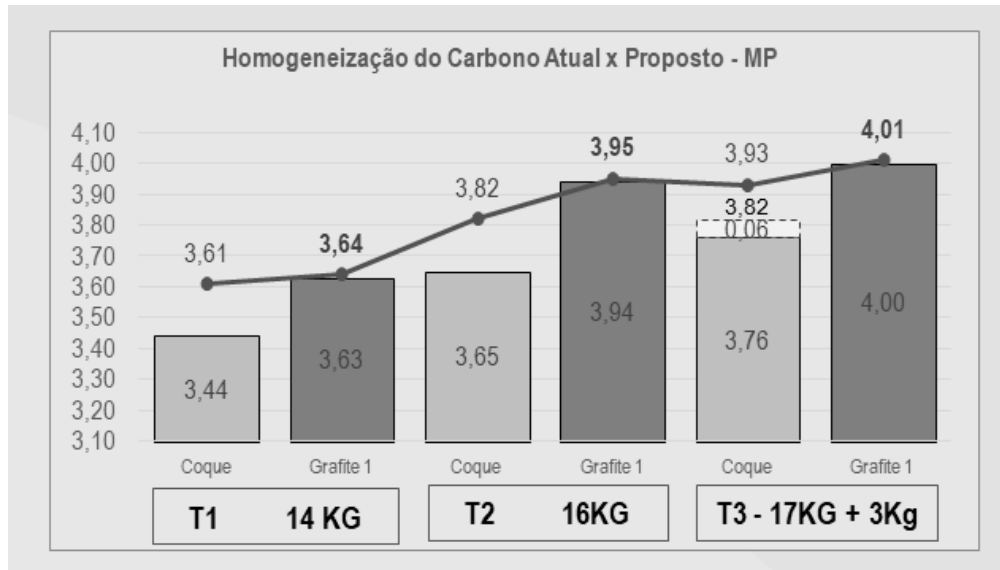


Figura 6 – Valores teóricos e reais da na liga de FC250 quando utilizado o grafite sintético e o coque calcinado de petróleo.

O forno vazador controla a temperatura e o tempo de retenção do metal líquido, promovendo uma solidificação mais uniforme e microestrutura desejável. Os valores teóricos da composição de carbono na liga após mistura no forno vazador ficam na faixa de 3,60 ~ 3,70%. Ou seja, já é a composição final que vai ser utilizada na liga FC250. Relembrando que as peças da MP-2R a faixa de composição de carbono é de 3,4-3,7%. Já para a MP-4R a composição inicial é ligeiramente superior 3,6-3,7% em massa. O T3 da liga FC250 (utilizando grafite) após passagem para o forno vazador ficou em 3,70% de carbono na amostra. Esse é um resultado muito promissor para a utilização de apenas 17 kg de material ao invés de 20 kg de coque. Outro detalhe importante foi à formação do carbono tipo A com quantidade superior a 70% em matriz ferrítica conforme a especificação para o material a partir dos ensaios metalográficos.

Para os ensaios mecânicos tração e dureza foram observados resultados satisfatórios quando foi utilizado o grafite sintético como carburante. A Figura 7 ilustra os gráficos de tensão versus deformação obtidos para FC250 com grafite e coque, respectivamente. Observando a Figura 7 percebe-se o padrão entre os gráficos, mostrando homogeneidade nas amostras produzidas. A especificação da empresa é que o limite de resistência à tração fique maior ou igual a 245 MPa. Foram obtidos valores mais elevados que a especificação e muito próximos utilizando ambos os carburantes, ou seja, 286 ± 16 MPa para o grafite e 282 ± 22 MPa para o coque.

Já em relação à dureza, a especificação da empresa é que a dureza do material fique na faixa de 93 ~ 104 HRB (dureza Rockwell B). Durante os testes foram testados 5 partes dos tubos conforme mostrou a metodologia proposta, e a média da dureza ficou $100 \pm 0,5$ HRB para ambos os carburantes.

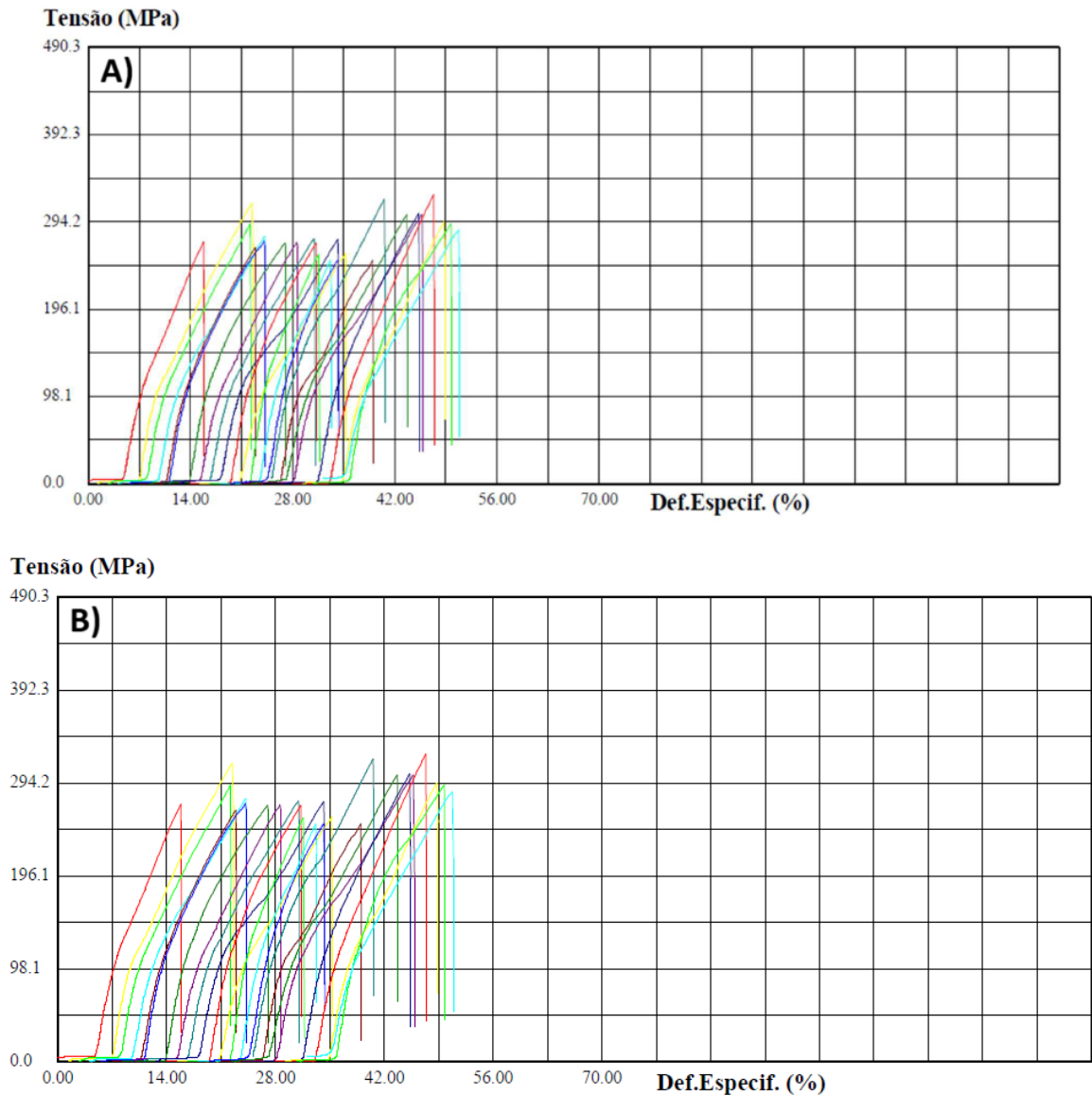


Figura 7 – Gráfico tensão x deformação para as ligas de FC250 quando utilizado: a) o grafite sintético e b) o coque calcinado de petróleo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou uma pesquisa para melhorar a homogeneização do banho metálico na produção do ferro fundido cinzento de uma empresa do PIM de Manaus. Após hipóteses iniciais sobre o tema foi aprovada a substituição do carburante na fabricação da liga de ferro fundido cinzento para solucionar o excesso dessa matéria-prima durante o processo. Posteriores pesquisas sobre o assunto foi escolhido o grafite sintético como potencial matéria-prima para substituição ao coque calcinado de petróleo. Após o primeiro teste realizado com a receita de 17 kg de carburante, o grafite sintético mostrou-se muito eficaz em relação ao coque calcinado de petróleo. Não foi necessário realizar o acerto do material no forno, ou seja, apenas 17 kg em relação aos 17kg + 3kg (acerto) do coque calcinado. Adicionalmente foi obtida a microestrutura desejada do ferro fundido cinzento com carbono tipo A em matriz ferrítica.

Finalmente, todas as demais propriedades finais necessárias para a realização da peça (camisa do cilindro) para a indústria duas rodas/quatro rodas foram atendidas; resistência à tração e dureza do material. Testes futuros com menores quantidades de grafite ainda serão testadas para verificar a mínima quantidade de matéria-prima a ser utilizada. Porém foi atingido o objetivo de redução de 39,7 % do excesso do carburante no primeiro teste.

6 REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Ministério da Economia. A história da Zona Franca de Manaus, em resumo. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/assuntos/historia-da-zona-franca>. Acesso em: 20 out. 2025.
- [2] ABRACICLO. Anuário da Indústria Brasileira de Duas Rodas. Disponível em: <http://www.abraciclo.com.br/anuario-de-2019>. Acesso em: 20 out. 2025.
- [3] CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7ª edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008. 600 p.
- [4] BATISTA, W. F. **Estudo da influência do inoculante na formação de inclusões de silício em anéis de pistão de ferro fundido cinzento**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2022.
- [5] ASTM A247-16a. **Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**, ASTM International, West Conshohocken. 13p. 2016.
- [6] VERRAN, G. O. **Aula 06: Solidificação de ferros fundidos**. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 26 out. 2025. Notas de aula.
- [7] EDALATI, K.; AKHLAGHI, F.; NILI-AHMADABADI M. Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures, **Journal of Materials Processing Technology**, v.160, pp.183–187, 2005.
- [8] TSCHIPTSCHIN, P., T.; GUESSER, W., L. On the growth of graphite lamellae in a high Si GG20 cast iron, **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.19, pp. e2642, 2022.
- [9] THEUWISSEN, K.; LACAZE, J.; LAFFONT, L. Structure of graphite precipitates in cast iron. **Carbon**, vol. 96, pp. 1120-1128, 2016.

[10] TEWARY, U, PAUL, D., MEHTANI, H.K., BHAGAVATH, S., ALANKAR, A., MOHAPATRA, G., SAHAY S. S., PANWAR, A. S., KARAGADDE, S., SAMAJDAR, I. The origin of graphite morphology in cast iron, **Acta Materialia**, v. 226, 2022.