

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOSÉ VINÍCIUS RIBEIRO DO NASCIMENTO
RAUL AUGUSTO MENDES DE SOUZA**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAS DE UM
FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-40 OBTIDOS POR DOIS
CARREGAMENTOS DIFERENTES DE FUSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2021

**JOSÉ VINÍCIUS RIBEIRO DO NASCIMENTO
RAUL AUGUSTO MENDES DE SOUZA**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE UM
FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-40 OBTIDOS POR DOIS
CARREGAMENTOS DIFERENTES DE FUSÃO**

**ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES AS A FUNCTION OF THE
MICROSTRUCTURE OF A NODULAR CAST IRON: A CASE STUDY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR GGG40 OBTIDO POR DOIS CARREGAMENTOS DIFERENTES DE FUSÃO

por

**JOSÉ VINÍCIUS RIBEIRO DO NASCIMENTO E RAUL AUGUSTO
MENDES DE SOUZA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 26 de abril de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Orientador

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Hipólito Domingo Carvajal Fals
Membro Titular

**Prof. Dr. Marcos Eduardo
Soares**
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos
de Carvalho**
Coordenador do Curso

RESUMO

NASCIMENTO, José Vinícius R.; SOUZA, M. Raul Augusto. **Análise das propriedades mecânicas e microestruturais de um ferro fundido nodular GGG40 obtido por dois carregamentos diferentes de fusão.** Trabalho de conclusão de Curso Bacharelado Em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

O desenvolvimento de novas ligas se tornou de grande importância para o avanço tecnológico, visto a necessidade de criar matérias primas para suprir a necessidade de maquinários e equipamentos, que na atualidade, está sendo cada vez mais exigidos, aliado a otimização de processos e produtos, esta a busca por alternativas que sejam viáveis do ponto de vista econômico. O cenário da indústria automobilística, que preza por qualidade e segurança, alavanca as pesquisas buscando sempre um diferencial dentro dos padrões para surpreender seus clientes. Este trabalho tem como objetivo, avaliar as diferenças nas propriedades mecânicas e microestruturais, quando se varia a matéria prima na obtenção de um ferro fundido nodular GGG40, com uma carga de 50% de sucata de aço mais 50% de gusa, e outra com um percentual menor, 20% de sucata de aço e 80% de gusa, na produção de um eixo para indústria automobilística. Foi utilizado um embasamento técnico e com o auxílio de ensaios de: análise química, ensaio de tração, análise metalográfica, ensaio de dureza e ensaio de ultrassom, para correlacionar essa variável junto aos resultados de propriedades mecânicas obtidas. Ao final, optou-se pela fabricação do eixo utilizando a carga de 80% de gusa, por cumprir os requisitos necessários ao apresentar uma matriz ferrítica e atingir o alongamento solicitado pela norma SAE J434.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular. Gusa. Indústria automotiva. Matéria prima. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

NASCIMENTO, José Vinícius R.; SOUZA, M. Raul Augusto. **Analysis of the mechanical properties as a function of the microstructure of a nodular cast iron:** A case study. 2019. Work of Conclusion Course Graduation in Mechanical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

The development of new alloys has become of great importance to technological progress, considering the need to create raw materials to supply machines and equipment production, that nowadays has been more required, combined with the optimization of processes and products, this is the search for alternatives that are economically viable. The scenario of the automobile industry, which values quality and safety, promotes researches seeking an attractive differential within the standards to surprise its customers. This work aims to evaluate the differences between the mechanical and microstructural properties when the raw materials to obtain ductile iron GGG-40 vary, with a load of 50% steel scrap plus 50% pig iron, and another with a lower percentage, 20% steel scrap and 80% pig iron, in the production of an axle for the automobile industry. To correlate this variable with technical studies and mechanical properties were executed chemistry analysis, tensile test, metallographic analysis, hardness test and ultrasound test. In the end, it was decided to manufacture the axle using the load of 80% of pig iron, as it fulfills the necessary requirements when presenting a ferritic matrix and reaching the requested elongation by SAE J434.

Keywords: Ductile Iron. Pig Iron. Automotive Industry. Raw Materials. Mechanical Properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.2 OBJETIVO GERAL	7
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.4 JUSTIFICATIVA	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1 FERRO FUNDIDO NODULAR	9
2.2 NODULARIZAÇÃO DO FERRO FUNDIDO	10
2.3 PROCESSO DE INOCULAÇÃO	11
2.4 FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-40.....	13
2.5 CÁLCULO DE CARGA PARA OBTENÇÃO DO FERRO FUNDIDO GGG-40	14
2.6 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E MICROESTRUTURAIS DO FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-40.....	15
3. METODOLOGIA	17
3.1 PREPARAÇÃO DE LIGAS PARA VAZAMENTO	17
3.3 ANÁLISE QUÍMICA	20
3.4 Ensaio de Tração	21
3.5 Metalografia	23
3.6 ENSAIO DE DUREZA	23
3.6 ENSAIO DE ULTRASSOM	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
4.1. ANÁLISE QUÍMICA	26
4.2. TRAÇÃO	26
4.3 MICROESTRUTURA	29
4.4 DUREZA	31
4.5 ULTRASSONOGRRAFIA.....	32
4.6 ANÁLISE GERAL.....	33
5. CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

A exigência do mercado está cada vez maior, visto a um cenário onde a competição se torna mais acirrada, junto a desenvolvimentos de tecnologias, reduções de custos e qualidade. Projetos automotivos estão mais robustos, vindo de inovações, eliminações de riscos e necessitam ter mão de obra especializada para atender as especificações exigidas. Junto a esse quadro, o ferro fundido está incluído entre outras diversidades de materiais, pela otimização das ligas, complexidade do projeto e atendimento a especificações rigorosas.

No processo de fabricação do ferro fundido nodular por fundição, há inúmeras variáveis para atender as necessidades impostas pelos produtos, que devem ser avaliadas em seu desenvolvimento, como: velocidade de resfriamento, composição química, estado de nucleação, geometria, repetibilidade, dentre outras variáveis do processo como um todo. Dentre as ligas de ferro fundido nodular, a liga GGG-40 é amplamente adotada para produção de peças automotivas. A liga GGG-40 é composta por: carbono, silício, magnésio, manganês, fósforo e enxofre, além de percentuais residuais especificados por norma SAE J434. Também pode haver outras especificações, como por exemplo tamanho de grão, volume de nódulos, e de acordo com normas específicas.

Neste trabalho, a partir de uma demanda do mercado, é realizado um estudo de produção da liga GGG-40 com dois carregamentos distintos (diferentes percentagens de materiais na preparação) com embasamentos científicos, técnicos e tecnológicos para atendimento a especificação de uma liga, que se faz necessária pela alta resistência a tração mecânica, não deixando de lado sua tenacidade, resiliência e resistência a fadiga, visando um menor custo na utilização de sucata de aço, para complementar a matéria prima.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar as propriedades mecânicas e microestruturais de um ferro fundido nodular GGG40 obtido por dois carregamentos distintos de fusão seguindo normas (DIN 1563; SAE J434) para a produção do material.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análise da composição química nos produtos produzidos;

- Análise das propriedades mecânicas obtidas pelos ensaios de tração e dureza;
- Verificar se a nodularização está conforme a especificação por ensaio de ultrassonografia.

1.4 JUSTIFICATIVA

Durante o desenvolvimento de um eixo pra indústria agrícola, tendo como matéria prima o ferro fundido nodular GGG40, constatou-se o não atendimento do alongamento exigido pela norma SAE J434, que exigia uma tensão de tração máxima de 450 MPa, tensão de escoamento 310 MPa e um alongamento mínimo de 12%. Sendo assim, este trabalho visa conhecer qual parâmetro levou a influenciar nas propriedades mecânicas através de ensaios mecânicos.

A partir do estudo e entendimento da fabricação do material, será possível produzir um produto de acordo com as especificações exigidas, dando garantia ao consumidor final com a eliminação de riscos a não conformidade das propriedades mecânicas exigidas pela peça.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para possibilitar o estudo e análise do ferro fundido nodular GGG-40 a ser produzido, o referencial bibliográfico abordará temas relacionados quanto a suas propriedades mecânicas, processos de fabricação e parâmetros para avaliação e validação para sua aplicabilidade comercial, prevendo o atendimento a norma SAE J434, que é utilizada afim de complemento da norma DIN1693 para melhor complementar os pré-requisitos de acordo com a espessura de parede do produto a ser produzido.

2.1 FERRO FUNDIDO NODULAR

O ferro fundido nodular é bastante utilizado na indústria devido as suas boas propriedades mecânicas, principalmente quanto a sua usinabilidade, podendo até ser comparada aos aços. A sua ductilidade pode ser compreendida através de valores de alongamento, que podem atingir até 18% ou mais, ainda sim mantendo sua alta tensão de escoamento (BALDAM, 2014).

Pode-se verificar a aplicabilidade do ferro fundido nodular em carcaças de eixos para maquinário agrícola, componentes de frenagem, peças que sofrem impactos e necessitam ter alta resistência ao desgaste.

Os elementos que mais afetam a estrutura do ferro fundido são o Carbono, qual influência na quantidade de grafitas a serem formadas e o Silício, que determina o grau de grafitização do fundido (Chiaverini, 1996).

Para Colpaert (2008), o silício depois do carbono, é o elemento mais importante nos ferros fundidos. O Silício reduz a estabilidade da cementita, assim favorece também a decomposição da cementita em ferrita e grafita.

Segundo Chiaverini (1996), o Manganês tem efeito oposto ao silício, isto é, estabiliza a cementita. Sua utilidade é produzir estrutura com matriz predominantemente perlítica. Outro elemento importante a ser analisado seria o fosforo, que assim como o manganês, atua como forte estabilizador de cementita, mas em teores elevados prejudicam as propriedades mecânicas. Já o enxofre é importante para garantir as propriedades mecânicas no ferro fundido cinzento. Tanto o enxofre como o fósforo são considerados impurezas no ferro fundido nodular (Colpaert 2008).

2.2 NODULARIZAÇÃO DO FERRO FUNDIDO

O ferro fundido nodular é caracterizado por apresentar, devido a um tratamento realizado ainda no estado líquido, carbono livre na forma de grafita esferoidal. De acordo com CHIAVERINI (1986), deve-se adicionar elementos como o magnésio e cério de maneira controlada a fim de se obter a grafita na forma esferoidal. Ainda se atentando a diminuir ou eliminar outros elementos que interfiram no processo de nodularização, como o antimônio, chumbo e outros.

Com relação ao insumo utilizado em escala industrial temos que, “o processo mais comum e mais econômico usado para a fabricação do ferro fundido nodular é o tratamento com magnésio” (Francklin, 2009).

De acordo com Colpaert (2008), para corrigir problemas de eficiência do magnésio, devido ao seu baixo ponto de ebulição (1090 °C), a indústria tem desenvolvido técnicas para obter um melhor rendimento, com adição de cério e cálcio para combater as substâncias nocivas ao processo de nodularização.

Ao adicionar o reagente nodularizante se obtém uma reação violenta, onde o magnésio é vaporizado e atravessa o ferro líquido, diminuindo seu teor de enxofre e provocando a formação de nódulos de grafita (CHIAVERINI, 1986).

“O magnésio atua como uma espécie de inibidor de curta duração, que retarda a formação inicial de grafita. Então o ferro fundido cinzento solidifica, inicialmente com formação de cementita; logo a seguir, cessada a ação do magnésio, a cementita decompõe-se, produzindo a grafita que se desenvolve por igual em todas as direções, resultando assim uma forma sensivelmente esférica.” (CHIAVERINI, 1986, p.560)

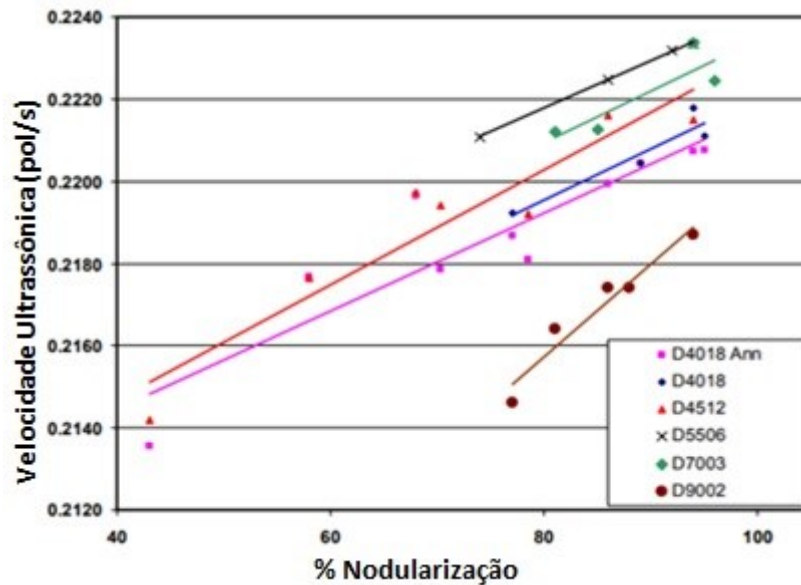
Para determinar o grau de nodularização do fundido é possível avaliar através de ensaio metalográfico, porém isto demanda destruição da amostra. Um meio para realizar este ensaio de maneira não destrutiva é através do ensaio de ultrassom. Em alguns casos, em peças de elevada responsabilidade, a nodularização completa é confirmada através da medida de velocidade de propagação do ultrassom. (Colpaert, 2008).

De acordo com Gundlach (2006), deve-se desenvolver relações entre as propriedades mecânicas, a nodularização e a velocidade do ultrassom.

Na figura 1, apresenta-se um modelo de estudo com diversas ligas de ferro fundido nodular, as quais foram produzidas buscando diferentes graus de nodularização e a avaliar a consequência disto nas suas propriedades mecânicas. Onde as velocidades de nodularização variam entre 5384 m/s (0,2120 pol/ μ s) até 5689 (0,2240 pol/ μ s), pode-se verificar que o grau de nodularização de aproxima

de 100% quanto maior a velocidade obtida. Para se obter um resultado mais preciso sobre a nodularização, pode-se empregar ainda o ensaio de análise microestrutural.

Figura 1 – Velocidade do Ultrassom e o Grau de Nodularização



Fonte: Gundlach (2006)

Para Gundlach (2006), a grande influência da nodularização na resistência do material se deve ao aumento de concentração de tensão em partículas não nodulares. Onde partículas de grafita degenerada apresentam uma concentração de tensão superficial elevada, diminuindo assim a resistência do material a fratura. Esta mudança de forma das partículas produz alterações no módulo de elasticidade e as propriedades sonoras do material. Tornando possível avaliar as mudanças através de ensaios não destrutíveis (Gundlach, 2006).

O Ensaio de ultrassom é uma ferramenta largamente utilizada no processo de desenvolvimento, produção e controle de um item. Esta ferramenta permite analisar sanidade, através de emissão e recepção de ondas sonoras, quando são interrompidas por vacâncias ou trinca, gera uma descontinuidade na onda.

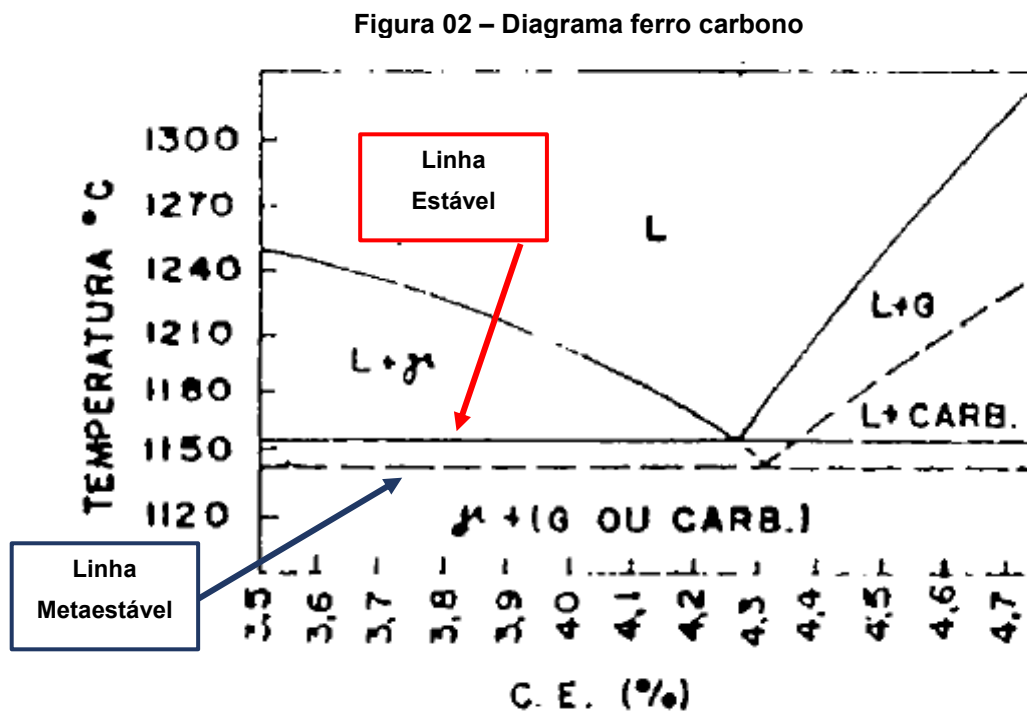
2.3 PROCESSO DE INOCULAÇÃO

Faz se presente o processo de inoculação antes do vazamento do ferro fundido nodular para que não ocorra a formação de carbonetos eutéticos na microestrutura, auxiliando na formação de nódulos de grafita mais circulares e sua

microestrutura como um todo mais refinada no processo de solidificação, estabilizando o seu resfriamento em diferentes espessuras de parede (SOUZA, 1991).

O processo de nucleação, que é ativado em função da temperatura de vazamento, se faz necessária por um super-resfriamento no momento em que o metal se encontra na sua forma líquida, responsável pelo início da formação da fase pró-eutética (SOUZA, 1991).

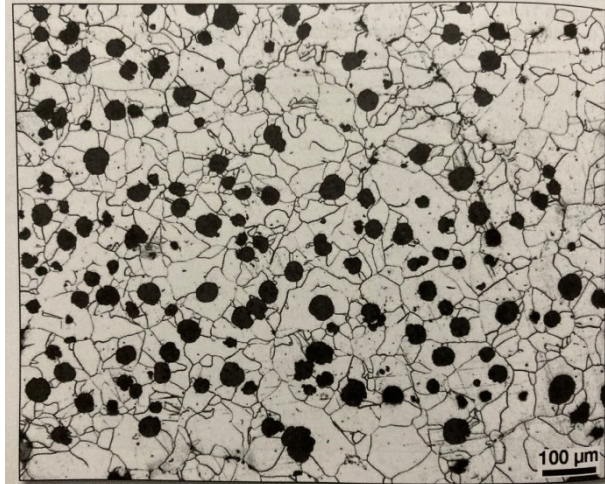
No diagrama de ferro carbono, ilustrado na figura 2, é possível identificar a região estável da formação de austenita mais grafita, e logo em seguida a metaestável formando austenita com a presença de carbonetos (SOUZA, 1991).



Fonte: Souza (1991)

Na composição do ferro fundido pode-se verificar a presença de uma liga ternária Mg-Fe-Si, responsável pela nodularização. Sua grafita se apresenta na forma esferoidal, que podem ser analisadas pela sua micrografia na Figura 3. Essa forma é responsável pela boa ductilidade e tenacidade (CHIAVERINI, 1986).

Figura 03 – Ferro fundido nodular de matriz ferrítica



Fonte: Colpaert (2008)

Alguns fatores podem ser levados em conta para a capacidade de nucleação de um banho metálico, como: grau de oxidação do banho, composição química da carga, quantidade de carbono combinado na carga, sequência do carregamento, tempo e temperatura de manutenção do banho metálico e tipo de forno de fusão. A tendência de grafitização pode ser diretamente relacionada ao potencial de nucleação de um fundido, que corresponde a quantidade de germes de nucleação. (FARIA, 2016).

2.4 FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-40

Para descrever as propriedades mecânicas necessárias para caracterizar o ferro fundido nodular como sendo do tipo GGG-40, foram utilizadas duas normas, DIN 1563 e a SAE J434. Ambas definem os valores das propriedades mecânicas que definem as classes das ligas, neste caso uma GGG-40 é identificada como D450.

A DIN 1563 traz as seguintes informações sobre a caracterização de tração e dureza para um ferro D450, quais ilustradas na Tabela 1. Conforme visualiza-se na tabela, as propriedades são caracterizadas em função da espessura de parede

Tabela 01 – Propriedades Mecânicas Ferro Fundidos Nodulares Ferríticos Perlíticos

Descrição Material		Espessura de parede (mm)	Tensão Escoamento (MPa)	Resistência a Tração (MPa)	% Alongamento
Símbolo	Número				
EN-GJS-450-10	5.3107	t ≤ 30	310	450	10
		30 < t ≤ 60	A ser acordado entre fabricante e cliente		
		60 < t ≤ 200			

Fonte: DIN 1563 (2012)

Para espessuras de parede maiores que 30mm são vagas as propriedades mecânicas, sendo que na maioria das vezes estas propriedades são determinadas pelo fabricante do produto. Tendo em vista este ponto vago na norma, buscou a norma SAE J434, a qual irá fornecer as propriedades necessárias.

O ferro fundido nodular GGG-40 é caracterizado pela norma SAE J434 como sendo D450, sendo um tipo ferro fundido de matriz Ferrítica Perlítica, a qual possui um limite de resistência à tração de 450 Mpa, 12% de alongamento e dureza Brinell que deve permanecer entre 156-217HB, como especificados na tabela 2.

Tabela 02 – Classes de Ferro Fundidos Nodulares

Classe	Faixa de Dureza (Mpa)	Descrição	Espessura de parede	Resistência a Tração		Tensão de Escoamento		% Alongamento
				MPa	ksi	Mpa	ksi	
D450 (D4512)	156-217 HBW	Ferrítico-Perlítico	≤20mm	450	65	310	45	12
			>20mm -≤40mm			295		
			>40mm -≤60mm			285		

Fonte: SAE J434 (2004)

2.5 CÁLCULO DE CARGA PARA OBTENÇÃO DO FERRO FUNDIDO GGG-40

Para obtenção do produto de acordo com a especificação de composição química, faz-se necessário calcular as quantidades de matérias primas pré-estabelecidas, com o intuito de chegar a composição desejada, sem haver falta de elementos mandatórios, como: carbono, silício, magnésio, cobre. Também visa evitar o excesso de alguns elementos com limites pré-estabelecidos, como o manganês, fósforo, enxofre, cromo, estanho e titânio.

Conhecendo os percentuais dos elementos químicos existentes nas matérias primas, sucata de aço e ferro gusa, calcula-se o valor a ser obtido na mistura, utilizando a equação 1:

$$\frac{\text{Quantidade de material} \times \% \text{ de elemento no material}}{\text{Peso total da carga}} \quad \text{Equação (1)}$$

Após conhecimento do resultado da composição química, na mistura das matérias primas principais, junto a percentuais de silício e magnésio que deverão ser adicionados a carga, para o processo de inoculação e nodularização, adota-se equação 2 para definir o peso dos elementos que estão abaixo do especificado.

$$\frac{\% \text{ de elemento faltante} \times \text{Peso total da carga}}{\text{Rendimento do elemento}} \quad \text{Equação (2)}$$

2.6 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E MICROESTRUTURAIS DO FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-40

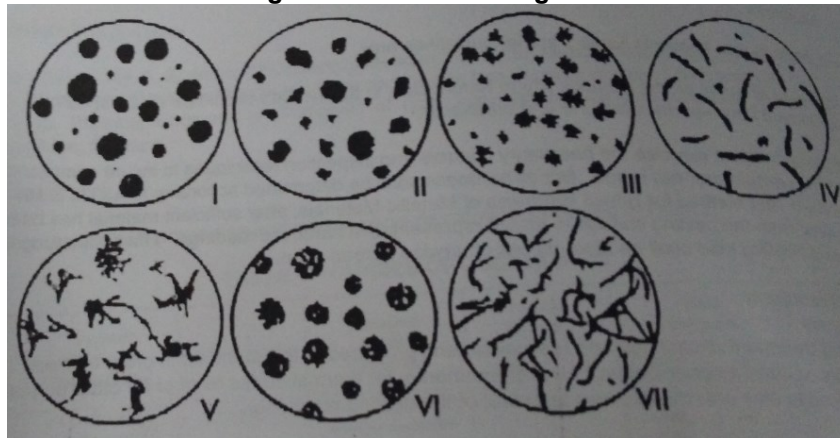
A norma SAE J434 traz em seu apêndice “A” a composição química estabelecida para atender as necessidades de um ferro fundido tipo GGG-40, cujos valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 03 – Especificação da composição química

Elemento químico	Composição química
C	3.50 - 3.80
Si	2.40 - 2.80
Mn	0.25 máximo
P	0.050 máximo
S	0.025 máximo
Mg	0.025 - 0.065
Cu	0.10 - 0.20
Cr	0.05 máximo
Sn	0.01 máximo
Ti	0.050 máximo

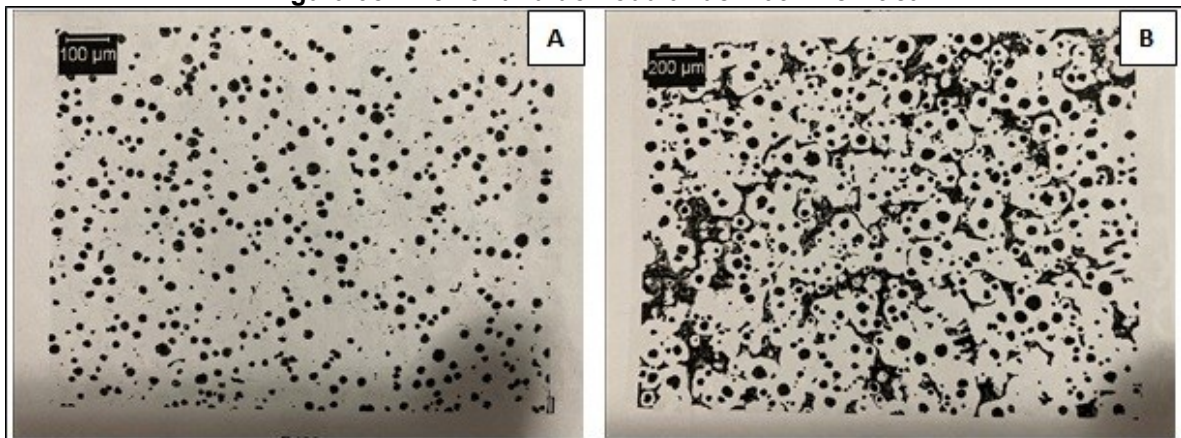
Fonte: SAE J434 (2004)

A microestrutura do ferro fundido nodular é diretamente correlacionada a norma ASTM A247, qual especifica a grafita esferoidal como tipo I e tipo II, extinguindo a presença da flotação gráfitica. As formas e tamanhos podem ser verificadas pela Figura 4. Sendo um ferro fundido nodular, este dispõe de grafita em forma de esferas na sua matriz de ferrita com algumas perlitas, fazendo com que os componentes feitos desse material apresentem boa resistência a cargas de choque, fadiga, boa ductilidade e usinabilidade.

Figura 04 – Formas da grafita

Fonte: ASTM A 247

A norma SAE J434, traz as características esperadas na microestrutura de um ferro D450, a qual deve conter uma matriz ferrítica perlítica. Como ilustrada nas imagens da Figura 5.

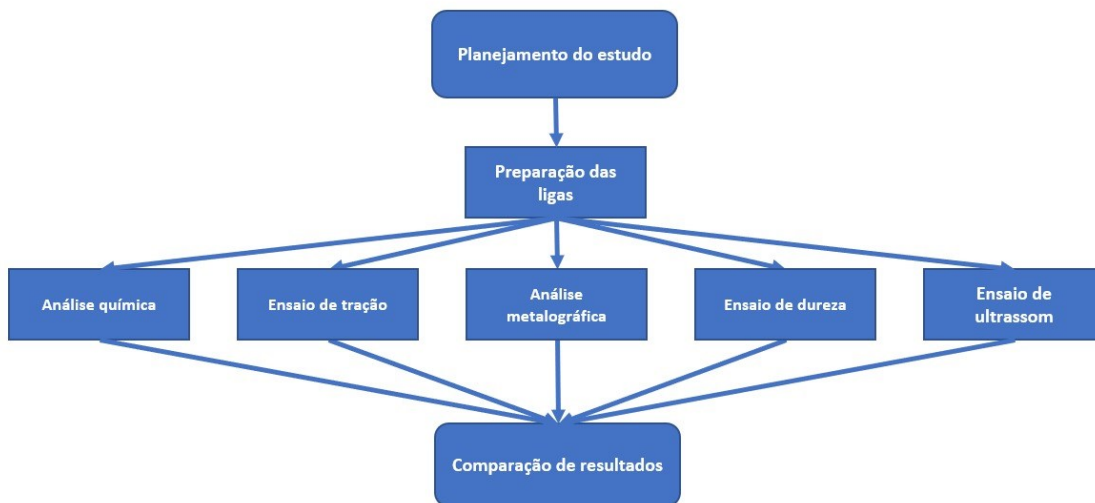
Figura 05 – Ferro fundido nodular de matriz ferrítica

Fonte: SAE J434 (2004)

3. METODOLOGIA

O trabalho adota o estudo relativo à um projeto de desenvolvimento de um produto automotivo, para produção de um eixo. Para tanto, estudou-se para produção do produto dois distintos vazamentos com cargas distintas. Foi realizado um planejamento inicial para definir as estratégias para análise e atendimento das especificações das propriedades mecânicas impostas pelo cliente. O fluxograma, representado na Figura 6 identifica as fases adotadas.

Figura 06: Fluxograma para homologação



Fonte: Autoria Própria

3.1 PREPARAÇÃO DE LIGAS PARA VAZAMENTO

A liga GGG-40 foi preparada utilizando dois carregamentos diferentes. Na primeira carga foi utilizado um balanceamento menos nobre, com 50% de gusa e 50% de sucata de aço, mais adição dos elementos químicos para o balanço se adequar a norma exigida quanto a composição da liga. Já a segunda carga foi realizada utilizando um balanceamento com 80% de gusa e 20% de sucata de aço, tornando-a mais nobre, conseqüentemente com maior custo de fabricação. Na tabela 4 são apresentados os valores da composição química da sucata e do gusa adotados para preparação das ligas.

Tabela 04 – Composição química da sucata e do gusa

	Sucata	Gusa
C	0,3040	4,2500
Si	0,3000	0,1920
Mn	0,4210	0,0300
P	0,0101	0,0560
S	0,0129	0,0167
Mg	0,0000	0,0020
Cu	0,2999	0,0911
Cr	0,0148	0,0015
Sn	0,0185	0,0010
Tl	0,0010	0,0041

Fonte: Autorial Própria

Ambas as ligas foram preparadas num forno de indução com capacidade de 3,5 toneladas, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 07 – Forno de indução

Fonte: Autorial Própria

O procedimento de fusão foi realizado seguindo a instrução operacional da empresa, onde após a definição da liga ser fundida é especificada o balanceamento de matérias primas necessárias para preparação da carga. Com a carga preparada, o operador do forno faz o carregamento do material (Figura 9) respeitando a ordem determinada de entrada de material. Iniciando com as cargas de densidade mais leve, no caso a sucata de aço e posteriormente cargas de mais densas, no caso gusa. O metal foi fundido na temperatura de aproximadamente 1430 °C.

Figura 08 – Carregamento Forno

Fonte: Aatoria Própria

Para a execução do processo de nodularização foi realizada a pesagem dos materiais (liga de magnésio FE 9 C3 e cavaco de ferro fundido nodular) a serem adicionados a câmara da panela de tratamento. Sendo que neste caso foi utilizado 1% do peso de metal líquido (Carga da Panela de Tratamento:1200kg). Foram adicionados 12kg da liga de magnésio FE 9 C3 (contendo 8,5% de Mg) e 12kg de cavaco. O cavaco tem como função retardar a reação e evitar a queima da liga de magnésio.

Figura 09 – Pesagem da liga de Mg e Reação de Nodularização

Fonte: Aatoria Própria

O processo de inoculação foi realizado com a adição de inoculante durante o processo de transferência do metal entre a panela de fusão tratamento e a

panela de vazamento. Ao decorrer do transbordo foi adicionado ao jato de metal a quantidade de 0,4% de inoculante Fe-Si (75% Fe - 25%Si), conforme o peso do metal a ser vazado. Neste caso como para 1200 kg de metal, equivaleu a 4,8kg de inoculante Fe-Si (75% Fe-25%Si). A figura 10 ilustra a adição do inoculante ao decorrer do transbordo.

Figura 10 – Inoculação do Ferro Fundido



Fonte: Autoria Própria

O processo de vazamento necessita do controle de duas variáveis, pois respectivamente da temperatura e do tempo de vazamento.

A temperatura de vazamento foi estabelecida por instrução operacional, sendo de aproximadamente 1420°C, qual medida no início do jato utilizando um pirômetro móvel modelo Italterm Fornero 2000.

O tempo de vazamento, qual também estabelecido por instrução operacional, foi de aproximadamente 36s. O controle do tempo foi realizado utilizando cronômetro digital.

3.3 ANÁLISE QUÍMICA

Após o término da fusão foi retirada a amostra para a análise química. O procedimento de retirada do metal foi realizado adotando um cadinho, qual posteriormente foi vazado em uma cunha padrão para constituir a amostra. A amostra solidificada posteriormente foi retificada e identificada para a realização do ensaio de espectrometria. Em posse da análise química, foi realizada a preparação para o vazamento da liga. A análise química foi realizada utilizando o aparelho da marca Espectromac, qual pela Figura 11.

Figura 11 – Espectrômetro

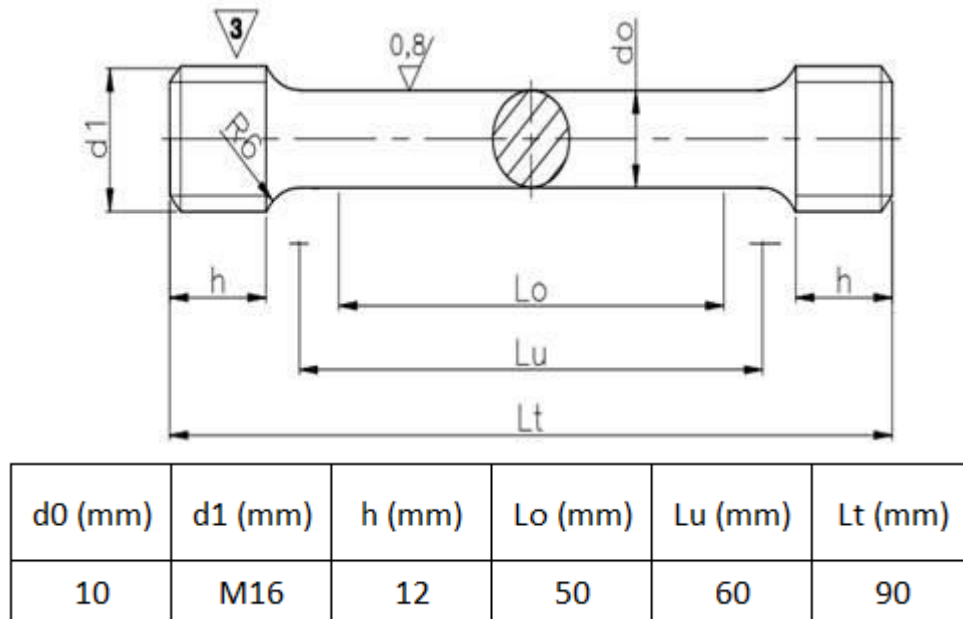
Fonte: Autoria Própria

3.4 Ensaio de Tração

Após resfriamento e processo de desmoldagem, as peças passaram por acabamento com jatos de granalhas para retirada da areia aderida na superfície da peça. Em seguida, foi realizado o corte em uma seção da peça, livre de componentes que poderiam influenciar a taxa de resfriamento, como massalotes e coquilhas. Este procedimento foi realizado para obter um resultado mais homogêneo que representasse a peça como um todo. Para tanto adotou-se uma serra fita da marca Cosen, modelo MH-1016JA. Foi retirada três amostras em regiões diferentes da peça com espessura de aproximadamente 20mm.

A amostra obtida foi usinada no torno convencional a marca Nardini, seguindo as dimensões e tolerâncias estipuladas conforme a norma EN ISO-6892-1:2009 definida como referência para preparação de corpo de prova para ferros fundidos nodulares. A Figura 12 apresenta as especificações para confecção do corpo de prova de tração segundo a norma.

Figura 12 – Corpo de prova para tração com as dimensões do corpo de prova



Fonte: Autoria Própria

Com os corpos de prova prontos, o ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de tração da marca Wolpert (ilustrado na figura 13), com capacidade de 200kN. Antes de prender o corpo de prova ao equipamento foi realizada a medida do diâmetro da alma do corpo e o seu comprimento L_0 através de marcação via extensômetro, utilizando paquímetro digital. Ao final do ensaio foi obtido o L_f . Com estes valores, e os indicados no software, obteve-se os resultados referente aos ensaios.

Figura 13 – Máquina Universal de Ensaio de Tração



Fonte: Autoria Própria

3.5 Metalografia

Após o ensaio de tração, adotou-se a parte do corpo de prova rompido para realizar a análise metalográfica.

A amostra foi preparada utilizando uma politriz de marca FORTEL (Figura 14 a), para efetuar o lixamento e polimento da amostra. O lixamento foi realizado em três etapas, conforme sequencia de lixa 160, 220 e 440 mesh. Após lixamento, utilizou-se de alumina de 1 μm para efetuar o polimento, qual tornou a superfície das amostras possíveis de visualização da microestrutura pelo microscópio. O microscópio adotado foi o de marca Olympus modelo PME3 que apresentava a resolução de até 600 X (Figura 14 b). Os resultados visuais e numéricos foram obtidos junto ao software Digimet Plus 5G, qual foi capaz de identificar a porcentagem de nodularização, total e volume de nódulos, tamanho e tipo da grafita, identificando também a matriz do metal ensaiado.

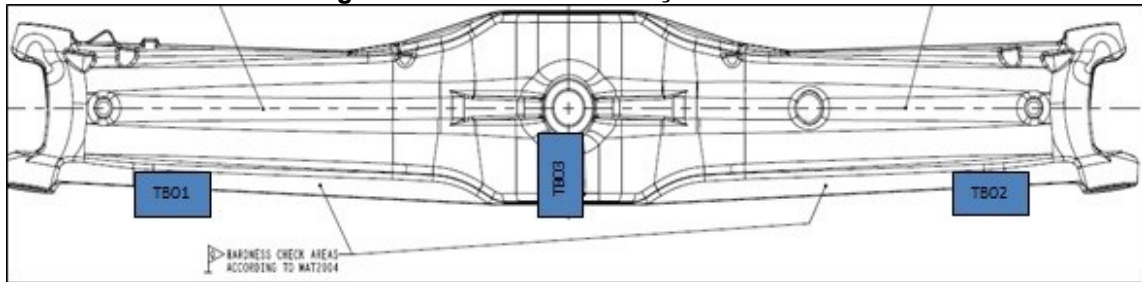
Figura 14 – a) Politriz b) Microscópio



Fonte: Autoria Própria

3.6 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado nos pontos definidos no produto, no caso da amostra foi definido a região TB01, conforme ilustrado na figura 15.

Figura 15 – Pontos de Medição de Dureza

Fonte: Disponibilizada pelo cliente

Após a peça ter sido desmoldada, foi realizada a limpeza das áreas a serem ensaiadas utilizando uma lixadeira para a retirada de areia da peça. Estando o ponto preparado para o ensaio, foi realizada a medição da dureza utilizando o durômetro da marca King com esfera de 10 mm e carga máxima de 3000kgf. Após o ensaio, verifica-se a dimensão da marca e utilizando tabela de instrução operacional interna faz-se a conversão para os valores de dureza, sendo a unidade de medida adotada foi de HB (Dureza Brinell).

3.6 ENSAIO DE ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom foi realizado com o equipamento SME P Top (Tecno Medição), sendo na região TB02 (Figura 16), indicada no ensaio de dureza. O transdutor utilizado era esférico do tipo que emite e recebe sinais.

Na região preparada foi feita a medição da espessura da sessão, utilizando paquímetro digital. Este valor foi utilizado para ajustar os parâmetros no aparelho de ultrassom.

Figura 16 – Medição da espessura da região a ser ensaiada

Fonte: Autoria Própria

Após o ajuste da espessura no aparelho, aplica-se óleo sob a superfície a ser ensaiada para garantir o acoplamento do cabeçote de medição a peça. Ao se deslizar o cabeçote pela peça se observa a velocidade retornada, a qual para garantir a nodularização desejada deve ser acima de 5500 m/s, conforme indicado no manual do equipamento. Para efeitos de comparação a velocidade mínima necessária para uma matriz de ferro fundido cinzento é de 4600m/s.

Figura 17 – Ensaio de Ultrassom



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE QUÍMICA

Após o processo de preparação de amostras, e execução do ensaio, obteve os resultados de composição química para as amostras do vazamento 1 e vazamento 2, conforme apresentados na tabela 5:

Tabela 05 – Composição química

	Vazamento 1	Vazamento 2	SAEJ434
C	3,65%	3,65%	3.50% - 3.80%
Si	2,60%	2,47%	2.40% - 2.80%
Mn	0,25%	0,11%	0.25% máximo
P	0,03%	0,05%	0.050% máximo
S	0,01%	0,01%	0.025% máximo
Mg	0.038 %	0.039 %	0.025% - 0.065
Cu	0.195 %	0.133 %	0.10% - 0.20%
Cr	0.008 %	0.004 %	0.05% máximo
Sn	0.009 %	0.004 %	0.01% máximo
Ti	0.003 %	0.003 %	0.050% máximo

Fonte: Autoria Própria

Notou-se uma diminuição no percentual de cobre e estanho, que pode ter diretas influências quanto aos resultados em que adquiridos durante o estudo, além da maior pureza do ferro gusa. Percebe-se que todos os percentuais de cada elemento ficaram de acordo com a norma SAE J434, GGG40, comprovando-se o material ensaiado.

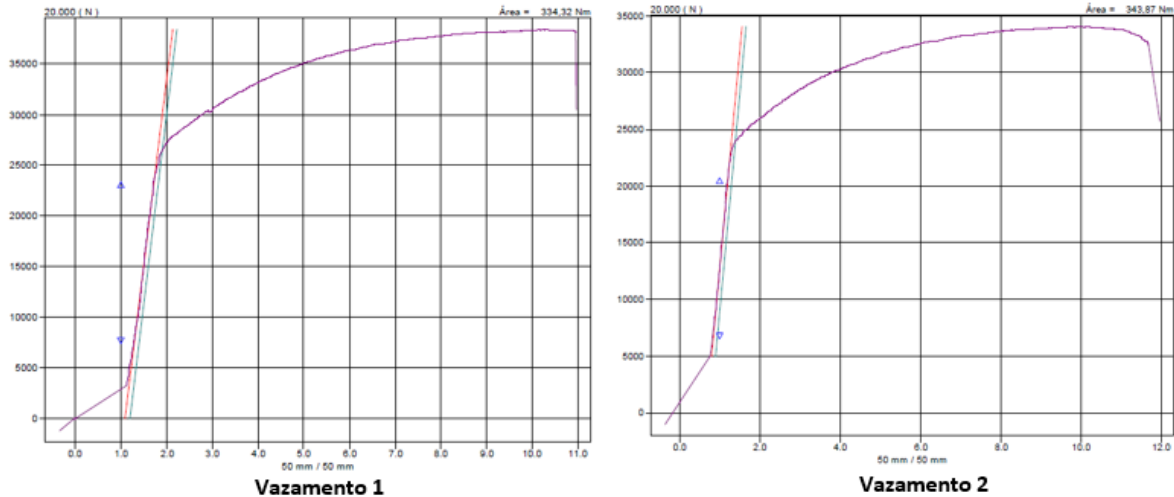
4.2. TRAÇÃO

Os valores obtidos do ensaio de tração das amostras, as quais retiradas de três pontos diferentes do produto, quanto ao escoamento e alongamento, serão apresentados conforme obtidos de forma gráfica nas Figuras 20, 21 e 22.

Os resultados resultantes na ruptura do corpo de prova no ponto 1, em ambas as amostras dos diferentes vazamentos, ficaram dentro da especificação da norma, norma DIN 1693 para o material GGG40 (Tabela 2), conforme apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Ensaio de Tração – Ponto 1

	Tensão Máxima (Mpa)	Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Vazamento 1	499	343	15
Vazamento 2	458	322	18
SAEJ434	450 mínimo	310 mínimo	12 mínimo

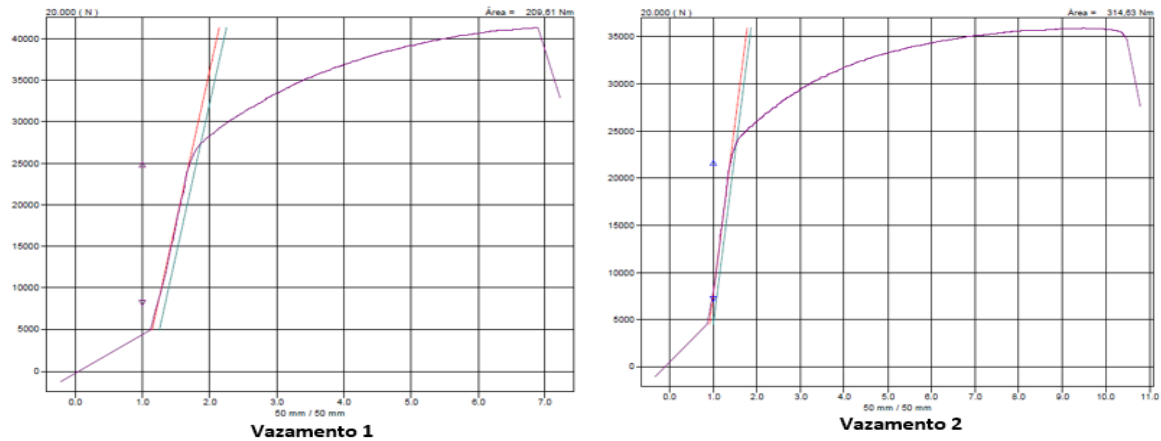


Fonte: Autoria Própria

No ponto 2, constata-se que o percentual de alongamento ficou abaixo do especificado no vazamento 1, mas houve aumento nos valores de tensão máxima e do limite e escoamento. Para o vazamento 2, comparando-se com a norma, verifica-se que os resultados de alongamentos obtidos ficaram dentro do especificado, conforme mostrados na Figura 19. Contudo, as tensões máximas aplicadas estão menores quando comparadas ao vazamento 1.

Figura 19 – Ensaio de Tração – Ponto 2

	Tensão Máxima (Mpa)	Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Vazamento 1	537	354	9
Vazamento 2	472	312	16
SAEJ434	450 mínimo	310 mínimo	12 mínimo

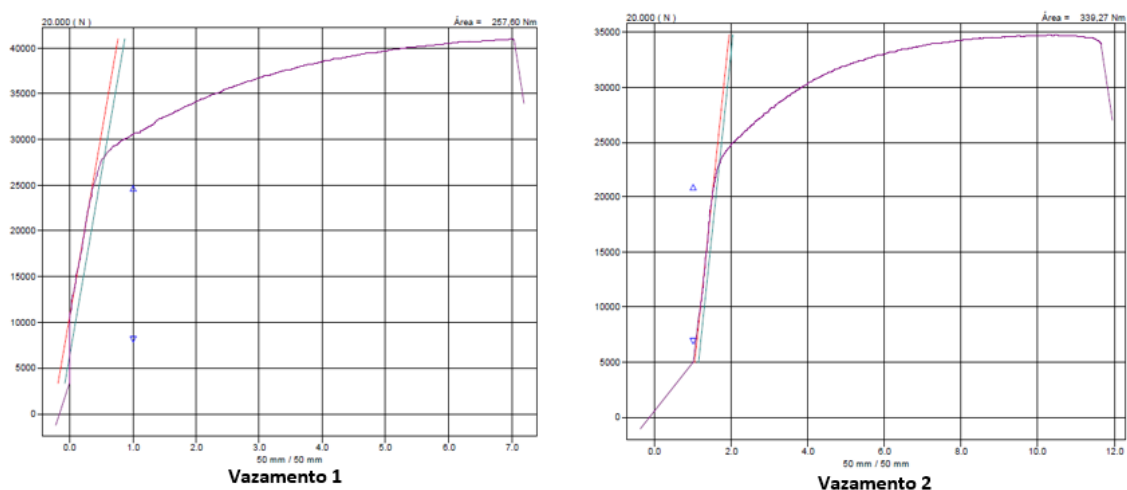


Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos no ponto 3 para o vazamento 1 são apresentados na Figura 20. Para o vazamento 2, constata-se a diminuição das tensões máximas e de escoamento, implicando numa não conformidade quanto a tensão de escoamento no vazamento 2. Pois, o valor mínimo quanto a tensão de escoamento estabelecida pela norma seria de 310,00 Mpa.

Figura 20 – Ensaio de Tração – Ponto 3

	Tensão Máxima (Mpa)	Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Vazamento 1	527	360	11
Vazamento 2	456	302	17
SAEJ434	450 mínimo	310 mínimo	12 mínimo



Fonte: Autoria Própria

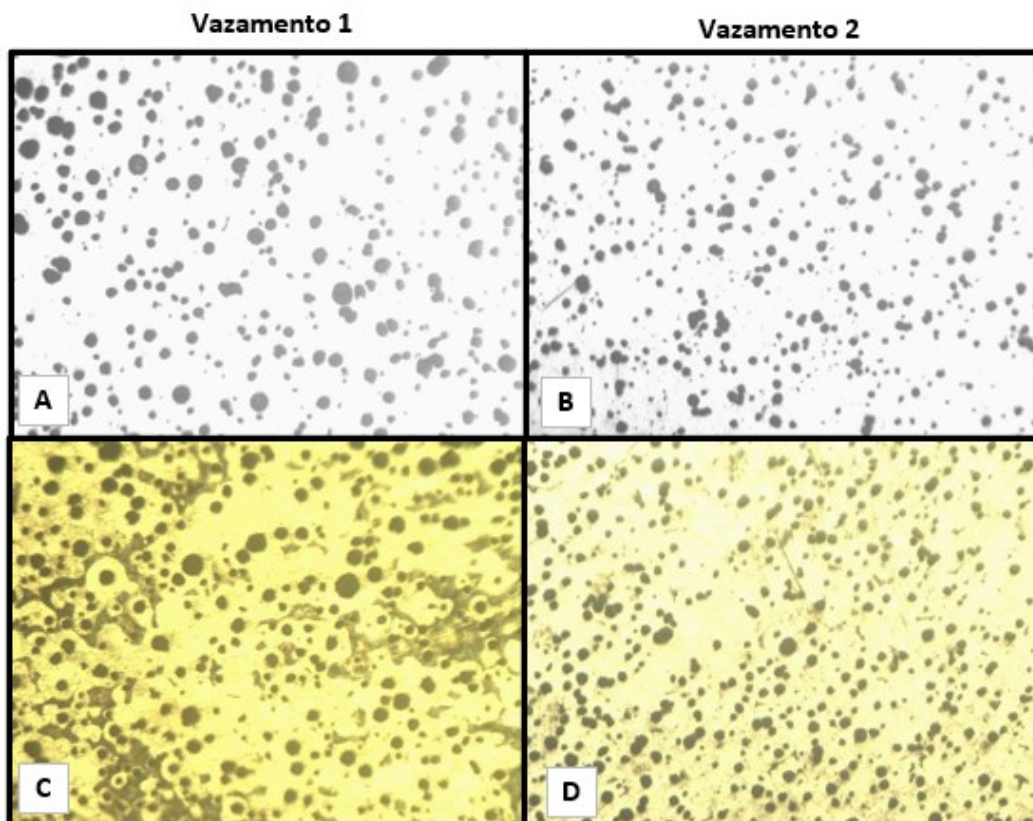
4.3 MICROESTRUTURA

Os ensaios realizados nas amostras, referente à análise microestrutural, nos forneceu imagens com ampliação de 100 μ m.

No ponto 1, referente ao vazamento 1, a leitura do percentual de ferrita foi de 77% e perlita 23%. Notou-se uma microestrutura mais refinada, sendo que os grãos eram bem definidos e constantes. Esta microestrutura é apresentada na Figura 21, onde a microestrutura da letra a e b são sem ataque, e as da letra c e d possuem ataque.

Os resultados do vazamento 2, comparados com o vazamento 1, apresentaram-se melhores. Pois, houve um maior grau no refino de seus grãos, e uma microestrutura que totalizou seu percentual ferrítico da matriz em 97% e perlítico de 3%. Esta constatação na microestrutura justifica a alteração nos resultados obtidos no ensaio de tração neste ponto, onde se constatou-se um melhor alongamento.

Figura 21 – Metalografia obtida no ponto 1

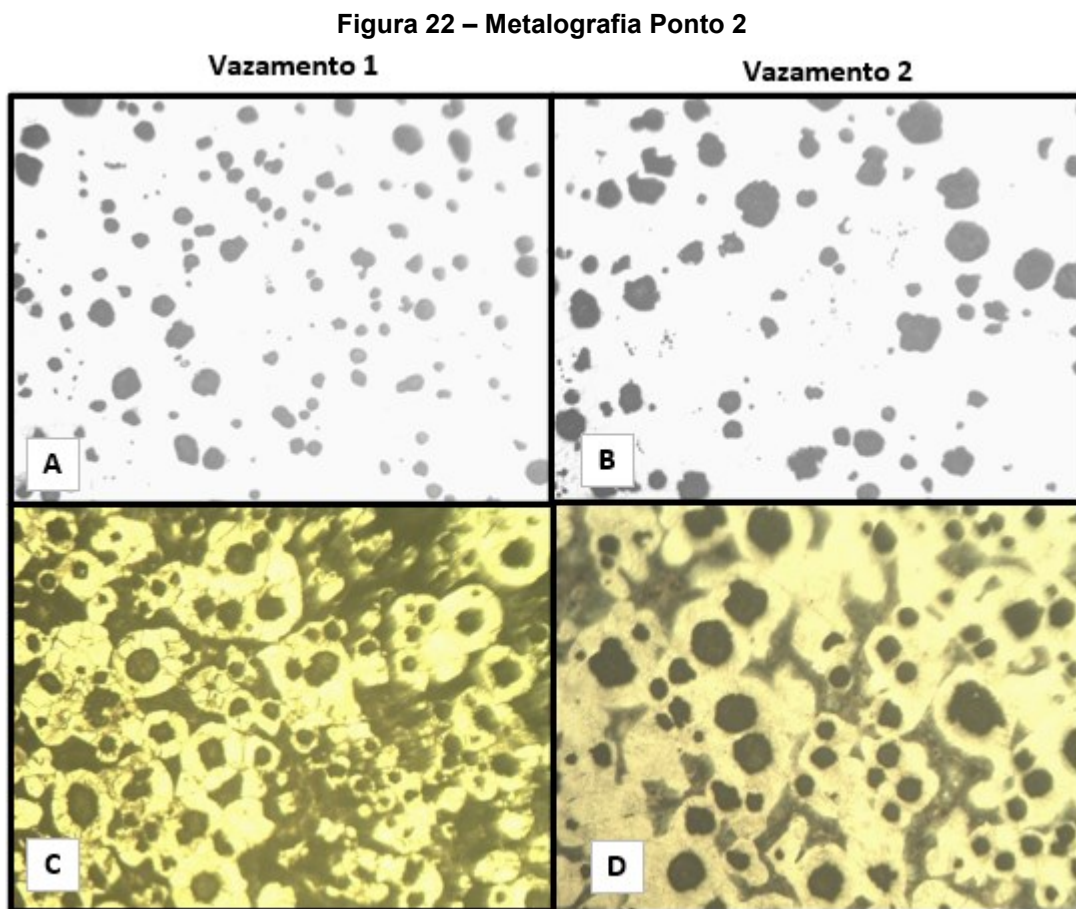


Fonte: Autoria Própria

As metalografias obtidas tanto do vazamento 1 como no 2, referente ao ponto 2, são apresentadas na figura 22 (a e b sem ataque e b e c com ataque).

No vazamento 1 a leitura de ferrita se deu em 55% e perlita 45%. Os nódulos observados na microestrutura foram definidos com característica perlítica. Esta região da peça tem maior potencial de formação da estrutura perlítica, o que vem a tornar um ponto crítico devido diminuir a propriedade quanto ao alongamento. Isto ocorre devido este ponto possuir uma frente de solidificação diferente quando comparado as extremidades da peça.

Para amostra 2, do ponto 2, obteve-se um percentual ferrítico de 85% e um perlítico de 15%. Esta microestrutura, conforme verificado na prática, tende a possuir um maior poder de absorção de impactos e maior alongamento, conforme pode ser observado na Figura 22.

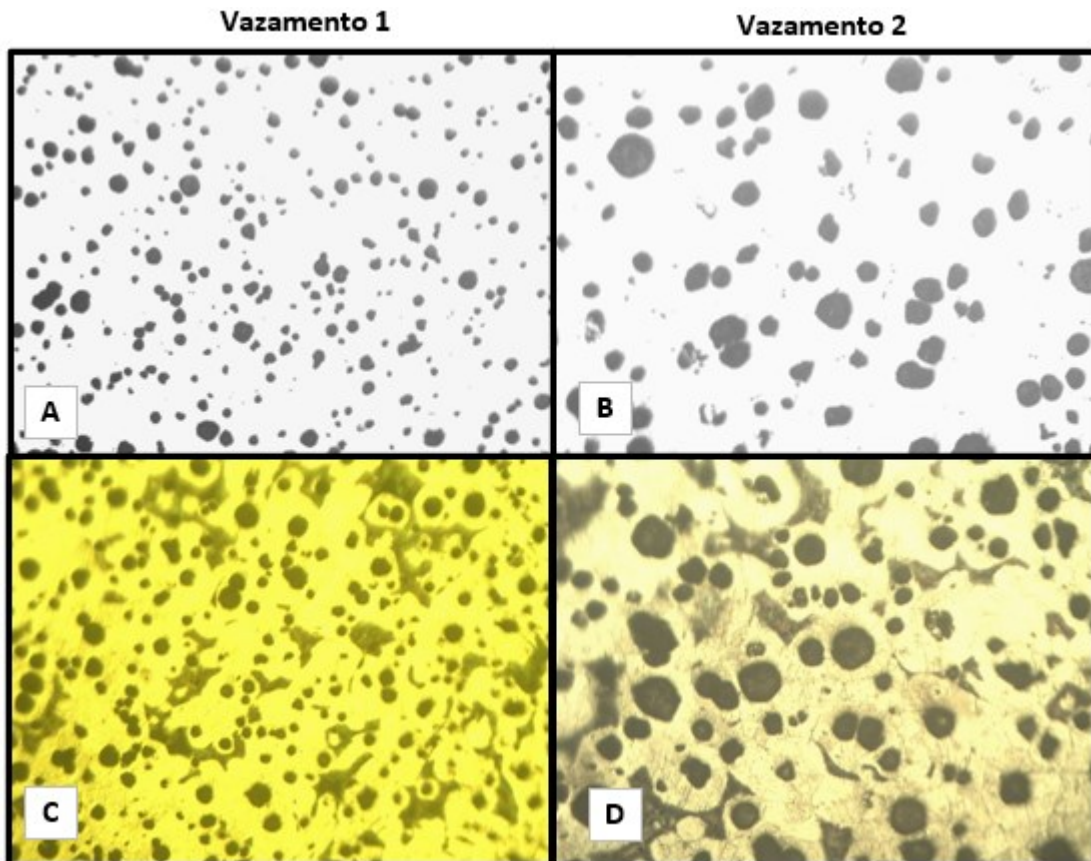


Fonte: Autoria Própria

No ponto 3 (Metalografias apresentadas na figura 23), o software utilizado nos forneceu uma leitura de 24% de perlita e 76% ferrítica para o vazamento 1. Os

resultados numéricos e gráficos, nos mostraram bem parecidos ao ponto 1. Algo que supostamente pode ser justificado pela similaridade do perfil da peça, contudo, sua solidificação. No vazamento 2 referentes ao ponto 3, houve menor variação microestrutural em sua matriz, constatando-se 87% ferrítica e 13% perlítica.

Figura 23 – Metalografia Ponto 3



Fonte: Autoria Própria

4.4 DUREZA

Após lixamento de superfície, para medição de dureza no ponto 1, obtivemos um valor de 163,00 HB para o vazamento 1. O diâmetro da esfera utilizada neste ensaio foi de 10 mm e uma carga de 3000kgf, o que veio a apresentar um diâmetro impresso na superfície da peça de 4,70 mm.

Para o vazamento 2, o diâmetro impresso na superfície da peça foi de 4,80 mm, resultando numa dureza menor, de aproximadamente 156 HB. Este resultado, se comparado com o resultado do vazamento 1, se torna lógico, visto ao aumento ferrítico da matriz formada conforme constatado na microestrutura, o

que conferiu no ensaio de tração um maior alongamento e menores resistências de tensão.

Na Figura 24 é apresentada o ponto ensaiado em cada amostra e valor marcado em caneta pelo analista de qualidade. Ambos resultaram atingiram os valores conforme especificados pela norma SAE J434 de 156-217 HB

Figura 24 – Ensaio de Dureza



Fonte: Autoria Própria

4.5 ULTRASSONOGRRAFIA

No produto do vazamento 1 a medição constatada da espessura de parede foi de 22,65 mm. Com este valor, o retorno da onda foi de 5545 m/s. Já para a amostra 2, com a espessura de parede de 22,66mm, o equipamento de ultrassom exibiu um retorno de onda de 5602 m/s.

Figura 25 – Medição Ultrassom



Fonte: Autoria Própria

Ambos os valores encontrados se mostraram acima dos 5500 m/s, que são os valores de referência para que a nodularização da peça foi obtida dentro do padrão especificado.

4.6 ANÁLISE GERAL

O cliente ao analisar os resultados obtidos, correlacionando com a necessidade de esforços requeridas pela peça, optaram pela alteração de sua especificação referente a tensão de escoamento. Isto deu-se após simulação de esforços estruturais, onde notaram que era alta margem de tensão mínima requerida (310 MPa). Para o cliente, a tensão de escoamento mínima foi alterada para 300 MPa, visto que para seu produto a maior necessidade seria quanto ao alongamento do item.

Ao se observar os valores encontrados na análise química, o objetivo de cumprir com os requisitos estabelecidos pela norma foram cumpridos. Também, os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom apresentaram-se dentro do limite estabelecido pela empresa, qual era uma velocidade mínima de 5500 m/s.

Ao se avaliar os resultados de dureza, percebe-se o decréscimo de 7 pontos na escala Brinell, causada pelo maior alongamento no vazamento 2, o qual foi fundida com maior quantidade de gusa. Comportamento similar foram observados nos resultados dos ensaios de tração, o vazamento 2 que atendeu as exigências do cliente foi o que apresentou o maior alongamento e atingiu o valor estabelecido por norma quanto a tensão de escoamento e tensão de ruptura. Isto foi possível com a carga fundida contendo 80% de ferro gusa.

Os resultados foram alcançados devido à presença de uma maior carga ferrítica obtida pela maior porcentagem de gusa na estrutura do metal do vazamento 2. Isto foi possível devido a uma carga mais pura, ou seja, livre de uma quantidade maior de elementos de liga residuais contido na sucata de aço utilizada na fusão. Assim, a ação da hereditariedade da grafita influenciou nas propriedades finais do material.

5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a origem do material a ser fundido influenciou nas propriedades mecânicas finais do material. Ao se utilizar a carga de material mais nobre, gerou um aumento no custo de produção, porém foi a solução encontrada para atingir o as propriedades mecânicas exigidas quanto ao produto.

A análise química indicou que em ambas as cargas apresentara composição química dentro da norma especificada.

O ensaio de tração a amostra 2 não atingiu os valores estabelecidos pela norma com relação ao escoamento. Porém, após análise pelo cliente, foi aceito os valores obtidos quanto a necessidade de alongamento, o qual foi atendido pela carga mais nobre.

A análise metalográfica nos apresentou uma matriz ferrítica no produto obtido do vazamento 2. Esta estrutura ocasionou um valor menor na dureza encontrada nos ensaios realizados.

O ensaio de ultrassom comprovou que ambos os vazamentos realizados apresentaram o grau de nodularização dentro do especificado.

Concluiu-se que a utilização da carga com 80% de gusa e 20% de sucata cumpriu a especificação do cliente.

REFERÊNCIAS

ASTM – American Society for Testing Materials. A 247 – **16ª - Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**, 2006.

BALDAM, L. R. Fundição. **Processos e Tecnologias Correlatas**. 2ª edição. Editora Érica, 2014.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7ª edição. Editora LTC, 2008.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. Vol. 2, 2. ed. p.2. São Paulo, 1986.

DIN Deutsches Institut für Normung - **Cast Iron With Nodular Graphite**. DIN1693 : 1977.

FARIA, R. Bueno. **Avaliação do grau de nucleação do ferro fundido cinzento hipoeutético em forno cubilô e em forno a indução através de análise térmica de solidificação**, ABIFA, São Paulo, 2016.

ISO TS Metallic materials – **Brinell Hardness Test** - Part 1: Test Method. EN 6506-1: 1999.

ISO TS Metallic materials - **Tensile testing** - Part 1: Method of Test. EN 6892-1 : 2010.

KAUER, Fabiano Z., **AAS – Princípios e instrumentação**. São Paulo, 2008.
Disponível em: <
http://www.shimadzu.com.br/analitica/noticias/seminarios/seminario_de_quimica-cc_e_ctgas/AAS-Fundamentos_e_Instrumentacao.pdf >. Acesso em 5 maio 2019.

SAE. **The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space**. INTERNATIONAL. J434.

SOUZA, A. B. SANTOS. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. 1ª edição. Editora IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 3.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1977. 216p.

FRANCKLIN, Alexandre Reis. **UM BREVE ESTUDO SOBRE FERRO FUNDIDO NODULAR**. 2009. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Produção Siderúrgica, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2009.

GUNDLACH, R. B.. DIS RESEARCH PROJECT N. 37: NODULARITY, ITS MEASUREMENT, AND ITS CORRELATION WITH THE MECHANICAL PROPERTIES OF DUCTILE IRON. **Stork Climax Research Services For Ductile Iron Society**, Wixon, v. 1, n. 37, p.1-34, jun. 2006.

Disponível em: www.ductile.org/researchpdfs/proj371.pdf. Acesso em: 01 abr. 2020.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p. Revisão e Atualização: André Luiz V. Costa e Silva.