

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RENATA FERNANDA DA COSTA LODDI

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO EM UM PINHÃO DE UM SECADOR
ROTATIVO HORIZONTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

RENATA FERNANDA DA COSTA LODDI

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO EM UM PINHÃO DE UM SECADOR
ROTATIVO HORIZONTAL**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento
Acadêmico de Engenharia de Materiais
da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

RENATA FERNANDA DA COSTA LODDI

ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO EM UM PINHÃO DE UM SECADOR ROTATIVO HORIZONTAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 2 de dezembro de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica)

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de
Materiais) Orientadora

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de
Materiais) Coordenadora do Curso de Engenharia de
Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por me dado saúde e força para superar as dificuldades que obtive, por se fazer presente em todos os momentos, sabedoria e disposição para alcançar mais uma vitória em minha vida.

Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional que me proporcionaram e que com toda dedicação ensinou-me a ser uma pessoa humilde e a respeitar e buscar meus sonhos de forma honesta.

Agradeço também a minha família e ao meu noivo por estar ao meu lado todo esse tempo me dando força, apoio e confiança.

A minha orientadora Professora Doutora Silvia Midori Higa, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos que me disponibilizou, a elaboração do presente trabalho de conclusão de curso e graduação. Foi um privilégio ser sua orientanda.

Agradeço a todos meus amigos, colegas por confiarem em mim, sempre me dando forças para não desistir.

Um agradecimento a todos os professores que fizeram parte da minha graduação, sem o conhecimento passado e tempo despendido, hoje eu também não estaria aqui. A todos os técnicos, servidores e demais funcionários que fazem da UTFPR Londrina.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

LODDI, R. F. C. **Análise da deformação em um pinhão do secador rotativo horizontal**. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, PR, 2019.

Diversos grãos são produzidos no Brasil e no mundo, sendo utilizados como matéria-prima na produção de alimentos. Para a boa qualidade dos grãos é necessário um bom beneficiamento, o qual consiste de várias etapas, sendo uma delas a secagem dos grãos. O secador horizontal rotativo é um maquinário utilizado para a secagem de grãos, que tem como objetivo promover uma melhor qualidade do produto, devido a secagem mais uniforme, não deixando odor nenhum no produto e além disso, possuir baixo consumo de energia para secagem. Esse equipamento possui um conjunto de engrenagens, sendo um desses o pinhão de ferro fundido nodular, que deve ser capaz de suportar esforços, ter resistência ao desgaste e boas propriedades mecânicas para não falhar em funcionamento. O objetivo principal deste trabalho baseou-se na análise da causa da deformação excessiva de um pinhão, componente de um secador rotativo com capacidade de 18000 l. Para isso, inicialmente foi realizada a metalografia de dois dentes deformados do pinhão, a qual revelou a presença de grafita nodular e vermicular, sendo esperado a presença apenas de grafita na forma nodular. Já a matriz ferrítica e perlítica observada mostrou-se de acordo com a norma ASTM com especificação GGG 40. Os valores de dureza obtidos foram mais altos do que o esperado pela norma. Além disso, foi realizada a análise química do componente, verificando que está de acordo com a norma e conforme a fundição, a qual fabrica o pinhão fornecido para a Calli do Brasil localizada em Maringá-PR sofrendo pequenas alterações para adquirir propriedades mecânicas solicitadas. A deformação do pinhão se deve pela alteração de suas propriedades mecânicas, através da microestrutura analisada foi possível observar grafita na forma de nódulos e vermicular, influenciando nas suas propriedades.

Palavras-chave: Deformação. Secador rotativo horizontal. Ferro fundido nodular.

ABSTRACT

LODDI, R F. C. **Analysis of the deformation in a pinion of the horizontal rotary dryer**. 57f. Undergraduate Thesis – Academic Department of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, PR, 2019.

Several grains are produced in Brazil and worldwide, being used as raw material in food production. For good grain quality, good beneficiation is required, which consists of several steps, one of which is drying the beans. The horizontal rotary dryer is a machinery used for grain drying, which aims to promote better product quality due to more uniform drying, leaving no odor in the product and also has low energy consumption for drying. This equipment has a set of gears, one of which is the nodular cast iron pinion, which must be able to withstand efforts, have wear resistance and good mechanical properties not to fail in operation. The main objective of this work was based on the analysis of the cause of excessive pinion deformation, component of a rotary dryer with capacity of 18000 l. For this, initially the metallography of two deformed teeth of the pinion was performed, which revealed the presence of nodular and vermicular graphite, being expected the presence of only graphite in the nodular form. The observed ferritic and perlite matrix was in accordance with the ASTM standard with GGG 40 specification. The hardness values obtained were higher than expected by the standard. In addition, a chemical analysis of the component was performed, verifying that it complies with the standard and according to the foundry, which manufactures the pinion supplied to Calli do Brasil located in Maringá-PR undergoing minor changes to acquire requested mechanical properties. The pinion deformation is due to the change of its mechanical properties, through the analyzed microstructure it was possible to observe graphite in the form of nodules and vermicular, influencing its properties.

Keywords: Deformation. Horizontal rotary dryer. Nodular cast iron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Câmara de secagem do secador rotativo horizontal.....	18
Figura 2 - Secador rotativo horizontal: 01. Caixa de Armazenamento, 02. Câmara de secagem, 03. Turbina, 04. Fornalha.....	19
Figura 3 - Conjunto de engrenagens, 01. Coroa e 02. Pinhão.	20
Figura 4 - Modo de transmissão entre 01. Coroa e 02. Pinhão.	20
Figura 5 - Ilustração do pinhão de menor dimensão e coroa de maior dimensão.	21
Figura 6 - Encaixe entre o pinhão com cor de cinza claro e coroa com cor cinza escuro.	22
Figura 7 - Micrografia Ferro Fundido Nodular Base. Ataque Nital 3%. Aumento de 200x.	25
Figura 8 - Nomenclatura e especificações do pinhão.....	28
Figura 9 - (A) Pinhão secador rotativo e (B) locais de deformação excessiva.	29
Figura 10 - Especificações de medida do pinhão.....	30
Figura 11- Fluxograma das atividades realizadas.....	31
Figura 12 - (A) Corte vertical pinhão e (B) Resultado corte vertical do pinhão. 1 – Amostra 1 foram retiradas duas regiões para análise no microscópio e dureza; 2 – Amostra 2 foram retiradas duas regiões para análise no microscópio e dureza.	32
Figura 13 - Corte na horizontal do pinhão.	32
Figura 14 - Amostra 1- Corte vertical e horizontal; Amostra 2- Corte vertical e horizontal.....	33
Figura 15 - Esquema de cortes da amostra 1, sendo igual para a amostra 2.	34
Figura 16 - Ensaio de dureza; amostra 1 indicando onde foram analisados os 3 pontos; (A) face da deformação, corte dente vertical; (B) face lixada e polida onde foi analisada pelo microscópio, corte dente vertical; (C) face da deformação, corte horizontal superior; (D) superfície para o centro, corte horizontal superior; (E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.	35
Figura 17 - Ensaio de dureza; amostra 2 indicando onde foram analisados os 3 pontos; (A) face da deformação, corte dente vertical; (B) face lixada e polida onde foi analisada pelo microscópio, corte dente vertical; (C) face da deformação, corte horizontal superior; (D) superfície para o centro, corte horizontal superior; (E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.	36

Figura 18 - Microestrutura amostra 1 antes de ser atacada, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.	38
Figura 19 - Microestrutura amostra 1 antes de ser atacada, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.....	39
Figura 20 - Microestrutura amostra 2 antes de ser atacada, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.	39
Figura 21 – Microestrutura amostra 2 antes de ser atacada, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.....	40
Figura 22 - Microestrutura amostra 1 após ataque, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.	42
Figura 23 - Microestrutura amostra 1 após ataque, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.	42
Figura 24 - Microestrutura amostra 2 após ataque, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.	43
Figura 25 – Microestrutura amostra 2 após ataque, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.	43
Figura 26 – Dente do pinhão com cotas em milímetros.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos vermicular e nodular.....	23
Tabela 2 - Composição química de diferentes tipos de ferro fundidos nodulares.....	24
Tabela 3 - Classe dos ferros fundidos nodulares e aplicações.....	24
Tabela 4 - Composição química % em massa do ferro fundido nodular – ASTM GGG – 40.....	26
Tabela 5 - Propriedades mecânicas ferro fundido nodular – ASTM GGG – 40.....	27
Tabela 6 – Composição química em % mássica do pinhão utilizado pela empresa Calli do Brasil.....	30
Tabela 7 – Dureza média (HB) amostra 1.....	45
Tabela 8 – Dureza HB, amostra 1(A) face da deformação, dente corte vertical.....	45
Tabela 9 - Dureza HB, amostra 1(B) face lixada, dente corte vertical.....	45
Tabela 10 - Dureza HB, amostra 1(C) face da deformação, corte horizontal superior.....	45
Tabela 11 - Dureza HB, amostra 1(D) superfície para o centro, corte horizontal superior.....	45
Tabela 12 - Dureza HB, amostra 1(E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.....	46
Tabela 13 – Dureza média (HB) amostra 2.....	46
Tabela 14 - Dureza HB, amostra 2(A) face da deformação, dente corte vertical.....	46
Tabela 15 - Dureza HB, amostra 2(B) face lixada, dente corte vertical.....	47
Tabela 16 - Dureza HB, amostra 2(C) face da deformação, corte horizontal superior.....	47
Tabela 17 - Dureza HB, amostra 2(D) superfície para o centro, corte horizontal superior.....	47
Tabela 18 - Dureza HB, amostra 2(E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.....	47
Tabela 19 – Composição química em % mássica das pastilhas coquilhadas obtidas durante a fundição do pinhão.....	48
Tabela 20 – Dados do motor elétrico.....	49
Tabela 21 – Resultados encontrados.....	50

Tabela 22 – Dados do redutor.....	50
Tabela 23 – Resultados encontrados.....	50
Tabela 24 – Dados do pinhão.....	51
Tabela 25 – Resultados encontrados.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
D	Diâmetro da impressão na amostra
HB	Dureza Brinnell
HR	Dureza Rockwell B
l	Litros
N	Newton
min	Minuto
mm	Milímetro
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
s	Segundos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SIMBOLOS

C_1	Constante que dependem da escala de Dureza Rockwell B
C_2	Constante que dependem da escala de Dureza Rockwell B
ΔP	Variação de carga aplicada
π	Pi
\varnothing	Diâmetro
τ	Cisalhamento
σ	Tensão
F	Força

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO.....	15
2.1 Objetivo geral.....	15
2.1.1 Objetivos específicos.....	15
3 JUSTIFICATIVA.....	16
4 REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1 Processo de secagem de grãos	17
4.1.1 Equipamentos.....	17
4.2 Pinhão do secador rotativo horizontal.....	21
4.2.1 Composição e propriedades.....	22
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
5.1 Materiais.....	29
5.2 Métodos.....	30
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1 Análise no Microscópio Ótico.....	38
6.2 Ensaio de Dureza.....	44
6.3 Análise Química.....	48
6.4 Análise Geométrica.....	49
7 CONCLUSÃO.....	53
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

No Brasil e no mundo é grande a procura de aprimoramento das condições de beneficiamento dos grãos visando melhorias na qualidade do produto.

Dentre as etapas de beneficiamento a secagem é uma delas. Nesta etapa um equipamento muito utilizado é o secador rotativo horizontal que tem vantagens como proporcionar secagem rápida e uniforme dos grãos, eliminando riscos de perda do produto. Dentre os grãos beneficiados estão o milho, trigo, soja, feijão, café, pimenta do reino, entre outros.

O secador rotativo é composto por: uma fornalha que fornece calor para que ocorra a secagem; uma turbina que injeta o ar quente para dentro da câmara de secagem, na qual submete-se o produto a ser seco; um conjunto de transmissão cuja função é rotacionar a câmara de secagem. Neste trabalho, o defeito de deformação excessiva no pinhão que faz parte do conjunto de transmissão será abordado.

Esses secadores são produzidos com diferentes capacidades de 5000 l, a 18000 l. O pinhão utilizado para a fabricação desses secadores é o mesmo para todas as capacidades e é produzido de ferro fundido nodular. Para que esse componente desempenhe de forma segura e adequada sua função, sua superfície deve apresentar elevada dureza, promovida por tratamento térmico.

Este trabalho é baseado na análise da deformação excessiva que ocorreu em pinhões dos secadores com capacidade de 18000 l. As hipóteses inicialmente levantadas são de que essa deformação pode ter sido causada por peso excessivo da carga de grãos, podendo a dureza superficial das engrenagens ser insuficiente para suportar os tipos de esforços a que são submetidos ou mesmo o encaixe das engrenagens, em termos da sua geometria, não adequado, também uma divergência da microestrutura final do componente com o que se era esperado pela norma seguida para fabricação.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é realizar uma análise da deformação apresentada por um pinhão de secador rotativo horizontal, identificando a possível causa.

2.1.1 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Análise microestrutural por microscopia óptica das regiões do componente que apresentaram maior deformação;
- Determinação da dureza superficial e interna, por ensaio de dureza;
- Análise química da pastilha coquilhada, por espectrômetro de emissão óptica;
- Análise dos esforços presente no dente do pinhão.

3 JUSTIFICATIVA

O Brasil é o terceiro maior exportador de grãos do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da Europa, segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (CHADE, 2018).

A importância da agricultura na economia brasileira é demonstrada pela sua participação no PIB (Produto Interno Bruto). Dados apontam que em 2018 a agricultura representava uma parcela de 20% da atividade econômica do Brasil (REUTERS, 2018).

Nesse cenário ganha importância a qualidade dos grãos exportados. Um dos processos que tem fundamental importância para garantir essa qualidade é o processo de secagem dos grãos. Esse processo elimina riscos de perda do produto por excesso de umidade, o que pode ocasionar a germinação do grão ou seu apodrecimento.

Um dos principais equipamentos para secagem é o secador horizontal rotativo, tendo fundamental importância para agricultores de pequeno, médio e grande porte.

Um dos componentes do secador é o pinhão, uma espécie de engrenagem que auxilia na sua rotação, não podendo sofrer deformação excessiva, uma vez que isso afetaria o funcionamento do secador.

Apesar de ter um valor baixo, aproximadamente 1,5% em relação ao custo total do maquinário, caso ocorra a fratura desse componente, ocorrerá conseqüentemente um possível dano aos demais componentes, como por exemplo, na engrenagem principal, causando a parada do secador. Junto ao prejuízo da substituição do material danificado, tem-se prejuízo devido ao tempo do equipamento parado, impossibilitando a secagem e a uma possível perda da qualidade dos grãos.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Processo de secagem de grãos

A safra brasileira de grãos no período de 2018/2019 foi de 236,7 milhões de toneladas (FIESP, 2019). Em 2018 a safra de café foi de 59,90 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado, segundo dados da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). O país é o maior produtor e exportador de café e segundo maior consumidor da bebida no mundo, sendo que as duas principais espécies plantadas são o arábica (80% da área) e o conilon (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2019).

O processo de secagem dos grãos pode ser realizado de forma natural ou artificial. O processo artificial é considerado o mais eficiente, devido ao uso de equipamentos que aceleram e uniformizam a secagem da carga. Um dos equipamentos que se destaca na secagem artificial é o secador horizontal rotativo. Neste trabalho, sua constituição e funcionamento serão abordados (SOUZA E SILVA, et al., 2014).

4.1.1 Equipamentos

No final do século XIX, a secagem e armazenamento de grãos já era alvo de estudos. Desde então, houve o desenvolvimento de equipamentos em termos da mecanização para otimização de tempo de processo, melhor qualidade do produto, menor esforço braçal de trabalhadores. Atualmente um dos equipamentos mais utilizados é denominado de secador rotativo horizontal (SOUZA E SILVA, et al., 2014).

Esse modelo de secador que também é utilizado como um pré-secador é constituído de um cilindro tubular horizontal, não inclinado, que gira em torno de seu eixo longitudinal a uma velocidade angular pré-determinada. Internamente contém um sistema de tubulação para distribuir o ar, além de chapas perfuradas de forma para promover a distribuição uniforme desse dentro do cilindro tubular, denominado de câmara de secagem.

Durante o processo de secagem, o ar aquecido por uma fornalha é inserido por uma turbina na câmara de secagem, atravessando a massa de produtos (DANTAS, 2017). Esse tipo de secador apresenta vantagens como o favorecimento da limpeza

dos grãos e uma boa uniformidade de secagem. Como desvantagens, são apontados o custo inicial alto para sua instalação e o alto consumo de energia.

Além dessas vantagens, a partir do conhecimento do tipo de secador, é possível controlar a temperatura atingida para precaver possíveis danos aos grãos, tornando-se uma possibilidade de secagem para sementes. Outras vantagens são descritas como a maior rapidez de secagem, independência das condições climáticas e a melhor aparência dos grãos ao final do processo (SOUZA E SILVA; LACERDO FILHO; BERBET, 2008).

A câmara de secagem, Figura 1, é comumente fabricada de aço SAE 1010. Suas chapas são perfuradas para que o ar quente atravesse, não permitindo a elevação da temperatura, o que poderia prejudicar a qualidade do grão. Além disso, tem a finalidade de suportar o peso e o atrito dos grãos gerado pelo movimento da câmara.

Figura 1 - Câmara de secagem do secador rotativo horizontal.



Fonte: Dantas (2017).

Os grãos úmidos são transportados das lavouras para caixas de armazenamento ou diretamente para a câmara de secagem do secador rotativo horizontal. Com o produto dentro da câmara de secagem, fecham-se as portas e se inicia o processo. A fonte de calor é fornecida por uma fornalha, que é alimentada a lenha ou a gás. O ar quente gerado é insuflado por meio da turbina dentro do tubo

interno da câmara de ar do secador. O controle da temperatura é feito por termômetros localizados na saída do ar quente e na câmara de secagem. Na Figura 2 é mostrado um secador rotativo horizontal.

Figura 2 - Secador rotativo horizontal: 01. Caixa de Armazenamento, 02. Câmara de secagem, 03. Turbina, 04. Fornalha.

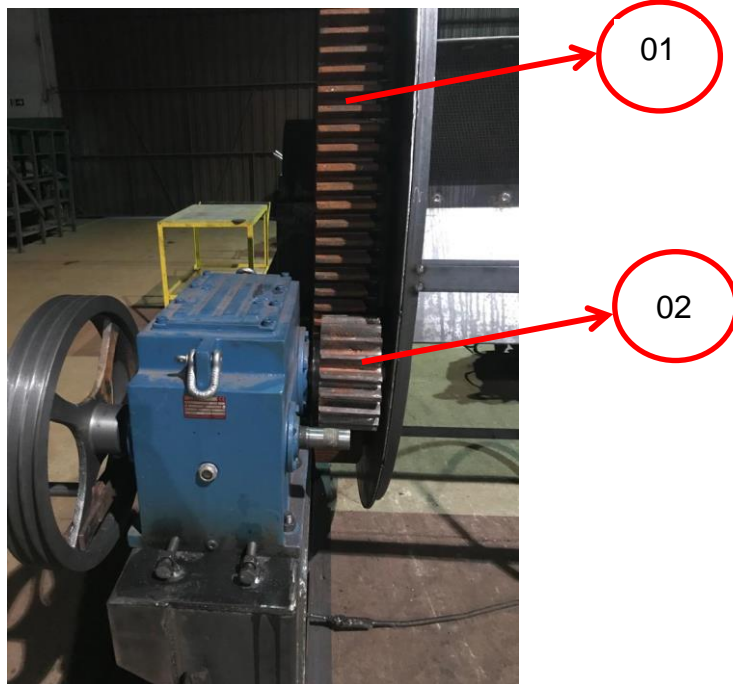


Fonte: Repositório Digital – Calli do Brasil (2018)

O secador é dotado de um conjunto de engrenagens que transmite o movimento de rotação para a câmara de secagem.

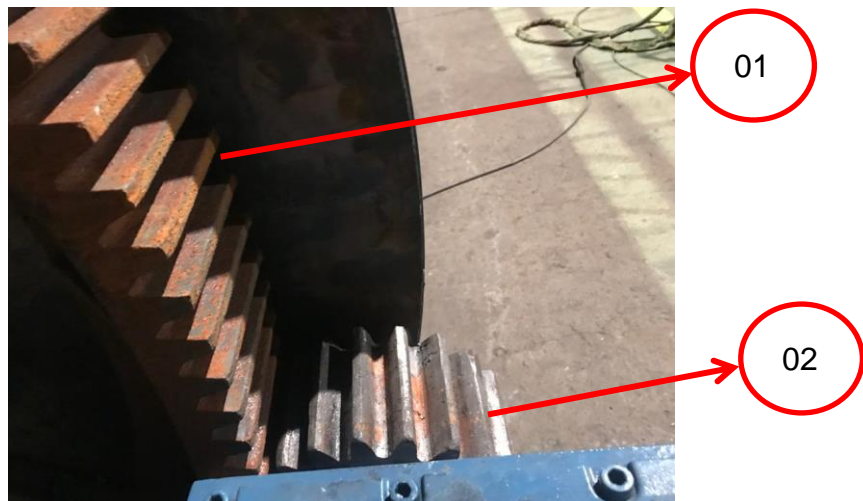
As engrenagens são compostas por um conjunto de coroa e pinhão, indicados na Figura 3. O pinhão (engrenagem motora) é responsável por transmitir a rotação para a coroa (engrenagem movida), como pode ser observado na Figura 4, possibilitando assim a movimentação do secador (FLORES E GOMES, 2014).

Figura 3 - Conjunto de engrenagens, 01. Coroa e 02. Pinhão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Modo de transmissão entre 01. Coroa e 02. Pinhão.



Fonte: Autoria própria.

O conjunto de engrenagens localizado na parte frontal do secador é acionado por um motor de 5 HP, 4 polos (1750 rpm). Essa potência e força são transmitidas para o redutor, por meio de um conjunto de polias. O redutor de 1:25 gira o pinhão e aciona a transmissão com a coroa, resultando em uma rotação de 6 voltas por minuto. Ao término do tempo necessário, a câmara de secagem é parada com as portas

voltadas para baixo, que ao serem abertas, descarregam o produto seco na moega de descarga.

O eficiente desempenho do sistema de engrenagens é essencial para o funcionamento correto do secador rotativo horizontal e conseqüentemente para a qualidade do produto final.

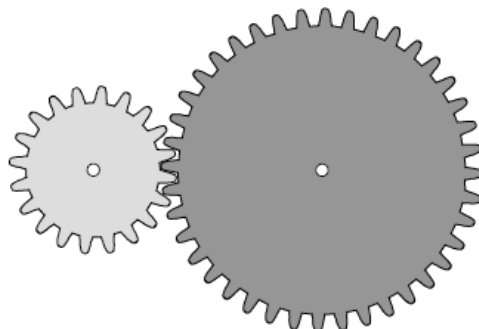
4.2 Pinhão do secador rotativo horizontal

Na produção de engrenagens devem ser levados em consideração fatores que determinam a geométrica adequada, de acordo com a sua aplicação. Esses fatores são: a velocidade de rotação do eixo condutor, a posição geométrica relativa dos eixos no espaço (distância e ângulo), a potência a ser transmitida e a relação de transmissão (GEMAUQUE E DONATELLI, 2004).

Existe uma classificação para os tipos de engrenagens. O primeiro refere-se à disposição relativa dos eixos das rodas, podendo ser: cilíndricas, cônicas e torsas. O segundo critério utilizado relaciona-se ao formato dos dentes: dentes retos, dentes helicoidais e dentes espirais. O terceiro refere-se à posição relativa dos centros instantâneos de rotação, sendo exteriores ou interiores (FLORES E GOMES, 2014).

Desta forma, pode haver uma classificação das engrenagens através dos dois primeiros critérios. O foco deste trabalho é a engrenagem cilíndrica de dentado reto utilizada no secador rotativo horizontal. Uma forma mais convencional de ser chamada é pinhão de dente reto. A Figura 5 é uma ilustração do pinhão, de menor dimensão, e a coroa, de maior dimensão.

Figura 5 - Ilustração do pinhão de menor dimensão e coroa de maior dimensão.

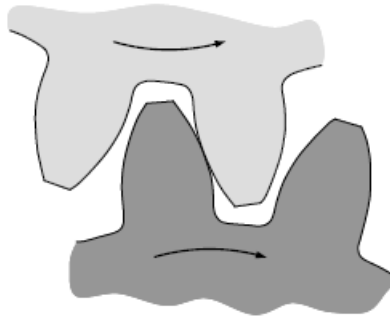


Fonte: Flores e Gomes (2014).

Na transmissão de movimentos paralelos, esse tipo de engrenagem é uma das mais utilizadas em projetos mecânicos, devido a fácil fabricação, montagem e manutenção. Esse tipo de engrenagem aceita maior relação de transmissão e elevados rendimentos. Uma desvantagem é quando operada em alta velocidade de rotação, apresenta ruídos (FLORES E GOMES, 2014).

O funcionamento do pinhão em contato direto com a coroa, ocorre a uma rotação inversa em relação a ela, e atua de maneira a reduzir a velocidade e aumentar o torque, conforme visto na Figura 6.

Figura 6 - Encaixe entre o pinhão com cor de cinza claro e coroa com cor cinza escuro.



Fonte: Flores e Gomes (2014).

Nesse trabalho serão analisadas as propriedades e o processo de fabricação do pinhão, pois o problema é focado na deformação excessiva apresentada por este componente.

4.2.1 Composição e propriedades

O pinhão analisado neste trabalho é feito de ferro fundido nodular. Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamela de grafita (CHIAVERINI, 1990).

Os ferros fundidos são divididos em seis classes: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e ferro fundido de grafita compacta (CHIAVERINI, 1990).

O ferro fundido nodular possui características importantes em relação aos demais ferros fundidos, como por exemplo, uma melhor ductilidade, tenacidade e resistência mecânica (maior limite de escoamento), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos vermicular e nodular.

Propriedades	Vermicular	Nodular
Resistência à tração (MPa)	500	650
Módulo de elasticidade (GPa)	140	165
Resistência à fadiga (MPa)	205	265
Condutividade térmica (W/mk)	35	28
Dureza (HB)	225	270
Limite de escoamento 0,2%	380	425

Fonte: Doré (2007).

Em geral, são divididos em classes de acordo com suas aplicações e composição, conforme Tabela 1 e 2. A composição varia em torno de 3,40% a 3,80% de carbono, 0,30% a 1,00% de manganês e silício entre 2,10% a 2,80%. Alguns outros elementos como fósforo e enxofre estão presentes em porcentagem pequena entre 0,02% a 0,09%, além do magnésio entre 0,04% a 0,06%. Outros elementos são utilizados para aumentar as propriedades de resistência mecânica, como o níquel, cobre, estanho e cromo (FRANCKLIN, 2009).

Tabela 2 - Composição química de diferentes tipos de ferro fundidos nodulares.

Elemento	Classes de ferro fundido nodulares					
	FE 38017	FE 42012	FE 50007	FE 60003	FE 70002	FE 80002
C	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8
Si	2,1 a 2,8	2,1 a 2,5	2,8 a 2,8	3,4 a 3,8	2,3 a 2,8	2,1 a 2,8
Mn (máx)	0,3	0,3	0,5	0,5	1,0	1,0
P (máx)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
S (máx)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cu	-	-	0,2 a 0,7	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0
Mg	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06

Fonte: Francklin (2009).

Tabela 3 - Classe dos ferros fundidos nodulares e aplicações.

Classe	Aplicação
FE 38017	Fundidos submetidos à pressão, corpos de válvulas e de bombas, mecanismos de direção e flanges.
FE 42012	Fundidos para máquinas submetidas a cargas de choque e fadiga e discos de freio.
FE 50007	Virabrequins e engrenagens
FE 60003	Engrenagens de alta resistência, componentes de máquinas e peças automotivas.
FE 70002	Engrenagens de alta resistência, componentes de máquinas e peças automotivas.
FE 80002	Pinhões, engrenagens e trilhos.

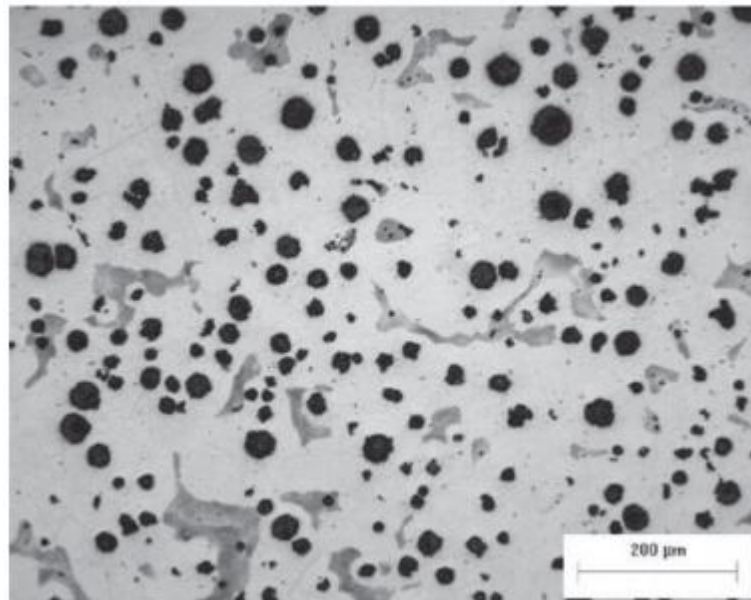
Fonte: Francklin (2009).

A microestrutura do ferro fundido nodular é constituída de grafita na forma de nódulos/esferoidal, como observado na Figura 7. Essa característica faz com que o ferro fundido nodular tenha melhores propriedades quando comparado a outros tipos de ferros fundidos, pois por mais que a grafita possua resistência mecânica baixa, podendo ser até entendida como uma descontinuidade da matriz, na sua forma esférica, esse efeito de descontinuidade se reduz, melhorando a resistência mecânica, ficando mais alta do que a grafita em veios (GOODRICH, 2003).

A grafita na forma esferoidal presente na microestrutura do ferro fundido nodular ocorre com a adição de alguns elementos, como magnésio, cério, entre outros. Entretanto o magnésio é o mais utilizado devido ao seu baixo custo. É feito um controle rigoroso a fim de contrabalançar outros elementos, como antimônio, chumbo, titânio, telúrio, bismuto e zircônio que afetam o processo da formação de nódulos, eliminando-se ou mantendo-se as porcentagens menores possíveis (CHIAVERINI,1990).

A microestrutura contendo nódulos, particularidade do ferro fundido nodular, advém do elemento de liga nodularizante que altera a morfologia da grafita na solidificação, fazendo com que a grafita lamelar, característica do ferro fundido cinzento, se transforme em grafita esferoidal. Esta liga nodularizante é adicionada a panela separada em um compartimento, para que não entre em contato direto com o ferro fundido despejado na panela. Após despejado a quantidade requerida de ferro fundido na panela, a mesma é basculada para que a liga nodularizante entre em contato com o ferro fundido, ocorrendo a reação (FERREIRA *et al.*, 2017).

Figura 7 - Micrografia Ferro Fundido Nodular Base. Ataque Nital 3%. Aumento de 200x.



Fonte: Revista Tecnologia (2010).

Além da composição, as propriedades do ferro fundido podem ser modificadas por meio de tratamentos térmicos dependendo o destino de sua aplicação. Entre os tratamentos térmicos estão o de alívio de tensão, recozimento, normalização,

têmpera, austêmpera, entre outros. Por meio do recozimento ou normalização é possível decompor a cementita, produzindo ferrita e mais grafita esferoidal, melhorando as propriedades mecânicas do material, sendo este um dos tratamentos mais utilizados.

A composição do material varia de acordo com as especificações das normas empregadas em sua fabricação. Cada norma delimita a composição e por consequência as propriedades e características do material. As normas também auxiliam na determinação do tipo de material que deve ser produzido para determinada aplicação.

Um dos desafios da produção do ferro fundido nodular é o rigoroso controle da composição do metal líquido que determinará junto à solidificação adequada das peças a microestrutura que possa garantir as melhores combinações das propriedades em uso. Assim, o controle não está apenas na composição, mas também no processo de fabricação por completo, pois uma alteração provocada no processo de solidificação pode alterar a microestrutura e propriedades mecânicas sem haver nenhuma alteração na composição química do material. (FRANCKLIN, 2009).

4.2.2 Fabricação do pinhão

O ferro fundido nodular confere boa usinabilidade e razoável estabilidade dimensional, sendo utilizado na indústria para aplicações que necessitam de boa resistência ao impacto, resistência a tração, resistência ao alongamento e escoamento.

O processo de fabricação se inicia na escolha da norma a ser seguida, a fim de se determinar a composição do material que melhor se aplica às necessidades do pinhão. A norma utilizada para a fabricação desse componente é a ASTM com especificação GGG-40 (*American Society for Testing and Materials*), com a composição mostrada na Tabela 4 e as propriedades mecânicas mostradas na Tabela 5.

Tabela 4 - Composição química % em massa do ferro fundido nodular – ASTM GGG - 40

% C	% Mn	% Si	% P	% S	%Cr	% Mg	% Cu
3,40– 3,75	0,25 max	2,40–2,70	0,10 max	0,02 max	0,10-0,40	0,03-0,07	0,10 max

Fonte: Açofer Brasil.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas ferro fundido nodular – ASTM GGG – 40

Propriedades Mecânicas	Valores
Limite de Resistência	~400 (N/mm ²)
Limite de Escoamento	~250 (N/mm ²)
Alongamento Percentual	~15 (%)
Dureza Brinell	~130 – 200 (HB)
Módulo de Elasticidade	160 – 185 (N/mm ²) (10 ³)
Resistência à Compressão	800 (N/mm ²)
Resistência à Flexão	800 (N/mm ²)
Resistência ao Cisalhamento	360 (N/mm ²)

Fonte: Spectru.

Após ser determinada a composição pela norma, é feita a fusão em temperatura entre 1175 a 1290° C, em forno de indução. O metal líquido é transferido para um cadinho que fica suspenso em uma ponte rolante. Por meio dessa ponte, o cadinho é levado até o molde, onde é vazado o metal líquido.

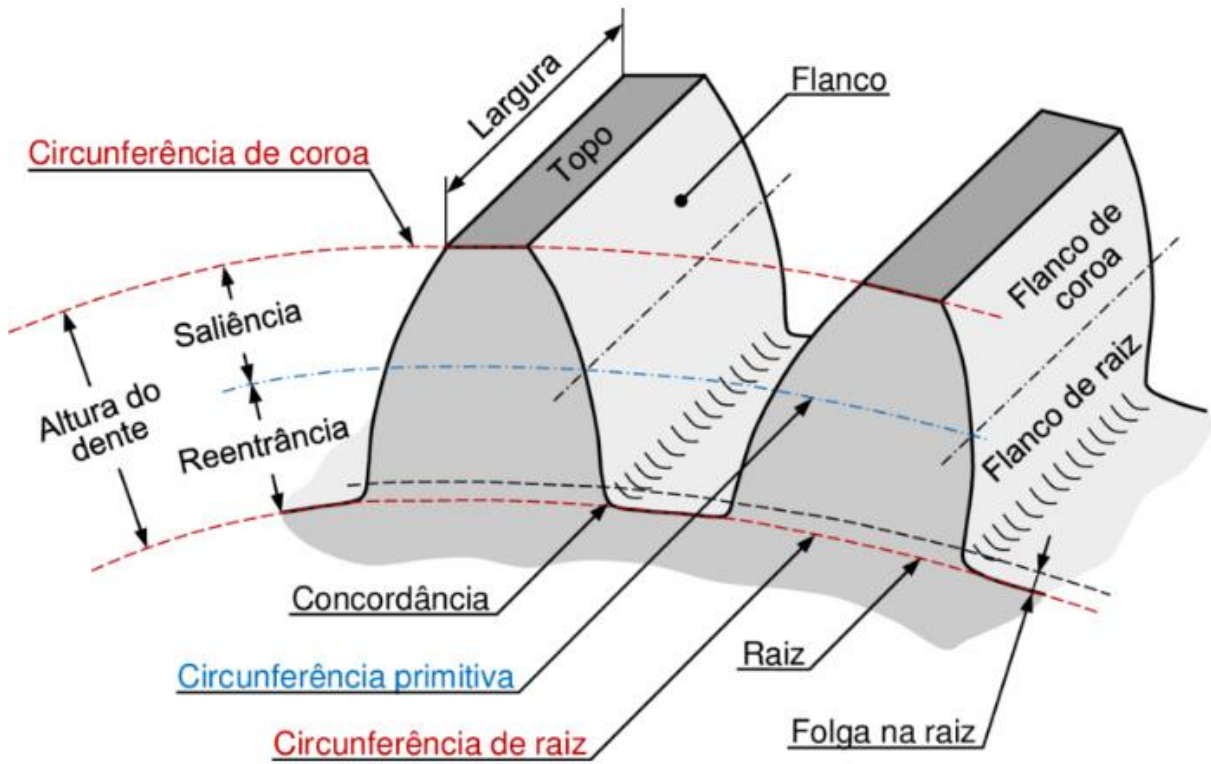
O processo para fundição do pinhão utiliza resina de cura a frio para enrijecer a areia base. Um catalisador líquido é adicionado em uma das partes de resina para deixar o processo de cura mais lento, o que facilita o manuseio no setor de moldagem. Utiliza-se desse processo devido às suas qualidades, como boa fluidez da areia, melhor acabamento superficial da peça e maior resistência do molde, possibilitando fabricação de peças maiores (FAISTAUER E WEBER, 2016).

Após 60 min de vertido no molde, o ferro líquido passa a ter estrutura formada por grafita, ferrita e perlita. Após solidificado é feita a desmoldagem do componente. A seguir são retiradas as rebarbas que são formadas durante o processo e a limpeza necessária. O pinhão não passa por nenhum tratamento térmico.

Na empresa Calli do Brasil, o pinhão passa por um processo de usinagem, a fim de deixar o diâmetro adequado do furo onde é acoplado o eixo.

Na Figura 8 tem-se uma representação das medidas e nomenclatura usadas para as especificações de um pinhão.

Figura 8 - Nomenclatura e especificações do pinhão.



Fonte: Researchgate.

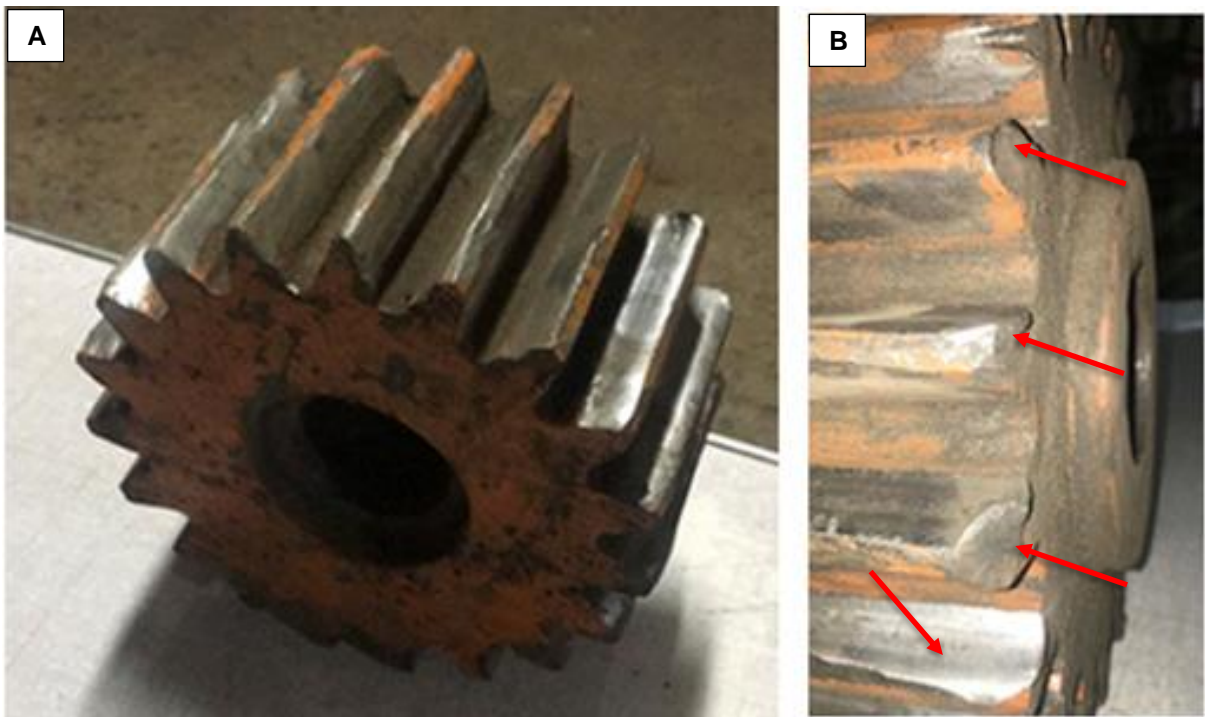
5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados e a metodologia aplicada para responder aos objetivos propostos neste trabalho.

5.1 Materiais

O objeto de estudo desse trabalho trata-se de um pinhão de ferro fundido nodular de um secador rotativo horizontal de grãos da empresa Calli do Brasil que apresentou deformação excessiva nas regiões indicadas pelas setas, representado na Figura 9.

Figura 9 - (A) Pinhão secador rotativo e (B) locais de deformação excessiva.



Fonte: Autoria própria.

A fundição, fornecedora do pinhão para a Calli do Brasil localizada em Maringá-PR, forneceu os dados de composição química do metal base utilizado para fabricação deste componente. Esses dados estão presentes na Tabela 6 e segue a norma ASTM GGG-40.

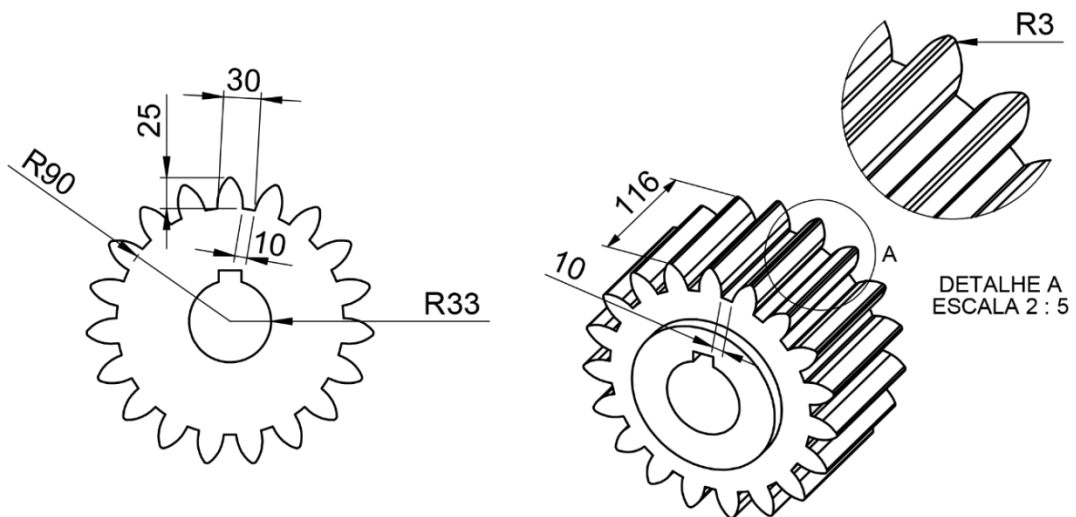
Tabela 6 – Composição química em % mássica do pinhão utilizado pela empresa Calli do Brasil.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	%Cr	% Mg
3,60– 3,70	0,30 max	2,55–2,65	0,08 max	0,02 max	0,10 max	0,02-0,06

Fonte: Fundição.

O pinhão possui um diâmetro interno de 66 mm, tamanho de dente de 25 mm e uma largura de 116 mm, como representado na Figura 10, pesando em torno de 29 kg quando recebido da fundição.

Figura 10 - Especificações de medida do pinhão.

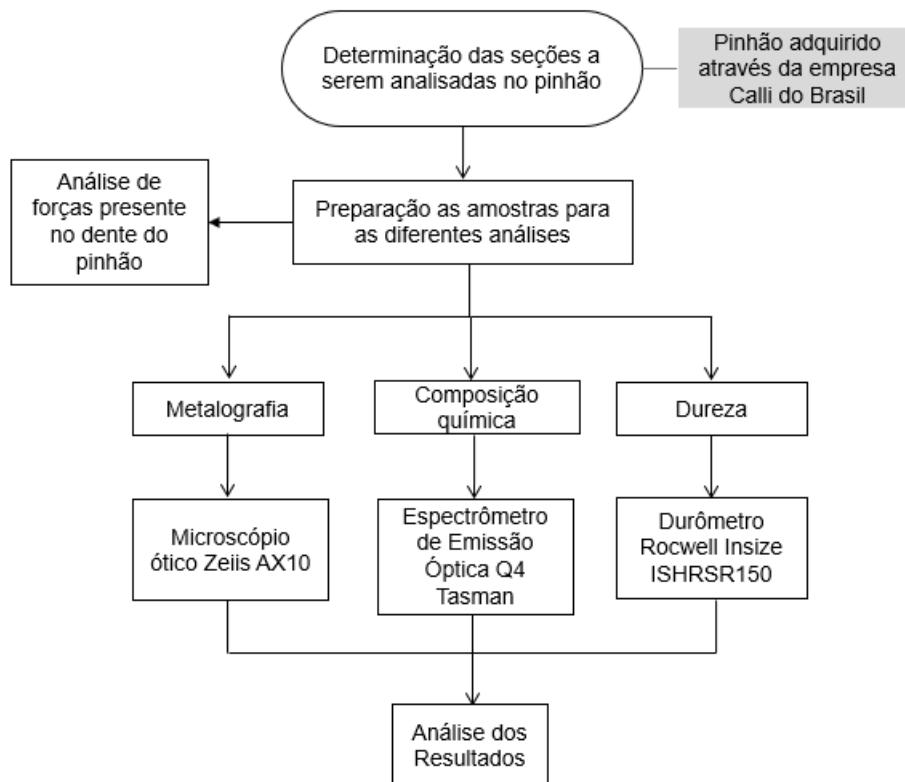


Fonte: Autoria própria.

5.2 Métodos

O fluxograma das atividades realizadas para o desenvolvimento desse trabalho é mostrado na Figura 11. A seguir, cada etapa do fluxograma é detalhada.

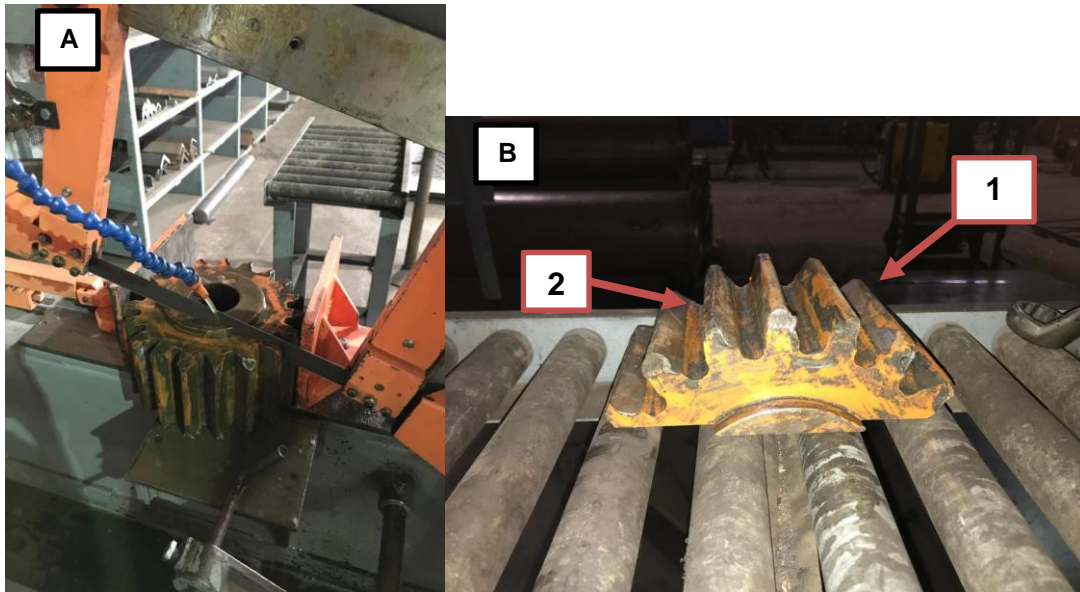
Figura 11- Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: Autoria própria.

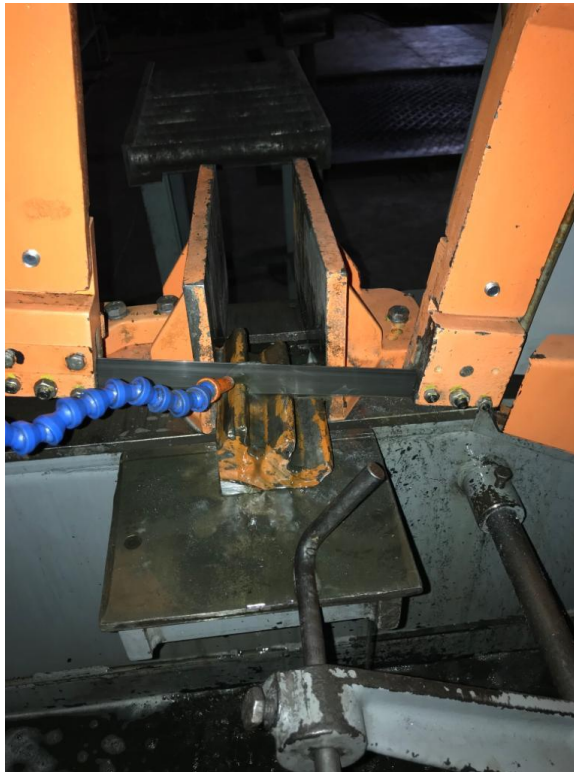
As amostras retiradas do pinhão para a metalografia foram as que apresentaram maior deformação, com corte vertical e horizontal da área selecionada conforme mostrado nas Figuras 12 (a) e 13, feito por uma Serra Franho FM 500, sem causar alterações nas seções deformadas a serem analisadas. As amostras foram nomeadas como amostra 1 e 2 (Figura 14) e os locais onde foram retiradas do pinhão estão apontados na Figura 12 (b).

Figura 12 - (A) Corte vertical pinhão e (B) Resultado corte vertical do pinhão. 1 – Amostra 1 foram retiradas duas regiões para análise no microscópio e dureza; 2 – Amostra 2 foram retiradas duas regiões para análise no microscópio e dureza.



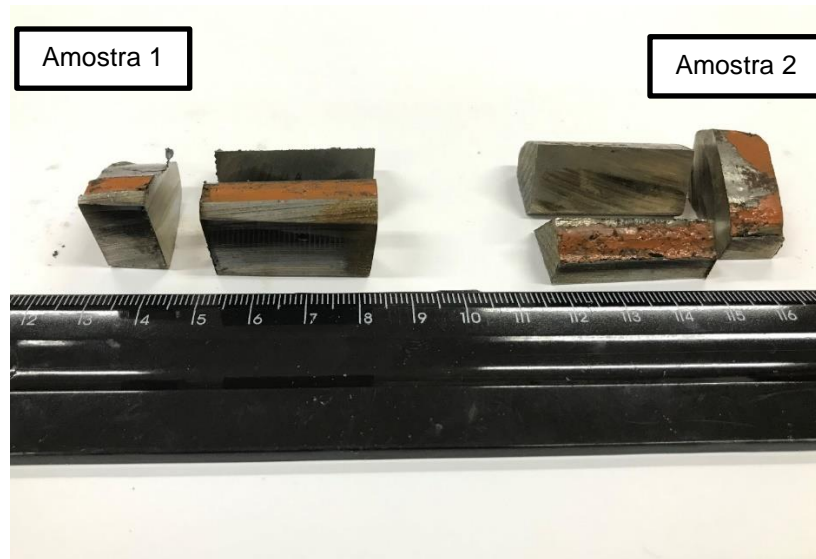
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Corte na horizontal do pinhão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Amostra 1- Corte vertical e horizontal; Amostra 2- Corte vertical e horizontal.



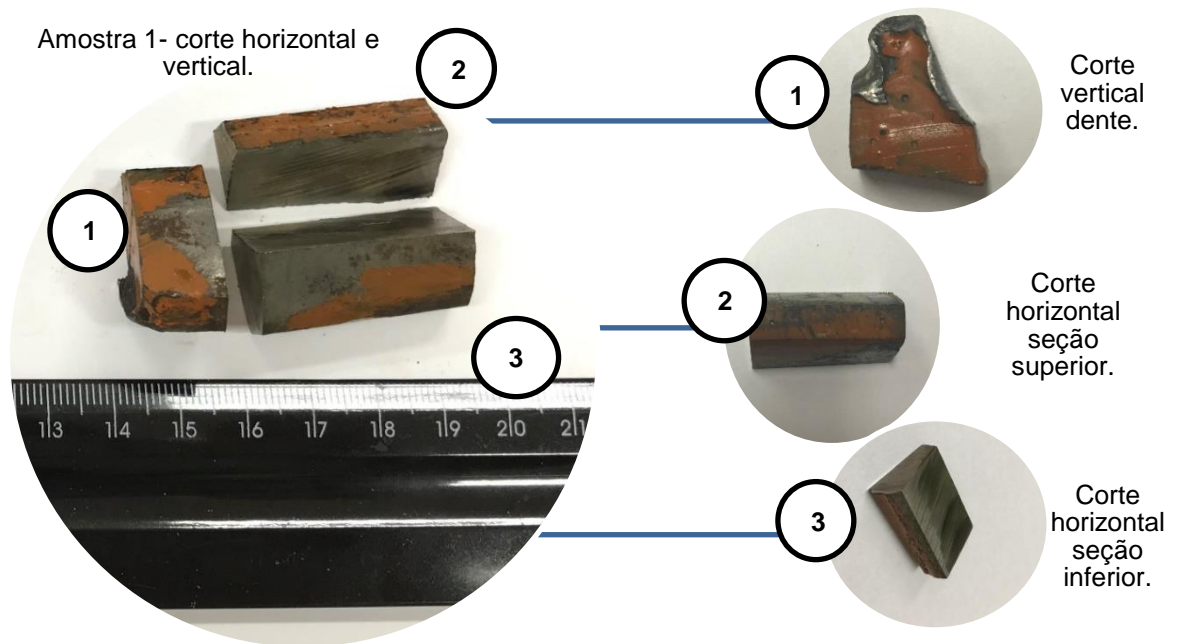
Fonte: Autoria própria.

O lixamento ocorreu de forma manual com lixas d'água com granulação na sequência: 80, 120, 240, 320, 400, 600, 1200 *mesh*.

O polimento foi efetuado na amostra 1 e amostra 2, no corte vertical e horizontal apresentado na Figura 15, em uma politriz com suspensão de alumina de 1 μm . Em seguida, as superfícies foram analisadas no microscópio ótico Zeiss AX10, do laboratório do DAEMA da UTFPR-LD- antes do ataque químico, com um aumento de 100x e 500x.

Para o ataque químico foi utilizada solução de Nital a 2%. A superfície atacada foi lavada com água e álcool e em seguida secada. Posteriormente, foi levado novamente ao microscópio ótico para analisar as imagens com aumento de 100x e 500x.

Figura 15 - Esquema de cortes da amostra 1, sendo igual para a amostra 2.

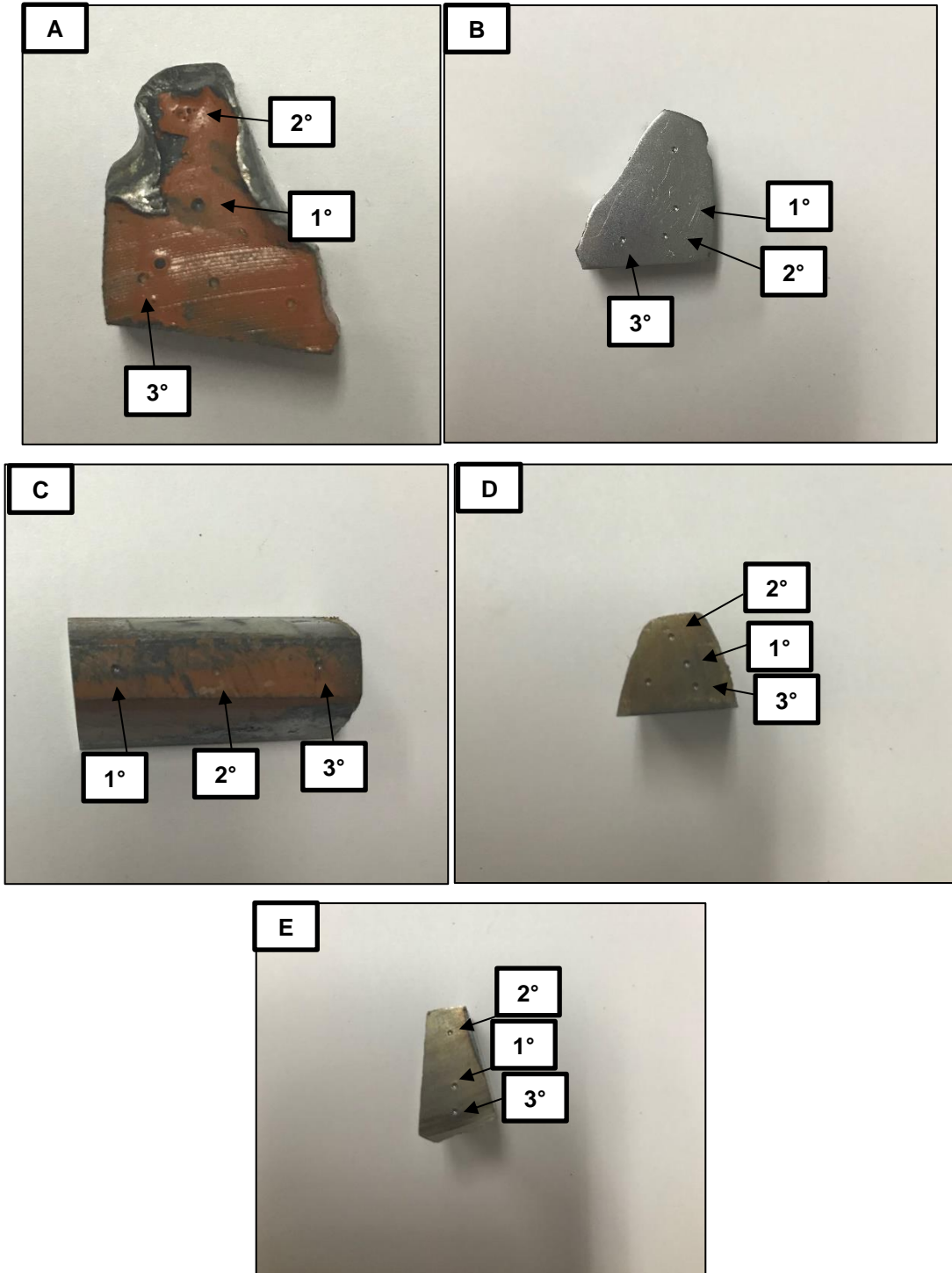


Fonte: Autoria própria.

Foi realizado o ensaio de dureza na escala Rockwell B, com uma pré-carga de 490 N e carga máxima de 980 N. Para cada amostra as medidas de dureza foram realizadas em triplicata nas faces onde ocorreu a deformação, na direção da superfície para o centro, como indicado nas Figuras 17 e 18 para a amostra 1 e 2, respectivamente. O equipamento utilizado foi um Durômetro Rocwell Insize ISHRSR150, do laboratório do DAEMA da UTFPR-LD.

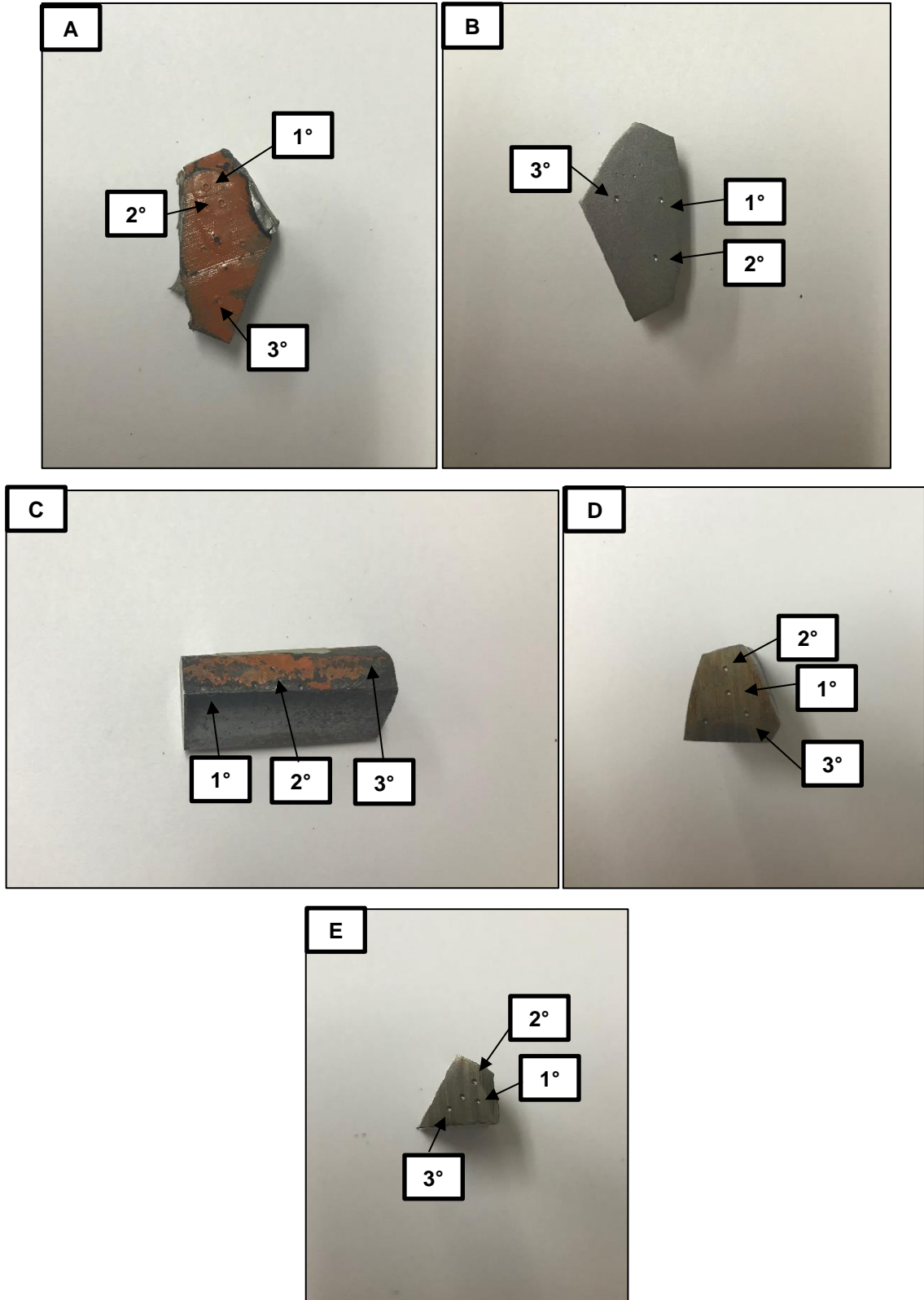
As medidas de dureza obtidas foram convertidas em Brinell, por meio da Equação 1, com os valores das constantes C_1 de 130 e C_2 500 (1/mm) e ΔP de 100 Kgf.

Figura 16 - Ensaio de dureza; amostra 1 indicando onde foram analisados os 3 pontos; (A) face da deformação, corte dente vertical; (B) face lixada e polida onde foi analisada pelo microscópio, corte dente vertical; (C) face da deformação, corte horizontal superior; (D) superfície para o centro, corte horizontal superior; (E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Ensaio de dureza; amostra 2 indicando onde foram analisados os 3 pontos; (A) face da deformação, corte dente vertical; (B) face lixada e polida onde foi analisada pelo microscópio, corte dente vertical; (C) face da deformação, corte horizontal superior; (D) superfície para o centro, corte horizontal superior; (E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.



Fonte: Autoria própria.

$$HR = C_1 - \left(C_2 \frac{\Delta P}{\pi \cdot D \cdot (HB)} \right) \quad (1)$$

Onde,

HR = dureza Rockwell B;

C₁ e C₂ = são constantes que dependem da escala Rockwell B;

ΔP = variação de carga aplicada;

D = Diâmetro da impressão na amostra;

HB = Dureza Brinell.

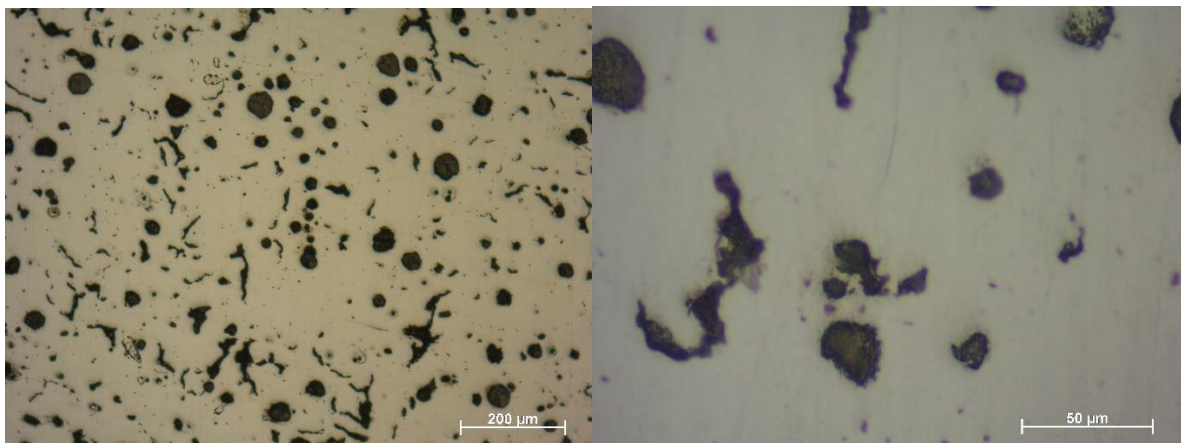
Para realização da análise química de peças fundidas, as amostras devem ser preparadas antes do resfriamento do metal, ou seja, durante o processo de fundição da peça. No caso do pinhão em questão, a análise química foi realizada por espectrometria de emissão óptica, utilizando as pastilhas coquilhadas cedidas pelo fabricante que estavam arquivadas, que são obtidas durante o vazamento do metal em moldes metálicos. A análise química foi realizada no laboratório da fundição, localizado em Toledo-PR. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Emissão Óptica Q4 Tasman.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise no Microscópio Ótico

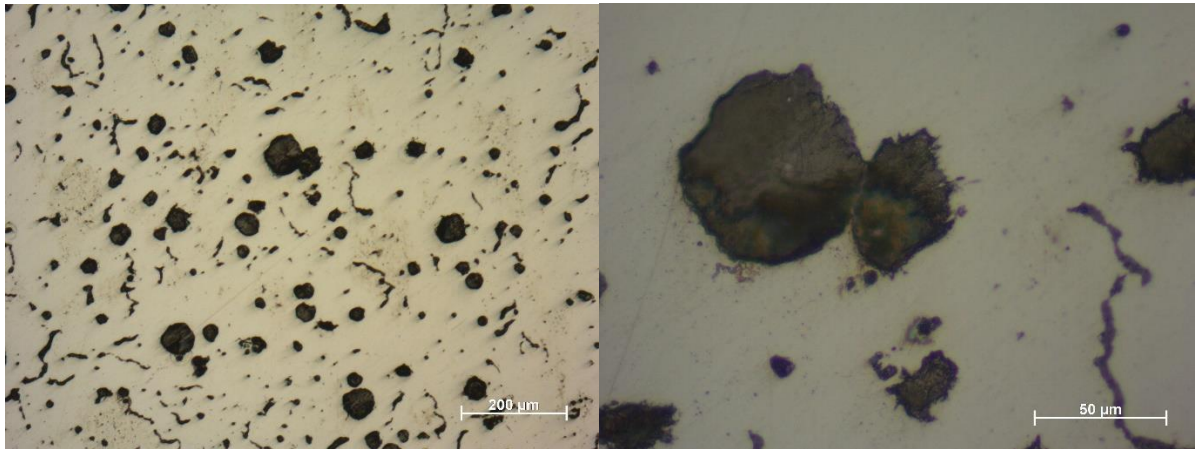
A microestrutura das amostras 1 e 2, antes do ataque químico podem ser observadas nas Figuras 18 a 21. É possível observar na microestrutura do ferro fundido a presença de grafita nodular (esferas) e vermicular (partículas mais alongadas e orientadas aleatoriamente), sendo que o esperado era apenas a grafita nodular. A forma esferoidal ou nodular da grafita é geralmente alcançada por meio da inoculação do material fundido com uma quantidade de magnésio adequada. Nas Figuras 18 e 20, referentes às superfícies obtidas por meio do corte vertical do dente, foi notada uma maior presença de estrutura vermicular, em relação as amostras 1 e 2 cujas superfícies foram obtidas pelo corte horizontal superior, Figuras 19 e 21. Isso se deve ao fato de um resfriamento mais rápido nessa região quando comparado as outras, ou perda do poder de nodularizante do magnésio em função do tempo.

Figura 18 - Microestrutura amostra 1 antes de ser atacada, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



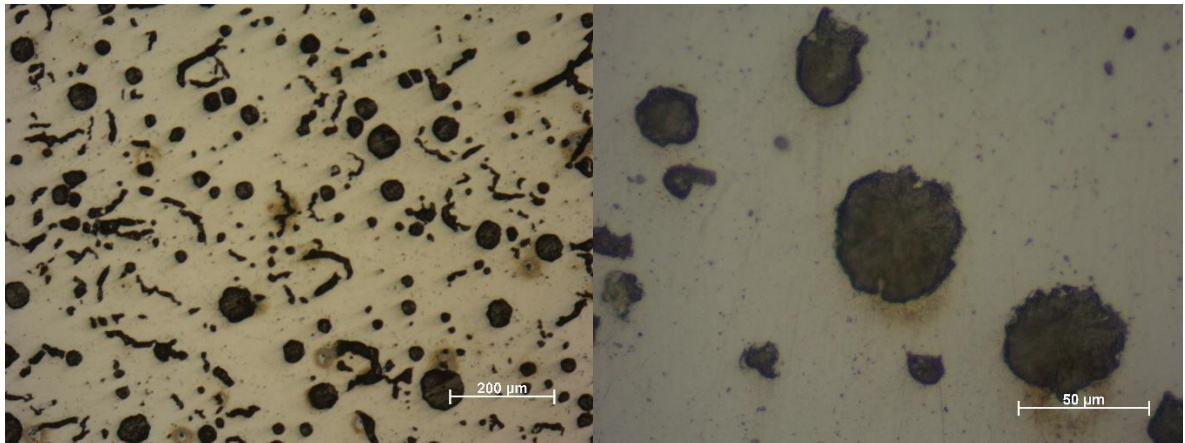
Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 - Microestrutura amostra 1 antes de ser atacada, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



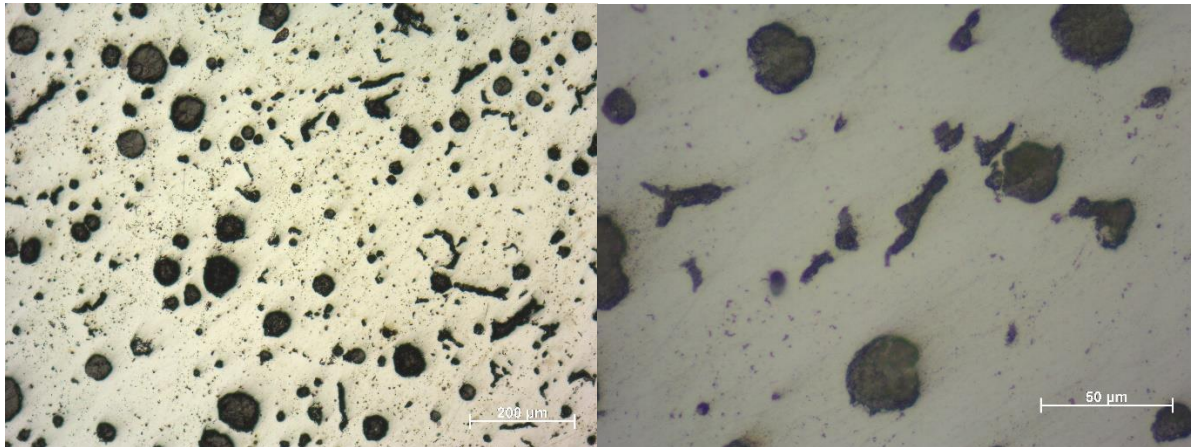
Fonte: Autoria Própria.

Figura 20 - Microestrutura amostra 2 antes de ser atacada, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 21 – Microestrutura amostra 2 antes de ser atacada, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



Fonte: Autoria Própria.

A grafita na forma nodular assegura boas propriedades, como ductibilidade e limite de escoamento superior do ferro fundido nodular. Esse tipo de grafita não interrompe a continuidade da matriz, diferente da grafita na forma vermicular que interrompe a continuidade da matriz, alterando os valores de suas propriedades. Dessa forma, conforme visto nas figuras acima foi encontrado a grafita na forma de vermicular, fato este que pode causar um desvio dos valores das propriedades mecânicas do pinhão em relação aos valores estabelecidos na norma ASTM com especificação GGG 40, visto que as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular são superiores ao do ferro fundido vermicular, como visto na Tabela 1.

Existem dois principais métodos para se obter grafita na forma vermicular, sendo o tratamento da liga com elementos nodularizantes como o magnésio já citado, e antinodularizantes como por exemplo o titânio. Nesse caso, combinação de alta porcentagem de magnésio não permite que a grafita cresça na forma lamelar, enquanto o titânio impede o crescimento da grafita em forma de nódulos. O outro método é o tratamento da liga com quantidades controladas de elementos nodularizantes, em teores entre 0,010 a 0,020%, quantidade insuficiente para se obter ferro fundido nodular e o necessário para o ferro fundido vermicular. O controle rígido da composição química é necessário para se obter apenas ferro fundido nodular. Caso ocorra variação na composição a microestrutura pode ser alterada, podendo ser um dos fatores que acarretou o aparecimento da microestrutura de grafita vermicular no pinhão (FRANCKLIN, 2009).

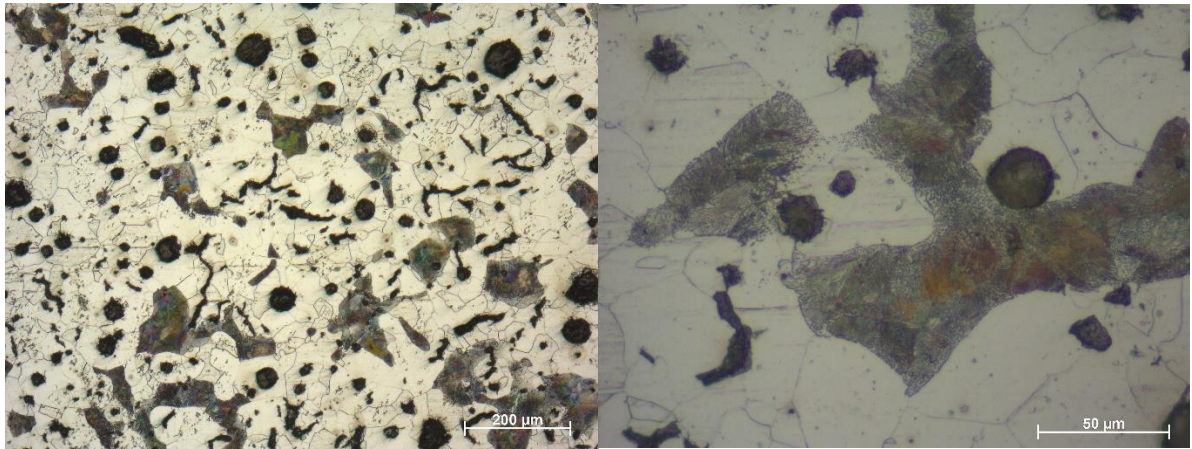
Outro fator que pode ter levado à presença da grafita vermicular na microestrutura do pinhão está ligado ao intervalo de reação do nodularizante quando durante o processo de fundição é despejado na panela do ferro fundido, que posteriormente é vazado no molde. Como essa reação tem um intervalo de tempo efetivo, caso haja uma extrapolação do tempo de vazamento, a microestrutura pode apresentar vermicularizações durante a solidificação das peças.

Além disso, após o vazamento a velocidade de resfriamento, a qual depende do material que é feito o molde e da espessura da peça vazada, também influencia na microestrutura final do ferro fundido. Existem dois tipos principais moldes, de areia e metálicos. No caso do pinhão analisado, o molde utilizado é de areia, o qual permite um resfriamento mais lento. No pinhão existem seções mais espessas, localizada mais ao centro da peça e seções finas, como os dentes, tendo uma maior velocidade de resfriamento comparado ao centro da mesma. Dessa forma, uma velocidade de resfriamento alta produz veios finos, enquanto que velocidades médias resultam em distribuição e tamanho intermediários e velocidade lenta promove em uma distribuição de veio mais grosseiros de grafita. A geração de grafita vermicular pode ter ocorrido devido a essa heterogeneidade de resfriamento na peça, devido as suas diferentes seções.

As Figuras 22 a 25 referem-se às micrografias das amostras após o ataque químico. Nelas é possível observar a matriz metálica composta por ferrita e perlita. A perlita é identificada como a região de cor cinza e próximo do laranja, apresentando morfologia tanto grosseira quanto fina. Já a ferrita é observada como a região clara nas micrografias. De uma forma geral, foi observado que os nódulos de grafita ficam situados no interior da ferrita. Dessa forma, a matriz metálica composta por ferrita e perlita se encontrou de acordo com a norma ASTM sendo a especificação GGG 40.

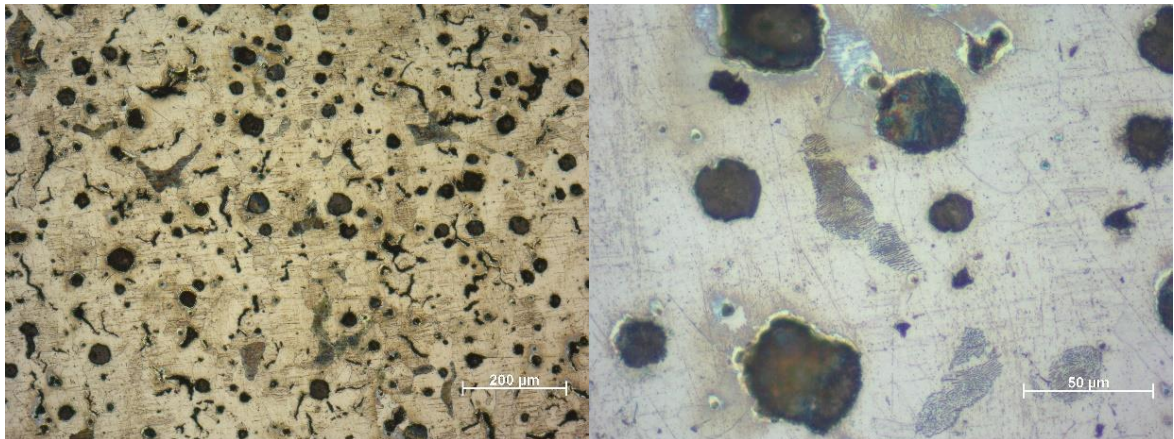
A perlita é constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita (Fe_3C). Essas lamelas de Fe_3C reforçam a matriz, tornando-a mais resistente e dura (REUTER et al. 2001).

Figura 22 - Microestrutura amostra 1 após ataque, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



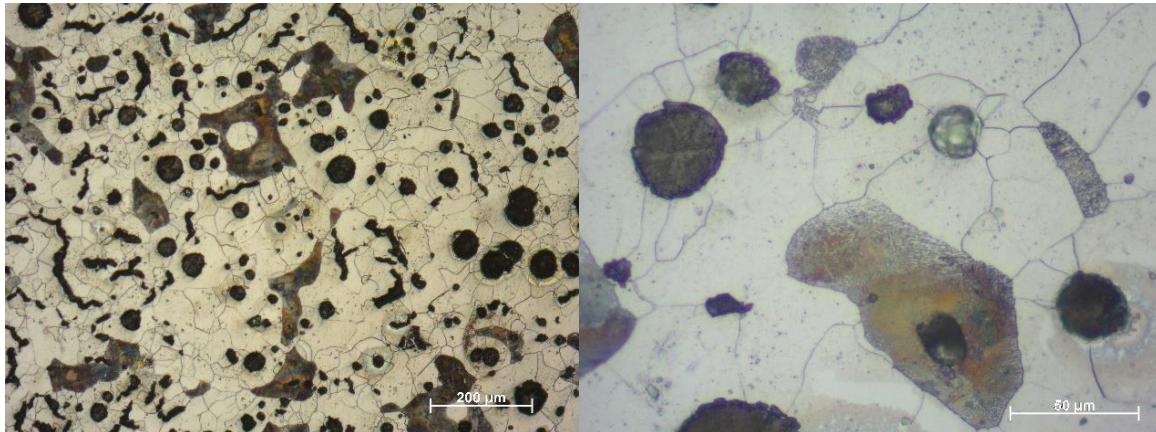
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 - Microestrutura amostra 1 após ataque, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



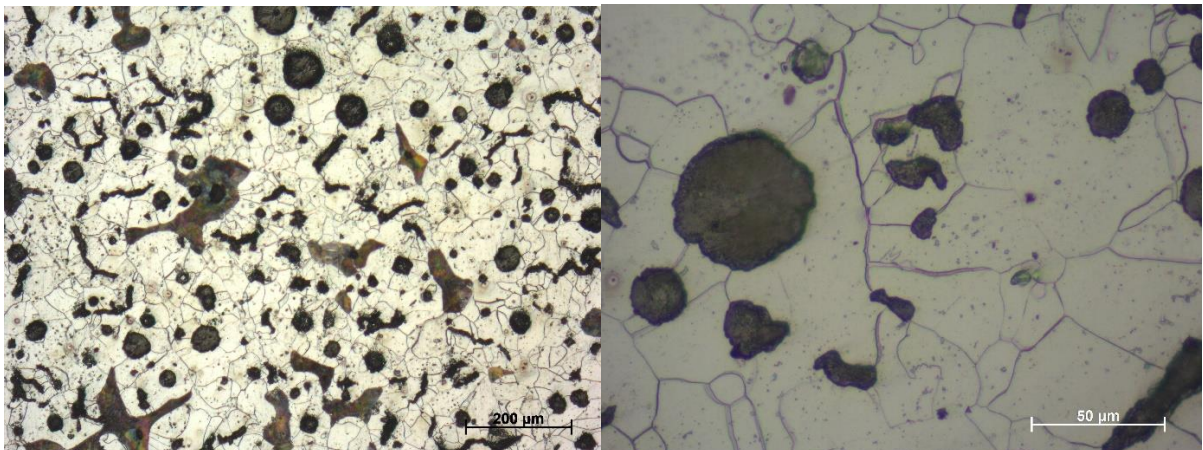
Fonte: Autoria Própria.

Figura 24 - Microestrutura amostra 2 após ataque, corte vertical dente; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 – Microestrutura amostra 2 após ataque, corte horizontal parte superior; esquerda – aumento de 100x; direita – aumento de 500x.



Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, com a revelação da presença de grafita vermicular na microestrutura, devido a uma nodularização e inoculação incompleta, influenciou nas propriedades mecânicas foram alteradas, diminuindo a ductilidade e aumentando a dureza e além disso, a presença de uma matriz predominantemente ferrítica, podendo estar com elementos perlizantes com baixos teores. Dessa forma, a deformação excessiva do pinhão pode estar relacionada com a presença das grafitas vermiculares, a qual alterou as propriedades do pinhão que eram esperadas pela norma.

6.2 Ensaio de Dureza

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell B e os valores convertidos em Brinell e o valor médio da dureza da amostra 1 estão mostrados na Tabelas 7 a 12. Verifica-se que os valores das durezas médias das amostras 1(A), 1(B) e 1(E) não se encontram correlação possuindo variações entre os valores obtidos em HRB, seu diâmetro e o valor calculado HB, já as amostras 1(C) e 1(D) possuem valores adequados. Isto se deve ao fato de a amostra não ter uma superfície plana, pois apresenta deformações excessivas nas superfícies do dente, não tendo um ponto de apoio plano para a realizar o ensaio de dureza. Durante o ensaio de dureza quando foi aplicada a pré-carga e a carga foi observado que amostra estava pendula, não tendo uma superfície de apoio por completa, interferindo diretamente no resultado da dureza. As amostras 1(C) e 1(D) apresentaram coerência com os dados obtidos, pois devido ao corte suas superfícies de apoio eram planas.

Era esperado de acordo com a norma ASTM com especificação GGG 40 encontrar uma dureza de 130 a 200 HB, e foi observado uma dureza na amostra 1 muito superior. Os valores de dureza obtidos para as amostras 1(C) apresentaram um desvio padrão muito alto. As medidas foram realizadas na região onde ocorreu a deformação excessiva, sendo a região mais superficial do dente cuja microestrutura foi observada apresenta um maior teor de carbono na forma de grafita vermicular, o que deixa o material com maior dureza. A propriedade esperada pela norma é que esse componente tivesse uma maior ductilidade, dando a ele capacidade de se deformar permanentemente sem ocorrer a deformação excessiva e o que foi observado é que o material adquiriu maior dureza e menor ductilidade. A amostra 1(D) possui o menor desvio padrão entre os valores de dureza obtidos, observando-se uma certa uniformidade no interior da peça.

Tabela 7 – Dureza média (HB) amostra 1.

Amostra	Dureza (HB)
1(A)	346,39 ± 30,12
1(B)	271,52 ± 23,69
1(C)	315,57 ± 65,31
1(D)	345,27 ± 11,91
1(E)	292,05 ± 3,28

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Dureza HB, amostra 1(A) face da deformação, dente corte vertical.

Amostra 1(A)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	82,8	1,0399	324,25
2°	80,6	0,82822	388,99
3°	63,6	0,73534	325,95

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 9 - Dureza HB, amostra 1(B) face lixada, dente corte vertical.

Amostra 1(B)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	56	0,90293	238,19
2°	66,8	0,88294	285,21
3°	70,2	0,91406	291,16

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 - Dureza HB, amostra 1(C) face da deformação, corte horizontal superior.

Amostra 1(C)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	64,2	1,01424	238,48
2°	76,6	0,96125	310,05
3°	80,3	0,8042	398,19

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 11 - Dureza HB, amostra 1(D) superfície para o centro, corte horizontal superior.

Amostra 1(D)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	76,3	0,87982	336,84
2°	79,1	0,86343	362,13
3°	76,8	0,88813	336,86

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 12 - Dureza HB, amostra 1(E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.

Amostra 1(E)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	70,4	0,90032	296,60
2°	69,2	0,90076	290,60
3°	71,1	0,9351	288,96

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados da amostra 2 estão mostrados nas Tabelas de 13 a 18. Foi possível notar que os valores obtidos possuem uma lógica entre os valores obtidos em HRB, relacionado com o diâmetro e o valor obtido em HB.

A amostra 2(B), comparando com as outras amostras, foi a que mais se aproximou dos valores da norma GGG-40 e menor desvio padrão, observando-se uma uniformidade no interior do dente.

A dureza média obtida da amostra 2(A) tem o maior desvio padrão, sendo a região do dente que apresentou maior deformação. O maior valor de dureza apresentado foi da amostra 2(D), podendo ser causado por uma não homogeneidade na sua microestrutura.

Tabela 13 – Dureza média (HB) amostra 2.

Amostra	Dureza (HB)
2(A)	260,57 ± 44,67
2(B)	223,97 ± 19,48
2(C)	329,56 ± 27,16
2(D)	342,70 ± 31,17
2(E)	292,87 ± 31,21

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 - Dureza HB, amostra 2(A) face da deformação, dente corte vertical.

Amostra 2(A)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	71	1,08556	248,49
2°	58,9	1,05136	212,91
3°	81,4	1,02233	320,32

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 15 - Dureza HB, amostra 2(B) face lixada, dente corte vertical.

Amostra 2(B)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	57,7	0,8753	251,49
2°	46	0,90755	208,77
3°	46,2	0,89732	211,65

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 16 - Dureza HB, amostra 2(C) face da deformação, corte horizontal superior.

Amostra 2(C)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	80,3	0,95886	333,97
2°	70,8	0,91347	294,30
3°	85	0,9813	360,41

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 17 - Dureza HB, amostra 2(D) superfície para o centro, corte horizontal superior.

Amostra 2(D)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	74,6	0,86932	330,46
2°	81,7	0,85476	385,50
3°	72	0,87908	312,15

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 18 - Dureza HB, amostra 2(E) superfície para o centro, corte horizontal inferior.

Amostra 2(E)	HRB	Diâmetro (mm)	HB
1°	57,8	0,86854	253,80
2°	69,6	0,89433	294,63
3°	74,4	0,86691	330,19

Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, como não ocorreu a formação de apenas grafita nodulares, tendo também na forma de veios, a alta dureza era esperada pela incompleta nodularização. Tal fato coincidiu com os desvios padrões elevados, nas regiões onde se observou a maior presença de grafita vermicular, isto é, na superfície das amostras. Como discutido nos tópicos acima, os dois principais fatores que podem estar relacionados a isso são a composição química indesejada ou velocidade e tempo de resfriamento dos processos inadequados. Conseqüentemente com a junção de todos esses fatores pode ter se dado a deformação excessiva do pinhão.

6.3 Análise Química

O resultado obtido na análise química das pastilhas coquilhadas está apresentado na Tabela 19. Comparando com a composição da Tabela 6, nota-se que a composição das pastilhas e então, do pinhão, está de acordo com a composição química seguida pela empresa de fundição. Dessa forma, a deformação excessiva do pinhão não está relacionada com composição química.

Tabela 19 – Composição química em % mássica das pastilhas coquilhadas obtidas durante a fundição do pinhão.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Mg	% Cr
3,70	0,30	2,55	0,03	0,02	0,06	0,02

Fonte: Autoria Própria.

Em relação a norma ASTM com especificação GGG 40, foi observado algumas dessemelhanças na composição do pinhão seguida pela fundição. Essas alterações são realizadas para melhor atender as necessidades de propriedades mecânicas, para a aplicação do pinhão no secador rotativo horizontal da empresa Calli do Brasil. Essas divergências são em questão do teor de elementos químicos.

O teor de Mn se encontra maior na composição química seguida pela empresa, em relação a norma. O manganês tem como principal finalidade favorecer a redução do enxofre, mas também dificulta a formação de ferrita, preservando a microestrutura perlítica, portanto, é utilizado quando se necessita de maior resistência mecânica ou elevação da dureza (FERNANDES, 2018)

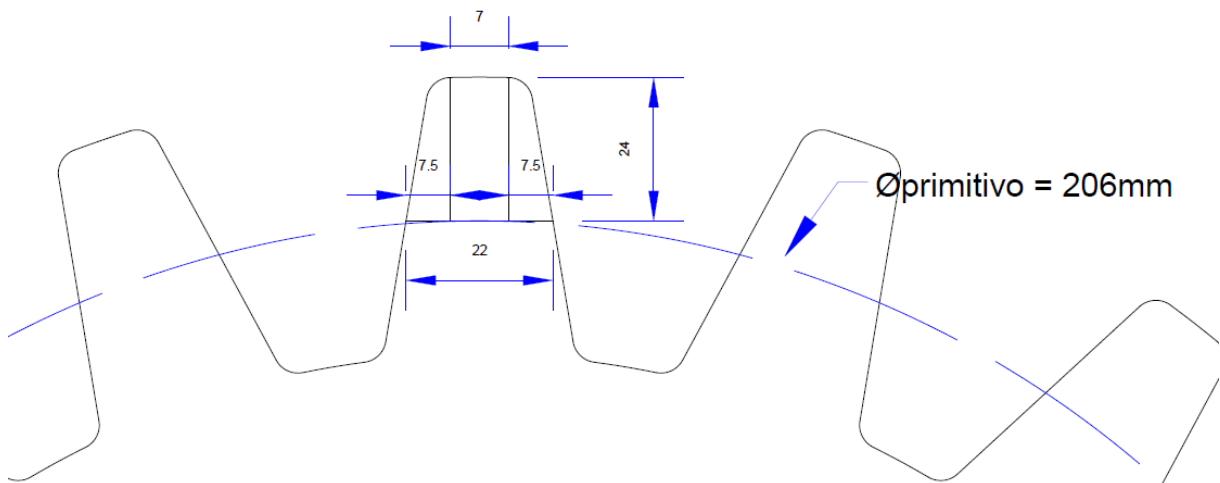
Em relação ao teor de P, foi visto que se encontra em menor quantidade na composição química da empresa do que estimado na norma. O fósforo é um elemento que pode causar fragilidades, por isso se utiliza uma porcentagem mais baixa possível, a não ser quando se necessita de um fundido com maior fluidez (FERNANDES, 2018).

O teor de Cr observado em menor valor na composição química da empresa quando comparado a norma. O cromo tem como função promover a formação de carbonetos. E o teor de Cu existe apenas na norma, mas se encontra na matriz perlítica, tendo propriedade de ampliar a faixa entre as temperaturas dos eutéticos e atuando como um perlitizante (FERNANDES, 2018).

6.4 Análise Geométrica

Na análise geométrica foi realizada por meio de cálculos para a obtenção de valores de flexão, compressão, cisalhamento e tensão ideal do dente do pinhão. Para os cálculos foi considerado uma eficiência de 100% em todo o sistema. Na Tabela 20 são apresentados os dados do motor elétrico utilizado para que ocorra a rotação do secador rotativo horizontal e na Figura 26 as dimensões utilizadas para os cálculos.

Figura 26 – Dente do pinhão com cotas em milímetros.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 20 – Dados do motor elétrico.

Potência (P)	7,5 cv
Rotação (R)	1750 rpm
Diâmetro da polia de saída do motor (ØDs)	97 mm

Fonte: Autoria Própria.

Primeiramente foi necessário determinar o valor do momento de torção pelo motor elétrico (MT_{me}) sendo determinado pela relação entre a potência (P) e a rotação (R), dada pela seguinte equação:

$$MT_{me} = \frac{(71620 \times P)}{R} \quad (2)$$

Em seguida, determinou-se a força periférica da polia (F_{me}), considerando $L_{me} = \varnothing D_s/2$, temos:

$$MT_{me} = F_{me} \times L_{me} \quad (3)$$

Na Tabela 21 apresenta-se os resultados obtidos.

Tabela 21 – Resultados encontrados.

Momento de Torção (MT_{me})	30,694 kgf.mm
Força Periférica da Polia (F_{me})	0,633 kgf

Fonte: Autoria Própria.

Seguidamente, foi necessário calcular o momento de torção (MT_{re}) produzido pela polia do redutor ($\varnothing P_{re}$) e o momento de torção produzida pelo redutor (MT_{sd}) pelas equações 4 e 5, respectivamente, com os dados apresentados na Tabela 22, considerando $L_{re} = \varnothing P_{re}/2$.

Tabela 22 – Dados do redutor.

Diâmetro da polia de entrada do redutor ($\varnothing P_{re}$)	440 mm
Relação de redução (i)	25,32

Fonte: Autoria Própria.

$$MT_{re} = F_{me} \times L_{re} \quad (4)$$

$$MT_{ent} \div MT_{sd} = \frac{1}{i} \quad (5)$$

Na Tabela 23 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 23 – Resultados encontrados.

Momento de Torção (MT_{re})	139,23 kgf.mm
Momento de Torção produzido pelo redutor (MT_{sd})	3.525,31 kgf.mm

Fonte: Autoria Própria.

Os dados da Tabela 24, são do pinhão, afim de se determinar a força periférica da engrenagem motora (F_{mot}), flexão, compressão, cisalhamento e tensão ideal, por meio das equações 6 a 12.

Tabela 24 – Dados do pinhão.

Diâmetro primitivo ($\varnothing P_{pr}$)	206 mm
Raio da engrenagem ($L_{mt} = \varnothing P_{pr}/2$)	103 mm
Largura da engrenagem (l)	116 mm
Base do dente (s)	22 mm
Ângulo de contato do dente (β)	17,35°
Ponto de incidência da força de contato no centro de simetria do dente(X)	10 mm

Fonte: Autoria Própria.

$$\tan \beta = \frac{7,5}{24} \quad (6)$$

$$F_{mot} = \frac{MT_{sd}}{L_{mt}} \quad (7)$$

$$F_{t'} = F_{mot} \times \cos \beta \quad (8)$$

$$F_{r'} = F_{mot} \times \sin \beta \quad (9)$$

$$\sigma_f = \frac{6 \times F_{t'} \times X}{l \times s^2} \quad (10)$$

$$\sigma_c = \frac{F_{r'}}{l \times s} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{F_{t'}}{l \times s} \quad (12)$$

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_f - \sigma_c)^2 + 6,25 \times \tau^2} \quad (13)$$

Na Tabela 25 se encontra os dados obtidos.

Tabela 25 – Resultados encontrados.

Força periférica do pinhão (F_{mot})	34,22 kgf	-
Força no eixo X (F_t)	32,67 kgf	-
Força no eixo Y (F_r)	10,21 kgf	-
Flexão (σ_f)	0,035 kgf/mm ²	0,343 N/mm ²
Compressão (σ_c)	0,004 kgf/mm ²	0,039 N/mm ²
Cisalhamento (τ)	0,013 kgf/mm ²	0,126 N/mm ²
Tensão Ideal (σ_i)	0,045 kgf/mm ²	0,441 N/mm ²

Fonte: Autoria Própria.

O motor que é responsável por fazer com que o movimento de rotação do secador rotativo horizontal se inicie, sendo o responsável por toda força e movimento das polias e engrenagens presentes. Dessa forma, a capacidade do motor é o limitador de forças que atuam em todo o sistema de transmissão.

Comparando a Tabela 5 com a 25, foi possível analisar que os dados obtidos pelos cálculos se encontram abaixo do presente na literatura. Dessa forma, compreende-se que os dentes do pinhão estão superdimensionados, pois foi visto na Tabela 25, a tensão de compressão, cisalhamento, flexão e tensão ideal estão abaixo das propriedades limites propostos para o material da teoria.

Visto isso, notou-se que o dimensionamento e geometria não é uma das causas da deformação excessiva do pinhão.

7 CONCLUSÃO

A partir da análise da microestrutura e o ensaio de dureza para avaliação da deformação excessiva do pinhão, é possível concluir:

1. Analisando as microestruturas obtidas, foi notado a presença grafita vermicular. Fato este que modifica as propriedades finais do pinhão;
2. Foi possível identificar uma elevada dureza na superfície do dente do pinhão e uma não homogeneidade nessa dureza no restante da peça. Essa maior dureza está relacionada com a presença de grafita vermicular, esta que também diminui significativamente a ductilidade do material. A deformação excessiva do pinhão se deu na ponta dos dentes onde estaria concentrado a elevação de dureza;
3. A matriz encontrada predominantemente ferrítica e perlítica encontrada está de acordo com a norma ASTM com especificação GGG 40;
4. De acordo com a análise química realizada, nota-se que a composição do material está relativamente de acordo com a norma seguida, mudando-se apenas alguns teores mássicos de alguns elementos, para que o componente possa atender as propriedades requeridas para o uso do pinhão nos equipamentos da empresa Calli do Brasil.
5. Através da análise dimensional do dente do pinhão, foi possível observar um superdimensionamento. Assim, podendo afirmar que esta não foi a causa da deformação excessiva, pois as tensões ali submetidas estão bem abaixo do que o material suporta de acordo com a literatura.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, como sugestões para dar continuidade ao estudo da deformação do pinhão, tem-se:

1. Realizar a análise dimensional por softwares;
2. Realizar tratamento térmico e analisar novamente a sua microestrutura e dureza;
3. Realizar análise dimensional considerando o secador rotativo horizontal com carga;
4. Realizar uma análise dimensional da transmissão entre o pinhão e a engrenagem, afim de se reduzir custo do maquinário.

REFERÊNCIAS

- AÇO FER BRASIL. **Normas técnicas de ferro fundido**. Disponível em: <http://www.acoferbrasil.com.br/site/sistema/catalogo_portugues/NORMAS%20FERRO.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2019.
- BREHM, A. F., **Produção de padrões para análise espectrométrica por emissão óptica de uma liga de aço AISI/SAE 120**. 199. 54f. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CHADE J. Brasil passa a ser 3º maior exportador agrícola, mas clima ameaça futuro. **O Estado de São Paulo**, São Paulo. 17 set. 2018. Economia e Negócios. Disponível em: < <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-passa-a-ser-3-maior-exportador-agricola-mas-clima-ameaca-futuro,70002506105>>. Acesso em: 15 mai. 2019.
- CHAVES, F. D., **Caracterização das propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG-40 para modelagem computacional em componentes automotivos**. 2016. 45f. TCC - Universidade de Brasília, Brasília.
- CHIAVERINI, V. (1990). **Aços e Ferros Fundidos** (6ª ed.). São Paulo: ABM.
- DANTAS, D., **Seleção de materiais para secadores horizontais rotativos**. 2017. 62 f. TCC – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina.
- DIAS, M., **A influência do teor relativo perlita/ferrita na usinabilidade do ferro fundido cinzento**. 2011. 149 f. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- DORÉ, C., **Influência da variação da modularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular**. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- FAISTAUER, G. A., WEBER, T. L., **caracterização de molde em processo cura a frio utilizando areia regenerada em processo térmico**. Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, 2016.
- FERNANDEDES, M., **Análise de estrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular com 0,058% Mg de um lote experimental produzido pela técnica de imersão por sino em função da temperatura e tempo no processo de fundição**. 2018. 116f. Dissertação – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro.
- FERREIRA, Raphael; DALMOLIN, Eduardo; LIMA., D. R. S. D. **Análise da Microestrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular FE-40015 em função do tempo de vazamento**. SECITEC: Semana da Ciência Tecnológica, Luzerna, n. 6, dez./2005.

FIESP. Safra Brasileira de Grãos 2018/2019 – 8º Levantamento da Conab. **Informativo**. Mai. 2019. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-de-graos-brasil/attachment/file20190510123239-safra-graos-brasil-2018-198-levantamento/>>. Acesso em: 14 mai. 2019.

FLORES, P., GOMES, J., **Cinemática e dinâmica de engrenagens**: 1. Aspectos Gerais sobre Engrenagens. Universidade do Minho: Guimarães, 2014.

FRANCKLIN, R. A. **Um breve estudo sobre ferro fundido nodular**. 2009. 30 f. Conclusão de Curso (Técnico em Produção Siderúrgica) – Curso de Graduação em Tecnologia em Produção, UEZO, Rio de Janeiro, 2019.

G1. **Pib do agronegócio do brasil deve crescer 3,4% em 2018, prevê Cepea**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2018/07/26/pib-do-agronegocio-do-brasil-deve-crescer-34-em-2018-preve-cepea.ghtml>>. Acesso em: 14 mai. 2019.

GMBH, I. F. G; DÜSSELDORF, De. A influência dos desvios da microestrutura sobre as propriedades do ferro fundido nodular. **Giesserei**, Alemanha, Volume, n. 4, p. 26-46, dez./2008.

GOODRICH, W. L., **Iron castings engineering handbook**, AFS; 2003.

GUESSER, Wilson Luiz; HILÁRIO., Diane Ghisi. **Ferros Fundidos Nodulares Perlíticos**. CONAF 99, São Paulo, dez./2005.

HUPALO, M. F. *et al.* Aspectos cinéticos e microestruturais da transformação bainítica incompleta em ferros fundidos austemperados: subtítulo do artigo. **REM**: R. Esc Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 2, p. 217-224, dez./2005.

KOERICH, A. L. et al. Efeito do antimônio a microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 31, n. 2, p. 147, dez. 2010.

LACERDA FILHO, Adilio F. de; SILVA, Juarez de S. e. **Secagem de café em combinação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 3, p.671-678, set. 2006. FapUNIFESP (SciELO).

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Café no brasil**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>>. Acesso em: 14 mai. 2019.

PROVENZA, Francesco. **Projetista de Máquinas**. 71. ed. São paulo: F. Provenza, 1996.

RESEARCHGATE. **Setor de uma roda cilíndrica exterior de dentes retos**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/setor-de-uma-roda-cilindrica-exterior-de-dentes-retos_fig14_292607871>. Acesso em: 27 mai. 2019.

REUTER, U., SCHULZ, H., DAWSON, S., HOLLINGER, I., ROBBINS, M., DAETH, J. **The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of automotive engineers, Inc, Alemanha, 2001, p 1-18.

ROHDE, Regis Almir. **Metalografia preparação de amostras: Uma abordagem pratica**. 3 ed. [S.L.]: LEMM, 2010. 30 p.

SANTOS, A. B. D. S. *et al.* **Ferro Fundido Vermicular- Obtenção, microestrutura e propriedades mecânicas**. Congresso Anual da ABM, Porto Alegre. n 34, dez./2005.

SILVA, J. D., LOPES, R. P., VITOR, D. G., & DONZELES, S. M. (Maio de 2014). **Secador Rotativo Intermitente: Projeto, Construção e Uso**. Brasília, DF, Brasil.

SILVA, J. S., LACERDA FILHO, A. F., BERBERT, P. A., **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Capítulo 07.

SPECTRU. Metalurgia. Disponível em: <
<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/Nova%20pasta2/nodular.pdf>> Acesso em: 21
nov. 2019.

VIDAL, F. D., **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino**. 2013. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2013.