

## ESTUDO DA VARIAÇÃO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAZAMENTO.

**Eduardo Dalmolin<sup>1</sup>, Raphael Ferreira<sup>2</sup>, Diego Rodolfo Simões de Lima<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>IFC-Luzerna/dalmolineduardo@gmail.com

<sup>2</sup> IFC-Luzerna

*Resumo: O ferro fundido nodular é uma das classificações de ferros fundidos e se caracteriza pela forma esferoidizada (nódulos) de suas grafitas. Este formato eleva a ductilidade do material, confere boa usinabilidade e razoável estabilidade dimensional, fazendo com que o ferro fundido nodular tenha grande aplicação industrial. Os ferros fundidos nodulares são obtidos através da ação de uma liga nodularizante, a base de ferro, silício e magnésio, que, por um relativamente curto período de tempo, mantém a grafita na forma de nódulos. Neste espaço de tempo, deseja-se que a peça seja vazada em moldes e solidificada, mantendo-se a forma nodular da grafita. Porém este tempo é incerto e pode sofrer variações, existindo o risco de se solidificar as peças já sem a nodularização da grafita, alterando as propriedades mecânicas do material. Este projeto de pesquisa aplicada pretende controlar a microestrutura de ferros fundidos nodulares em função do tempo, determinando um limite seguro de tempo de vazamento e solidificação de peças, garantindo a microestrutura final desejada. Para tanto, coletou-se amostras da corrida do ferro fundido nodular GGG60, em função do tempo de vazamento do metal líquido, cronometrando-se continuamente desde a adição da liga nodularizante, até o vazamento de todo o metal líquido contido na panela. Das amostras coletadas, após solidificação do ferro fundido nodularizado, foram usinados corpos-de-prova para ensaio de tração e realizados procedimentos metalográficos para avaliar o percentual de grafita nodular presente na microestrutura do material. Pôde-se constatar que, após um tempo de 10 minutos e 41 segundos de vazamento, todo o metal líquido foi vazado das panelas para os moldes. As amostras obtidas ao longo deste período apresentaram, no pior caso, na última amostra, apenas 88,41% de nódulos de grafita esferoidal, o que é considerado aceitável pela norma técnica. Coerentemente, as propriedades mecânicas aferidas pelos ensaios de tração e dureza foram todas acima dos limites mínimos definidos por norma. Desta forma, a pesquisa não foi suficiente para definir um tempo máximo aceitável para o vazamento de peças, mas foi eficiente ao garantir que é seguro vazar peças em até 10 minutos após a adição da liga nodularizante na panela de ferro fundido GGG60.*

*Palavras-Chave: Ferro fundido nodular, grafita nodular, microestrutura de ferros fundidos.*

### 1. INTRODUÇÃO

Visando buscar a qualidade de produtos fundidos as empresas do setor metal-mecânico permanentemente investem em pesquisas e parcerias para a otimização de seus processos industriais. O entorno do IFC – *campus* Luzerna possui 6 empresas de fundição, que garantem aproximadamente 600 empregos diretos em suas atividades, isso faz com que essas empresas sejam de extrema importância para a economia e o desenvolvimento da microrregião do Meio-Oeste Catarinense e Vale do Rio do Peixe. No entanto o controle de parâmetros de processo ainda é baixo, tornando, muitas vezes, a produção quase artesanal.

Neste contexto, este projeto visa realizar um estudo para desenvolver conhecimentos acadêmicos relativos ao processo de fundição do setor industrial local, neste momento representado pela empresa parceira Medal fundição, localizada nas proximidades do IFC *campus* Luzerna, referente ao controle de propriedade mecânicas e ao controle de microestruturas de ferros fundidos

nodulares GGG60. Acredita-se que o presente projeto representa a essência da pesquisa universitária, na criação de soluções para alavancar o desenvolvimento econômico dentro do Arranjo Produtivo Local, no âmbito dos municípios de Luzerna, Joaçaba e Herval d'Oeste.

A presença do carbono e do silício na composição química do ferro fundido são de extrema importância visto que estes elementos influenciam na formação da microestrutura e nas propriedades mecânicas do ferro fundido, pois, o carbono, sendo o mais importante nesse caso, é o grande responsável pelas propriedades mecânicas das peças, podendo variar seu teor de 3,2 a 3,8% na composição química, e pode ser observado na análise microestrutural. Antes de o ferro fundido nodular ser vazado na panela para o vazamento, uma pequena amostra de GGG60 é coletada e despejada em uma cápsula de análise que indica o teor de carbono presente no ferro fundido.

Já o Silício atua como um grafitizante durante a solidificação da peça, que como consequência, favorece a formação de grafita na solidificação e também a formação de ferrita, não sendo observável na microestrutura da peça pois fica em solução sólida na ferrita. O processo metalúrgico do controle do teor na composição química desses dois elementos é fundamental para a formação das características específicas do ferro fundido nodular.

Ferros fundidos nodulares apresentam em sua microestrutura, no estado bruto de solidificação, grafita predominantemente na forma nodular, ou esferoidal. Para que possa ser formada essa nodularidade na microestrutura do material, é necessário que haja uma reação do ferro fundido com uma liga nodularizante. A caracterização do formato dos nódulos é avaliada segundo a norma ABNT 6916.

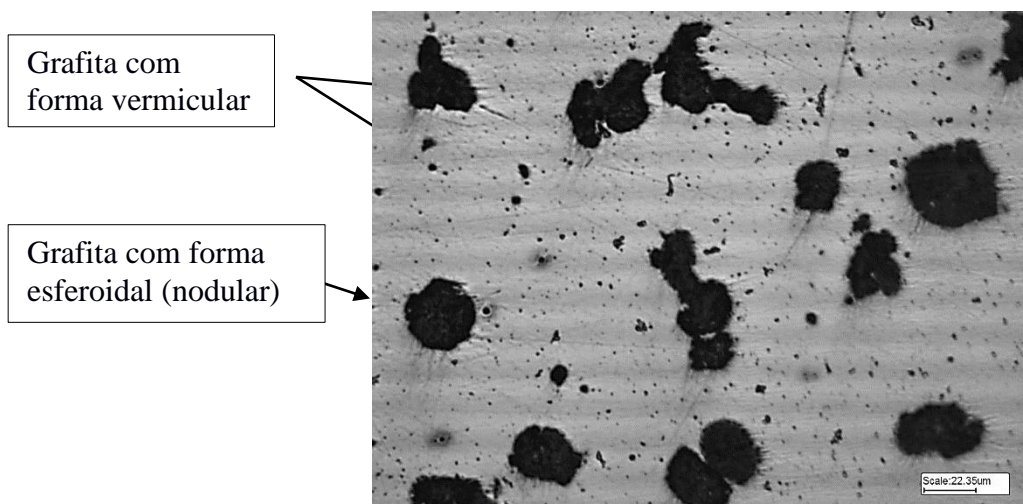


Figura 1- Microestrutura de um Ferro Fundido GGG60.

Fonte: Próprio Autor

Na figura 1, pode-se observar a diferença entre a grafita vermicular e a grafita esferoidal, no qual a morfologia da grafita nesse caso (esferoidal), proporciona uma maior ductibilidade. O percentual mínimo de nódulos esferoidais é de 85% segundo a norma CEMP, abaixo desse percentual o material pode sofrer alterações nas suas propriedades mecânicas.

O elemento de liga nodularizante contendo um teor de magnésio, tem como finalidade alterar a morfologia da grafita na solidificação, fazendo com que a grafita lamelar, característica de ferro fundido cinzento, se transforme em grafita esferoidal, formando-se uma microestrutura predominantemente com nódulos (esferas), característico de ferro fundido nodular como visto na figura 1. A liga nodularizante é adicionada na panela em um compartimento para que não entre em contato com o ferro fundido enquanto é despejado na panela, após ser despejada a quantidade desejada de ferro fundido na panela, a mesma é basculada para que a liga nodularizante entre em contato com o ferro fundido, no qual ocorre uma reação.

Após a reação, o ferro fundido se torna nodular e já pode ser vazado nos moldes da linha de produção da empresa, porém essa reação tem um intervalo de tempo que é efetiva, caso haja uma extrapolação do tempo de vazamento, a microestrutura pode apresentar vermicularizações durante a solidificação das peças, fato este que torna o controle do tempo de vazamento muito importante para que possam ser evitados problemas em relação a solidificação das peças com excesso de vermicularizações, e, seja determinado um intervalo de tempo ideal para que o vazamento do ferro fundido nodular nos moldes seja realizado.

As peças de ferro fundido nodular são comumente utilizadas em casos que demandam maior resistência mecânica, no qual as peças produzidas de GGG60 na linha de produção são, em grande parte, utilizadas em componentes de máquinas sujeitos a cargas de choque e fadiga.

## 2. METODOLOGIA/DESENVOLVIMENTO

A metodologia seguida foi definida através da estipulação de metas, pois houve uma melhor organização e também possibilitou visualizar seu processo de desenvolvimento para que os objetivos fossem alcançados dentro dos prazos estabelecidos.

O projeto se iniciou com um período de observação do processo produtivo de uma empresa localizada próximo ao campus do IFC em Luzerna, onde foram estudados os aspectos, métodos e particularidades da obtenção de peças da empresa. Junto com a empresa foram desenvolvidos os moldes de areia para obtenção de corpos-de-prova, para posterior avaliação mecânica e

microestrutural das amostras.

De posse dos moldes, estes foram introduzidos no processo produtivo da empresa, sendo que em cada molde de areia para obtenção de peças, um molde de corpo-de-prova foi colocado ao lado. O material que preencheu as peças também preencheu os moldes de corpo de prova em um instante de tempo similar, de modo a garantir que a morfologia da grafita que se solidificou na peça fosse similar à solidificada no corpo de prova.



Figura 2- À esquerda, moldes dos corpos de prova produzidos. À direita, blocos dos corpos de prova preenchidos com ferro fundido nodular.

Foram obtidos os blocos para testes durante a produção de uma peça de tamanho médio da empresa, o que representou 8 moldes preenchidos com ferro fundido nodular GGG60 por uma mesma panela de vazamento. Destes blocos, foram obtidos corpos de prova por usinagem, conforme dimensões expressas na Figura 3. O tempo de vazamento de cada molde foi cronometrado desde o início da ação da liga nodularizante na panela, até o fim do vazamento.

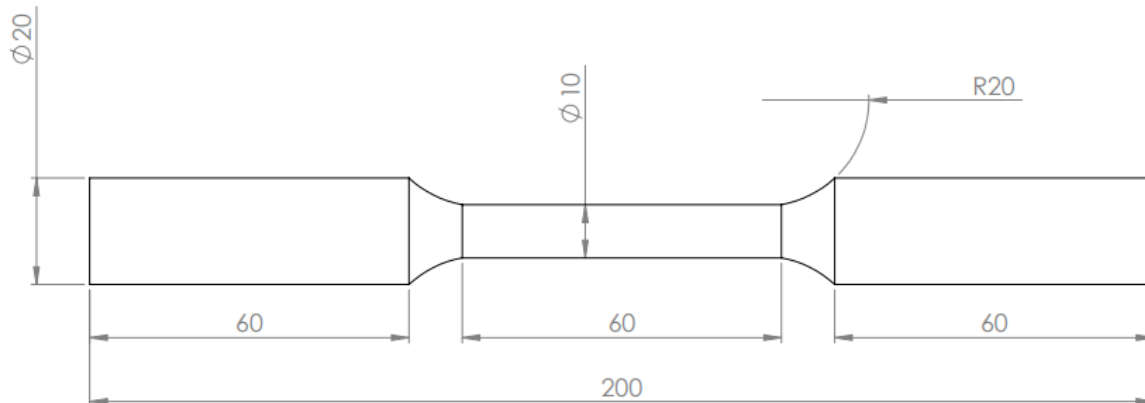


Figura 3- Corpo de prova para ensaios de tração (ABNT NBR 6916:2017)

Fonte: Próprio autor

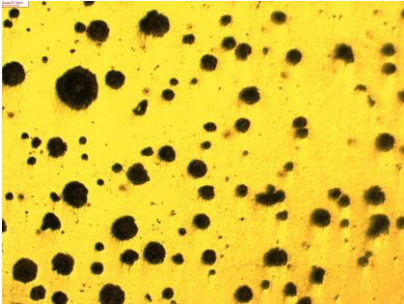
Os corpos de prova usinados foram encaminhados para caracterização mecânica por ensaio de tração, testados em máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL-10000. Além disso, ensaios de dureza também foram efetuados a cada molde obtido, realizados na escala Brinell, com esfera de 2,5 mm de diâmetro e carga de 187,5 kgf.

Cada corpo-de-prova ensaiado à tração e à dureza, também teve sua microestrutura avaliada, através de procedimento padrão de preparação metalográfica ASTM E3, com sequência decrescente de granulometria de lixas e polimento. A análise micrográfica foi realizada em microscópio ótico OPTIKA B1000. Todos os ensaios de caracterização mecânica e microestrutural foram realizados nos equipamentos do IFC Luzerna.

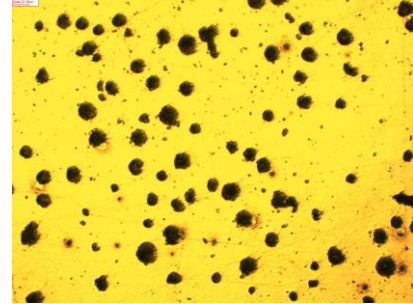
Após obtenção dos resultados, os valores obtidos das propriedades mecânicas foram confrontados com a morfologia das grafitas caracterizadas micrograficamente e foi verificado que suas propriedades se tratam de um ferro fundido nodular GGG60.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

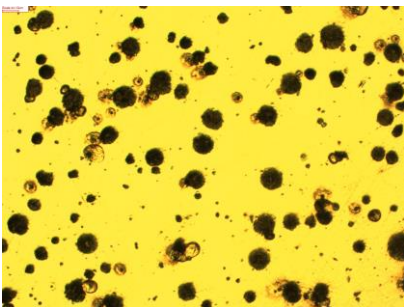
As imagens trazidas pelas Figuras 5 a 12 (Fonte: autores) apresentam as análises metalográficas dos corpos de prova após se solidificaram, de acordo com o tempo de vazamento.



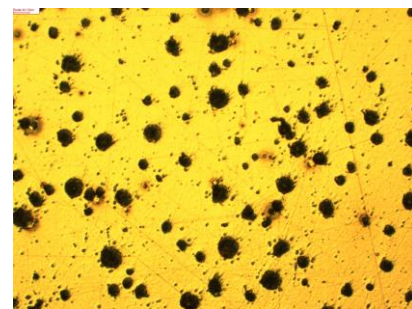
*Figura 5 - Amostra 1 (02:03)*



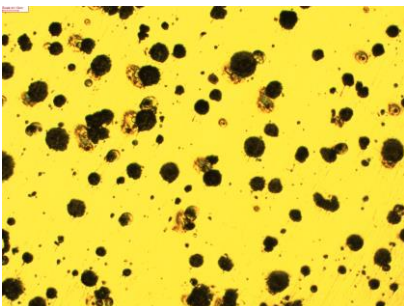
*Figura 9 - Amostra 5 (07:23)*



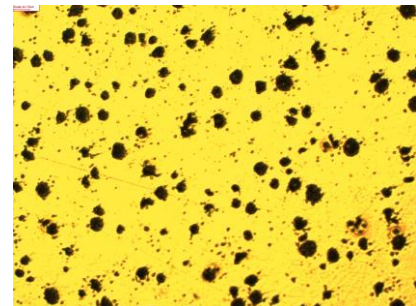
*Figura 6 - Amostra 2 (03:31)*



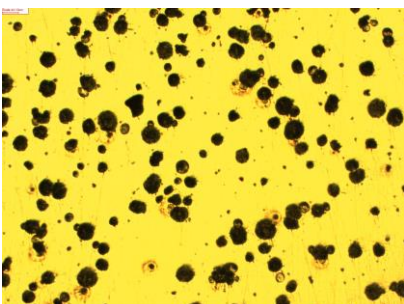
*Figura 10 - Amostra 6 (08:20)*



*Figura 7 - Amostra 3 (05:26)*



*Figura 11 - Amostra 7 (09:16)*



*Figura 8 - Amostra 4 (06:22)*



*Figura 12 - Amostra 8 (10:41)*

A estrutura obtida pelas análises das imagens amostrais mostrou a presença dos nódulos de grafita nodular, apresentando algumas precipitações de vermicularizações nas grafitas a partir da amostra 6. A porcentagem mínima de grafita nodular na microestrutura tolerada por norma é de 85%, um valor menor pode comprometer as propriedades mecânicas do material.

A tabela 1 revela o percentual de grafita nodular obtido de acordo com o tempo de vazamento.

*Tabela 1 – Percentual de nódulos esferoidais*

<b>Amostra</b>	<b>Tempo</b>	<b>Percentual</b>
<b>1</b>	2:03	96,43 %
<b>2</b>	3:31	94,57 %
<b>3</b>	5:26	93,34 %
<b>4</b>	6:22	94,62 %
<b>5</b>	7:23	91,67 %
<b>6</b>	8:20	91,03 %
<b>7</b>	9:16	88,29 %
<b>8</b>	10:41	88,10 %

Como verificado na Tabela 1, a presença de grafita nodular na microestrutura das amostras se manteve em constante diminuição, sendo que o percentual mínimo de nódulos esferoidais foi obtido na amostra 8 com 88,10 %.

Como resultado da análise dos dados obtidos, pôde-se concluir que em um intervalo de tempo inferior a 10 minutos e 41 segundos, contados a partir do momento da adição da liga nodularizante na panela, todas as grafitas se solidificaram na forma nodular dentro do percentual aceito, sendo esse um tempo seguro para o vazamento. Acima de um tempo de 10 minutos e 41 segundos não é possível garantir que a microestrutura apresentem vermicularizações dentro do limite máximo permitido.

Em termos de propriedades mecânicas, a tabela 2 apresenta os valores mínimos especificados pela norma ABNT NBR 6916/17 para o ferro fundido nodular em análise, enquanto que a tabela 3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de dureza e de tração uniaxial, a que foram submetidas as amostras de ferro fundido nodular coletadas ao longo dos vazamentos.

*Tabela 2 – Especificações ABNT NBR 6916/17 para FE-42012*

Dureza Brinell (HB)	Limite de escoamento mínimo (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência a Tração mínimo (N/mm <sup>2</sup> )
210/250	400	600

*Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova*

Dureza Brinell (HB)	Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência a Tração (N/mm <sup>2</sup> )
294,0	511,55	731,00
292,5	549,90	786,35
289,0	537,00	798,40
291,5	545,25	798,65
289,5	505,85	750,10
293,0	570,60	737,90
296,0	487,20	746,05
294,5	535,05	741,55

Os ensaios de tração e dureza, apresentaram os resultados esperados segundo a norma ABNT NBR 6916:2017 define para FE-42012, similar ao FE-40012 em estudo.

Verificou-se que o ferro fundido nodular possui uma boa resistência à tração, e também um maior limite de escoamento em relação a outros tipos de ferros fundidos.

A vermicularização formada nas microestruturas das amostras não causaram alterações significativas nas propriedades mecânicas dos material, o que era esperado, já que o estudo foi realizado com amostras dentro da faixa ideal de 100% a 85% da microestrutura com grafita em forma nodular.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se neste estudo que a microestrutura das peças após a solidificação manteve um constante aumento de nódulos vermiculares, mas que em nenhum momento ultrapassou-se o limite inferior a 85% de nódulos em formato esferoidal, porcentagem essa que é a mínima permitida para ferros fundidos nodulares.

A extrapolação do tempo de 10 minutos e 41 segundos de vazamento de ferro fundido nodular GGG60 em moldes não é recomendada, pois a partir desse momento não se conhece o percentual de de formato esferoidal, existindo a possibilidade de que se obtenha um percentual inferior a 85% de nódulos esferoidais, o que poderia acarretar problemas indesejados nas propriedades mecânicas do material.

O controle do tempo de vazamento do ferro fundido nodular GGG60 mostrou-se essencial para as linhas de produção das empresas de ferro fundido, pois pode garantir que empresas trabalhem com um melhor controle do tempo de vazamento evitando assim problemas que comprometam a qualidade das peças devido a alterações indesejadas nas suas propriedades mecânicas e também desperdício de tempo e material sendo que após exceder o limite de tempo de vazamento não é mais possível utilizar aquele material para o fim desejado.

## AGRADECIMENTOS

Ao autores agradecem a empresa Medal Fundição Ltda por todo o apoio e materiais cedidos à pesquisa e ao Instituto Federal Catarinense – Campus Luzerna, pelo financiamento de bolsas aos autores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIÊNCIA DOS MATERIAIS. **Microestrutura com nódulos de grafita de um ferro fundido nodular.** Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=13&top=241>>. Acesso em: 26 jul. 2017.

GARCIA, Amauri. **Solidificação: Fundamentos e aplicações.** 2 ed. São Paulo: Unicamp, 2016. 400 p.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** 1 ed. São Paulo: Blucher, 2009. 344 p.