ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR FE-40015 EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAZAMENTO

Raphael Ferreira[1], Eduardo Dalmolin[2], Diego Rodolfo Simões de Lima[2]
[1]IFC-Luzerma/raphaelfol@gmail.com
[2] IFC-Luzerna

Resumo: *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 esferoidizada. Neste espaço temporal, deseja-se que a peça seja vazada em moldes e solidificada, mantendo-se a forma nodular da grafita. No entanto, este espaço de tempo é incerto e podem haver variações, de modo que existe o risco de se solidificar as peças já sem a nodularização da grafita, prejudicando as propriedades mecânicas do material. Este projeto de extensão aplicou um controle de microestrutura de ferros fundidos nodulares em função do tempo de vazamento, determinando-se em cada caso as propriedades mecânicas do material. Ao fim, estabeleceu-se um tempo seguro para vazamento de 8 minutos e 12 segundos, para uma microestrutura 85% nodular, o que é o limite aceitável normatizado. O projeto foi aplicado em uma fundição de ferros fundidos da cidade de Luzerna-SC, parceira no desenvolvimento desta ação extensionista.*

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

1. INTRODUÇÃO

A busca pela qualidade de produtos fundidos consiste em uma realidade permanente nas indústrias deste importante setor metal-mecânico. O entorno do IFC – *campus* Luzerna possui 6 empresas de fundição, que garantem aproximadamente 600 empregos diretos em suas atividades, representando um setor importantíssimo para a economia e o desenvolvimento da microrregião do Meio-Oeste Catarinense e Vale do Rio do Peixe. No entanto, como é característico deste processo de fabricação no Brasil, o controle de parâmetros de processo ainda é baixo, tornando, muitas vezes, a produção quase artesanal.

Neste contexto, este projeto visa a extensão dos conhecimentos acadêmicos relativos ao processo de fundição ao setor industrial local, neste momento representado pela empresa parceira localizada nas proximidades do IFC câmpus Luzerna, referente ao controle de propriedade mecânicas e ao controle de microestruturas de ferros fundidos nodulares FE-40015. Acredita-se que o presente projeto representa a essência da extensão 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 FE-40015 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.

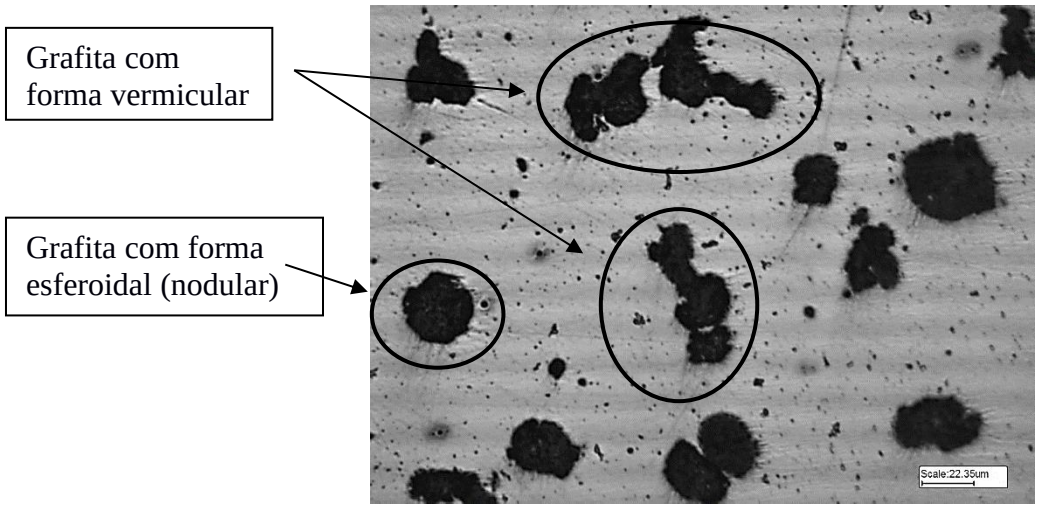

Figura 1- Microestrutura de um Ferro Fundido FE-40015. Ataque Nital 2%

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 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 FE-40015 na linha de produção são, em grande parte, utilizadas em componentes de máquinas sujeitos a cargas de choque e fadiga.

2. METODOLOGIA

A metodologia seguida durante o desenvolvimento do projeto foi utilizada em forma de metas, pois houve uma melhor organização e também possibilitou uma boa visão do fluxo do projeto para que todos os objetivos fossem alcançados dentro do prazo estipulado.

O projeto se iniciou com um período de observação do processo produtivo de uma empresa localizada em Luzerna, onde foram compreendidos os aspectos e particularidades da obtenção de peças da empresa. Em conjunto com a empresa foram projetados os moldes de areia para obtenção de corpos-de-prova, para posterior caracterização mecânica e microestrutural das amostras. Estes moldes podem ser visualizados na Figura 2.

De posse dos moldes para obtenção dos corpos-de-prova, 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 FE-40015 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.

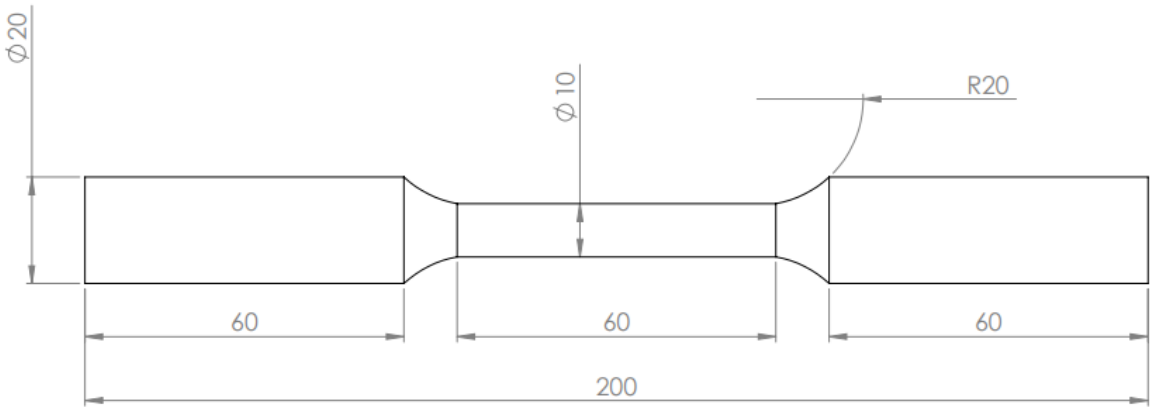

Figura 3- Corpo de prova para ensaios de tração (ABNT NBR 6916:2017)

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, com posterior ataque químico. E uma análise química foi realizada também, utilizando espectrômetro da empresa parceira, cujo resultado é apresentado na Figura 4. 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 FE-40015.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	3.461	2.335	0.293	0.045	0.0100	0.018	0.0088	0.014	0.084	0.039
2.	3.479	2.351	0.297	0.047	0.011	0.018	0.0091	0.015	0.089	0.042
3.	3.460	2.423	0.301	0.047	0.010	0.019	0.0095	0.016	0.091	0.044
4.	3.238	2.160	0.241	0.158	0.0047	0.969	0.0034	1.056	0.098	0.058
↑	3.8	2.8	0.5	0.10	0.020	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ø	**3.467**	**2.370**	**0.297**	**0.046**	**0.010**	**0.018**	**0.0091**	**0.015**	**0.088**	**0.042**
↓	3.4	2								
σ	0.011	0.047	0.0040	0.0012	0.00071	0.00071	0.00035	0.0010	0.0036	0.0025
υ	0.317	1.983	1.347	2.609	7.100	3.944	3.846	6.667	4.091	5.952

	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0042	0.00081	0.0075	0.0078	0.0034	0.055	0.0024	0.012	0.0060	0.0027
2.	0.0040	0.00093	0.0095	0.010	0.0040	0.064	0.0025	0.021	<0.0050	0.0027
3.	0.0045	0.0010	0.012	0.013	0.0039	0.055	0.0029	0.025	0.0085	0.0032
4.	0.0024	0.050	0.015	0.050	0.010	0.033	0.0041	0.021	<0.0050	0.188
↑	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.06	0.1	0.05	0.1	0.1
Ø	**0.0042**	**0.00091**	**0.0097**	**0.010**	**0.0038**	**0.058**	**0.0026**	**0.019**	**0.0065**	**0.0029**
↓						0.03				
σ	0.00025	0.00010	0.0023	0.0026	0.00032	0.0052	0.00026	0.0067	0.0018	0.00029
υ	5.952	10.99	23.71	26.00	8.421	8.966	10.00	35.26	27.69	10.00

	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Ceq
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0079	0.0063	0.0038	0.021	0.0030	0.0037	<0.0030	93.54	4.255
2.	0.0086	0.0065	0.0041	0.0094	0.0031	0.0043	<0.0030	93.48	4.279
3.	0.0089	0.0067	0.0042	0.014	0.0030	0.0045	<0.0030	93.41	4.284
4.	0.013	0.063	0.189	0.0088	0.0038	0.0044	<0.0030	91.35	4.010
↑	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		4.45
Ø	**0.0085**	**0.0065**	**0.0040**	**0.015**	**0.0030**	**0.0042**	**<0.0030**	**93.48**	**4.273**
↓									4.3
σ	0.00051	0.00020	0.00021	0.0058	0.00007	0.00042		0.065	0.016
υ	6.000	3.077	5.250	38.67	2.333	10.00		0.070	0.374

Figura 4- Composição química do FE-40015

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.

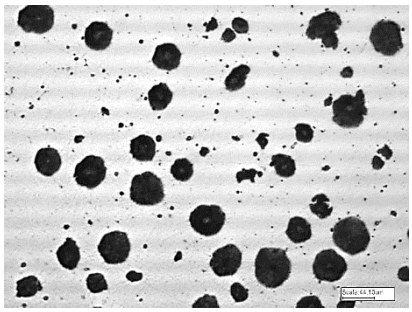

Figura 5- Amostra 1.

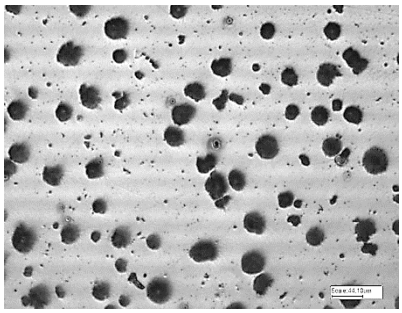

Figura 6- Amostra 2.

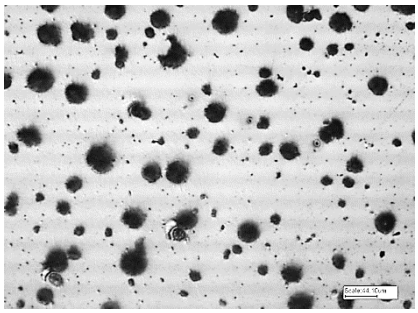

Figura 7- Amostra 3.

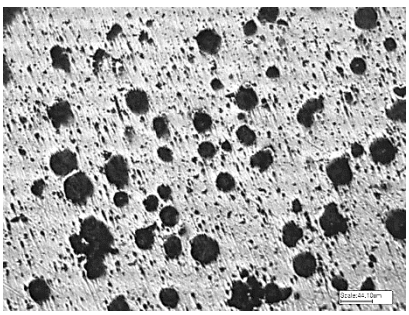

Figura 8- Amostra 4.

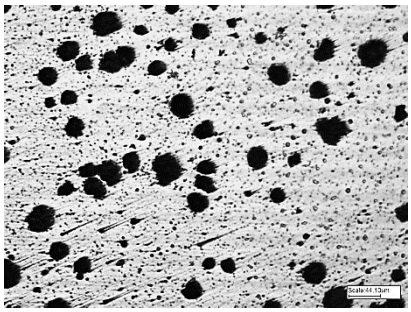

Figura 9- Amostra 5.

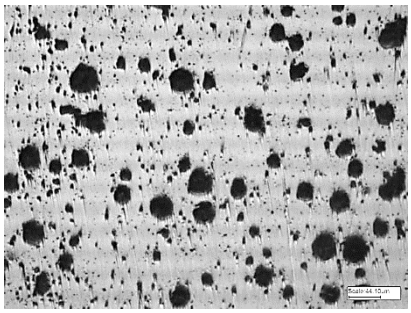

Figura 10- Amostra 6.

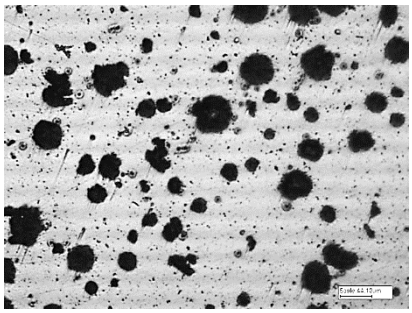

Figura 11- Amostra 7.

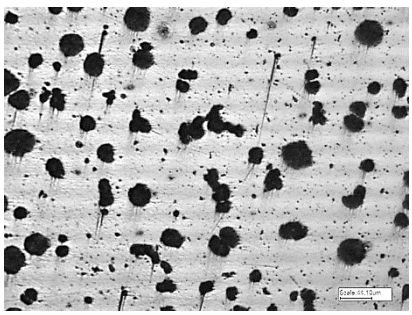

Figura 12- Amostra 8.

A estrutura obtida pelas análises das amostras indicou a presença predominante 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 – Dados das amostras

Amostra	Tempo de vazamento	% de grafita nodular
1	2m18s	100
2	3m	100
3	4m03s	100
4	4m47s	100
5	5m29s	100
6	6m14s	95
7	7m03s	90
8	8m12s	85

Como verificado na Tabela 1, a presença de 100% de grafita nodular na microestrutura das amostras se manteve constante até a amostra 6 e, a partir desta amostra, começou a se notar um decaimento do percentual de grafita esferoidal, sendo que a 8ª e última amostra, apresentou 85% de grafita esferoidal.

Como resultado da análise dos dados obtidos, pôde-se concluir que em um intervalo de tempo inferior a 5 minutos e 29 segundos, contados a partir do momento da adição da liga nodularizante na panela, todas as grafitas se solidificaram na forma nodular. Deste momento em diante, as amostras começaram a apresentar formações de vermicularizações nas grafitas do material, em percentual crescente. No entanto, até o último vazamento, com um tempo de 8 minutos e 12 segundos, pode se perceber que as amostras apresentaram vermicularizações na microestrutura dentro do limite máximo permitido.

Em termos de propriedades mecânicas, a tabela 2 apresenta os valores 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/mm²)	Resistência a Tração mínimo (N/mm²)
140/180	280	400

Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova

Dureza Brinell (HB)	Limite de escoamento (N/mm²)	Resistência a Tração (N/mm²)
151,4	302	421
154	310	427
146,4	280	420
150,6	295	378,5
155,6	285	414
152	290	407,6
155,6	300	427
151, 4	295	434,9

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 na microestrutura das amostras de 6 a 8 não causaram alteração significativa em relação aos resultados esperados nos ensaios, 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 começou a apresentar vermicularizações a partir de 5 minutos e 29 segundos de vazamento nos moldes, tempo contado a partir da adição da liga nodularizante na panela, e que a peça vazada no tempo de 8 minutos e 12 segundos apresentou 85% de grafita com forma esferoidal em sua microestrutura, porcentagem essa que é a mínima permitida para ferros fundidos nodulares.

A extrapolação do tempo de 8 minutos e 12 segundos de vazamento de ferro fundido nodular FE-40015 em moldes não é recomendada, pois a partir desse momento pode-se verificar que a microestrutura tende a apresentar, após a solidificação das peças, um percentual menor que 85% de grafita com forma esferoidal, o que poderia acarretar problemas indesejados por propriedades mecânicas insuficientes.

O controle do tempo de vazamento de ferro fundido nodular FE-40015 de peças na linha de produção se mostrou essencial, pois pode garantir que as empresas possam trabalhar dentro do tempo recomendado de vazamento durante a ação da liga nodularizante na panela, e evitar que as peças que saem no mercado, retornem ao fornecedor por motivo de falha mecânica e também garantir uma maior economia com material desperdiçado a partir do momento em que o vazamento do ferro fundido não é mais viável por conta do tempo de vazamento excedido.

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.