

## EFEITOS DE DIFERENTES INOCULANTES NAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DO FERRO FUNDIDO CINZENTO GG-25, NA DUREZA E VIDA UTIL DA FERRAMENTA DE USINAGEM\*

Diego Ruben Martin<sup>1</sup>  
Joao Roberto Sartori Moreno<sup>2</sup>

### Resumo

Este trabalho objetivou comparar, por meio de experimentos desenvolvidos em uma fundição, através da adição de três inoculantes diferentes (IM-22 com FeSi-Ba/Zr, G 20 com FeSi-Ba) e IMSR 75 com FeSi-Sr), para observar as características da vida útil de ferramentas na usinabilidade das peças, microestrutura e propriedade mecânica. A metodologia da pesquisa se baseou em analisar principalmente pelo processo de fresamento o ferro fundido cinzento GG-25 inoculado diferentemente, denominado de acordo com a Norma DIN EN 1561. As formas de avaliação dos resultados terão como base uma análise quanto ao desgaste da ferramenta, acabamento superficial, análise microestrutural, composição química e propriedades mecânicas do material da peça. Os resultados mostraram que dentre os inoculantes aplicados o com Sulfeto de Estrôncio (SrS) apresentou-se mais estável termodinamicamente que as amostras inoculadas com os outros dois inoculantes, pois ele levou a uma variação da energia livre de Gibbs mais negativa e portanto mais favorável a formação de núcleos com raio crítico ( $r_c$ ) maiores, o que permitirá uma solidificação com nucleação heterogênea. Todavia o respectivo inoculante também foi mais eficiente na formação de uma microestrutura mais estável, com maiores quantidades de células eutéticas e vida útil do inserto mais longa quando usinado.

**Palavras-chave:** Usinabilidade; Ferro fundido cinzento; Desgaste de ferramenta; Células eutéticas.

### EFFECTS OF DIFFERENT INOCULANTS IN THE MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF GRAY CAST IRON GG-25, HARDNESS AND USEFUL LIFE OF THE MACHINE TOOL

#### Abstract

This study aimed to compare, by means of experiments carried out in a melt, by addition of three different inoculants (IM-22 with Ba-Fe-Si/Zr, G-20 and Ba-FeSi) and IMSR 75 with FeSi-Sr), to observe the characteristics of the useful life of tools in the machinability of the pieces, microstructure and mechanical property. The search methodology is mainly based on analyzing the milling process gray cast iron GG-25 inoculated differently called according to DIN EN 1561. The forms of assessment of the results will be based on an analysis regarding the tool wear, microstructural analysis, chemical composition and mechanical property of the material. The results showed that among the inoculant applied to strontium was found to be more thermodynamically stable than the samples inoculated with the other two inoculants as it led to a more negative variation in Gibbs free energy and hence a more favorable training centers with critical radius ( $r_c$ ) higher, allowing a solidification with heterogeneous nucleation. However its inoculant was also more efficient in forming a more stable microstructure with larger amounts of eutectic cells and longer life of the insert when machined.

**Keywords:** Machinability; Gray cast iron GG-25; Tool wear; Eutectic cells

<sup>1</sup> Eng. Mecânica, Mestrando, Aluno de Pós Graduação, PPGEM- Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica, UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Materiais, PhD, Professor Titular PPGEM, UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil.

## 1. INTRODUÇÃO

Entre os principais materiais utilizados na indústria da fundição estão o ferro fundido, o alumínio e o aço. O ferro fundido continua sendo o mais importante material de fundição com mais de 70% da tonelagem mundial total produzida. Conforme a forma de apresentação da grafita, o ferro fundido pode ser dividido principalmente em lamelar (ferro fundido cinzento) [1] e esferoidal (ferro fundido nodular).

Em especial, o ferro fundido cinzento é tradicionalmente escolhido em muitas aplicações industriais devido a sua flexibilidade de uso: boa fusão, baixo custo (20% a 40% menos que o aço) e uma ampla faixa de propriedades mecânicas. Além disso, o ferro fundido cinzento é um material que proporciona facilidade de usinagem, no entanto devido à grande quantidade de peças e volume deste tipo de material que é usinado em nível mundial, tornar a sua usinagem mais fácil, rápida e econômica é um desafio contínuo, tanto das empresas de fundição quanto dos fabricantes de ferramentas de corte e máquinas-ferramentas [2].

As propriedades mecânicas e estruturais do ferro fundido cinzento podem ser melhoradas por meio da adição de ligas à base de Ferro-Silício momentos antes do vazamento do ferro líquido. Tal técnica, denominada como inoculação, tem como papel principal reduzir o super-resfriamento na solidificação, aumentando o número de células eutéticas para evitar grafita de super-resfriamento e carbonetos na matriz metálica, e evitar a solidificação pelo sistema eutético metaestável, objetivando a obtenção de grafita do tipo A, tornando-se também uma abordagem viável para melhorar a usinabilidade do material [3-5].

Este trabalho surgiu com a necessidade de uma empresa de fundição situada na região de Londrina-PR aprimorar o processo de fresamento de uma peça fabricada em ferro fundido cinzento, com a finalidade de aumentar a vida útil da ferramenta de corte. Foi sugerido então alterar a composição química dos inoculantes utilizados na fundição (G20) e, por meio de ensaios de usinabilidade em fresamento realizados em amostras, acompanhar a influência de cada adição nas propriedades de fresamento do material.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram retiradas em forma paralelepípeda em blocos de 50x70x90 mm após vazamento do metal a temperaturas entre 1380 e 1410°C por 15 segundos, e posteriormente desmoldadas 32 minutos. Obedecendo a Norma DIN EN 1561 este material (ferro fundido cinzento GG-25) foi analisado quimicamente através de espectrometria de absorção atômica utilizando um espectrômetro Spectro Max com auxílio do software Spark Analyzer Vision MX, nas suas três composições devidamente inoculadas com G-20; IM-22 e IMSR75, durante a transferência do fundido para a panela de vazamento.

Por outro lado, a análise metalográfica foi realizada em amostras embutidas e preparadas com polimento em lixa até 400 mesh, atacadas em Nital 4% conforme a norma NBR 13284:95 e NBR 6593:81. Porém, a contagem de células eutéticas foram realizadas utilizando um microscópio óptico digital modelo Olympus BX 51 com capacidade de aumento de 100 a 1000 vezes, ataque específicos para cada necessidade, e captura para interpretação das imagens conforme software Image Pró-Plus.

Também, as medidas de durezas foram realizadas conforme a norma Norma DIN EN 1561, onde aplicando uma carga de 3000 Kgf com uma esfera de aço duro de Ø10mm

durante 20s permitiu-se digitalizar as capturas por meio do software Quick Brinell da Metalab.

Entretanto, os ensaios de usinabilidade para detectar a vida útil da ferramenta, foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC Romi D 600 com Inseto SPHX1205 KY3500 e rotações de 5500 rpm e 6366 rpm.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Composição Química

As composições químicas das amostras referentes aos vazamentos de ferros fundidos cinzentos GG-25 devido às três inoculações diferentes, estão mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composições (% peso) dos GG 25 inoculado com os três inoculantes

Inoculantes	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Sn
<b>G-20</b>	3,17	2,01	0,70	0,018	0,245	0,545	0,014	0,047
<b>IM-22</b>	3,17	1,90	0,66	0,020	0,205	0,546	0,012	0,043
<b>IMSR75</b>	3,15	2,00	0,65	0,022	0,229	0,533	0,007	0,045

Os valores de composição química obtidos não diferem significativamente entre as três amostras, porém convém salientar que as quantidades de silício e enxofre excederam a quantidade sugerida pela Norma DIN EN 1561.

A composição química dos três inoculantes utilizados, esta apresentada na Tabela 2, onde podemos ressaltar que o silício está presente em maior quantidade no inoculante IMSR75 que também tem o estrôncio presente.

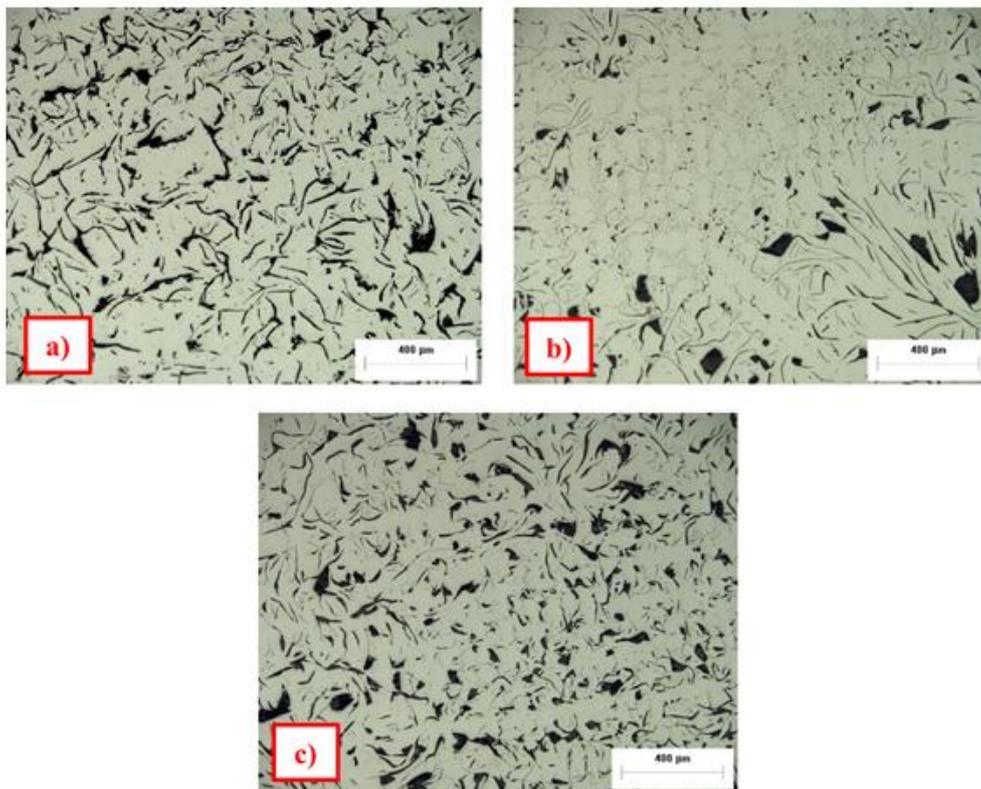
**Tabela 2 –** Composição Química (%peso) dos Inoculantes testados.

Inoculante	Si	Mn	Ca	Al	Ba	Zr	Sr
<b>G20</b>	60,22	8,14	2,63	1,30	4,83	-	-
<b>IM-22</b>	65,21	5,52	1,49	1,06	2,19	5,74	-
<b>IMSR 75</b>	74,54	-	0,083	0,094	-	-	0,84

#### 3.2. Análise Microestrutural

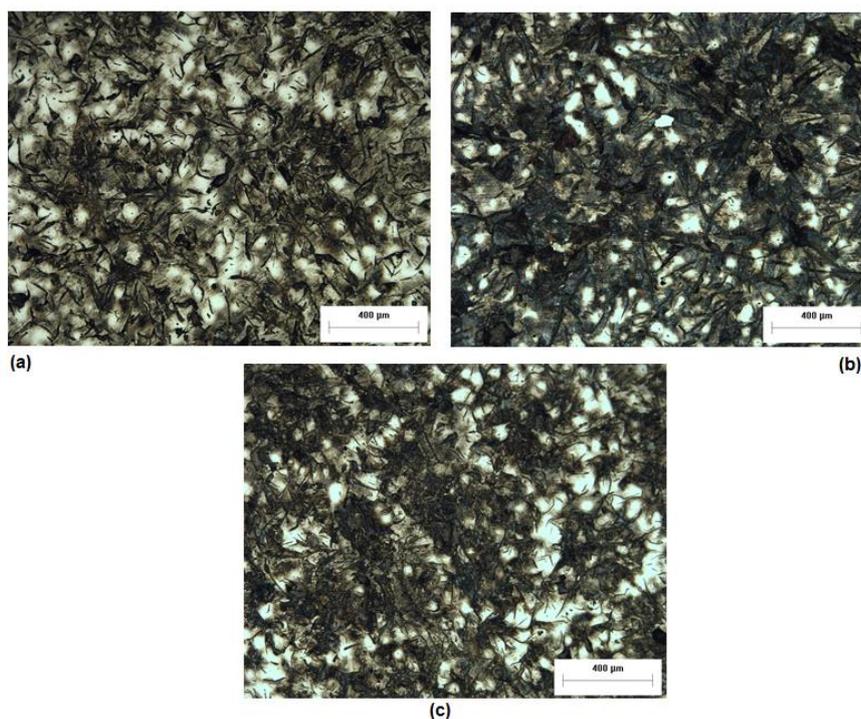
A Figura 1 mostra as matrizes das amostras inoculadas respectivamente com G-20, IM-22 e IMSR75, onde se presencia a distribuição de grafita tamanho 4 em sua forma lamelar do tipo A e C em matrizes essencialmente perlíticas [6,7].

Entretanto o ferro fundido inoculado com IM-22 apresentou pequeno percentual de grafita de super-resfriamento (tipo D), também distribuídas finamente na matriz perlítica.



**Figura 1.** Microestruturas da liga de ferro fundido GG-25 inoculadas com (a) G-20, (b) IM-22 e (c) IMSR 75; aumento de 100X e atacadas com Nital 4%.

A Figura 2(a), (b) e (c) apresentam microestrutura após o ataque com o reagente de Stead (2,5 g de cloreto de cobre 10 g de cloreto de magnésio 05 ml de HCl concentrado 250 ml de álcool etílico) que acelera a revelação do contorno das células eutéticas em função da inoculação [8].



**Figura 2.** Células eutéticas conforme inoculante: (a) G-20; (b) IM-22 e (c) IMSR75.

### 3.3. Contagem de Células Eutéticas

Foram realizadas cinco contagens na região de meio raio das amostras fundidas e foi calculada a média para obter um número de células eutéticas por amostra, como pode ser observado na Tabela 2.

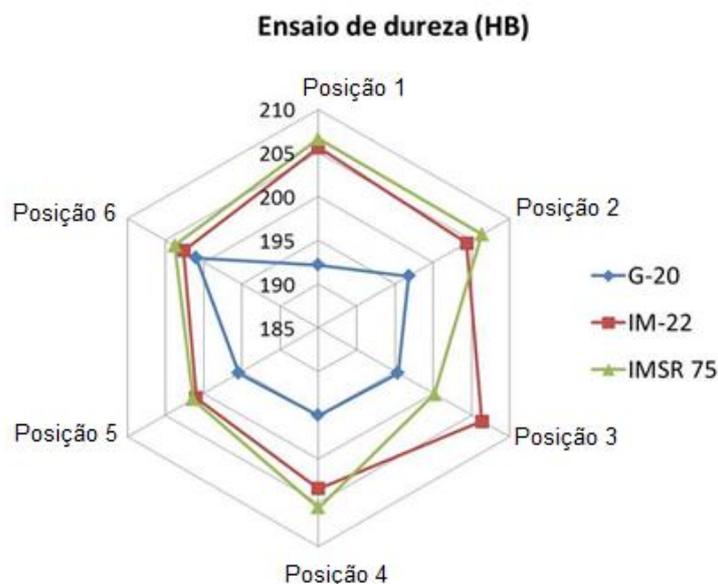
**Tabela 2.** Contagem de células eutéticas

Identificação	Nº de células eutéticas / mm <sup>2</sup>					Média
	Contagem 01	Contagem 02	Contagem 03	Contagem 04	Contagem 05	
<b>Amostra 01 (G20)</b>	1,6	1,2	1,4	1,4	1,9	<b>1,5</b>
<b>Amostra 02 (IM-22)</b>	1,1	0,7	0,9	0,9	0,9	<b>0,9</b>
<b>Amostra 03 (IMSR 75)</b>	1,6	1,8	2,8	2,1	1,8	<b>2,0</b>

A inoculação atua no sentido de produzir grafita tipo A e matriz perlítica, e um número de células eutéticas relativamente elevado, pois quanto maior o número de células eutéticas maior tendera a resistência mecânica aumentar, bem como a ductilidade [9,10]. O material inoculado com o IMSR75 foi que mais apresentou estas células por mm<sup>2</sup>, favorecendo seu melhor desempenho para as propriedades do ferro fundido inoculado com ele.

### 3.4. Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em seis locais distintos na amostra e podemos notar que a inoculação com IM-22 e com IMSR 75 apresentaram maiores valores em comparação com os valores de dureza obtidos no material inoculado com G20, como mostra a Figura 3. Entretanto nenhum dos materiais deixou de atender a faixa de dureza especificada pela Norma DIN EN 1561 (180HB a 250HB).



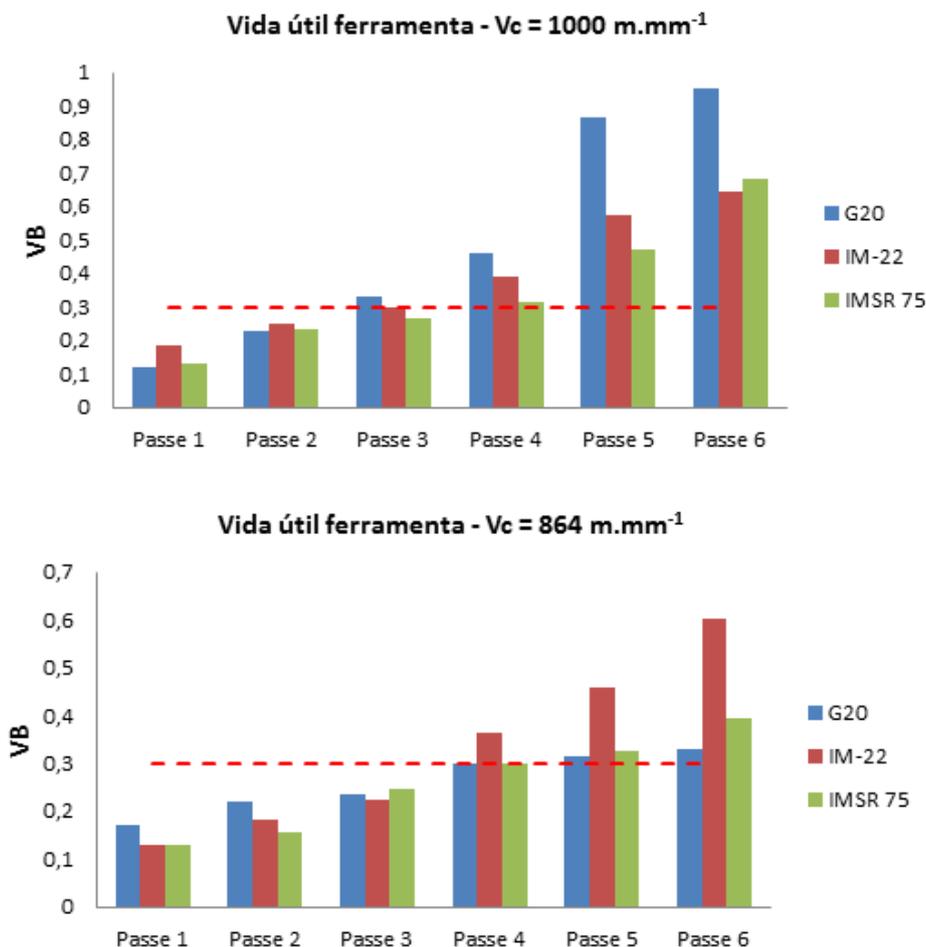
**Figura 3.** Ensaio de dureza Brinell nas seis posições.

A inoculação tende normalmente a favorecer a obtenção de propriedades mecânicas melhores, tais como ductilidade e dureza tração [11], o que no nosso estudo não evidenciou muito isto.

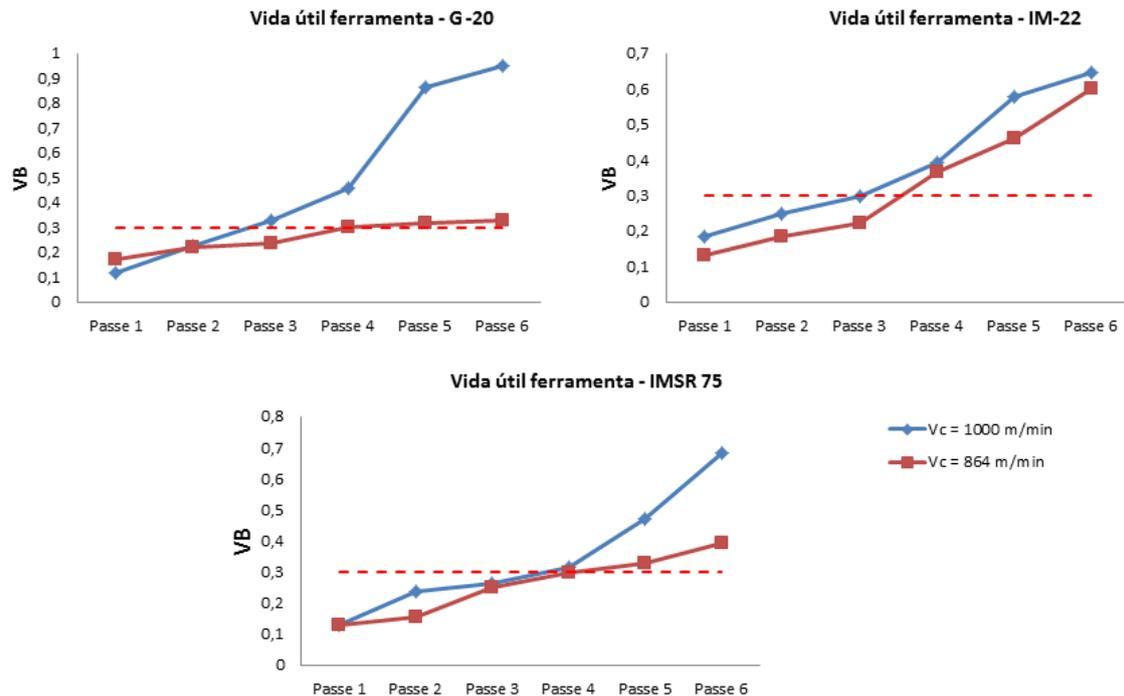
### 3.5. Ensaios de Usinabilidade

O final de vida de uma ferramenta pode ser notado à medida que a média do desgaste máximo do flanco dos inserto (tipo SPHX1205 KY3500) atinge 0,3 milímetros, ou o desgaste máximo do flanco de quaisquer das pastilhas de corte atinge 0,3 mm [12]. Os parâmetros de corte foram tais que o mecanismo de desgaste da ferramenta dominante foi relacionado ao desgaste abrasivo sobre a face de flanco das inserções. O desgaste de flanco é que foi avaliado, e assim foi utilizado como resposta quantitativa para determinar a vida útil da ferramenta [11,12].

Portanto, foi analisado o desgaste de flanco do inserto ( $V_B$ ) com a finalidade de fazer uma análise de vida útil de ferramenta, considerando como critério de fim de vida um  $V_B=0,3\text{mm}$ , comparando os resultados obtidos com os três inoculantes testados e com diferentes parâmetros de usinagem, conforme Figura 4.



**Figura 4.** Desgaste da ponta do inserto ferramenta para a liga com seus inoculantes, para duas diferentes velocidades de cortes  $V_c$ .



**Figura 5.** Desgaste de flanco em FC GG-25 inoculado com G-20, IM-22 e IMSR 75.

Observa-se que para os três inoculantes utilizados a taxa de desgaste de flanco do inserto utilizada pelo fresamento do ferro fundido cinzento GG-25 reduziu com a diminuição da velocidade de corte, resultando assim em um aumento da vida útil do inserto para velocidades de corte menores [13,14,15].

Portanto, o material inoculado com IMSR 75 e usinado a 864mm/min, proporcionaram ao inserto um menor desgaste de flanco da ferramenta, prolongando por sua vez sua vida útil [16,17,18]; seguido do material inoculado com IM-22 e em seguida para o material já usado na empresa, inoculado com G20.

#### 4. CONCLUSÕES

Conforme as análises realizadas, permitimos observar que pela composição do inoculante, a presença do elemento como estrôncio (IMSR-75) favoreceu a um menor desgaste dos insertos pela formação mais acentuada de células eutéticas.

Microestruturalmente, todos os três inoculantes do ferro fundido cinzento GG-25, tiveram grafita na forma lamelar com matriz perlítica, porém o ferro fundido cinzento GG-25 inoculado com IMSR 75 (FeSi-Sr) apresentou grafita tipo A e C, que também são favorecedoras de dureza alta e melhor trabalhabilidade.

Entretanto, na contagem de células eutéticas também o inoculante IMSR 75 foi o que obteve melhores resultados, com 2,0 células/mm<sup>2</sup>, seguido pelo inoculado com G-20, contendo em média 1,5 células/mm<sup>2</sup>, acompanhado pelo inoculado com IM-22 que mostrou 0,9 células/mm<sup>2</sup>, favorecendo concluir que também ele teve melhor rendimento.

A usinabilidade mostrou melhor desempenho nos critérios desgaste do inserto para este fundido, pois a vida útil da ferramenta se associou também a um refino da grafita e perlita.

De uma maneira geral conclui-se que se torna viável a utilização de inoculantes à base de FeSi-Sr na produção de ferro fundido cinzento GG-25, em comparação com

inoculantes à base de FeSi-Ba, uma vez que o Estrôncio mostrou-se preponderante na formação de uma microestrutura de perlita com grafirita mais fina, quantidades de células eutéticas maiores, vida útil do inserto mais longa quando usinado.

## Agradecimentos

Agradecemos a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo incentivo de bolsa regular ao mestrando durante todo período dos trabalhos. Também devemos agradecer a MULTIMETAL Fundação S/A – Londrina - PR que foi quem investiu e requisitou tal estudo.

## REFERÊNCIAS

- 1 JABBARI, M; HOSSEINZADEH, A. Numerical modeling of coupled heat transfer and phase transformation for solidification of the gray cast iron; *Computational Materials Science*, 2013 p. 68.
- 2 PIESKE, A; CHAVES FILHO, L. M; REIMER, J. F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. SOCIESC, 1985.
- 3 SOUZA SANTOS, A. B; CASTELO BRANCO, C. H. *Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares*. 3ª ed. São Paulo: IPT, 1989.
- 4 COLLINI, L; NICOLETTO, G; KONECNA, R. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron, *Materials Science and Engineering A* 2008, p.488
- 5 PEREIRA, A. A. Influência do teor de enxofre na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na usinabilidade do ferro fundido cinzento FC-25, 2005; Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p.141.
- 6 MUHMOND, H. M; FREDRIKSSON, H. Relationship between inoculants and the morphologies of MnS and graphite in gray cast iron; *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, v.44
- 7 CHAVES FILHO, L. M; PIESKE, A; CASTRO, C. P. Avaliação do comportamento de alguns inoculantes para ferros fundidos cinzentos. Sociedade Educacional Tupy, Joinville, 1975.
- 8 VILELA, F. J; LEBRÃO, S. G; FUOCO, R; VICENTE, A. A e MELO, G. H. T. Efeito de algumas variáveis de processo na obtenção do ferro fundido nodular ferrítico no estado bruto de fundição; *Humanidades & Tecnologia em Revista*, 2010; Ano IV v.4
- 9 FRÁS, E; GÓRNY, M. Inoculation effects of cast iron. *Archives of Foundry Engineering*, 2012, v.12 (4):34-46
- 10 SELIN, M., HOLMGREN, D., and SVENSSON, I. L., Influence of Alloying Additions on Microstructure and Thermal Properties in Compact Graphite Irons, *International Journal of Cast Metals Research*, 2009; v.22:283-285.
- 11 FRÁS, E; GÓRNY, M. , Eutectic cell and nodule count as the quality factors of cast iron; *Archives of Foundry Engineering*; 2008, v.8(3):53-58
- 12 KIM, S., COCKCROFT, S.L., and OMRAN, A.M., Optimization of the Process Parameters affecting the Microstructures and Properties of Compacted Graphite Iron; *Journal of Alloys and Compounds*, 2009; v.476 (1-2):728-732
- 13 COELHO, R. T; OLIVEIRA, J. F. G; SUDO, T. T; WISE, M; BRAGHINI Jr, A. O desgaste de ferramentas na usinagem de ferro fundido cinzento a alta velocidade. *O mundo da usinagem*, vol 1, 2001.
- 14 PEREIRA, F. S. Torneamento em alta velocidade do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício, 2012, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p.149
- 15 MACHADO A.R., ABRÃO A.M., COELHO R.T., DA SILVA M.B. , *Theory of machinability materials*, 2011; 2ª ed (in Portuguese).Edgard Blucher, São Paulo

- 16 REN, F.; LI, F.; LIU, W; M.A., Z; TIAN, B. Effect of inoculating addition on machinability of gray cast iron; Journal of Rare Earths; 2009 v.27.
- 17 MUÑOZ DIAS, L.R; DINIZ, A.E., Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force; Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2013, v.35:17-29
- 18 KARABULUT, Ş. and GÜLLÜ, A.; Wear Model in Milling Compacted Graphite Iron with Different Lead Angle Using Ceramic Cutting Tools, Solid State Phenomena, 2013; 199:371-376