



ANÁLISE DE CONSUMO EXCESSIVO DE PASTILHA DE USINAGEM DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

Gabriel Borges Cechinel¹

Renan Copetti Menegaro²

Anderson Daleffe³

Pedro Henrique Menegaro Possamai⁴

Henrique Cechinel Casagrande⁵

Resumo: esta pesquisa apresenta a análise de um problema de usinagem em peças de ferro fundido fornecidas por uma Indústria de Implementos Agrícolas. As peças, apresentaram uma elevada resistência, resultando em frequente quebra das pastilhas de corte e a necessidade de redução da rotação das máquinas durante a usinagem. As ações corretivas incluíram a coleta de amostra do item para realização de ensaios de metalografia e através da análise metalográfica revelou-se a predominância da forma e distribuição da gráfica e a presença de estruturas cuja característica pode ser um fator influenciador dificultando a usinagem, devido à ação abrasiva sobre as ferramentas de corte. Este estudo destaca a influência dos constituintes microestruturais na usinabilidade do ferro fundido, sugerindo que a formação de carbonetos ou Steadita em sistemas de solidificação metaestáveis prejudica o desempenho das ferramentas durante o processo de usinagem.

Palavras-chave: Ferro Fundido, Usinabilidade, Carbonetos e Distribuição da Grafita

1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido cinzento é um material amplamente utilizado na indústria, principalmente na fabricação de componentes mecânicos devido à sua boa usinabilidade, resistência ao desgaste e propriedades mecânicas satisfatórias. No entanto, fatores como a solidificação do material e a formação de determinadas fases microestruturais podem impactar significativamente seu desempenho durante o processo de usinagem. Em particular, a presença de carbonetos eutéticos e grafita de

¹ Mestrando em Engenharia Metalúrgica, UniSATC. E-mail: eng.gabrielcechinel@gmail.com

² Mestrando em Engenharia Metalúrgica, UniSATC. E-mail: eng.menegaro@gmail.com

³ Prof.Orientador.Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Mestrando em Engenharia Metalúrgica, UniSATC. E-mail: pedropossamai@hotmail.com

⁵ Doutorando em Engenharia de Materiais, UFSC. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

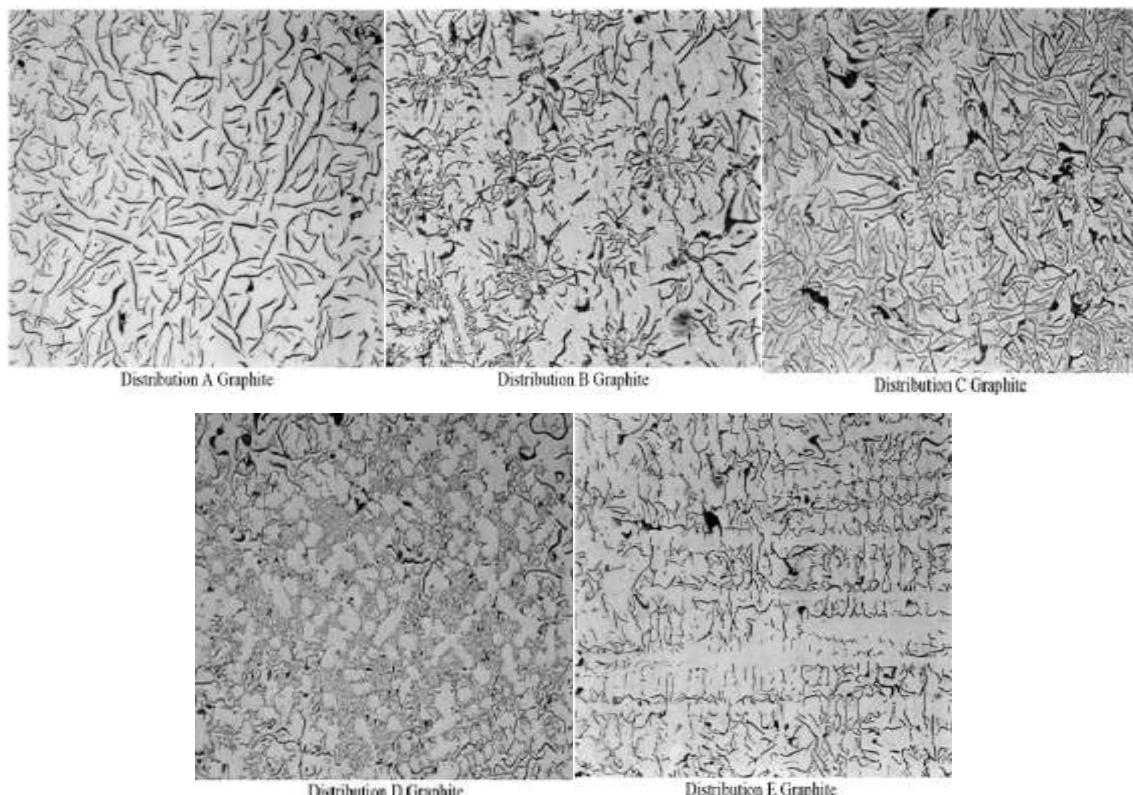
tipos específicos tem sido associada a dificuldades no corte, desgaste acelerado das ferramentas e aumento da dureza do material [1 e 2].

Este estudo visa investigar falhas durante a usinagem em peças fornecidas para a indústria de implementos agrícolas. O problema causado pela resistência elevada do material, resultando na quebra frequente das pastilhas de corte e na necessidade de ajustes no processo de usinagem.

Por meio de ensaios de dureza e análise metalográfica, buscou-se identificar as causas dessas dificuldades e fornecer orientações para prevenir falhas similares em futuros processos de produção. A pesquisa enfoca a influência dos constituintes microestruturais, como os carbonetos eutéticos e a Steadita, formados em condições de solidificação metaestável, que prejudicam a usinabilidade do ferro fundido. O objetivo é gerar conhecimentos que possam ser aplicados para melhorar a qualidade do material e otimizar o desempenho das ferramentas de corte em operações de usinagem industrial.

A usinabilidade de materiais metálicos, especialmente do ferro fundido cinzento, é influenciada por uma série de fatores microestruturais e propriedades mecânicas. O ferro fundido cinzento, que possui uma matriz predominantemente ferrítica e perlítica, contém flocos de grafita dispersos, cuja forma e distribuição afetam diretamente seu comportamento durante a usinagem [3]. Conforme a norma ASTM A247 [4], a classificação da grafita em tipos, como A, B, C, D e E, representadas na Fig. 1, refere-se a sua morfologia, que pode interferir na ductilidade, resistência ao desgaste e dureza do material.

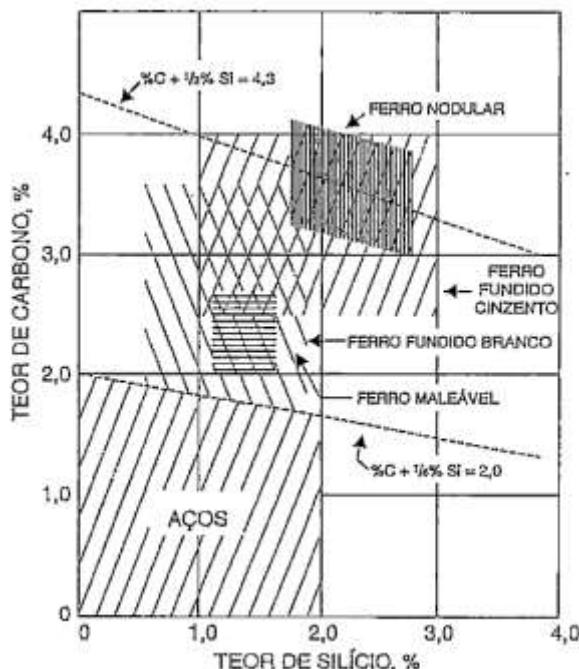
Figura 1 – Tipos de distribuição da grafita lamelar.



Fonte: Adaptado da Norma ASTM A247 [3]

Para CHIAVERINI [1], o Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar em carbono parcialmente livre, onde o Ferro fundido cinzento, cuja fratura mostra uma coloração escura, é caracterizada por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura em que parte relativamente grande do carbono está no estado livre (na forma de veios ou grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (Fe₃C). Ainda sobre as faixas dos teores de carbono e silício, ele nos traz a faixa aproximada de cada das ligas ferrosas de acordo com a Fig. 2, onde a linha tracejada inferior define o limite superior de teor de carbono como o limite de solubilidade do carbono na austenita e no caso do ferro fundido para ligas ternárias.

Figura 2 - Faixa aproximada de quantidades de carbono e silício nas ligas ferrosas



Fonte: Chiaverini [1]

A variação da composição química comumente empregada na fabricação de ferros fundidos na indústria, sem a adição de elementos de liga, está descrita na Tab. 1.

Tabela 1 - Composição química dos ferros fundidos comuns.

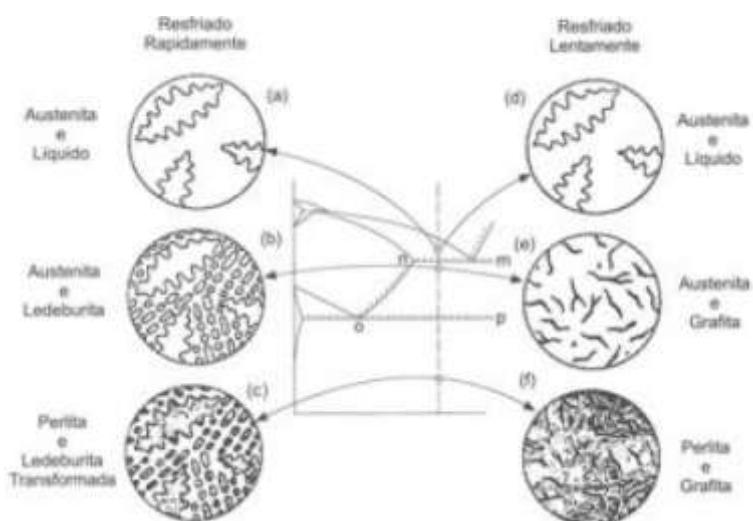
Tipos	%C	%Si	%Mn	%S	%P
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,20
Maleável	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,20	0,02-0,20	0,02-0,20
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,20-1,00	0,02-0,25	0,02-1,00
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,00	0,01-0,03	0,01-0,10
Vermicular	2,5-4,0	1,0-3,0	0,20-1,00	0,01-0,03	0,01-0,10

Fonte: Adaptado de Chiaverini [1]

A solidificação do ferro fundido cinzento é um processo complexo que envolve a transformação do ferro líquido em sólido. Durante a solidificação, ocorrem a nucleação e o crescimento dos grãos de grafita, influenciados por fatores como a taxa de resfriamento e a composição química [5].

A solidificação do ferro fundido cinzento, inicia-se com a nucleação dos grãos de grafita, seguida pelo crescimento desses grãos. A taxa de resfriamento é um fator crucial que determina a microestrutura final do material, conforme Fig. 3. Taxas de resfriamento mais rápidas podem levar a uma maior densidade de núcleos de grafita e, consequentemente, a uma microestrutura mais fina [1].

Figura 3 - Solidificação de um ferro fundido hipoeutético (a), (b) e (c) formação de ferro fundido branco e (d), (e) e (f) formação de ferro fundido cinzento perlítico.

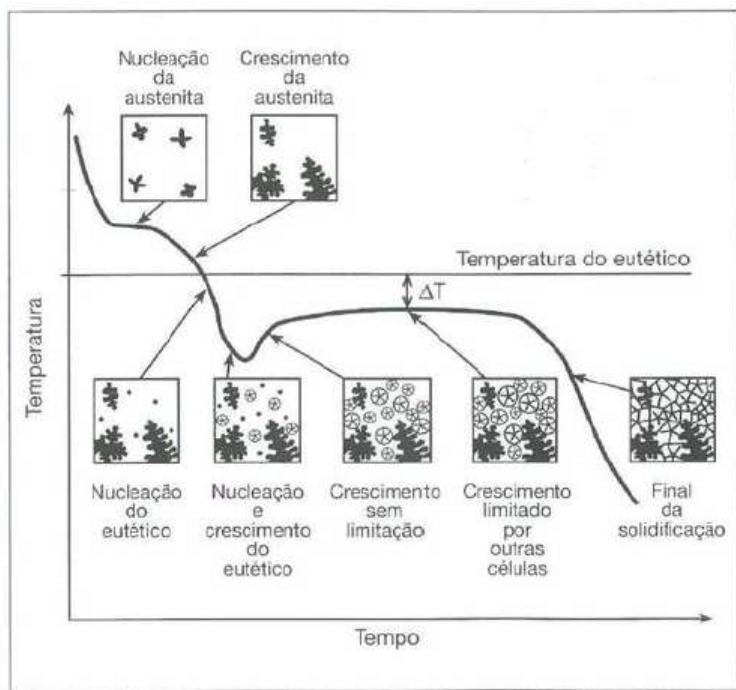


Fonte: Garcia [4]

A temperatura de vazamento, a composição química e a geometria do molde são fatores que afetam o processo de solidificação. A temperatura de vazamento deve ser controlada para evitar defeitos e garantir uma solidificação uniforme. A composição química, especialmente o teor de silício, afeta a formação de grafita e a qualidade da microestrutura [6].

Modelos teóricos, como a teoria da nucleação e crescimento de dendritas, são importantes para entender a solidificação do ferro fundido cinzento, assim como a evolução da microestrutura durante esse processo, conforme Fig. 4. Esses modelos ajudam a prever a estrutura final e a otimizar o processo de fabricação [5].

Figura 4 - Evolução microestrutural esquemática de um ferro fundido cinzento durante a solidificação.

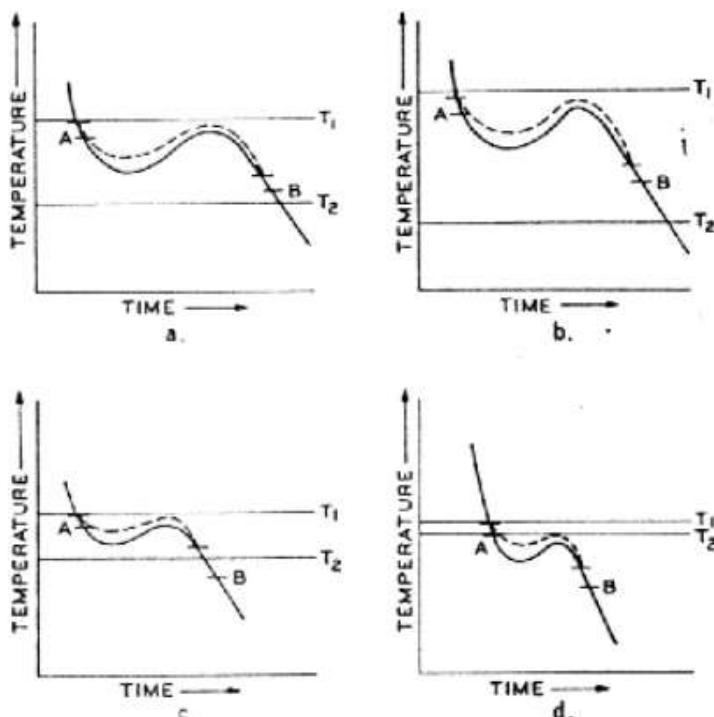


Fonte: Colpaert [5]

Segundo FUOCO [8], a solidificação dos ferros fundidos é frequentemente analisada pela competição entre dois tipos de eutéticos: o estável ($L \leftrightarrow$ grafita + γ) e o metaestável ($L \leftrightarrow$ M3C + γ), conforme o diagrama binário Fe-C. O eutético estável, que envolve austenita (γ) e grafita, exemplifica um sistema facetado/não facetado, onde a grafita, por ser facetada, apresenta desafios significativos para nucleação e crescimento. Assim, a grafita se torna a fase crítica para o superresfriamento necessário à nucleação e ao crescimento desse eutético. MINKOFF [9] diz que o eutético metaestável, também caracterizado por uma combinação facetada/não facetada, demonstra uma taxa de crescimento mais rápida em comparação ao eutético estável. Como resultado, em condições de solidificação acelerada, a formação do eutético estável é inibida, levando a liga a solidificar conforme a reação do estado metaestável.

Merchant [10] revisita a teoria de solidificação dos ferros fundidos, explicando a formação dos eutéticos com base em curvas de resfriamento, conforme Fig. 5. Segundo o autor, na figura o T_1 representa a temperatura de equilíbrio do eutético austenita-grafita, T_2 é a temperatura de equilíbrio do eutético austenita-M3C, e A e B são as temperaturas que marcam o início e o fim da solidificação.

Figura 5 - Curvas de resfriamento do ferro fundido: (a) resfriamento normal (b) efeito de elemento grafitizante (c) efeito de elemento formador de carboneto (d) efeito de elemento forte formador de carboneto.



Fonte: Merchant [5]

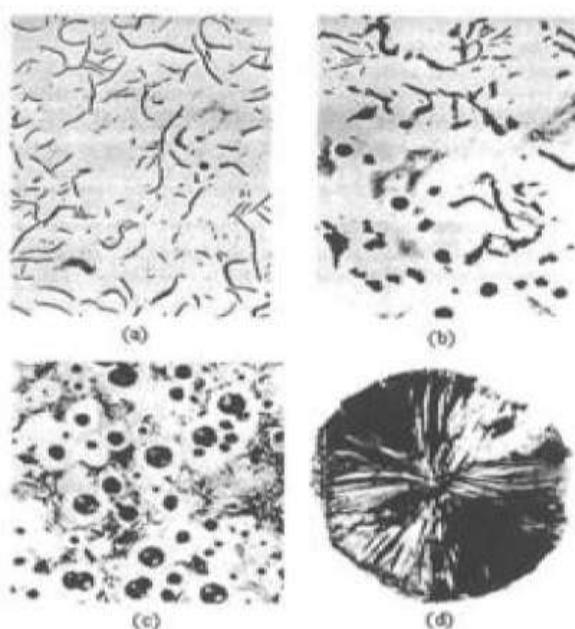
Segundo a figura, se os pontos A e B estão acima de T₂, a solidificação resultará em austenita e grafita. Se ambos estiverem abaixo de T₂, a fase M₃C irá nuclear e crescerá, originando ferro fundido branco. No caso em que A está acima de T₁ e B abaixo de T₂, a microestrutura resultante será uma combinação, com M₃C formando-se na periferia das células eutéticas de austenita e grafita. A diferença entre T₁ e T₂ é influenciada pela presença de elementos grafitizantes ou formadores de carbonetos, sendo essa variação crucial para determinar se a liga tende a formar grafita ou carbonetos.

A microestrutura do ferro fundido cinzento é composta pela matriz de ferro e as partículas de grafita. A forma e distribuição da grafita afetam diretamente as propriedades mecânicas do material [1].

A grafita no ferro fundido cinzento pode se apresentar em formas lamelares ou esferoidais, conforme Fig. 6. A grafita lamelar é comum em ferro fundido cinzento convencional e proporciona boa resistência ao desgaste, enquanto a grafita esferoidal,

obtida por tratamento nodular, oferece melhores propriedades de tenacidade e ductilidade [6].

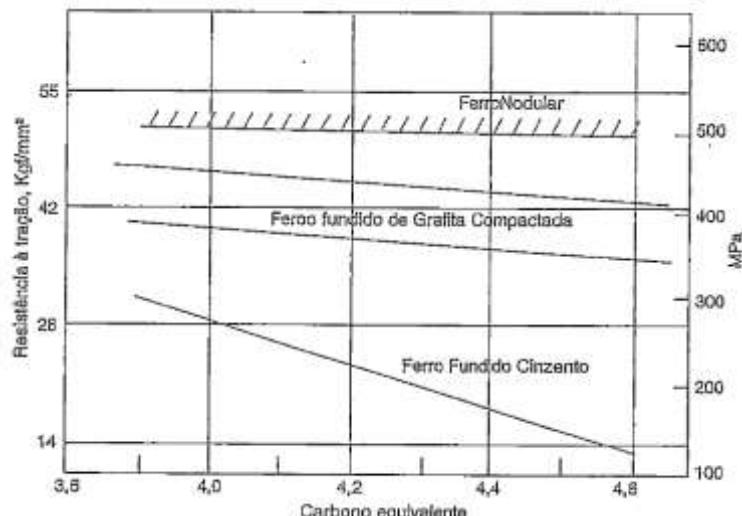
Figura 6 - Microestruturas de ferro fundido com quantidades crescentes de magnésio: a) 0,017% Mg: veios de grafita; b) 0,026% Mg: veios com início de formação com nódulos de grafita; c) 0,13% Mg: grafita totalmente na forma esferoidal; e d) aspecto de um nódulo individual de grafita.



Fonte: Garcia [4]

A microestrutura do ferro fundido cinzento inclui a matriz de ferro (ferrita e perlita) e as partículas de grafita. A matriz fornece a base de suporte para a grafita e contribui para as propriedades mecânicas gerais do material [5]. A forma e a distribuição da grafita têm um impacto significativo nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, assim como a composição química - carbono equivalente, conforme Fig. 7. A grafita lamelar melhora a resistência ao desgaste, mas pode reduzir a tenacidade e a resistência ao choque. A grafita esferoidal, por outro lado, melhora a ductilidade e a resistência ao impacto [1]. As propriedades elétricas, magnéticas, térmicas, entre outras também são diretamente dependentes destas características da grafita, além de sua fração volumétrica [6].

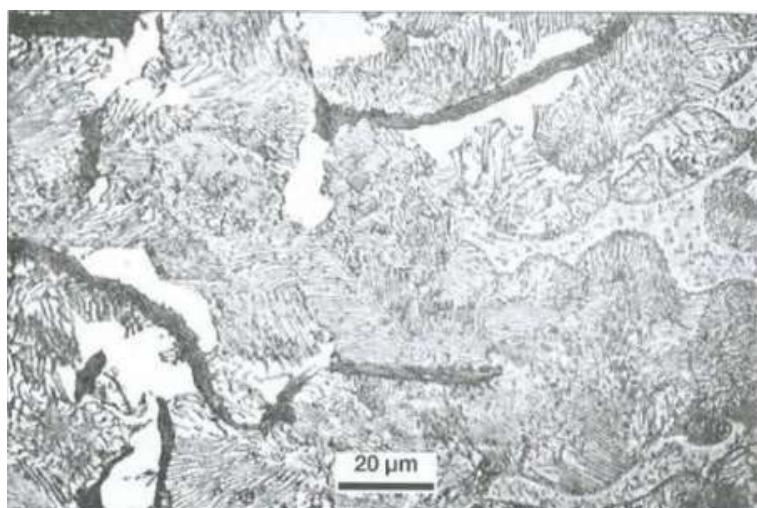
Figura 7 - Influência do carbono equivalente e da forma da grafita sobre a resistência a tração de ferro fundido cinzento, ferro nodular e ferro fundido de grafita compactada.



Fonte: Chiaverini [1]

De acordo com Fernandes [7], a steadita, Fig. 8, apresenta um ponto de fusão que varia entre 950°C e 980°C. Ela é caracterizada por ser um constituinte duro e quebradiço, localizado nos contornos das células. A presença da steadita reduz a ductilidade e, dependendo de sua quantidade e distribuição, pode diminuir o limite de resistência à tração, além de tornar a usinagem mais difícil.

Figura 8 - Exemplo de Steadita



Fonte: Colpaert [5]

A presença de diferentes tipos de grafita e a composição da matriz de ferro afetam significativamente a usinabilidade do ferro fundido cinzento. A grafita lamelar atua como um agente de lubrificação durante a usinagem, reduzindo o atrito entre a ferramenta e o material, mas pode causar desgaste irregular das ferramentas e rebarbas, comprometendo a precisão dimensional das peças [1]. Por outro lado, a grafita esferoidal melhora a usinabilidade ao reduzir o atrito e a abrasividade, permitindo uma melhor qualidade de superfície e maior precisão dimensional [6].

A matriz de ferro também desempenha um papel crucial, Tab. 2, a ferrita, sendo mais macia e dúctil, facilita a usinagem e contribui para superfícies mais suaves, enquanto a perlita, com sua dureza e abrasividade superiores, pode aumentar o desgaste das ferramentas e os custos de operação [5].

Tabela 2 - Efeitos da estrutura na velocidade prática de torneamento

Vida de Ferramenta	Porcentagem Relativa				
	100	50	0	0	0
Ferrita (%)	100	50	0	0	0
Perlita Grosseira (%)	0	50	100	-	-
Perlita Fina (%)	-	-	-	100	95
Cementita (%)	-	-	-	-	5
Dureza Brinell	120	150	195	218	240
Velocidade Recomendada, (m/min)	244	168	98	82	61

Torneamento com pastilha de metal duro, de classe indicada para ferro fundido

Fonte: Adaptado de Chiaverini [1]

Para otimizar a usinabilidade do ferro fundido cinzento, é essencial controlar sua microestrutura durante a solidificação e aplicar tratamentos térmicos adequados quando necessários. Modificar o processo de solidificação, como adicionar elementos para promover a formação de grafita esferoidal e controlar a taxa de resfriamento, pode melhorar significativamente a usinabilidade [5 e 6]. Além disso, tratamentos térmicos, como o recozimento e a têmpora, são utilizados para ajustar as propriedades mecânicas do ferro fundido. O recozimento pode aumentar a ductilidade e facilitar a usinagem, enquanto a têmpora pode aumentar a dureza da matriz e melhorar a resistência ao desgaste, potencialmente elevando a qualidade da superfície usinada [1 e 6].

O controle rigoroso da microestrutura e a aplicação adequada de tratamentos térmicos são, portanto, estratégias essenciais para otimizar a usinabilidade e a eficiência do processo de usinagem, pois a microestrutura do ferro fundido cinzento exerce um impacto significativo na usinabilidade e qualidades das peças fundidas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para entender o problema de usinagem relatado, foram realizadas análises detalhadas de dureza e metalografia nas peças. Essas análises visam identificar a presença de constituintes microestruturais que poderiam estar afetando a usinabilidade do ferro fundido. A amostra utilizada foi retirada diretamente de uma peça agrícola fundida onde a escolha da peça visou representar o material comumente empregado em componentes agrícolas submetidos a esforços mecânicos.

2.1 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica foi conduzida nas amostras utilizando técnicas com e sem ataque químico. A preparação inicial das amostras incluiu lixamento sequencial com lixas e posterior polimento para obtenção de uma superfície lisa. Para a observação da microestrutura sem ataque químico, as amostras foram analisadas diretamente sob o microscópio óptico.

Para a análise com ataque químico, as amostras foram submetidas a um ataque com solução de nital a 3%, visando realçar a estrutura do material.

2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química de um material é a identificação e quantificação dos elementos presentes nele. No caso do ferro fundido cinzento, elementos como carbono, silício, manganês, cobre e enxofre desempenham papéis cruciais na determinação das propriedades mecânicas e na microestrutura final do material, podemos observar abaixo na Tab. 3 os resultados da análise.

A composição química da amostra foi determinada por espectrometria de emissão óptica. O espectrômetro utilizado foi calibrado para análise de elementos comuns em ferros fundidos, como carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre.

Tabela 3 - Composição química

Elemento	Composição (%)
Carbono (C)	3,412
Cobre (Cr)	0,217
Manganês (Mn)	0,505
Enxofre (S)	0,085
Silício (Si)	2,018

Fonte: Do autor (2024).

2.3 Ensaio de Dureza

A dureza da amostra foi medida utilizando o método Brinell (figura 10), com uma carga de 3000 kgf e esfera de 10 mm de diâmetro, conforme a norma ASTM E10. O item apresentou uma dureza média de 202,7 HB.

Figura 10 - Ensaio de Dureza.



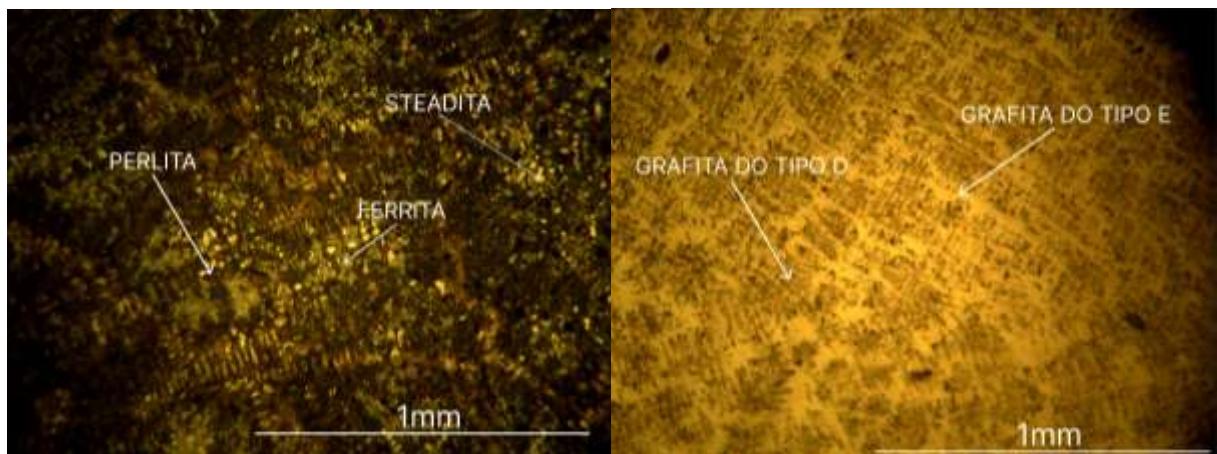
Fonte: Do autor (2024).

3 ANÁLISE DOS DADOS

Na metalografia da Fig. 9, a investigação revelou a predominância de grafitas dos tipos D e E, de acordo com a classificação da norma ASTM A247. Estes tipos de grafita indicam um baixo potencial de nucleação durante a solidificação. As características morfológicas das grafitas foram observadas e documentadas, como mostrado na Fig. 9.

Também foram identificadas as fases perlita, ferrita e steadita. Essas fases são comuns em ligas de ferro fundido cinzento, onde a perlita aparece como uma mistura de ferrita e cementita em uma estrutura lamelar, a ferrita é a fase mais macia e dúctil composta de ferro puro com pouco carbono, e a steadita, uma fase eutética rica em fósforo, se apresenta em forma de redes ou contornos nas áreas interdendríticas.

Figura 9 - Ensaio de Metalografia, amostra com e sem ataque químico, ampliação 100x.



Fonte: Do autor (2024).

Além disso, o ataque químico permitiu a identificação de carbonetos eutéticos nas regiões intercelulares, que solidificam por último. Esses carbonetos foram observados em ambas as amostras e estão associados a um processo de solidificação metaestável. A presença desses constituintes microestruturais endurece o material nas regiões intercelulares, tornando-o mais abrasivo e, consequentemente, mais difícil de utilizar.

4 CONCLUSÕES

A análise realizada neste estudo evidenciou a influência significativa dos constituintes microestruturais na usinabilidade do ferro fundido cinzento. As amostras apresentaram uma matriz com predominância perlítica e grafitas dos tipos D e E, indicando um baixo potencial de nucleação durante a solidificação. Mais importante, a presença de carbonetos eutéticos e/ou Steadita nas regiões intercelulares foi identificada, caracterizando um processo de solidificação metaestável.

Esses carbonetos eutéticos ou Steadita foram identificados como os principais responsáveis pelo aumento da dureza e abrasividade do material, resultando em uma usinabilidade mais difícil e em um maior consumo de pastilhas de corte, a presença desses constituintes microestruturais revelou a necessidade de um controle mais rigoroso das condições de solidificação e da composição química durante a produção do ferro fundido.

A pesquisa tem grande contribuição para o meio acadêmico e empresarial, gerando base de conhecimento e relacionando a teoria junto à prática buscando entendimento do comportamento dos processos frente às situações enfrentadas no dia a dia das empresas.

REFERÊNCIAS

- [1] Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos 7º edição. São Paulo, ABM. 1996.
- [2] Assis, G. F. C. A. Estudo da usinabilidade do ferro cinzento a partir da variação da temperatura: Uma avaliação com base no teste de propriedades físicas. Monografia, Universidade Estadual do Maranhão, 2015.
- [3] Dagostin, G. F., Daleffe, A., Cavaler, L. C. C. Influencia dos parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido ASTM A518 GR.3. Rev. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 18, e2270, 2021.
- [4] ASTM A247. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite Iron Castings. ASTM International. 2017.
- [5] Garcia, A. "Solidificação". Editora Unicamp, 2001.



- [6] Colpaert, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns 4º edição. Editora Blucher, 2008.
- [7] Junior, L. F. Produção de Ferros Fundidos Cinzentos, Nodular e Aços em Fornos de Indução – Aspectos Metalúrgicos. 1998.
- [8] Fuoco, R.; Corrêa, E. R.; Cabezas, C. S.; Albertin, E. Interpretação de curvas de análise térmica de ferros fundidos com grafita vermicular. Rev. Fundição e Mat. Primas; n. 35, 2000.
- [9] Minkoff, I. The Physical Metallurgy of Cast Structure. John Wiley & Sons, 1986.
- [10] Merchant, H. D. Solidification of Cast Iron. Recent Research of Cast Iron, Detroit, 1964.