



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

NILIS CUNHA CHIMENDES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ZINCO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO FERRO FUNDIDO CINZENTO G2500**

FORTALEZA

2019

NILIS CUNHA CHIMENDES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ZINCO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO FERRO FUNDIDO CINZENTO G2500**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira
Motta

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C465a Chimendes, Nilis Cunha.

Análise da influência do zinco nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento
G2500. / Nilis Cunha Chimendes. – 2019.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro
de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta.

1. Ferro fundido cinzento. 2. Sucata galvanizada . I. Título.

CDD 669

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ZINCO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO FERRO FUNDIDO CINZENTO G2500**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica e Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. (a). Dr. (a). Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Valdir Aranega Neto

“Eu errei mais de 9.000 arremessos na minha carreira. Perdi quase 300 jogos. Em 26 oportunidades, confiaram em mim para fazer o arremesso da vitória e eu errei. Eu falhei muitas e muitas vezes na minha vida. E é por isso que tenho sucesso.”

Michael Jordan

A minha Família.

Aos meus Amigos.

Aos meus Orientadores.

RESUMO

O ferro fundido cinzento é amplamente usado nas indústrias automobilísticas, tendo um alto grau de exigência com relação as suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, justamente por fazer parte da construção de componentes com um elevado nível de criticidade. As fundições utilizam sucata como um dos componentes para preparação das cargas metálicas e, por conta da grande disponibilidade de sucata galvanizada no mercado, os aços zincados estão presentes nessa preparação. Porém, os efeitos do zinco nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos ainda não são totalmente conhecidos. Visando avaliar esses efeitos, foram vazados quatro corpos de prova variando a composição química do zinco e mantendo os demais parâmetros do processo constantes. Foi realizado um balanço de massa, adicionando-se zinco nos moldes em forma de pó de zinco metálico, sendo realizado após o vazamento ensaios de tração, dureza e metalografia, buscando identificar alterações nas propriedades mecânicas, matriz e morfologia da grafita. Para metodologia e faixas de composição trabalhadas, não foi possível observar variações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do ferro fundido cinzento G2500.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento, sucata galvanizada, zinco.

ABSTRACT

Gray cast iron is widely used in the automotive industry, which has a high requirement for mechanical and metallurgical properties, precisely because they are part of the construction of components with a high level of criticality. The smelters use scrap as one of the components for the preparation of metal loads and, because of the high availability of galvanized scrap on the market, the zinc steels are present in this preparation. However, the effects of zinc on the mechanical properties of gray cast iron are not yet fully understood. Aiming to evaluate these effects, four specimens were leaked by varying the chemical composition of the zinc and keeping the other process parameters constant. It was carried out a mass balance by adding zinc in the molds in the form of metallic zinc powder, being carried out later tests of traction, hardness and metallography, seeking to identify changes in the mechanical properties, matrix and morphology of the graphite. For the methodology and composition range studied, it was not possible to observe variations in the mechanical and metallurgical properties of G2500 gray cast iron.

Keywords: Gray cast iron, galvanized scrap, zinc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação da temperatura eutética estável (TEE) e temperatura eutética metaestável (TEM).....	16
Figura 2: Curva de resfriamento para um ferro fundido hipoeutético.	17
Figura 3: Influência de elementos químicos nas temperaturas eutéticas estáveis e metaestáveis.....	18
Figura 4: Esquema de uma célula eutética.....	18
Figura 5: Tipos de grafita.	19
Figura 6: Relação entre o super-resfriamento e as diversas formas de grafita.	20
Figura 7: Classificação quanto ao tamanho das lamelas da grafita.	20
Figura 8: (a) Cristalografia da grafita. (b) Direção de crescimento da grafita lamelar...	21
Figura 9: Representação da influência da velocidade de crescimento na solidificação. 22	
Figura 10: Influência da velocidade de resfriamento sobre o super-resfriamento.	23
Figura 11: Efeito da temperatura de vazamento no número de células eutéticas.....	24
Figura 12: Sucata galvanizada.	28
Figura 13: Processo de galvanização.	29
Figura 14: Efeitos da microestrutura e de variáveis de processo sobre o limite de resistência em ferro fundido cinzento.	30
Figura 15: Efeito do Carbono Equivalente sobre o Limite de Resistência de ferros fundidos cinzentos.....	31
Figura 16: Efeito da inoculação sobre a quantidade de grafita de super-resfriamento e limite de Resistência de ferros fundidos cinzentos.....	31
Figura 17: Efeito da inoculação sobre a quantidade de grafita de super-resfriamento e limite de Resistência de ferros fundidos cinzentos.....	32
Figura 18: Fluxograma do trabalho.	34
Figura 19: Corpo de prova para ensaio de tração segundo a Norma ASTM a-48.....	37
Figura 20: (a) Durômetro Pantec (b) Máquina de tração EMIC.	38
Figura 21: Metalografia do CP1. Aumento: 100x - sem ataque.....	40
Figura 22: Metalografia do CP2. Aumento: 100x - sem ataque.....	41
Figura 23: Metalografia do CP3. Aumento: 100x - sem ataque.....	41
Figura 24: Metalografia do CP4. Aumento: 100x - sem ataque.....	41

Figura 25: Metalografia do CP1. Ataque com Nital 2%	42
Figura 26: Metalografia do CP2. Ataque com Nital 2%	42
Figura 27: Metalografia do CP3. Ataque com Nital 2%	43
Figura 28: Metalografia do CP4. Ataque com Nital 2%	43
Figura 29: Matriz perlítica. Aumento 500x - ataque com Nital 2%	44
Figura 30: Proporção de carbonetos na matriz	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do metal.	35
Tabela 2: Composição de zinco nos corpos de prova.....	35
Tabela 3: Parâmetros de fusão, vazamento e resfriamento.	36
Tabela 4: Composição química das amostras.	39
Tabela 5: Temperatura e tempo de vazamento.....	39
Tabela 6: Massa de zinco adicionada e rendimento.	39
Tabela 7: Valores de dureza e limite de resistência a tração.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos	15
3.1.1 Morfologia da grafita nos ferros fundidos cinzentos.	19
3.1.2 Influência das variáveis de processo na solidificação de ferros fundidos cinzentos.....	21
3.1.2.1 <i>Composição química</i>	21
3.1.2.2 <i>Velocidade de resfriamento</i>	22
3.1.2.3 <i>Tratamentos do banho metálico</i>	24
3.2 O uso da sucata nas fundições	26
3.2.1 Sucata galvanizada	27
3.3 Processo de galvanização	28
3.4 Propriedades estáticas dos ferros fundidos cinzentos	30
3.4.1 Influência dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas. 30	
3.5 Influência do zinco nas propriedades do ferro fundido cinzento	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 Preparação das cargas.....	34
4.2 Vazamento do corpo de prova e parâmetros de processo.....	35
4.3 Preparação das amostras	36
4.4 Ensaios mecânicos e metalográficos.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39

5.1	Composição química, tempo e temperatura de vazamento	39
5.2	Caracterização microestrutural	40
5.2.1	Classificação da grafita.....	40
5.2.2	Classificação da matriz.....	42
5.2.3	Quantificação dos carbonetos	44
5.3	Avaliação das propriedades mecânicas	45
5.4	Considerações finais.....	46
6.	CONCLUSÃO	47
7.	TRABALHOS FUTUROS	48

1. INTRODUÇÃO

Nas fundições, a produção de ferro fundido tem a sucata como uma das principais matérias primas que compõem a carga metálica. No cenário atual, o decréscimo na produção de aço vem contribuindo para diminuição da sucata disponível no mercado, forçando as fundições buscarem novas alternativas.

Diante da escassez de matéria prima, uma das alternativas é o uso da sucata zincada. O processo de galvanização tem o objetivo de proteger a superfície do aço contra corrosão através da aplicação de uma camada superficial de zinco. O processo tem um ótimo custo benefício e, por esse motivo, tem uma vasta aplicação no âmbito metalúrgico. Com isso, o aumento considerável da utilização da galvanização no combate a corrosão, ampliou a disponibilidade de sucata zincada no mercado.

No entanto, o alto teor de zinco limita o uso dessa sucata como matéria prima para produção de ferro fundido. Alguns dos efeitos do elevado teor de zinco na composição do ferro fundido são a deterioração da morfologia da grafita e formação de *pin-holes*. Porém, os limites máximos de zinco toleráveis na composição do ferro fundido cinzento ainda não são totalmente claros.

No presente trabalho é feita uma avaliação da influência do zinco nas propriedades do ferro fundido cinzento GG25, buscando uma faixa de composição química aceitável sem que essas sejam afetadas, através da confecção de corpos de prova com diferentes composições de zinco, mantendo-se os outros parâmetros constantes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Investigar a influência do zinco nas propriedades mecânicas do ferro fundido G2500.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o teste prático através do vazamento de corpos de prova com composição entre as faixas de 0,05% e 0,20%.
- Realizar ensaios mecânicos com o objetivo de validar as faixas de composição química.
- Realizar ensaios metalográficos analisando o efeito na morfologia da grafita e correlacionando com as faixas de composição.
- Encontrar a tolerância máxima de zinco na composição química sem que haja modificação das propriedades do ferro fundido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os ferros fundidos são ligas compostas por ferro e carbono, onde o teor de carbono é superior a 2%, tendo como característica marcante a presença de carbono livre em forma de grafita. Devido à grande influência do silício na liga, que tem relação direta com a estabilização do carbono em forma de grafita, o ferro fundido é considerado uma liga ternária de Fe-C-Si (CHIAVERINI, 2002).

Os ferros fundidos têm uma vasta aplicação no ramo da Metalmeccânica, sendo utilizado principalmente nas indústrias automobilísticas. As boas propriedades físicas e mecânicas permitem a confecção de componentes que resistem a altas temperaturas, como por exemplos os blocos de motores, até os que exigem uma maior resistência ao atrito, que é o caso dos discos de freio.

Dos tipos de ferro fundido, os mais conhecidos são: ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e ferro fundido vermicular. O ferro fundido vermicular vem em ascensão no mercado, tendo uma grande aplicação na fabricação de blocos de motores. O ferro fundido nodular, por ter uma boa resistência a tração, é aplicado na fabricação de cubos de roda. O ferro fundido cinzento é o mais utilizado, tendo boas propriedades de condutibilidade e resistência ao desgaste.

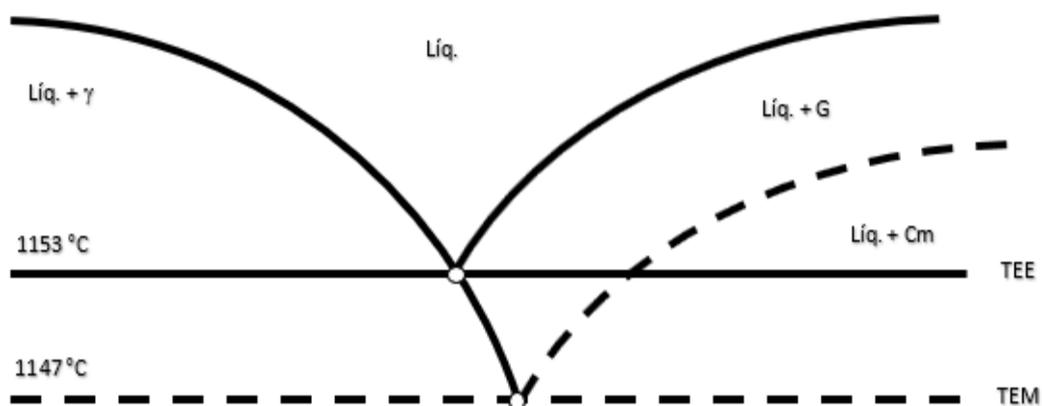
Segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), a produção de fundidos no ano de 2016 ultrapassou os 2 milhões de toneladas, sendo as ligas ferrosas responsáveis por 1.7 bilhão de toneladas. Mesmo com a crise responsável pela redução de cerca de 30% da produção, o setor gerou mais de 50 mil empregos no ano de 2016 (ABIFA, 2016).

3.1 Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos.

O diagrama de equilíbrio Fe-C apresenta duas naturezas: estável e metaestável. A natureza metaestável está relacionada com a formação, durante a solidificação, de austenita e cementita (Fe_3C). Já a natureza estável é função, entre outros fatores, da velocidade de resfriamento, onde a cementita se decompõe em ferro e carbono, dando origem a grafita.

Há uma diferença entre a temperatura e porcentagem de carbono do ponto eutético para os dois estados. Segundo Benz e Elliot o eutético metaestável tem a composição de 4,30 %C a 1147 °C, e o estável tem composição de 4,26 %C a 1153 °C (Figura 1).

Figura 1. Representação da temperatura eutética estável (TEE) e temperatura eutética metaestável (TEM).



Fonte: SANTOS, 1989.

Uma das particularidades dos ferros fundidos é a presença de silício, sendo o elemento de liga mais importante e responsável pela classificação desses como ligas ternárias. As contribuições do silício são a aceleração da decomposição da cementita e a diminuição da solubilidade máxima do carbono na austenita, com isso, há o deslocamento do ponto eutético para esquerda do diagrama.

Por ter uma solidificação análoga as ligas Fe-C, a consideração do silício e de outros elementos de liga nas mudanças estruturais do ferro cinzento é feita através da fórmula do carbono equivalente (CHIAVERINI, 2002).

(Equação 1):

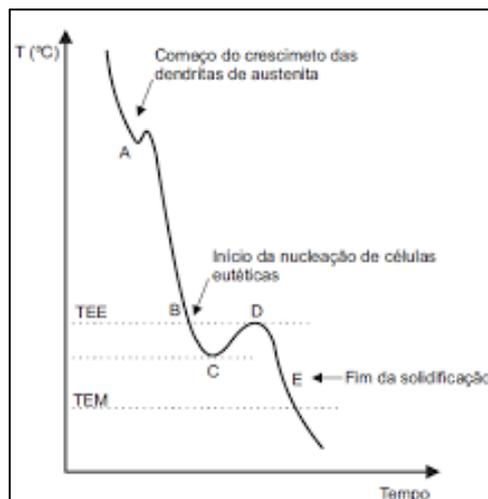
$$C.E = \%C + \frac{1}{3} (\%Si + \%P)$$

Para ligas com valores de carbono equivalente menores que a porcentagem da composição eutética, temos uma composição hipoeutéticas. Aquelas que tem valores

maiores que a porcentagem da composição eutética, temos uma composição hipereutética.

No resfriamento de ligas hipoeutéticas, quando se ultrapassa a temperatura de solidificação ocorre um fenômeno chamado de super-resfriamento. Nesse momento parte do metal permanece líquido e as primeiras dendritas de austenita começam a nuclear e crescer, porém, em determinado momento o metal reaquece devido a energia liberada pela dissociação de alguns núcleos (recalescência). Com a perda de energia para o molde ou para o ambiente o metal acaba solidificando. O segundo super-resfriamento ocorre entre as temperaturas de solidificação estável e metaestável, sendo necessário um resfriamento lento entre essas faixas de temperatura para se obter a formação da grafita (Figura 2).

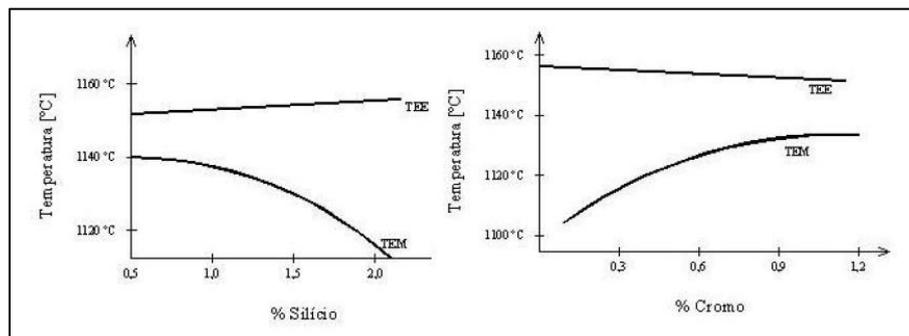
Figura 2: Curva de resfriamento para um ferro fundido hipoeutético.



Fonte: SANTOS, 1989.

Segundo Pieske (1974), alguns elementos têm influência sobre o intervalo de solidificação entre as do eutético estável e metaestável. Os que tem a capacidade de distanciar as linhas de temperatura eutética estável (TEE) e temperatura eutética metaestável (TEM), são conhecidos como elementos grafitizantes, como o silício, alumínio, níquel e cobre. Já os que tem efeito contrário, aproximar as linhas, são conhecidos como elementos formadores de carbonetos: cromo, manganês, vanádio, tungstênio e molibdênio (Figura 3).

Figura 3: Influência de elementos químicos nas temperaturas eutéticas estáveis e metaestáveis.



Fonte: OLDFIELD, 1982.

Com a formação das primeiras dendritas de austenita, há o enriquecimento de carbono no líquido. Ao atingir o a temperatura eutética estável, a composição do banho aproxima-se de 4,3% de carbono, dando início ao crescimento cooperativo das fases eutéticas (austenita e grafita). A solidificação é finalizada quando as dendritas de austenita primária formam uma fase contínua com as dendritas de austenita formadas no eutético (SANTOS, 1989).

Segundo Santos, crescimento dos núcleos eutéticos se dá com uma frente de solidificação de formato esférico. Cada porção que está nucleando e crescendo, ou seja, cada associação esférica de austenita e grafita lamelar, é chamado de célula ou grão eutético. Cada célula eutética é constituída e um agregado de grafita e austenita, onde a grafita está presente como um esqueleto contínuo e ramificado dentro da célula eutética (Figura 4).

Figura 4: Esquema de uma célula eutética.



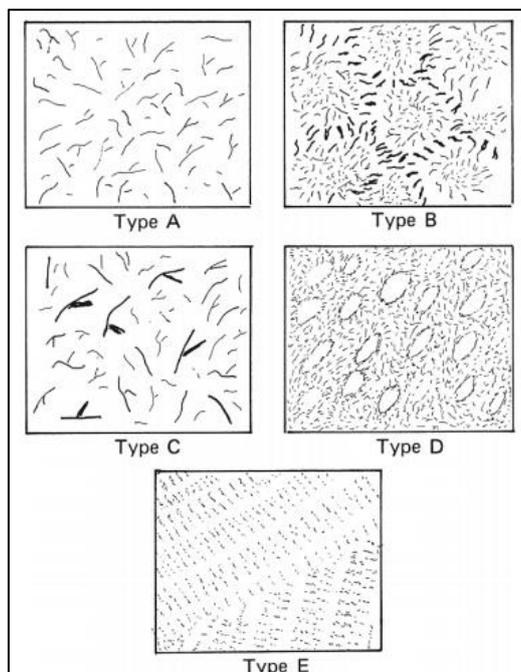
Fonte: MARROGH, 1960.

3.1.1 Morfologia da grafita nos ferros fundidos cinzentos.

O processo de nucleação e crescimento da grafita está diretamente ligado a taxa de resfriamento. Esse processo pode ter variações na velocidade dependendo da intensidade do super-resfriamento, como por exemplo, com o aumento do super-resfriamento obtém-se uma maior quantidade de núcleos e, conseqüentemente, um maior número de células eutéticas. Essa variação no super-resfriamento terá como consequência uma grafita mais fina, já que a velocidade de difusão dos elementos irá reduzir devido ao aumento na velocidade de crescimento (SANTOS, 1989).

Segundo a Norma ASTM A 247, as grafitas são classificadas, em termos de tipo e distribuição, como sendo do tipo A, B, C, D e E (Figura 5).

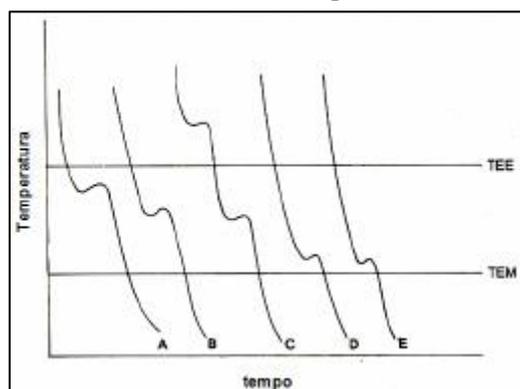
Figura 5: Tipos de grafita.



Fonte: ELLIOT, 1988.

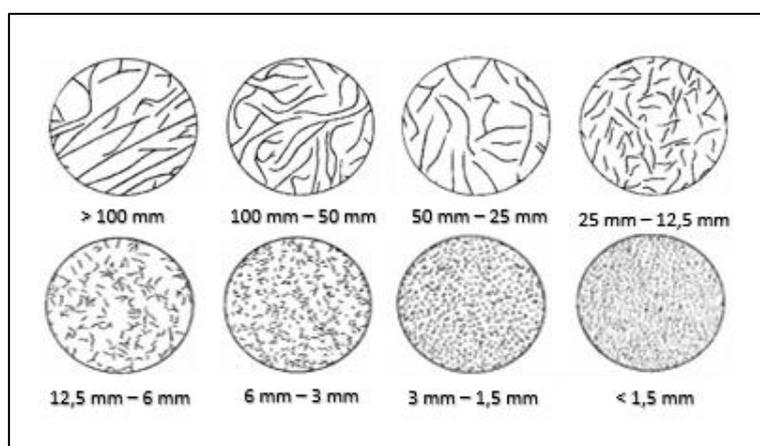
As variações citadas no super-resfriamento (Figura 6) irão ter influência direta na morfologia da grafita: forma, tamanho, distribuição. Ainda segundo a Norma ASTM A 247, existe um padrão para classificar a grafita com relação ao seu tamanho, com faixas que vão de 100 até 1,5 mm, como observado na Figura 7.

Figura 6: Relação entre o super-resfriamento e as diversas formas de grafita.



Fonte: SANTOS, 1989.

Figura 7: Classificação quanto ao tamanho das lamelas da grafita.



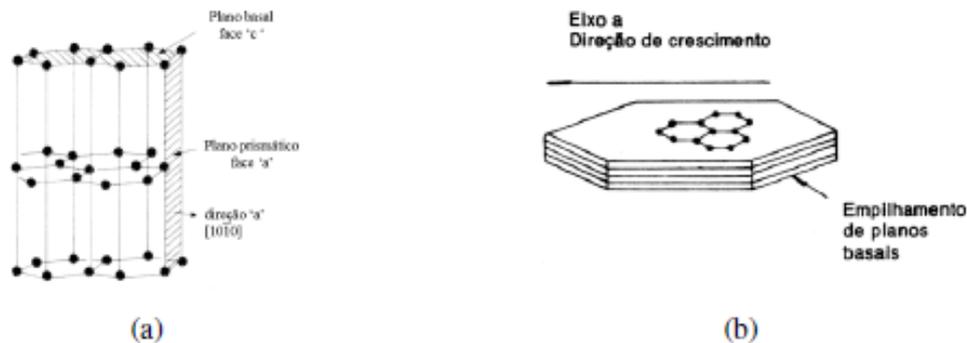
Fonte: ASTM A 247.

No banho, a grafita irá nuclear sob substratos oriundos da inoculação. Elementos como o enxofre, manganês, oxigênio propiciam a formação de centros que favorecem a nucleação heterogênea da grafita. Os elementos que auxiliam a nucleação devem ter uma estrutura cristalina semelhante à da grafita, além de apresentar uma elevada estabilidade termodinâmica no líquido e um elevado ponto de fusão, acima da temperatura de solidificação do ferro fundido (LOPER, 1999).

A grafita tem uma estrutura cristalina hexagonal compacta (Figura 8-a), tendo um crescimento preferencial no plano basal (direção "c"). No entanto, a presença de elementos tensoativos, como enxofre e oxigênio, altera o crescimento da grafita. Esses elementos irão adsorver no plano prismático e diminuir a energia de interface, favorecendo o crescimento nesses planos (direção "a"). O crescimento no plano basal

irá formar grafitas esferoidais e o crescimento no plano prismático formará lamelas (Figura 8-b).

Figura 8: (a) Cristalografia da grafita. (b) Direção de crescimento da grafita lamelar.



Fonte: SANTOS, 1989.

3.1.2 Influência das variáveis de processo na solidificação de ferros fundidos cinzentos.

O conceito de solidificação abrange os processos de nucleação e crescimento, sendo esses responsáveis pelas propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas dos ferros fundidos cinzentos. Importantes variáveis do processo irão influenciar diretamente na nucleação e crescimento, sendo importante destacar três dessas variáveis: composição química, velocidade de resfriamento e tratamentos do banho. Trabalhando-se para otimizar e controlar esses três parâmetros, deve-se obter a combinação ideal entre gráfica e matriz com intuito de atender determinada aplicação.

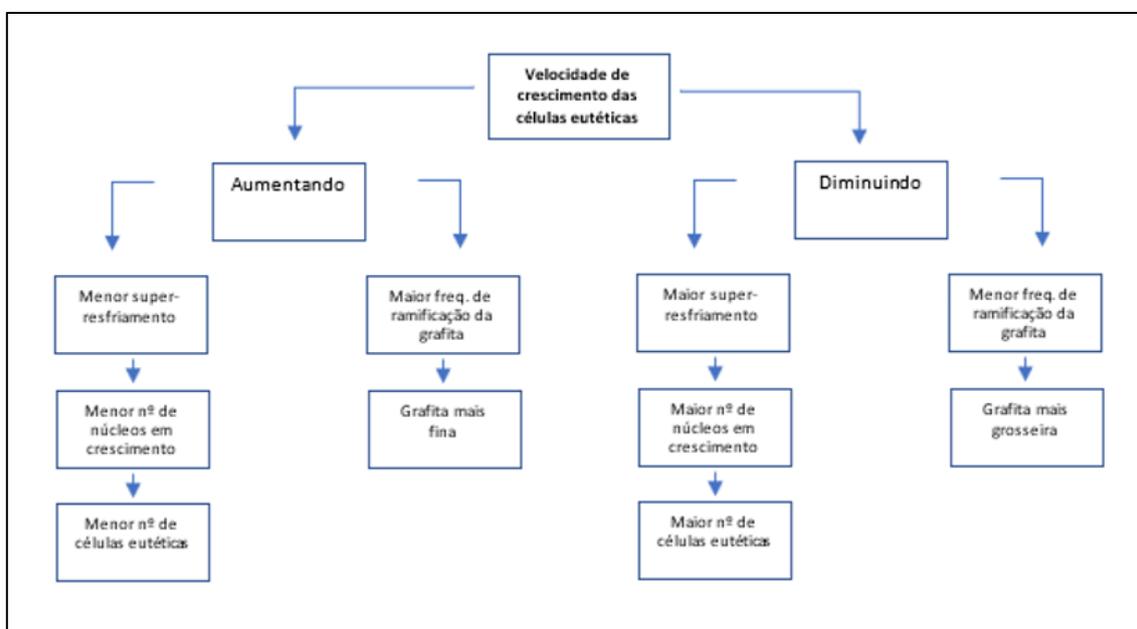
3.1.2.1 Composição química.

Como já discutido anteriormente, alguns elementos têm a capacidade de distanciar as curvas de temperatura metaestável e estável, ou aproximá-las. No entanto, essa não é a única função dos elementos de liga: a adição de silício e manganês, por exemplo, irá impactar diretamente na velocidade de crescimento das células eutéticas, onde um crescimento rápido propiciará a formação da grafita do tipo A. Dessa forma, quanto maior a velocidade de crescimento, menor será o super-resfriamento (SANTOS, 1989).

Outros elementos terão mais de um impacto no momento da solidificação. O enxofre, além de favorecer o crescimento da grafita na direção do plano prismático, também se combina com o manganês e forma substratos para nucleação da grafita. Esses substratos irão aumentar a quantidade de células eutéicas que, conseqüentemente, diminuirão o super-resfriamento necessário para solidificação e aumentarão a velocidade de crescimento (PIESKE, 1974).

De modo geral, temos uma influência significativa da composição química na velocidade de crescimento das células eutéicas, alterando, dessa forma, no grau de super-resfriamento (Figura 9).

Figura 9: Representação da influência da velocidade de crescimento na solidificação.



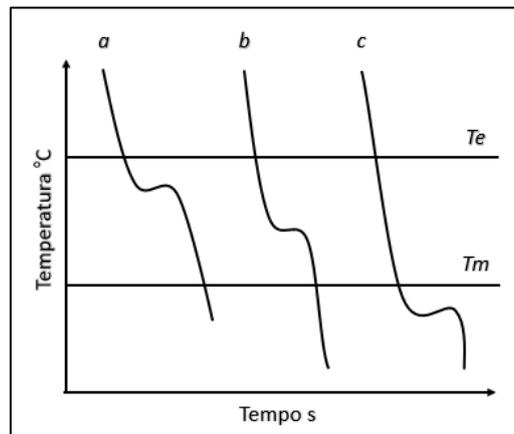
Fonte: SANTOS, 1989.

3.1.2.2 Velocidade de resfriamento

A velocidade de resfriamento está relacionada a alguns fatores: espessura da peça, tipo de molde e temperatura de vazamento. Maiores velocidades de resfriamento estão ligadas a peças mais delgadas e a moldes com uma maior capacidade de extração de calor.

A variação da velocidade de resfriamento, fixando todos os outros parâmetros, para um mesmo banho pode ser observada a seguir (Figura 10):

Figura 10: Influência da velocidade de resfriamento sobre o super-resfriamento.



Fonte: PIESKE, 1975.

Na curva “a” observamos um resfriamento lento, onde o calor latente de solidificação (calor liberado pela nucleação e crescimento de células eutéticas) se equipara ao calor extraído pelo molde, iniciando o fenômeno da recalescência e dando origem a grafitas do tipo A. Na curva “b” o metal é resfriado de forma mais intensa, passando pela temperatura de super-resfriamento da curva “a” e tendo o início da recalescência em uma temperatura mais baixa, já que a quantidade de calor extraída era maior e a velocidade de crescimento também. Na curva “c” a velocidade de resfriamento é tão alta que ultrapassa os intervalos entre a temperatura eutética estável e metaestável, tendo estímulo termodinâmico para a nucleação e crescimento do eutético apenas após cruzar a linha da temperatura de solidificação metaestável (SANTOS, 1989).

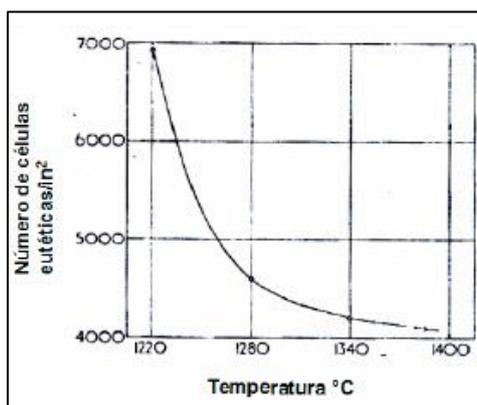
Analisando as curvas de resfriamento, observa-se que nessas condições pré-determinadas, o super-resfriamento irá aumentar com o acréscimo da velocidade de resfriamento do banho.

Para alterar a taxa de resfriamento, alguns parâmetros do processo podem ser modificados. Alterar a espessura do molde e/ou o material que o constitui tem influência direta na velocidade de extração de calor. Outra variável a se modificar é a espessura da peça, já que a massa está diretamente ligada a velocidade de resfriamento. Variar a temperatura de vazamento, utilizando temperaturas mais altas, terá um reflexo direto na velocidade de solidificação (SANTOS, 1989).

Com baixas temperaturas de vazamento, o gradiente térmico peça/molde é consideravelmente grande e irá contribuir para uma maior taxa de resfriamento. Vazando o metal com temperaturas mais elevadas, o tempo para se diminuir o gradiente térmico peça/molde, antes que se atinja a temperatura de solidificação, será maior e diminuirá a taxa de resfriamento.

Além da velocidade de crescimento, o número de núcleos e, conseqüentemente, o número de células eutéticas irão aumentar com o aumento da velocidade de resfriamento. Portanto, vazando o metal com baixas temperaturas (próximas a temperatura de solidificação) também aumentará as variáveis acima (Figura 11). Como consequência da diminuição da temperatura de vazamento, haverá o refino da estrutura e um aumento na possibilidade de se obter ferro fundido branco (PIESKE, 1974).

Figura 11: Efeito da temperatura de vazamento no número de células eutéticas.



Fonte: MORROGH, 1960.

3.1.2.3 Tratamentos do banho metálico.

O grau de nucleação do banho, ou seja, número de nódulos disponíveis para o crescimento das células eutéticas pode ser diretamente influenciado pelas outras duas variáveis discutidas anteriormente.

Diante da complexidade da influência do tratamento do banho na solidificação dos ferros fundidos cinzentos, cada parâmetro deve ser cuidadosamente estudado, já que uma mesma variável pode ter diferentes comportamentos conforme os parâmetros do processo são alterados.

A quantidade de inoculante depende do peso da peça, onde o Fe-Si (75% de Si) é um dos mais usados, devendo ter granulometria controlada, sendo pequeno o suficiente para que se dissolvam rapidamente e suficientemente grandes para que não se oxidem ou fiquem flutuando no banho (SANTOS, 1989).

Além da granulometria e tipo de inoculante, as ligas devem ter um intervalo controlado entre o início do tratamento e o início da solidificação do metal. Esse intervalo pode afetar o tempo de "*fading*", já que o aumento do tempo entre essas duas etapas causa a diminuição da eficiência do inoculante, aumento o super-resfriamento e diminuindo o número de células eutéticas. Portanto, as consequências do "*fading*" são o aumento da formação de carbonetos e a alteração das propriedades dos ferros fundidos cinzentos.

Uma técnica comum na produção de ferro fundido cinzento é a adição de Fe-Si com granulometria controlada, mais refinada, no momento do vazamento do metal na peça, melhorando as condições grafitizantes com a diminuição do super-resfriamento e o aumento do número de células eutéticas momentos antes da solidificação.

Outro tratamento, agora visando a dissociação de núcleos instáveis e a homogeneização do banho, é o superaquecimento. Manter a carga fundida ao longo do tempo em uma determinada temperatura provoca esse superaquecimento, diminuindo os efeitos da instabilidade do banho. É essencial, após o superaquecimento, a nucleação e crescimento de novos sítios com a posterior inoculação do banho.

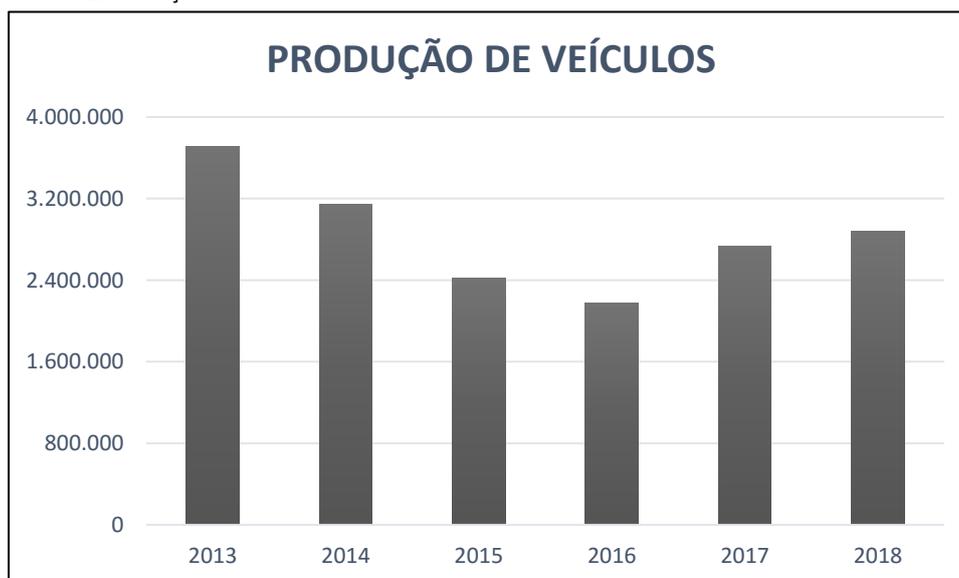
3.2 O uso da sucata nas fundições

Nas fundições o uso da sucata é essencial nos carregamentos, reduzindo os custos e otimizando o processo. A receita praticada em diversas fundições consiste na adição de sucata de aço, sucata de ferro fundido, retorno do processo, gusa e ferro-ligas, onde é feito o balanço de massa para atender a composição química que se deseja.

A sucata de aço é gerada em diversos processos de fabricação, ou pode ser oriunda do descarte de algum bem pela sociedade. Toda essa sucata antes de ser reaproveitada nas fundições, necessita ser coletada e beneficiada. Essa sucata pode ser comercializada nas suas diversas formas de beneficiamento, variando quanto à densidade e dureza, sendo essas duas características, além da composição química, as grandes responsáveis pela variação de preço da sucata.

A disponibilidade da sucata no mercado é cíclica, tendo sua geração ligada ao momento financeiro das indústrias. A geração de sucata de processo das indústrias automobilística é uma das principais fontes das fundições e, segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos (ANFAVEA), a produção de veículos passou por uma queda brusca no ano de 2015, tendo uma leve recuperação apenas no ano de 2017. Essa queda, em função da crise econômica que afetou o país, teve um reflexo direto na geração de sucata (Gráfico 1).

Gráfico 1: Produção de veículos nos últimos seis anos.



Fonte: ANFAVEA.

Para grande parte das fundições a preparação da sucata acaba sendo um grande desafio. Para atender as especificações inerentes ao processo de fusão da carga, a sucata usada nos fornos de indução deve seguir uma série de exigências no momento da sua preparação, focando na dimensão e na densidade de carga. Garantir um fluxo de carregamento rápido e contínuo, manter a carga o mais compactada possível e obedecer às sequências de carregamento, são fatores importantes para a economia de tempo e de custo.

Na preparação, com intuito de preservar a segurança dos operadores e manter o bom desempenho do forno, deve-se reduzir a quantidade de impurezas da sucata. É comum em sucatas obsoletas a presença de vidro, madeira, óleo e demais impurezas que devem ser reduzidas no momento do beneficiamento, podendo essas causar desde contaminações até explosões da carga.

3.2.1 Sucata galvanizada

Além do beneficiamento, outro fator importante a se considerar é a composição química da sucata utilizada. O controle dos contaminante presentes nas sucatas provenientes dos descartes feitos pela sociedade é de difícil realização e elementos como o enxofre, fósforo, chumbo, e zinco podem estar presentes nas cargas metálicas, causando efeitos indesejáveis nas propriedades dos ferros fundidos.

Tratando-se do zinco, esse elemento está presente em sucatas galvanizadas, que têm volume considerável no mercado, pois o processo de galvanização é um dos mais eficientes no combate a corrosão de superfícies. No cenário atual, as indústrias automobilísticas são grandes produtores de sucata zincada, tendo como vantagem o fornecimento dessa sucata em uma composição química controlada e já beneficiada na dimensão necessária, pronta para o carregamento dos fornos elétricos de indução (Figura 12).

Figura 12: Sucata galvanizada.



Fonte: Próprio autor.

Outro fator a se considerar é a capacidade de reaproveitamento do zinco que não incorpora no banho, pois o mesmo pode ser reciclado infinitamente sem qualquer perda de suas propriedades químicas e físicas (Fonte). O zinco acaba evaporando durante o processo de fusão e é coletado pelo sistema de desempoeiramento junto com outros elementos provenientes da carga metálica. Segundo a USGS (*United States Geological Survey*), apenas nos anos de 2015 e 2016 foram recicladas mais de 170 toneladas de zinco.

3.3 Processo de galvanização

O zinco é o elemento mais eficiente em termos de custo e de meio ambiente como proteção do aço contra a corrosão, ajudando a poupar recursos naturais (minério de ferro e energia) através do prolongamento da vida útil dos produtos que utilizam esse tipo de proteção.

A galvanização, ou zincagem, é o processo de aplicação de uma camada superficial de zinco com intuito de proteger o substrato contra a corrosão. A galvanização, além de formar uma camada protetora, tem o zinco como um ânodo de sacrifício que continua protegendo o substrato mesmo com a danificação da camada superficial (GENTIL, 1982).

O processo mais conhecido de galvanização é a imersão a quente. O processo consiste em mergulhar a peça em um banho de zinco e esperar que ela atinja a

temperatura do banho, dando início a difusão do zinco para superfície da peça (Figura 13). A camada superficial tem a presença de algumas fases constituídas por zinco e ferro, sendo a camada mais externa composta apenas por zinco (GENTIL, 1982).

Figura 13: Processo de galvanização.



Fonte: Autor desconhecido.

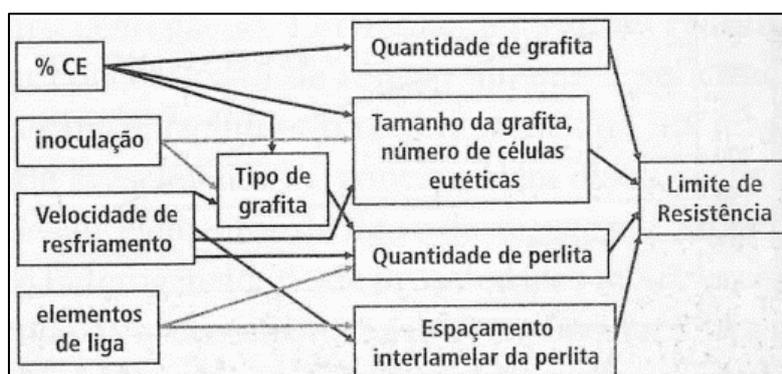
Existem algumas especificações de espessura para cada tipo de produto, mas em geral as espessuras estão compreendidas entre 305 a 610 g/m², ou uma média de 65 µm de espessura. Tratando-se do reaproveitamento desse tipo de material como carga metálica para os fornos, há uma quantidade considerável de zinco em sua composição, podendo causar efeitos indesejáveis caso não sejam usadas na proporção correta.

3.4 Propriedades estáticas dos ferros fundidos cinzentos

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos estão diretamente ligadas ao tipo de matriz e a grafita. Por ter baixa resistência mecânica, a grafita se comporta como uma região de acúmulo de tensões, de modo que quanto maior a quantidade de grafita e quanto maiores as partículas de grafita, menor é a resistência mecânica. Com relação à matriz, maiores porcentagens de perlita contribuem para o aumento da resistência, assim como o refino das lamelas de perlita (SANTOS, 1989).

O tipo de grafita tem total influência no tipo de matriz formada. A grafita de super-resfriamento, tipo D, facilita a formação de ferrita devido à baixa distância de difusão do carbono (GUESSER, 2009). Essa relação direta entre propriedades mecânicas e microestrutura pode ser modificada com a variação de alguns parâmetros de processo, como por exemplo: teor de carbono, teores de elementos de liga, inoculação e velocidade de resfriamento (Figura 14).

Figura 14: Efeitos da microestrutura e de variáveis de processo sobre o limite de resistência em ferro fundido cinzento.

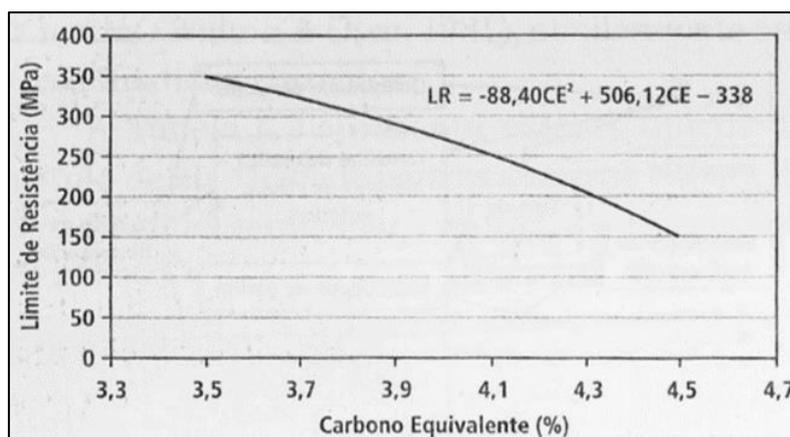


Fonte: GUESSER, 2009.

3.4.1 Influência dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas

O carbono equivalente da liga tem influência no limite de resistência, causando o aumento da quantidade e principalmente do tamanho das partículas de grafita. Com esses acréscimos, o aumento do carbono equivalente e do tamanho da grafita irá causar a diminuição do limite de resistência (Figura 15). Como outros elementos também influenciam o carbono equivalente, o acréscimo da composição desses também afeta o limite de resistência.

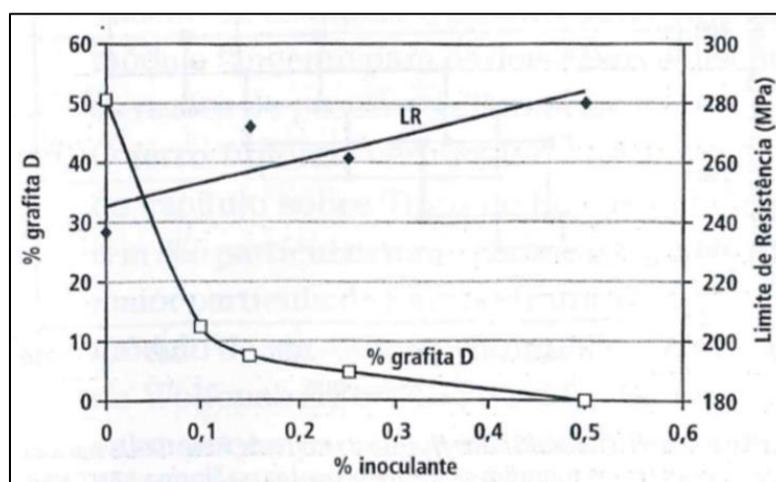
Figura 15: Efeito do Carbono Equivalente sobre o Limite de Resistência de ferros fundidos cinzentos.



Fonte: GUESSER, 2009.

Outro parâmetro que afeta as propriedades mecânicas é o grau de inoculação do banho. A inoculação do banho aumenta o número de células eutéticas, refinando a grafita e aumentando a quantidade de regiões intercelulares que devem ser rompidas no processo de fratura (GUESSER, 2009). O grau de inoculação também afeta a matriz, tendo relação com formação da grafita tipo D e, conseqüentemente, formação de uma matriz ferrítica (Figura 16).

Figura 16: Efeito da inoculação sobre a quantidade de grafita de super-resfriamento e limite de Resistência de ferros fundidos cinzentos.

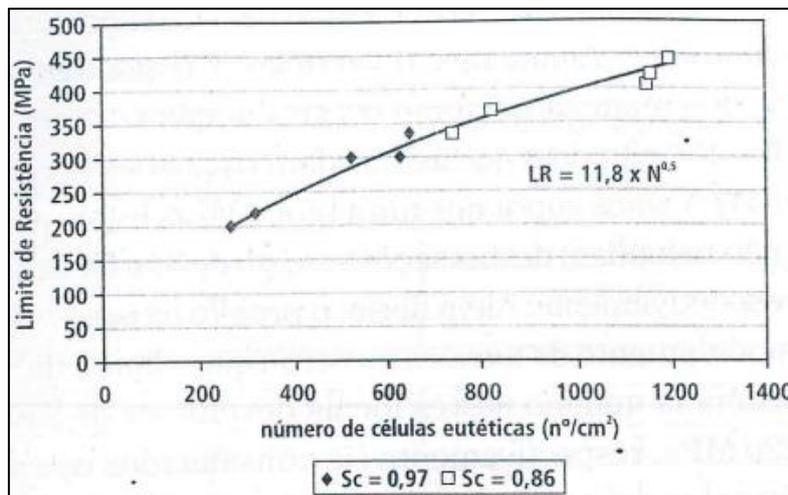


Fonte: GUESSER, 2009.

A Figura 17 apresenta a influência do número de células eutéticas no limite de resistência dos ferros fundidos cinzentos. Com o aumento do número de células

eutéticas pode ser observado um aumento no limite de resistência devido a influência desse parâmetro na formação da grafita do tipo A, geralmente associada a matriz perlítica.

Figura 17: Efeito da inoculação sobre a quantidade de grafita de super-resfriamento e limite de Resistência de ferros fundidos cinzentos.



Fonte: GUESSER, 2009.

3.5 Influência do zinco nas propriedades do ferro fundido cinzento

A influência do zinco nas propriedades dos ferros fundidos ainda é um tema pouco abordado, tendo em vista que a presença desse elemento na preparação de carga para a fabricação de materiais fundidos só surgiu após o aumento considerável do uso de aço galvanizado pelas grandes montadoras.

A composição máxima de zinco permitida em peças de ferro fundido cinzento ainda não tem um valor especificado. Um trabalho publicado pela BCIRA (*B.C industrial Relations Association*) cita que o zinco não tem uma faixa aplicável para ferros fundidos cinzentos, citando apenas que a presença do elemento tende a retardar a grafitação e promover a formação de uma matriz ferrítica.

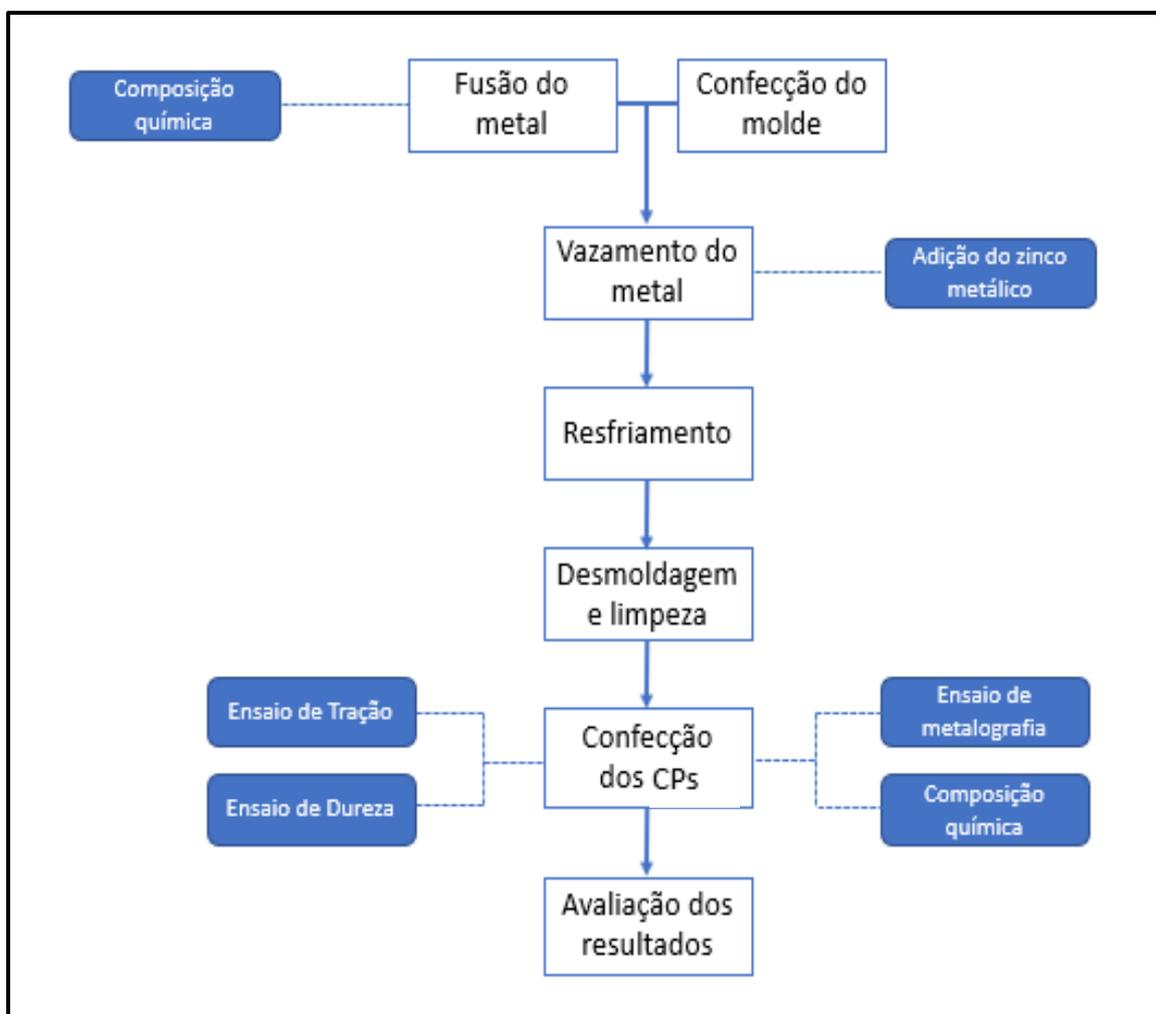
Em uma outra análise, Hiratsuka afirma que uma certa quantidade de zinco é favorável para formação de porosidades, *pin holes*, e deterioração da grafita do ferro fundido cinzento, afetando de forma considerável as propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Por ser um elemento com baixo ponto de ebulição, 907 °C, comparado ao ponto de fusão dos demais componentes das cargas para obtenção do ferro fundido, há uma grande formação de gases no momento da fusão. Esse fator pode justificar o aparecimento de porosidades em peças fundidas com alta composição de zinco, porém o mecanismo que causa as alterações na microestrutura ainda carece de estudos mais aprofundados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho está apresentada na Figura 18 através de um fluxograma.

Figura 18: Fluxograma do trabalho.



Fonte: Próprio autor.

4.1 Preparação das cargas

Visando estudar o efeito do zinco nas propriedades do ferro fundido cinzento, foram fundidos num forno de indução da Inductotherm com potência de 3000 KW e capacidade de 5400 toneladas, gusa, sucata de aço e sucata de ferro fundido nas seguintes proporções: 20% de gusa, 50% de sucata de aço e 30% de sucata de ferro fundido.

Os elementos de liga foram adicionados para corrigir a composição segundo a Tabela 1. Retirou-se uma pastilha do forno para avaliar a composição química do metal antes do vazamento.

Tabela 1: Composição química do metal.

	% C	% Si	% Mn	% S	% Cr	% Cu	% Sn	% P
Máx.	3,48	2,20	0,85	0,11	0,60	0,08	0,11	0,06
Mín.	3,30	2,00	0,70	0,08	0,30	-	0,06	-

Fonte: Próprio autor.

A composição de zinco foi controlada através da adição de zinco metálico em pó da marca Dinâmica (com teor mínimo de zinco de 99,8%) no molde instantes antes do vazamento do metal. As proporções de zinco foram calculadas através de um balanço de massa (Equação 2) baseado no peso do corpo de prova e na composição química do metal líquido, tendo como meta de composição desejada valores próximos ao máximo de cada faixa. Para compensar possíveis perdas, acrescentou-se a mais um valor de 10% do peso calculado. Procurou-se obter as seis faixas de composição química indicadas na Tabela 2.

(Equação 2):
$$M_{Zn} = \frac{C_{oZn} - C_{Zn}}{R_{PM}} * P_{CP}$$

C_{oZn} : Composição inicial de zinco

C_{Zn} : Composição desejada de zinco

R_{PM} : Rendimento do pó de zinco metálico

P_{CP} : Peso do corpo de prova

M_{Zn} : Massa de zinco a ser adicionada no molde

Tabela 2: Composição de zinco nos corpos de prova.

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
% Zn Máx.	0,05	0,10	0,15	0,20
% Zn Mín.	0	0,05	0,10	0,15

Fonte: Próprio autor.

4.2 Vazamento do corpo de prova e parâmetros de processo

Após a fusão, mediu-se a temperatura e a carga metálica foi transferida para panela de vazamento de aproximadamente 1000 Kg, adicionando-se FeSi com granulometria de 2 a 10 mm realizando uma pré-inoculação do banho.

O molde foi vazado e simultâneo ao vazamento do metal, um jato de FeSi com granulometria de 0,15 a 0,85 mm foi adicionado, possibilitando a inoculação dentro do molde. Na etapa de vazamento foram controlados o tempo de vazamento, o peso de inoculante adicionado no molde e a temperatura de vazamento. O peso do inoculante foi calculado de acordo com a Equação 2.

(Equação 2):
$$P. \text{INOCULANTE} = 0,011 * P_{CP}$$

O metal foi vazado em um molde de areia verde confeccionado com auxílio da máquina de moldagem Georg Fisher, utilizando uma pressão de moldagem de 270 bar.

O molde seguiu na linha de moldagem e teve um tempo de resfriamento de 210 minutos, com uma taxa de resfriamento de aproximadamente 4,5 °C/min, sendo desmoldado e enviado para o jateamento com intuito de remover o excesso de areia e facilitar a preparação dos corpos de prova.

Os parâmetros de processo que foram acompanhados nas etapas discutidas estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de fusão, vazamento e resfriamento.

Parâmetros controlados	
Temperatura no forno fusor	1420 - 1520 °C
Peso da pré-inoculação	20 – 22 Kg
Temperatura de vazamento	1300 - 1360 °C
Peso do inoculante	250 g
Tempo de vazamento	15 – 25 s
Peso da peça	22 – 23 Kg

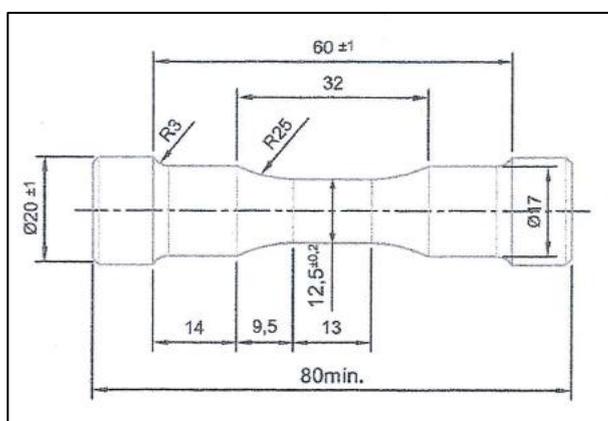
Fonte: Próprio autor.

4.3 Preparação das amostras

Após vazamento, resfriamento e limpeza, cada peça foi cortada em três partes, tendo uma delas dimensão próxima a do corpo de prova a ser torneado. Foram preparados corpos de prova para o ensaio de dureza e composição química, um para ensaio de tração e o último para ensaios metalográficos.

O corpo de prova para o ensaio de tração foi confeccionado seguindo as recomendações da Norma ASTM a-48 em um torno convencional (Figura 19). Para o ensaio de dureza e composição química, as amostras foram cortadas na seção transversal do corpo de prova e preparadas utilizando lixas com granulometria de 80 e 200 mashes. Para os ensaios metalográficos, as amostras foram lixadas utilizando lixas de granulometria de 80 a 1200 mashes, polidas com pasta de diamante de 3 μm a 1 μm , atacadas com nital 2% para revelação da matriz e com persulfato de amônia para revelação dos carbonetos.

Figura 19: Corpo de prova para ensaio de tração segundo a Norma ASTM a-48.



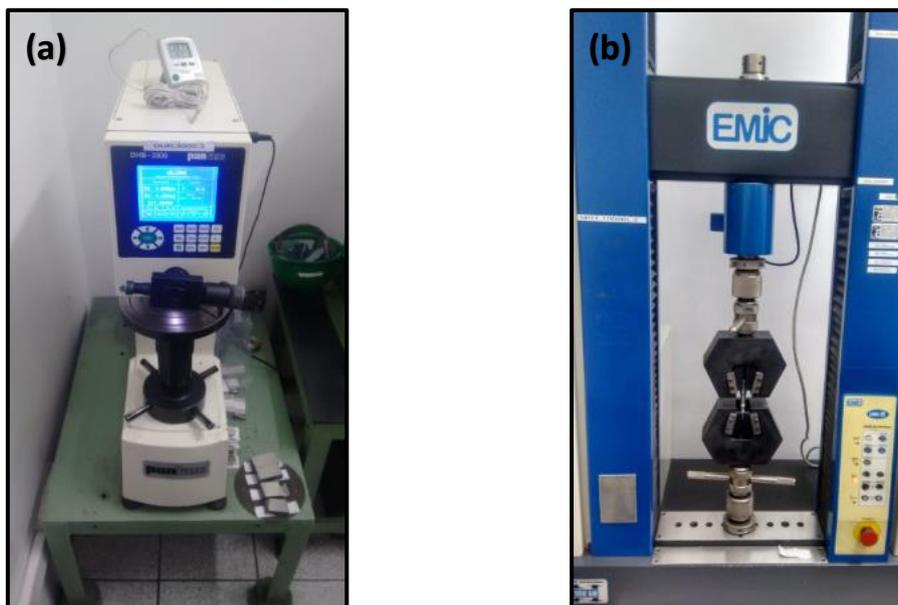
Fonte: ASTM a-48.

4.4 Ensaios mecânicos e metalográficos

Foram medidas as composições químicas das seis amostras utilizando o espectrômetro de emissão ótica Spectro (modelo SpectroLab) para confirmar a composição de zinco em cada uma delas.

Após a confirmação das composições químicas, os ensaios mecânicos de tração e dureza foram realizados. O ensaio de tração das quatro amostras foi realizado na máquina de tração universal EMIC (modelo DL1000 – capacidade 100 KN), segundo a norma ABNT 6892:2016 (Figura 20-a). A dureza Brinell dos corpos de prova foi medida com um durômetro Pantec (modelo DHB 3000), com um penetrador de esfera de 10 mm de diâmetro e carga de 3000 kgf, conforme norma ABNT 6506-1:2015 (Figura 20-b).

Figura 20: (a) Durômetro Pantec (b) Máquina de tração EMIC.



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios metalográficos foram realizados com auxílio do microscópio Zeiss (modelo Axio Vert.A1). A quantificação, morfologia e tipo de grafita foram caracterizadas de acordo com a norma ASTM A247-10. As metalografias foram feitas com aumento de 100x. Além da análise microestrutural da grafita, também foi realizada a caracterização do tipo de matriz e a proporção de carbonetos presentes nas amostras através do analisador de imagens.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Composição química, tempo e temperatura de vazamento

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises químicas das ligas fundidas, destacando-se os valores do zinco.

Tabela 4: Composição química das amostras.

	% C	% Si	% Mn	% S	% Cr	% Cu	% Sn	% P	% Zn	Zn ESPERADO
CP 01	3,46	2,18	0,712	0,089	0,499	0,0781	0,103	0,054	0,0238	0,05 %
CP 02	3,42	2,00	0,762	0,102	0,543	0,0663	0,119	0,055	0,0704	0,10 %
CP 03	3,43	2,00	0,814	0,095	0,538	0,0539	0,120	0,057	0,11	0,15 %
CP 04	3,36	2,03	0,807	0,076	0,327	0,0296	0,060	0,034	0,173	0,20 %

Fonte: Próprio autor.

O tempo e a temperatura de vazamento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Temperatura e tempo de vazamento.

	Temperatura (°C)	Tempo (s)
CP 01	1349	13
CP 02	1342	13
CP 03	1337	14
CP 04	1345	13

Fonte: Próprio autor.

As composições químicas que estavam fora da faixa especificada foram corrigidas com a adição de ferro-ligas. Com relação a adição de pó de zinco metálico, calculou-se a massa a ser adicionada segundo a Equação 1 e esses valores podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6: Massa de zinco adicionada e rendimento.

	Massa (g)	Rendimento (%)
CP 01	6	99
CP 02	21	78
CP 03	35	78
CP 04	48	80

Fonte: Próprio autor.

Com uma composição de 99,8%, esperava-se um rendimento superior aos 99%, porém o rendimento foi abaixo dos 99% usado nos cálculos. Observou-se essa problemática principalmente nas adições de maior massa, tendo o pó de zinco metálico um rendimento abaixo dos 80% para adições acima de 15 gramas. O rendimento abaixo do esperado pode ser justificado pela reação acelerada causada pelo contato direto entre o pó de zinco metálico e o metal em altas temperaturas, provocando a evaporação instantânea de parte da massa adicionada ao corpo de prova.

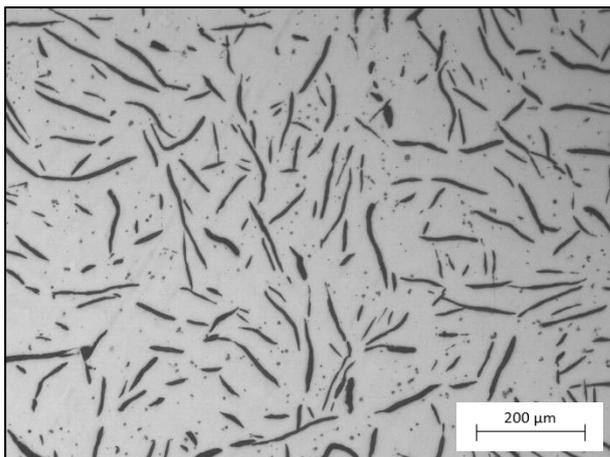
5.2 Caracterização microestrutural

5.2.1 Classificação da grafita

Para os quatro teores de zinco analisados (0,0238%, 0,0704%, 0,11% e 0,17%), evidencia-se apenas a presença da grafita de morfologia tipo A, indicando que os teores de zinco nessa faixa de composição não exercem efeito sobre a forma da grafita. Com relação ao tamanho da grafita, para os quatro corpos de prova, observou-se uma predominância da grafita tipo 4, excluindo a possibilidade dessas três faixas de composição terem influência sobre o tamanho da grafita (Figura 21, 22, 23 e 24).

Figura 21: Metalografia do CP1. Aumento: 100x - sem ataque.

(a) Tipo da grafita.



Fonte: Próprio autor.

(b) Tamanho da grafita.

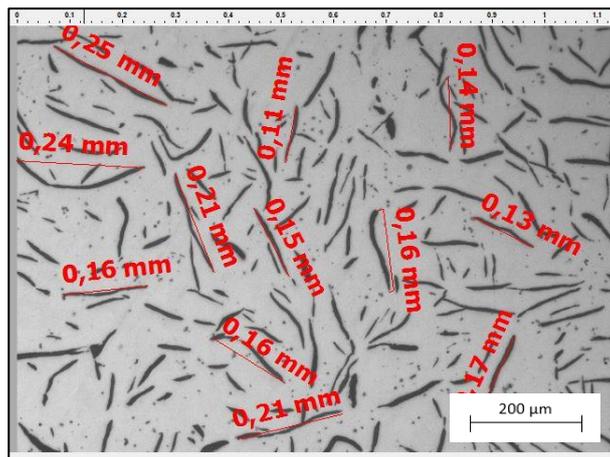
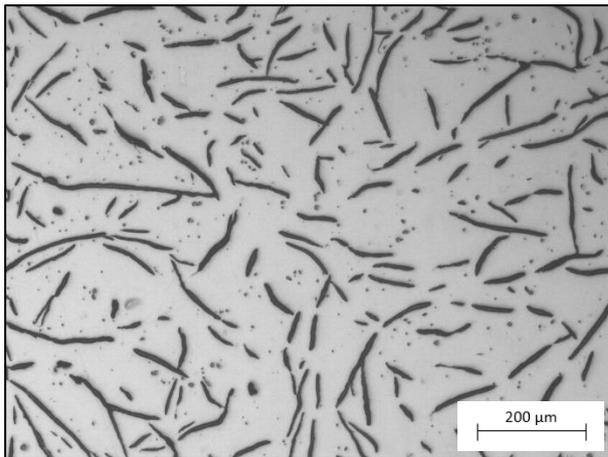


Figura 22: Metalografia do CP2. Aumento: 100x - sem ataque.

(a) Tipo da grafita.



Fonte: Próprio autor.

(b) Tamanho da grafita.

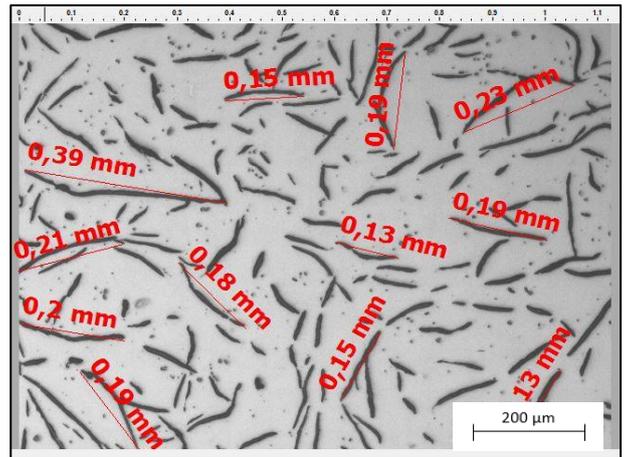
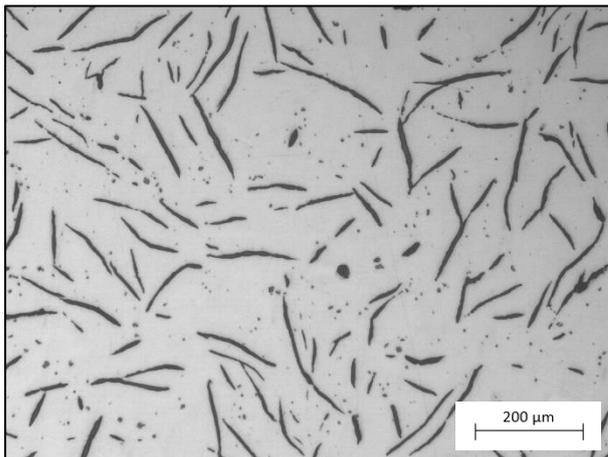


Figura 23: Metalografia do CP3. Aumento: 100x - sem ataque.

(a) Tipo da grafita.



Fonte: Próprio autor.

(b) Tamanho da grafita.

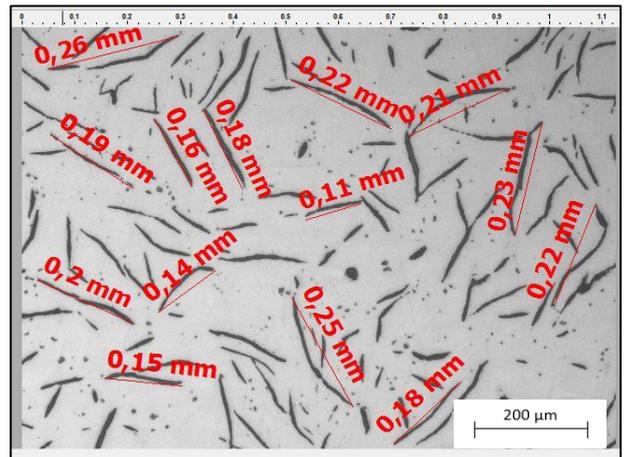
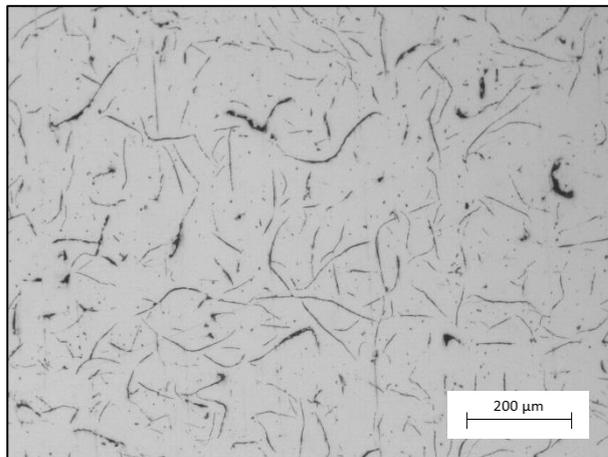


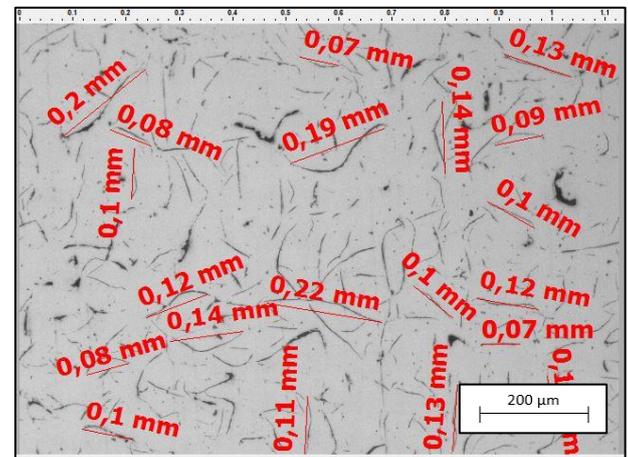
Figura 24: Metalografia do CP4. Aumento: 100x - sem ataque.

(a) Tipo da grafita.



Fonte: Próprio autor.

(b) Tamanho da grafita.



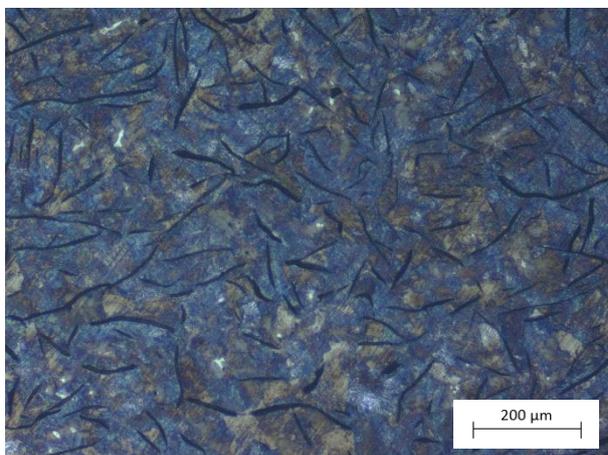
5.2.2 Classificação da matriz

Analisando a matriz referente aos quatro primeiros corpos de prova, Figura 25, 26, 27 e 28, não foi observada alteração diante do aumento do percentual de zinco. Como demonstrado na Figura 29, observou-se uma matriz formada por dois tipos de perlita: uma com um menor espaçamento entre as lamelas (perlita fina) e outra com um maior espaçamento (perlita grosseira).

A matriz perlítica se enquadra nos padrões exigidos pela Norma SAE J431/2000 (ferrita < 5% da matriz), que visam garantir a resistência ao desgaste.

Figura 25: Metalografia do CP1. Ataque com Nital 2%.

(a) Aumento de 100x.



Fonte: Próprio autor.

(b) Aumento de 500x.

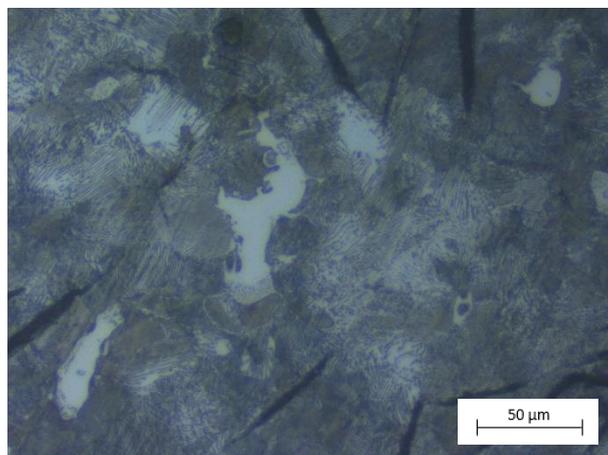
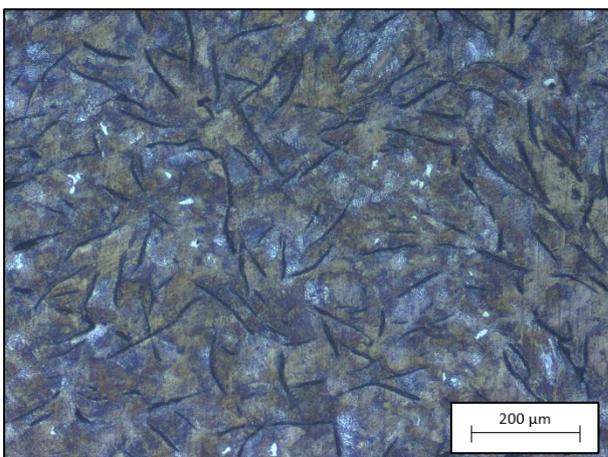


Figura 26: Metalografia do CP2. Ataque com Nital 2%.

(a) Aumento de 100x.



Fonte: Próprio autor.

(b) Aumento de 500x.

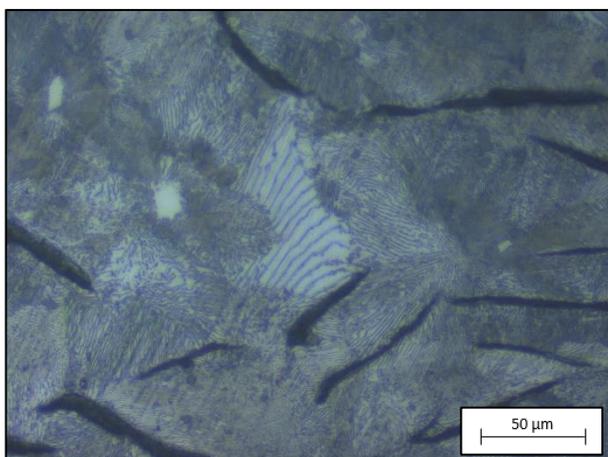
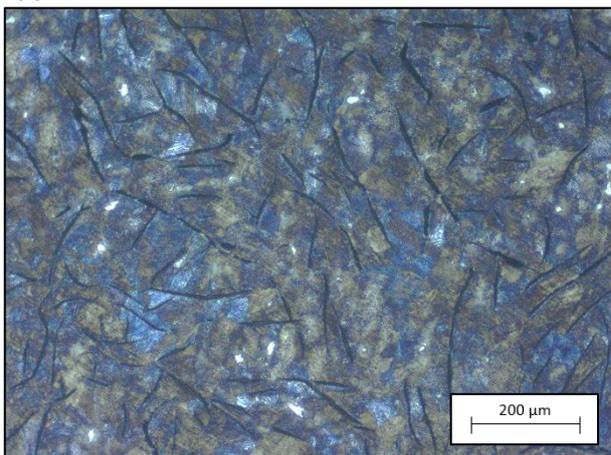


Figura 27: Metalografia do CP3. Ataque com Nital 2%.

(a) Aumento de 100x.



Fonte: Próprio autor.

(b) Aumento de 500x.

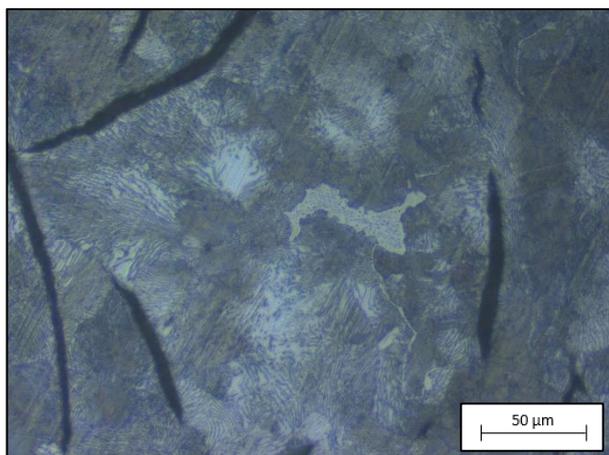
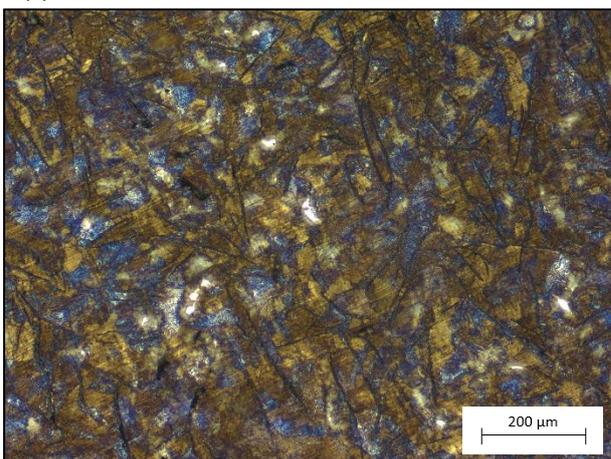


Figura 28: Metalografia do CP4. Ataque com Nital 2%.

(a) Aumento de 100x.



Fonte: Próprio autor.

(b) Aumento de 500x.

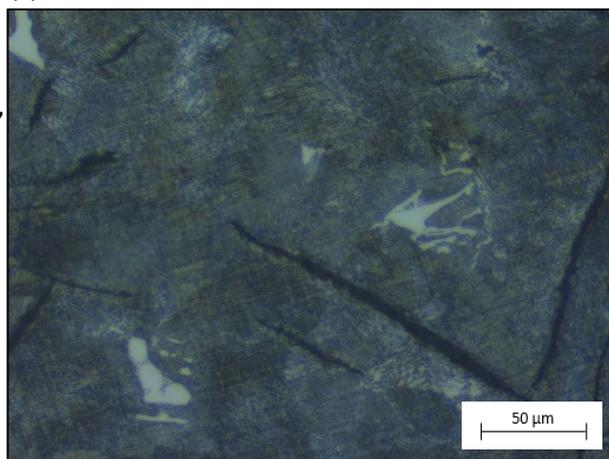
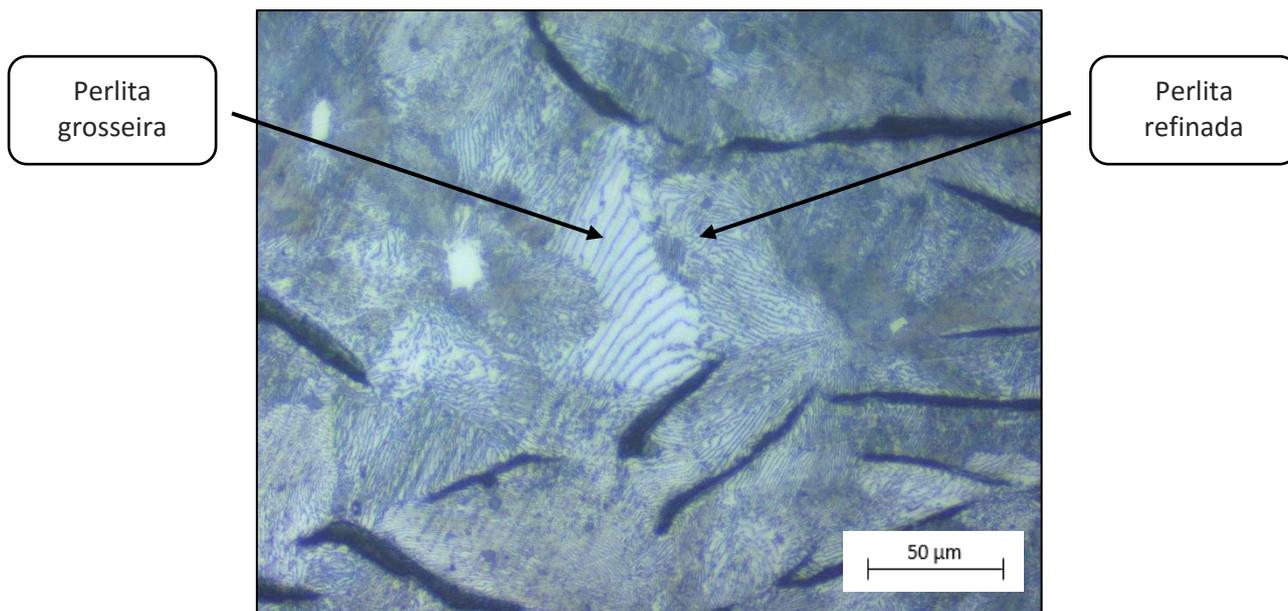


Figura 29: Matriz perlítica. Aumento 500x - ataque com Nital 2%.



Fonte: Próprio autor.

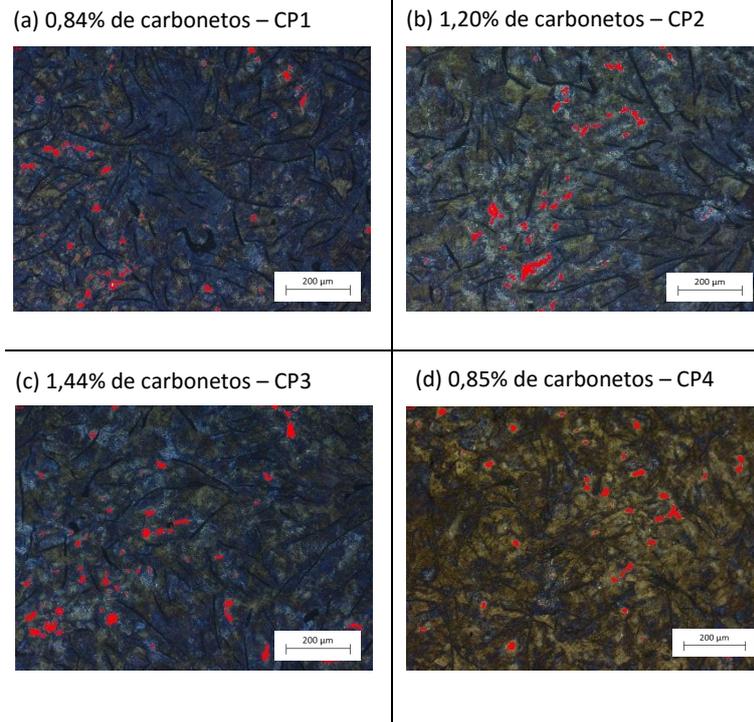
5.2.3 Quantificação dos carbonetos

A presença de carbonetos na matriz tem influência direta nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos. Por terem uma elevada dureza, se comparados a matriz, os carbonetos aumentam significativamente a dureza e a resistência ao desgaste. Porém, sua presença deve ser controlada, pois interferem diretamente na usinabilidade dos componentes fundidos.

Observou-se uma alteração na proporção de carbonetos presentes na matriz. Porém, junto com o aumento da porcentagem de zinco, as porcentagens de cromo e manganês tiveram um acréscimo na composição do CP2 e CP3, se comparados a composição do CP1 e CP4 (Figura 30). Por serem fortes formadores de carboneto, o aumento diretamente proporcional entre a composição desses elementos e a quantidade de carbonetos é esperado. Diante desse fato, não se observou uma alteração na quantidade de carbonetos relacionado diretamente ao aumento da porcentagem de zinco.

A quantidade de carbonetos se enquadra nos padrões exigidos pela Norma SAE J431/2000 (carbonetos < 5% da matriz), que visam garantir as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento G2500.

Figura 30: Proporção de carbonetos na matriz.



Fonte: Próprio autor.

5.3 Avaliação das propriedades mecânicas

Ao analisar os valores de dureza e resistência a tração, observa-se uma maior dureza nos corpos de prova que tiveram uma composição mais alta de cromo e manganês, apresentando uma porcentagem mais elevada de carbonetos distribuídos na matriz perlítica (Tabela 7).

Os limites de resistência a tração tiveram valores dentro do esperado, diante da matriz, tipo e forma da grafita (Tabela 7).

Os valores de dureza e limite de resistência a tração estão dentro do padrão da Norma SAE J431/1996 referente a classe dos ferros fundidos cinzentos G2500.

Tabela 7: Valores de dureza e limite de resistência a tração.

	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência (Kg/mm ²)
CP 01	198	23,86
CP 02	206	25,68
CP 03	205	24,39
CP 04	200	25,50

Fonte: Próprio autor.

5.4 Considerações finais

Diante da metodologia e parâmetros de processo utilizados, observou-se que as quatro composições químicas apresentaram resultados favoráveis com relação aos ensaios mecânicos, morfologia da grafita e tipo de matriz. Para as quatro faixas de composição química, as propriedades se mantiveram constantes e dentro dos padrões do ferro fundido G2500. Com relação a proporção de carbonetos, não foram observadas alterações com o aumento da porcentagem de zinco.

Foram realizados alguns vazamentos com composição de zinco acima dos 0,20%. Devido à forte reação do pó de zinco metálico no momento do vazamento, os corpos de prova que tiveram uma maior porcentagem de zinco em sua composição, apresentaram alguns defeitos de fundição provenientes da liberação de gases ocasionada pela reação. Os defeitos comprometeram a integridade dos corpos de prova, inviabilizando a realização dos ensaios mecânicos e a obtenção de resultados satisfatórios. Portanto, esses resultados não foram apresentados.

Com a introdução dessa nova variável relacionada aos defeitos de fundição gerados pelo aumento da composição de zinco, novas investigações são necessárias para esclarecer a real causa do surgimento dos defeitos: estando esses diretamente relacionados ao aumento da porcentagem de zinco, ou a formação de gases gerados pela forte reação entre o metal e o pó de zinco metálico.

Não foi encontrado um limite máximo de zinco tolerável sem que haja alteração nas propriedades metalúrgicas e mecânicas especificadas. Pelo fato das composições acima de 0,20% não terem apresentado corpos de prova dentro de um padrão tolerável, o percentual de 0,173 foi o limite máximo encontrado através dos ensaios e metodologia adotada no trabalho.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, concluiu-se que:

- Para as variações de zinco na composição química dentro dos parâmetros utilizados, não se observou uma variação nas propriedades mecânicas, tendo em vista que os resultados estiveram dentro da faixa especificada para os ferros fundidos G2500.
- A morfologia da grafita não teve variações causadas pelo aumento de zinco na composição do metal, bem como a proporção de carbonetos e o tipo de matriz.
- Diante da metodologia e ensaios adotados, 0,173% foi o limite máximo encontrado para o teor de zinco, mantendo as propriedades mecânicas e metalúrgicas dentro do especificado.

7. TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar uma metodologia que permita o vazamento de corpos de prova com uma maior composição de zinco, avaliando a influência desse aumento no surgimento de defeitos de fundição.
- Realizar novos ensaios mecânicos para composições acima de 0,173%, avaliando a influência do aumento da composição nas propriedades do ferro fundido cinzento.
- Analisar a matriz com auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), realizando ensaios de EDX e verificando a presença de zinco distribuído ao longo da matriz.
- Analisar os carbonetos formados na matriz com auxílio dos ensaios de EDX, buscando avaliar sua composição, além de verificar a influência de maiores percentuais de zinco na sua formação.
- Avaliar as faixas de percentual de zinco alterando os demais parâmetros do processo, como inoculação, tempo de vazamento e temperatura de vazamento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. ABIFA. **Site da ABIFA**. Disponível em: <www.abifa.org.br>. Acesso em: 15 mai.2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ISO 6892:2016**. Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente. Brasil, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NM-ISO 6506:2015**. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell. Brasil, 2015.

ASTM A247-10 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings. **ASTM International**, 2010.

ASTM A48-16 Standard Specification for Gray Iron Castings. **ASTM International**, 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.

DE LIMA, Caetano et al. REMOÇÃO DE ZINCO DE SUCATA DE AÇO GALVANIZADO PARA VIABILIZAR A RECICLAGEM DA LAMA FINA DE ACIARIA LD. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 10, n. 2, 2013.

ELLIOTT, Roy. **Cast iron technology**. Butterworth-Heinemann, 1988.

GARCIA, A. M.; SOBRAL, L.; MONTEIRO, D. **RECUPERAÇÃO DE ZINCO DE SUCATA DE AÇO GALVANIZADO**.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. Blucher, 2009.

HIRATSUKA, Sadato et al. Influence of steel scrap on microstructure and mechanical properties of spheroidal graphite cast iron. **Materials transactions**, v. 44, n. 7, p. 1419-1424, 2003.

PIESKE, A.: CHAVES F., L.M & GRUHL, A.H **Efeito de algumas variáveis metalúrgicas no controle de estrutura de ferros fundidos cinzentos**. Joinville, 1974.

PIESKE, Adolar et al. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. Joinville: Sociedade Educacional Tupy, 1980.

SAE J431/2000. Automotive gray iron castings. 2000

SANTOS, Adalberto B. de S.; BRANCO, Carlos HC. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares.** IPT, v. 100, p. 198, 1989.

VASQUES, Antônio Cruz. Relatório técnico 83: reciclagem de metais no país. **Ministério de Minas e Energia (MME)**, 2009.

VILELA, Fernando J. et al. **NA OBTENÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR FERRÍTICO NO ESTADO BRUTO DE FUNDIÇÃO.**