

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
IVO SANTOS FREITAS

**ESTUDO SOBRE LIGAS DE FERRO FUNDIDO: PROCESSOS DE FUNDIÇÃO,
INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA, O CARBONO EQUIVALENTE E
SUAS APLICABILIDADES**

FORMIGA – MG

2018

IVO SANTOS FREITAS

ESTUDO SOBRE LIGAS DE FERRO FUNDIDO: PROCESSOS DE FUNDIÇÃO,
INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA, O CARBONO EQUIVALENTE E SUAS
APLICABILIDADES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG,
como requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Me. Antônio J. dos Santos
Júnior

FORMIGA – MG
2018

F866 Freitas, Ivo Santos.

Estudo sobre ligas de ferro fundido: processos de fundição, influência da composição química, o carbono equivalente e suas aplicabilidades / Ivo Santos Freitas. – 2018.

55 f.

Orientador: Antônio José dos Santos Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Carbono. 2. Equivalente. 3. Fundição. I. Título.

CDD 671

Ivo Santos Freitas

ESTUDO SOBRE LIGAS DE FERRO FUNDIDO: PROCESSOS DE FUNDIÇÃO,
INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA, O CARBONO EQUIVALENTE E
SUAS APLICABILIDADES

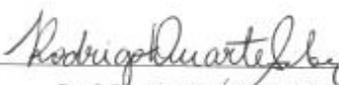
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química do UNIFOR-MG, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Mé. Antônio J. dos Santos Júnior

Orientador



Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva

UNIFOR-MG



Prof. Rosiéne Gonzaga de Jesus Pimenta

UNIFOR-MG

Formiga, 14 de novembro de 2018.

Este trabalho foi possível somente devido ao apoio primeiramente a Deus, e ao apoio de meus pais nos momentos difíceis que tive de enfrentar até conseguir me tornar uma pessoa capaz de realizar aquilo que se propõe, ser responsável, ser um profissional melhor, uma pessoa melhor. Aos meus pais Dalton e Olga agradeço por me ajudarem a me tornar a pessoa e o profissional que eu precisava ser, sei que sempre poderei contar com seu apoio sempre para o que se fizer necessário.

“A prática sem a teoria é cega. A teoria sem a prática é estéril”.

Vladimir Ilyich Ulyanov

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e forças para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Dalton e Olga, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Sem vocês nada deste sonho seria possível, e torná-lo possível junto a vocês o torna mais gratificante para mim.

Ao meu tio e padrinho Gaspar Santos que sempre me apoiou no que se fez necessário.

Aos meus amigos Alisson Santos, Natália Cristina e Maria Carolina por todo apoio nos momentos de dificuldades e de alegrias. Pelo companheirismo ímpar que me dedicaram, por todas as brincadeiras e conselhos que fizeram de mim de certo modo um profissional capaz de entender significado do que é compreensão e empatia.

A faculdade que me oportunizou a janela de oportunidades e possibilidades que hoje vislumbro em um novo horizonte, com a confiança no mérito e ética que me foram ensinados.

Ao meu orientador Antônio Santos pelo suporte, no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos, pelo apoio para este trabalho, pelo profissionalismo e ética, e companheirismo que teve durante esta jornada.

As empresas as quais trabalhei desde que me ingressei no mercado de trabalho pelas oportunidades de agregação de valores e conhecimento a mim oferecidas, e pelas possibilidades de novas ideias que somente pude desenvolver pelos desafios a mim impostos.

Aos profissionais Clodoaldo dos Santos e Edson Rabelo pelo apoio e idealização deste projeto.

A todos os professores que me acompanharam desde a minha trajetória até onde estou hoje pelo modo como me ensinaram que os detalhes fazem a diferença.

RESUMO

A indústria de fundição de ferro é de extrema importância nos ramos de engenharia mecânica, elétrica, química, e outras. Este tipo de indústria conta com vários processos para que haja um produto final de qualidade. Neste trabalho são citados o processo de modelagem, sistemas de enchimento, macharia, moldação, fusão, e resfriamento. Este trabalho contempla a demonstração das principais classes de ferro fundido, suas estruturas metalográficas, suas composições básicas e algumas propriedades. São apresentados os principais elementos que compõem um liga metálica de ferro fundido e suas principais aplicações no metal líquido, e no sólido final. São apresentadas as influências dos teores de carbono, silício e fósforo na liga na forma de carbono equivalente, demonstrando o ponto eutético do ferro fundido, e apresentando suas aplicações e restrições, de acordo com a aplicação que deseja-se obter para um determinado tipo específico de geometria que cada peça apresenta. Restrições como redução de propriedades mecânicas como limite de resistência à tração e dureza. E aplicações estas como aumentar a fluidez do metal líquido, reduzir seu ponto de fusão, reduzir porosidades e rechupes. Com este trabalho observa-se que a composição química desempenha um papel importante nos ferros fundidos, e o carbono equivalente possibilita a aplicação dos ferros fundidos em peças de alto grau de complexidade, tanto geométricas quanto de especificações mecânicas.

Palavras Chaves: Carbono. Equivalente. Fundição.

ABSTRACT

The iron casting industry is of extreme importance in fields of mechanical, electrical, chemical and other. This type of industry has several processes for a final quality product. In this work are mentioned the process of modeling, filling systems, male manufacturing, molding, fusion, and cooling. This work includes the demonstration of the main classes of cast iron, its metallographic structures, its basic compositions and some properties. We present the main elements that make up a cast iron alloy and its main applications in the liquid metal, and in the final solid. The influence of carbon, silicon and phosphorus in the alloy in the form of carbon equivalent, showing the eutectic point of the cast iron, and presenting its applications and restrictions, according to the application that is desired for a specific type of geometry that each piece presents. Restrictions as reduction of mechanical properties as limit of tensile strength and hardness. And applications such as increasing the fluidity of liquid metal, reducing its melting point, reduce porosity and empty caused by contraction. This work shows that the chemical composition plays an important role in the cast iron, and the equivalent carbon enables the application of the cast iron in pieces of high degree of complexity, both geometric and mechanical specifications.

Keywords: Carbon. Equivalent. Foundry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Fluxograma da sequência básica de um processo de fundição em areia.....	19
Figura 02 – (a) Modelo Inteiriço e (b) Modelo Bipartido.....	20
Figura 03 – (a) e (b) Modelos Maciços com Marcação de Macho.....	21
Figura 04 – Modelos (a) em Esqueleto, (b) em Chapelona, e (c) em Gabarito.....	21
Figura 05 – Formas de Partição.....	22
Figura 06 – Ângulo de Saída β	23
Figura 07 – Representação de um molde por moldagem nua sendo vazado.....	27
Figura 08 – Representação de moldagem de poço.....	27
Figura 09 – Caixa de paredes retas com dobradiças.....	28
Figura 10 – Caixa de parede inclinada com linguetas extraíveis.....	29
Figura 11 – Caixas de abertura com paredes inclinadas de movimentos limitados.....	29
Figura 12 – Caixa simples com paredes inclinadas e lisas.....	30
Figura 13 – Percentual de fornos nos parques industriais de fundições de ferro fundido.....	31
Figura 14 – Esquema básico das zonas de um forno cubilô.....	32
Figura 15 – Esquema de construção de um forno a indução de cadinho.....	34
Figura 16 – Esquema da corrente induzida, e do campo eletromagnético no cadinho.....	34
Figura 17 – Tipos (distribuições) de grafita em ferros fundidos cinzentos.....	39
Figura 18 – Aspecto micrográfico de um ferro fundido nodular.....	41
Figura 19 – Forma das grafitas em 5 (cinco) classes diferentes de ferro fundido.....	42
Figura 20 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	45
Figura 21 – Diagrama de Henderson para ferros fundidos nodulares.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Coeficientes Típicos de Contração Linear de Metais.....	24
Tabela 02 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos.....	37
Tabela 03 – Classes de ferro fundido branco para aplicação de mineração etc.....	40
Tabela 04 – Efeitos estruturais de alguns elementos químicos no ferro fundido.....	44
Tabela 05 – Composição química (m/m) para ferro fundido cinzento para componentes.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS

%C	Percentual de Carbono (m/m)
%C _{Eq}	Percentual Carbono Equivalente
%Mn	Percentual de Manganês (m/m)
%P	Percentual de Fósforo (m/m)
%Si	Percentual de Silício (m/m)
(FeMn) ₃ C	Carboneto de Ferro-Manganês
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
C	Carbono
C _{Eq}	Carbono Equivalente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DIN	Instituto Alemão de Padronização
Fe ₃ C	Carboneto
Fe ₃ P	Fosfeto de Ferro
Kgf/mm ²	Quilograma-Força por Milímetro Quadrado
m/m	Relação massa por massa
Mg	Magnésio
Mg-Fe-Si	Nodularizante Magnésio-Ferro-Silício
MgS	Sulfeto de Magnésio
Mn	Manganês
MnS	Sulfeto de Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Mega Pascal
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
S _c	Grau de Saturação de Carbono Equivalente
Si	Silício
Sn	Estanho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos Gerais	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 JUSTIFICATIVA	16
4 METODOLOGIA	17
5 REFERENCIAL TEÓRICO	18
5.1 Breve Histórico sobre o Ferro Fundido	18
5.2 Processo de Fundição em Areia	19
5.2.1 Introdução	19
5.2.2 Modelação: Modelos e Caixa de Machos	19
5.2.2.1 Material de Fabricação do Modelo	21
5.2.2.2 Métodos e Especificações para Confecção de Modelos	22
5.2.2.2.1 Métodos de Partição do Modelo	22
5.2.2.2.2 Ângulo de Saída	22
5.2.2.2.3 Redimensionamento Devido à Contração	23
5.2.3 Areias de Moldagem	24
5.2.3.1 Classificação Generalizada das Areias de Moldagem	24
5.2.3.2 Componentes Básicos de uma Areia Silicosa de Moldagem	24
5.2.3.2.1 Areia-Base	25
5.2.3.2.2 Aglomerantes	25
5.2.3.2.2.1 Aglomerantes Orgânicos	25
5.2.3.2.2.2 Aglomerantes Inorgânicos	26
5.2.3.2.2.3 Aglomerantes Sintéticos	26
5.2.3.2.3 Areias Não-Silicosas	26
5.2.4 Moldagem	26

5.2.4.1 Moldagem por Blocos em Caixas	27
5.2.4.1.1 Tipos de Caixas de Moldagem Desmontáveis.....	28
5.2.5 Fusão	30
5.2.5.1 Fornos Cubilô.....	31
5.2.5.2 Fornos a Indução a Cadinho.....	33
5.3 Contração e Sistemas de Enchimento.....	34
5.3.1 Resfriamento e Contração	35
5.4 Ferros Fundidos.....	35
5.4.1 Definição e Classificação dos Tipos de Ferro Fundido	35
5.4.2 Especificações das Classes de Ferros Fundidos	36
5.4.2.1 Ferro Fundido Cinzento.....	36
5.4.2.2 Ferro Fundido Branco.....	39
5.4.2.3 Ferro Fundido Nodular ou de Grafita Esferoidal	41
5.5 Influência da Composição Química nos Ferros Fundidos	41
5.5.1 Silício.....	42
5.5.3 Fósforo.....	43
5.5.4 Manganês	43
5.5.5 Enxofre.....	44
5.5.6 Magnésio	44
5.5.7 Outros Elementos	44
5.5.8 Carbono.....	45
5.5.8.1 Ligas Eutéticas, Hipoeutéticas, e Hipereutéticas	45
5.5.8.2 Carbono Equivalente e suas Aplicações	46
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fundição apresentaram uma evolução significativa nos últimos séculos, sendo que o domínio do processo como um todo fez com que os fundidos se tornassem cada vez mais precisos e aplicáveis.

Como supracitado, este advento de precisão foi possível apenas pelo domínio do conjunto inteiro que se denomina técnica de fundição, que engloba desde o domínio das técnicas de moldagem e macharia, o domínio das técnicas de fundir, o domínio das técnicas de rebarbação, até o domínio das ligas que compõe o ferro fundido. Entretanto esta última técnica, talvez tenha sido a de maior relevância para o processo em si.

O aprimoramento do controle sobre as ligas de ferro fundido possibilitou uma maior aplicabilidade para este material, uma vez que o ferro fundido por si só não apresenta características suficientes para ser amplamente utilizado em ramos da engenharia devido a sua fratura frágil, dentre outras propriedades mecânicas que não são interessantes à indústria e seus segmentos.

As ligas utilizadas nos ferros fundidos têm possibilitado uma competição mais acirrada com o aço, uma vez que o aço contém propriedades mais interessantes à engenharia que o ferro fundido puro. A inserção destas ligas possibilitou que o ferro fundido adquirisse algumas propriedades de aplicabilidade aos ramos de engenharia mecânica, como o ramo automobilístico, engenharia elétrica, como bobinas ferromagnéticas, e a engenharia química, como revestimento de caldeiras de destilaria.

A introdução destes elementos de liga possibilitou a criação de classes de ferro fundido que segundo Chiaverini (2012), dividem-se em ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e ferro fundido de grafita compacta. Estas classes se subdividem em uma infinidade de classes especificadas por normas como a DIN (Instituto Alemão de Padronização) e ASTM (Sociedade Americana para Testes e Materiais).

Uma série de fatores influenciam na determinação de uma classe de ferro fundido, sendo que a sua microestrutura é um dos fatores de maior relevância. Entretanto para que se obtenha um tipo de microestrutura definida pelas normas de referência, ou por especificação técnicas de produtos, a composição química é crucial para tanto.

A composição química junto às técnicas de resfriamento definem a microestrutura, uma vez que a geometria de uma determinada peça interfere de forma direta em seu resfriamento,

alterando sua estrutura micrográfica. Com isso a composição química é um dos fatores que influenciam diretamente na microestrutura, definindo, conseqüentemente, algumas propriedades mecânicas, além de influenciar diretamente na sanidade interna da peça a ser fundida.

A composição química será o fator de maior relevância neste trabalho, apresentando sua influência na fluidez do ferro fundido, na formação da grafita e da cementita, além da influência da mesma nas propriedades mecânicas dos materiais.

Serão apresentados os processos comumente utilizados em fundição para que haja um conhecimento prévio das técnicas praticadas nestes processos, e assim será apresentada a relevância da composição química no ferro fundido para aplicabilidade em engenharia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Demonstrar a influência do carbono e da composição química dos elementos de liga, no processo de fundição de ferro.

2.2 Objetivos Específicos

Apresentar o processo de fundição e seus conceitos básicos, e algumas técnicas que os mesmos requerem.

Apresentar as classes de ferro fundido mais comuns e algumas propriedades.

Demonstrar como elementos de liga como magnésio, silício, manganês, cromo, fósforo, cobre, dentre outros, tem influência em propriedades físicas do metal líquido, e mecânicas no sólido resultante do processo.

Demonstrar a relevância do carbono equivalente em propriedades físicas essenciais do metal líquido, e nas mecânicas do sólido resultante.

3 JUSTIFICATIVA

As aplicações do ferro fundido em processos de vários ramos da engenharia, principalmente no setor mecânico, vêm crescendo desde a criação de novas ligas para este material. Entretanto as exigências quanto à sanidade interna e propriedades mecânicas das peças produzidas com este tipo de material, também cresceram.

Para a obtenção dos requisitos supracitados a composição química deste material apresenta influência direta, em específico o carbono equivalente em conjunto com elementos de liga. Para tanto este trabalho apoia-se no ponto de apresentar o carbono equivalente como uma possível solução para problemas como rechupes (vazios causados devido as contrações que o metal líquido e o sólido resultante sofrem), porosidades (vazios gerados pela má fluidez do metal líquido, má formação da grafita, gases gerados pelo molde e/ou pelo metal, entre outros fatores) em peças, e propriedades mecânicas. E a melhoria da técnica do processo de fusão, com aumento de fluidez e redução de ponto de solidificação.

O processo de fundição em si não possui uma quantidade significativa de trabalho teóricos e experimentais com referências confiáveis, apenas trabalhos antigos com fins apenas de ensinar as práticas dos processos, e não visam consolidar a teoria como base para a prática do processo. Este trabalho apresenta novas perspectivas para o desenvolvimento de artigos e trabalhos técnicos para o fim de desenvolvimento de ferros fundidos para novas aplicações industriais, com processos com menores custos que os materiais metálicos utilizados atualmente. Como por exemplo o ferro fundido vermicular que fora desenvolvido com o objetivo de sanar problemas comuns em blocos de motores, como a baixa resistência ao alongamento e baixa dissipação do calor gerado pelo motor.

4 METODOLOGIA

Este trabalho fora desenvolvido com base em revisões de literaturas sobre processos de fundição, e estudos metalúrgicos sobre a influência da composição química no ferro fundido processado.

Desenvolveu-se um esquema sobre o processo de fundição, apresentando os conceitos básicos de um processo de fundição comum em areia, explicitando os processos de modelagem, moldagem, fusão (com os modelos de fornos mais comumente utilizados) e a influência do resfriamento do metal líquido.

Apresentou-se a definição de ferro fundido e suas respectivas classes, e suas respectivas subdivisões, estruturas metalográficas, a influência dos elementos químicos no fundido final, o ponto eutético do ferro fundido, o cálculo do carbono equivalente e seu grau de saturação.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Breve Histórico sobre o Ferro Fundido

O ferro fundido tem sido utilizado há muito tempo. De acordo com Stefanescu¹ (2005 apud COLPAERT, 2008, p.550) “O registro mais antigo de um objeto de ferro fundido é um leão chinês de 500 a.C., enquanto na Europa, esta liga foi introduzida entre os séculos XIII e XV”.

Apesar de o primeiro registro de um objeto ser produzido em ferro fundido datar de 500 a.C., segundo Stefanescu¹ (2005 apud COLPAERT, 2008, p.550), o processo de fundição levou tempo considerável para ser analisado cientificamente. De acordo com Ribeiro² (2008 apud CASOTTI; FILHO; CASTRO, 2011, p.123) “Apenas em 1638 d.C., foram registrados os primeiros estudos científicos sobre a resistência dos metais à ruptura, realizados por Galileu Galilei.”. Ainda segundo Ribeiro² (2008 apud CASOTTI; FILHO; CASTRO, 2011, p.123) “As inovações no método produtivo foram feitas no século XVII, por meio da incarbonização, que consiste na adição de carbono ao ferro – o que daria origem, futuramente, ao aço.”

O processo de fundição foi definido segundo Ferreira (2000, p. 337) como o “ato, efeito, arte ou fábrica de fundir”. Para tanto o ato fundir foi definido segundo Ferreira (2000, p. 337) das seguintes maneiras: “**1.** Derreter, liquefazer (metais). **2.** Lançar metal fundido em molde (1), para solidificar; vaziar. **3.** Incorporar em uma só (várias coisas); juntar, unir. **4.** Fundir (3). **P. 5.** Derreter-se. **6.** Incorporar-se.”.

Conforme supracitado o segmento de fundição baseia-se no conjunto de técnicas necessárias para se derreter o metal, e lançá-lo em seu estado liquefeito ao molde para solidificar.

Segundo Chiaverini (2012), os ferros fundidos caracterizam um grupo de grande importância industrial nas ligas de ferro-carbono, não devido somente as características intrínsecas que este material possui, mas também devido ao desenvolvimento da inserção de elementos de liga, e tratamentos térmicos para a produção de ferro fundido nodular, que viabilizaram a aplicação deste material no ramo da engenharia, onde era exclusiva a aplicação do aço.

¹STEFANESCU, D. M. **Solification and modeling of cast iron – A short history of the defining moments**. Materials Science and Engineering A, 2005, v. 413-414, p.322-333.

²RIBEIRO, R. A. C. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal-mecânico**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

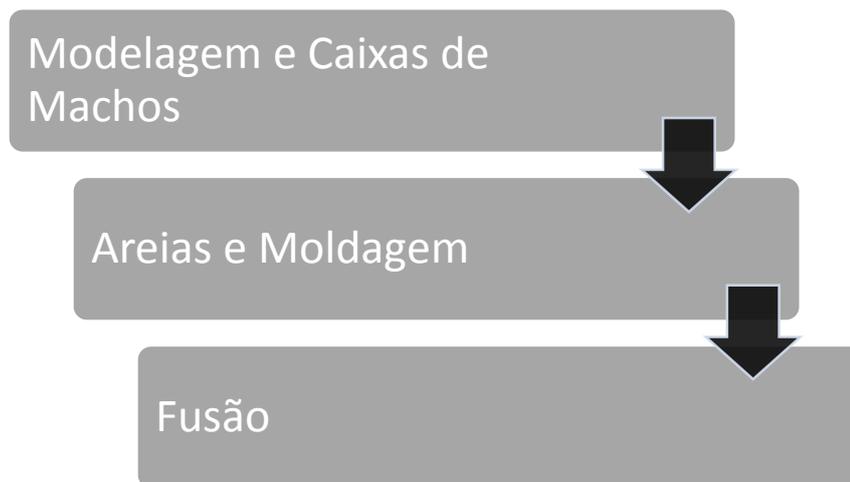
5.2 Processo de Fundição em Areia

5.2.1 Introdução

Embora existam outros processos de fundição, neste trabalho será tratado apenas a fundição em areia, pois segundo Soares (2000, p. 7) a moldagem em areia é, ainda, o método de moldação mais difundido no mercado devido a sua versatilidade econômica.

Este tipo de processo, segundo Soares (2000, p. 7) utiliza moldes de areia como matéria prima para produção da peça. Com base no livro de Soares (2000) os processos que influenciam a fundição em areia são a modelação, areias e moldagem, e a fusão em um determinado tipo de areia. A seguir serão apresentados na forma de fluxograma na FIG. 01 a sequência dos processos supracitados.

Figura 01 – Fluxograma da sequência básica de um processo de fundição em areia



Fonte: O PRÓPRIO AUTOR.

5.2.2 Modelação: Modelos e Caixa de Machos

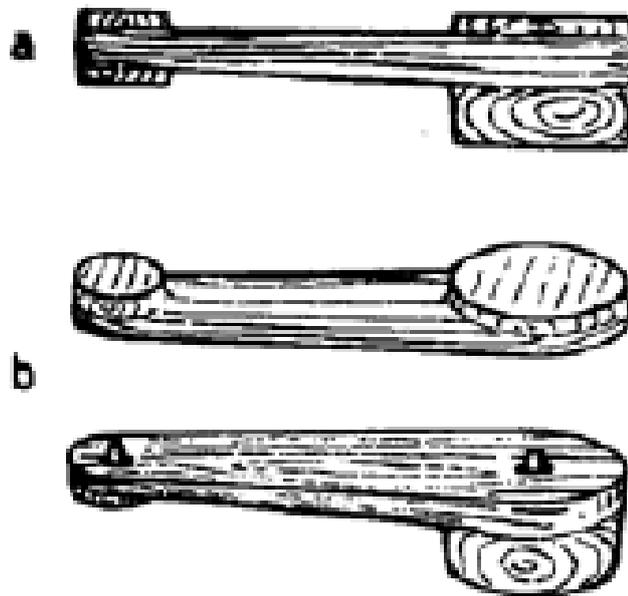
Modelo foi definido segundo Ferreira (2000, p. 467) como “**1.** Aquilo que serve como referência ou que é dado para ser reproduzido. **2.** Representação em pequena escala de algo que se pretende reproduzir em grande. **3.** Protótipo de um objeto [...]”.

O macho foi definido segundo Ferreira (2000, p. 437) como “[...] **5.** Peça [...] que encaixa na outra, fêmea.”. Com base no que foi definido por Holanda (2000, p. 437) o macho encaixa-se na fêmea, o molde, para formar as cavidades no fundido final. Logo a caixa de macho pode ser definida como o modelo para fabricação do macho.

Segundo Soares (2000) os modelos e as caixas de macho podem ser feitas de vários materiais, mas são tradicionalmente fabricadas de madeira, metais e resinas do tipo epóxi. Estes materiais se diferem quanto ao acabamento e a durabilidade.

Os modelos podem ser feitos de várias formas. Segundo Soares (2000) normalmente os modelos são feitos bipartidos (FIG. 02), visando agilizar o processo de moldação, mas os modelos também podem ser maciços (FIG. 03), em esqueleto (FIG. 04a), em chapelona (FIG. 04b), em gabarito (FIG. 04c).

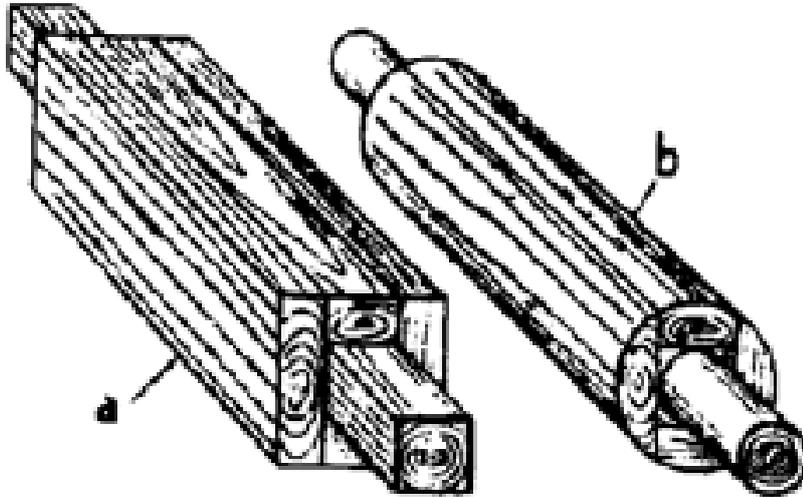
Figura 02 – (a) Modelo Inteiro e (b) Modelo Bipartido



Fonte: CAPELLO³ (1996 apud SOARES, 2000, p. 9)

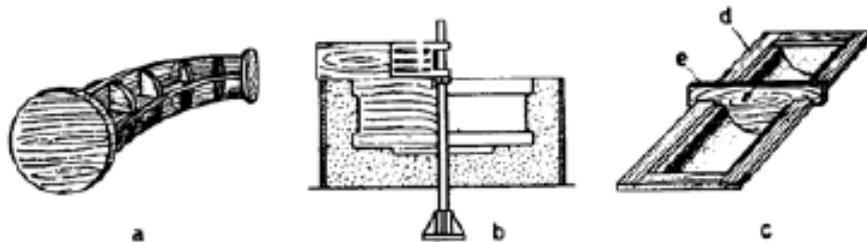
³ CAPELLO, E. **Tecnología de la Fundición**. Editorial Gustavo Gili, S.L., 1996, 1. ed.

Figura 03 – (a) e (b) Modelos Maciços com Marcação de Macho



Fonte: CAPELLO³ (1996 apud SOARES, 2000, p. 9)

Figura 04 – Modelos (a) em Esqueleto, (b) em Chapelona, e (c) em Gabarito



Fonte: CAPELLO³ (1996 apud SOARES, 2000, p. 9)

5.2.2.1 Material de Fabricação do Modelo

Segundo Soares (2000) antes da escolha do material em que o modelo, ou caixa de machos, será confeccionado deve-se saber as exigências que o processo de moldagem apresenta. Por exemplo, no processo de moldagem de *shell* em casca, o modelo deve ser metálico, pois o mesmo requer ser pré-aquecido para sua fabricação, uma vez que a areia *shell* se fixa no formato do molde apenas após ser curada com aquecimento, e não compactação, que é o mais comum no processo de moldagem em areia. Caso não haja restrições, o modelo deve ser fabricado de acordo com a quantidade que será produzida por lote, e sua durabilidade.

³ CAPELLO, E. **Tecnología de la Fundición**. Editorial Gustavo Gili, S.L., 1996, 1. ed.

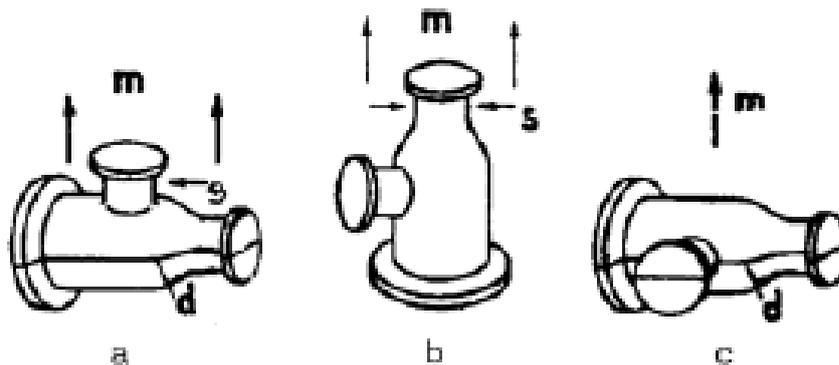
5.2.2.2 Métodos e Especificações para Confeção de Modelos

5.2.2.2.1 Métodos de Partição do Modelo

Segundo Soares (2000) a partição de um modelo que não apresenta eixo de simetria implica na possibilidade de posicioná-lo de seis formas diferentes no plano de apartação, ou plano de partição. A escolha da posição em que se coloca este modelo, de acordo com o plano de apartação, varia de acordo com a complexidade do número de macho que o modelo irá requerer, com a extração do modelo no molde, e com possíveis rebarbas de difícil extração. Em peças menos complexas, em geral, faz-se coincidir a maior área da partição com o plano.

A FIG. 05 exemplifica como pode-se fazer as partições de uma peça genérica.

Figura 05 – Formas de Partição



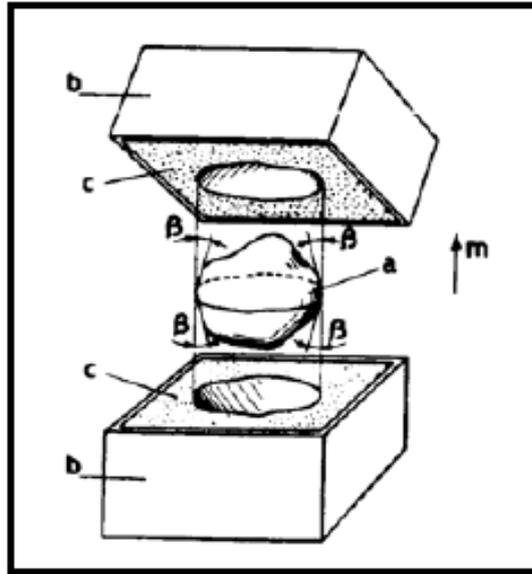
Fonte: CAPELLO⁴ (1996 apud SOARES, 2000, p. 11)

5.2.2.2.2 Ângulo de Saída

O ângulo de saída foi definido segundo Soares (2000) como o ângulo utilizado para a confecção do modelo, para possibilitar a extração do molde do modelo, sem danificá-lo. Este ângulo pode variar de 1° a 2°, como demonstrado na FIG. 06.

⁴ CAPELLO, E. **Tecnología de la Fundición**. Editorial Gustavo Gili, S.L., 1996, 1. ed.

Figura 06 – Ângulo de Saída β



Fonte: CAPELLO⁵ (1996 apud Soares 2000, p. 13)

Nota: (a) é o modelo, (b) é são as apartações do molde, (c) são as faces de apartação, (β) são os ângulos de extração, e (m) é a força de extração.

5.2.2.2.3 Redimensionamento Devido à Contração

Segundo Soares (2000), em um processo de fundição basicamente todos os metais utilizados no processo se contraem durante a fase de resfriamento. Esta contração é responsável pela redução das medidas da peça do modelo.

Na TAB. 01 estão representados alguns coeficientes de contração linear típicos dos metais.

⁵ CAPELLO, E. **Tecnología de la Fundición**. Editorial Gustavo Gili, S.L., 1996, 1. ed.

Tabela 01 – Coeficientes Típicos de Contração Linear de Metais

Metal	% Linear
Aço	2,0
Ferro Fundido	0,5 – 1,0
Ferro Fundido Nodular	0,8
Alumínio	1,7
Latão	1,3 – 1,6
Zinco	2,6

Fonte: Maehara⁶ (1998 apud SOARES, p. 12)

5.2.3 Areias de Moldagem

Segundo Soares (2000) as areias utilizadas no processo de moldagem e macharia são basicamente constituídas de grânulos de elementos refratários, em geral de origem de areias silicosas, e de um, ou mais, elementos aglomerantes e de um plastificante, sendo que o mais comum é a água.

As areias de moldagem devem apresentar algumas propriedades mecânicas necessárias para sua utilização. De acordo com Soares (2000, p.16):

A areia de moldagem deve apresentar elevada refratariedade, boa resistência mecânica, permeabilidade adequada e plasticidade (ou moldabilidade). Já da areia destinada à fabricação de machos espera-se, além dos requisitos exigidos para a areia de moldagem, boa colapsibilidade, definida como a perda de resistência da areia após o início da solidificação da peça (SOARES, 2000, p. 16).

5.2.3.1 Classificação Generalizada das Areias de Moldagem

As areias de moldagem possuem critérios de classificação. Segundo Soares (2000) as mesmas podem ser classificadas quanto à origem se são naturais, semissintéticas ou sintéticas. Quanto ao emprego, se são utilizadas para moldagem ou produção de machos. Quanto a retenção de umidade e ainda podem ser classificadas quanto utilização, se são recicladas ou não.

5.2.3.2 Componentes Básicos de uma Areia Silicosa de Moldagem

⁶ MAEHARA, Y. **Padrões de Fabricação para Aços Fundidos, vol.1: Projetos de Fundição**. ELF Com. e Ind. de Produtos Químicos, 1998;

Segundo Soares (2000) as areias silicosas de moldagem no geral são compostas por areia-base e aglomerantes.

5.2.3.2.1 Areia-Base

As areais-base são, de acordo com Soares (2000), em geral silicosas. Estas areias são refratárias, sendo originadas, no geral, de areias de praia e lavadas para remoção de sais. A composição química da areia-base influencia na dilatação da areia quando submetida a uma diferença de temperatura, na reação da areia com o metal líquido, e principalmente na refratariedade do molde.

Outra característica de extrema importância para a areia base é a granulometria, que foi definida por Ferreira (2000) como especificação das medidas dos grãos que compõem os depósitos sedimentares. Segundo Soares (2000) a permeabilidade e penetração metálica da areia-base pode ser afetada pela granulometria que a compõe. No caso do ferro fundido que origina gases a granulometria da areia-base deve ser maior, para que os gases saiam com maior facilidade.

5.2.3.2.2 Aglomerantes

Os aglomerantes, ou aglutinantes, foram definidos por Ferreira (2000, p. 23) como “[...] Material que tem a propriedade de ligar as partículas [...]”. Os aglomerantes conferem à areia-base algumas propriedades, como as citadas por Soares (2000) após a compactação e secagem: resistência ao cisalhamento, dureza e redução da permeabilidade. Os aglomerantes são subdivididos em orgânicos, inorgânicos e sintéticos.

5.2.3.2.2.1 Aglomerantes Orgânicos

Segundo Soares (2000) são exemplos de aglomerantes orgânicos carboidratos e óleos, os mesmos conferem boa resistência e colapsibilidade à areia após leve socagem e secagem. Segundo (CEMP 186 ... 2015, p. 2) a colapsibilidade “é o tempo gasto para o desmoronamento de um corpo de prova quando exposto a uma pré-carga e temperatura estabelecida”.

5.2.3.2.2 Aglomerantes Inorgânicos

De acordo com Soares (2000) os aglomerantes inorgânicos são em geral compostos de argilas, bentonita (é uma argila com maior poder aglomerante), e o cimento (pouco utilizado devido à baixa colapsibilidade). Estes aglomerantes atingem sua resistência através da compressão da areia, e sinterizam quando em contato com o metal líquido.

5.2.3.2.3 Aglomerantes Sintéticos

Os aglomerantes sintéticos podem ser subdivididos, segundo Soares (2000), em duas classes, os termoendurecíveis e os autoendurecíveis. Os termoendurecíveis se polimerizam com a ação do calor, já os autoendurecíveis se polimerizam com cura a frio. Estes dois aglomerantes conferem boa resistência, boa colapsibilidade, e possibilitam a confecção de seções finas.

5.2.3.2.3 Areias Não-Silicosas

As areias não-silicosas são, segundo Soares (2000), areias de base silicosa que apresentam uma baixa expansão quando expostas ao calor, e menor reatividade quando comparadas com as areias silicosas, um exemplo destas areias são a zirconita e a cromita. Estas areias seriam ideais se não fosse pelo seu elevado custo.

5.2.4 Moldagem

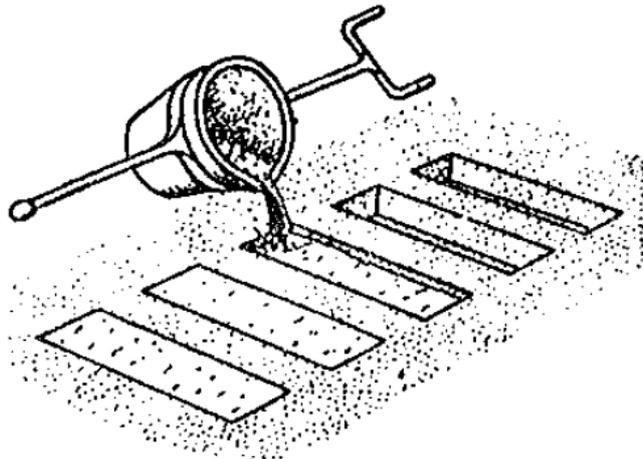
Segundo Ferreira (2000) moldar é o ato de formar um molde adaptando-se a um modelo. Tomando como base a definição de Holanda (2000) pode-se apresentar as técnicas de moldagem.

Segundo Capello (1996, tradução nossa) a moldagem é a técnica utilizada para se obter uma reprodução em negativo da peça que será reproduzida. O negativo é o contorno formado pelo modelo da peça no molde, expressando as medidas e ângulos externos.

Embora existam várias técnicas de moldagem, para satisfação do propósito deste trabalho será apresentada apenas a técnica de moldagem por blocos em caixas, uma vez que a mesma apresenta muitos aspectos da moldagem. Mas como foi anteriormente citado existem

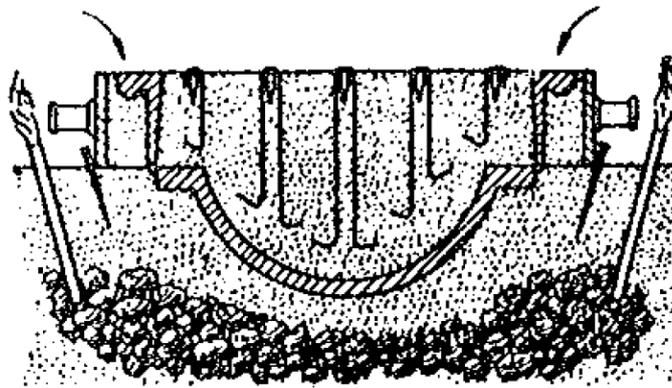
outros processos de moldagem como citado por Capello (1996, tradução nossa), a nua (FIG. 07), de poço (FIG. 08), automatizada com sistemas hidráulicos e pneumáticos, dentre outras.

Figura 07 – Representação de um molde por moldagem nua sendo vazado



Fonte: CAPELLO (1996, p. 67)

Figura 08 – Representação de moldagem de poço



Fonte: CAPELLO (1996, p. 67)

5.2.4.1 Moldagem por Blocos em Caixas

O esquema de moldagem por blocos em caixas foi descrito por Capello (1996, tradução nossa) como um sistema onde a reprodução do negativo é feita colocando-se o modelo entre duas ou mais caixas, e as preenchendo com a areia que está sendo utilizada para moldação. Em seguida socando-se a areia para que a mesma adquira algumas propriedades físicas conferidas pela compactabilidade. Segundo Capello (1996, tradução nossa) este sistema de moldagem é o

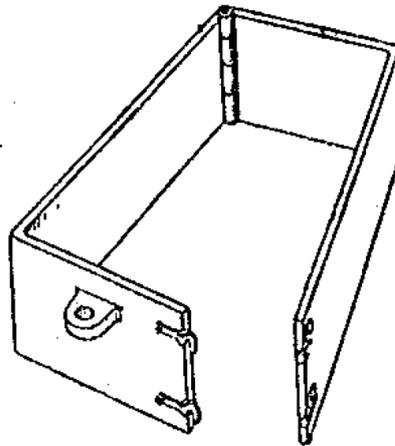
mais utilizado devido a sua adaptabilidade a qualquer tipo de peça, entretanto ele requer caixas adequadas para cada tipo de peça.

Segundo Capello (1996, tradução nossa) a moldagem em caixas necessita de caixas desmontáveis, anéis de reforço, ou camisas, e de cercos, ou calção, feitos de areia ao redor da caixa para sustentá-la. Estes dois últimos itens citados são utilizados apenas em casos de a areia não suportar a pressão e o peso do metal líquido.

5.2.4.1.1 Tipos de Caixas de Moldagem Desmontáveis

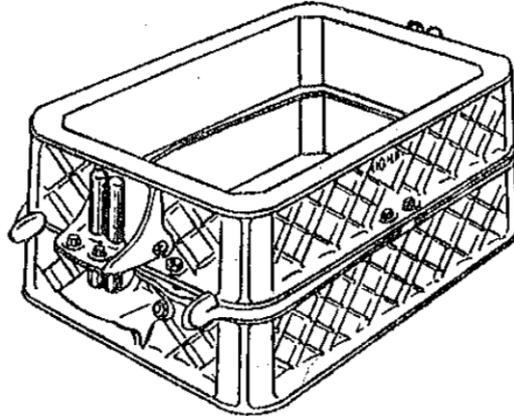
As caixas de moldagem desmontáveis podem ser subdivididas de acordo com Capello (1996, tradução nossa) em caixas de paredes retas com dobradiças (FIG. 09), caixas de paredes inclinadas com linguetas extraíveis (FIG. 10), caixas de abertura com paredes inclinadas de movimentos limitados (FIG. 11), caixas simples de paredes inclinadas e lisas (FIG. 12).

Figura 09 – Caixa de paredes retas com dobradiças



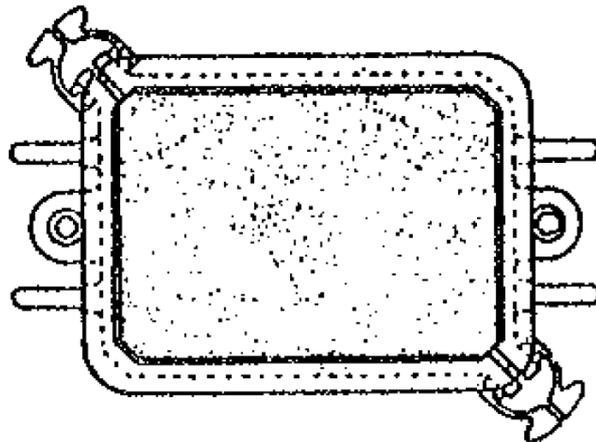
Fonte: CAPELLO (1996, p. 67)

Figura 10 – Caixa de parede inclinada
com linguetas extraíveis



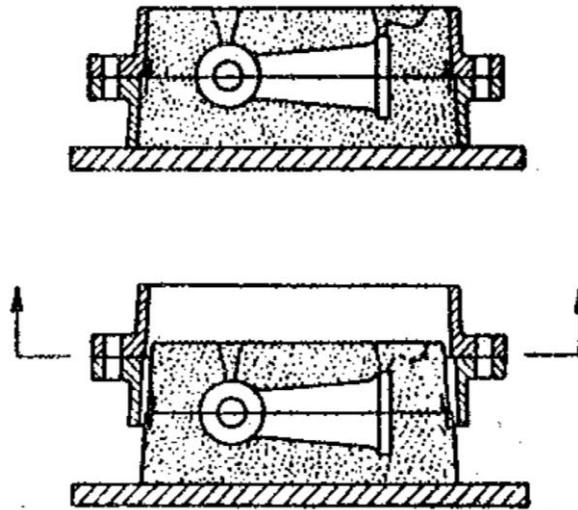
Fonte: CAPELLO (1996, p. 71)

Figura 11 – Caixas de abertura com paredes inclinadas
de movimentos limitados



Fonte: CAPELLO (1996, p. 71)

Figura 12 – Caixa simples com paredes inclinadas e lisas



Fonte: CAPELLO (1996, p. 71)

5.2.5 Fusão

O processo de fusão representa, segundo Capello (1996, tradução nossa), um dos processos de maior importância para uma fundição. É nele que ocorre a fusão do metal e suas ligas no estado sólido, para que sejam vazados para a produção de uma peça com outra forma diferente.

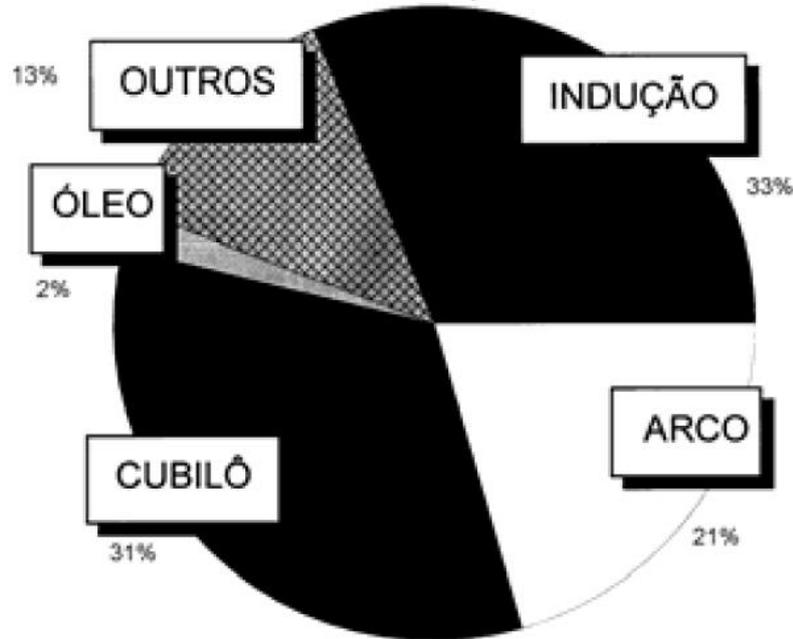
Segundo Capello (1996, tradução nossa) para que haja a fusão dos metais e suas ligas são necessários fornos para fornecimento de calor em quantidades específicas para cada tipo de material. De acordo com Soares (2000) o emprego dos fornos pode ser subdividido de acordo com o tipo de aquecimento que se deseja empregar em cada tipo de metal e/ou liga.

Segundo Soares (2000) os fornos podem ser divididos em elétricos e a combustível. Os fornos elétricos podem ser subdivididos de acordo com seu princípio de funcionamento em a arco (direto ou indireto), a indução (a canal ou a cadinho), e de resistência elétrica. Os fornos a combustível podem ser subdivididos de acordo com o combustível que usar, como carvão/coque, óleo combustível, dentre outros.

Os fornos podem ser subdivididos a partir do princípio de funcionamento, segundo Soares (2000), em cuba (alto forno, cubilô), rotativo, e de cadinho. A FIG. 13 apresenta um gráfico com o percentual de fornos em parques industriais de fundição de ferro fundido feita pela ABIFA (Associação Brasileira de Fundição), em 1997.

Figura 13 – Percentual de fornos nos parques industriais de fundições de ferro fundido

FERRO FUNDIDO = 1,5 milhões ton. peças



Fonte: ABIFA (1997, apud Soares, 2000, p. 48)

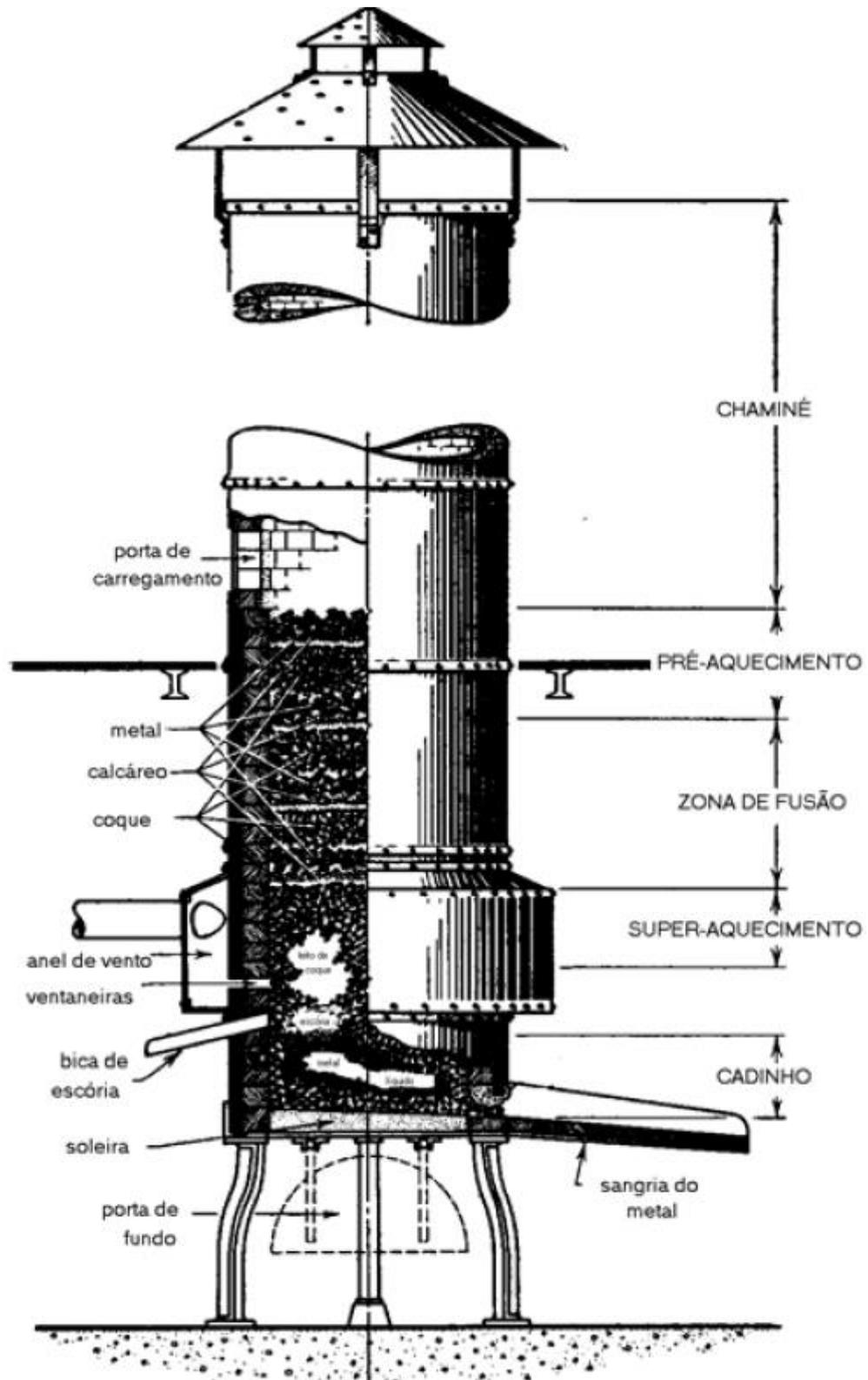
Conforme demonstrado pela FIG. 13 em pesquisa da ABIFA, em 1997, mais de 60% da produção de ferro fundido advém de fornos cubilô e indução. Para tanto serão apresentados neste trabalho os princípios básicos de funcionamento apenas dos fornos cubilô e a indução.

5.2.5.1 Fornos Cubilô

Os fornos cubilô podem ser definidos como fornos de cuba, operando em contracorrente, que utilizam o coque como elemento primário para combustão e apoio para a carga metálica. Este tipo de forno possui uma alta capacidade produtiva, entretanto não é um forno indicado para processos que requerem produção de ferro fundido com baixos teores de carbono equivalente e enxofre (SOARES, 2000).

Na FIG. 14 será apresentado a esquema básico das zonas de um forno cubilô, e suas respectivas funções.

Figura 14 – Esquema básico das zonas de um forno cubilô



Fonte: TAYLOR; FLEMINGS; WULFF⁷ (1965, apud Soares, 2000, p. 56)

⁷ TAYLOR, H. F.; FLEMINGS, M. C.; WULFF, J. **Foundry Engineering**, 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1965.

Como demonstrado na FIG. 14 um forno cubilô é composto de quatro zonas: de pré-aquecimento, de fusão, de superaquecimento, e de cadinho.

A zona de pré-aquecimento se estende desde a zona de fusão até a porta de carregamento, nesta zona a carga recebe calor, assim se pré-aquecendo, antes de ser consumida na zona de fusão. A região de fusão, ou zona de redução, é onde ocorre a redução do ferro e ocorre, efetivamente, a fusão do metal da carga. Esta zona situa-se abaixo da região de pré-aquecimento e se estende até o topo da região de superaquecimento. A região de superaquecimento é onde ocorre a oxidação do coque, ou seja, a combustão do mesmo, esta região situa-se acima do cadinho. No cadinho, que se localiza logo abaixo da zona de superaquecimento, há o armazenamento do metal líquido que goteja da zona de superaquecimento. O metal líquido armazenado no cadinho é liberado do forno pela bica de sangria do metal (SOARES, 2000).

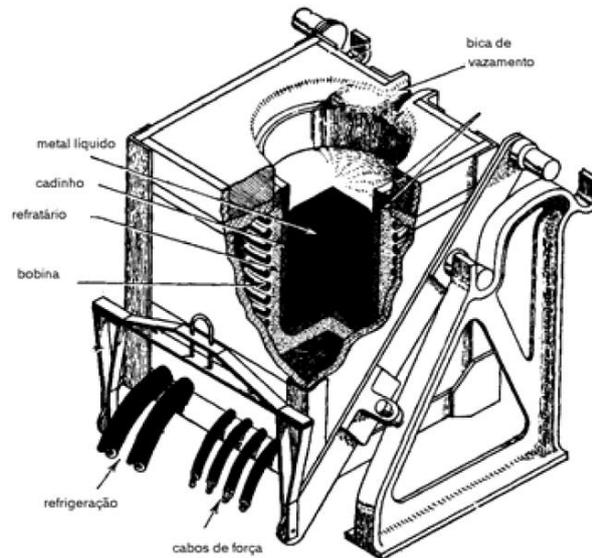
5.2.5.2 Fornos a Indução a Cadinho

Os fornos a cadinho vêm conquistando preferência no ramo de ferros fundidos devido a possibilitarem um maior controle da composição química que outro forno, possibilitando um ganho maior de qualidade para o processo (SOARES, 2000).

De acordo com Soares (2000) o forno de indução a cadinho, ou forno de indução de núcleo, apresenta o formato de um cadinho, entretanto o mesmo opera o metal que se deseja fundir como secundário. Este modelo de forno opera em várias frequências, e possui um esquema de construção conforme mostrado na FIG. 15, mais adiante.

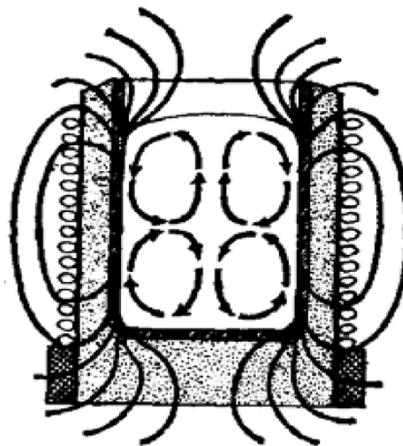
Segundo Soares (2000) este modelo de forno opera gerando uma corrente induzida no bloco metálico das bobinas que circundam o cadinho do forno, esta corrente decai exponencialmente até o meio do banho de metal líquido contido no cadinho fazendo com que este banho se movimente tornando a massa líquida homogênea, conforme ilustrado na FIG. 16.

Figura 15 – Esquema de construção de um forno a indução de cadinho



Fonte: TAYLOR; FLEMINGS; WULFF⁸(1965 apud Soares, 2000, p. 50)

Figura 16 – Esquema da corrente induzida, e do campo eletromagnético no cadinho



Fonte: TAYLOR; FLEMINGS; WULFF⁸ (1965 apud Soares, 2000, p. 52)

5.3 Contração e Sistemas de Enchimento

⁸ TAYLOR, H. F.; FLEMINGS, M. C.; WULFF, J. **Foundry Engineering**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1965.

Ao projetar uma peça de ferro fundido deve-se planejar junto ao seu modelo um sistema de enchimento, ou alimentação, que fará com que o metal líquido escoe através deste sistema para preencher a cavidade onde a peça foi moldada, e se necessário reabastecê-la com metal líquido. Entretanto este sistema de enchimento deve ser planejado de modo que não haja desperdício de metal, e que facilite sua remoção ao fim do processo (SOARES, 2000).

5.3.1 Resfriamento e Contração

Após o vazamento do metal líquido no molde, o mesmo submete-se a solidificação por resfriamento, e por consequência a contração. Durante a solidificação no molde o metal líquido passa por três contrações volumétricas consecutivas: a líquida, a de solidificação, e a contração de resfriamento (ABREU; SANTOS; GANIVET, 1987).

Segundo Abreu, Santos e Ganivet (1987) a contração de resfriamento é a responsável por causar redução das dimensões da peça após a mesma ter se solidificado. Como fora mencionado acima esta contração é compensada com o acréscimo das medidas de contração no modelo.

As contrações líquidas e de solidificação provocam uma redução do volume de metal líquido no molde, esta redução de volume faz com que possa haver a formação do rechupe. Estas contrações podem ser compensadas com a adição de uma reserva de metal líquido fora da peça, que é chamada de massalote. Entretanto estas contrações dependem das ligas que são utilizadas. As ligas comuns se dividem em: metais puros e eutéticos puros, ligas que não apresentam eutéticos, e ligas que apresentam eutéticos (ABREU; SANTOS; GANIVET, 1987).

Com base no que fora citado acima será apresentado neste trabalho o ponto eutético de ligas de ferro em função do carbono equivalente. Entretanto serão apresentados primeiramente a definição, classificação, e algumas propriedades dos ferros fundidos.

5.4 Ferros Fundidos

5.4.1 Definição e Classificação dos Tipos de Ferro Fundido

A definição de ferro fundido foi adotada na obra de Chiaverini (2012, p. 494), da seguinte forma: “Ferro fundido é a liga de 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 carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita”.

Ferro fundido é uma denominação generalizada. Segundo Chiaverini (2012) o ferro fundido pode ser distinguido nos seguintes tipos de liga: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular, e ferro fundido de grafita compacta.

Como foi descrito por Chiaverini (2012, p. 494):

- Ferro fundido cinzento – cuja fratura mostra uma coloração escura (donde a sua denominação), caracterizada por aumentar com elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura em que uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (Fe_3C);
- ferro fundido branco – cuja fratura mostra uma coloração clara (donde a sua denominação), caracterizado por apresentar ainda como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício, mas cuja estrutura, devido às condições de fabricação e menor teor de silício, apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada (Fe_3C);
- ferro fundido mesclado – cuja fratura mostra uma coloração mista entre branca e cinzenta (donde a sua denominação), caracterizado igualmente por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento;
- ferro fundido maleável – caracterizado por ser obtido a partir do ferro branco mediante um tratamento térmico especial (maleabilização), resultando numa transformação de praticamente todo ferro combinado em grafita na forma de nódulos (em vez de veios ou lamelas);
- ferro fundido nodular – caracterizado por apresentar, devido a um tratamento realizado ainda no estado líquido, o carbono livre na forma de grafita esferoidal, o que confere ao material características de boa ductilidade, donde a denominação frequente para este material de ferro fundido dútil.
- ferro fundido com grafita compacta – caracterizado pelo fato da grafita apresentar-se em “escamas” ou seja com a forma de plaquetas ou estrias, motivo pelo qual tem sido também designado por “quase-escama”. Outras denominações são: escama agregada, semi-ondular e vermicular. É um produto que, como o ferro nodular, exige adição de elementos especiais como terras raras, com um elemento adicional, como o titânio, que reduz a formação de grafita esferoidal. O ferro fundido de grafita compacta, pode ser considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro nodular, possui fundibilidade do ferro fundido cinzento, com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade. Sua comercialização é relativamente recente (CHIAVERINI, 2012, p. 494).

5.4.2 Especificações das Classes de Ferros Fundidos

Com base na distinção feita por Chiaverini (2012, p. 494) serão especificadas algumas características básicas das classes de ferro fundido mais comuns: cinzento, branco e nodular.

5.4.2.1 Ferro Fundido Cinzento

De acordo com Chiaverini (2012) dentre as classes existentes de ferro fundido, o cinzento é o mais utilizado, devido as suas características mecânicas: boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste, e sua capacidade de amortecimento. Outro fator que faz com que ele seja muito utilizado é sua boa característica metalúrgica de ser facilmente fundido e boa moldagem.

Segundo Chiaverini (2012) os ferros fundidos cinzentos abrangem uma faixa de composição química muito grande: o carbono apresenta-se em uma faixa variando de 2,50 a 4,00%, o silício de 1,00 a 3,00%, o manganês de 0,20 a 1,00%, o fósforo de 0,02 a 1,00%, e o enxofre deve se apresentar em faixas residuais de 0,02 a 0,25%.

Os ferros fundidos cinzentos possuem diversas normas para classificação. Segundo ASTM A48⁹ (19-- , apud Chiaverini, 2012) as composições químicas variam de acordo com as propriedades mecânicas que a peça necessita, e sua espessura. A TAB. 02 apresenta as classes deste material e algumas propriedades mecânicas.

Tabela 02 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos

Classe	Diâmetro do corpo de prova mm	Limite de resistência à tração kgf/mm ² (MPa)	Dureza Brinell	Observações
20	22,2	15,5/18,3 (155/183)	160/220	Peças finas: espessura até 13mm C – 3,50 a 3,80% Si – 2,40 a 2,60%
	30,5	12,9/16,9 (129/169)	160/180	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 3,40 a 3,60% Si – 2,30 a 2,50%
	50,8	12,7/15,5 (127/155)	130/180	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm
25	22,2	18,3/20,4 (183/204)	160/180	Peças finas: espessura até 13mm C – 3,30 a 3,50% Si – 2,20 a 2,40%
	30,5	18,3/20,4 (183/204)	179/207	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 3,20 a 3,40% Si – 2,20 a 2,40%
	50,8	18,3/20,4 (183/204)	179/217	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 3,00 a 3,30% Si – 1,90 a 2,20%

⁹ ASTM A 48. **Especificação Padrão de Ferros Fundidos Cinzentos.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 19--.

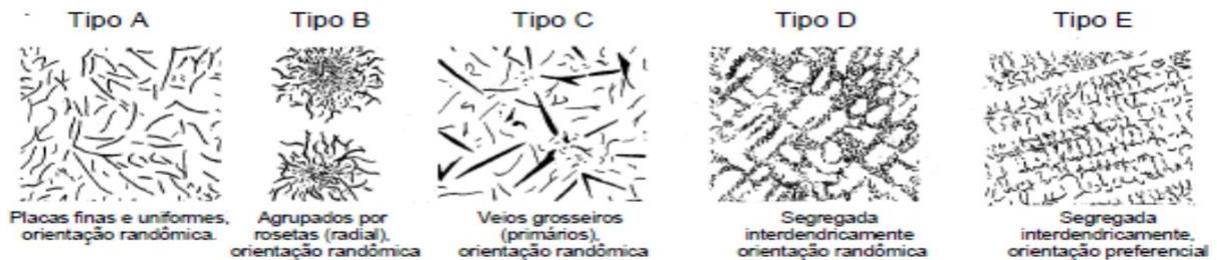
Tabela 02 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos (Continuação)

30	22,2	21,1/24,3 (211/243)	179/288	Peças finas: espessura até 13mm C – 3,20 a 3,40% Si – 2,10 a 2,30%
	30,5	-	-	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 3,10 a 3,30% Si – 2,10 a 2,30%
	50,8	21,1/24,3 (211/243)	207/228	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,90 a 3,20% Si – 1,70 a 2,10%
35	22,2	25,3/28,1 (253/271)	183/217	Peças finas: espessura até 13mm C – 3,10 a 3,30% Si – 2,00 a 2,20%
	30,5	24,6/27,4 (246/264)	212/241	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 3,00 a 3,25% Si – 1,80 a 2,10%
	50,8	24,6/26,7 (246/260)	183/217	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,80 a 3,10% Si – 1,60 a 2,00%
40	22,2	29,5/32,3 (285/313)	212/241	Peças finas: espessura até 13mm C – 3,00 a 3,20% Si – 1,90 a 2,20%
	30,5	28,1/33,0 (271/320)	207/241	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 2,95 a 3,15% Si – 1,70 a 2,00%
	50,8	28,8/31,6 (278/306)	180/217	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,75 a 3,00% Si – 1,50 a 1,90%
50	22,2	35,9/38,7 (344/377)	228/269	Peças finas: espessura até 13mm C – 2,90 a 3,10% Si – 1,70 a 2,10%
	30,5	35,2/40,1 (342/391)	228/269	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 2,70 a 3,00% Si – 1,70 a 2,00%
	50,8	35,2/38,0 (342/370)	207/241	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,55 a 2,85% Si – 1,40 a 1,70%
60	22,2	42,2/45,7 (412/447)	228/272	Peças finas: espessura até 13mm C – 2,70 a 3,00% Si – 1,40 a 1,70%
	30,5	42,2/45,7 (412/447)	248/290	Peças média: espessura de 13 a 25 mm C – 2,50 a 2,85% Si – 1,90 a 2,10%
	50,8	42,2/45,0 (412/440)	212/248	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,50 a 2,80% Si – 1,20 a 1,50%

Fonte: ASTM A 48⁹ (apud Chiaverini, 2012, p. 518 e 519)

Conforme apresentado por Colpaert (2008) as classes de ferro fundido cinzento apresentam em sua microestrutura uma predominância de grafita lamelar, e alguns carbonetos conforme apresentado na FIG. 17.

Figura 17 – Tipos (distribuições) de grafita em ferros fundidos cinzentos



Fonte: ASTM A 247 (2017, p.?)

Segundo Colpaert (2008) os ferros fundidos cinzentos podem ser constituídos de matrizes micrográficas ferríticas, ferríticas, e ferrito-perlíticas. A escolha destas matrizes depende da aplicabilidade que a peça a ser fundida terá, uma vez que matrizes ferríticas apresentam dureza e resistência à tração mais baixas e maior alongamento, e estruturas perlíticas apresentam dureza e resistência à tração mais elevadas e menor alongamento.

5.4.2.2 Ferro Fundido Branco

Segundo Chiaverini (2012) o ferro fundido branco apresenta em suas propriedades mecânicas essenciais elevadas dureza e resistência ao desgaste.

Como foi mencionado acima o ferro fundido branco contém uma alta porcentagem de carbonetos, o grafita combinada (Fe_3C). Esta elevada quantidade de carbonetos confere a este material as propriedades citadas acima. Esta quantidade de carbono combinado ocorre somente devido a utilização de teores elevados de elementos como o manganês, níquel e cromo, que são elementos carbonetantes. Dentre os citados o que possui maior influência no processo de formação da grafita combinada é o cromo (CHIAVERINI, 2012).

A TAB. 03 apresenta as composições especificadas pela ASTM A532 / A532M-10, e as respectivas durezas das classes dessa norma.

Tabela 03 – Classes de ferro fundido branco para aplicação de mineração etc.

Classe	Dureza Brinell	Tipo de moldagem ou tratamento térmico	Composição Química, (%)								
			C _t	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	Outros	
I	500	Areia	min.	3,0			3,3	1,4			
Tipo A	600	Coquilha	max.	3,6	0,8	1,3	5,0	4,0	1,0	0,15	0,30 P
I	550	Areia	min.	2,5			3,3	1,4			
Tipo B	600	Coquilha	max.	3,0	0,8	1,3	5,0	4,0	1,0	0,15	0,30 P
I	550	Areia	min.	2,9			2,7	1,1			
Tipo C	600	Coquilha	max.	3,7	0,8	1,3	4,0	1,5	1,0	0,15	0,30 P
I	550	Areia	min.	2,5	1,0		5,0	7,0			
Tipo D	600	Coquilha	max.	3,6	2,2	1,3	7,0	11,0	1,0	0,15	0,10 P
II	550	Areia	min.	2,4		0,5		11,0	0,5		
Tipo A	600	Temperado	max.	2,8	1,0	1,5	0,5	14,0	1,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II	450	Areia	min.	2,4		0,5		14,0	1,0		
Tipo B	600	Temperado	max.	2,8	1,0	1,5	0,5	18,0	3,0	0,06	0,10 P; 1,2Cu
II	550	Areia	min.	2,8		0,5		14,0	2,3		
Tipo C		Temperado	max.	3,6	1,0	1,5	0,5	18,0	3,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II	450	Areia	min.	2,0		0,5		18,0			
Tipo D	600	Temperado	max.	2,6	1,0	1,5	1,5	23,0	1,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II	450	Areia	min.	2,6		0,5		18,0	1,0		
Tipo E	600	Temperado	max.	3,2	1,0	1,5	1,5	23,0	2,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
III	450	Areia	min.	2,3		0,5		23,0			
Tipo A	600	Temperado	max.	3,0	1,0	1,5	1,5	28,0	1,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu

Fonte: ASTM A532 / A532M-10, 2014, p.?

Como citado acima os ferros fundidos possuem matrizes. Segundo Colpaert (2008) esta classe pode apresentar matriz perlítica, e apresenta altos teores de cementita, ou grafita combinada.

5.4.2.3 Ferro Fundido Nodular ou de Grafita Esferoidal

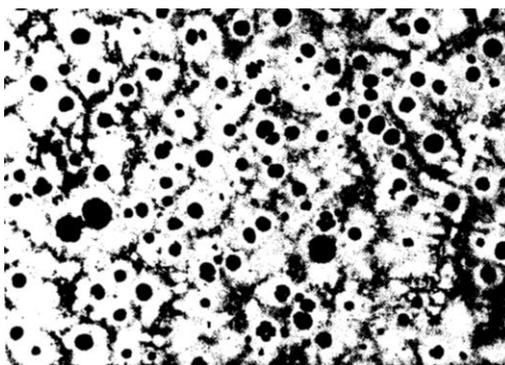
O ferro fundido nodular possui um aspecto diferenciado em seu processo de produção. Segundo Chiaverini (2012) este material apresenta uma composição química similar a dos materiais ferrosos cinzentos, entretanto durante seu processo produtivo lhe é adicionado um agente nodularizante, que em geral contém magnésio. Este elemento nodularizante pode ser adicionado na forma de: magnésio sem liga, nodularizantes a base de níquel, ou a base de magnésio-ferro-silício (Mg-Fe-Si).

De acordo com Chiaverini (2012) o processo consiste em depositar o nodularizante no fundo de uma panela para que o metal líquido seja vazado nesta panela, fazendo com que o nodularizante se dissolva no ferro fundido propiciando a reação de nodularização.

O processo supracitado produz um material que segundo Chiaverini (2012) possui boa ductilidade, tenacidade, boa resistência à tração, e um limite de escoamento elevado. Estas propriedades são geradas devido a formação dos nódulos de grafita, que interrompem a continuidade das lamelas de grafita.

A FIG. 18 apresenta uma análise micrográfica de um corpo de prova de ferro fundido nodular, cedida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo a Chiaverini (2012).

Figura 18 – Aspecto microográfico de um ferro fundido nodular



Fonte: IPT-SP¹⁰ ([19--?]) apud Chiaverini, 2012, p. 561)

5.5 Influência da Composição Química nos Ferros Fundidos

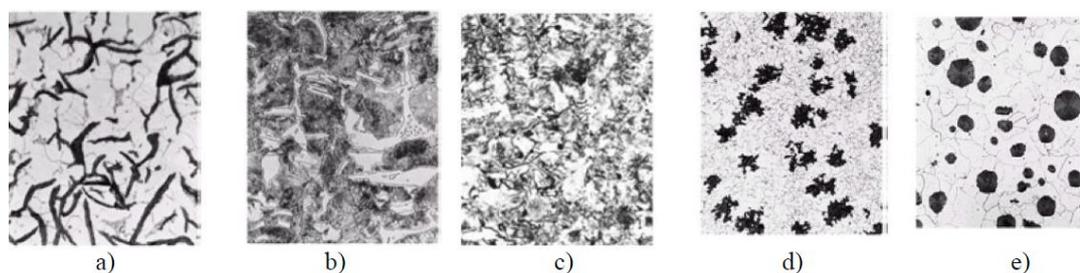
¹⁰ IPT-SP. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. [19--?]

O ferro fundido é classificado, de acordo com Peixoto et al. (2015), com o tipo e forma da grafita, além de um outro padrão de diferenciação para subclasses, a matriz que a microestrutura apresenta.

As matrizes de um ferro fundido são classificadas segundo Peixoto et al. (2015) e Colpaert (2008) em ferríticas, perlíticas, ferríto-perlíticas, austeníticas e martensítica.

Segundo Peixoto et al. (2015) a forma da grafita é como a mesma se apresenta na estrutura micrográfica do ferro fundido, conforme apresentado nas figuras FIG. 19a, 19b, 19c, 19d, e 19e.

Figura 19 – Forma das grafitas em 5 (cinco) classes diferentes de ferro fundido



Fonte: PEIXOTO ET AL., 2015, p.2

Segundo Peixoto, et al. (2015) e Colpaert (2008) a FIG. 17a apresenta a forma das grafitas lamelares de um material ferroso cinzento, a FIG. 17b apresenta uma estrutura de um ferro banco com carboneto (grafita combinada, Fe_3C), a FIG. 17c apresenta a microestrutura de um ferro fundido mesclado, a FIG. 17d apresenta a microestrutura de um ferro fundido maleável, e a FIG. 17e apresenta as grafitas em forma de esferas caracterizando um material ferroso nodular.

Vários fatores influenciam na microestrutura de um ferro fundido, segundo Peixoto et al. (2015), como a inoculação de elemento de liga, o superaquecimento, a velocidade de resfriamento, a composição química, dentre outros. Entretanto este trabalho contemplará apenas a influência da composição química.

5.5.1 Silício

O silício, segundo Colpaert (2008) e Santos (2000), reduz a estabilidade da cementita, ou grafita combinada. A adição de silício a um ferro fundido é necessária quando deseja-se obter um fundido final com grafita, uma vez que o silício proporciona estabilidade na formação da grafita. Se o silício for adicionado em poucas ou nenhuma quantidade, o fundido final

apresenta, geralmente, uma fratura branca, ou seja, o fundido pode se conformar em uma estrutura de ferro branco.

De acordo com Colpaert (2008) se o fundido final desejado tiver de apresentar propriedades de maior resistência mecânica, a adição de silício deve ser limitada, evitando a formação de ferrita e perlita com espaçamento grosseiro entre as grafitas. O silício, em combinação com carbono, também afeta a composição do eutético alterando equilíbrios importantes, como o ponto de solidificação.

5.5.3 Fósforo

O fósforo, segundo Colpaert (2008) e Santos (2000), em baixos teores é um elemento de capacidade grafitizante, e em teores elevados contribui para a estabilização da cementita. Entretanto o fósforo desempenha outro papel importante para o ferro fundido, o mesmo tem a capacidade de elevar a fluidez do metal líquido, assim possibilitando a fundibilidade de peças finas e/ou com contornos nítidos.

Embora o fósforo apresente boas propriedades o mesmo deve ser ponderado, uma vez que, segundo Colpaert (2008), as propriedades mecânicas podem ser afetadas, devido ao seu efeito de tornar a fratura frágil devido a formação de fosfeto (Fe_3P) e estabilizar a cementita. Entretanto o fósforo tem sido empregado em altos teores em ferros fundidos cinzentos a fim de produzir peças com uma resistência ao desgaste elevada.

5.5.4 Manganês

O manganês, segundo Colpaert (2008) e Santos (2000), estabiliza cementita dificultando que ela seja decomposta, solubilizando-se a ela. Esta solubilização pode ser apresentada por $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$. E em teores elevados pode inibir o poder grafitizante do silício, produzindo um fundido final branco.

Segundo Chiaverini (2012) e Santos (2000) o manganês também pode ser utilizado para a produção de peças de volumes elevados que devam apresentar matrizes perlíticas, uma vez que o manganês possui poder perlitizante, o que confere uma maior dureza a peça, que a mesma não atingiria devido ao sobreaquecimento, que não permitiria uma formação eficaz da perlita.

Segundo Colpaert (2008) e Chiaverini (2012) o manganês também é utilizado com dessulfurizante, promovendo a formação do sulfeto de manganês (MnS). Abaixo será

apresentada a equação de proporção em que o manganês deve ser adicionado em função do teor de enxofre, conforme demonstrado na equação 1 demonstrada por Colpaert (2008):

$$\%Mn = 1,7 \times (\%S) + 0,3 \quad (1)$$

5.5.5 Enxofre

O enxofre, segundo Colpaert (2008) e Santos (2000), apresenta-se importante na formação da morfologia da grafita no fundido final. Por isso, como foi acima citado, o seu teor deve ser ajustado com manganês. Entretanto se deve controlar o teor dos sulfetos de manganês para que não ultrapasse a solubilidade máxima no metal líquido, de modo que se assegure que não haja precipitação deste sulfeto.

5.5.6 Magnésio

O magnésio, segundo Chiaverini (2012) e Santos (2000), tem a capacidade de formar grafitas esferoidais que conferem ao material uma maior ductilidade e tenacidade. Entretanto as ligas que contém magnésio devem ser controladas quanto à presença de enxofre, pois o mesmo se combina com o magnésio formando o sulfeto de magnésio (MgS), eliminando a ação nodularizante do magnésio.

5.5.7 Outros Elementos

Conforme apresentado na TAB. 04, outros elementos também interferem nas propriedades estruturais dos fundidos, e conseqüentemente nas propriedades mecânicas.

Tabela 04 – Efeitos estruturais de alguns elementos químicos no ferro fundido

Elemento	Efeitos durante a solidificação	Efeitos durante a reação eutetoide
Alumínio	Forte grafitizante	Promove a formação da ferrita e da grafita
Cromo	Forte ação carbonetante. Forma carbonetos complexos e muito estáveis	Forte tendência a formação de perlita
Cobre	Grafitizante fraco	Promove a formação de perlita
Molibdênio	Fraca tendência carbonetante	Forte formador de perlita
Estanho	Pequeno efeito nas quantidades usadas	Forte tendência a retenção da perlita

Fonte: Chiaverini (2012, p.502), adaptado

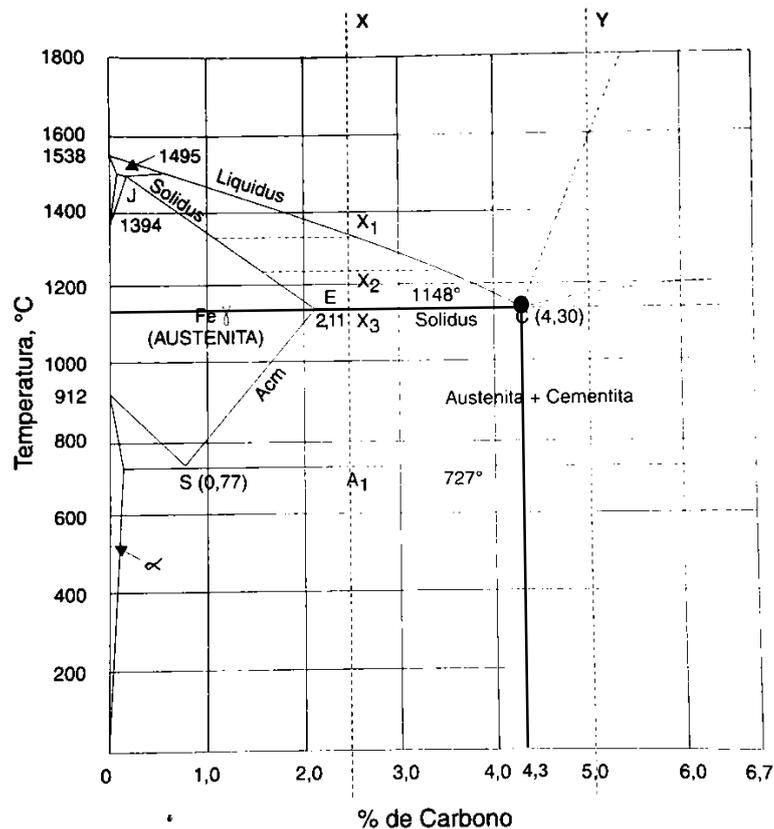
5.5.8 Carbono

De acordo com Colpaert (2008) o carbono empregado nos produtos siderúrgicos industriais opera em uma faixa de 2,0 a 4,0%. Se o processo trabalha com o carbono em baixos teores há tendência de formação de ferro branco, mas à medida que o teor de carbono se eleva se começa a criar condições propícias à formação da grafita, o que possibilita a formação de outras classes de ferro fundido.

5.5.8.1 Ligas Eutéticas, Hipoeutéticas, e Hipereutéticas

Os ferros fundidos eutéticos são, segundo Chiaverini (2012), as ligas que apresentam o mais baixo ponto de solidificação/fusão. Estas ligas apresentam um teor de carbono igual a 4,3% e seu ponto de solidificação/fusão a uma temperatura de 1148° C. As ligas que apresentam teores de carbono entre 2,0 e 4,3% são consideradas hipoeutéticas, já as ligas que apresentam teores de carbono acima de 4,3% são nomeadas hipereutéticas. O ponto eutético é apresentado na FIG. 20.

Figura 20 – Diagrama de equilíbrio Fe-C



Fonte: CHIAVERINI (2012, p. 495), adaptado.

5.5.8.2 Carbono Equivalente e suas Aplicações

Segundo Chiaverini (2012) a análise do ponto eutético apenas com diagrama de equilíbrio Fe-C não se apresenta eficiente, uma vez que pode ocorrer a decomposição do carboneto (Fe_3C) em ferro e carbono, sendo que o carbono proveniente desta decomposição se transforma em grafita.

A decomposição do carboneto é, segundo Chiaverini (2012), acelerada pela presença do silício, de modo que deve-se analisar a influência do silício no ponto eutético, uma vez que a decomposição do carboneto e o resfriamento irão influenciar na fase de formação da grafita. O fósforo também influencia neste processo uma vez que o mesmo tem capacidade grafitizante e de estabilizar o carboneto. A seguir será apresentada a equação (2), apresentada por Colpaert (2008) e Chiaverini (2012), que correlaciona o teor de silício e fósforo com o carbono para se obter o teor de carbono equivalente.

$$\%C_{Eq} = \%C + \frac{1}{3}(\%Si + \%P) \quad (2)$$

Onde o %C, %Si e %P são os percentuais em massa respectivamente de carbono, silício e fósforo, e o %C_{Eq} é o percentual de carbono equivalente.

O carbono equivalente pode ser analisado também pelo seu grau de saturação, conforme a equação apresentada por Serbino (2005). A equação (3) apresenta o grau de saturação do carbono equivalente:

$$S_C = \frac{\%C}{4,3 - \frac{\%Si + \%P}{3}} \quad (3)$$

Onde o S_C é o grau de saturação de carbono equivalente.

De acordo com a equação (3) apresentada por Serbino (2005), o grau de saturação opera de modo que de $0 \leq S_C \leq 1$ o metal apresenta uma liga hipoeutética, $S_C = 1$ o metal apresenta uma liga eutética, e $S_C \geq 1$ apresenta uma liga hipereutética.

Com base no que foi acima citado, e segundo Santos, Branco e Sinatora (1997), Cabezas, et al. (2000) e Chiaverini (2012) a temperatura de solidificação atinge seu mínimo no ponto eutético, o que permite que metal líquido permaneça neste estado por um intervalo de tempo

maior, o que lhe confere uma maior possibilidade de decomposição dos carbonetos, e assim consequentemente uma maior formação da grafita, o que permite um melhor preenchimento dos espaços vazios na estrutura do ferro fundido, podendo reduzir falhas de material como rechupes.

Como foi citado por Chiaverini (2012), o ponto de solidificação atinge seu mínimo no ponto eutético, permitindo que a fluidez do metal líquido seja maior, uma vez que temperaturas acima de 1148°C são capazes de manter o material no estado líquido.

O carbono equivalente apresenta diversas aplicabilidades. Segundo Santos, Branco e Sinatora¹¹ (1977, apud SERBINO, 2005, p. 50), nos ferros fundidos com elevados teores de carbono equivalente a incidência de porosidades reduz-se consideravelmente, o que facilita a fundibilidade de peças com geometrias complexas e de grande volume, uma vez que permite que o metal se mantenha em seu estado líquido por um intervalo de tempo maior, já que seu ponto de fusão é reduzido para 1148°C. Além disso, os elementos silício e fósforo elevam a estabilidade da grafita e desestabilizam o carboneto, conferindo ao material uma estrutura mais estável e nucleada.

Entretanto segundo Chiaverini (2012) e Peixoto, et al. (2015) deve-se manter um controle quanto ao teor de carbono no ferro fundido, pois quanto maior a quantidade de grafita presente no fundido final menor serão suas propriedades mecânicas, como dureza e resistência a tração. Por isso é necessário restringir o valor do teor de carbono, de modo que ele atenda ao ponto eutético com o carbono equivalente.

As composições podem ser alteradas para que se obtenham novas aplicações para os materiais. Como apresentado na TAB. 05 que fora desenvolvida para uma empresa do ramo metalúrgico para que o ferro fundido cinzento atendesse as propriedades requeridas pelos modelos de peças produzidas por esta empresa. Por questões de sigilo a empresa não permitiu a divulgação de seu nome e sua logomarca.

¹¹ SANTOS, A. B. de S.; BRANCO, C. H. C.; SINATORA, A. **Alumínio em Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Resistência**. Metalurgia, São Paulo, vol. 33, p. 389-395, 1977.

Tabela 05 – Composição química (m/m) para ferro fundido cinzento para componentes

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Mg	C _{Eq}
GG-15	mín.	3,65	2,30	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,42
	máx.	3,80	2,60	0,55	0,12	0,12	0,15	0,25	0,03	0,02	4,71
GG-20	mín.	3,45	2,20	0,45	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	4,18
	máx.	3,60	2,50	0,70	0,12	0,12	0,20	0,25	0,06	0,02	4,47
GG-25	mín.	3,40	2,10	0,55	0,00	0,00	0,00	0,15	0,04	0,00	4,10
	máx.	3,55	2,50	0,70	0,12	0,12	0,20	0,30	0,07	0,02	4,42
GG-30	mín.	3,15	1,90	0,70	0,00	0,00	0,25	0,35	0,05	0,00	3,78
	máx.	3,30	2,30	0,90	0,12	0,12	0,40	0,50	0,10	0,02	4,11

Fonte: O Próprio Autor (2017)

A TAB. 05 foi desenvolvida a partir de testes e ensaios de sanidade de peças, tração, dureza e metalografia. A TAB. 05 apresenta os valores das composições que apresentam o melhor resultado para um tipo específico de peças mecânicas com geometria similares. Observa-se que os materiais cinzentos GG-20 e GG-25 operam com seus limites superior e inferior próximo ao ponto eutético do ferro fundido. Estes materiais, nesta empresa de fundição, eram utilizados em peças com geometrias menos complexas que favoreciam seus sistemas de alimentação e seu resfriamento, assim atingindo suas propriedades exigidas apenas com a boa fluidez do metal líquido no molde e ajustes de temperatura de vazamento.

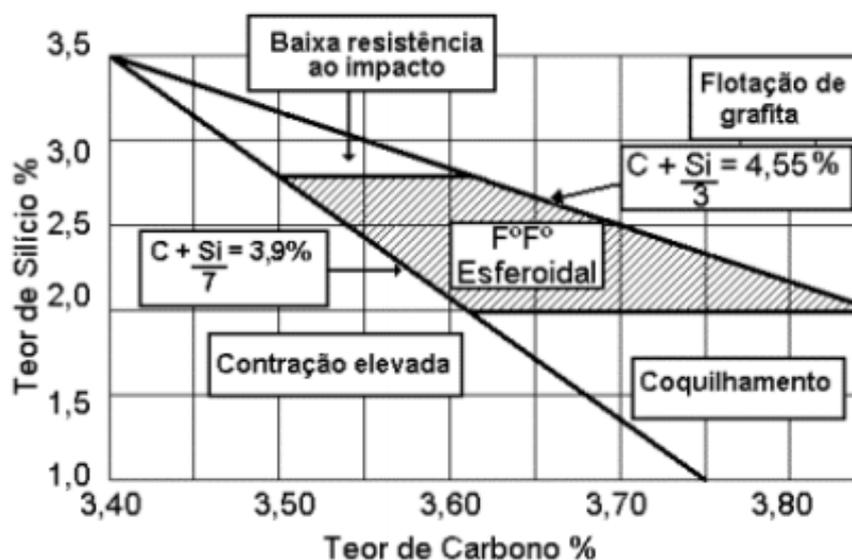
O material cinzento GG-15, apresentado na TAB. 05, é caracterizado como uma liga hipereutética uma vez que seus limites de carbono equivalente excedem o ponto eutético do ferro fundido. O motivo para este material ser produzido com uma liga hipereutética é a geometria das peças produzidas por esta empresa. Estas peças apresentavam grandes volumes de massa concentrada, o que dificultava o resfriamento das mesmas e formava porosidades e rechupes. Como supracitado, segundo Santos, Branco e Sinatora¹² (1977, apud SERBINO, 2005, p. 50) o aumento do carbono equivalente reduz a incidência de rechupes e porosidades. Entretanto conforme supracitado, segundo Chiaverini (2012) e Peixoto et al. (2015), o aumento do carbono equivalente reduz as propriedades mecânicas do material. Neste caso pode-se utilizar este recurso devido a peça não exigir esforços mecânicos.

¹² SANTOS, A. B. de S.; BRANCO, C. H. C.; SINATORA, A. **Alumínio em Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Resistência**. Metalurgia, São Paulo, vol. 33, p. 389-395, 1977.

O material cinzento GG-30, apresentado na TAB. 05, é caracterizado como uma liga hipoeutética uma vez que seus limites inferior e superior de carbono equivalente não atingem o ponto eutético do ferro fundido. O motivo para que este material seja uma liga hipoeutética é que as peças produzidas com este material devem apresentar propriedades mecânicas elevadas como resistência à tração e dureza. Segundo Chiaverini (2012) e Peixoto et al. (2015) as propriedades mecânicas do ferro fundido são inversamente proporcionais ao carbono equivalente da liga do material.

O carbono equivalente também pode ser utilizado, segundo Lussoli (2003), para reduzir possíveis defeitos relacionados a composição, com os teores de silício e de carbono, como flotação de grafita, redução da resistência ao impacto, elevação da contração do metal líquido, e aumento da tendência de coquilhamento. Conforme apresentado na FIG. 21, que apresenta o diagrama de Henderson, indicando as faixas de operação do carbono equivalente para ferros fundidos nodulares.

Figura 21 – Diagrama de Henderson para ferros fundidos nodulares



Fonte: CHIAVERINI¹³ (1997, apud LUSSOLI, 2003, p. 22),

Devido a constante substituição do ferro fundido por aço serão apresentadas algumas aplicações do carbono equivalente no processo de soldabilidade do aço.

¹³ CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1982/1997.

O carbono equivalente pode ser aplicado, também, na soldabilidade de aços. Segundo Jorge et al (2013), o teor de carbono equivalente do material depositado pela solda pode ser calculado pela equação 4:

$$\%C_{Eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (4)$$

Onde, segundo Jorge et al (2013), %C, %Mn, %Cr, %Mo, %V, %Cu, e %Ni são respectivamente os teores, em relação massa por massa, do material depositado de: carbono, manganês, cromo, molibdênio, vanádio, cobre e níquel. E o %C_{Eq} é o teor efetivo ou equivalente do carbono neste material de solda.

De acordo com Jorge et al (2013), o aumento do teor de carbono equivalente reduz a soldabilidade no aço, e reduz a taxa de resfriamento do conjunto soldado.

Modenesi (2011) cita que utilizando-se a equação 4 apresentada por Jorge et al (2013), pode-se calcular também o teor de carbono equivalente no aço, para identificar que tipo de solda, e composição química que a mesma deverá possuir para promover a junção do conjunto de aço.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ramo de fundição de ferro apresenta uma sequência de processos necessários para que o produto final atenda as especificações para a finalidade a qual o mesmo fora desenvolvido. O processo de fundição em areia fora utilizado neste trabalho para apresentar uma sequência de produção genérica do método de fundição mais difundido atualmente, abordando os conceitos fundamentais de uma fundição, uma vez que a indústria de fundição consiste em mais do que fundir metais, e sim criar formas com este material, e para tanto necessita de outros processos para que o fundido final seja produzido.

Todo material fundido atende a uma classe que é especificada para garantir propriedades mecânicas e/ou químicas, uma vez que a aplicabilidade exige propriedades diferentes, como eixos de transmissão de tração de caminhões que necessitam de alta resistência à tração e alongamento baixo. Estas classes determinam características de disposição de grafitas, dureza, tração, alongamento, flexão, resistência ao impacto, dentre outras, garantindo que o material final seja confiável em relação a aplicabilidade que o produto necessita.

As classes de materiais atingem seus objetivos devido as composições das ligas que as constituem. Cada elemento químico inserido na liga com ferro desempenha um fator importante na constituição e classificação do material, como o silício, o fósforo, o magnésio, o manganês, o carbono, e outros. Cada um tem uma finalidade específica, seja elevar a grafitização, elevar a taxa de carboneto, ou outro. Os elementos de liga alteram as propriedades de modo a se obter o produto ideal para uma determinada aplicação.

Embora haja classes específicas de materiais algumas não conseguem atender a critérios exigidos para projetos como sanidade interna devido a questões de resfriamento e contração. Algumas peças possuem geometrias complexa que dificultam a ação dos sistemas de alimentação e de realimentação, causando defeitos como rechupes e porosidades. Entretanto algumas alterações na composição química como os teores de carbono, silício e fósforo elevam o carbono equivalente que aumenta a fluidez do metal líquido e reduz o ponto de solidificação do metal líquido.

O emprego de silício e fósforo em uma liga de ferro-carbono possibilita a obtenção de ligas eutéticas, hipoeutéticas e hipereutéticas, que possibilitam a operação do ferro fundido para uma vasta gama de aplicabilidades. Como por exemplo pecas que possuem grandes massa concentradas é utilizado a liga hipereutética a fim de produzir um sólido com um alto grau de sanidade interna e com baixas propriedades mecânicas. As ligas hipoeutéticas são utilizadas para produção de itens que exigem altos valores de resistência mecânica, e não exigem que o

metal líquido seja utilizado com alta fluidez. As ligas eutéicas são, no geral, empregadas em peças com geometria complexa que necessitam de uma fluidez maior e um maior poder de fechamento intersticial.

A aplicabilidade desta técnica se estende principalmente em ramos mecânicos, metalúrgicos, e de prospecção onde é necessário se criar peças com formas muito complexas e com propriedades altamente específicas.

O ramo de ferro fundido tem sido deixado em segundo plano com a aplicação de novos materiais metálicos. Entretanto este trabalho demonstra que o ferro fundido precisa ser estudado mais a fundo, pois conforme apresentado neste trabalho pequenas alterações em elementos essenciais na composição química do ferro fundido podem produzir novas classes deste material para aplicações específicas. Como fora o caso do ferro fundido vermicular, ou de grafita compacta, que fora desenvolvido a partir da falha na nodularização do ferro fundido nodular, que gerou uma nova classe de ferro fundido que é utilizada na produção de proteção sistemas térmicos, como o bloco do motor de veículos automotores.

REFERÊNCIAS

- ABIFA. **Associação Brasileira de Fundição**. Disponível em: < <http://www.abifa.org.br/>>. Acesso em 12 jun. 18.
- ABREU, A. G. S.; SANTOS, C. de P.; GANIVET, M. **Publicação Técnica SENAI-MG – Fundição, 17: Determinação dos sistemas de massalotes e canais – volume II**. 2. ed. Belo Horizonte: DFP/DAT, 1987.
- ASTM A 247. **Método de Teste Padrão para Avaliação da Microestrutura de Grafite em Fundidos de Ferro**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ASTM A532 / A532M-10. **Especificação padrão para ferros fundidos resistentes a abrasão**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- ASTM. **Sociedade Americana para Testes e Materiais**. Disponível em: <<http://www.astm.org>>. Acesso em 6 jun. 18.
- CABEZAS, C. S. et al. **Os diagramas de fase estável e metaestável do sistema Fe-C-X (X=Cr, Si) e a solidificação dos ferros fundidos**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro/SP, 14º, p. 35401-35411, 2000. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC306-013.pdf>>. Acesso em 16 jun. 18.
- CAPELLO, E. **Tecnología de la Fundición**. 1. ed. Editorial Gustavo Gili, S.L., 1996.
- CASOTTI, B. P.; FILHO, E. D. B.; CASTRO, P. C. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.33, p. 121–162, mar. 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1721/1/A%20BS%2033%20Ind%C3%B3ria%20de%20fundi%C3%A7%C3%A3o%20-%20situa%C3%A7%C3%A3o%20atual%20e%20perspectivas_P.pdf>. Acesso em: 9 mar. 18.
- CEMP 186. **Materiais para Fundição – Determinação da Colapsibilidade em Areias de Macho: Método de Ensaio**. CEMP – Comissão de Estudo de Matérias Primas, Aprov. dez. 1993, rev. nov. 2015. Disponível em: < <http://www.tecnofund.com.br/cemp/normas/186.pdf>>. Acesso em 20 mai. 18.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1982/1997.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. rev. tec. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2008.
- DIN. **Instituto Alemão de Padronização**. Disponível em: <<http://www.din.de>>. Acesso em 6 jun. 18.

FERREIRA, A. B. de H. **Miniaurélio: o minidicionário da língua portuguesa**. 4. ed. ampl. e rev. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2000.

IPT-SP. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. [19--?]

JORGE, J. C. F. et al. **Efeito do Tratamento Térmico Pós-Soldagem nas Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Metal de Solda de Aço de Extra Alta Resistência para Utilização em Equipamentos de Ancoragem**. Rio de Janeiro: DEMA/PUC-Rio, Abril de 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/si/v18n2/v18n2a07>>. Acesso em: 23 out. 18.

LUSSOLI, R. J. **Efeito da Adição de Cobre e da Seção da Peça Sobre as Características Microestruturais e Mecânicas de Ferro Fundido Nodular Austemperado**. 2003. 85 páginas. Tese de Mestrado. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. 2011. 26 páginas. ?. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>>. Acesso em: 23 out. 18.

PEIXOTO, F. de M. et al. Artigo 11594: Desenvolvimento de um Software para cálculo da densidade de nódulos de grafita em ferro fundido nodular através de Processamento Digital de Imagens. **Revista Matéria**, Maracanaú/CE, volume 20, n° 1, p. 262-272, 2015.

SANTOS, A. B. de S.; BRANCO, C. H. C.; SINATORA, A. **Alumínio em Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Resistência**. Metalurgia, São Paulo, vol. 33, p. 389-395, 1977.

SANTOS, A. B. de S. **Efeitos da Composição Química na Produção de Ferro Fundido Nodulares**. Rio de Janeiro: 55° Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2000.

SERBINO, E. M. **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. 2005. 111 páginas. Monografia. USP – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SOARES, G. de A. **Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, Abril de 2000.

TAYLOR, H. F.; FLEMINGS, M. C.; WULFF, J. **Foundry Engineering**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1965.