



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS



ENG 02298 – TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

ANÁLISE DE DEFEITOS EM PEÇAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO
UTILIZANDO-SE DA ANÁLISE MORFOLÓGICA E CORRELAÇÃO COM A
LITERATURA

Aluno: Juliana Dagnese
Nº Cartão: 128794

Professor Orientador: Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Junior

Dezembro de 2008

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jaime Spim, pela orientação recebida durante este trabalho.

Ao professor Enio Heinen, cuja colaboração e ensinamentos foram muito importantes para a realização do trabalho.

Ao engenheiro Régis Amaral, e aos amigos Diogo Krammer Topolski, Jankiel Bordignon e Marcus Birnfeld pelo auxílio e sugestões.

A Empresa John Deere, pela infra-estrutura, oportunidade e apoio ao trabalho.

A Empresa PL Fundições, ao colaborador Túlio e sua equipe, pelo tempo, disponibilidade e auxílio.

Aos colegas e amigos Mikael Noremborg e Karina Wieck pelo apoio e pela ajuda recebida durante a realização deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Materiais pelos ensinamentos, apoio, dedicação e compreensão.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela infra-estrutura.

A toda minha família e amigos, pelo incentivo.

RESUMO

Fundição em moldes de areia é uma das mais antigas e conhecidas técnicas para obtenção de peças de ferro fundido cinzento, porém a suscetibilidade do processo à variação das condições do mesmo pode gerar inúmeros defeitos originados de diferentes causas raiz, o que exige um estudo mais aprofundado de cada defeito, para que então se atue na correta causa das falhas.

É apresentado um caso de análise morfológica de defeitos de dois componentes de ferro fundido cinzento. Os componentes são obtidos pelo processo de fundição em molde de areia verde. Utilizando-se da correlação das características morfológicas dos defeitos observados com a literatura e classificando-os seguindo o Atlas Internacional de Defeitos de Fundição, normalização criada pelo *International Committee of Foundry Technical Association*, foi possível levantar possíveis causas dos mesmos e suas possíveis soluções.

Apresenta-se ainda a simulação computacional de solidificação de um dos componentes. A simulação teve o intuito de identificar possíveis zonas de porosidade devido à contração natural que o ferro fundido cinzento apresenta durante seu resfriamento e solidificação.

As evidências observadas avaliando-se a morfologia dos defeitos apontaram maior relação com os seguintes defeitos descritos na literatura: Inclusão de Areia e Inclusão de Escória, Gota Fria e Rechupes Dispersos. A simulação computacional de solidificação não apontou potenciais pontos de rechupe na peça.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 FERROS FUNDIDOS	6
3.2 FERRO FUNDIDO CINZENTO	7
3.3 PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM MOLDE DE AREIA VERDE	8
3.4 SOLIDIFICAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS.....	9
3.5 FORMAS DE ALIMENTAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NA SOLIDIFICAÇÃO	10
3.5.1 <i>Formas de alimentação</i>	10
3.5.2 <i>Influência do massalote</i>	11
3.6 INOCULAÇÃO	16
3.7 DEFEITOS EM FERROS FUNDIDOS CINZENTOS	17
3.7.1 <i>Rechupes</i>	18
3.7.2 <i>Pinholes de Hidrogênio</i>	20
3.7.3 <i>Defeitos devido ao Nitrogênio</i>	21
3.7.4 <i>Inclusões</i>	22
3.7.5 <i>Erosão ou lavagem</i>	24
3.7.6 <i>Bolhas de gás</i>	26
3.7.7 <i>Mau enchimento devido a gases</i>	27
3.7.8 <i>Explosão</i>	27
3.7.9 <i>Defeitos devidos à alimentação</i>	28
3.8 CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS DE FUNDIÇÃO	29
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4.1 ANÁLISE DOS DADOS DE REFUGO E ESCOLHA DAS AMOSTRAS.....	30
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
4.2.1 <i>Microestrutura</i>	35
4.2.2 <i>Dureza</i>	35
4.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA E CARACTERIZAÇÃO DOS DEFEITOS	35
4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SOLIDIFICAÇÃO	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	37
5.1.1 <i>Peça 5000</i>	37
5.1.2 <i>Peça 7000</i>	39
5.1.3 <i>Dureza</i>	40
5.2 ANÁLISE MORFOLÓGICA E CARACTERIZAÇÃO DOS DEFEITOS	40
5.2.1 <i>Peça 5000</i>	40
5.2.2 <i>Peça 7000</i>	53
5.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SOLIDIFICAÇÃO.....	59
5.3.1 <i>Temperatura de Vazamento</i>	59
5.3.2 <i>Acima da Temperatura de Vazamento</i>	60
5.3.3 <i>Abaixo da Temperatura de Vazamento</i>	61
6. CONCLUSÃO.....	62
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	63
8. BIBLIOGRAFIA	64

1. Introdução

Defeitos de descontinuidade em peças de ferro fundido cinzento, causadas por cavidades e inclusões, têm aumentado o índice de refugo e diminuído a produtividade da fundição. Em muitos casos, estes defeitos são sub-superficiais e somente revelados após usinagem. Uma identificação precisa do defeito deve ser feita antes de se tomar decisões a respeito de medidas corretivas. Uma correta análise da localização, forma e tamanho do defeito fornece informações importantes com respeito à sua origem. A análise de tais fatores é a principal chave para se determinar com precisão as causas e soluções para a maioria dos defeitos em peças de ferro fundido.

Uma correta metodologia de análise de defeitos evita uma grande, e às vezes desnecessária, aplicação de recursos por parte das empresas na investigação de suas causas e propostas de soluções. Várias ferramentas da qualidade podem e devem ser utilizadas para este fim, mas existe um fator de grande importância para o sucesso de análise de defeitos, o “registro de refugo” ou de “defeitos”. Sem este, toda a sistemática de análise usará como ferramenta principal o método de tentativas sucessivas.

O registro de refugos deve conter todas as informações necessárias para se fazer um histórico completo da peça analisada, é importante que sejam registrados, por exemplo, nome do defeito, a descrição do defeito, o motivo do refugo, a porcentagem do defeito no lote fabricado, etc.

2. Objetivos

Este trabalho visa caracterizar os principais defeitos encontrados em peças de dois modelos de discos de freio, peças de ferro fundido cinzento, e através da comparação da morfologia com a literatura, levantar as possíveis causas destes defeitos e suas soluções.

Além disso, o trabalho visa analisar pontos de rechupe através da simulação computacional da solidificação de uma das peças.

As peças analisadas apresentam alto índice de refugo na casa do cliente, gerando altos custos de rejeição e custos de operação, visto que os defeitos se revelam somente depois das superfícies serem usinadas.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Ferros fundidos

O ferro fundido é uma liga essencialmente ternária constituída pelos elementos Fe- C- Si em que o teor de carbono toma valores superiores a 2%. Estas percentagens do carbono são superiores à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo que por solidificação do FoFo resulta carbono parcialmente livre na forma corrente de veios ou de lamelas de grafite. O FoFo é um material versátil e de aplicação bastante generalizada, que pode ser produzido com uma estrutura frágil, ou com uma estrutura dúctil de menor dureza. [1]. Na figura 3.1, visualiza-se o diagrama de fases Fe-C.

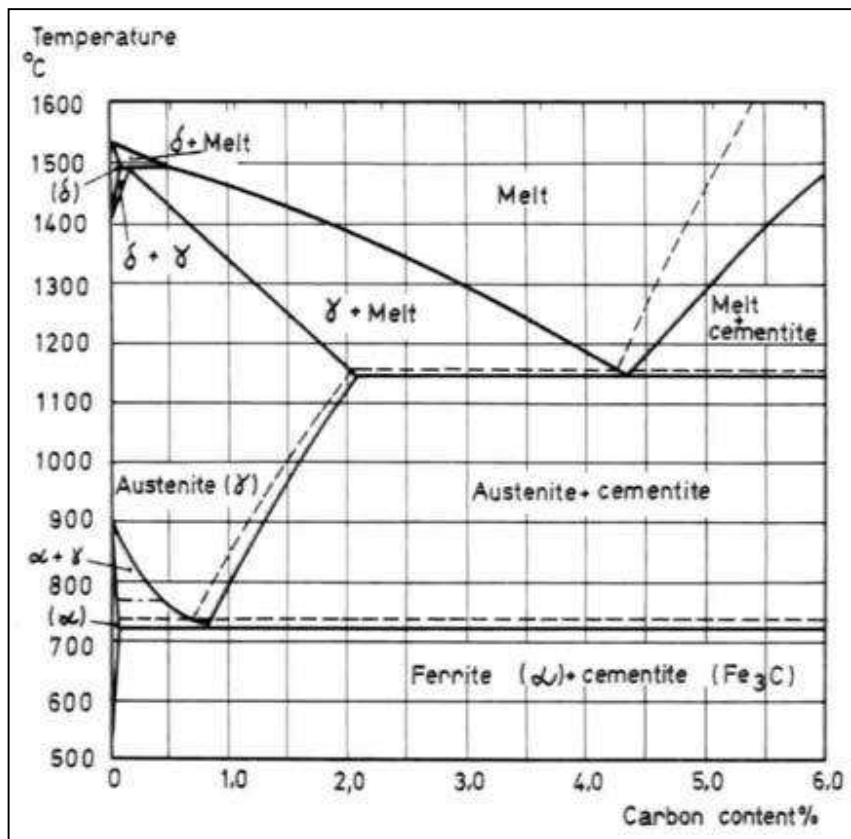


Figura 3.1 Diagrama de fases Fe-C.

Podemos distinguir os seguintes tipos de ferros fundidos:

- Ferro fundido branco
- Ferro fundido cinzento

- Ferro fundido mesclado
- Ferro fundido maleável
- Ferro fundido nodular (esferoidal)
- Ferro fundido nodular (austemperado)

3.2 Ferro fundido cinzento

Designa-se por ferro fundido cinzento uma liga ferro-carbono que solidifica no sistema estável, isto é, em que o carbono eutético precipita sob a forma de grafita; a sua estrutura é basicamente constituída por grafita inserida numa matriz perlítica/ferrítica, com possibilidade de aparecer ferrita e cementita (indesejável), cujo aspecto característico se apresenta na figura seguinte. [2]



Figura 3.2. Microestrutura típica de um ferro fundido cinzento.

A composição química geral do FoFo cinzento pode ser conferida na tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3 Composição geral dos principais elementos do FoFo cinzento.

Elemento	Faixa de composição (%)
Carbono	2,5 - 4,0
Silício	1,0 - 3,0
Manganês	0,25 - 1,00
Enxofre	0,02 - 0,25
Fósforo	0,05 - 1,00

O ferro cinzento é um material com elevada fluidez no estado líquido, capaz de permitir a produção de peças finas e de forma complicada; quando solidifica, a formação de grafita (com baixa densidade) provoca uma expansão que contraria a contração metálica inerente à solidificação, originando peças sãs com excelentes rendimentos metalúrgicos. [3]

O termo de ferro cinzento refere-se a uma classe de ligas ferrosas de fundição,

normalmente caracterizadas por uma microestrutura de flocos de grafita numa matriz de ferro. Os ferros cinzentos são na sua essência Fe-C-Si, contendo pequenas quantidades de outros elementos. Como classe eles variam significativamente nas suas propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas. A metalurgia de ferros cinzentos é extremamente complexa devido a uma grande variedade de fatores que influenciam em sua solidificação e também nas transformações no estado sólido. [2]

3.3 Processo de fundição em molde de areia verde

O processo mais usado na produção de peças em ferro fundido cinzento é a fundição em areia verde. Os processos de fundição envolvem o vazamento de ligas metálicas em moldes resistentes a temperaturas acima das temperaturas de fusão dos metais (temperaturas de sobreaquecimento). Devido ao fato dos moldes metálicos (considerados “permanentes”) não resistirem, no tempo, ao desgaste erosivo e à fadiga térmica originada pelas altas temperaturas de vazamento dos fundidos em ligas ferrosas, a maioria das peças são vazadas em moldes obtidos por compactação de uma mistura de areia com aglomerantes, aditivos e uma certa porcentagem de umidade, designada por fundição em “areia verde”.

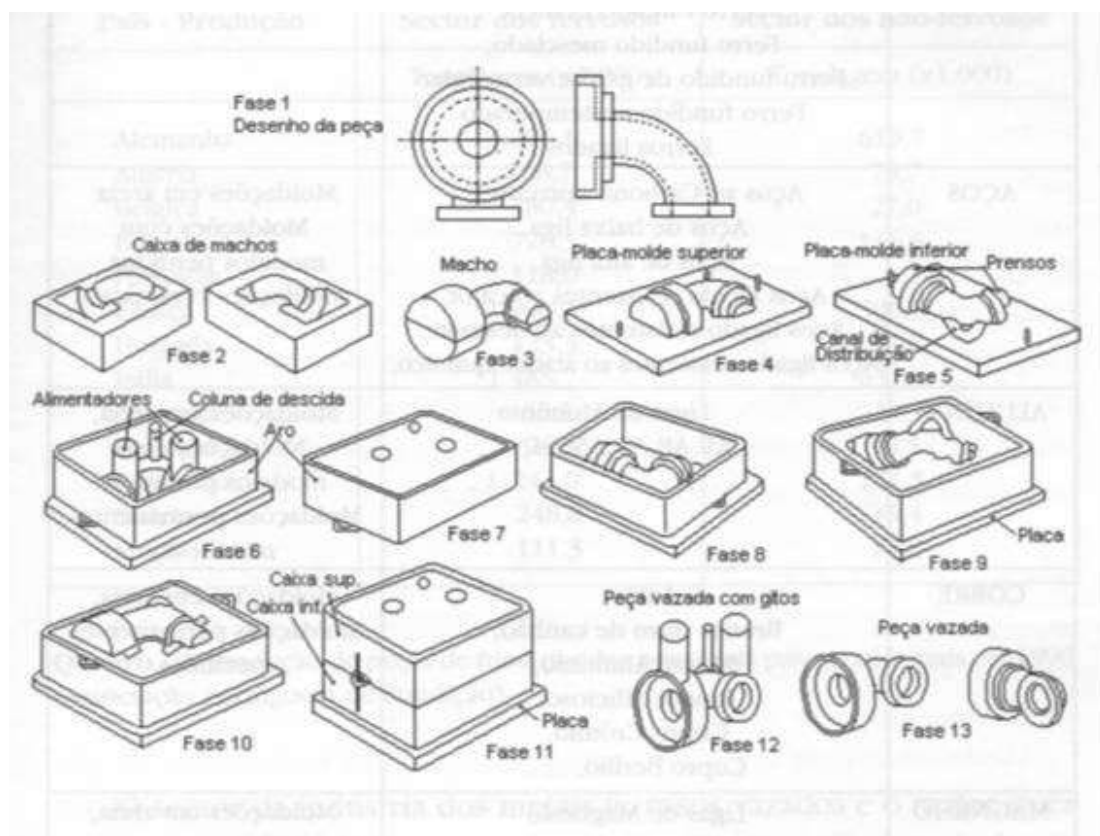


Fig. 3.4 – Processo normal de obtenção de peças de fundição em moldes de areia verde.

3.4 Solidificação de Ferros fundidos

Os ferros fundidos com grafita são ligas do sistema Fe-Si-C que se solidificam através de uma reação eutética, caracterizando-se pela formação de duas fases: austenita e grafita. Dentro dessa família de ligas, os ferros fundidos cinzentos são uma das mais comuns. [4]

Os ferros fundidos têm uma característica bastante peculiar durante sua solidificação: ocorre um aumento do volume do líquido devido à precipitação da grafita. Tal fenômeno é denominado “expansão grafítica”. Esta expansão pode tanto favorecer a alimentação de uma peça, compensando a contração líquida e de solidificação como também promover o deslocamento das paredes do molde alterando o volume do mesmo, favorecendo a formação de rechupes e porosidades (também chamados pseudo-rechupes). Geralmente, os ferros fundidos cinzentos têm composições químicas que vão da eutética à hipoeutética, conforme aumentam as propriedades mecânicas requeridas ($Ce \leq 4,3\%$). Quanto mais hipoeutéticas são as composições, maiores são as quantidades de austenita (dendritas) que se formam antes do eutético. O eutético dos ferros fundidos cinzentos é do tipo cooperativo, formando-se simultaneamente a grafita e a austenita com o decorrer da solidificação. [4]

Os ferros fundidos cinzentos apresentam um pequeno intervalo de solidificação nas composições químicas comerciais. Entretanto, essa liga não tende se solidificar com a formação de uma “casca sólida”, que avança em direção aos centros térmicos, devido à nucleação independente na frente da interface, caracterizando-se por uma solidificação “pastosa”. [4]

O crescimento de uma célula eutética (austenita + grafita) é bastante independente, e no final da solidificação restam porções de líquido intercelular em finos canais. A movimentação do líquido pelos canais intercelulares é difícil, e essa dificuldade aumenta com o aumento do número de células eutéticas. [4]

Como visto anteriormente, a maior parte da grafita forma-se diretamente do líquido, e sendo essa fase de baixa densidade, sua precipitação provoca um aumento de volume e de pressão de líquido. Essa precipitação é a principal responsável pelo fenômeno de inchamento de peças quando são usados moldes não rígidos (pressão interna do líquido no molde elevado) e pelo fenômeno de refluxo em canais de descida quando são usados moldes rígidos. [4]

Acompanhando-se a solidificação de ferros fundidos cinzentos nota-se uma contração

primária correspondente à contração líquida do metal e no caso de ligas hipoeutéticas, a contração de solidificação da fase pró-eutética. Nota-se também uma contração secundária correspondente à solidificação das regiões intercelulares. As contrações são responsáveis pela formação de rechupes. [4]

As pressões do metal líquido são baixas para módulos de resfriamento ≤ 1 cm, onde as velocidades de resfriamento são grandes, aumentando a tendência de formação de uma “casca” (solidificação menos pastosa). Na “casca sólida” a contração secundária reduz as pressões exercidas sobre o molde, geradas pela expansão do metal (expansão gráfica). Para módulos maiores, a tendência da formação da “casca” diminui, aumentando as porções em solidificação no período de expansão. [4]

Tecnologicamente, a expansão gráfica pode auxiliar na alimentação das peças, ou seja, os aumentos da pressão obtidos com a expansão podem reduzir ou eliminar os efeitos de baixa pressão provocados pelas contrações líquidas, primárias e secundárias. Para isso, durante o período de expansão, o líquido deve ser confinado no molde e, por sua vez, o molde não deve sofrer deformação definitiva, de modo a não aliviar a pressão. O confinamento do líquido no molde é garantido com a solidificação dos canais de enchimento e uso de massalotes cegos. A deformação do molde pode ser evitada com o emprego de moldes rígidos (em resina ou silicato de Sódio/CO₂) ou, no caso de areia à verde, com o emprego de máquinas de moldar de alta pressão. [4]

3.5 Formas de alimentação e sua influência na solidificação

3.5.1 Formas de alimentação

3.5.1.1 Alimentação convencional

A alimentação convencional baseia-se na aplicação de gradientes térmicos em direção aos massalotes, fazendo com que esses compensem as contrações primárias e secundárias por reposição de líquido sem utilizar o período de expansão. Para alimentação da contração primária, a utilização de massalotes segue recomendações gerais. Contudo, a alimentação da contração secundária é dificultada pela região “pastosa”, exigindo gradientes de temperatura maiores para reduzir a extensão dessa região e aplicação de grandes pressões nos massalotes para garantir a movimentação do líquido de reposição pelos canais intercelulares. A utilização de alimentação não tem exigências quanto à

resistência dos moldes e temperaturas de vazamento. Algumas recomendações práticas são sugeridas, tais como:

1. Garantir solidificação dirigida para os massalotes (uso de resfriadores, ataque nos massalotes, uso de luvas exotérmicas);
2. Evitar grandes massas de metal isoladas, sem alimentação;
3. Garantir alta pressão nos massalotes (massalotes diretos abertos, ataque ou laterais abertos localizados nas paredes superiores da peça);
4. Elevar temperatura de vazamento para peças finas, intensificando os gradientes térmicos. [6]

3.5.1.2 Alimentação pressurizada

Os sistemas de alimentação, utilizando a expansão da grafita, baseiam-se no confinamento da mesma dentro do molde. Dessa forma, os sistemas de alimentação devem garantir a alimentação da contração primária, devendo haver rápida solidificação dos canais de ataque e seções de ligação massalote/peça. Para garantir a não deformação dos moldes (que estarão com alta pressão interna), devem-se utilizar moldes rígidos.

O volume dos massalotes pode ser pequeno, apenas suficiente para compensar a contração primária. Para melhor utilização da pressão de expansão da grafita é necessário um controle rígido do processo seguindo todas as especificações do projeto. [6]

3.5.1.3 Alimentação sem massalotes

O sistema de alimentação sem massalotes baseia-se na compensação das contrações primária e secundária pela expansão gráfitica. Para que isso seja possível, a contração líquida deve ser limitada (baixas temperaturas de vazamento $\leq 1350^{\circ}\text{C}$) e deve haver total restrição ao refluxo durante a expansão (moldes rígidos e ataques finos). A redução de gradientes térmicos é também recomendável, evitando-se tempos de solidificação muito diferentes (ataque pelas partes finas das peças, resfriadores nas partes mais espessas, tempo de enchimento curto, ataques múltiplos). [6]

3.5.2 Influência do massalote

3.5.2.1 Forma dos massalotes

De acordo com a equação de Chvorinov o tempo de solidificação é função da relação volume/área.[5].

Quanto maior o volume de metal, maior a quantidade de calor contido, tendendo a aumentar o tempo necessário para solidificação. Já o aumento da área facilita a troca de calor com o meio, tendendo a diminuir este tempo. Assim, a velocidade de resfriamento, e, portanto de solidificação para um dado volume de metal será função da área superficial correspondente, que pode variar conforme a geometria. [6]

Para um dado volume, a forma geométrica de menor área superficial é a esfera. Contudo, a utilização de massalotes esféricos é problemática em termos de moldagem, além do que na prática é difícil manter o fluxo de metal líquido do massalote para a peça. A forma geralmente adotada é a cilíndrica, com as áreas da base e superior geralmente semi-esféricas. Em alguns casos usam-se massalotes semi-esféricos. [6]

Convém lembrar que as formas cilíndricas apresentam uma distorção nos tempos de solidificação em relação ao módulo calculado, devido à superfície convexa. [6]

3.5.2.2 Posicionamento de massalotes

O procedimento normal quanto ao posicionamento dos massalotes segue a recomendação básica de manter um gradiente térmico positivo em sua direção. Assim, sem o uso de recursos especiais, podemos supor que as partes mais finas (menor módulos) solidificam com menor tempo, e devem ser alimentadas pelas partes mais grossas. As partes mais grossas por sua vez devem ser alimentadas pelos massalotes. [6]

A colocação dos massalotes ligados às seções mais grossas pode, no entanto, não ser a técnica empregada, desde que sejam feitas alterações na taxa de extração de calor dessas regiões (uso de resfriadores, por exemplo). [6]

Os cuidados principais no posicionamento de massalotes referem-se a evitar distâncias de alimentação muito extensas (principalmente em seções paralelas) e evitar a ocorrência de pontos quentes isolados do fluxo de metal fornecido pelo massalote. [6]

3.5.2.3 Tipos de massalotes

Os massalotes abertos são os mais usados em fundição por facilitarem a saída dos gases da cavidade do molde durante o vazamento. Suas principais desvantagens são a

grande perda de calor por radiação através da superfície superior e a dificuldade de controlar a sua altura durante o vazamento. [6]

O uso de pós de cobertura ou pós exotérmicos é muito comum para reduzir as perdas por radiação e para manter a superfície líquida, aumentando assim a pressão exercida pelo massalote (pressão metalostática + pressão atmosférica). [6]

Massalotes fechados ou cegos apresentam maior eficiência térmica, mas por serem de menor alturas exercem menor pressão sobre a peça. Essa limitação é particularmente crítica em ligas que solidificam com um pequeno intervalo de solidificação, tendendo à formação de uma casca solidificada em torno do massalote, que impede a ação da pressão atmosférica. Nesses casos, a utilização de machos pressurizados ou apenas a criação de um ponto quente na parte superior desses massalotes é geralmente suficiente para evitar a solidificação da casca superior, permitindo a ação favorável da pressão atmosférica. [6]

A pressão atmosférica é equivalente à pressão metalostática de 1,30m de aço, 1,15m de cobre ou 4,34m de alumínio. Dessa forma, auxiliado pela pressão atmosférica, um massalote poderia teoricamente alimentar uma região de altura muitas vezes superior à própria altura. [6]

Na prática os machos pressurizados também são usados em massalotes abertos, além do emprego de pós exotérmicos. [6]

A utilização de respiros na parte superior dos massalotes cegos é uma técnica recomendada, facilitando a extração dos gases da sua cavidade durante o preenchimento. [6]

3.5.2.4 Técnicas para aumentar o rendimento de massalotes

Alterações nas condições de trocas térmicas no conjunto peça + massalote são obtidas através de técnicas como uso de luvas e materiais isolantes ou exotérmicos junto aos massalotes e uso de resfriadores junto às seções grossas da peça. [6]

A melhoria no rendimento dos massalotes pode ainda ser obtida posicionando os canais de ataque diretamente nos massalotes. Dessa forma, todo metal destinado ao preenchimento da peça passa primeiro pelo massalote, aquecendo a cavidade nessa região, além do que ao término de enchimento do molde, o massalote sendo a última região a ser preenchida, conterá o metal mais quente. [6]

Na fundição de peças grandes é prática comum o preenchimento de massalotes por

um sistema independente de canais após se completar o vazamento da peça. [6]

3.5.2.5 Considerações sobre a ligação massalote/peça

A ligação massalote/peça, conhecida como pescoço, tem por função estabelecer uma ligação, permitindo o fluxo de metal líquido do massalote para a peça, durante o estágio de solidificação. [6]

O principal parâmetro de projeto para pescoço é o tempo de solidificação, devendo permanecer líquido (parcialmente) enquanto houver necessidade de alimentação. Na maioria dos casos, esse tempo de solidificação é intermediário entre o do massalote e o da peça. No caso particular dos ferros fundidos nodular e cinzento, em que se pretende usar a expansão da grafita como forma de compensação da contração, os massalotes só devem alimentar as contrações de solidificação da fase pré-eutética, devendo o pescoço se solidificar antes do início da reação eutética, evitando o fenômeno de refluxo. [6]

Outra característica importante que deve ser considerada no projeto das ligações massalote/peça é a limpeza posterior da peça fundida. O posicionamento e forma dessa ligação deve facilitar os trabalhos de corte e esmerilhamento dessas áreas. [6]

3.5.2.6 Influência das Características de Solidificação na Alimentação de Ferros

Fundidos Cinzentos e Nodulares

Os ferros fundidos cinzentos e nodulares têm em comum a precipitação de grandes quantidades de grafita durante a solidificação (cerca de 10% em volume). [6]

Como a grafita tem densidade aproximadamente três vezes menor a do ferro, a sua precipitação é acompanhada de uma expansão volumétrica, que pode ser aproveitada para compensar a contração de solidificação da austenita do eutético. [6]

Em ferros fundidos de composição hipoeutética a solidificação se inicia com a formação da austenita pró-eutética, ocorrendo posteriormente a reação eutética, com precipitação de grafita e austenita. Nessas composições a precipitação de grafita geralmente não é suficiente para compensar as contrações líquida e de solidificação da austenita pró-eutética. [6]

É importante notar que a compensação da contração volumétrica pela expansão da grafita só será obtida se se conseguir confinar essa expansão à cavidade da peça e, assim,

umentar a pressão interior. Se houver refluxo de metal pelos canais ou para o massalote, ou ainda, dilatação considerável da cavidade do molde (comum em areia verde), o efeito da expansão será perdido. Mesmo nos casos em que se consiga aproveitar essa expansão devida à solidificação do eutético, há que compensar por outros meios a contração líquida, que pode ser reduzida com a utilização de baixas temperaturas de vazamento. [6]

O sucesso da utilização da expansão da grafita para compensar a contração depende, portanto:

a) emprego de moldes rígidos ou mesmo de moldes de areia a verde produzidos em máquinas de alta pressão, garantindo mínima expansão do molde;

b) utilização de baixas temperaturas de vazamento, reduzindo a contração líquida (no caso decomposições eutéticas e hipereutéticas);

c) garantir a solidificação dos canais após a compensação da contração líquida e a contração de solidificação da fase pró-eutética, garantindo que ocorra a solidificação da ligação massalote/peça antes do início da reação eutética. [6]

A alimentação dessas ligas pode ainda ser feita pelo processo tradicional, sem considerar-se a expansão da grafita. Nesse caso, a solidificação se processa por células de interface lisa, mas que, devido à nucleação independente à frente da interface, intensificada pelo uso de inoculantes, dificultam o fluxo de metal líquido intercelular nos últimos estágios da solidificação. [6]

O emprego de grandes gradientes de temperatura para redução da extensão da zona “pastosa” é um expediente perigoso nessas ligas podendo provocar a precipitação do carbono na forma metaestável de carbonetos. [6]

3.5.2.7 Função dos canais de alimentação

Além de simplesmente servir de conduto para o metal líquido atingir a cavidade do molde correspondente à peça, um sistema de canais de enchimento pode ser projetado de maneira a cumprir diversas funções:

- Reduzir a turbulência do fluxo de metal à medida que o mesmo percorre o sistema e penetra na cavidade do molde. A existência de turbulência leva à captação de ar e de gases do molde pelo fluxo do metal, podendo provocar, portanto, defeitos na peça devido à presença de óxidos e bolhas.
- Evitar a formação de regiões de baixa pressão junto ao fluxo metálico, evitando assim a aspiração de ar ou gases do molde.

- Diminuir a velocidade do fluxo metálico, permitindo diminuir a possibilidade de ocorrência de erosão do molde de machos, diminuir a turbulência e facilitar a separação de drosses e escórias.
- Permitir o preenchimento do molde em um tempo previamente estipulado, de acordo com as características da peça e do molde.
- Contribuir para o estabelecimento de gradientes térmicos que facilitem a alimentação da peça.
- Eliminar ao máximo aspectos subjetivos e a dependência em relação a habilidades individuais no momento do vazamento da peça. [6]

Nenhum “método de cálculo de canais” resolve por si só o problema de preenchimento de todas as peças fundidas. Fatores como rendimento metálico, disponibilidade de espaço na placa, altura de caixas, geometria da peça fundida e dificuldade de moldagem, vão condicionar a aplicação das soluções estudadas exclusivamente do ponto de vista do preenchimento. [6]

Um dos fatores mais importantes a se considerar é a sensibilidade da liga quanto à formação de escória e drosses. Quanto maior a tendência para a formação de óxidos (e, portanto drosses e escória), maior deve ser o rigor na aplicação dos princípios de projeto que visam a diminuir a turbulência e aspiração no sistema de canais. Quanto ao uso de sistemas de separação e retenção de escória, deve-se ter em mente que aqueles baseados na flutuação das escórias e sua retenção por adesão à parede superior os canais só funciona se houver diferença de densidade entre o metal e os compostos formados. [6]

Ao contrário das ligas de alumínio e magnésio, os ferros fundidos cinzentos comuns e alguns tipos de latões e bronzes são pouco sensíveis à formação de escórias. Nestas ligas, portanto, o sistema de canais pode priorizar outras necessidades, como rapidez de enchimento (desde que não provoque erosão de moldes ou machos), rendimento metálico (peso da peça sobre o peso total fundido), posicionamento para favorecer a alimentação, etc. [6]

3.6 Inoculação

A inoculação é um procedimento corrente na atual prática metalúrgica de

elaboração de ferros fundidos cinzentos, quaisquer que sejam os seus tipos de grafita, modo de elaboração ou processo de fundição. [7]

Existem diversos modos de inoculação, com modificação no tipo de liga, granulometria empregada, forma, momento e teor de adição. [7]

A inoculação consiste na adição tão tardia quanto possível, de uma pequena quantidade de um produto “ativo” ao banho, normalmente à base de grafite ou um ferro silício, que ao incorporar-se promove a formação de núcleos heterogêneos, necessários à precipitação da grafita. Dado que parte dos núcleos tendem a dissolver ou separam por diferença de densidade (fenômeno chamado fading), a sua efetividade diminui com a passagem do tempo. O crescimento deste tipo de fases não metálicas, no seio de banhos metálicos, necessita que haja homogeneidade na dispersão do inoculante pelo banho, proporcionando simultaneamente campos de elevada atividade de carbono e com boa quantidade e qualidade de núcleos.[7]

A prática de inoculação promove os seguintes efeitos:

- a) Aumento da densidade de grãos eutéticos;
- b) Evitar a precipitação de carbonetos primários;
- c) Diminuição da sensibilidade à variação da espessura da seção;
- d) Melhorar a aptidão à usinabilidade;
- e) Promover a precipitação tipo A, no lamelar, ou de melhor nodularidade.

O aumento da densidade dos grãos eutéticos depende, igualmente da composição em carbono equivalente e espessura da seção, além da velocidade de arrefecimento.[7]

3.7 Defeitos em Ferros fundidos cinzentos

Pode-se definir defeito em peça fundida ou defeito de fundição como sendo qualquer desvio em relação à qualidade especificada para a peça fundida. Esse termo não abrange, normalmente, a composição química e a qualidade metalúrgica da peça, mas principalmente os aspectos relacionados a:

- Sanidade interna da peça fundida ou ausência de continuidade como vazios produzidos por contração ou gás, inclusões, etc.

- Precisão dimensional ou geometria da peça fundida,
- Estado da superfície ou acabamento superficial.[6]

Os defeitos de fundição podem ter sua origem de diferentes causas:

- Defeitos devidos aos moldes de areia verde: envolve movimentação das paredes do molde, erosão, gases, expansão da areia, etc.
- Defeitos devidos à alimentação: envolvem tipo, forma e posicionamento dos massalotes, características de solidificação das ligas, canais de alimentação, etc.
- Defeitos ligados à composição química: envolvem a influência dos teores dos elementos químicos base (carbono, silício, manganês, enxofre, fósforo) e a tendência de reação com oxigênio.

Segue uma breve descrição dos defeitos mais comuns encontrados em ferros fundidos cinzentos:

3.7.1 Rechupes

São na sua maioria cavidades, internas e externas, que se apresentam distribuídas de maneira isolada ou interconectadas de forma irregular e aspecto interno mostrando formação dendrítica (Figura 3.5). Este tipo de defeito forma-se nos “pontos quentes” da peça. Tais pontos estão geralmente associados aos pontos maciços da peça, ou seja, partes da peça com maior concentração de massa, e as regiões adjacentes aos canais de enchimento e massalotes. Rechupes internos são evidenciados somente após a usinagem das peças e/ou testes de estanqueidade. Os rechupes são formados devido à falta de metal líquido para compensar a contração volumétrica da peça. Esta falta de metal líquido é decorrente de vários fatores, desde a falta ou dimensionamento incorreto de massalotes até um sistema de enchimento deficiente.[6]

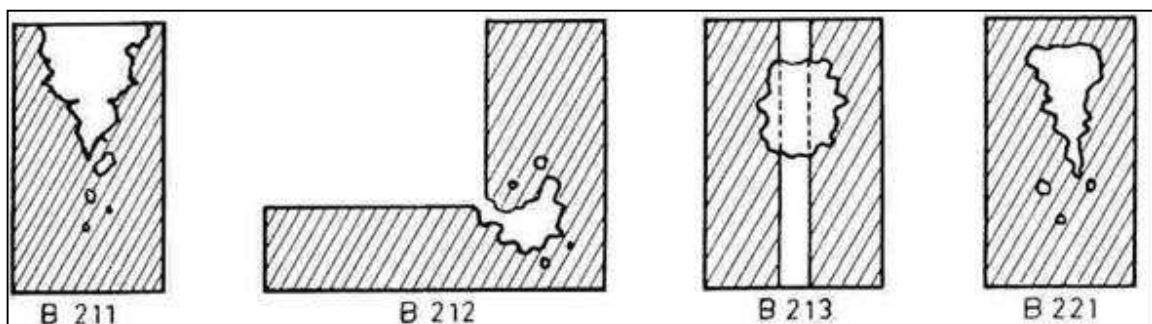


Figura 3.5 Rechupes

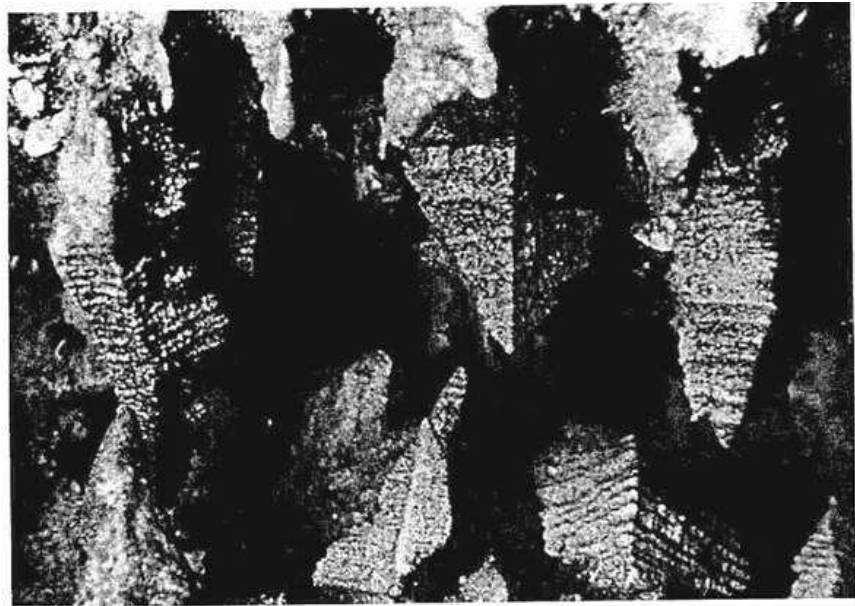


Figura 3.6 Formação Dendrítica

Podemos citar como fatores que favorecem a formação de rechupes a falta de rigidez do molde, a composição química do metal, uma temperatura de vazamento incorreta, um alto grau de nucleação, etc. Estes fatores podem atuar independentemente ou combinados.[6]

Todas as ligas contraem durante a solidificação, porém o ferro fundido cinzento apresenta além desta contração uma expansão volumétrica bem peculiar devido à formação e crescimento da grafita. Tal expansão, chamada de expansão gráfitica, promove o aumento e deslocamento do líquido residual dentro do molde e ocorre durante a formação do eutético austenita-grafita. Esta expansão será tanto maior quanto maior for a quantidade de grafita. Esta condição está diretamente ligada ao tratamento de inoculação do metal. A expansão gráfitica nos ferros fundidos cinzentos é fator determinante no projeto de fabricação das peças, visto que o aumento do volume do líquido residual poderá contribuir para a reposição do mesmo durante a contração do metal, evitando a colocação de massalotes.[6]

Moldes, particularmente em areia à verde, que apresentam dureza insuficiente são incapazes de conter a expansão do metal líquido. A deformação do molde causará um

aumento do volume da cavidade tornando os massalotes insuficientes para compensar este novo volume, formando assim, rechupes na peça. Esta alteração no volume da cavidade do molde é facilmente evidenciada nas dimensões e peso da peça, assim, ao menor sinal de variação de dimensões e peso das peças, deve-se verificar a sanidade interna do fundido.[6]

Temperaturas de vazamento muito elevadas também aumentam a contração do metal líquido promovendo maior formação de rechupes. Também ocorre que a areia do molde não é estável, e com o aumento da temperatura do metal há a movimentação das paredes do molde devido à expansão dos grãos de areia (a parte que influi sobre o rechupe é devida à pressão metalostática e à pressão de formação da grafita). Mas se a temperatura de vazamento for baixa, poderá gerar outros defeitos do tipo cavidade devido a bolhas, junta fria, formação de carbonetos, etc. A temperatura ideal para o vazamento deve ser estabelecida de acordo com as características de cada peça.[6]

3.7.2 Pinholes de Hidrogênio

Este tipo de defeito tem a forma de pequenas cavidades esféricas com diâmetros inferiores a três mm. Finos filmes de grafita são geralmente encontrados no interior destas cavidades, podendo também ser encontradas camadas de óxidos, caso as peças sejam tratadas termicamente.[8]

Inclusões não metálicas não estão presentes nestes vazios, mas algumas podem ser encontradas se o metal contém tais inclusões. Pinholes são defeitos tipicamente subcutâneos, isto é, localizados abaixo da superfície da peça, e só podem ser observados após usinagem ou um forte jateamento. As partes finas da peça estão mais susceptíveis à formação deste defeito do que as seções mais espessas, que estão mais afastadas da região dos canais de ataque. Um número variado de fatores, ligados às condições do molde e do metal, estão ligados à formação de pinholes de hidrogênio, e provavelmente combinam durante esta formação. No ferro fundido, teores em alumínio abaixo de 0,005% já encorajam a dissociação do vapor d'água gerado no molde aumentando o teor de hidrogênio no metal. [8]

As principais fontes de alumínio são os ferros ligas, usados nos tratamentos do metal líquido e as sucatas. Umidade excessiva do molde e a presença de aditivos hidrocarbonáceos, também são causas de pinholes. O tamanho do grão de areia e a permeabilidade do molde não afetam a formação deste tipo de defeito. O refratário úmido da panela de vazamento, longos canais de distribuição que aumentam o tempo de contato do metal com molde e a turbulência são outros fatores que contribuem para a formação de pinholes. [8]

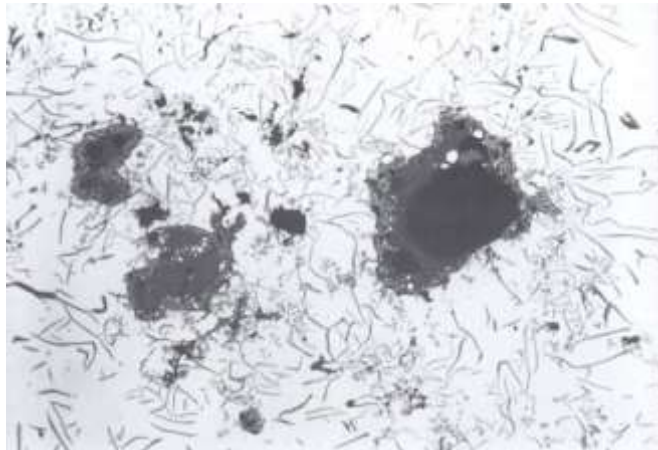


Figura 3.7 Pinholes de Hidrogênio

3.7.3 Defeitos devido ao Nitrogênio

Nos ferros fundidos, o teor de nitrogênio na ordem de 20 a 80 ppm é considerado normal. Em teores elevados, o ferro fundido não consegue mais absorver o nitrogênio fazendo com que este gás seja liberado durante a solidificação. Isto causa a formação de vazios interdentríticos ou cavidades maiores (blowholes).[8]

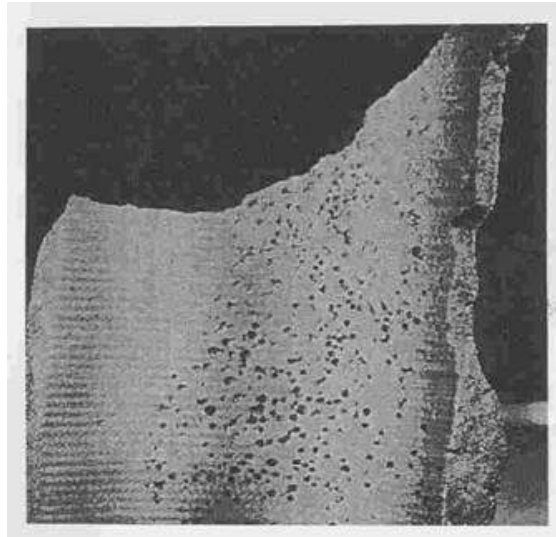


Figura 3.8 Blowholes

Estes vazios tendem a apresentar uma coloração clara e brilhante, podendo algumas vezes ter um filme de grafita. Em peças tratadas termicamente um filme de óxidos também pode estar presente. Grafitas vermiculares são, algumas vezes, encontradas ao longo do perímetro do defeito. A quantidade de nitrogênio necessária para induzir a formação do defeito varia. Em seções finas, teores de nitrogênio até a faixa de 130 ppm não afetam a formação do defeito. Em peças de espessuras maiores, teores de nitrogênio na faixa de 80 ppm já provocam a formação do defeito. As ligas de ferros fundido elaboradas com uma grande quantidade de sucata de aço na carga (50% ou mais), são mais susceptíveis à formação de tal problema. Materiais recarburantes (carbonáceos) podem conter teores elevados de nitrogênio devido à presença de compostos nitrogenados. Também moldes e machos confeccionados com resinas do tipo furânicas e fenólicas uretânicas podem apresentar elevado teor de nitrogênio. Tintas para machos, normalmente contêm componentes carbonáceos e resinas, que são fontes de nitrogênio. O efeito do nitrogênio pode ser neutralizado com a adição de 0,02 a 0,03% de Ti. Níveis aceitáveis de nitrogênio podem se tornar perigosos caso haja hidrogênio presente no metal. [8]

3.7.4 Inclusões

Inclusão de areia é um dos tipos de defeitos de fundição que ocorre com maior frequência. Muitas vezes este defeito é de difícil diagnóstico, pois as inclusões ocorrem de forma aleatória e por isso são de difícil correlação. Partículas de areia do molde

freqüentemente são arrastadas pela corrente do metal líquido e sobrenadam, pois não se deixam ‘molhar’ pelo mesmo. [9]

Muitas vezes as inclusões de areia ocorrem junto com bolhas de CO e partículas de escória. Inclusões de areia, em combinação com óxidos metálicos e escória, também podem ficar presas abaixo da superfície metálica, e só aparecer por ocasião da usinagem. Se de alguma parte do molde parte da areia solta é “lavada”, o resultado é o aparecimento de uma saliência metálica neste local. [9]

Uma visão a respeito do equilíbrio carbono-oxigênio, figura 3.9, no ferro fundido sugere que o oxigênio dissolvido no banho não causa problemas devido ao alto teor de carbono. Portanto, inclusões de óxidos não deveriam ocorrer em ferros fundidos cinzentos. Entretanto, a presença do silício também aumenta a tendência à formação de inclusões devido à relação de equilíbrio entre carbono-silício-oxigênio. [10]

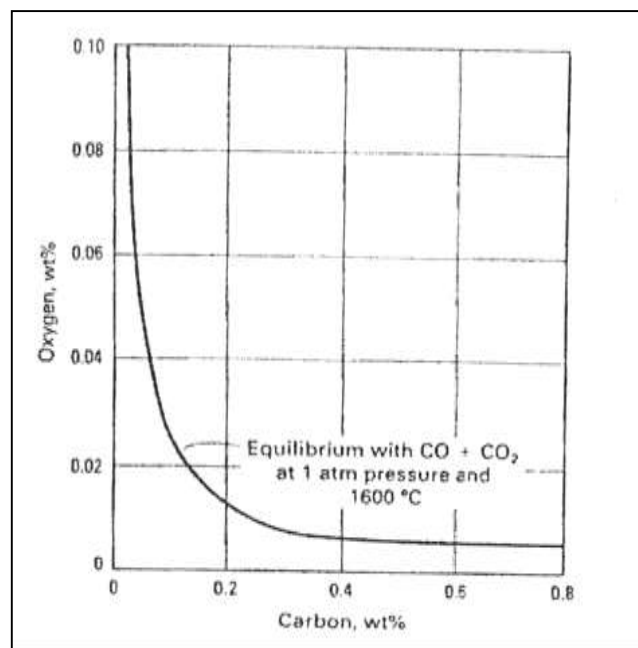


Figura 3.9 Equilíbrio Carbono-Oxigênio

Porém a energia livre necessária à formação de SiO₂ e CO são dependentes de temperaturas bem diferentes. A uma temperatura acima de 1533°C, o CO torna-se um composto mais estável, enquanto que o SiO₂ torna-se estável às temperaturas mais baixas que esta. Isto pode ser observado na superfície do banho, na qual aparece limpa às altas temperaturas e quando a temperatura cai percebe-se facilmente a rápida formação de

escória sobre o metal líquido. Esta variação na formação de escória não está, necessariamente, ligada à elevação de temperatura do metal, inclusões também são encontradas em peças vazadas a baixas temperaturas onde o metal líquido é exposto a uma reoxidação durante o vazamento. Estas inclusões são normalmente silicatos formados no metal. Uma vez que o metal líquido estando na cavidade do molde, há uma baixa tendência de formação de silicatos devido ao ambiente interno do molde ser menos oxidante. Inclusões de nitretos e sulfetos também ocorrem em ferros fundidos cinzentos, mas não são tão evidentes como nas ligas de aço, devido ao baixo teor de oxigênio dissolvido no ferro fundido. Ferros fundidos especiais contêm determinados elementos de liga (Cr, Ti, Al, etc.) que têm grande afinidade com o oxigênio, nitrogênio ou enxofre e podem favorecer a formação de reações com o material do molde, panelas e a atmosfera.[10]

3.7.5 Erosão ou lavagem

Mau aspecto superficial não é o único e nem o mais importante efeito de erosão do molde pelo fluxo de metal líquido. Em alguns casos, a rugosidade superficial decorrente de erosão mal pode ser percebida. No entanto, os grãos de areia arrancados de diversos pontos do molde, particularmente do sistema de canais, tendem a ficar no interior da peça, em geral sub-superficialmente, agrupados em determinadas regiões. [10]

Essas inclusões de areia, mais que o mau aspecto superficial, é que são, em geral, a causa de rejeição. [10]

Desde que o fenômeno de erosão é consequência da ação mecânica do fluxo de metal líquido, é óbvio que as características do escoamento do metal nos canais e na cavidade são de importância fundamental. [10]

O fluxo de metal que entra na cavidade pode apresentar 3 tipos de escoamento:

- escoamento normal, onde o metal ao entrar na cavidade do molde, flui deslizando sobre a superfície do mesmo;
- escoamento com choque, onde o metal ao entrar na cavidade do molde, além de deslizar, também sofre uma queda dentro da cavidade;

- choque puro, onde o metal ao entrar na cavidade do molde sofre uma queda, esta queda é chamada de efeito cachoeira.

A erosão torna-se mais forte, segundo estudos, quando é provocada pelo escoamento com choque seguido de escoamento normal e finalizado com choque puro (este somente produz erosão nos primeiros instantes da queda do metal, pois logo após a superfície é recoberta por uma camada de metal que protege a areia do fluxo de metal líquido). [8]

A erosão ou lavagem e a conseqüente formação de inclusões nas peças podem ser reduzidas ou eliminadas, portanto, por medidas que, ou evitem a secagem rápida ao ar, ou suprimam os efeitos danosos dessa secagem. [10]

Outros fatores que influem são:

- tipo de argila usada: argilas que adsorvem água com maior facilidade são, para as mesmas condições de mistura, menos sensíveis à perda de água por secagem ao ar;
- a velocidade de secagem ao ar aumenta com o aumento da permeabilidade da areia;
- a friabilidade tende a ser menor em areias finas do que em areias grossas e em areias de distribuição concentrada do que em areias com distribuições espalhadas e;
- o emprego de amidos e dextrinas possibilita a retenção da plasticidade da areia numa faixa mais ampla de teor de umidade, o que vale dizer, areias contendo esses aditivos são menos sensíveis à secagem ao ar e apresentam menor friabilidade. [10]

Além dos problemas de erosão, ao reduzir a velocidade de secagem ao ar, essas providências podem sanar um outro problema, que é o da dificuldade de colocação de machos nas marcações enrijecidas e friáveis de moldes parcialmente secos ao ar. Nessas condições é praticamente inevitável que alguma areia seja desalojada das marcações e fique solta no interior da cavidade. [6]

3.7.6 Bolhas de gás

Este tipo de defeito refere-se àquelas cavidades encontradas logo abaixo da superfície da peça e que são reveladas somente após a usinagem ou jateamento das mesmas. Estas cavidades podem ser esféricas ou de forma irregular apresentando um revestimento interno de cor cinza ou cinza azulado. Muitas destas cavidades contêm escória aderida e em algumas delas gotas de metal exudado. Inclusões de sulfeto de manganês são normalmente encontradas na matriz junto ao defeito ou até mesmo na escória.[8]

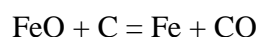
Metal frio resultante de baixas temperaturas de vazamento é a causa primária deste tipo de defeito, assim as peças vazadas por último têm maior tendência a apresentar estas cavidades. Altos teores de enxofre e manganês contribuem para a eclosão deste problema.[8]

Seqüência de formação do problema:

1. Quando a temperatura do metal cai, sulfetos de manganês formam-se e se separam do banho;
2. Estes sulfetos flutuam até a superfície e se misturam à escória da panela (silicatos de ferro e manganês), criando uma escória de elevada fluidez;
3. Esta escória ao entrar na cavidade do molde, reage com a grafita precipitada na reação eutética formando monóxido de carbono;
4. O monóxido de carbono formado fica retido logo abaixo da superfície da parede da peça se esta já estiver sólida.[8]

Desta forma, o balanço entre os teores de enxofre e manganês, o controle de temperatura de vazamento e um bom trabalho de limpeza do banho e panelas de vazamento serão de fundamental importância para se evitar a formação deste tipo de defeito.[8]

Em determinadas condições, escórias ricas em oxigênio podem reagir com o carbono do banho, formando CO. Também escórias líquidas ricas em óxido de ferro mostram esta reação:



As bolhas podem ser reconhecidas na superfície das peças, mas parcialmente elas também só aparecem por ocasião da usinagem.[9]

3.7.7 Mau enchimento devido a gases

As peças apresentam interrupções em suas paredes apresentando-se às vezes incompletas. Quando um molde produz ou possui grande volume de gases, estes, se não forem evacuados são capazes de impedir ou dificultar o preenchimento total da cavidade do molde pelo fluxo contínuo de metal líquido. A junta fria ou emenda fria é um caso particular deste defeito e ocorre quando duas frentes de metal se encontram dentro do molde, estando as mesmas já a baixas temperaturas (ocasionado pela perda de temperatura do metal para as paredes do molde ou por uma baixa temperatura de vazamento), não ocorrendo a ligação (solda) entre as mesmas. O controle da tendência ao desprendimento de gases é importante, pois, se a mesma for elevada, mesmo um vazamento a uma temperatura mais elevada poderia não solucionar o problema, vindo até a criar outros. A própria velocidade de vazamento, se muito rápida, pode ocasionar tal defeito, pois não há tempo para os gases saírem da cavidade do molde. Este defeito é mais comum em peças de paredes finas, podendo também ocorrer em peças maciças quando há elevada temperatura de vazamento que aumenta a geração de gases. [10]

3.7.8 Explosão

Sob certas condições, pode ocorrer uma grande vaporização da água contida no molde e um grande desprendimento de gases, que pela sua rapidez e volume pode adquirir um aspecto de explosão, podendo promover a expulsão de metal líquido para fora do molde pelas aberturas do mesmo, como massalotes, respiros e canais, ou mesmo provocando a abertura do molde. Associam-se a este defeito a rugosidade superficial e penetração metálica. O metal líquido ao entrar em contato com a parede do molde promove uma rápida e elevada produção de gases, os quais misturados ao metal são violentamente arremessados de encontro às outras superfícies do molde, ocorrendo nestas áreas forte penetração metálica. [8]

3.7.9 Defeitos devidos à alimentação

Em consequência das contrações líquidas e de solidificação da maioria das ligas metálicas (com alguma contribuição da contração sólida), e devido às características das interfaces líquido-sólido, as peças solidificadas podem apresentar-se com cavidades de diferentes tamanhos, formas e distribuição. Para obtenção de uma peça idealmente sadia, seria necessário que cada frente de solidificação mantivesse contato ininterrupto com uma frente de suprimento de metal líquido, externa à peça (massalote, alimentador ou montante), até que todo metal contido dentro dos limites da peça estivesse sólido.[6]

Nesse momento (o do término da solidificação da peça) o metal líquido da fonte externa de suprimento poderia, teoricamente, ter-se esgotado, isto é, a fonte de suprimento terminaria sua solidificação ao mesmo tempo em que a peça para a qual ela vinha fornecendo metal líquido; [6]

Na prática, por segurança, o término da solidificação do massalote deve ocorrer após o término da solidificação da peça. [6]

A solução matemática geral do problema de alimentação de peças ainda não foi encontrada e mesmo que o fosse sua aplicação ainda dependeria da realização de muito trabalho experimental para obtenção de dados que permitam definir as chamadas “condições de contorno”. Esses dados experimentais incluiriam avaliações quantitativas de:

- Tipo e morfologia da frente de solidificação;
- Direção de solidificação e gradientes de temperatura;
- Correlações entre os dois itens acima mais a composição da liga e as variáveis de fundição (temperatura de vazamento, vibrações, inoculação, pressão, etc.).
- Características de nucleação de vazios e seu volume total em relação à contração volumétrica total;
- Efeitos de geometria da peça (e do massalote) e das propriedades térmicas da liga e do molde sobre a forma da interface sólido-líquido e sobre o gradiente de temperatura. [6]

Como o número de variáveis é muito grande, as soluções matemáticas são elaboradas para determinados conjuntos de condições particulares, por exemplo, um tipo de liga (tipo de interface sólido-líquido) e um dado processo de fundição (variáveis de transmissão de calor). [6]

O mecanismo básico de alimentação exige que a contração volumétrica que ocorre

quando um cristal (sólido) cresce às custas de um líquido seja compensada diretamente pelo líquido adjacente; a contração volumétrica total devida ao sólido já formado manifesta-se pelo abaixamento do nível do líquido no seu ponto mais elevado (ou de outro modo, sujeito à maior pressão) que deve ser o massalote. Duas condições estão implícitas nesse mecanismo:

- deve existir um gradiente de temperatura positivo em direção ao massalote.
- volume do massalote deve ser suficiente para que ele forneça o líquido necessário à compensação de todas as contrações. [6]

Além disso, a pressão interna do líquido (soma das pressões metalostática e atmosférica) deve não apenas garantir contínuo contato líquido-sólido, como suplantar a pressão atmosférica que tende a deformar a camada solidificada (formando depressões superficiais). [6]

Essas condições são tanto mais críticas quanto maior o intervalo de solidificação e quanto mais “pastosa” a solidificação de uma liga. Nesses casos, a possibilidade de se obter uma peça de alta densidade dependerá da forma dos cristais em crescimento e, em casos extremos, pode-se até abandonar esse objetivo e procurar distribuir uniformemente as microporosidades resultantes das contrações volumétricas que ocorrem no final da solidificação. [6]

A função dos massalotes é essencialmente a compensação das contrações líquida e de solidificação de uma peça fundida, garantindo sua sanidade. [6]

No projeto de alimentação, além do aspecto de sanidade da peça, os custos envolvidos também devem ser considerados. Dessa maneira, o projeto de massalotes visa basicamente:

- obter uma eficiente alimentação da peça fundida;
- obter a peça fundida com o máximo rendimento metálico;
- facilitar a operação de limpeza da peça. [6]

3.8 Classificação dos defeitos de fundição

A maioria das fundições utilizam nomes tradicionais para identificar os defeitos que ocorrem no seu dia-a-dia. Dentre os vários nomes utilizados podemos citar: rabo de rato, escama, pele de jacaré, junta fria, casca de laranja, broca, chupada, etc., porém estes nomes quando usados por diferentes empresas nem sempre identificam os mesmos tipos de

defeitos.

O International Committee of Foundry Technical Association criou uma normalização para identificação e nomenclatura dos defeitos em peças fundidas. Sete categorias básicas de defeito são estabelecidas, cada uma identificada por uma letra [11]:

- A – Excrescências Metálicas;
- B – Cavidades ou vazios;
- C – Descontinuidades do material;
- D – Defeitos Superficiais;
- E – Fundição Incompleta;
- F – Dimensões e Formas Incorretas;
- G – Inclusões ou Anomalias Estruturais.

Este sistema, que será utilizado aqui para a classificação dos defeitos, é baseado na descrição física do mesmo. Pretende-se permitir uma identificação pela direta

observação do defeito e por uma descrição detalhada, considerando-se somente os critérios de forma, aparência, localização e dimensões.

4. Procedimento experimental

4.1 Análise dos dados de refugo e escolha das amostras

Previamente à investigação das causas de defeitos em peças fundidas, deve-se realizar uma análise dos dados históricos de refugo destes defeitos com o intuito de atacar e atuar nas causas dos problemas que mais impactam no desempenho da unidade. No caso englobado por este trabalho, houve estreita colaboração entre o setor de usinagem e a garantia da qualidade da empresa.

No setor de usinagem trabalha-se com como carcaças de transmissão de tratores, discos de freio e demais peças de ferro fundido, as quais, posteriormente, são enviadas para as linhas de montagem da empresa. Devido à solicitação mecânica sofrida por estas peças durante o funcionamento do produto final, não são admitidos defeitos em superfícies chave, exigência essa que leva à geração de índices de refugo que impactam no processo de usinagem, visto que na maioria das vezes estes defeitos são detectados somente após a usinagem. Perdem-se as peças e todo o trabalho executado, representando desgaste de ferramentas, maior tempo de processo, menor produtividade e, conseqüentemente, aumento de custo para a empresa.

Partindo-se desta metodologia de análise de dados de refugo, fez-se um Pareto das peças usinadas na empresa considerando-se os rejeitos acumulados das mesmas, desde novembro de 2007 até agosto de 2008. Obteve-se o resultado apresentado no gráfico 4.1, expresso em PPM (partes por milhão).

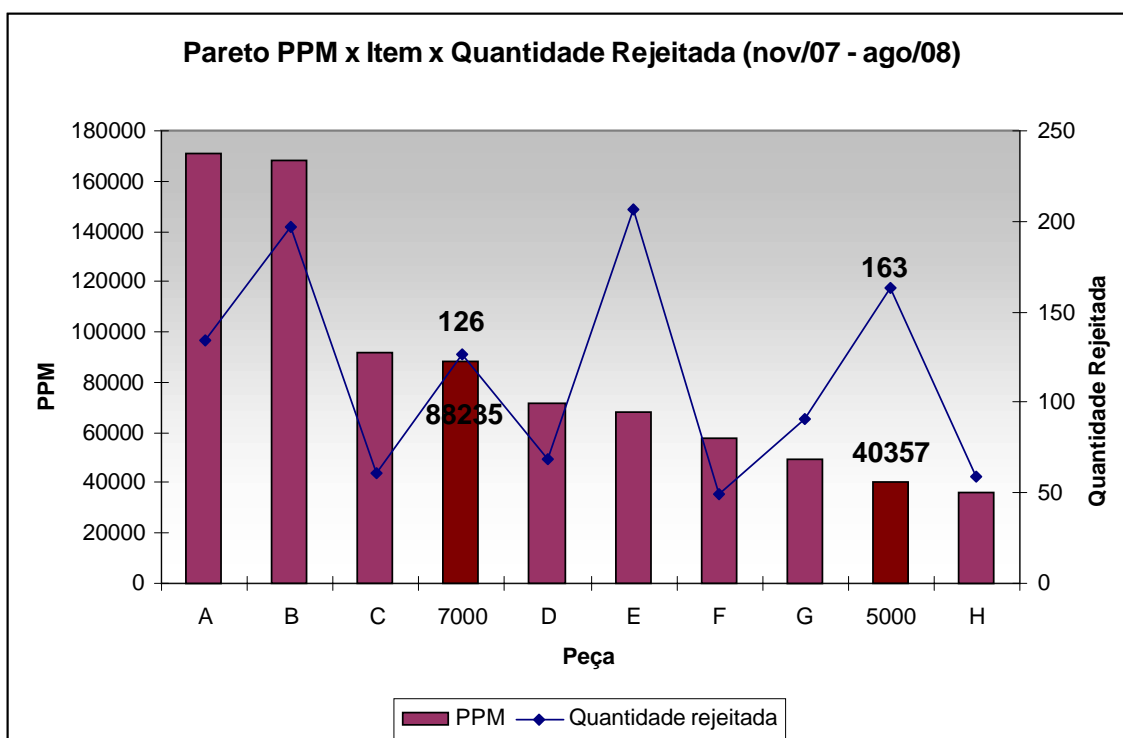


Gráfico 4.1 Pareto das dez peças que apresentaram maior índice de rejeito, avaliado em PPM.

As amostras foram escolhidas baseando-se neste pareto, no critério de ocorrência de defeito no mês em que as peças foram coletadas e na geometria similar das peças.

As peças escolhidas, então, são dos discos de freio de diferentes dimensões e diferentes fornecedores. Ambos de ferro fundido cinzento, fundidos em areia verde. Nos gráficos 4.2 e 4.3 evidencia-se o índice de rejeito destas peças. E nas figuras 4.4 e 4.5 visualizam-se as peças, que foram chamadas “peça 7000” e “peça 5000” respectivamente. Na tabela 4.6 estão mostradas as principais dimensões das peças e na tabela 4.7 a composição química do material, dado fornecido pelo fornecedor. As composições químicas que seguem melhor se enquadram nas composições de FoFo das ligas GG25 e GG15, segundo norma DIN 1691, respectivamente para a peça 5000 e 7000.

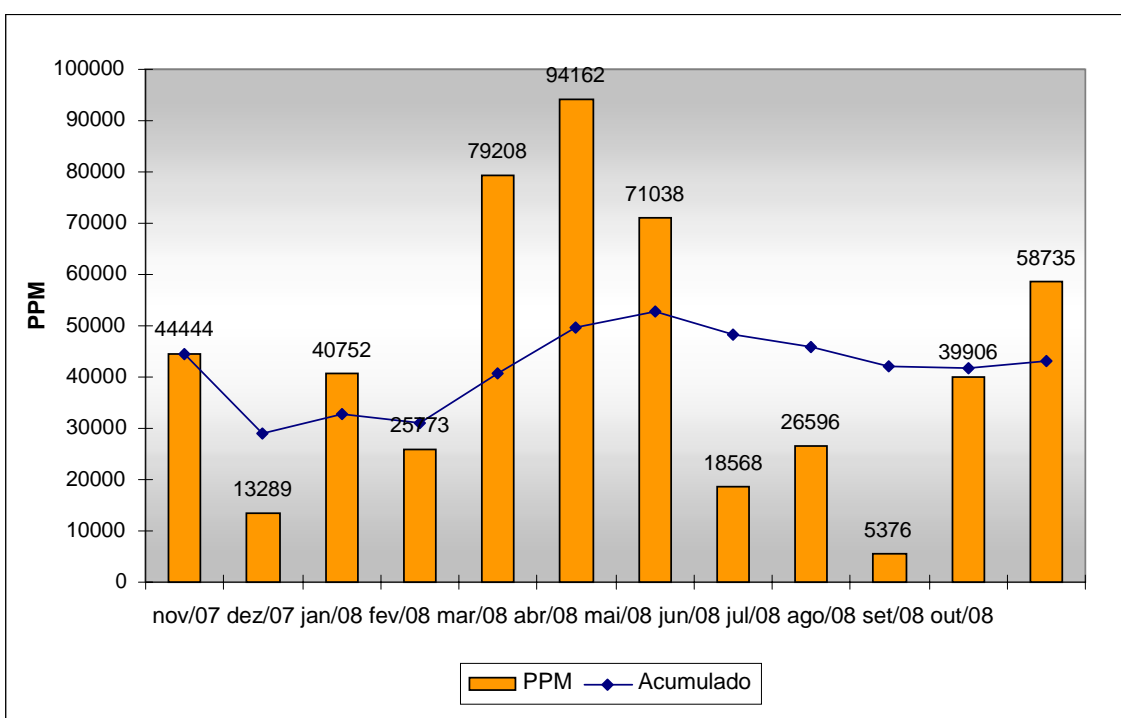


Gráfico 4.2. Rejeitos mensais da peça 5000, expresso em partes por milhão.

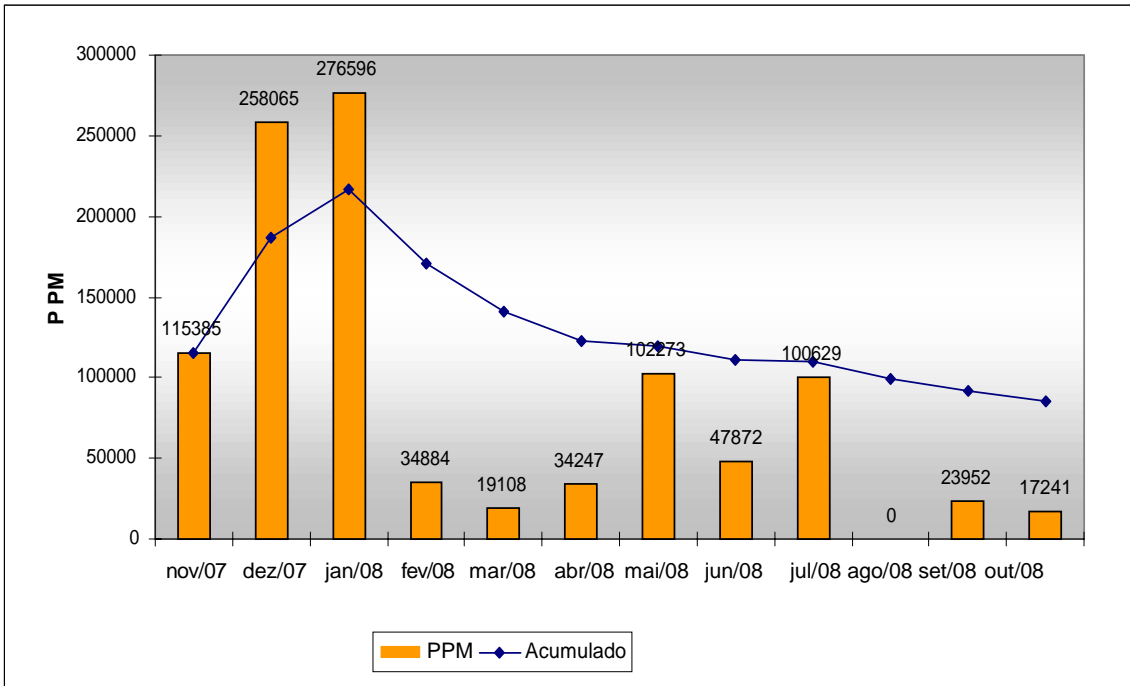


Gráfico 4.3. Rejeitos mensais da peça 7000, expresso em partes por milhão.



Figura 4.4. Peça 5000.



Figura 4.5. Peça 7000.

Tabela 4.6. Principais dimensões das peças.

Peça	Espessura (mm)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Massa média (kg)
5000	22	315	222	7,72
7000	44	389	262	13,6

Tabela 4.7. Composição química do material.

Peça 5000	
Elemento	Quantidade (%)
C	3,20 a 3,30
Si	1,90 a 2,10
P	0,10 MÁXIMO
Mn	0,40 A 0,50
S	0,06 a 0,10
Cr	0,15 MÁXIMO
Cu	0,40 a 0,50
Sn	0,05 a 0,06
Peça 7000	
Elemento	Quantidade (%)
C	3,31
Si	2,12
P	0,028%
Mn	0,33
S	0,016
Mg	0,0002

Para a peça 5000, foram registradas, no mês de setembro, 17 peças rejeitadas devido a defeitos na superfície usinada, das quais, nove peças representativa destes defeitos foram escolhidas para análise dos mesmos. Como pode ser visto no gráfico 4.2, esta peça atingiu um índice de rejeito de 39906 PPM no mês de setembro.

Para a peça 7000, foram registradas, no mês de setembro, quatro peças rejeitadas devido a defeitos na superfície usinada, e todas foram utilizadas para análise dos mesmos. Como pode-se constatar no gráfico 4.3, esta peça atingiu um índice de rejeito de 23952 PPM no mês de setembro.

4.2 Caracterização das amostras

Uma amostra do material de cada uma das peças foi caracterizada através de análise da microestrutura e dureza.

4.2.1 Microestrutura

Uma amostra de cada peça foi lixada (lixas 200, 400, 600, 1100) e polida em manta de diamante até atingir-se a superfície ideal para análise da microestrutura. Após, as amostras foram quimicamente atacadas com solução de Nital 2%.

A microestrutura foi observada e analisada através de um microscópio com lente objetiva, nos aumentos 100 e 200 vezes.

4.2.2 Dureza

Para a dureza (Brinell) das amostras foi utilizado penetrador de esfera de diâmetro 2,5mm e carga de 187,5 kg/f.

O ideal é utilizar esfera de diâmetro 10mm com carga de 3000kg/f, porém neste trabalho a dureza é apenas indicativa e é útil somente para caracterização e comparativo.

4.3 Análise morfológica e caracterização dos defeitos

A fim de observar-se as principais características morfológicas dos defeitos e identificar detalhes importantes para a definição das causas dos mesmos, realizou-se uma análise visual.

Para a análise dos defeitos tratados neste trabalho, será utilizada a identificação e nomenclatura criada pela ICFTA através da comparação das características morfológicas dos defeitos e das descrições físicas dos mesmos.

Os principais defeitos representativos serão observados macroscopicamente, a olho nu, e com auxílio de uma lupa com aumento de até 40 vezes, a fim de se identificar características chave para a definição da causa dos mesmos.

4.4 Simulação computacional da solidificação

Por modelação do processo de solidificação entende-se a simulação, em computador, do processo que ocorre quando um metal é vazado para dentro de um molde, durante a fase de arrefecimento e solidificação. Ao simular o processo, o engenheiro espera prever potenciais zonas de defeito na peça fundida que lhe possibilitem redesenhar o sistema de alimentação de forma a eliminar tais defeitos antes da entrada em produção.

Com estas ferramentas é possível analisar os resultados da simulação e prever o local onde podem ocorrer problemas de porosidade ou outros. Se a peça não se apresentar são, é possível alterar o projeto em vários aspectos, tais como tamanho, número e forma dos alimentadores, velocidade de enchimento, temperatura de vazamento, etc. [12]

Com o intuito de avaliar o projeto de alimentação e identificar potenciais defeitos devido a pontos quentes, realizou-se uma simulação computacional do enchimento do molde e solidificação de uma das peças, a 5000.

A simulação foi realizada através do software “Solid Cast”, programa capaz de gerar uma Iso-Superfície, ou seja, uma superfície tridimensional dentro do modelo que permite mostrar as regiões onde os resultados são iguais a um determinado valor. Por outras palavras, permite-nos recolher informação sobre um determinado parâmetro. [12]

Passos básicos na modelação de solidificação de peças:

1 – Criar um modelo 3D da peça fundida, importando um ficheiro CAD como STL ou utilizando o SOLIDCast para criar a peça e sistemas de alimentação.

2 – Selecionar materiais e condições iniciais;

Escolher uma liga de fundição a partir da base de dados do SOLIDCast (mais de 200 ligas)
Em seguida, seleccionar os materiais a utilizar na moldação.

Após este passo, é necessário especificar a taxa de transferência de calor através das superfícies de contato, especificando dados como os Coeficientes de Transferência de Calor;

3 – Criação de uma malha;

Este passo consiste na divisão do modelo em pequenos elementos para permitir o cálculo das transferências de calor envolvidas no processo de solidificação. O SOLIDCast usa o Método das Diferenças Finitas neste cálculo. Uma vez definidos os parâmetros de rede, este processo é automático.

4 – Simulação;

5 – Análise dos resultados. [12]

A função “Densidade de Material” resulta do cálculo da influência da contração do metal e do escoamento do metal líquido durante a solidificação. As regiões em que o metal líquido fluiu para outras zonas da peça terão um valor da função densidade inferior. O resultado desta função é um valor entre 0 (zero) e 1 (um), e representa uma medida da quantidade de metal que efetivamente fica em cada ponto do modelo. Um valor de 0 (zero) significa que todo o metal fluiu para outras zonas da peça, enquanto que um valor de 1 (um) representa metal 100% sólido.[12]

A simulação foi realizada em 3 temperaturas diferentes, com o intuito de simular variações nos parâmetros de processo de fundição da peça:

1. Na temperatura de vazamento informada pelo fornecedor;
2. Na temperatura de 70° C acima da temperatura de vazamento;
3. Na temperatura de 30° C abaixo da temperatura de vazamento.

5. Resultados e Discussões

5.1 Caracterização das amostras

5.1.1 Peça 5000

As figuras 5.1 e 5.2 mostram a microestrutura da peça 5000, em aumento de 100 e 200 X respectivamente, revelando uma microestrutura de matriz perlítica e ferrítica

apresentando grafita disposta em lamelas Tipo A, característica de FoFo de composição hipoeutetóide.



Figura 5.1 Microestrutura peça 5000. Ataque Nital 2%. Aumento 100 X.

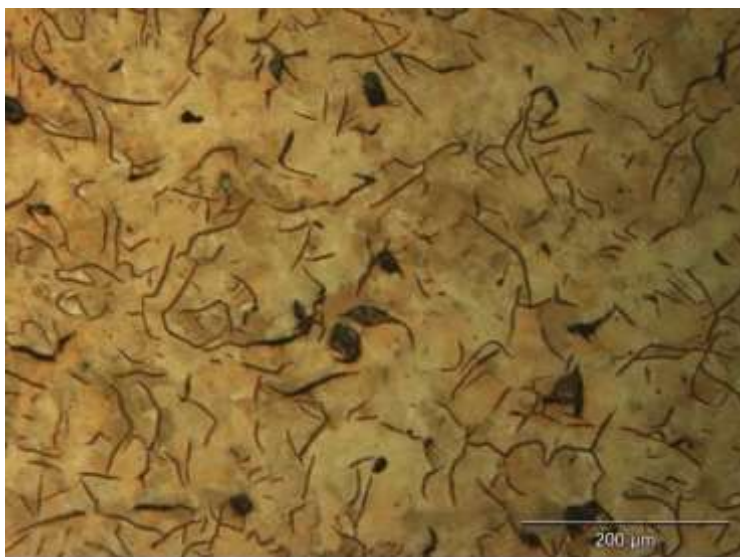


Figura 5.2 Microestrutura peça 5000. Ataque Nital 2%. Aumento 200 X.

5.1.2 Peça 7000

As figuras 5.3 e 5.4 mostram a microestrutura da peça 7000, em aumento de 100 e 200 X respectivamente, revelando também uma microestrutura de matriz perlítica e ferrítica apresentando grafita disposta em lamelas Tipo A, característica de FoFo de composição hipoeutetóide.



Figura 5.3 Microestrutura peça 7000. Ataque Nital 2%. Aumento 100 X.



Figura 5.4 Microestrutura peça 7000. Ataque Nital 2%. Aumento 200 X.

5.1.3 Dureza

A tabela 5.5 contém a dureza das amostras, dureza está que está de acordo com os valores apresentados pelos FoFo's GG25 (peça 5000) e GG15 (peça 7000).

Tabela 5.5 Valores de Dureza Brinell das amostras de material das duas peças analisadas.

Amostra (HB)	Dureza (HB)			Média (HB)
5000	173,20	174,52	175,62	174,45
7000	179,56	176,51	171,52	175,86

5.2 Análise morfológica e caracterização dos defeitos

5.2.1 Peça 5000

Selecionou-se uma quantidade de 9 peças cujo refugo ocorreu no mês de setembro, as quais apresentaram, analisando-se por método visual, 4 tipos de defeitos. Fez-se então uma seleção das peças representativas de tais defeitos, os quais foram nomeados aqui como defeito 5A, 5B, 5C, 5D.

5.2.1.1 Defeito 5A

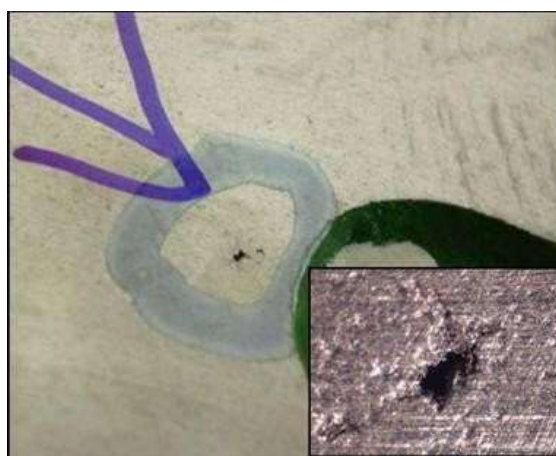


Figura 5.6. Defeito 5A.

1.A) Evidências observadas

- Tamanho de até 3 mm;
- Manifesta-se em partes variadas da peça;
- Manifestou-se em 44% das peças analisadas;
- Superfície interna do defeito é irregular;
- Aparecimento de bolhas de CO (Figura 5.7);
- A morfologia do defeito se assemelha à morfologia do defeito “Inclusão de Areia”.



Figura 5.7. Bolha de CO.

2.A) Análise Bibliográfica segundo o ICFTA

A **Inclusão de Areia (G 131 Sand Inclusions, International Atlas of Casting Defects [11])**, são inclusões de formas irregulares, geralmente concentradas e próximas à superfície da peça. Partículas de areia do molde frequentemente são arrastadas pela corrente do metal líquido e sobrenadam, pois não se deixam ‘molhar’ pelo mesmo.

Muitas vezes as inclusões de areia ocorrem junto com bolhas de CO e partículas de escória.[9]

Inclusões de areia, em combinação com óxidos metálicos e escória, também podem ficar presas abaixo da superfície metálica, e só aparecer por ocasião da usinagem.

Causas possíveis

- Linha de moldagem

- Quebras (ou trincas) de partes do molde por ocasião da extração, colocação de machos, fechamento do molde ou transporte e deposição do molde.

- Compactação não-homogênea de moldes, parcialmente também compactação excessiva.

- Areia ligada com bentonita
 - Moldabilidade muito baixa.
 - Percentagem de bentonita muito baixa ou bentonita mal misturada (mal amassada).
 - Percentagem de material inerte muito elevada.
 - Muitos torrões.
 - Percentagem muito elevada de material gerador de carbono vítreo.

- Areia ligada com resinas.
 - Resistência muito baixa do macho.
 - Desencontro acentuado do macho.

- Técnica de vazamento e alimentação.
 - Velocidade muito alta do metal líquido, com esguicho de metal contra a parede do molde, e conseqüente erosão.

- Altura excessiva da panela de vazamento, acima da bacia de vazamento.
- Tempo de vazamento muito longo.[9]

Soluções

- Linha de moldagem
 - Controlar os moldes quanto a áreas de pressão e eventualmente colocar régua de pressão.
 - Limpar os moldes cuidadosamente com ar comprimido.
 - Melhorar as placas de modelos, aumentar as saídas dos modelos e os raios.
- Aquecer as placas de modelos e usar separadores.

- Verificar se a extração dos moldes está uniforme e fazer a manutenção da instalação de moldagem, se necessário.
 - Automatizar a colocação de machos. Antes da produção em série, verificar as marcações dos machos e modificá-las, se necessário.
 - Homogeneizar a compactação dos moldes. Evitar super-compactação.
- Areia ligada com bentonita.
 - Aumentar a moldabilidade e, com isso, melhorar a plasticidade da areia.
 - Aumentar o teor de bentonita. Usar bentonitas de alto poder ligante. Misturar (amassar) melhor a bentonita, através do aumento do tempo de mistura ou pré-umidificação da areia de retorno.
 - Reduzir o teor de material inerte. Através da redução do teor de finos, reduzem-se os torrões na areia.
 - Reduzir o teor de material gerador de carbono vítreo.
- Areias ligadas com resinas
 - Aumentar a resistência dos machos. Aumentar o teor de ligantes.
 - Melhorar a compactação dos machos e torná-la mais homogênea, eventualmente vazar melhor.
 - Evitar desencontro de machos.
- Sistemas de alimentação e técnica de fundição.
 - Evitar altas velocidades do metal e esguicho da corrente metálica em cima de superfícies do molde.
 - Diminuir os tempos de vazamento, distribuir melhor os ataques.[9]

3.A) Conclusão

Analisando-se a morfologia do defeito 5A, evidencia-se semelhança com a descrição da morfologia do defeito tipo “Inclusão de Areia”. Além disso, constatou-se a

presença de bolha de CO (Figura 5.7) e possivelmente de inclusões de escória (Defeito 5C), conforme descrito na análise bibliográfica.

Assim, as evidências levam à grande probabilidade do defeito ser devido à inclusão de areia.

5.2.1.2 Defeito 5B

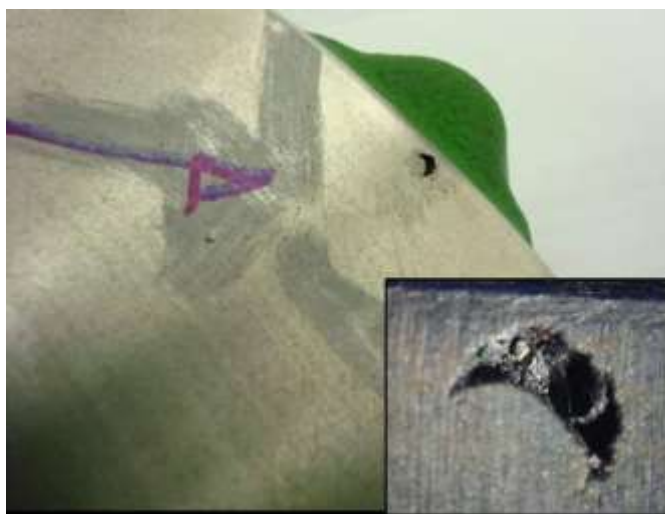


Figura 5.8. Defeito 5B.

1.B) Evidências observadas

- Inclusões metálicas de formato esférico (Figura 5.9);
- Superfície oxidada (figura 5.10);
- Presença de grão de areia;
- Tamanhos variados;
- Presente em 22% das peças analisadas;
- Morfologia semelhante ao defeito tipo “Gota Fria”;



Figura 5.9 Defeito 5B. Inclusão metálica de formato esférico. Aumento 10 X.



Figura 5.10 Defeito 5B. Superfície oxidada (pontos vermelhos). Aumento 10 X.

2.B) Análise Bibliográfica segundo o ICFTA

A Gota Fria (G 112 Cold Shot, International Atlas of Casting Defects [11]), se manifesta na forma de inclusão metálica de forma esferoidal, localizada geralmente na parte inferior da peça. Esta inclusão tem a mesma composição química da peça e apresenta-se geralmente oxidada.

A Gota Fria é causada pela projeção de metal sólido para dentro da cavidade do molde. Estas partículas do metal não mais conseguem se fundir em meio ao metal líquido que entra pela cavidade.

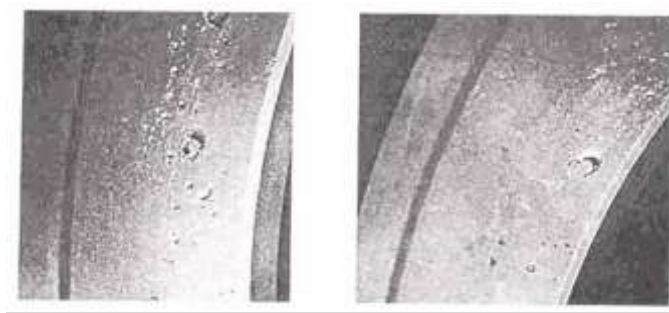


Figura 5.11 Defeito Gota Fria segundo ICFTA.

Causas possíveis

- Vazamento mal feito;
- Disposição errada de canais e massalotes (muito próximos)
- Funil de vazamento com pequena profundidade.

Soluções

- Rever projeto do sistema de alimentação e enchimento;
- Treinamento do pessoal responsável pelo vazamento (vazar cuidadosamente);
- Proteger o molde contra respingos de metal;
- Melhorar condições do funil para vazamento.

3.B) Conclusão

Observando as evidências constatadas na análise visual do defeito 5B, praticamente todas estão de acordo com a descrição da análise bibliográfica do defeito tipo Gota Fria e com sua morfologia ilustrada, indicando grande probabilidade da causa raiz da falha ser devido a respingos de metal sólidos que não são fundidos em meio ao metal líquido.

A presença de grão de areia observada na Figura 5.10, provavelmente está associada à posterior entrada da mesma na cavidade formada pelo defeito.

5.2.1.3 Defeito 5C

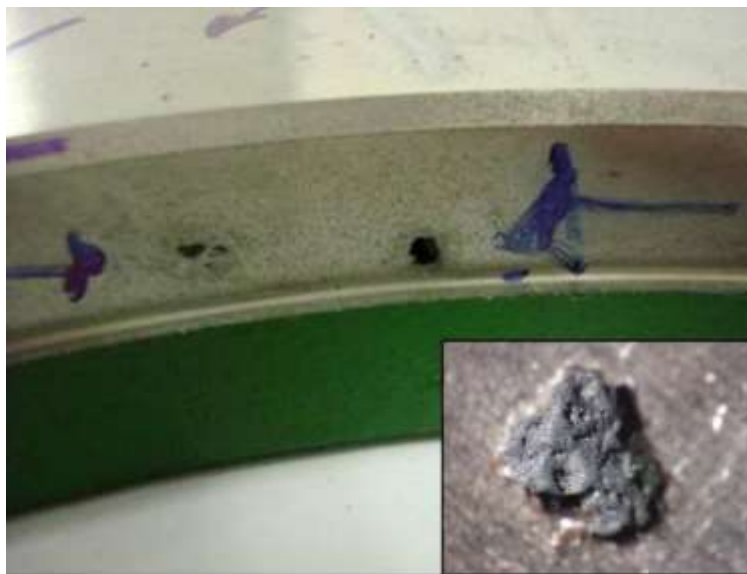


Figura 5.12. Defeito 5C.

1.C) Evidências observadas

- Ocorreu remoção de material estranho no momento da usinagem;
- A cavidade tende a ser arredondada indicando que não é uma inclusão de areia;
- Não houve oxidação na superfície do defeito;
- Presente em 11% das peças;
- A morfologia do defeito se assemelha à morfologia do defeito “Inclusão de Escória”.

2.C) Análise Bibliográfica segundo o ICFTA

A Inclusão de Escória (G 121 Inclusion of Slag, International Atlas of Casting Defects, [11]), se caracteriza por inclusões não metálicas (carbonetos, fosfetos, peróxidos, etc.) de forma irregular semelhante às escórias formadas nos fornos de fusão ou nas paredes de tratamento. Estas inclusões podem se concentrar tanto na superfície da peça como na sua parte interna. Sendo assim estes defeitos só serão notados após a usinagem das peças ou

através de ensaio radiográfico. É comum a partir destas inclusões a formação de bolhas de gás.

A origem destas inclusões pode ser tanto a partir das escórias geradas no forno de fusão como a partir das escórias geradas nos tratamentos da liga em panelas (como escórias geradas no tratamento de dessulfuração).

Causas possíveis

- Reação entre os produtos desoxidantes e o material do refratário de forno.
- Elevada oxidação do banho;
- Tratamento de desoxidação mal elaborado;
- Uso excessivo de produtos aglutinadores de escória.

Soluções

- Promover uma boa limpeza do metal no forno e panelas;
- Usar filtros nos canais de alimentação;
- Realizar um trabalho de desoxidação eficiente;
- Sempre que possível moldar as superfícies a serem usinadas para baixo.

3.C) Conclusão

Avaliando-se a morfologia do defeito é possível concluir que não é um caso de rechupe pois não há tendência à formação dendrítica. A morfologia do defeito pode ser associada à inclusão de um material estranho, pois constata-se que superfície tende a um formato arredondado, sugerindo que houve arrancamento deste material. Caso fosse uma inclusão de areia, a superfície deveria ser possível a identificação de grãos de areia, além de um formato irregular da superfície do defeito.

Avaliando-se as observações acima, conclui-se há grande probabilidade do defeito 5C ser proveniente de Inclusão de Escória, posteriormente removida durante a usinagem.

Deve-se dispor de uma análise química da superfície do defeito para verificar que elementos estão presentes.

5.2.1.4 Defeito 5D

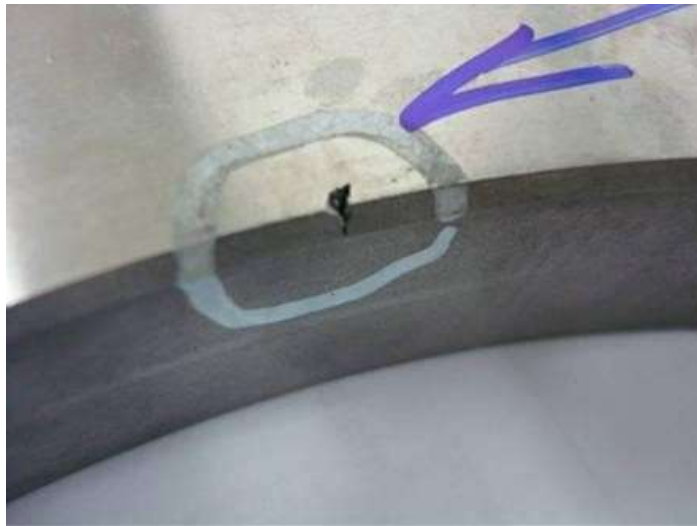


Figura 5.13 Defeito 5D.

1.D) Evidências observadas

- Poros estreitos na forma de trincas;
- Aparecem sempre no diâmetro interno da peça;
- Manifestou-se em 22% das peças analisadas;
- Têm cerca de 5 mm de comprimento;
- Trincas com profundidade;
- Trincas geralmente perpendiculares à superfície da peça;
- Morfologia semelhante ao defeito tipo “Rechupes Dispersos”.

2.D) Análise Bibliográfica segundo o ICFTA

Os Rechupes Dispersos (B 124 Dispersed Shrinkage, International Atlas of Casting Defects [11]), também conhecidos na literatura como Vírgula (Comma), segundo o ICFTA, é um defeito que se apresenta, na maioria dos casos, como poros estreitos na forma de trincas, que aparecem na superfície das peças e na maioria das vezes são perpendiculares à mesma. A largura dos defeitos pode ser de alguns milímetros.

Os poros em forma de trincas de até 2 mm de profundidade, na maioria dos casos perpendiculares à superfície das peças, muitas vezes apresentam estruturas dendríticas na superfície. Os defeitos podem aparecer na superfície ou nos cantos dos moldes, mas também na superfície de machos. Os poros na forma de trincas se formam em razão da separação de gases (nitrogênio) durante a solidificação. Uma separação simultânea de hidrogênio pode acentuar ainda mais este defeito. [9]

Quando o teor de nitrogênio é extremamente alto, os poros se tornam arredondados e sua superfície lisa. Não são encontradas inclusões dentro dos defeitos devidos a nitrogênio.[9]

Defeitos devidos ao nitrogênio distribuídos em uma superfície maior da peça podem aparecer como bolhas de hidrogênio.[9]

A figura 5.14 é extraída do Atlas Internacional de Defeitos de Fundição (ICFTA) e caracteriza a forma de aparecimento do defeito tipo Vírgula.

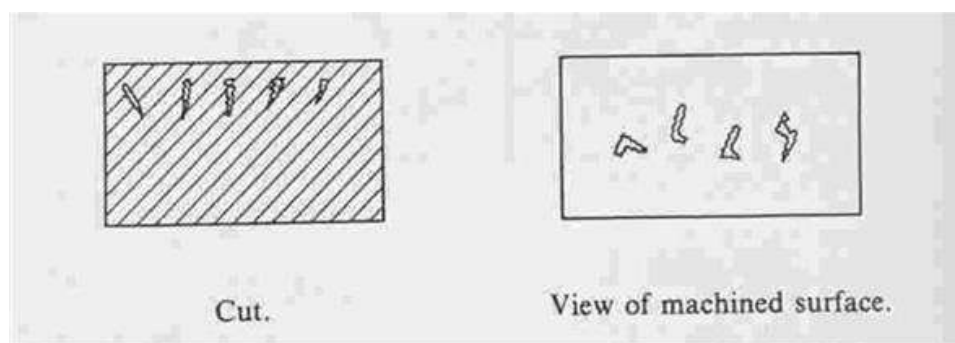


Figura 5.14 Característica do defeito tipo Rechupe Dispersos segundo a ICFTA.

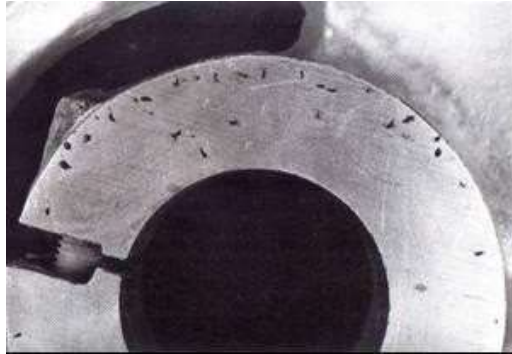


Figura 5.15 Foto livro Handbuch der Gussfehler. Defeito tipo Vírgula.[9]

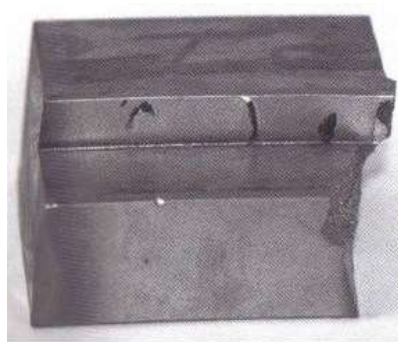


Figura 5.16 Foto livro Handbuch der Gussfehler. Defeito tipo Vírgula.[8]

Ferros fundidos líquidos, produzidos a partir de altos teores de sucata de aço, contêm alto teor de nitrogênio. Um teor acima de 100 ppm deve ser considerado crítico. Com o crescente uso de sucata de aço na carga, aumentou o perigo de ocorrência de defeitos tipo vírgula. Da mesma forma há aumento da chance de ocorrerem defeitos de gases devido ao uso de ligantes que contêm nitrogênio (molde e machos) e de carburantes.[9]

Causas possíveis

- *Metalurgia*
 - Teor muito elevado de nitrogênio no metal líquido.
 - Teor de titânio muito baixo, comparado com o teor de nitrogênio elevado demais.
 - Carbono equivalente muito baixo para teor de nitrogênio relativamente muito alto.[9]

- *Areias de moldagem ligadas com resinas*

- Teor muito elevado de nitrogênio dos ligantes ou excesso de ligantes na areia.
- Excesso de desenvolvimento de gases e baixa permeabilidade dos machos.[9]

- *Areias ligadas com bentonita*

- Excesso de umidade da areia e por isso absorção exagerada de água pelo metal fundido.
- Excesso de nitrogênio na areia de moldagem, devido à entrada de areia de macho no sistema ou trazido pelo aditivo para a formação de carbono vítreo (pó de carvão ou outros).[9]

Soluções

- *Metalurgia*

- Limitar o uso de sucata de aço na carga. Limitar o teor de nitrogênio no metal líquido em 100 ppm.
- Ligar o nitrogênio através do acréscimo de titânio.
- Aumentar o carbono equivalente.[9]

- *Areias de moldagem ligadas com resinas*

- Usar resinas com menor teor de nitrogênio.
- Usar resinas com evolução mais lenta de gases, se possível, ou usar resinas com mais baixo teor de gases.
- Acrescentar óxido de ferro.[9]

- *Areias ligadas com bentonita*

- Melhorar a umidade através de melhor amassamento da areia, menor acréscimo de bentonita e diminuição do teor de finos inertes.
- Reduzir os teores de nitrogênio da areia. Eventualmente diminuir o teor de aditivo gerador de carbono vítreo ou usar aditivo com menor % de nitrogênio.
- Eventualmente diminuir o teor de nitrogênio da areia de macho incorporada ao sistema.[9]

- *Sistemas de alimentação*

- Encurtar os canais de alimentação para diminuir a absorção de gases.
- Aumentar a temperatura de vazamento e a velocidade de alimentação.[9]

3.B) Conclusão

Observando as evidências constatadas na análise visual do defeito 5D, é possível constatar a semelhança com a descrição da análise bibliográfica do defeito tipo Rechupes Dispersos e com sua morfologia, indicando grande probabilidade da causa raiz da falha ser devido à separação de gases (nitrogênio) durante a solidificação.

5.2.2 Peça 7000

Selecionou-se uma quantidade de 4 peças cujo refugo ocorreu no mês de setembro, as quais apresentaram, analisando-se por método visual, 3 tipos de defeitos . Fez-se então uma seleção das peças representativas de tais defeitos, os quais foram nomeados aqui como defeito 7A, 7B, 7C.

5.2.2.1 Defeito 7A



Figura 5.17 Defeito 7A.

1.A) Evidências observadas

- Ocorre sempre na tampa;
- Esteve presente em 100% das peças analisadas;
- Ocorre próximo aos cantos do diâmetro externo (Figura 5.17);
- Presença de inclusão de areia no interior do poro (Figura 5.18);
- O tamanho varia desde cerca de 1 mm até 5 mm (Figura 5.19).

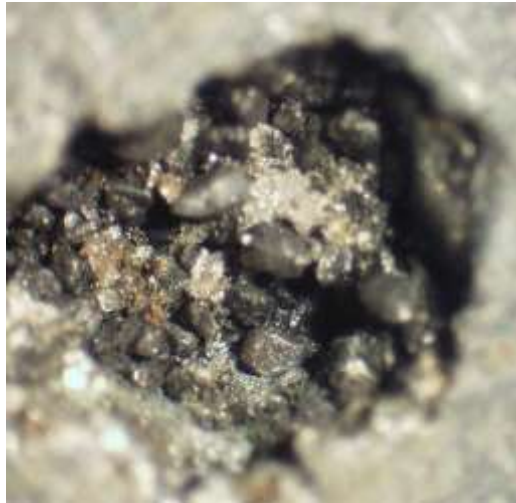


Figura 5.18 Defeito 7A. Presença de inclusão de areia. Aumento 40 X.

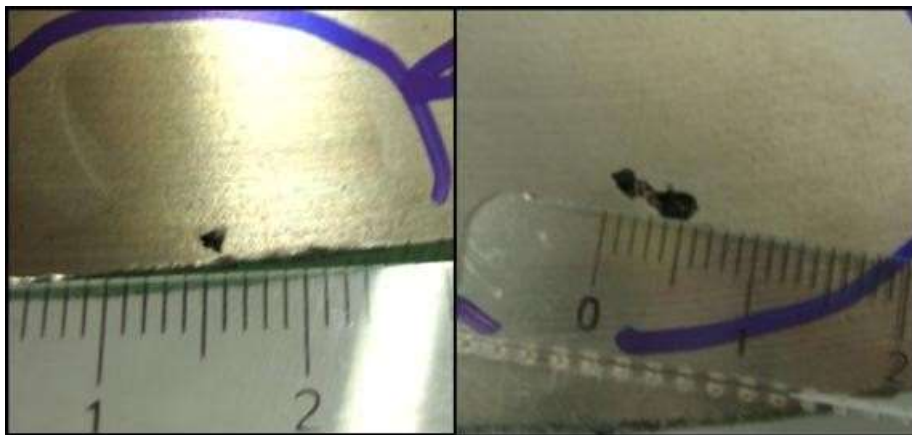


Figura 5.19 Defeito 7A. Variação do tamanho do defeito. Sem aumento.

2.A) *Análise Bibliográfica segundo o ICFTA*

Inclusão de Areia (G 131 Sand Inclusions, International Atlas of Casting Defects [11]).

A descrição, causas e remédios do defeito são os mesmos descritos no item na análise bibliográfica do defeito 5A (5.2.1.1 *Defeito 5A*).

3.A) *Conclusão*

Analisando-se a morfologia do defeito 7A, evidencia-se semelhança com a descrição da morfologia do defeito tipo “Inclusão de Areia”. Além disso, é possível visualizar grãos de areia no interior do defeito.

Há grande probabilidade da causa raiz do defeito ser devido à inclusão de areia, sendo esta proveniente da erosão de areia do molde durante o vazamento e enchimento da peça.

5.2.2.1 *Defeito 7B*

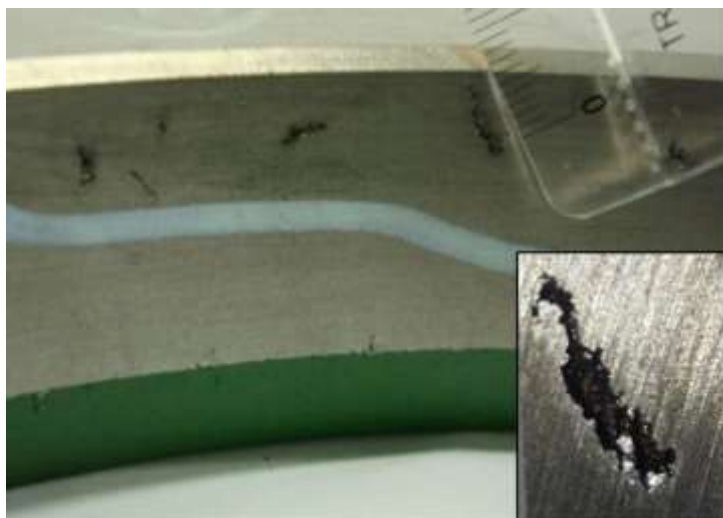


Figura 5.20 Defeito 7B.

1.B) Evidências observadas

- Poros estreitos na forma de trincas;
- Aparecem em grande quantidade na mesma peça;
- Aparecem sempre no diâmetro interno da peça;
- Manifestou-se em 75% das peças analisadas;
- Têm cerca de 5 mm de comprimento;
- Trincas com profundidade;
- Trincas geralmente perpendiculares à superfície da peça;
- Formação dendrítica pode ser observada na figura 5.21;
- Morfologia semelhante ao defeito tipo “Rechupes Dispersos”.



Figura 5.21 Formação dendrítica. Aumento de 40 X.

2.B) Análise Bibliográfica segundo o ICFTA

Os Rechupes Dispersos (B 124 Dispersed Shrinkage, International Atlas of Casting Defects [11]).

A descrição, causas e remédios segue a mesma do defeito 5D (5.2.1.4 Defeito 5D).

3.B) Conclusão

Observando as evidências constatadas na análise visual do defeito 7B, todas estão de acordo com a descrição da análise bibliográfica do defeito tipo Rechupes Dispersos e com sua morfologia, indicando grande probabilidade da causa raiz da falha ser devido à separação de gases (nitrogênio) durante a solidificação.

Além disso, observando-se a localização do defeito, podemos constatar a maior probabilidade do nitrogênio ser proveniente de reação com o molde (areias de moldagem ligadas com resinas ou areias ligadas com bentonita).

5.2.2.1 Defeito 7C



Figura 5.22 Defeito 7C.

1.C) Evidências observadas

- Foi observado somente no fundo da peça, em cantos;
- Caracteriza a remoção de um material estranho;

- Apresenta superfície irregular;
- Tamanho de cerca de 3 a 4 mm;
- Manifestou-se em 50% das peças analisadas;
- Morfologia semelhante à “Inclusão de Areia/ Escória”.

2.C) Análise Bibliográfica segundo o ICFTA

Inclusão de Areia (G 131 Sand Inclusions, International Atlas of Casting Defects [11]).

A descrição, causas e remédios do defeito são os mesmos descritos no item na análise bibliográfica do defeito 5A (*5.2.1.1 Defeito 5A*).

Inclusão de Escória (G 121 Inclusion of Slag, International Atlas of Casting Defects [11])

A descrição, causas e remédios do defeito são os mesmos descritos no item na análise bibliográfica do defeito 5C (*5.2.1.3 Defeito 5C*).

3.C) Conclusão

A morfologia do defeito caracteriza a remoção de uma inclusão não metálica, porém não é possível afirmar se esta inclusão é areia ou escória.

Geralmente quando a inclusão acontece no fundo da peça, esta apresenta maior probabilidade de ser devido à areia solta no fundo do molde, e quando esta inclusão se manifesta na tampa, a probabilidade maior é devido à escória. Porém, não é possível identificar esta posição da peça no molde, visto que a informação de cavidade foi perdida no momento da usinagem da peça e visto que as peças são fundida em ambas as posição.

5.3 Simulação computacional da solidificação

Através de informações cedidas pelo fornecedor da peça, foi possível uma dedução do ferramental. Os parâmetros utilizados também foram fornecidos pelo fabricante da peça.

5.3.1 Temperatura de Vazamento

Realizando-se a simulação na temperatura de vazamento informada pelo fornecedor, não identificaram-se pontos de densidade de material abaixo do valor de 0,99, ou seja, o software não apontou defeitos de porosidade devido à contração do material. Na figura 5.23 está ilustrada a simulação à 1350°C, temperatura de vazamento.

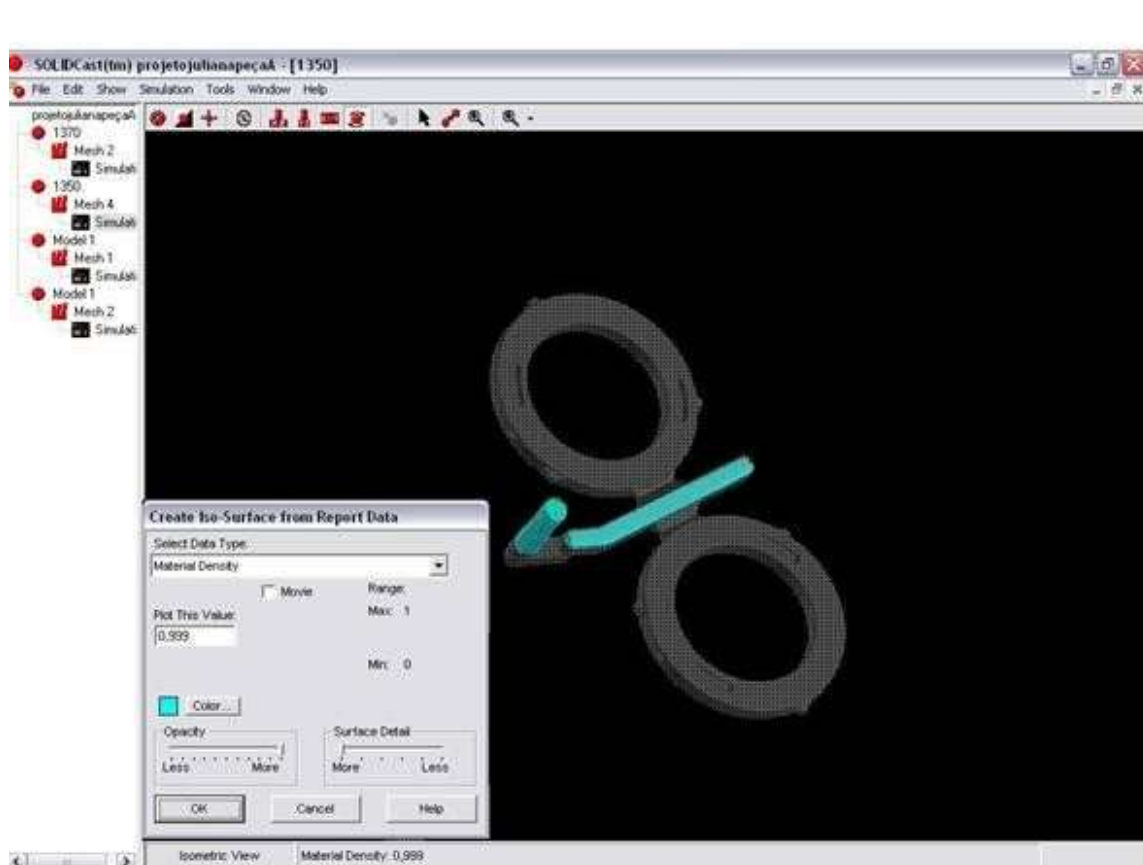


Figura 5.23 Simulação à temperatura de vazamento de 1350°C. Valor de Densidade de material apontada pelo software de 0,99.

5.3.2 Acima da Temperatura de Vazamento

Realizando-se a simulação acima da temperatura de vazamento informada pelo fornecedor, não identificaram-se pontos de densidade de material abaixo do valor de 0,99, ou seja, o software não apontou defeitos de porosidade devido à contração do material. Na figura 5.24 está ilustrada a simulação à 1420°C, 70° C acima da temperatura de vazamento nominal.

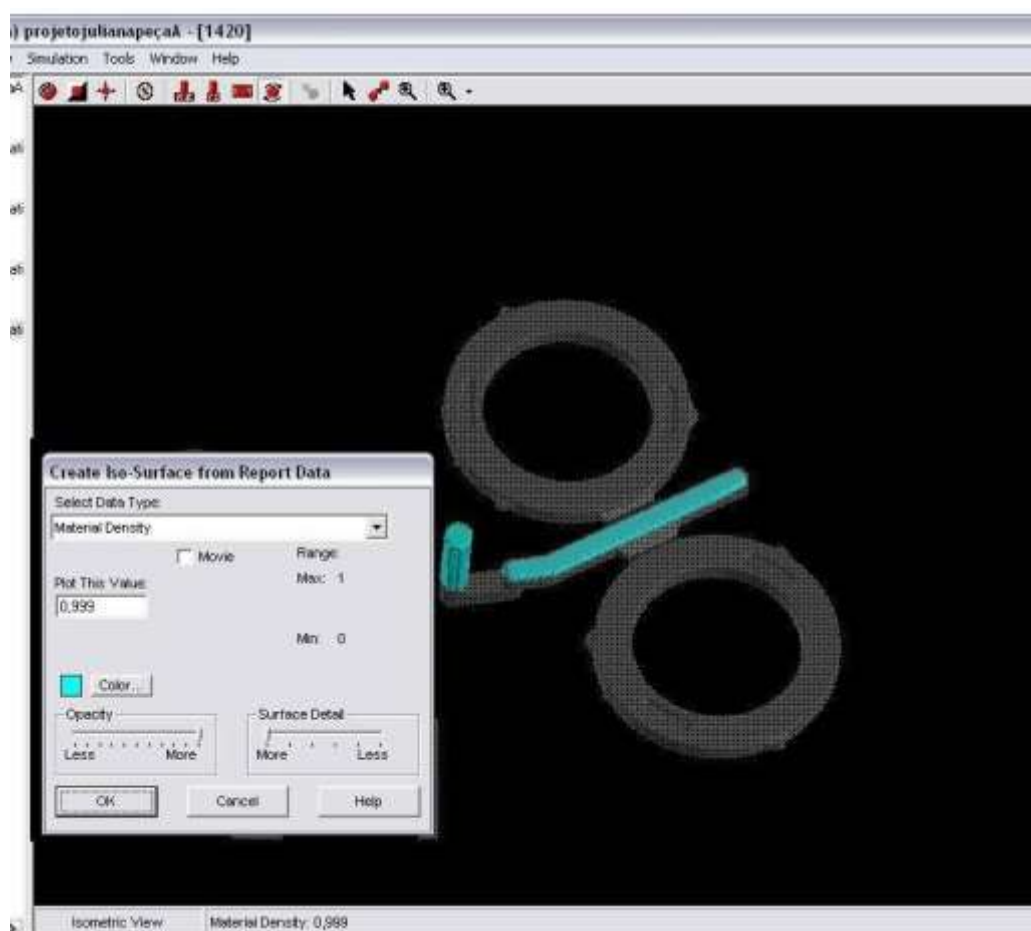


Figura 5.24 Simulação à temperatura de vazamento de 1420°C. Valor de Densidade de material apontada pelo software de 0,99.

5.3.3 Abaixo da Temperatura de Vazamento

Realizando-se a simulação abaixo da temperatura de vazamento informada pelo fornecedor, não identificaram-se pontos de densidade de material abaixo do valor de 0,99, ou seja, o software não apontou defeitos de porosidade devido à contração do material. Na figura 5.25 está ilustrada a simulação à 1320°C, 30° C abaixo da temperatura de vazamento nominal.



Figura 5.25 Simulação à temperatura de vazamento de 1320°C. Valor de Densidade de material apontada pelo software de 0,999.

6. Conclusão

A partir das análises aqui expostas e a partir de estudos sobre a morfologia característica dos defeitos em peças de FoFo cinzento fundidas em molde de areia verde, é possível afirmar:

1. O defeito 5A apresenta grande probabilidade do defeito ser devido à inclusão de areia.
2. O defeito 5B apresenta grande probabilidade da causa raiz da falha ser devido a respingos de metal sólidos que não são fundidos em meio ao metal líquido, defeito conhecido como “Gota Fria”;
3. Há grande probabilidade do defeito 5C ser proveniente de Inclusão de Escória, posteriormente removida durante a usinagem. Deve-se dispor de uma análise química do defeito para verificar que elementos estão presentes;
4. Observando-se as evidências constatadas na análise visual do defeito 5D, é possível constatar a semelhança com a descrição da análise bibliográfica do defeito tipo Rechupes Dispersos e com sua morfologia, indicando grande probabilidade da causa raiz da falha ser devido à separação de gases (nitrogênio) durante a solidificação, defeito conhecido como “Rechupes Dispersos”;
5. O defeito 7A apresenta grande probabilidade da causa raiz ser devido à inclusão de areia, sendo esta proveniente da erosão de areia do molde durante o vazamento e enchimento da peça;
6. Há grande probabilidade da causa raiz do defeito 7B ser devido à separação de gases (nitrogênio) durante a solidificação;
7. Devido à localização do defeito 7B, a maior probabilidade do nitrogênio ser proveniente de reação com o molde (areias de moldagem ligadas com resinas ou areias ligadas com bentonita);
8. A morfologia do defeito 7C caracteriza a remoção de uma inclusão não metálica, porém não é possível afirmar se esta inclusão é areia ou escória.

9. A simulação computacional de solidificação da peça 5000 não indentificou zonas de densidade de material menor que 99% após a solidificação, ou seja, a análise do software SolidCast aponta que não há zonas potenciais de rechupe segundo projeto de alimentação da peça.

7. Sugestões de Trabalhos Futuros

1. Realizar a simulação computacional de solidificação da peça 7000;
2. Realizar ensaio de MEV e Espectrometria de Dispersão de Energia para identificar os elementos químicos presentes na superfície dos defeitos produzidos a partir do contato dos possíveis materiais geradores destes defeitos com o ferro fundido líquido. Metodologia sugerida no artigo “Prevenção de defeitos superficiais em peças de ferro fundido”, publicado na revista “Fundição e Serviço”, nº 178, de dezembro de 2007;
3. Avaliar junto ao fornecedor e diretamente na planta do mesmo as possíveis causas e implementar as soluções sugeridas;
4. Avaliar a eficácia das ações avaliando-se a evolução dos índices de refugo das peças analisadas.

8. Bibliografia

1. FERREIRA, J.M.G.C. *Tecnologia de Fundição*. Caloust Gulbenkian, 1999.
2. COSTA, J.D. *Ferros Fundidos, Composição Química, Estrutura e Propriedades*. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Industrial. [entre 1959 e 1979]
3. SANTOS, H. *Sebenta [Apostila] da disciplina de Ligas Ferrosas*. Porto, Pt: FEUP/ Universidade do Porto, [Ca.2000].
4. MARIOTTO, C.L.; ALBERTIN, E.; FUOCO, R. *Defeitos devido à alimentação*. In: SEMINÁRIO DEFEITOS DE FUNDIÇÃO, [entre 1970 e 1990], [S.l.]. *Anais...[S.l.]*: Revista Fundição e Serviços.[entre 1970 e 1990], p.32-54.(Texto Parcial do Curso “Alimentação e enchimento de peças fundidas – ABM).
5. CHVORINOV, N., *Control of Solidification of Casting by Calculation*. Proc. Inst. British Foundrymen, v. 32, nº 229, [ca.1938].
6. FUOCO, R. *Princípios de Alimentação de ferros fundidos cinzentos e nodulares*. In: Curso Alimentação e enchimento de moldes, São Paulo, 1990.134p.
7. *Metals Handbook*, American Society for Metals, v.9, USA, 1979, 629 – 645p.
8. SENAI DR. MG. *Defeitos de fundição*. 2.ed. Belo Horizonte, DFP/DAT, 1987. 134p. il. (Publicação Técnica Fundição, 14).
9. *Handbuch der Gussfehler*, Alemanha, S&B Industrial Minerals GmbH, 2005, p.40- 96.
10. MARIOTTO, C.L. *Defeitos devidos aos moldes em areia verde*. In: SEMINÁRIO DEFEITOS DE FUNDIÇÃO. [entre 1970 e 1990], [S.l.]. *Anais...[S.l.]*: Revista Fundição e Serviços.[entre 1970 e 1990], p.1-31.(Texto Parcial da Apostila Areias de Moldagem Aglomeradas com Argila)
11. *International Atlas of Casting Defects*. CIATF.Des Plaines, 1974. 337p. il.
12. DURÃO, L.M.P. *SOLIDCast: Manual prático de utilização*, 2007 v1. Disponível em : http://www.dem.isep.ipp.pt/docentes/lmd/Manual_pratico_SOLIDCast_2007_v1.pdf. Acesso em 22 de novembro, 2008