

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Trabalho de Formatura 2002

**Ferro fundido nodular com alto Si e Mo em
coletor de escape**

Gui Schroer

Orientador: Hélio Goldenstein

1 RESUMO.....	2
2 OBJETIVOS.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	4
3.1 RESISTÊNCIA DO FERRO FUNDIDO NODULAR.....	5
3.2 METALOGRAFIA DO FERRO FUNDIDO NODULAR.....	7
3.2.1 Estruturas de Matriz.....	8
3.2.2 Morfologia da grafita.....	10
3.3 DEFEITOS EM GERAL.....	13
3.3.1 Gases.....	13
3.3.2 Drosses.....	14
3.3.3 Microrechupe.....	15
3.3.4 Macrorechupe.....	16
3.3.4 Veiamento.....	18
3.3.5 Rebarbas.....	19
3.4 O FERRO NODULAR COM ALTO Si E Mo (SiMo).....	20
3.4.1 Composição.....	21
3.4.2 Comportamento a temperaturas elevadas.....	22
3.4.3 Resistência à fluência.....	23
3.4.4 Ciclo térmico.....	25
3.4.5 Resumo de propriedades físicas.....	26
3.4.6 Aplicações.....	26
3.5 ALIMENTAÇÃO.....	28
4 PROCEDIMENTO.....	28
4.1 A ALIMENTAÇÃO VIA MASSALOTE.....	28
5 CONCLUSÃO.....	35
6 REFERÊNCIAS.....	36

1 RESUMO

Coletores de escape obtidos com ferro nodular com alto carbono e silício (ferro SiMo) já estão sendo produzidos. Do ponto de vista de *produto* não constituem novidade. Por outro lado, a sua confecção traz dificuldades e desafios, o que se deve às características da liga e de alimentação da peça.

O coletor de escape é uma peça que deve resistir a solicitações em alta temperatura como esforços alternados e fluência. Além disto é necessário que mantenha suas dimensões durante o uso, ou seja, não deve possuir uma dilatação térmica elevada nem sofrer alterações estruturais. Além disto é desejável que não seja muito pesado e, obviamente, não deve vazar. Estas características tornam o ferro "SiMo" um excelente candidato, porém necessita de um rigoroso controle para não perder nenhuma das características demandadas:

- uma degeneração da grafita acarreta em perdas de propriedades mecânicas. Isto requer controle de composição durante o vazamento e um controle após o mesmo da metalografia.
- gases, além de perdas de propriedades mecânicas, podem ocasionar vazamentos. Para evita-los, são também necessários os cuidados de vazamento e composição.
- rechupes possuem efeitos semelhantes a gases, porém um cuidado adicional da maior importância é a alimentação da peça.
- estrutura demasiadamente perlítica pode ocasionar alterações dimensionais devido a uma transformação para estrutura ferrítica durante o próprio uso do produto. Isto torna necessário que o processo proporcione uma matriz fundamentalmente ferrítica, o que pode ser alcançado por tratamento térmico ou por um tempo até a desmoldagem (resfriamento mais lento).

Do ponto de vista do desenvolvimento, na fundição o fator mais trabalhosa é a alimentação, pois no caso do coletor em SiMo atua contra dois "inimigos" : a própria liga SiMo de difícil alimentação e a forma do coletor (com regiões finas), que também dificulta a alimentação. É, portanto, necessário atacar

a peça por diversos lados, para não depender apenas de uma região fina para a alimentação.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são uma melhor familiarização com o ferro fundido nodular e uma alimentação de peças com este material e uma verificação de seu sistema de alimentação.

3 INTRODUÇÃO

Por ferro fundido entende-se uma liga de ferro com alto teor de carbono além dos elementos silício, manganês, fósforo e enxofre. Há uma variedade de ferros fundidos com diferentes composições químicas e estruturas. Esta variação pode proporcionar ligas baratas para contra-pesos ou ligas para peças que necessitam, por exemplo, maior dureza, maior resistência aa corrosão ou maior resistência mecânica.

As ligas de ferro são excelentes para a fundição devido, basicamente, aos altos teores de carbono e silício. Possuem boa fundibilidade a baixas temperaturas de fusão. A contração de solidificação é baixa e em alguns casos nula, o que diminui os defeitos internos. As ligas de ferro podem ser também utilizadas, em muitos casos, no estado bruto de fusão.

No que se refere à micro estrutura, tem-se uma razoável quantidade do carbono precipitado na forma de grafita. A precipitação da grafita, que se dá no processo de solidificação, é justamente o responsável pela contração de solidificação baixa ou nula, pois gera um aumento de volume que se opõe aa contração. É também a sua forma, notadamente lamelar ou nodular, um grande fator de influencia nas propriedades mecânicas da liga ¹.

Há três tipos básicos de ferro fundido. O ferro fundido branco (que não possui carbono precipitada na forma de grafita e ao qual não será dada importância neste trabalho), o ferro fundido com grafita lamelar ou cinzento e o ferro fundido nodular (deste faz parte o SiMo).

O ferro fundido com grafita lamelar possui o carbono livre precipitado na forma de lamelas ou veios em uma matriz geralmente ferrítico-perlítica. As lamelas proporcionam propriedades como. melhor usinabilidade, melhor difusividade térmica, melhor capacidade de amortecimento de vibrações e resistência ao desgaste no atrito metal-metal. Possuem ainda excelentes propriedades de fundição e baixo custo. A composição química é variável e

depende das diferentes classes de material. Outra variável do processo é a temperatura de resfriamento.

Já os ferros fundidos nodulares possuem o carbono precipitado na forma de nódulos. A forma nodular é obtida através do tratamento do banho com liga nodularizante. O elemento mais utilizado para este tratamento é o magnésio, comumente introduzido na forma de liga Fé-Si-Mg.

O fato de ser nodular proporciona melhorias nas propriedades mecânicas como. Alta resistência aa tração e à fadiga, alta tenacidade, alta ductilidade e alto módulo de elasticidade.

No que se refere à composição química, o ferro fundido nodular também possui uma ampla faixa, variando conforme classe e particularidades da liga. Há porém, via de regra, uma tolerância menor nas faixas de composição assim como uma constante preocupação em manter o teor de enxofre baixo. Apresenta também uma maior tendência aa formação de rechupes e drosses.

Os grupos principais, quanto à matriz, se dividem em ferríticos, ferrítico-perlíticos e perlíticos.

Todos os ferros fundidos podem possuir mais ou menos elementos de liga, sendo que quando possuem mais de 3% são denominados de alta liga.

Quanto aa solidificação existem as possibilidades de ocorrer segundo os diagramas estável (fornecendo grafita) ou metaestável (fornecendo cémentita), dependendo das velocidades de resfriamento e da nucleação da grafita. Além disto deve ser levado em conta que se trata de ligas Ferro-silício-carbono, ou seja, devem ser observadas as ligas ternárias. Como instrumento de trabalho para isto é utilizado o carbono equivalente (CE). Neste utiliza-se um diagrama pseudo-binário no qual é utilizado o carbono equivalente que leve em conta a influencia que o silício tem sobre o deslocamento do eutético. Neste instrumento de trabalho, do ponto de vista prático, considera-se a liga possui CE 4,3%.

$CE = \%C + 1/3 Si.$

3.1 RESISTÊNCIA DO FERRO FUNDIDO NODULAR

A resistência do produto final nos ferros fundidos nodulares é dada por mecanismos ativos em todas as fases do processamento. solidificação, resfriamento e eventual tratamento térmico. A resistência é pode ser aumentada por diversos mecanismos como refino da estrutura da grafita, aumento do teor de austenita primária, aumento da quantidade de células eutéticas, aumento do teor de perlita, solução sólida⁽²⁾.

Nos ferros fundidos nodulares o teor de carbono, do ponto de vista de propriedades mecânicas, é de baixa importância. Isto se deve a natureza compacta dos nódulos. Embora um aumento de carbono equivalente resulte em um aumento de grafita, isto não altera significativamente o diâmetro de seus nódulos e conseqüentemente pouco influi em uma área transversal da matriz sujeita a esforços mecânicos. Resulta disto que a resistência de um ferro nodular é determinada pela resistência de sua matriz.

Primeiramente pode haver a influência de se aumentar ou reduzir o carbono eutético⁽³⁾. Elementos que reduzem o carbono eutético são chamados de grafitizantes, já os que o aumentam são chamados de perlitizantes ou estabilizadores de carbonetos. Na figura (1) estão indicadas as influencias dos elementos de liga. Os grafitizantes (por exemplo Si e Ni) simultaneamente aumentam o patamar eutético austenita-grafita e reduzem o eutético austenita-carboneto. Os estabilizadores de carbonetos (por exemplo cromo e vanádio) fazem o contrário, reduzindo o eutético austenita-grafita e elevando o austenita-carbonetos.

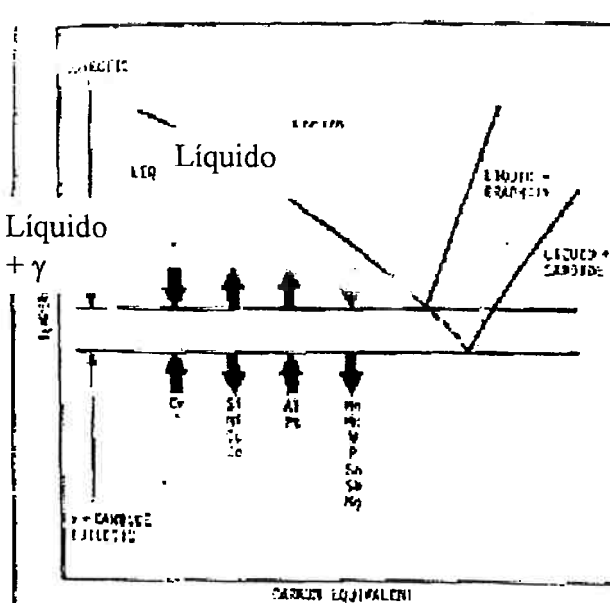


Fig. 1: Elementos grafitizantes e os estabilizadores de carbonetos agindo no patamar de carbono equivalente. Ref. 3

Por consequência, elementos de liga alteram o equilíbrio da linha sólido ferro-grafita e ferro-carboneto de ferro^(4,5,6). Portanto, grafitizantes inibem coquilhamento e estabilizadores de carboneto promovem coquilhamento. Outras ligas (molibdênio, manganês ou Al) ao mesmo tempo aumentam ou diminuem ambos os patamares. É útil se ter em mente que ferro + grafita é a fase estável e ferro + carboneto é meta-estável. Por esta razão um grande intervalo de solidificação (diferença entre austenita + grafita e austenita + carboneto) proporciona mais tempo para a solidificação favorecendo a fase estável.

3.2 METALOGRAFIA DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Em ferros fundidos ferríticos a resistência à tração é pouco afetada por um aumento de seção, sendo que ocorre uma sensível redução de sua ductilidade.

Nos perlíticos a resistência à tração é reduzida por um aumento de seção, porém a ductilidade, já bastante baixa não é afetada⁽⁷⁾.

Em todo caso, em ambos os casos, a resistência da prova é pouco alterado e é justamente neste que os projetos costumam ser baseados.

As propriedades mecânicas inferiores nas seções grossas são devidas a uma deterioração do número, forma e tamanho da grafita unidos a uma segregação de elementos formadores de carbonetos resultantes de uma menor velocidade de solidificação.

Pode-se melhorar as propriedades mecânicas do ferro nodular com uma boa técnica de inoculação – em especial inoculação pouco antes ou durante o vazamento no molde, controlando os formadores de carbonetos e número de nódulos em seções de resfriamento lento.

3.2.1 Estruturas de Matriz

Perlítica: Normalmente a formação de perlita é promovida por Mn e/ou Sn e/ou Cu. Outros elementos, normalmente não facilmente encontrados em ferro nodular são Cr, As, V, Sb, Bi e Ni.

Fig(2) mostra uma metalografia bruta de fusão de um virabrequim perlítico com mínima resistência à tração de 700 N/mm², limite de escoamento de 420 N/mm² e alongamento de 2% - especificação 700-2.

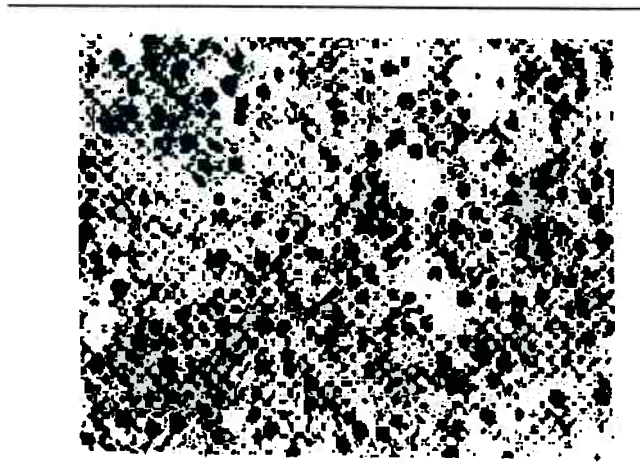


Fig 2. Matriz perlítica (em virabrequim), aumento 50x
Ref. 7

Ferrítica-perlítica: Na fig(3) é mostrada uma capa de mancal ferrítico-perlítico com resistência à tração de 500 N/mm², limite de escoamento de 320 N/mm² e alongamento de 7%. Dureza típica na faixa de 170 a 220 HB.

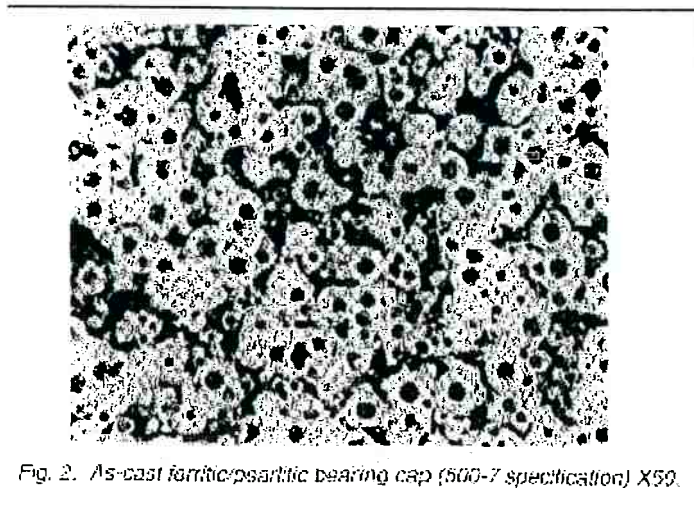


Fig. 2. As-cast ferritic/pearlitic bearing cap (500-7 specification) X50.

Ferrítica: Fig.3 Mancal ferrítico-perlítico, aumento 50x Ref.7 por controle de elementos estabilizadores de perlita. Fig(4) mostra um coletor de escape com resistência à tração de 450 N/mm², limite de escoamento de 310 N/mm² e alongamento de 10% - especificação 450-10. Valores típicos de dureza estão entre 156 e 217 HB.

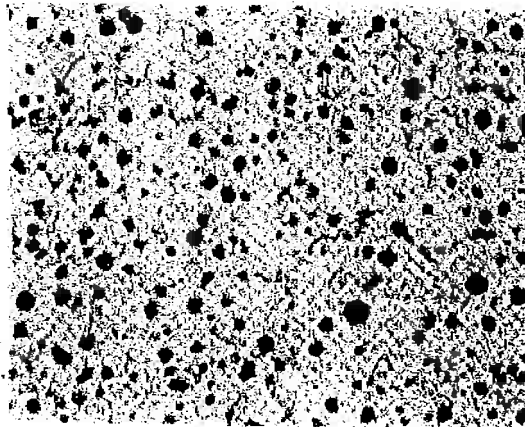


Fig. (4) Coletor de escape bruto de fusão, aumento de 100x Ref. 7

Fosfatos e carbonetos: A figura (5) mostra uma formação de esteadita (eutético ferro-carbono-fósforo). O fósforo segrega para os contornos de grão, possui alta dureza, aumenta a temperatura de transição dútil-frágil, e promove instabilidade interna. Os efeitos são de maior importância ao se obter fósforo superior a 0,05%.

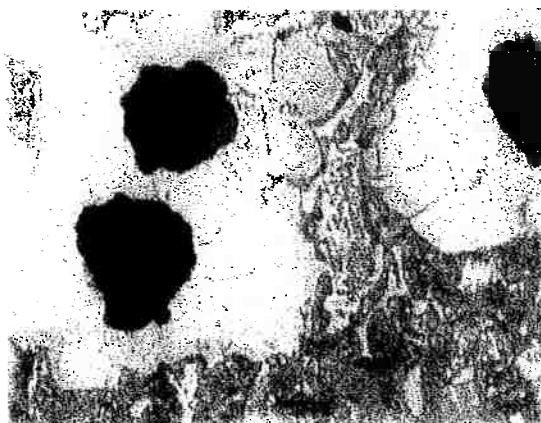


Fig5. Eutético ferro-carbono-fósforo (steadita)
Aumento de 500x Ref. 8

Havendo um alto molibdênio e rápido resfriamento pode ocorrer um coquilhamento mesmo em uma peça de, comparativamente a outras, alto silício. Este problema é combatido, via de regra, por uma inoculação mais eficiente.

3.2.2 Morfologia da grafita

Magnésio e cério: Grafita nodular é obtida por via de elementos nodularizantes como Mg e Ce podendo haver também combinação de terras raras. Níveis típicos de Mg estão entre 0,04 e 0,06%, embora teores de 0,025% ainda possam obter grafita esferoidal dependendo da eficácia de inoculação, seção da peça, e combinação de outros elementos. Excesso de Mg irá gerar carbonetos na matriz, promovendo rechupes e levar a grafita a se deteriorar na forma.

Ce neutraliza a ação de elementos que deterioram a grafita, assim como Pb, Bi, Sb e Ti, que podem levar a formas indesejadas como “spiky”, que tem efeitos negativos no desempenho mecânico de peças⁽⁷⁾.

Quantidade de nódulos: quantidade de nódulos, assim como nodularidade, são fatores importantes no ferro nodular, uma alta quantidade de nódulos favorece propriedades de alongamento e facilita a usinagem devido a uma matriz mais consistente e menor segregação para os contornos de grão.

Formas – morfologia - da grafita:

Seção: Figuras(6) e (7) mostram a influência da seção em um coletor de escape de alto silício.

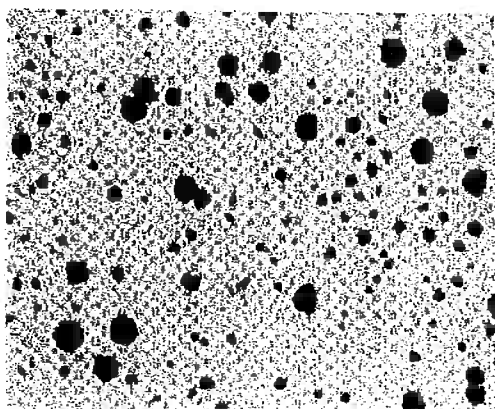


Fig 6. influência da seção em um coletor de escape de alto silício, flange. Ref. 7

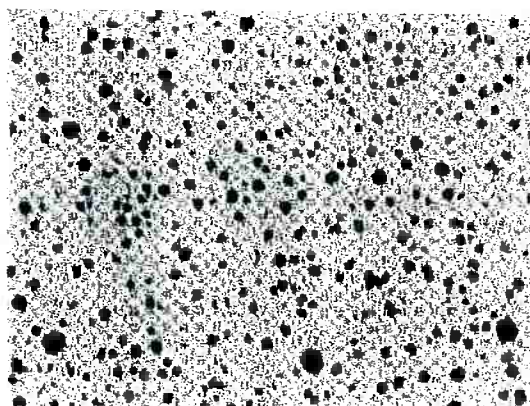


Fig. 7. influência da seção em um coletor de escape de alto silício, duto. Ref. 7

alto Si-Mo (não-inoculado x inoculado 0,5 no molde e 0,2% no vazamento).

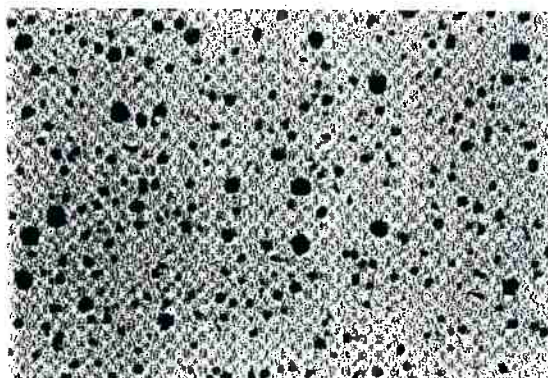


Fig.8. Influência da inoculação em coletor de escape SiMo. Aumento 100 x Ref. 7

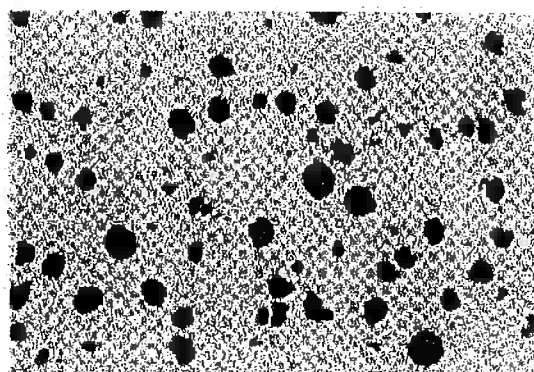


Fig. 9. Coletor de escape em Simo não inoculado, aumento de 100x Ref. 7

Influência do magnésio: figuras (10) e (11) mostram a influência do Mg em um coletor de escape de alto Si. (0,02 x 0,035% Mg)

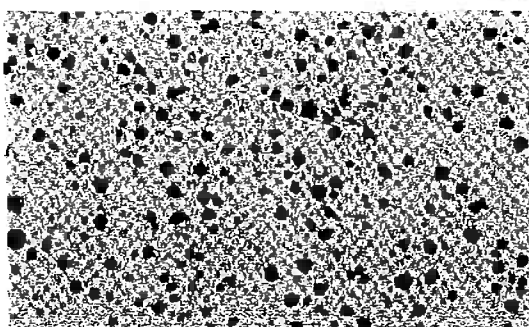
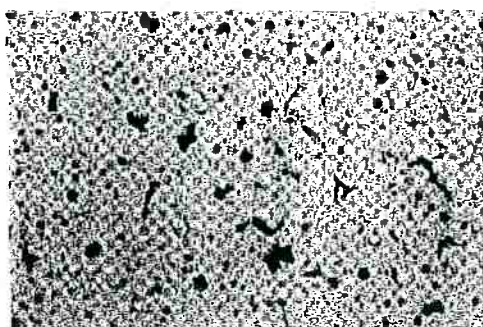


Fig.10 Influência de baixo (0,005%) Mg em um coletor de escape SiMo aumento de 100x Ref 7

Fig.11 Influência de alto (0,035%) Mg em um coletor de escape SiMo aumentado de

Grafita alinhada: figura (12) mostra grafita alinhada formada sobre dendritas. Isto é resultado de baixa inoculação e/ou elevadas temperaturas de vazamento.

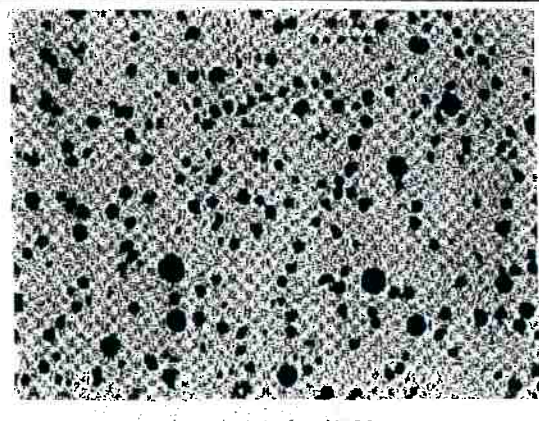


Fig.12. Exemplo de grafita alinhada. Ref. 7

3.3 DEFEITOS EM GERAL.

3.3.1 Gases

Pinholes: defeito devido à ocorrência de hidrogênio, cuja principal fonte é a areia verde, ao qual a peça estará sujeita a níveis superiores a 0,01%. Estes defeitos ocorrem logo abaixo da superfície, na forma de agulhas. Em uma verificação microscópica possuem forma de pequenos círculos que podem atingir até 3mm de diâmetro, mas que frequentemente estão abaixo deste valor. Um aumento

pequeno geralmente mostrará os pinholes com uma superfície brilhante. Num aumento maior pode-se ver que estão alinhados com um filme de grafita e estão livres de inclusões não-metálicas.

Para prevenção deste defeito convencionalmente pode-se:

- Controlar teor de Al nas ligas de ferro e nas sucatas utilizadas na alimentação do forno de fusão.
- Garantir que os revestimentos refratários estão secos antes do uso.
- Controlar a umidade na areia verde.
- Manter um nível de carvão na areia fina.
- Evitar canais de alimentação longos, o que aumenta o contato entre metal e a areia verde.

Blowholes: Um aprisionamento de escória no ferro durante o vazamento é um fator chave para a formação de blowholes na peça. O carbono presente no ferro fundido irá reduzir os óxidos de Si, Mg e Fé produzindo monóxido de carbono. Via de regra são revelados após usinagem.

Gases: via de regra se apresentam em peças feitas com moldes com ligantes (moldes de areia, machos). Frequentemente se trata de gases que são aprisionados pelo metal líquido, não podendo mais sair da peça antes da solidificação.

Geralmente este defeito se encontra na parte superior da peça (molde superior), em regiões de saída deficiente de gases. Estes defeitos também podem surgir no interior da peça dependendo da espessura da parede e da solidificação.

Caracteriza-se por vazios arredondados, geralmente com paredes lisas. Os gases podem surgir isolados ou agrupados, por vezes associados a óxidos e/ou escórias. Estando presentes na superfície aumentam o retrabalho com solda ou já podem ser motivo de refugo. No interior da peça, caso identificados são motivo de refugo, podendo ocasionar quebra em uso se passarem despercebidos.

O defeito em si surge de relação geração de gases / permeabilidade e possibilidade de saída de gases em geral. Portanto para se compensar uma

geração alta de gases, por exemplo, de macharia, esta geração deve ser compensada por uma melhor permeabilidade.

Sua geração pode se dar de duas maneiras:

Por meio do metal quente vazado surgem gases no material de moldagem – e de macharia. A pressão do gás pode atingir uma pressão tão alta que precipitam em forma de bolhas dentro do metal. A outra maneira é uma menor solubilidade de gases dentro do metal sólido do que no líquido, havendo uma precipitação em forma de bolhas durante a solidificação.

Estes gases tem a oportunidade de, no estado inicial da formação da peça fundida, subir pelo fundido e sair pela parede ainda não solidificada. Uma maior viscosidade do metal, i é uma solidificação mais adiantada, reduz a velocidade de ascensão das bolhas. Estas podem ser aprisionadas logo abaixo de uma casca solidificada ou até no centro de uma secção maior. A consequência é um defeito por gases.

3.3.2 Drosses

Oxidação de Mg e Si na superfície do ferro líquido forma filmes de silicato de magnésio, que posteriormente se unem com a grafita. Particularmente no caso de ferros nodulares hipereutéticos, visto na Fig. (13)

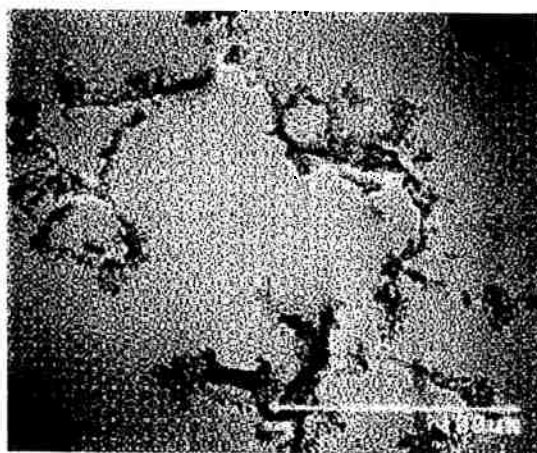


Fig.13. Defeito de drosses de silicato de magnésio. Aumento 500x Ref. 7

Pode-se evitar esta condição desfavorável controlando teores altos de Mg e Si, altas temperaturas de vazamento, projeto de ataque e uso de agentes fluxantes.

3.3.3 Microrechupe

A figura 14 mostra um microrechupe no centro (ponto quente) de um tubo de coletor de escape. Este defeito pode ser evitado com: melhor sistema de alimentação, inoculação no vazamento.

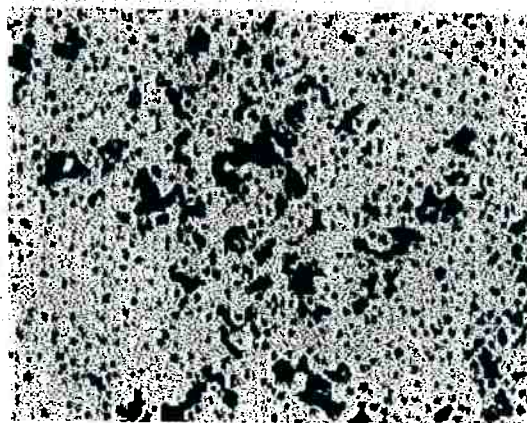


Fig. 14. Microrechupe em seção de canalização de coletor de escape. Aumento 50x. Ref. 7

3.3.4 Macrorechupe

Figuras(15) e (16) mostram macrorechupe dendrítico. Melhor sistema de alimentação é o necessário para evitar este problema.



Fig. 15. Macrorechupe em mancal.
Aumento 100x

Fig. 16. Macrorechupe em mancal.
Aumento 300x Ref 7

Os macrorechupes externos são visíveis a olho nu, já que localizados em regiões superficiais. São vazios simétricos que, quando superficiais, costumam apresentar forma cônica⁽⁸⁾, como visto na figura 17.

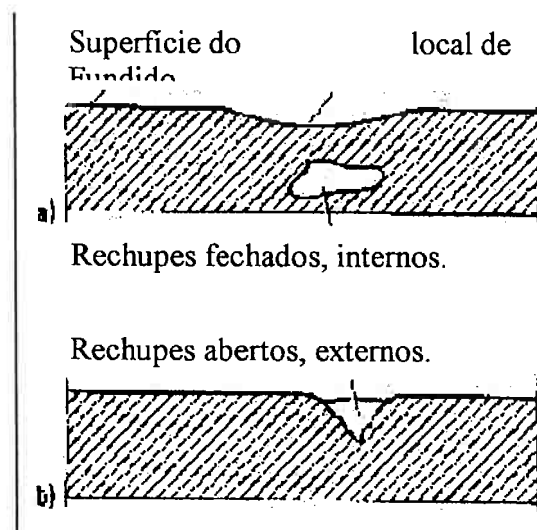


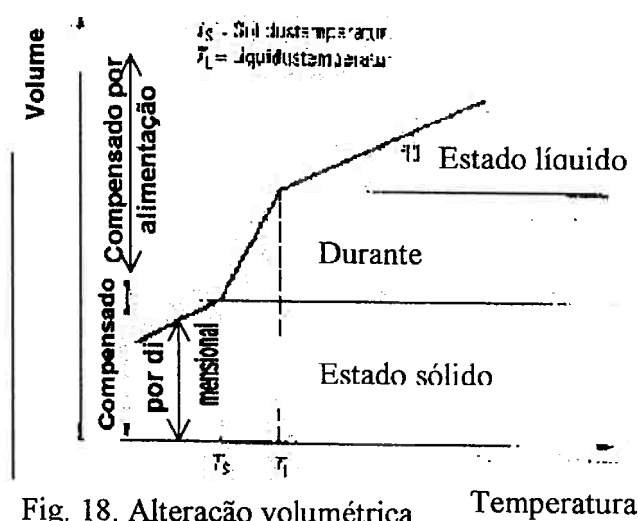
Fig. 17. Rechupes se apresentando em diferentes formas Ref. 8

As paredes dos rechupes costumam seguir a forma áspera, muitas vezes dendríticas, ou seja, menos lisas do que nos gases. Defeitos internos que não possuem ligações com o exterior possuem forma irregular a olho nu apenas serão visíveis após usinagem ou ensaio destrutivo.

Caso não for possível tomar medidas de técnica de fundição (solidificação dirigida, alimentação) o macrorechupe é motivo de refugo.

Mecanismos de formação. O volume específico dos metais utilizados em fundição é maior no estado líquido do que no sólido. Portando ao cristalizar estes

metais sofrem uma contração. Forma-se então um déficit volumétrico que se manifesta como rechupes, porosidades etc. (fig.18)



Portanto, o rechupe é formado pelo processo físico de contração e a falta de compensação desta por alimentação. A grandeza do déficit volumétrico é função principalmente do material utilizado. Como compensação a esta redução podem atuar o teor de gases na liga, a deformação do molde (principalmente quando for em areia) e a expansão devido à grafita.

Em ferros fundidos nodulares tem-se uma solidificação endógena pastosa. Ao lado da contração líquida, que pode ser atacada por sistemas de ataque e alimentação e uma contração sólida tem-se uma expansão durante o processo de solidificação⁽⁸⁾.

Também deve ser observado que durante a solidificação a grafita pode precipitar junto à superfície da peça e causar um resalto se o material de

moldagem ceder a essa pressão interna. Isto proporciona um aumento de volume e se não houver uma alimentação que compense este aumento haverá rechupe. Em uma etapa mais adiantada da solidificação a grafita precipita em uma região – ou em quase todos os locais – na peça. Como as paredes das peças são capazes de contrair, uma auto alimentação torna-se mais fácil.

3.3.4 Veiamento

Defeito típico de um molde com ligante orgânico, ou seja, mais frequente em macho.

Todos os materiais de fundição podem ser atingidos por este defeito. Pelo fato dos motivos de defeito serem procurados no processo de confecção de macho ele surge independente do processo de moldagem.

Os veiamentos causados por machos são membramentos irregulares, finos, em forma de filigrana em ângulos, cantos, arestas e curvaturas de peças fundidas. Pelo fato de "inícios" de veiamentos, formados pelo surgimento de cascas, crescerem para dentro dos vãos devido à expansão do quartzo e não quebrarem como schülpen, o metal vazado alimenta este crescimento formando típicas composições de veiamento. Veios levam a uma maior necessidade de retrabalho⁽⁸⁾.

Veiamento é classificado como defeito devido à expansão de areia. O metal líquido, que envolve o macho, causa um gradiente de temperatura entre superfície e centro (do macho). Aliadas a isto ocorrem tensões, motivadas por expansão da areia de quartzo por transformação estrutural (alotrópica β - α).

Juntamente com a progressiva destruição de ligantes na superfície de macho surgem pequenas trincas, nas quais o metal penetra.

O veiamento ainda é influenciado pelo comportamento a quente do ligante - por exemplo, termoplasticidade, resistência a quente.

3.3.5 Rebarbas

Rebarbas são restos de metal, via de regra de parede fina ou, dependendo do caso grossa, localizados no plano de divisão. De uma maneira geral a precisão dimensional da peça é mantida. Geralmente se forma perpendicular em relação à superfície da peça em alturas irregulares e não deve ser confundida com veiamento⁽⁸⁾.

Como consequência de alterações locais de resfriamento a rebarba pode causar endurecimento e região coquilhada, assim como um aumento de risco de trincas.

No vazamento o metal líquido, e neste caso bastante quente, pode penetrar na divisão de molde, marcações de macho e demais locais entreabertos, solidificar e formar uma rebarba. No caso de um mau fechamento de molde tem-se a ocorrência de rebarba grossa⁽⁸⁾.

3.4 O FERRO NODULAR COM ALTO Si E Mo (SiMo)

Por SiMo entende-se ferro fundido com alto teor de silício e molibdênio.

Um aumento de silício uma estabilidade estrutural e de propriedades do ferro fundido em altas temperaturas por formação de uma estrutura de matriz ferrítica e aumentando a temperatura de transformação de austenita. Pelo fato do ferro ser nodular há uma maior resistência ao crescimento e oxidação⁽⁹⁾.

Estes efeitos benéficos da grafita nodular em relação à lamelar são explicados pela sua estrutura. Por ser nodular evita uma fase contínua de grafita, fase esta bastante frágil. No que se refere à oxidação tem se verdadeiras "trilhas" formadas pela grafita lamelar que favorecem uma oxidação interna, ocorrência minimizada na grafita nodular⁽¹⁰⁾.

O fato de a estrutura ser estável (alta temperatura de transformação austenítica) favorece a estabilidade em usos a altas temperaturas.

O silício forma também uma fina camada, ou filme, de óxido que protege o material abaixo de oxidação. Na figura 1 observa-se as curvas de oxidação a 650°C para diferentes teores de silício. Pode-se notar que para valores a partir de 4%, após uma formação inicial de camada oxidada, um aumento de peso (devido à oxidação) é praticamente desprezível e há um comportamento semelhante para temperaturas maiores⁽¹¹⁾.

O silício como solução sólida dentro da matriz ferrítica provoca um aumento de resistência e uma queda de ductilidade - tenacidade. Até aproximadamente 4,5% há uma queda moderada de tenacidade, mas a partir deste patamar o decaimento é acentuado e para teores superiores a 6% o material é demasiadamente frágil para aplicações estruturais.

Adições de molibdênio até 0,5% ou, dependendo das aplicações, até 1,0% podem ser adicionados para favorecer a resistência à fluência⁽⁹⁾, especialmente na ocorrência de ciclos térmicos. Na presença de molibdênio há também pequenas quantidades de carbonetos dispersos nos contornos de grão, o que não deve prejudicar as propriedades mecânicas. Em dispersão há até uma melhora nestas propriedades (mecânicas).

3.4.1 Composição

Para manter um equilíbrio ótimo entre resistência à oxidação e propriedades mecânicas o teor de silício é normalmente mantido entre 4 e 6%. Na extremidade inferior desta escala com 4 a 4,5% de silício as propriedades mecânicas são semelhantes às de ligas com teores mais baixos, na ordem de 2,5%. Já na faixa próxima a 6% ocorre uma maior resistência à oxidação, porém acompanhada de fragilização. Para aplicações a altas temperaturas é frequentemente adicionado molibdênio entre 0,5 e 1,5%. Com isto são formados carbonetos que se mantêm após recozimento. Portanto tem-se, mesmo após um eventual recozimento, uma dureza superior a 250 HB. Com base nisto um ferro com 4 a algo menos do que 5% de silício e 0,5 a 1,5% de molibdênio é o mais adequado para a maioria das aplicações de ferro SiMo⁽⁹⁾.

O silício reduz o teor de carbono eutético, de forma que o silício e o carbono devem ser balanceados para evitar flotação. Conforme o silício aumenta de 5 a 6%, o carbono deve cair de 3,8 a 2,9%.

Já o teor de manganês não deve exceder 0,5%, pois isto fragiliza o material. Pode também haver formação de perlita nos contornos de grão.

3.4.2 Comportamento a temperaturas elevadas

A influência do silício se mantém a altas temperaturas como é mostrado na figura 19. Os ferros com 4% de silício ou mais são consideravelmente superiores do que os convencionais⁽¹⁰⁾. Além disto as adições de molibdênio também aumentam a resistência à tração, apesar de promoverem redução de alongamento.

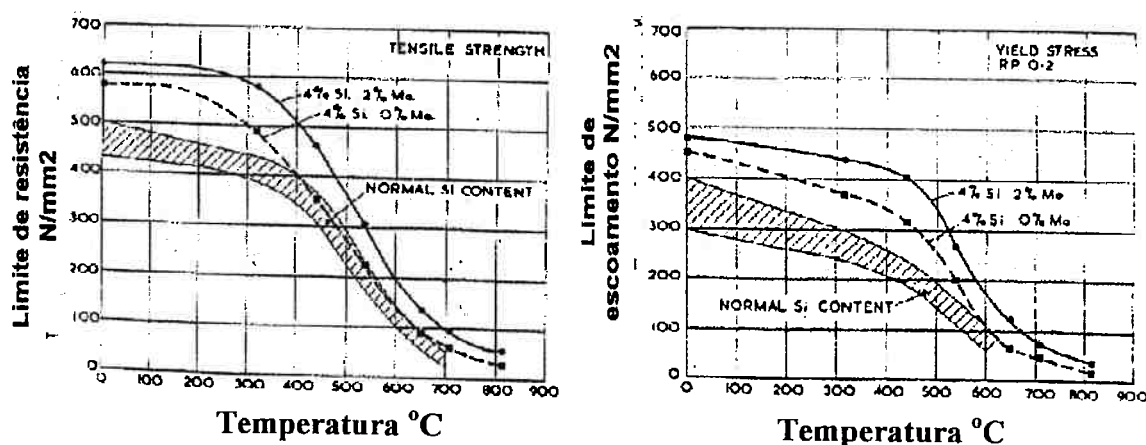


Fig. 19: indicação das influências benéficas de silício e molibdênio: ambos os elementos aumentam o limite de escoamento e a resistência à tração. Ref. 10

Dos dois ciclos ferritizantes, recozimento subcrítico resulta num material com maior limite de escoamento e menor ductilidade do que em um tratamento de austenitização completa. Estes efeitos podem ser vistos nas figuras 20 a até e, sendo que na "d" e "e" estão indicados comportamentos a elevadas temperaturas (no caso 815 °C. Aumento de silício em até 5% aparenta possuir pouco efeito

sobre o alongamento em altas temperaturas (fig. 21) Também são indicados, na mesma figura, os valores para os ferros com 2 a 2,6% de silício, e com 0,5 a 2,0 de molibdênio. As ligas contendo já teores de 6% de silício possuem um alongamento inferior às com 4%.

A resistência à compressão altera pouco nos ferro com até 5% de Si⁽¹⁰⁾

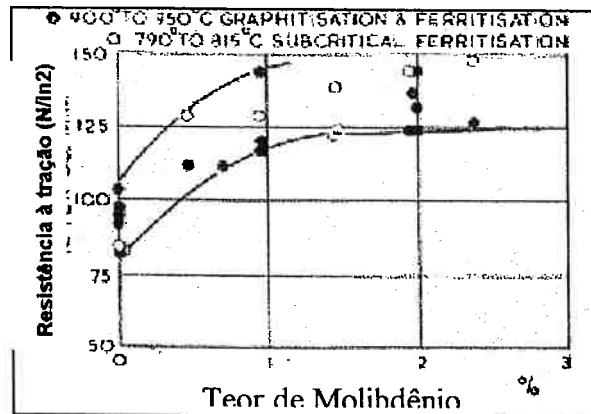


Fig. 20a Resistência à tração em função do teor de molibdênio a temperatura ambiente. Ref. 10.

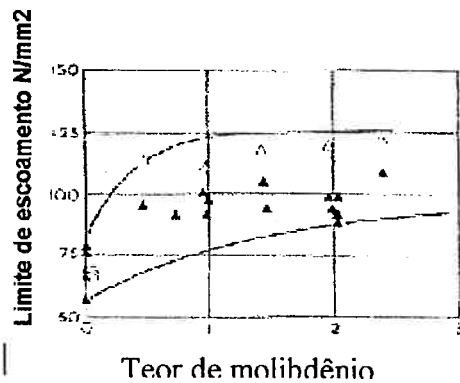


Fig. 20b: limite de escoamento em função do teor de molibdênio em temperatura ambiente. (ref. 10)

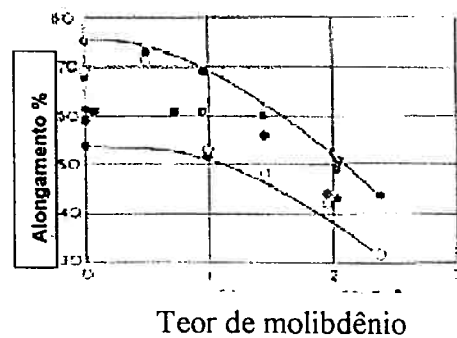
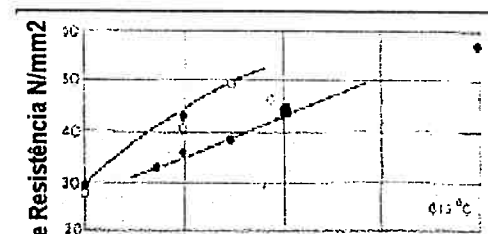
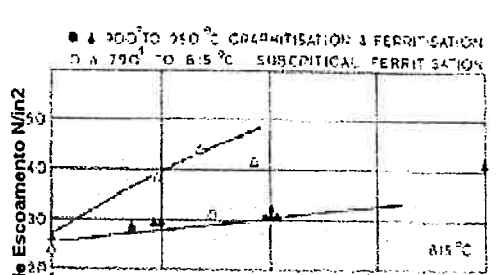


Fig. 20c: alongamento em função do teor de molibdênio a temperatura ambiente (ref. 10)



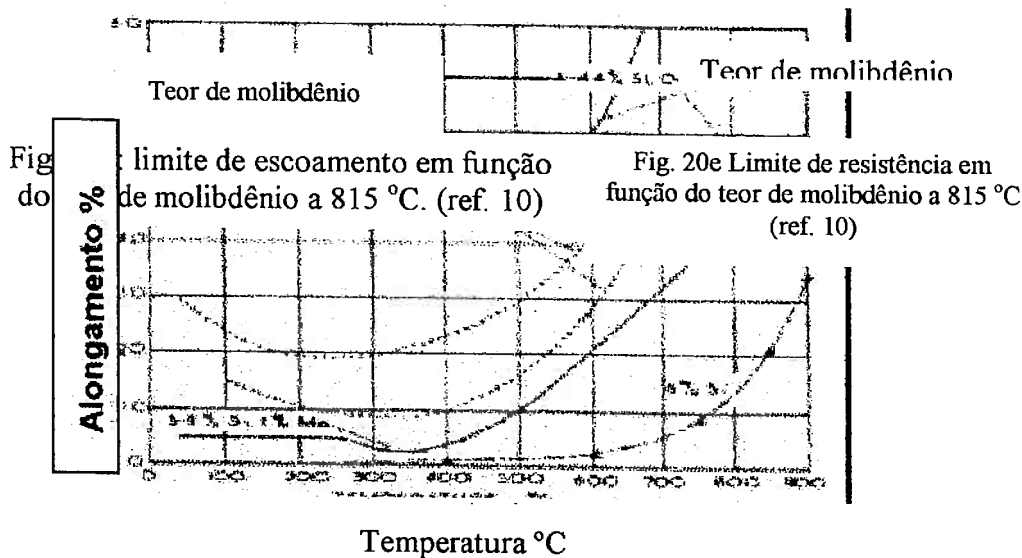


Fig. 21: Influência do teor de silício no alongamento de ferro nodular ferrítico em elevadas temperaturas (ref. 10)

3.4.3 Resistência à fluência

O molibdênio possui um forte efeito sobre a resistência à ruptura a altas temperaturas, sendo que o material recozido a temperaturas sub-críticas é mais resistente do que o que passou pelo ciclo de austenitização e ferritização. Adições de até 1% de molibdênio aumentam a resistência (fig 22) enquanto que adições subsequentes perdem efetividade. A fig 23 apresenta valores de fluência a longo prazo com ferros fundidos com 4% de silício e teores variáveis de molibdênio.

Dados comparativos de fluência estão dispostos na forma de diagramas de Larson-Miller e mostram o comportamento de ferros nodulares ferríticos, austeníticos e aços resistentes ao calor (fig. 24)

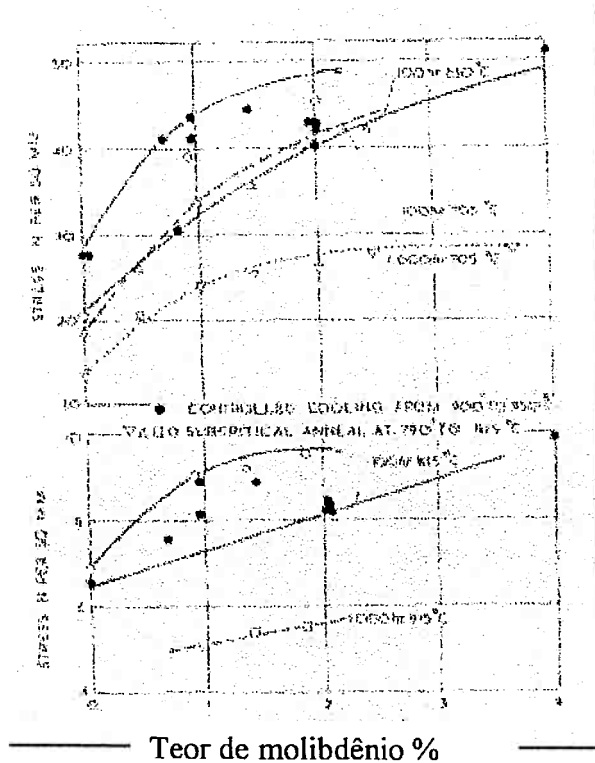


Fig. 22: relação entre adições de molibdênio e resistência (ref. 10)

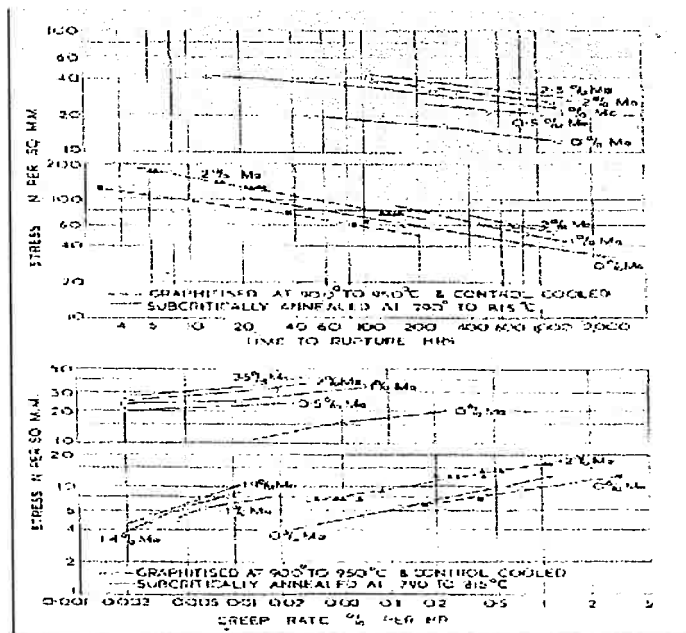


Fig. 23: fluência com silício fixo (4%) e valores variáveis de molibdênio (ref. 10)

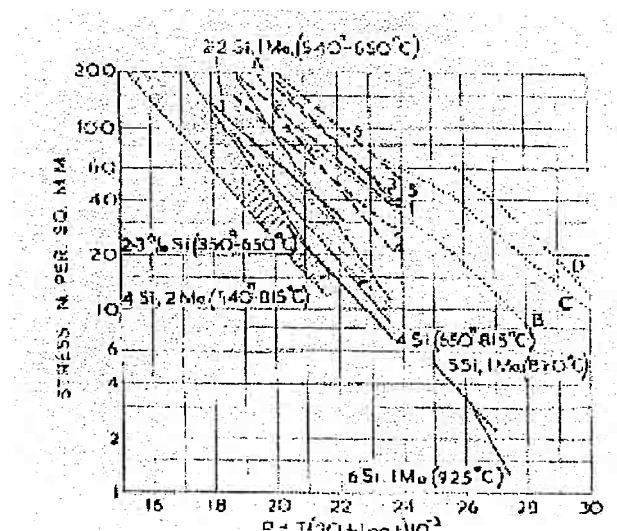


Fig 24: Fluência em ferros nodulares ferríticos e aços resistentes ao calor (ref. 10)

3.4.4 Ciclo térmico

O ciclo térmico é a solicitação normalmente mais exigente à qual está sujeito o ferro fundido que deva ser resistente ao calor. As tensões formadas devido a contrações e dilatações podem exceder o limite de escoamento ou o limite de resistência, dependendo das circunstâncias. Materiais frágeis podem

trincar e materiais dúcteis podem sofrer deformações plásticas permanentes. Estas tensões surgem devido a variações dimensionais durante ciclos de aquecimento e resfriamento e com uma restrição externa como de um coletor de escape preso a um conjunto rígido bloco de motor – coletor de escape.

No caso de contração da peça atuam na mesma tensões de tração, sendo que podem ser geradas trincas devido à fadiga ou devido a uma tensão térmica que ultrapassa a tensão de fratura em materiais frágeis.

No caso de dilatação da peça atuam na mesma tensões de contração, podendo ser geradas deformações plásticas caso as tensões térmicas forem suficientemente altas para ocasionar fluência.

A magnitude das tensões térmicas é função do gradiente de temperatura, do coeficiente de dilatação térmica e módulo de Young para elasticidade. Fatores que melhoram a performance em ciclos térmicos são uma alta condutividade térmica que minimiza os gradientes de temperatura, baixo módulo, alta resistência a altas temperaturas e alta ductilidade. As particularidades podem ser mutualmente exclusivas sendo dependentes do teor e natureza (tipo) de grafita⁽¹⁰⁾.

3.4.5 Resumo de propriedades físicas

O peso específico do ferro fundido com aproximadamente 4% Silício e 1% molibdênio está próxima de 6,84 g/cm³⁽¹¹⁾.

3.4.6 Aplicações

O ferro SiMo – ferro fundido nodular com alto silício e molibdênio podem ser aplicados em sistemas de exaustão em motores de automóveis leves e caminhões. Isto se deve às maiores solicitações a que estes motores estão submetidas, tanto do ponto de vista meramente de desempenho, e ambiental⁽¹¹⁾.

3.5 ALIMENTAÇÃO

Devido a um maior volume ocupado por uma massa de metal líquido durante a fusão do que pela mesma massa de metal no estado sólido (contração líquida e de solidificação) podem surgir insanidades na peça, os rechupes.

Uma equação geral proposta para dimensionamento de massalotes (proposta por Chvorinov e alterada por Namur) é ⁽¹²⁾

$$Vm = \frac{\Gamma}{\Gamma m} * \varepsilon_m * A_m * \frac{V}{\varepsilon * A} (\delta + b) + b * V_0 \quad (1), \text{ ref. 12.}$$

Onde:

Vm	=	Volume do massalote
V	=	Volume da peça
V_0	=	Volume total a ser alimentado (maior que V caso o massalote Alimentar mais do que uma peça)
A	=	Área de troca de calor da peça
A_m	=	Área de troca de calor de massalote
ε	=	Fator de correção da peça
ε_m	=	Fator de correção do massalote
Γ	=	Constantes relativas ao metal e ao molde (para a peça)
Γm	=	Constantes relativas ao metal e ao molde (para o molde)
b	=	Coefficiente de contração volumétrica
δ	=	fator de relacionamento com o tempo de vazamento

4 PROCEDIMENTO

4.1 A ALIMENTAÇÃO VIA MASSALOTE

Para uma alimentação correta de um fundido devem ser levados em conta tanto as características da liga quanto as da peça em si. Uma correta alimentação visa prevenir principalmente o problema de rechupe.

Em geral tem-se como equação simplificada para massalote⁽¹³⁾

$$V_m \geq k' \cdot r \cdot V_c \quad (2, \text{ ref. } 13)$$

Onde:

V_m = volume do massalote

V_c = volume do metal líquido que preenche a cavidade deixada no molde devido à contração.

r = coeficiente de contração volumétrica

k' = coeficiente de segurança, que depende do tipo de massalote utilizado.

$$V_c = V_p \cdot \frac{ds}{dq} = \frac{P}{dq} \quad (3, \text{ ref. 13})$$

V_p = volume da peça (ou parte da peça) sólida/fria.

ds = densidade do metal sólido

dq = densidade do metal líquido

P = peso da peça (ou parte da peça).

Deficiências das relações 2 e 3 neste item em relação à relação 1 são a falta de correlacionar área de troca de calor e tempo de vazamento.

Nestas condições será visto que uma peça como coletor de escape feita em ferro fundido nodular traz uma série de cuidados e, do ponto de vista meramente de técnica de fundição sem levar em conta o desempenho em uso, desvantagens⁽¹³⁾.

k'	Tipo de massalote
6	Comum
5	Aquecido pelo ataque
4	Com pó exotérmico
3	Em molde rígido
2	Com camisa exotérmica

Nos k' casos pode ser considerado como aquecido pelo ataque.

r	Liga
0,07	Aço comum

0,007	Ferro fundido cinzento (como CE – carbono equivalente > 4,1, como é o caso do nodular utilizado)
0,08	Ferro fundido nodular

Nota-se que o ferro fundido nodular apresenta uma maior contração (maior solicitação sobre os massalotes)⁽¹³⁾.

ds e dq são aproximadamente equivalentes em ambos os ferros fundidos e valem 7,3 e 6,9, respectivamente.

Adicionalmente tem-se que o rechupe (visto anteriormente) ocorre com maior facilidade em ferro fundido nodular.

No que diz respeito à “partes” da peça, mencionado no item Vp, volume da peça:

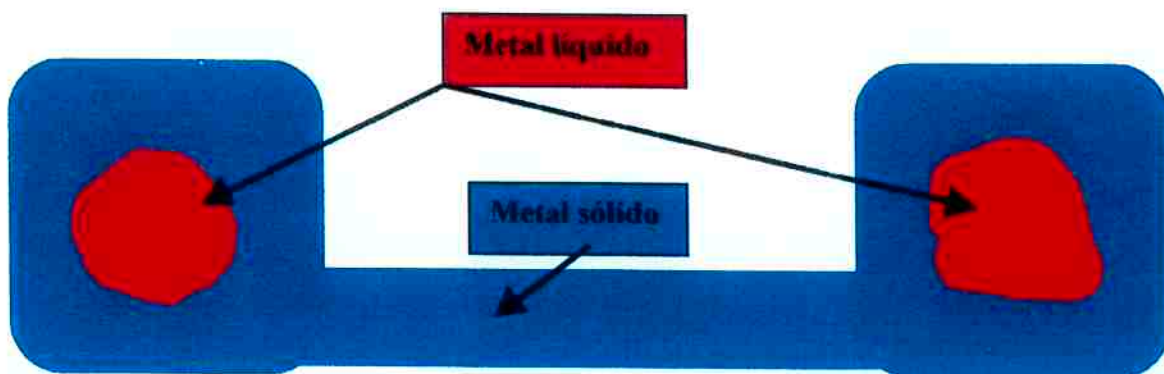
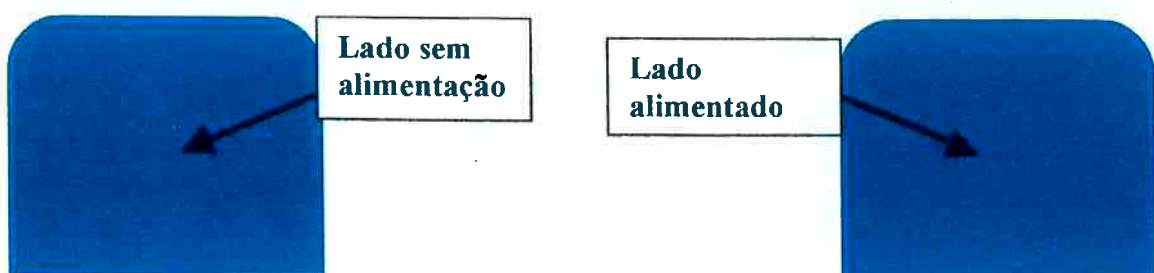


Fig. 25: representação de um perfil variável durante a solidificação

Caso fosse feita uma alimentação somente em um dos lados, chegar-se-ia à situação seguinte:



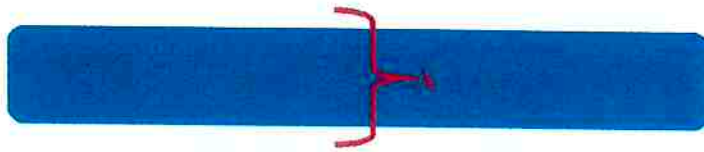


Fig. 26: representação de recheio em perfil variável após solidificação

A seção mais fina (A) da peça solidifica impedindo a passagem de material do lado alimentado para o não alimentado. Com isto o metal ainda líquido da seção mais espessa do lado não alimentado deixa recheio ao solidificar.

Um coletor de escape (Fig. 27) possui as características do esquema anterior, pois possui "bolachas" para usinagem e fixação espessas e canais de passagem de gás de escape com parede em torno de 5 mm.

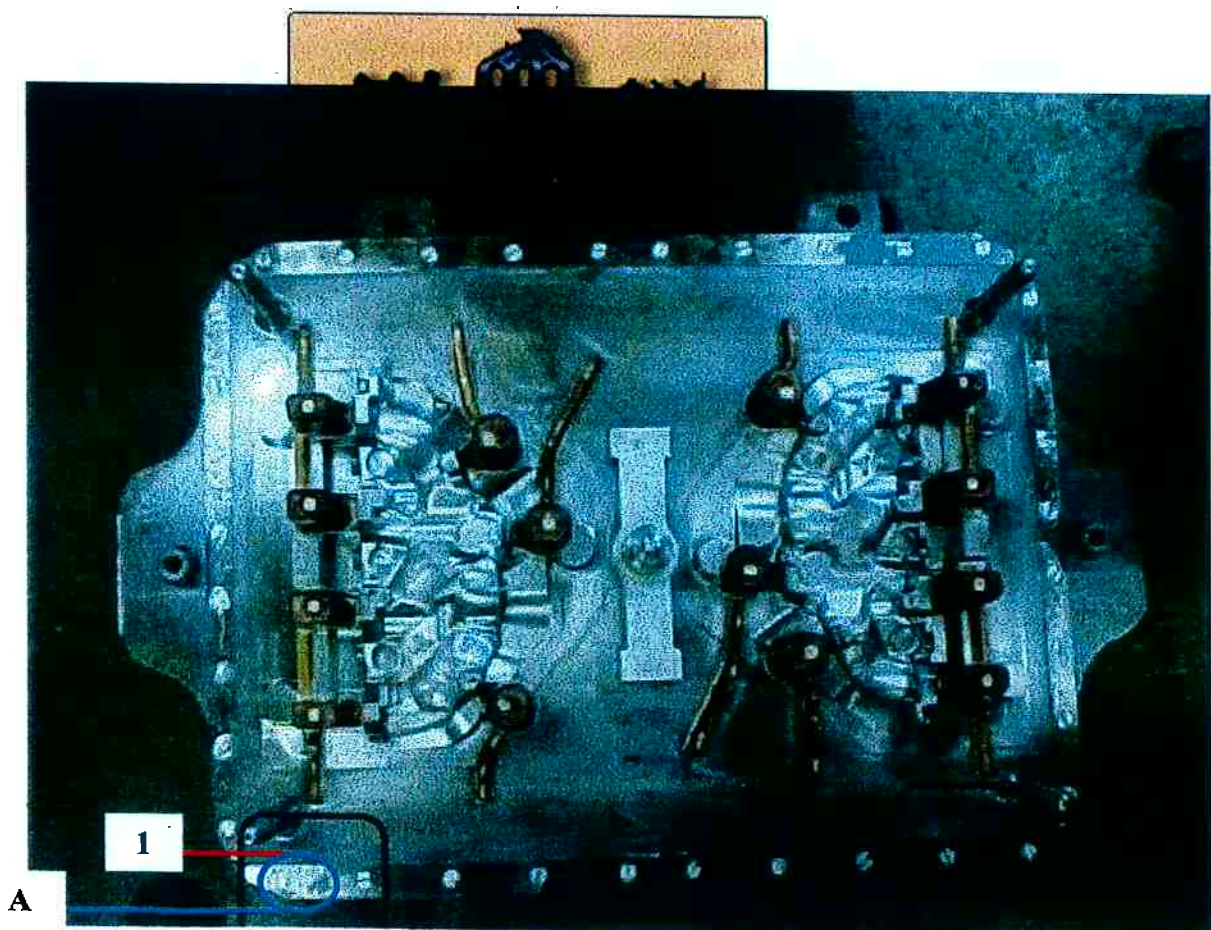


Fig.28 disposição inicial dos massalotes

Um cálculo para 1 massalote, embora com valores corretos, não atende de maneira alguma à alimentação de um coletor de escape, pois os canais

simplesmente iriam solidificar deixando uma massa líquida nas “bolachas” não alimentadas. Portanto, de antemão uma alimentação com apenas 1 massalote foi descartada.

A alimentação inicial se deu como acima, vista no ferramental de moldagem. No que se refere aos massalotes destacados, foi levado mais em consideração ³ a facilidade de confecção e ajuste aos canais de alimentação do que um bom funcionamento. Observa-se sua forma assemelhada a um para-choque ^B (massalotes 1, 2, 3 e 4, figura 27), o que leva a um resfriamento mais rápido ⁴ - consequentemente a uma solidificação do metal no massalote. Com isto o mesmo deixa de alimentar a peça. Outra deficiência é a disposição dos canais (regiões A e B, figura 27) que alimentaram os massalotes 2 e 3 da figura 27 com defasagem. Na disposição inicial tem se um corte esquematizado (números de massalotes conforme figura 27):

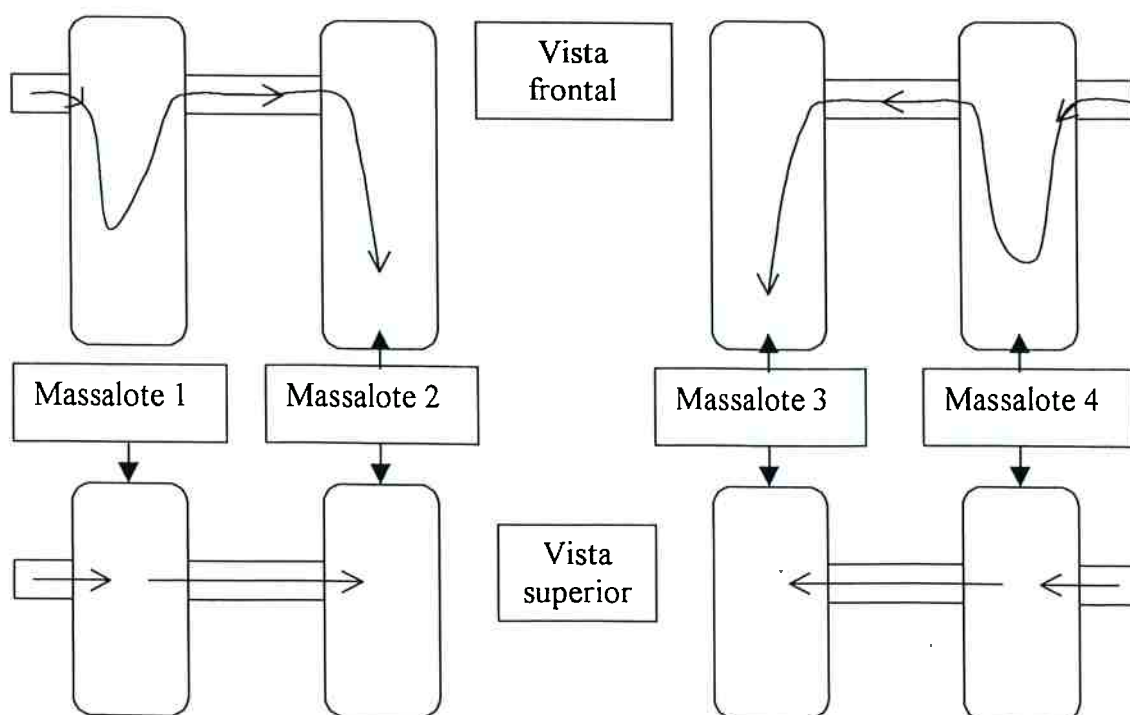


Fig.29 Disposição inicial mostra o caminho inicial percorrido pelo metal (→). Para que o metal chegue nos massalotes 2 e 3 é necessário que passa antes nos massalotes 4 e 1, o que se mostrou prejudicial ao funcionamento dos primeiros (2 e 3)

Cortes feitos na peça, em especial próximos ao massalote mostraram uma série de rechupes. Ainda é necessário dar destaque ao fato de que próximo aos massalotes 2 e 3, ou seja, aqueles cuja alimentação ainda passou por outros massalotes (1 e 4). Para auxiliar na identificação de defeitos foi utilizado ultra-som e raio-x (este último apenas em menor escala).

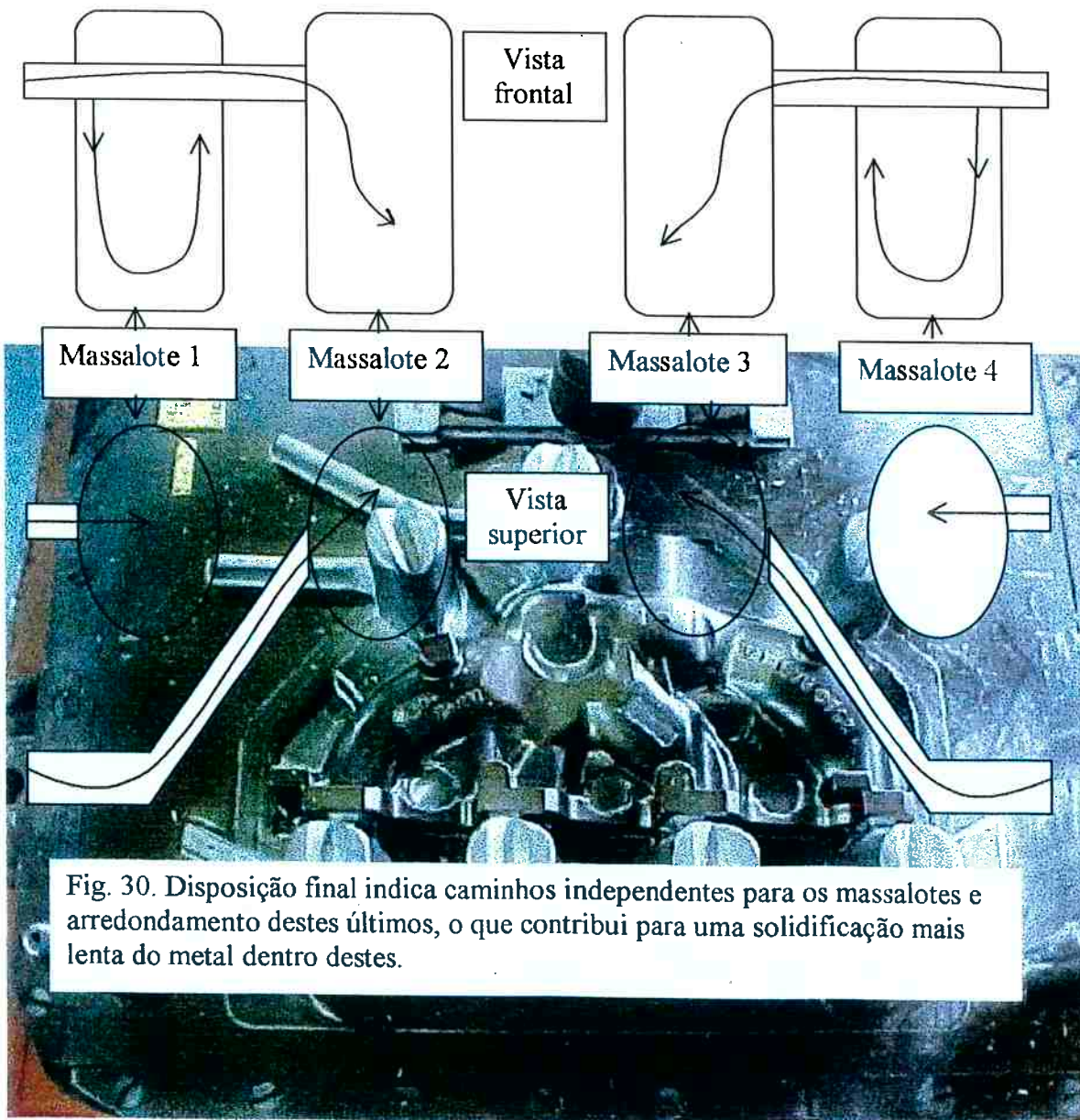


Fig. 30. Disposição final indica caminhos independentes para os massalotes e arredondamento destes últimos, o que contribui para uma solidificação mais lenta do metal dentro destes.

Fig.31: Ferramental após alterações

5 CONCLUSÃO

Para uma boa alimentação de uma peça como o coletor de escape é necessária uma distribuição de massalotes que alimentem diretamente locais mais espessos (como flange). Caso contrário, a alimentação de regiões espessas teria de ser feito via dutos do coletor, seções finas que solidificam rapidamente, impedindo transporte de metal e consequentemente a alimentação de seções espessas. Por esta razão o número de massalotes em um coletor chegou a nove.

Uma tentativa inicial de confeccionar massalotes com forma diferente da cilíndrica (no caso se aproximando de um paralelepípedo) não se mostrou eficaz. Isto se deve à menor relação área/volume do cilindro e consequentemente menor perda de calor, quando comparado ao paralelepípedo de mesmo volume.

No que se refere à alimentação dos massalotes chegou-se à conclusão de que esta deve ser direta e rápida. Falhou uma tentativa de reduzir o peso do conjunto (peça + canais de alimentação + massalotes) por meio de uma economia de canais de alimentação, sendo que esta economia também retardou o preenchimento de massalotes. Foi o caso em que o caminho da alimentação

preenchia antes um massalote e posteriormente um segundo. Chegando neste último o metal está em temperatura inferior e o massalote perde a eficácia.

6 REFERÊNCIAS

1 VIEIRA, R. R.; FALLEIROS, I. G. S.; PIESKE, A.; GOLDENSTEIN, H.; Materiais para máquinas-ferramenta. STI/IPT. 1973/74

2 JANOWAK, J.; GUNDLACH, R.; ELDIS, G.; RÖHRIG, K.; Technical advances in cast iron metallurgy. Proceedings of the 48th International Foundry Congress, Varna, Bulgaria, 1981.

3 NEUMANN, F.; SCHENK, H.; Effects of trace elements on the solubility of carbon in molten iron alloys, with reference of their positions in the periodic system. GIESSEREI 14 No.1, 1962, pp 21-29.

4 MARGÉRIE, J. C.; Some advances in the science of cast iron solidification. AFS TRANSACTIONS 78, 1970, pp 281-286.

- 5 OLDFIELD, W – Chill-reducing mechanism of silicon in cast iron. B.C.I.R.A. JOURNAL 10 nº 1, January 1962, pp 17-27.
- 6 MERCHANT, H. D.; Structure and delineation of eutetic cells in cast iron. AFS TRANSACTIONS 70, 1962, pp 973-992.
- 7 MARKS J.R.; Metallography of ductile iron. AFS TRANSACTIONS.
- 8 STEPHAN, H.; Guss und Gefühgefehler. SHIELE UND SCHÖN , 1999.
- 9 BCIRA BROADSHEET 219-2, 1985 BCIRA.
- 10 FAIRHURST, W.; RÖHRIG, K.; High-silicon nodular irons. FOUNDRY TRADE JOURNAL, 29 March 1979, vol 146, pp 657-681.
- 11 JANOWAK, J.; CRAWFORD, J. D.; RÖHRIG, K.; Ferritic Nodular irons for elevated-temperature service. MOLYBDENIUM MOSAIC, vol 5 nº 1.
- 12 MARIOTTO, C. L.; ALBERTIN, E.; FUOCO, R; Sistemas de enchimento e alimentação de peças fundidas. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS – ABM. Julho/1986.
- 13 Determinação dos sistemas de massalotes e canais; Escola SENAI de Fundação Marcelino Corradi, Itaúna, 1981.
14. www.nelcast.com/images/exhaust_manifolds.jpg