

ANDREA APARECIDA MUNIZ MENEZES

**REMOÇÃO DE FERRO DO BANHO DE ALUMÍNIO UTILIZANDO FILTRO
CERÂMICO E ADIÇÃO DE MANGANÊS**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo
2002

Ao meu irmão William Marcos Muniz Menezes, politécnico e
Engenheiro Metalurgista, que tem sido um exemplo de
dedicação e amor à profissão.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a todos os meus protetores.

Aos meus pais, Wanderley e Darcy, por sempre me apoiarem e ampararem, e por terem me ensinado a fazer o melhor.

Ao Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório pelo permanente incentivo e dedicação.

Aos meus irmãos: Wilney, Cristine, William, Claudia e Wesley, e aos meus sobrinhos, pelo carinho e por acreditarem em mim.

Aos meus amigos, que me acompanharam por cinco anos e dos quais espero não me separar.

Ao Danilo, Rubens, Lívio, Claudio, Francisco, Gilson e Ariane, pela ajuda e amizade sincera.

Aos Professores e Funcionários pela dedicação e apoio.

Obrigado e que Deus abençoe.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	5
LISTA DE FIGURAS	6
RESUMO	7
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 A IMPORTÂNCIA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO ⁽¹⁾	1
1.2 DESIGNAÇÃO PARA AS LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO ⁽¹⁾	2
1.3 PROPRIEDADES DAS LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO ⁽¹⁾	3
1.4 AS PRINCIPAIS LIGAS DE ALUMÍNIO USADAS NA FUNDIÇÃO	4
1.5 APLICAÇÕES	6
1.6 PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB ALTA PRESSÃO POR INJEÇÃO ⁽¹⁾	7
1.7 MÁQUINAS DE INJEÇÃO DE CÂMARA FRIA ⁽¹⁾	8
1.7.1 <i>Variedade de dimensões e pesos das peças injetadas⁽¹⁾</i>	9
1.7.2 <i>Volume de produção e tempo de construção dos moldes⁽¹⁾</i>	9
1.7.3 <i>Capacidade de fazer secções finas⁽¹⁾</i>	9
1.7.4 <i>Réplica de detalhes⁽¹⁾</i>	10
1.7.5 <i>Acabamento superficial⁽¹⁾</i>	10
1.7.6 <i>Furos obtidos por fundição⁽¹⁾</i>	10
1.7.7 <i>Precisão dimensional⁽¹⁾</i>	10
1.7.8 <i>Peças típicas⁽¹⁾</i>	11
1.8 IMPUREZAS PERMANENTES DO ALUMÍNIO	11
1.8.1 <i>O sistema Al-Fe-Si</i>	11
1.8.2 <i>O sistema Al-Fe-Si-Mn</i>	15
1.8.3 <i>O sistema Al-Fe-Cu</i>	19
1.8.4 <i>A influência do manganês nas fases intermediárias</i>	21
1.9 REMOÇÃO DE FERRO E PROCESSO DE FILTRAGEM	21
1.9.1 <i>Os problemas causados pelas impurezas no processo de fundição de peças</i>	24
2. MATERIAIS E MÉTODOS	25
2.1 FUSÃO E FILTRAGEM	26
2.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A ANÁLISE QUÍMICA	28
2.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	33
3.1.1 <i>Material filtrado</i>	34
4. APÊNDICE	37
5. CONCLUSÕES	39
6. LISTA DE REFERÊNCIAS	40

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Nomenclatura e designação para as ligas de alumínio fundido⁽¹⁾</i>	2
<i>Tabela 2 - Composição das ligas de alumínio fundido⁽¹⁾</i>	6
<i>Tabela 3 – Estequiometrias e nomes das fases precipitadas nas ligas hipoeutéticas Al-Fe-Mn-Si⁽²⁵⁾</i>	24
<i>Tabela 4 – Reações de precipitação na solidificação da liga 380⁽²⁵⁾</i>	26
<i>Tabela 5 – Composição nominal da liga A380.⁽¹⁹⁾</i>	33
<i>Tabela 6 - Informações sobre os experimentos realizados</i>	36
<i>Tabela 7 – Resultados obtidos e eficiência de cada experimento</i>	41

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Projeção da superfície liquidus do sistema Al-Fe-Si.⁽²¹⁾</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 – Região rica em Al do diagrama ternário Al-Fe-Si.⁽²⁴⁾</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3 – Representação simplificada do diagrama de fases do sistema Al-Fe-Si para teores de Mn constantes: (a) 0%Mn, (b)0,1%Mn, (c)0,2%Mn, (e)0,4%Mn.⁽²⁵⁾</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4 – Projeção da superfície liquidus do sistema Al-Cu-Fe.⁽²¹⁾</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5 – Estrutura obtida na 3º corrida (aumento de 10x), que apresenta fases intermediárias com diferentes morfologias.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 6 – Metalografia da 1º corrida (aumento de 10x)</i>	<i>43</i>
<i>Figura 7 – 8º corrida. Aumento de 10x. Devido a maior adição de Mn realizada, é possível observar mais fases intermediárias formadas.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 8 – Típica estrutura intermetálica, formada na 7º corrida</i>	<i>44</i>
<i>Figura 9 – Vista superior do material retido no filtro, e presença de inclusões na superfície</i>	<i>45.</i>
<i>Figura 10 – Material utilizado durante a fusão do alumínio líquido.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 11 – Esquema obtido após filtragem, material retido, filtro e material filtrado</i>	<i>46</i>

RESUMO

O alumínio fundido é amplamente utilizado na indústria automobilística devido às suas propriedades de alta resistência e baixo peso específico. O ferro é uma das principais impurezas existente nas ligas de alumínio devido à utilização de sucata de alumínio contaminada com sucata de aço na metalurgia secundária do alumínio. O ferro forma fases intermediárias que podem comprometer as propriedades das ligas e das peças fabricadas. O objetivo deste trabalho foi o de estudar a remoção de ferro do alumínio líquido utilizando filtro cerâmico poroso e adição de manganês eletrolítico. A liga estudada foi a A380, que tem vasta aplicação industrial, principalmente na indústria automobilística. As variáveis estudadas foram: a composição química, a temperatura de filtragem do alumínio e o tipo de filtro. A conclusão que se chega neste estudo é que o processo só é possível fazendo adições de manganês e diminuindo a temperatura até os campos de cristalização de fases primárias contendo ferro.

1. INTRODUÇÃO

1.1 A importância das ligas de alumínio fundido⁽¹⁾

A fundição de alumínio se tornou utilizada somente depois da invenção do refino de alumínio pelo processo Hall-Heroult. No final do século 20, a aplicação de ligas de alumínio fundido era limitada para objetos decorativos e utensílios domésticos.

A expansão da utilização de ligas de alumínio fundido ocorreu após a II Guerra Mundial. Novas ligas foram desenvolvidas e os processos de fundição foram aprimorados para atender as aplicações comerciais e técnicas.

A crise do petróleo (crise energética) no início dos anos 70, e mais recentemente a questão ambiental, levou a melhorar o uso de alumínio fundido em muitos veículos, em função da sua excelente relação resistência-peso.

Uma variedade de metais pode ser adicionada ao alumínio. Dentre os metais usualmente utilizados como elementos de liga estão o zinco, magnésio, cobre, silício, ferro, lítio, manganês, níquel, prata, estanho e titânio. A solubilidade desses elementos na fase sólida em alumínio é relativamente alta. Alguns são utilizados em solução sólida para aumento da resistência, enquanto outros são adicionados pelo fato de formarem vários compostos intermetálicos que melhoram diversas propriedades da liga.

Em termos de utilização de ligas fundidas, as ligas de alumínio são as mais utilizadas depois das ligas de ferro fundido.

1.2 Designação para as ligas de alumínio fundido⁽¹⁾

As especificações para as ligas fundidas são definidas pela sua composição química. As ligas fundidas são obtidas a partir do alumínio eletrolítico ou do alumínio metálico reciclado, e depois são adicionados os elementos de liga. Cada país desenvolveu sua própria nomenclatura e designação para as ligas de alumínio fundido, e após algum tempo foi adotado um sistema internacional para identificação. A Associação de Alumínio nos Estados Unidos adotou um sistema numérico de quatro dígitos para identificar as ligas de alumínio fundido. O primeiro dígito indica o elemento de liga em maior teor na liga, mostrado na Tabela 1:

Tabela 1 - Nomenclatura e designação para as ligas de alumínio fundido⁽¹⁾

1xx.x	Composição sem elemento de liga; alumínio 99.0 % ou mais
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silício com magnésio e/ou cobre
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
6xx.x	Não usado
7xx.x	Zinco
8xx.x	Estanho
9xx.x	Não usado

No grupo 1xx.x, dois dígitos a esquerda do decimal denotam o mínimo do teor de alumínio. Por exemplo um 190.x é a designação correspondente para um alumínio de grau de pureza 99.90 %. O dígito a direita do ponto do decimal indica a forma do produto, 0 a 1 respectivamente para fundidos e lingotes.

1.3 Propriedades das ligas de alumínio fundido⁽¹⁾

As ligas de alumínio são caracterizadas pelo seu baixo peso específico o qual pode variar ligeiramente acima ou abaixo do peso específico do alumínio puro dependendo do principal elemento de liga. Além do seu baixo peso, as ligas de alumínio fundido possuem baixa temperatura de fusão, negligência à solubilidade de gases com a exceção do hidrogênio, excelente fundibilidade (fluidez do metal em fusão) especialmente perto da composição do eutético 11.7 %, boa usinabilidade e acabamento superficial, boa resistência à corrosão, e boas condutividades térmica e elétrica. Uma contração volumétrica entre 3.5 % e 8.5 % que ocorre durante a solidificação é a principal desvantagem das ligas fundidas de alumínio.

O coeficiente de contração deve ser considerado durante o design do molde a fim de obter precisão dimensional e evitar a tensão à quente e a contração das porosidades. No caso de algumas ligas, o tratamento térmico é utilizado para melhorar as propriedades mecânicas.

A escolha da composição de uma liga para uma determinada aplicação é baseada nos parâmetros:

- Usinabilidade
- Propriedades mecânicas
- Propriedades de uso

A fundibilidade das ligas de alumínio é determinada pelo uso de moldes de prova específicos que são apropriados para medir a fluidez, a tensão (de ruptura) a quente e as características da contração.

As propriedades de fundição dependem principalmente da composição da liga e do intervalo de solidificação, o qual pode variar de 0°C (ligas eutéticas) a 140°C (liga B 390).

A melhora das propriedades mecânicas é geralmente obtida através do tratamento térmico das ligas o qual inclui as ligas eutéticas (A 356.0, A 357.0) e ligas de solução sólida (201.0).

1.4 As principais ligas de alumínio usadas na fundição

O aumento da resistência das ligas Al-Si é obtido pela adição de pequenas quantidades de cobre, magnésio ou níquel. Na família das ligas de composição hipoeutética, o silício confere boas propriedades de fundição e o cobre confere limite de resistência à tração, usinabilidade e resistência à corrosão. A liga 380 tem sido usada por muitos anos como principal liga fundida sob alta pressão. Via de regra as ligas 319.0 380.0 são fornecidas no seu estado bruto de fusão, mas a resistência e a usinabilidade de uma liga 319.0 podem ser melhoradas pelos tratamentos térmicos T6 ou T5.

De uma forma ampla, a indústria de fundidos sob alta pressão usa liga alumínio - silício - cobre conhecida como 380.0 nos EUA.^(1,4,5)

A tabela 2 mostra as diferentes designações internacionais as quais diferem não somente pelos elementos de liga como Si e Cu, mas também pelos teores das principais impurezas tais como ferro, zinco e manganês. Altos teores de ferro diminuem o risco de caldeamento do metal sob alta pressão em matriz, mas podem promover a formação de placas frágeis de α - Al Fe Si ou outros intermetálicos complexos na presença de manganês. O teor de magnésio é geralmente especificado abaixo de 0.3 % para evitar a formação de Mg₂Si, o qual resulta na deterioração do metal no limite de resistência à tração.⁽¹⁾

Tabela2 - Composição das ligas de alumínio fundido⁽¹⁾

Designações Número AA Composição	A360.0	A380.0	383.0	A413.0	B390.0	384.0
Silício	9,0-10,0	7,5-9,5	9,5-11,5	11,0-13,0	16,0-18,0	10,5-12,0
Ferro	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Cobre	0,6	3,0-4,0	2,0-30,	1,0	4,0-5,0	3,0-4,5
Manganês	0,35	0,50	0,50	0,35	0,50	0,50
Magnésio	0,40-0,6	0,10	0,10	0,10	0,45-0,65	0,10
Níquel	0,50	0,50	0,30	0,50	0,10	0,50
Zinco	0,50	3,0	3,0	0,50	1,5	3,0
Estanho	0,15	0,35	0,15	0,15	0,20	0,35
Titânio	-	-	-	-	0,20	-
Total dos outros	0,25	0,50	0,50	0,25	0,20	0,50

1.5 Aplicações

Os blocos de motor 380.0 com linhas de ferro fundido são fundidos sob alta pressão na Europa e no Japão. Nos EUA e no Canadá, carcaças de motor, peças de transmissão e várias outras peças automotivas são fundidas nas ligas da série 380.0.⁽¹⁾

1.6 Processo de fundição sob alta pressão por injeção⁽¹⁾

As máquinas de fundição sob pressão devem possuir as seguintes características:

- Capacidade máxima e mínima de injeção (volume de material injetado)
- A pressão por injeção
- A regulagem da velocidade de injeção de que se possa dispor. A velocidade de injeção é importante, pois se for excessiva o metal injetado pulveriza-se, oxidando-se; se for muito pequena o material pode solidificar prematuramente, impedindo o enchimento completo do molde, principalmente no caso de peças com secções finas
- Tipo de construção, tanto quanto ao movimento do molde (horizontal, vertical ou oblíquo) e também quanto à direção de injeção (horizontal, vertical ou oblíqua)
- Tipo de comando da injeção. Este comando pode ser feito manualmente por alavancas, ou mecanicamente por sistemas eletro-hidráulicos ou pneumohidráulicos. O comando manual só se pode usar para volumes pequenos e pressões limitadas. O comando por cames só se usa em máquinas pequenas porque as cames só permitem cursos pequenos e fixos e, portanto, não permitem por si só a regulagem contínua de injeção. Efetivamente é imprescindível poder variar o volume de metal injetado, pois ele depende não só da moldagem, como também do nível do metal dentro da câmara; por isso, o comando por cames só se usa para pequenas e pequenas pressões. No caso do comando hidráulico a regulagem do volume da injeção não apresenta problemas. No sistema pneumo-hidráulico existe um reservatório com gás sob

pressão que vai acumulando o líquido bombeado continuamente pelas bombas.

O gás que se usa é normalmente é o azoto para não haver riscos de explosão ou de inflamação (de gás misturado com vapores de óleo quente do sistema hidráulico). Não se pode usar o ar comprimido pois poderia formar misturas explosivas com os vapores de óleo.

1.7 Máquinas de injeção de câmara fria⁽¹⁾

O forno que mantém o metal líquido (temperatura do forno acima da temperatura de fusão do metal) está separado da máquina de injeção embora deva estar instalado o mais próximo possível da máquina.

O dispositivo de injeção consiste num contentor (caixa metálica de grandes dimensões) ou cilindro com uma abertura superior dentro da qual circula um êmbolo que, após a abertura do orifício de vazamento por colher, injeta o metal líquido dentro da cavidade da moldagem metálica através de um sistema de distribuição constituído por canais de enchimento.

O conjunto do contentor/pistão (em ferro fundido, aço, ou bronze ligado com Berílio) só se encontra em contato com o metal vazado durante poucos segundos, que separam o tempo de enchimento do contentor do momento da injeção. O cadinho do forno que mantém o metal líquido é neste caso revestido por material refratário.

Este equipamento é destinado à produção de peças injetadas em:

- Ligas de alumínio
- Ligas de Magnésio
- Ligas de Cobre

1.7.1 Variedade de dimensões e pesos das peças injetadas⁽¹⁾

A maior parte da produção de peças injetadas é realizada em dimensões e pesos que podem ser considerados pequenos. Contudo, a dimensão e o peso das peças injetadas em ligas de alumínio continua a aumentar para atender às necessidades da indústria automobilística.

1.7.2 Volume de produção e tempo de construção dos moldes⁽¹⁾

Os moldes metálicas para a fundição sob pressão são, em geral, muito complexos pelo tempo necessário para a sua fabricação que é longo e dispendioso, o que por sua vez obriga a realizar grandes produções. Contudo a produção da ordem de 5000 peças pode ser justificada se a precisão dimensional exigida às peças for elevada.

Os tempos de ciclo de vazamento variam desde uma injeção por segundo para peças finas em ligas de zinco até 15 injeções por hora para peças de grande dimensões em ligas de alumínio para a indústria automobilistica.

1.7.3 Capacidade de fazer secções finas⁽¹⁾

O processo permite realizar secções da ordem de 0,5 mm em ligas de Zinco, da ordem de 0,8 mm em ligas de alumínio e da ordem de 1,5 mm em ligas de cobre.

1.7.4 Réplica de detalhes⁽¹⁾

O processo de injeção sob pressão em moldes metálicos garante uma fidelidade da réplica de detalhes muito elevada.

1.7.5 Acabamento superficial⁽¹⁾

O acabamento das superfícies das peças injetadas é melhor para ligas vazadas a baixas temperaturas e podem obter-se valores de rugosidade da ordem dos 0,4 a 3,2 µm.

1.7.6 Furos obtidos por fundição⁽¹⁾

Os furos obtidos com machos metálicos nos processos de injeção podem ter tolerâncias muito pequenas da ordem de aproximadamente 0,015 mm.

1.7.7 Precisão dimensional⁽¹⁾

Dimensões críticas abaixo de 25 mm podem ter tolerâncias de 0,08 mm para ligas de zinco, de 0,10 mm para ligas de alumínio e de 0,18 mm para ligas de cobre.

1.7.8 Peças típicas⁽¹⁾

Uma enorme variedade de peças são vazadas por injeção sob pressão, as quais incluem para a indústria automobilística: corpos de carburador, corpos de distribuidores, caixas de velocidades e de engrenagens, caixas para componentes elétricos, etc...

1.8 Impurezas permanentes do alumínio

1.8.1 O sistema Al-Fe-Si

O estudo do sistema ternário Al-Fe-Si revela que próximo do estado de equilíbrio, o campo da fase na região rica em alumínio (a fase solução sólida (Al)), é cercada por regiões que contém solução sólida rica em silício (Si) e as fases intermediárias FeAl_3 , $\alpha(\text{AlFeSi})$, $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$, $\delta(\text{AlFeSi})$. Como pode-se ver na Figura 1 e Figura 2.⁽¹⁶⁻²⁰⁾

A presença destes compostos, quando situados principalmente nos contornos de grão, faz diminuir a plasticidade do alumínio.

Três fases ternárias estão presentes na região rica em alumínio. Nota-se no diagrama que o aumento do teor de silício diminui o campo de fase primária (Al), e portanto, favorece as fases intermediárias ricas em ferro.⁽¹⁶⁻²⁰⁾

Observando o diagrama, nota-se que para uma ampla composição de Fe e Si forma-se a fase intermediária AlFeSi que tem estrutura lamelar. A composição química da fase AlFeSi contém 27 – 28% de ferro e 14 – 15% de silício. A mais provável composição estequiométrica é $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$. A composição não é afetada pela taxa de solidificação ou subsequente tratamento térmico.⁽²⁹⁾

Dentre os metais usados como elementos de liga no alumínio, poucos têm alta solubilidade à temperatura ambiente. Somente o zinco, o magnésio, o cobre e o silício têm solubilidade acima de 1%. Outros elementos com solubilidade abaixo de 1% conferem melhorias nas propriedades das ligas de alumínio.⁽¹⁸⁾

O ferro pode ser considerado praticamente insolúvel no alumínio (máx. 0,05%), portanto, mesmo que o teor de ferro seja pequeno, verifica-se a formação da fase eutética Al + Al₃Fe com apenas 1,7 % de Fe (ou 7 % de Al₃Fe). Dado que o teor de ferro na fase eutética é muito reduzido, o estudo microscópico não chega a revelar a presença de uma estrutura tipicamente eutética por ser coalescente. A estrutura das ligas Al–Fe está constituída pelo alumínio e pelas inclusões de Al₃Fe.

Em geral, o tamanho das fases intermediárias ricas em ferro aumenta com o teor de ferro, e diminui com o aumento da taxa de resfriamento. Logo a elevação do teor de ferro faz com que o material passe de uma região de cristalização primária de alumínio para fases contendo ferro. Nessas condições as fases precipitam-se livremente à partir do líquido, enquanto que para baixos teores de ferro o crescimento é limitado às regiões interdendríticas.

Para baixas taxas de resfriamento, a fase intermediária β lamelar é mais grosseira e concentrada no contorno de grão, onde o material se torna mais suscetível à fratura frágil. Para altas taxas de resfriamento, a fase β tem pequenas dimensões sendo distribuída mais uniformemente.

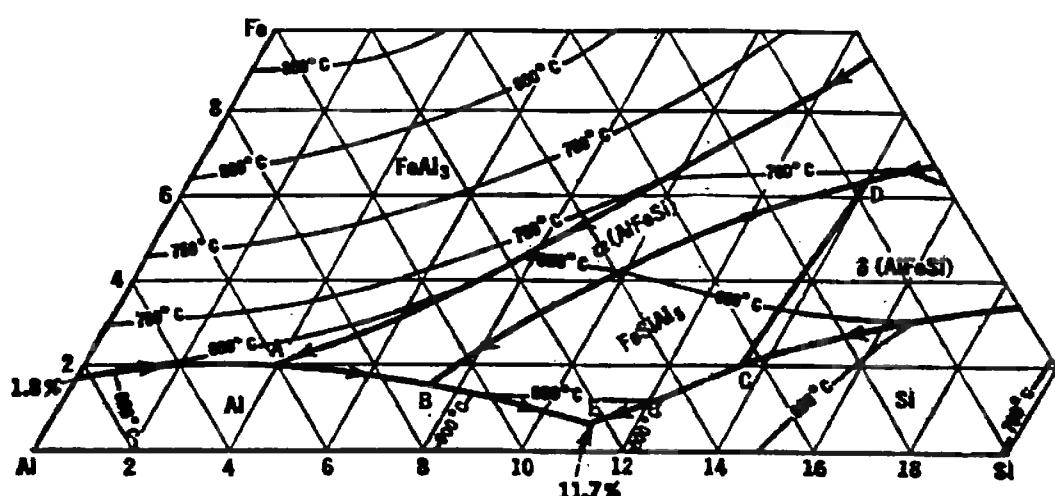


Figura 1 – Projeção da superfície liquidus do sistema Al-Fe-Si.⁽²¹⁾

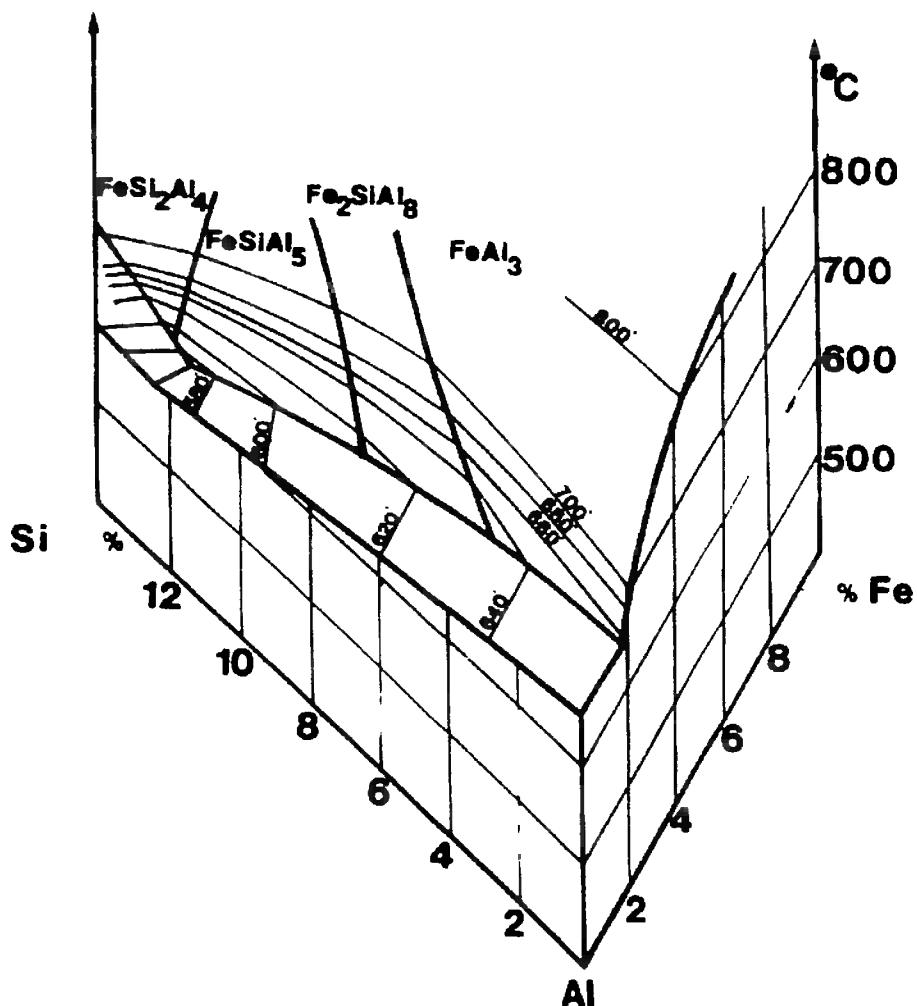


Figura 2 – Região rica em Al do diagrama ternário Al-Fe-Si.⁽²⁴⁾

O silício não é capaz de formar compostos com o alumínio. A solubilidade do alumínio no silício é muito reduzida, razão porque se pode considerar que no alumínio atinge, à temperatura eutética, 1,65 %, ao passo que à temperatura ambiente normal vem sendo quase nula (0,09 % a 300°C). A fase eutética contém 11,7 % de Si, estando constituída pelas inclusões alternadas de ambas as fases.⁽¹⁾

1.8.2 O sistema Al-Fe-Si-Mn

Para cada teor de silício nas ligas Al-Si, as quantidades de ferro e manganês presentes são importantes no estabelecimento de propriedades do material a ser produzido.^(9,10,24,25,26)

No diagrama de fase da Figura 3, pode ser visto que com o aumento da quantidade de Mn e Fe, há um aumento no campo de precipitação da fase intermediária $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$.⁽²⁵⁾

Analizando os diagramas de fases de equilíbrio dos sistemas ternário Al-Si-Fe, mostrado na Figura 1 e do quartenário Al-Si-Fe-Mn, mostrado na Figura 3, são observados os seguintes fenômenos: o silício causa diminuição do campo de alumínio primário e portanto é um elemento que favorece a estabilização das fases intermediárias contendo ferro. Adição de manganês às ligas do sistema Al-Si-Fe causa diminuição no campo de estabilidade do alumínio primário e a ampliação dos campos das fases intermediárias contendo ferro.

A Tabela 3 mostra as estequiometrias das fases e seus respectivos nomes.

Tabela 3 – Estequiometrias e nomes das fases precipitadas nas ligas hipoeutéticas Al-Fe-Mn-Si⁽²⁵⁾

Fase	Nome
Al ₁₅ FeSi	β – AlFeSi
Al ₈ Fe ₂ Si	α – AlFeSi
Al ₁₅ Mn ₃ Si ₂	α – AlMnSi
Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂	Fase - χ
Al ₁₅ (Cu,Fe,Mn) ₃ Si ₂	-----

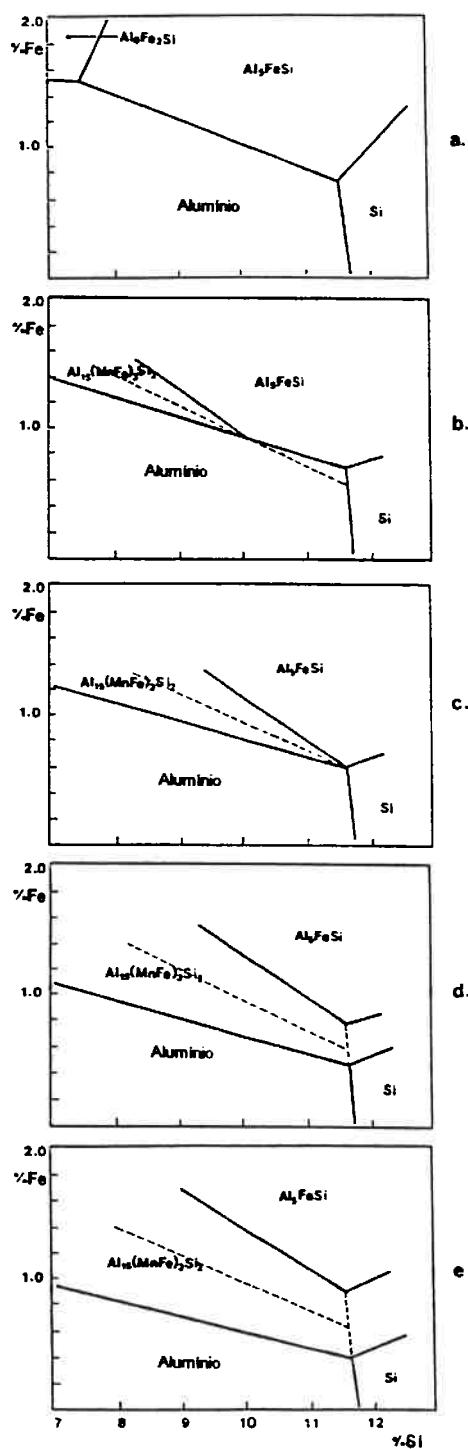


Figura 3 – Representação simplificada do diagrama de fases do sistema Al-Fe-Si para teores de Mn constantes: (a) 0%Mn, (b) 0,1%Mn, (c) 0,2%Mn, (e) 0,4%Mn.⁽²⁵⁾

As duas principais fases intermediárias encontradas nas ligas de Al-Si de fundição contendo ferro e manganês são: $\text{Al}_{15}\text{FeSi}$ e $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$. A fase ($\text{Al}_{15}\text{FeSi}$) tem estequiometria definida e dissolve limitadas quantidades de outros elementos como Mn e Cu.

A fase $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$ tem morfologia menos acicular que a fase $\text{Al}_{15}\text{FeSi}$, o que a torna menos propicia a geração de trincas no produto fundido. A fase intermediária $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$ apresenta variação na sua composição e pouca diferença morfológica.^(11,24,25)

Nas ligas com altos teores de Fe e Mn, o diagrama de fase indica a formação de $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$ como fase primária. Quando se resfria o banho a uma temperatura próxima do ponto de fusão, os cristais da fase intermediária começam a crescer, e como sua densidade é maior que a do alumínio líquido, ocorre a sedimentação para o fundo do cadiño.⁽²⁵⁾

O estudo deste fenômeno foi feito para a liga 380 (Al-9%Si-3%Cu), onde variaram os teores de ferro, manganês e cromo. Para o teor de ferro desta liga (em torno de 1%), ocorre uma seqüência de reações mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Reações de precipitação na solidificação da liga 380⁽²⁵⁾

Reação	Temperatura(°C)
Fase primária $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$	650
(Al) dendrita e $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$ e ou Al_5FeSi	600
Eutético Al + Si e Al_5FeSi	550
Al_2Cu e mais fases complexas	500

1.8.3 O sistema Al-Fe-Cu

O sistema Al-Fe-Cu ilustrado na Figura 4, mostra que as adições de cobre às ligas de alumínio têm efeito semelhante às adições de Si, ou seja, ocorre a estabilidade do campo de cristalização primária do alumínio com crescimento dos campos das fases intermediárias. O cobre tende a formar fases intermediárias com o alumínio e o ferro e é pouco solúvel nas fases intermediárias de Al-Fe-Si-Mn.

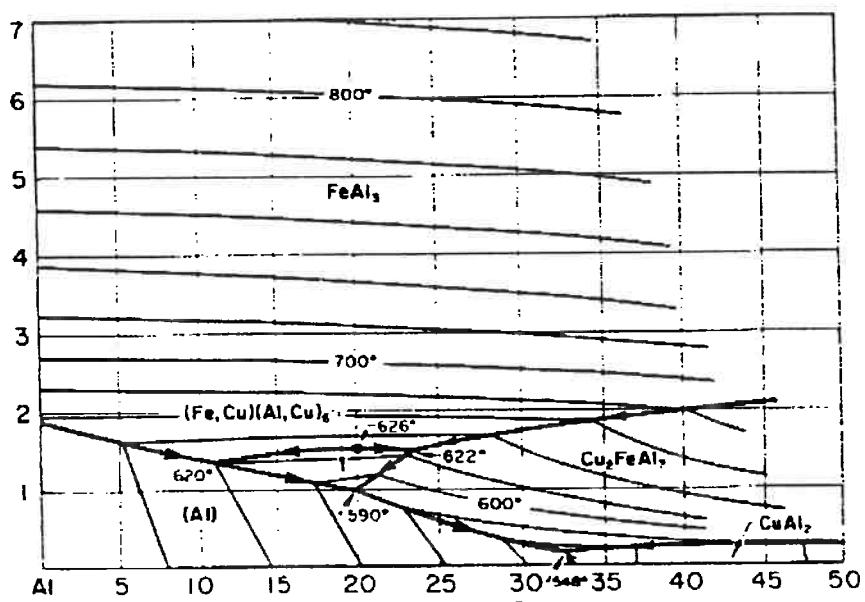


Figura 4 – Projeção da superfície *liquidus* do sistema Al-Cu-Fe.⁽²¹⁾

1.8.4 A influência do manganês nas fases intermediárias

O Mn é o elemento de adição mais utilizado para modificar o surgimento de fases intermediárias nas ligas de alumínio de fundição. Usualmente o manganês é adicionado na proporção Fe:Mn de 2:1 para converter as fases ricas em ferro, com morfologia acicular (fase β), para forma escrita chinesa (fase α). O efeito positivo sobre a modificação da fase rica em ferro, para aumentar a resistência a propagação de trincas, é contra balanceado pelo aumento da fragilidade e volume da fase.^(10,11,23)

A adição de Mn transforma a fase b (Al_5FeSi), que tem morfologia de lamelas, para a fase $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ que tem morfologia escrita chinesa e formas irregulares.

1.9 Remoção de ferro e processo de filtragem

No processo de filtragem para remoção de ferro é feita a adição de manganês, que forma com o alumínio fase do $MnAl_6$ que dissolve o ferro na forma de solução sólida do tipo $(Fe,Mn)Al_6$. Esta fase é transformada na fase $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ na reação peritética. Além disso, a adição de manganês nas ligas do sistema Al-Fe-Si desloca o campo de estabilidade das fases intermediárias ricas em ferro para baixo.⁽²⁸⁾

Segundo Flores et al.⁽²⁹⁾ a nucleação e crescimento da fase $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ é controlada por difusão com tamanho médio e fração aumentando com o tempo de espera. Uma vez que esta fase nucleia e começa a crescer, ela tende a sedimentar, formando em depósito rico em ferro no fundo cadinho.

É difícil evitar a formação de inclusões não metálicas durante a fusão, refino e solidificação das ligas de alumínio. Portanto, a etapa de filtragem está crescendo nas indústrias do setor.

As ligas de alumínio contêm impurezas que são prejudiciais às suas propriedades físicas, mecânicas, elétricas e estéticas dos produtos finais.

O processo de filtragem consiste na passagem do alumínio fundido através de um meio poroso (filtro), no qual as inclusões ficam retidas no filtro. O material do filtro deve ser resistente ao choque térmico, à corrosão e ser refratário, a fim de que não seja deteriorado pelo metal líquido. Por esse motivo, a maioria dos filtros são fabricados em material cerâmico.

Ao longo do processo de filtragem, a estrutura interna do filtro muda como resultado do contínuo acúmulo de partículas retidas. Como consequência, a porosidade do filtro, a área superficial específica, e a espessura da teia do filtro decrescerão com o tempo.

Os componentes importantes no processo de filtragem são: as inclusões, o banho metálico e o filtro. As inclusões são caracterizadas pelo seu tamanho, distribuição, composição, densidade e morfologia. As características do banho metálico dependem da composição da liga metálica, da viscosidade e da densidade.⁽¹⁾

O filtro é caracterizado pelas suas dimensões: tamanho da estrutura unitária, sua distribuição e arranjo no filtro, e por sua porosidade. As forças das três interfaces (tensões interfaciais) entre banho/filtro, banho/inclusões e inclusões/filtro são importantes durante o processo de filtragem. A fase gasosa ou vácuo formado entre o filtro e a inclusão podem influenciar no processo.⁽¹⁾

A diferença de pressão (pressão metalostática) através do filtro depende das propriedades do filtro e do fluido. Com o decorrer da filtragem a diferença de pressão passa a depender também das propriedades das partículas retidas.

Quando as partículas se depositam sobre o filtro é dito que há filtragem por aglutinação (para partículas com tamanho próximo ao dos poros do filtro). Ainda que as partículas sejam uma ou duas vezes menores que o tamanho dos poros, a seção do filtro diminui gradualmente com o decorrer do processo, de modo que o mecanismo se pareça com filtragem por aglutinação. Se as inclusões são depositadas dentro do filtro ocorre filtragem por profundidade.⁽¹⁾

A capacidade do filtro é definida pela quantidade de partículas depositadas (usualmente expressa em gramas ou quilogramas) que o filtro é capaz de acumular antes de alcançar uma certa diferença de pressão (menor que a pressão metalostática). A capacidade de filtragem depende do tipo e tamanho das partículas a serem filtradas.⁽¹⁾

Trabalhos experimentais têm sido desenvolvidos para medir a eficiência de filtragem e o comportamento característico de filtragem. O tamanho e concentração de inclusões relativamente grandes desenvolvem rapidamente a filtragem por aglutinação e podem levar à obstrução do filtro. A filtragem por profundidade, por outro lado, é importante no aprisionamento de pequenas inclusões que passam na superfície de entrada do filtro. Este modo de captura de partícula é influenciado pela velocidade de fluxo metal líquido, pela molhabilidade, tamanho, densidade das partículas e parâmetros estruturais do filtro, como, por exemplo, espessura do filtro e tamanho das células. Os dois princípios de filtragem são amplamente utilizados na indústria de alumínio para remoção de inclusões. Como exemplo comercial de filtros que fazem uso do princípio de aglutinação, tem-se os filtros de espuma cerâmica, que foram utilizados nos experimentos deste trabalho.⁽³⁰⁾

1.9.1 Os problemas causados pelas impurezas no processo de fundição de peças

As fases intermetálicas formadas pela presença de ferro podem atacar quimicamente as matrizes (particularmente na região dos canais e junto aos ataques devido a maior temperatura de trabalho), e provocar colamento ou soldagem das peças fundidas à matriz, além de provocar nas peças riscos e irregularidades. As matrizes ainda podem ser arranhadas pelas partículas de Fe sólido, que ainda podem formar partículas grosseiras no metal que na usinagem trincam ou lascam as ferramentas de corte.^(1.13)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados 12 ensaios experimentais, utilizando a liga de alumínio AA380, de ampla utilização industrial.

Tabela 5 –Composição nominal da liga A380.⁽¹⁹⁾

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn
A380	8,50	1,00	3,50	0,50	0,10	0,50	3,00	0,35

Na Tabela 5 é apresentada a composição nominal da liga estudada. Todas as composições mostradas neste estudo estão em porcentagem de peso.

O processo de refino baseia-se na adição de teores crescentes de Mn para a formação de fases intermediárias contendo Fe, e diminuição da temperatura de fusão, e ainda, filtragem visando reter as fases intermediárias formadas e a consequente diminuição do teor de Fe na liga.

A seqüência de operações realizadas na liga foi a seguinte:

- Ensaios de fusão e filtragem;
- Preparação de amostras para análises químicas e;
- Metalografia;

2.1 Fusão e filtragem

Os lingotes preparados foram feitos a partir de peças automotivas (eixo de direção) cedidas para estudo, consideradas refugo por apresentarem excesso de rechuve em alguns pontos.

Foram fundidos três lingotes, classificados como lingote A, B e C. Cada lingote foi cortado em “bolachas” de aproximadamente 600 g.

O manganês e o ferro foram pesados variando a quantidade a ser adicionada em cada ensaio. O manganês eletrolítico foi moído para ser adicionado, e o ferro, era ferro fundido, e foi utilizado na forma de cavaco moído, para aumentar a superfície de contato com o alumínio líquido.

O manganês e o ferro, antes de serem adicionados ao metal líquido, permaneciam por noventa minutos dentro da estufa, à temperatura de 100°C, para a remoção da umidade, evitando respingos na hora de serem adicionados ao metal líquido.

Os filtros utilizados eram do tipo espuma cerâmica, fornecidos pela CESBRA (Companhia Estanífera do Brasil), denominados FILCAST AL. Estes filtros são produzidos com alumina (material refratário), “colada” quimicamente com fosfato de alumínio AlPO₄. O nome utilizado para este filtro é Phosphate Bonded Alumina (PBA).

Este filtro é comercializado pelo número de poros por polegada (holes per square inch – ppi), ou seja, número de poros por polegada quadrada. Foram utilizados filtros de 30 ppi.

Foram recebidos na forma de placas de 435,2 por 435,2 mm, com 51,2 mm de espessura, e foram cortados na forma de cilindros cônicos para encaixar nos cadinhos utilizados, tomando cuidado com as irregularidades nas laterais e no nivelamento, para o

alumínio líquido não vazaria sem ser filtrado. Para uma eficiente vedação, foi utilizado o pó gerado durante o corte dos filtros. Os filtros eram encaixados a uma profundidade de 8 mm da extremidade superior do cadinho, para que a coluna de metal líquido sobre o filtro gere uma pressão sobre o mesmo e facilite a filtragem. Estes cadinhos eram de grafite de 150 mm de diâmetro 200 mm de altura e capacidade de 3,0 Kg.

O conjunto cadinho e filtro era montado e aquecido no forno até a temperatura de 630°C, temperatura igual à temperatura de vazamento do metal líquido. O objetivo era evitar que o calor do metal líquido fosse extraído por condução pelo filtro, e solidificasse dentro do filtro. Dentro desse forno era utilizado um termopar tipo K para melhor acompanhamento da temperatura.

As bolachas de alumínio eram aquecidas dentro dos cadinhos até a temperatura de 720°C, para serem fundidas, e então eram adicionados o manganês e o ferro de acordo com o ensaio. Dentro do cadinho com o metal, havia um termopar mergulhado no metal para melhor acompanhamento da temperatura.

Após um intervalo de 15 minutos, a temperatura era abaixada até 630°C.

Após estabilizada a temperatura, era coletada uma amostra com uma colher de aço inoxidável em uma pequena lingoteira e então o metal era vazado.

Após o cadinho com o metal filtrado já haver esfriado, o resíduo que sedimentou foi raspado das paredes e principalmente do fundo cadinho para análise química, tomando cuidado para não haver contaminação da grafita do cadinho e alterar os resultados.

A seguir está a Tabela 6 referente aos ensaios (corridas) realizados:

Tabela 6 – Informações sobre os experimentos realizados

Corrida	Peso (g)	Teor de Fe (%)	Adição de Fe (g)	Teor de Mn (%)	Adição de Mn (g)
1	578,50	1,0000	0,0000	0,5032	2,9108
2	545,10	1,0000	0,0000	1,0040	5,4730
3	610,34	1,0000	0,0000	1,5090	9,2102
4	606,73	1,4286	2,6002	0,5053	3,0661
5	643,23	1,4927	3,1691	1,0037	6,4564
6	547,24	1,5126	2,8053	1,5551	8,5100
7	662,40	2,0024	6,6397	0,5124	3,3945
8	612,31	2,0184	6,2361	1,0124	6,1990
9	640,90	2,0	6,344	1,5	9,717
10	643,66	2,0	6,410	2,0	12,975
11	523,24	2,0	2,609	1,5	5,296
12	513,85	2,0	2,693	2,0	7,691

2.2 Preparação das amostras para a análise química

Para todos os experimentos foram analisados os teores de Fe, Mn e Cu antes e depois da filtragem do alumínio líquido utilizando as técnicas de Absorção Atômica e Espectometria de Emissão com ICP.

O procedimento de amostragem para análise dos teores antes da filtragem consistiu-se em retirar o metal líquido com uma colher de aço inoxidável. O metal foi vertido em uma coquilha. Cada amostra pesava de 20 a 25g. Após a solidificação do metal

na coquilha cada amostra foi retirada e usinada. Os cavacos foram recolhidos para fazer a análise química.

O procedimento da amostragem para a análise dos teores do material filtrado e sedimentado no fundo do cadiño consistiu em retirar cavacos diretamente do material solidificado. Os cavacos gerados foram recolhidos para se fazer as análises químicas.

O procedimento para preparação das amostras das ligas para a análise química dos teores antes da filtração e do material filtrado, os quais foram analisados pela técnica de Absorção Atômica, foi realizado da seguinte forma:

- Recolheram-se aproximadamente 2 g de cavaco de alumínio;
- Pesaram-se 0,25g de cavaco proveniente de cada amostra em uma balança analítica;
- Lixiviação dos cavacos em becker de 100 ml usando-se 20 ml de ácido clorídrico PA e 10 ml de ácido nítrico PA, seguido de aquecimento a 100°C dentro de uma capela até a evaporação completa do líquido;
- Após o resfriamento, adicionaram-se 25 ml de ácido clorídrico e novamente aqueceu-se a 100°C até total evaporação do líquido do material;
- Novamente após o resfriamento adicionaram-se 10 ml de ácido nítrico para solubilizar o resíduo, aquecendo a 100°C durante 20 minutos;
- Finalmente, após o resfriamento, transferiu-se o resíduo solubilizado para um balão volumétrico de 100 ml e completou-se com água destilada para a homogeneização.

O procedimento para preparação das amostras das ligas para a análise química dos teores do material sedimentado no fundo do cadiinho, o qual foi analisado pela técnica de Espectrometria de Emissão com ICP, foi realizado da seguinte forma:

- Adicionar 5 ml de ácido nítrico P.A. em 0,2g de cavaco do material
- Retirar 90 ml da amostra e transferir para um becker de 250 ml.
- Agitar a amostra energeticamente para uma perfeita homogeneização.
- Evaporar até o volume cerca de 80 ml com auxílio de pérolas de vidro.
- Esfriar até temperatura ambiente.
- Transferir a solução para um balão volumétrico de 100 ml.
- Avolumar com água deionizada e homogeneizar. (Na prova do branco se utiliza água deionizada como meio)

2.3 Análise metalográfica

Após a fundição e a filtragem, foram tiradas amostras dos seguintes materiais para análise metalográfica:

- Material filtrado
- Material antes da filtragem
- Material sedimentado no fundo do cadiinho e na superfície na 11º e 12º corridas

As amostras tiveram uma das superfícies lixada e polida, durante a preparação metalográfica. O ataque metalográfico foi feito com solução de ácido sulfúrico diluído em água destilada na proporção de 20% de H₂SO₄ em volume. O corpo de prova foi imerso

durante 40 segundos na solução aquecida à 80°C. Este ataque foi utilizado para evidenciar as fases ricas em ferro (fases intermetálicas formadas).

As amostras preparadas foram observadas no microscópio óptico. O método de identificação foi o de comparação das morfologias encontradas com as de outros autores.^(1,21,22,23)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui serão discutidos e mostrados os resultados obtidos decorrentes do processo de filtragem para a liga comercial A380.

Na Tabela 7, estão os resultados das análises químicas realizadas para cada experimento. Foram calculadas as eficiências de cada corrida realizada. Da 1º corrida até a 10º, foram utilizados os filtros cerâmicos porosos. Mas na 11º e 12º corridas, os filtros não foram utilizados e eles simularam a 9º e 10º corridas, simultaneamente. Foi analisado o material da superfície e da base dos lingotes formados.

Os teores de ferro e manganês adicionados são crescentes da 1º para 10º corrida.

Tabela 7 – Resultados obtidos e eficiência de cada experimento.

Nº corrida	%Fe antes de filtrar	%Fe filtrado	%Mn antes de filtrar	%Mn filtrado	%Fe fundo do cadiinho	%Mn fundo do cadiinho	%Cu fundo do cadiinho	Eficiência (%)
1º 630°C	0,960	0,694	0,377	0,253	-	-	-	27,7
1º 660°C	0,917	0,694	0,392	0,253	-	-	-	24,3
1º 680°C	0,960	0,694	0,298	0,253	-	-	-	27,7
2º	0,857	0,600	0,466	0,257	-	-	-	29,9
3º	0,834	0,630	0,419	0,271	1,840	11,60	2,24	24,4
4º	1,130	1,036	0,290	0,248				8,30
5º	1,058	0,791	0,791	1,058	4,000	7,760	2,400	25,2
6º	1,074	0,940	0,284	0,940				12,5
7º	1,178	1,037	0,273	0,199	5,760	2,320	2,640	16,6
8º	1,154	0,936	0,264	0,194	8,000	7,920	2,160	16,6
9º	1,123	0,854	0,345	0,278	5,280	3,680	2,720	25,8
10º	0,994	0,737	0,345	0,278	5,600	4,160	2,520	26,9
11º	1,040	-	0,150	-	3,760	4,880	2,560	27,7
12º	1,120	-	0,150	-	3,440	6,800	2,560	32,6

As análises do teor de manganês constataram a redução do seu teor. Esta redução é devida ao fato de que a fase $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ contém manganês na mesma proporção de ferro.

3.1 Análise microestrutural

A análise microestrutural teve por objetivo identificar as fases intermediárias formadas após a redução do teor de ferro na liga.

Nos ensaios foi observada a redução da concentração de ferro no material filtrado, e o aumento da concentração de ferro no material sedimentado no fundo dos cadinhos.

3.1.1 Material filtrado

A morfologia do material filtrado apresenta as estruturas intermediárias formada pela adição de manganês e consequente redução do teor de ferro na liga. As morfologias obtidas são semelhantes às encontradas na literatura em estudos feitos anteriormente.^(1,21,22,23)

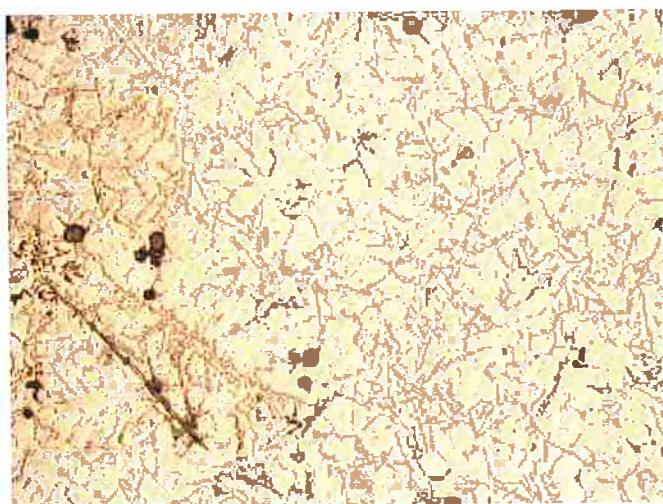


Figura 5 – Estrutura obtida na 3º corrida (aumento de 10x), que apresenta fases intermediárias com diferentes morfologias.



Figura 6 – Metalografia da 1º corrida (aumento de 10x)

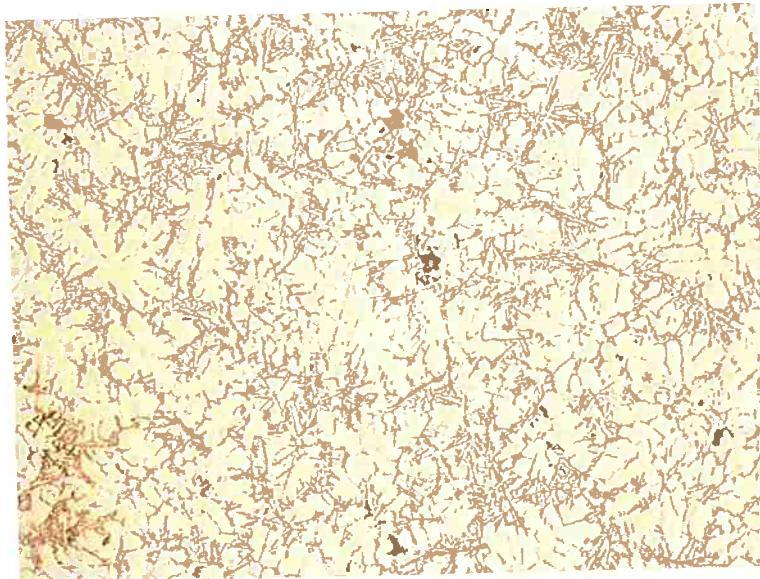


Figura 7 – 8º corrida. Aumento de 10x. Devido a maior adição de Mn realizada, é possível observar mais fases intermediárias formadas.

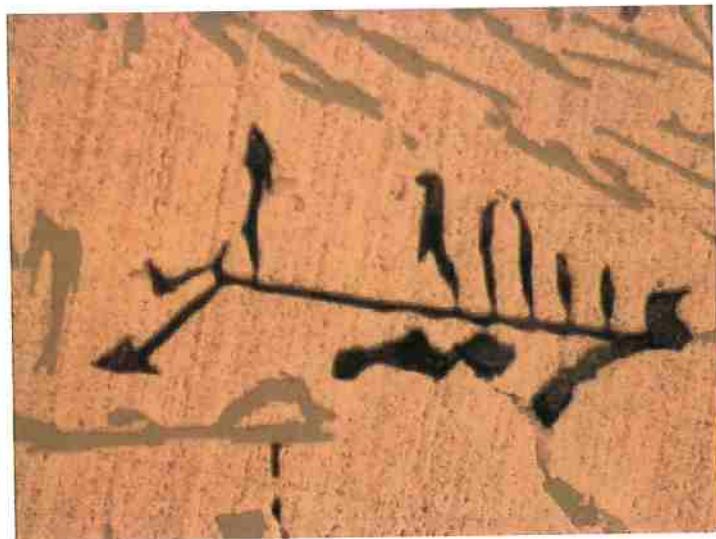


Figura 8 – Típica estrutura intermetálica, formada na 7º corrida

4. APÊNDICE

Aqui estão algumas fotos obtidas durante o processo de filtragem.



Figura 9 – Vista superior do material retido no filtro, e presença de inclusões na superfície.



Figura 10 – Material utilizado durante a fusão do alumínio líquido.



Figura 11 – Esquema obtido após filtragem, material retido, filtro e material filtrado.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados deste estudo, foram obtidas as seguintes conclusões:

- O processo de filtragem de alumínio para diminuir o teor de ferro é possível desde que sejam feitas em ligas de Al-Si, com adições de Mn e resfriamento da temperatura até o campo de cristalização das fases primárias contendo ferro.
- Quanto maior a concentração de silício inicial maior será a eficiência do processo.
- Há um teor ideal de adição de Mn, que depende diretamente do teor de ferro da liga
- A remoção de ferro ocorre em duas etapas: primeiro a sedimentação e em seguida a filtragem. Na filtragem o principal mecanismo observado foi a aglutinação, pois a fase $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ precipitada possui dimensões próximas à porosidade do filtro.

6. LISTA DE REFERÊNCIAS

¹ CLOSSET, B.; GRUZLESKI, J. E. The treatment of liquid aluminum-silicon Alloys. Des Plaines, Illinois. USA: American Foundrymen's Society, Inc.1990. p.1-44. P75-94. P.185-202.

² MYERS, T. A. Ternary Phase Diagrams. Engineering Materials Software Series. University of Manchester/UMIST. London.

³ LANCKER, M. van. Metallurgy of Aluminum Alloys. Chapman and Hall Ltd. London. 1967. p. 1 – 17.

⁴ HATCH.,D. E.; JORSTAD, J. L. R. Aluminum structural casting in US-automobiles. Aluminum. 1978. V.54. p.695-697.

⁵ KURIHARA, Y. The role of aluminum in automotive weight reduction. Part II. JOM. Feb.1994. p.33-39.

⁶ HORN, K. V. Aluminum. Ohio. American Society for Metals. 1967. V. I.p.1-77. P.163-205.

⁷ BARLOCK, J. G.; MONDOLFO, L. F. Structure of some aluminum-iron-magnesium-manganese-silicon alloys, Z. Metallkde. 1975 V.66. p.605-611.

⁸ BARLOCK, J. G.; MONDOLFO, L. F. Aluminum alloys: Structure and Properties. Butter Worths. 1976. p.491-492, 497-507, 513-515, 529-530, 534-536, 566-572661-663.

⁹ BIROL, Y.; SERTCELIK, F. Intermetallic particles in a Strip-cast Al-Fe-Mn-Si alloy. Z. Metallkde. 1999. V.90. p.329-334.

¹⁰ CORBY, R. N. BLACK, P. J. The structure of α -(AlFeSi) by anomalous methods. Acta Cryst. B33.1977. p.3468-3475.

¹¹ DONS, A. L. Superstructures in α -Al(Mn,Fe,Cr)Si. Z. Metallkde. V.76. 1985. P.151-153.

¹² SAMUEL, F. H.; QUELLET, P.; SAMUEL, A. M.; DOTY, H. W. Effect of Mg and Sr additions on the formation of intermetallics in Al-6Wt Pct Si-3.5Wt Pct Cu-(0.45) to (0.8) Wt Fe 319-Type alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. Dec. 1998. V.29A. p.2871-2884.

¹³ FUOCO, R. Efeito dos tratamentos de modificação sobre a formação de microporosidade em liga de alumínio A356. São Paulo. 1996. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica-USP.

¹⁴ EKLUND, J. E.; VUORINEN, J. J. On the effects of impurities on the solidification and mechanical behavior of recycled secondary aluminum and aluminum alloys. In: WORLD FOUNDRY CONGRESS. 56. São Paulo. ABIFA. 1992. 56th World Foundry Congress. São Paulo. Sep. 1992.

¹⁵ SIGWORTH, G. K.; SHIVKUMAR, S.; APELIAN, D. The influence of molten metal processing on mechanical properties of cast Al-Si-Mg alloys. AFS Transactions. V.97. 1989. P.811-824.

¹⁶ NAGY, S. at al. Mossbauer investigation of iron in aluminum – II. Al-Fe-Si samples. Acta Metall. V.35. N.3. 1987. P.741-746.

¹⁷ SIMENSEN, C. J.; VELLASAMY, R. Determination of phase present in cast material of an Al-0,2 Wt.%Si alloy. Z. Metallkde. V.68. 1977. P.428-431.

¹⁸ ASM SPECIALTY HANDBOOK –Aluminum and aluminum alloys. Ohio. Warrendale.

¹⁹ ASM SPECIALTY HANDBOOK 9th. ed. ASM V.2. Properties and selection non-ferrous alloys and pure metals. 1979. P.140-179.

²⁰ LIU, P.; THORVALDSSON; DUNLOP, G. L. Formation of intermetallic compounds of during solidification of dilute Al-Fe-Si alloys. Materials Science and Technology. V.2. Oct.1986. p.1009-1018.

²¹ MONDOLFO, L. F. Metallography of aluminum alloys. London. Casa pub. 1943.

²² MUNSON, D. A clarification of the phases occurring in aluminum-rich aluminum-iron-silicon alloys, with particular reference to the ternary phase a-AlFeSi. Journal of the institute of metals. V.95. 1967. P.217-219.

²³ CLOSSET, B.; GRUZLESKI, E. Structure and properties of hypoeutetic Al-Si-Mn modified with pure strontium. Metallurgical Transactions A. V.13A. Jun.1982. p.945-951.

²⁴ GUSTAFSSON, G.; THORVALDSSON, T.; DUNLOP, G. L. The influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al-Si-Mg alloys. Metallurgical Transactions A. V.17A. Jan.1986. p.45-52.

²⁵ BACKERUD, L.; CHAI, G.; TAMMINEN, J. Solidification characteristics of aluminum alloys. ASF/SKANALUMINIUM. V.1&2.

²⁶ KAMAT, R. G.; Ng-YLIM, J.; SAIMOTO, S. Morphology and precipitation of a-Al(Fe,Mn)Si phase in hot rolled AA3004. Z. Metallkunde. V.86. 1995. P.49.

²⁷ ASM METALS HANDBOOK 8th. Ed. V.7. Atlas of microstructures of industrial alloys. 1972. P.241-272.

²⁸ GRIGORENKO, V. M.; POPOV, V. A.; OFENGENDEN, A. A. Refining of aluminium alloys of the Al-Si-Cu system from iron. Sovjet non-ferrous metals research. 1977. P.281-282.

²⁹ FLORES, A. at al. Kinetic mechanisms of iron segregation from Al-Si-Cu-Fe-Mn melts. Light Metals. 1992. P.845-850.