

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

LUCIMAR VENÂNCIO AMARAL

**AVALIAÇÃO DA DESCONTINUIDADE NA SOLIDIFICAÇÃO DE ALUMÍNIO**  
**FUNDIDO NA FABRICAÇÃO DE UM CABEÇOTE DE MOTOR**

BELO HORIZONTE

2012

LUCIMAR VENÂNCIO AMARAL

**AVALIAÇÃO DA DESCONTINUIDADE NA SOLIDIFICAÇÃO DE ALUMÍNIO  
FUNDIDO NA FABRICAÇÃO DE UM CABEÇOTE DE MOTOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Ivan José de Santana

Coorientadora: Elaine C. S. Corrêa

BELO HORIZONTE

2012

LUCIMAR VENÂNCIO AMARAL

**AVALIAÇÃO DA DESCONTINUIDADE NA SOLIDIFICAÇÃO DE ALUMÍNIO  
FUNDIDO NA FABRICAÇÃO DE UM CABEÇOTE DE MOTOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em 12/11/2012

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ivan José de Santana

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

---

Prof. Ms. Wanderlei Ferreira de Freitas

## DEDICATÓRIA

À meus pais, exemplos vivos de perseverança.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e à minha família, que me encorajam todos os dias. À equipe da Nemark Alumínio do Brasil, que não mediu esforços para o desenvolvimento deste trabalho. Aos mestres e funcionários do CEFET-MG, que me engrandecem a cada dia através de seus conhecimentos.

## RESUMO

O processo de fabricação de peças através do processo de fundição é importante por ser um dos processos mais antigos e versáteis, através deste pode-se produzir peças de diversos tamanhos e formatos de maneira econômica. O objetivo deste trabalho é caracterizar uma descontinuidade encontrada em cabeçotes fabricados em liga de alumínio através de processo de fundição por gravidade. Para a caracterização foram utilizados resultados das análises químicas e metalográficas, análises de imagens obtidas via microscopia eletrônica, análises das propriedades da liga utilizada e análises de temperatura dos ferramentais e da liga utilizada na fabricação do cabeçote. Através destes resultados observou-se que a temperatura dos moldes utilizados na fundição é a principal causa do aparecimento da descontinuidade.

Palavras-chave: Fundição. Cabeçotes. Liga de alumínio.

## **ABSTRACT**

The process of making parts by foundry is important because it is one of the most primitive, and because it is one of the most versatile, because it can produce different shapes and sizes of parts. The objective of this study is characterizing a discontinuity found at heads manufactured using aluminum alloy and gravity foundry. Were used for the characterization the results of chemical and metallographic analysis, analysis of images obtained by electron microscopy, analysis of properties of alloy and analysis of temperature of toolings and aluminum alloy utilized for foundry of head. Through these results, it was observed that the temperature of the molds utilized at foundry is the principal cause of the appearance of discontinuities.

Key words: Foundry. Heads. Aluminum alloy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Coquilha em aço H13 utilizada como molde na fundição de cabeçotes em ligas de alumínio. Em detalhe, câmaras de combustão, laterais de escape e admissão e blocos de fundo .....	20
Figura 3.2	Molde em aço H13 utilizado em processo de fundição sob pressão .....	21
Figura 3.3	Macho em areia utilizado na obtenção de cavidades em peças fundidas .....	21
Figura 3.4	Processo de fundição em casca, também denominado <i>shell mold</i> .....	22
Figura 3.5	Esquema do processo de fundição utilizando moldagem em cera perdida .....	24
Figura 3.6	Molde em material cerâmico utilizado para obtenção de peças que contem muitos detalhes .....	25
Figura 3.7	Vista lateral em corte de uma matriz de injetora utilizada no processo de fundição sob pressão .....	26
Figura 3.8	Corte de máquina injetora utilizada para processos de injeção sob pressão via câmara fria e câmara quente .....	27
Figura 3.9	Peça fundida não rebarbada obtida via processo sob pressão .....	28
Figura 3.10	Esquema de vazamento em coquilha .....	29
Figura 3.11	Esquema mostrando sentido de solidificação da peça, além do alimentador, denominado massalote .....	30
Figura 3.12	Corte de uma peça fundida por gravidade mostrando a presença de vazios, denominados rechupes .....	32
Figura 3.13	Esquema de formação de junta fria em um fundido .....	33
Figura 3.14	Representação esquemática da liga líquida na parte inferior e o óxido de seu metal, menos denso, na parte superior .....	35
Figura 3.15	Esquema de desgaseificação da liga utilizada através de sopro de gás N <sub>2</sub> .....	36



Figura 3.16	Microestrutura típica de ligas eutéticas de alumínio-silício .....	37
Figura 3.17	Diagrama de fases das ligas de alumínio-silício .....	39
Figura 3.18	Formação típica de estrutura dendrítica no resfriamento .....	40
Figura 4.1	Cabeçote de motor de combustão interna – Vista das câmaras de combustão .....	46
Figura 4.2	Cabeçote de motor de combustão interna – Vista dos vãos de óleo .....	47
Figura 4.3	Cabeçote de motor de combustão interna – Vista da lateral de admissão .....	47
Figura 4.4	Cabeçote de motor de combustão interna – Vista da lateral de escape .....	47
Figura 4.5	Amostra coletada antes de vazar os cabeçotes para realização de análises químicas e metalográficas .....	48
Figura 4.6	Espectrômetro de absorção atômica de chama .....	49
Figura 4.7	Aparelho de raios-x utilizado na detecção de descontinuidades internas à peça .....	50
Figura 4.8	Serra de fita utilizada para o corte das peças em análise .....	51
Figura 4.9	Local de corte longitudinal .....	51
Figura 4.10	Locais de corte transversais, indicando também o local da descontinuidade ..	52
Figura 4.11	Politriz utilizada no lixamentos dos corpos de prova .....	52
Figura 4.12	Microscópio utilizado para visualização da microestrutura do material .....	54
Figura 4.13	Exemplo de medição de espaçamento interdendrítico utilizando-se o software Analysis .....	55

Figura 4.14	Microdurômetro Shimadzu utilizado na medição de microdureza .....	56
Figura 4.15	Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu .....	57
Figura 4.16	Termômetro digital infravermelho MINIPA MT-395 .....	58
Figura 4.17	Esquema do pirômetro de imersão ITALTERM FORNERO KAL utilizado para medição de temperatura da liga .....	59
Figura 4.18	Balança Toledo PL 403 .....	60
Figura 4.19	Representação da proveta para vazamento em aço H13 .....	61
Figura 4.20	Molde construído em madeira, preenchido por areia misturada em resina .....	62
Figura 5.1	Imagem da região da descontinuidade obtida via ensaio de raios-x .....	64
Figura 5.2	Resultado da medição de espaçamento interdendrítico de peça apresentando descontinuidade .....	64
Figura 5.3	Resultado da visualização da microestrutura e da descontinuidade em microscópio ótico .....	65
Figura 5.4	Visualização de microestrutura da liga utilizada no processo de fundição .....	66
Figura 5.5	Microestrutura mostrando matriz em alumínio com estrutura dendrítica em silício .....	67
Figura 5.6	Análise química quantitativa mostrando os principais elementos constituintes da região analisada .....	68
Figura 5.7	Microestrutura mostrando matriz em alumínio com filme caracterizado conforme análise química .....	69
Figura 5.8	Análise química quantitativa mostrando os principais elementos constituintes da região analisada, destacando-se a presença de Si e O na região do filme, o que caracteriza óxido de silício .....	69
Figura 5.9	Microestrutura mostrando descontinuidade presente, na forma de um vazio, cercada por matriz em alumínio com dendritas em silício .....	70

Figura 5.10	Análise química quantitativa mostrando os principais elementos constituintes na região analisada .....	70
Figura 5.11	Amostras obtidas após vazamento e resfriamento .....	74
Figura 5.12	Amostra obtida após vazamento em proveta embutida em molde de areia e resfriada ao ar .....	74
Figura 5.13	Micrografia referente à primeira amostra vazada em proveta embutida em molde de areia e resfriada ao ar .....	75
Figura 5.14	Amostra obtida após vazamento em proveta embutida em molde de areia e resfriada em água corrente .....	75
Figura 5.15	Micrografia referente à segunda amostra vazada em proveta embutida em molde de areia e resfriada em água corrente .....	76
Figura 5.16	Amostra obtida após vazamento em proveta e resfriada ao ar .....	76
Figura 5.17	Micrografia referente à segunda amostra vazada em proveta e resfriada ao ar .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificação da composição química da liga utilizada para fabricação do cabeçote .....	48
Tabela 2	Composição química encontrada em amostra do cabeçote fabricado contendo a descontinuidade .....	63
Tabela 3	Valores de dureza encontrados em 10 medições .....	66
Tabela 4	Valores das temperaturas encontradas no molde .....	71
Tabela 5	Valores das densidades encontradas nas amostras analisadas .....	72
Tabela 6	Valores das temperaturas encontradas para o banho .....	73

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	18
2.1 Objetivos gerais .....	18
2.2 Objetivos específicos .....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1. Classificações dos processos de fundição .....	19
3.1.1. Processos via moldes perdidos .....	22
3.1.2. Processos via moldes permanentes .....	25
3.2. Descontinuidades nos processos de fundição .....	30
3.3. O alumínio e suas ligas .....	34
3.3.1. Características e propriedades mecânicas .....	34
3.3.2. Ligas de alumínio nos processos de fundição .....	34
3.3.3. Tratamentos para as ligas de alumínio .....	35
3.3.4. Tipos de ligas de alumínio .....	38
3.3.5. Solidificação das ligas de alumínio .....	39
3.4. Motores automotivos .....	41
3.4.1. Características .....	41
3.4.2. Componentes do motor .....	41
3.4.3. Funcionamento do motor .....	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	46
4.1. Materiais .....	46

4.2. Procedimentos para caracterização do material e das descontinuidades .....	49
4.2.1. Análise química da região com descontinuidade .....	49
4.2.2. Raios-x .....	50
4.2.3. Metalografia .....	50
4.2.3.1. Medição do espaçamento dendrítico da microestrutura .....	54
4.2.4. Medição de microdureza .....	55
4.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	56
4.2.6. Medição das temperaturas dos moldes .....	57
4.2.7. Medição de temperatura da liga .....	59
4.2.8. Medição de densidade da liga .....	60
4.2.9. Testes de resfriamento de amostras .....	60
5. RESULTADOS .....	63
5.1. Análises químicas .....	63
5.2. Raios-x .....	63
5.3. Metalografia .....	64
5.4. Microdureza .....	66
5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	67
5.6. Medições de temperatura nos moldes .....	71
5.7. Medições de densidade da liga .....	72
5.8. Medições de temperatura da liga .....	73
5.9. Testes de resfriamento de amostras .....	73
6. CONCLUSÕES .....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

São muitos os processos de fabricação pelos quais os materiais metálicos podem ser submetidos para serem transformados em produtos como os componentes automotivos, por exemplo. Dentre estes, os processos de fundição destacam-se como um dos mais antigos processos de fabricação, com registros datados do quarto milênio antes de Cristo.

Os processos de fundição podem ser definidos como os processos de conformação de metais e ligas a partir do material líquido, vazado em moldes apropriados onde, ao solidificar-se, tomam a forma; resultando em produtos acabados, semi-acabados ou matéria prima para processamento mecânico.

Dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a fabricação de peças com grande variedade de formas e especificações de composição química. Pode-se aplicar um determinado processo de fundição para a obtenção de uma única peça ou milhares de peças. Obviamente, toda a diversidade observada nos processos de fundição não pode ser obtida com um único processo, mas sim escolhendo, dentre os diferentes processos disponíveis, o que melhor se adapta às exigências do projeto com custo aceitável e que possa atender aos prazos estipulados pelo cliente. O Processo de fundição evoluiu ao longo do tempo, e sua compreensão é de fundamental importância para o crescimento tecnológico atual. Seu aperfeiçoamento deve ocorrer de forma contínua tanto na fabricação de pequenas peças fundidas artesanalmente quanto nos processos mais avançados e totalmente automatizados.

Fatores como aumento de consumo e exigência de maior controle dimensional, demandaram novas tecnologias para a fabricação de peças fundidas. A produção de equipamentos bélicos durante a segunda guerra mundial impulsionou parte dessas demandas, exigindo essencialmente uma maior produtividade e, sobretudo uma melhor qualidade dos produtos.

Os processos de fundição, sempre muito difundidos nos países desenvolvidos, principalmente nos localizados na Europa e na Ásia, possibilitam hoje obter peças em vários formatos, com propriedades mecânicas mais uniformes e com cada vez menos descontinuidades, o que era muito trabalhoso há algumas décadas. No Brasil o processo foi introduzido tardiamente, por volta de 1935, e de forma artesanal, sobretudo na fabricação de utensílios domésticos.

Estes processos podem ser divididos em vários tipos, sendo os principais: (a) Fundição por gravidade, no qual a força responsável por impulsionar o metal para dentro do molde é a gravidade e (b) Fundição por alta pressão, onde a principal força de enchimento do molde é realizada por um pistão.

Nos processos de fundição, assim como nos outros processos de fabricação, é essencial a definição correta das variáveis do processo, caso contrário descontinuidades nas peças produzidas, tais como: Trincas, juntas frias, rechupes, poros, presença de óxidos, dentre outros, podem ser geradas. .

Dentre os componentes comumente fabricados via processo de fundição a partir de ligas de alumínio estão alguns dos componentes dos motores de combustão interna. Os motores de combustão interna são constituídos pelos principais componentes: Cárter, bloco e cabeçote.

O cárter envolve a parte inferior do motor e é responsável pelo armazenamento de óleo dos componentes do motor.

O bloco é composto por cilindros, normalmente 4, que alojam os pistões, responsáveis por movimentar, comprimir e exaurir os gases provenientes da combustão. Este componente fica acoplado logo acima do cárter e abaixo do cabeçote.

O cabeçote se encontra na parte superior do motor, e é onde estão alojadas as velas de ignição e as válvulas de admissão e escape. Neste trabalho investigou-se as possíveis causas de rechupes em cabeçotes de alumínio confeccionados para motores populares de 1.6 cilindradas. Estas descontinuidades ocorrem de maneira intermitente e podem provocar a comunicação entre os sistemas de refrigeração e ou lubrificação com o sistema de combustão no motor, inviabilizando a queima completa da mistura ar/combustível câmaras de combustão, gerando mal funcionamento do motor e necessidade de troca de componente.

A caracterização das descontinuidades e a verificação de suas possíveis causas se concretizaram por meio de (a) análise de todo o processo produtivo, fundição por gravidade em matriz aberta, da chegada da matéria prima até o produto final, (b) análise visual de diversas peças, (c) ensaios mecânicos, dureza, (d) análises químicas, de regiões com e sem defeito, (e) raios-x para detectar a região exata da descontinuidade, (f) análises metalográficas, microscopia óptica para detecção de microestrutura, medição do espaçamento interdendrítico e caracterização do perfil de solidificação.



Com base nos resultados, pode-se caracterizar o material dos cabeçotes, as descontinuidades e apontar suas possíveis causas. Espera-se que o trabalho sirva de subsídio para balizar possíveis melhorias no processo produtivo, diminuindo assim o índice de refugo de peças.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

- a) Compreender os processos de fundição, técnicas e materiais empregados na fabricação de peças em ligas de alumínio para a indústria automotiva.
- b) Investigar as discontinuidades que podem ser originadas no produto antes, durante, ou depois do processo de fundição.

### **2.2 Objetivos específicos**

- c) Realizar estudo de caso utilizando cabeçote em alumínio comercializado no mercado automotivo para caracterizar descontinuidade, rechupe, suas possíveis causas e gerar subsídios para balizar possíveis melhorias no processo produtivo e conseqüentemente do produto.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Classificações dos processos de fundição

Os processos de fundição podem ser classificados de diversas maneiras, de acordo com modo com que o metal líquido é vazado no molde (por gravidade, por baixa pressão, por alta pressão, pressão negativa, centrifugação, etc.) e ainda de acordo com o tipo de molde, que pode ser permanente ou perdido (FERREIRA, 2010).

Os moldes permanentes são aqueles nos quais se obtém várias peças, ou seja, podem-se vaziar inúmeras peças nos mesmos antes de se inutilizá-los (FERREIRA, 2010).

Já os moldes perdidos são aqueles nos quais se obtém apenas uma peça a partir do mesmo, ou seja, inutiliza-se o mesmo assim que se retira a primeira peça vazada no mesmo (FERREIRA, 2010).

Os processos via moldes perdidos mais utilizados são aqueles com moldação em areia e preenchimento do molde por gravidade (FERREIRA, 2010).

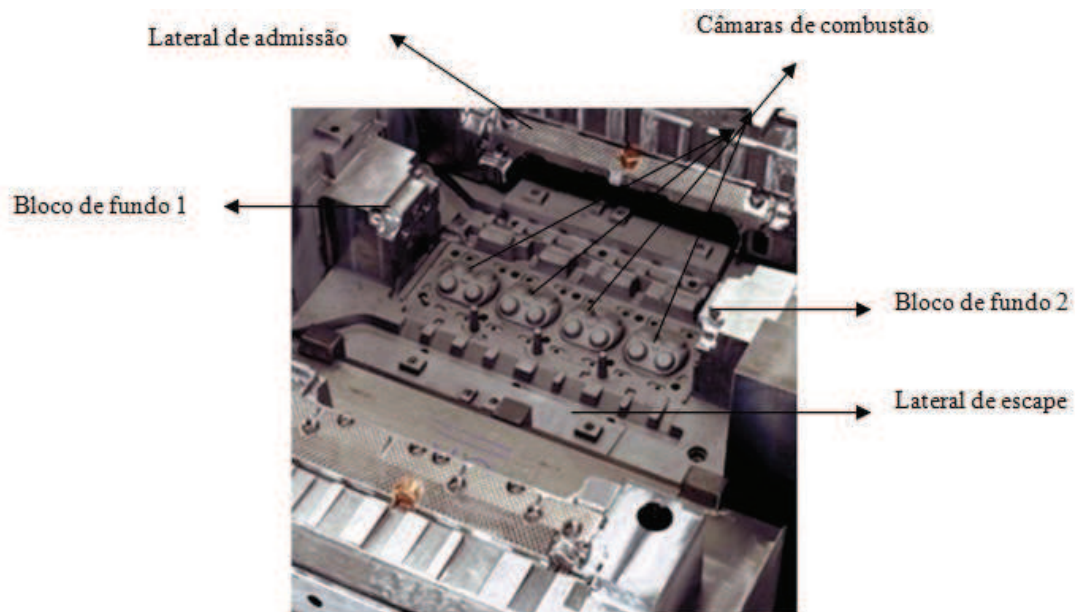
Já os processos que mais utilizam moldes permanentes são: Fundição sob baixa pressão, alta pressão, pressão negativa, centrifugação e até mesmo via gravidade (FERREIRA, 2010).

Os moldes são os responsáveis por definir as superfícies externas das peças a serem obtidas, no entanto, algumas peças por possuírem detalhes internos ou até mesmo externos podem requerer a utilização de machos (geralmente feitos em areia sintética), conforme representado na Figura 3.3, acoplados ao molde, para que o mesmo reproduza em mesma escala os detalhes da peça fundida. Portanto, o macho é um modelo negativo da superfície interna e/ou externa da peça, pois impede o vazamento de metal nos locais onde se deseja obter cavidades, sendo posicionado na cavidade do molde antes que ocorra o vazamento, de forma que a liga fundida irá escoar e solidificar entre a cavidade do molde e o macho (FERREIRA, 2010). Os machos são fabricados, geralmente, em areia que é combinada a uma resina e então compactada na forma desejada (BRADASCHIA, 1993).

Os moldes perdidos podem ser constituídos de inúmeros materiais, conforme será detalhado em cada processo, já os permanentes são constituídos em sua maioria em aço ou ferro fundido, pois estes materiais apresentam ponto de fusão superior a 1000°C. Apresentam uma superfície interna usinada para possibilitar a obtenção de melhor acabamento, e ainda, boa tolerância dimensional (FERREIRA, 2010).

Os moldes permanentes são comumente denominados “coquilhas” para o processo de vazamento por gravidade, e são constituídos por duas ou mais partes, que precisam ser encaixadas e perfeitamente fechadas antes do vazamento, de modo a evitar frestas que ocasionem vazamento do metal fundido (FERREIRA, 2010). Este tipo de molde é mostrado na Figura 3.1.

**Figura 3.1 - Coquilha em aço H13 utilizada como molde na fundição de cabeçotes em ligas de alumínio.  
Em detalhe, câmaras de combustão, laterais de escape e admissão e blocos de fundo**



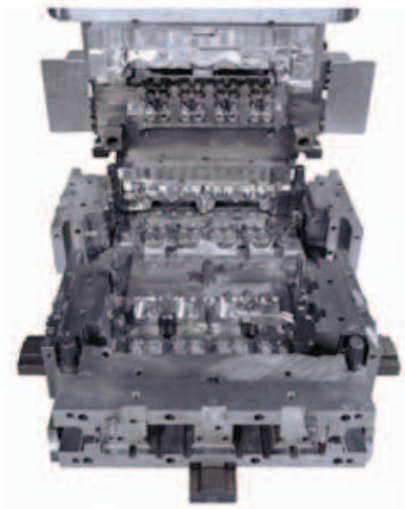
VETIMEC, 2011

Geralmente, antes do vazamento, as coquilhas são pré-aquecidas para evitar-se choque térmico entre metal fundido e molde frio, e um revestimento é pulverizado em sua cavidade para facilitar o escoamento do metal pelo sistema de enchimento, e ainda ajudar na remoção da peça do molde.

Dentre as vantagens na utilização de coquilhas, destacam-se bons acabamentos e controle dimensional das peças obtidas, e ainda solidificação mais rápida, resultando em estrutura de grãos mais fina, podendo adquirir melhores propriedades mecânicas do produto final.

Na Figura 3.2 é representado um molde permanente para o processo de fundição sob pressão.

**Figura 3.2 - Molde permanente em aço H13 utilizado em processo de fundição sob pressão**



VETIMEC, 2011

**Figura 3.3 - Macho em areia utilizado na obtenção de cavidades em peças fundidas**



MINERAÇÃO DUNAS, 2011

### 3.1.1 Processos via molde perdido

Dentre os processos que utilizam molde perdido, temos o processo de fundição em casca (*Shell molding*), onde o molde é uma casca fina feita de areia misturada a um material termo ligante. Neste processo, a superfície da cavidade do molde é mais lisa que a do molde convencional, o que faz com que o metal líquido tenha um fluxo regular durante seu vazamento, melhorando o acabamento da peça requerida. Porém, estes moldes apresentam custo elevado em relação aos processos que utilizam moldes convencionais, como as coquilhas em ferro fundido, por exemplo. Eles podem ser utilizadas no vazamento de inúmeras peças, e ainda são destinados a fundição de peças pequenas, pois são muito frágeis, e não resistem a altos volumes de fundido, além de serem descartados após o vazamento de uma única peça (FERREIRA, 2010). Estes processos e seus moldes característicos estão esquematizados na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Processo de fundição em casca, também denominado *shell mold*



CUSTOM PART NET, 2011

O próximo processo por molde perdido é a moldagem a vácuo, onde um molde de areia é compactado pela ação da pressão atmosférica. A vantagem deste tipo de molde, é a possibilidade de se reaproveitar a areia utilizada em quase toda sua totalidade, já que durante a produção do molde uma camada plástica é depositada na cavidade do mesmo e se funde imediatamente ao vazamento da liga, possibilitando mínimo contato direto desta última com a

areia utilizada. Este processo não utiliza areia úmida, e as discontinuidades de fundição causadas por este fato são minimizadas. Porém, é um processo de alto custo em relação aos processos de vazamento que utilizam moldes permanentes, pois funde apenas uma única peça por vez, sendo necessário um novo molde para cada peça a ser vazada. (FERREIRA, 2010).

Outro processo por moldes perdidos é a moldagem por poliestireno expandido. Neste processo, o molde é obtido pela socadura de areia em volta de um modelo de espuma de poliestireno que vaporiza a medida que o metal é vazado para dentro da cavidade do molde, permitindo o preenchimento da cavidade do mesmo. A vantagem deste processo, é que o preenchimento é mais homogêneo, já que não há contato brusco entre metal e a areia, além do que, esta última é seca devido à ausência de aglomerante não curado, e pode ser reutilizada (FERREIRA, 2010).

Dentre os processos via moldes perdidos, há também o denominado cera perdida, Figura 3.5. Neste, um modelo de cera é revestido com material refratário para produzir o molde, que será obtido pela posterior retirada da cera via aquecimento. É um processo que possibilita a geração de peças com excelentes tolerâncias dimensionais e detalhes intrincados (FERREIRA, 2010). O molde é produzido de forma que a cera é revestida por um material refratário, e é então aquecido de forma que a cera seja eliminada e o refratário se torne o material definitivo do molde. Quando o metal é vazado e solidificado, é simples a quebra do molde refratário para a retirada da peça. A vantagem deste processo é o alto controle de acabamento e dimensões.

Figura 3.5 - Esquema do processo de fundição utilizando moldagem em cera perdida

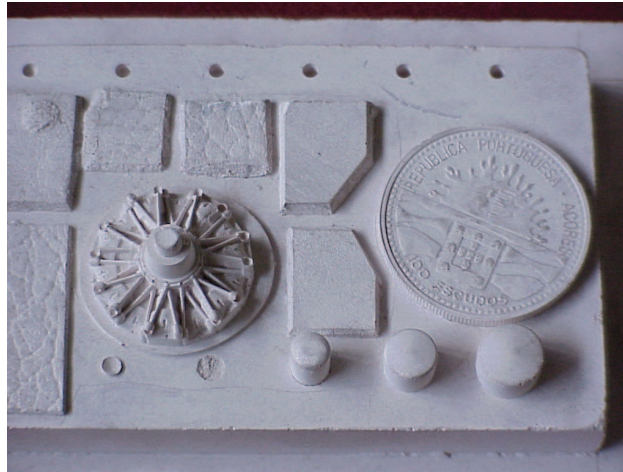


MORO *et al*, 2007

Por fim, há os moldes em gesso e cerâmica, moldes similares ao da fundição em areia, Figura 3.6, porém utilizando gesso misturado a alguns aditivos para aumento da resistência do molde. O gesso é misturado em areia e vazado sobre um modelo de madeira ou metal em caixa apropriada onde irá secar. A vantagem é que a mistura possui alta fluidez, permitindo que todos os detalhes do modelo sejam reproduzidos. A grande desvantagem do processo é o grande tempo para a total cura da mistura, e ainda a baixa resistência da mistura de gesso, quando a mesma perde hidratação durante a cura. Outra desvantagem é a baixa permeabilidade do gesso aos gases (FERREIRA, 2010).



**Figura 3.6 - Molde em material cerâmico utilizado para obtenção de peças que contem muitos detalhes**



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA, 2009

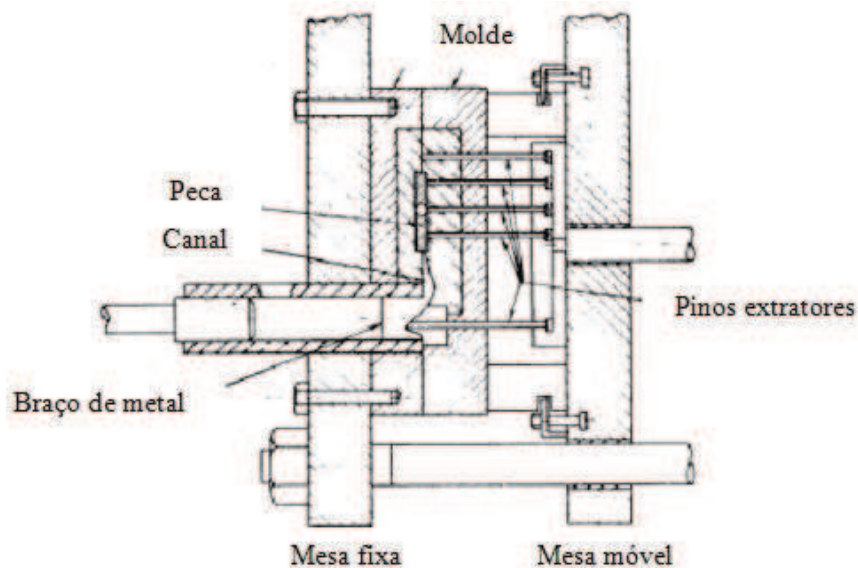
### **3.1.2 Processos via molde permanente**

Para uso dos moldes permanentes, há dois processos de fundição mais difundidos: O processo de vazamento sob pressão, e o processo de vazamento por gravidade que pode usar tanto moldes permanentes ou perdidos.

Quanto ao processo de vazamento sob pressão, é um processo no qual o metal líquido é injetado na cavidade do molde sob pressões, que variam entre 7 e 135 MPa, pressão esta que deve ser mantida durante a solidificação para haver compensação da contração do metal que ocorre, evitando o aparecimento de descontinuidades na peça (FERREIRA, 2010).

As máquinas usadas para este processo são denominadas injetoras, Figura 3.7, que acionam matrizes em aço, projetadas para proporcionar um encaixe das partes que compõe o molde, permitindo que as duas partes se mantenham unidas enquanto o metal é forçado para dentro da sua cavidade. Essas máquinas podem ser de dois tipos: A de câmara quente e a de câmara fria, diferenciadas pelo modo de injeção do metal no molde.

**Figura 3.7 - Vista lateral em corte de uma matriz de injetora utilizada no processo de fundição sob pressão**



Santos *et al*, 2010

Nas de câmara quente, Figura 3.8, o metal é fundido em compartimento junto à máquina, sendo um pistão utilizado para injetar o metal líquido na cavidade da matriz a alta pressão. (FERREIRA, 2010).

As etapas que compõe este processo são:

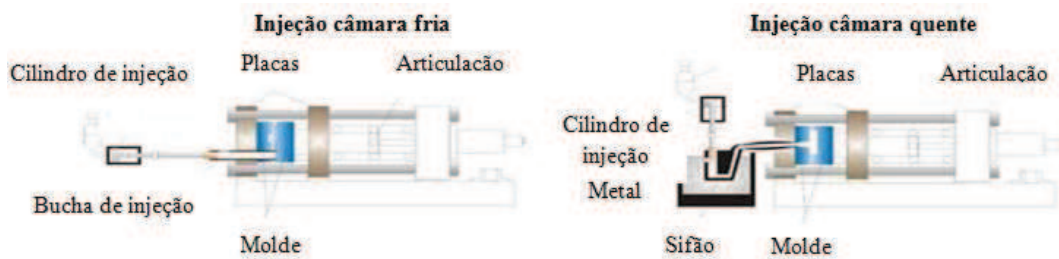
- a) O metal líquido escoo para dentro da câmara;
- b) O pistão injeta metal na matriz e mantém a pressão até a completa solidificação (pressão de recalque);
- c) O pistão retorna a sua posição inicial, a matriz se abre, e a peça é retirada completamente solidificada.

Já nas máquinas de câmara fria, Figura 3.8, o metal líquido é retirado de um forno externo, colocado em uma câmara não aquecida, e um pistão injeta metal a alta pressão na matriz, pressão esta que varia de 14 a 140 MPa (FERREIRA, 2010). As principais etapas que compõe estes processos são:

- a) Metal líquido é vazado na câmara fria;

- b) O pistão injeta metal na cavidade da matriz, e a pressão é mantida até a completa solidificação;
- c) O pistão é aberto, e a peça retirada.

**Figura 3.8 - Corte de máquina injetora utilizada para processos de injeção sob pressão via câmara fria e câmara quente**

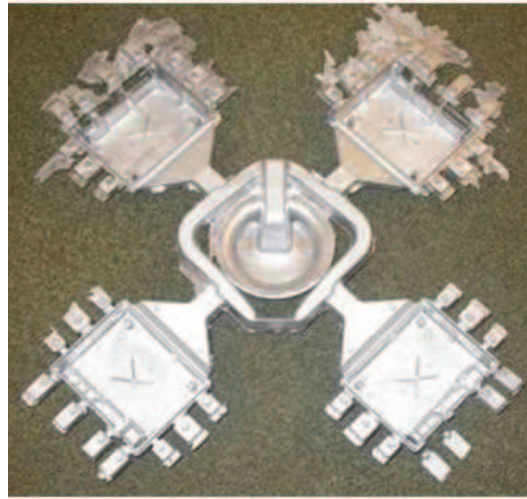


ALUINFO, 2011

Quanto à falta de porosidade natural do material utilizado na construção da matriz, e a alta velocidade com que o metal flui para a cavidade durante a injeção, para suprir a necessidade de escape dos gases, faz-se necessário que orifícios de escape de gases (denominados canais de respiro) sejam distribuídos na região da linha de partição das matrizes (FERREIRA, 2010).

Outro parâmetro a ser controlado é a formação de rebarbas, Figura 3.9, no qual metal líquido se infiltra no pequeno espaço entre as metades do molde. Essas rebarbas devem ser retiradas da peça, pois não fazem parte da forma que deve ser dada às mesmas (FERREIRA, 2010).

**Figura 3.9 - Peça fundida não rebarbada obtida via processo sob pressão**



ALUINFO, 2011

As vantagens deste processo são: Operação a altas taxas de produção, estreitas tolerâncias dimensionais, bom acabamento e microestrutura com grãos refinados que gerem aumento da resistência mecânica associada a aumento da tenacidade do material (FERREIRA, 2010).

As desvantagens são: Seu alto custo, tanto de implantação quanto manutenção, já que as injetoras são em sua maioria importadas, além do formato da peça, que deve possibilitar sua fácil retirada da matriz após o vazamento e solidificação.

Para o vazamento por gravidade, Figura 3.10, vaza-se metal líquido através de um canal, denominado canal de vazamento ou de descida, que são dutos para levar o metal vindo da panela de vazamento até o interior do molde por gravidade, composto ou não por machos. O processo consiste em pintar o molde para receber o metal líquido, e possibilitar maior fluidez ao mesmo, e em seguida montar os machos, caso seja necessário. A seguir, a coquilha é fechada e aquecida, até que se alcance temperatura uniforme na mesma, para que se evite choques térmicos entre o metal e a mesma durante o vazamento do metal. Finalmente, o metal é retirado de um forno e é vazado no molde via canais de descida (FERREIRA, 2010).

**Figura 3.10 - Esquema de vazamento em coquilha**

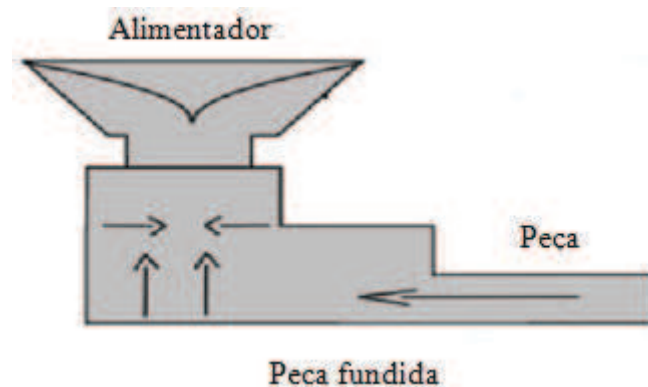


SKT USINAGEM, 2011

Quanto ao volume vazado, deve-se ressaltar que não é vazada somente quantidade suficiente para preencher o molde, mas também um volume sobressalente de metal, denominado “massalote” (ou “alimentador”), Figura 3.11, que tem a função de suprir a falta de material gerada pela contração da liga quando há o resfriamento da mesma (FERREIRA, 2010).

Logo após a solidificação e resfriamento da peça a uma temperatura que possibilite o manuseio, a peça é retirada do molde. Procede-se o corte do canal de vazamento e também do massalote, e a peça é então levada para os processos de acabamento. Os processos de acabamento consistem em consiste em limpeza para retirada do massalote, usinagem para acerto dimensional e retirada de rebarbas e tratamento térmico para acerto de propriedades mecânicas.

**Figura 3.11 - Esquema mostrando sentido de solidificação da peça, além do alimentador, denominado massalote**



MARCOS BORGES, 2010

Este é um processo que exige maior controle de qualidade e de parâmetros de processo que o processo sob pressão, já que envolve o vazamento por gravidade, ou seja, não há um molde fechado para que se garanta um preenchimento total e uniforme da matriz (FERREIRA, 2010).

Há ainda o fato de que se houverem machos de areia envolvidos no processo, os mesmos podem causar discontinuidades internas na peça de forma mais corriqueira devido à presença de discontinuidades em sua superfície, e o possível desprendimento de areia se a mesma não sofreu adequada compactação e mistura com aglomerante (FERREIRA, 2010).

### **3.2 Descontinuidades nos processos de fundição**

Outro ponto de suma importância nos processos de fundição é a formação de discontinuidades antes, durante ou depois do vazamento do metal. Essas discontinuidades surgem e se instalam na peça, podendo gerar a perda das mesmas, se não forem devidamente evitadas.

Estas discontinuidades podem ser classificadas como excrescências ou saliências metálicas, vazios, discontinuidade de metal, defeitos de superfície, peça incompleta e desvios de medida. (FERREIRA, 2010).

Iniciando pelas excrescências, pode-se citar:

- a) Rebarbas;
- b) Inchamento;
- c) Erosão;
- d) Quebra de Molde.

As rebarbas se formam em razão da entrada de metal na superfície de apartação em caixas de moldação e/ou devido à penetração de metal na folga entre as marcações e os machos (FERREIRA, 2010).

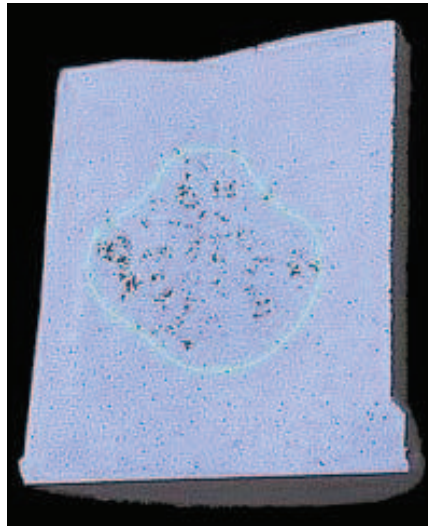
Já o Inchamento ocorre quando há o aumento de espessuras nas partes inferiores devido à deformação das paredes do molde ou do macho como consequência da pressão exercida pelo metal numa areia que, por exemplo, foi insuficientemente compactada (FERREIRA, 2010).

Sob a influência de fluxo de metal líquido, pode haver desagregação de areia superficial o que gera uma saliência metálica na peça. Os grãos de areia deslocados são encontrados como inclusões na peça. É a chamada inclusão de areia (FERREIRA, 2010).

Outro defeito é a erosão, pois a areia desprende-se da parede da cavidade do molde, um “buraco” é gerado e o metal líquido penetra no mesmo, fazendo com que se alterem as dimensões da peça, e ocorra o aparecimento de rebarbas (FERREIRA, 2010).

Em peças fundidas, é possível que ocorra vazios internos ou externos à massa solidificada, que são formados pela presença de gases que não escaparam de forma adequada durante o preenchimento do molde, ou ainda por falta de alimentação adequada. Isso ocorre durante o resfriamento e solidificação. A liga se contrai e não há metal sobressalente (massalote) para suprir a contração. Conseqüentemente ocorre a formação de vazios internos ou superficiais na peça, denominados “rechupes”, Figura 3.12.

**Figura 3.12 - Corte de uma peça fundida por gravidade mostrando a presença de vazios, denominados rechupes**



INTI, 2011

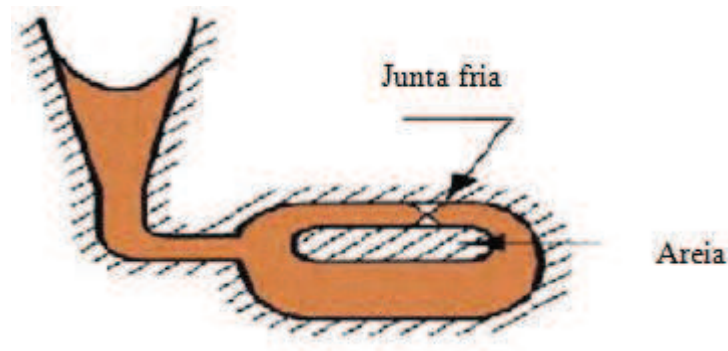
Os massalotes devem ser projetados contendo forma e posicionamento corretos, a fim de suprir a perda de volume na contração da peça. Cada frente de solidificação deve manter contato ininterrupto com uma fonte de suprimento de metal líquido, o que ocorre através do canal de vazamento. O massalote deve permitir a passagem de metal líquido para a peça durante todo o processo de solidificação. Sendo assim, se o sistema de alimentação e o massalote estiverem adequadamente projetados, a contração volumétrica aparecerá como um rechupe no massalote, e não na peça (FUOCO, 2011).

Os chamados rechupes ocorrem quando o metal sofre contração durante a solidificação, possibilitando a formação de um vazio na superfície ou internamente pela falta de material. Mesmo com a inserção de massalotes em alguns casos ainda há a formação dos rechupes, já que o material sobressalente pode ser insuficiente (FERREIRA, 2010).

Quanto às discontinuidades originadas por vazamento inadequado, pode-se citar a presença de juntas frias, Figura 3.13. Estas são causadas por dois fluxos de metais que não se soldam, ou não se unem. Há separação da peça em duas ou mais partes devido a um enchimento da cavidade do molde realizado com interrupção. Uma parte de metal é vazada, e se interrompe o vazamento por algum tempo, de forma que esta parte já vazada inicia sua solidificação, fazendo com que a outra parte de metal líquido vazado posteriormente não se una à primeira, devido à diferença de temperatura (FERREIRA, 2010).



Figura 3.13 - Esquema de formação de junta fria em um fundido



UFU, 2011

Dentre as discontinuidades relacionadas ao contato da areia do macho junto à superfície da peça, estão as altas rugosidades que dão a idéia de reprodução do relevo dos grãos de areia nas paredes dos moldes. Elas prejudicam o bom aspecto superficial do produto, demonstrando a inadequada granulometria da areia utilizada na fabricação do macho. Esta deve ser brevemente angular para que haja a adequada compactação dos grãos que gere uma superfície resistente, porém de faces levemente irregulares. (FERREIRA, 2010).

Também para os defeitos de superfície, a areia pode aderir-se a superfície da peça durante o vazamento do metal. Devido ao sobreaquecimento ela é sinterizada, ou seja, há aumento da capacidade da aderência da mesma devido à alta temperatura a qual foi submetida. Isso faz com que ela se una superficialmente à peça, alterando o acabamento da mesma (FERREIRA, 2010).

Se há deslocamento de camadas de areia na superfície da cavidade do molde, podem ser formados os rabos-de-rato ou escamas, características pela formação de crostas na peça (FERREIRA, 2010).

Pode haver também, a formação de uma peça incompleta devido à falta de material suficiente para encher a cavidade do molde, ou então devido ao escape de metal líquido para a superfície de separação dos moldes para a formação da peça (FERREIRA, 2010).

Quanto às dimensões inadequadas, as mesmas podem decorrer devido a não consideração do coeficiente de contração linear no cálculo da quantidade de material a ser vazado. Sendo assim, é vazado menos material que o necessário, promovendo dimensões inadequadas à peça (FERREIRA, 2010).

Outro fator contribuinte para o surgimento de descontinuidades do produto é o manuseio incorreto do mesmo antes de sua total solidificação. Isso quando o metal ainda não se encontra totalmente sólido, o que pode provocar torções, trincas e até mesmo quebra deste produto. (FERREIRA, 2010).

### **3.3 O alumínio e suas ligas**

#### **3.3.1 Características e propriedades mecânicas**

O alumínio puro, ou seja, composto por 99,5 a 99,996% de alumínio, possui rede cristalina cúbica de faces centradas, com baixa densidade ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) em relação aos aços. Para se ter uma idéia, um aço possui densidade de  $7,8 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, quase três vezes maior que o alumínio. Além de baixa temperatura de fusão ( $660^\circ\text{C}$ ) em relação aos aços, que possuem temperaturas de fusão entre  $1440$  e  $1530^\circ\text{C}$ , alta eletrocondutibilidade e condutibilidade térmica. Em estado puro, apresentam ductilidade elevada, com alongamento podendo chegar a 40%, baixa resistência mecânica a tração, que gira em torno de 50 a 90 MPa.

#### **3.3.2 Ligas de alumínio nos processos de fundição**

O banho de alumínio e suas ligas em geral possuem alta capacidade de dissolução de hidrogênio, e ainda elevada capacidade de reação com oxigênio, Figura 3.14, formando a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), uma película que sobrenada em sua superfície, pois possui densidade menor que o banho (COUTINHO, 1980).

**Figura 3.14 - Representação esquemática da liga líquida na parte inferior e o óxido de seu metal, menos denso, na parte superior**



WIKIPEDIA, 2011

Essa camada é contínua, transparente, inerte e aderente, e impede o contato direto do banho com o meio externo rico em oxigênio, e capaz de provocar a oxidação deste banho.

Tanto a absorção de oxigênio como de hidrogênio são prejudiciais ao vazamento, solidificação e obtenção de peças via processo de fundição. O gás hidrogênio se precipita na forma de bolhas quando o metal vazado está se solidificando, bolhas estas que são concentradoras de tensão como dito anteriormente (COUTINHO, 1980).

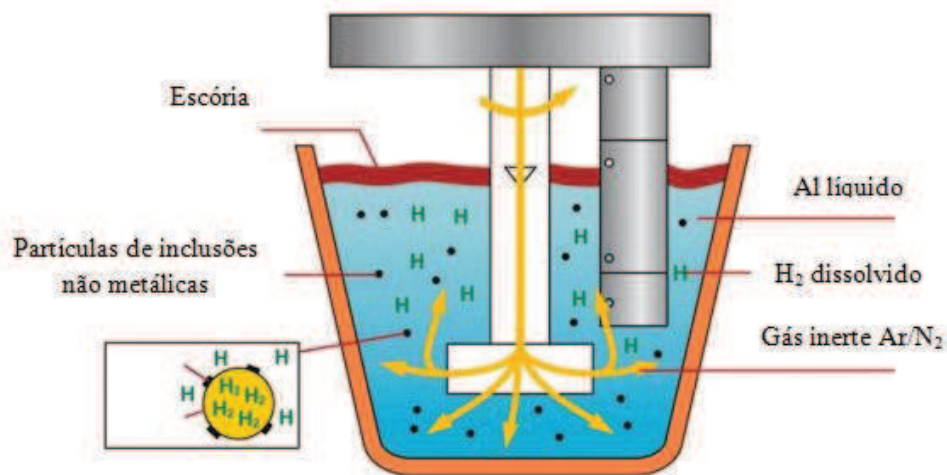
Já o gás oxigênio como citado, possibilita a formação da camada de óxido ao reagir com o alumínio, camada esta que é insolúvel no banho, que pode prejudicar a usinagem posterior, pois devido a sua alta resistência é capaz de desgastar precocemente as ferramentas utilizadas no processo (COUTINHO, 1980).

### **3.3.3 Tratamentos para as ligas de alumínio**

Para que não haja a presença em quantidade expressiva dos gases citados anteriormente, utiliza-se o tratamento de degaseificação da liga, Figura 3.15, através do sopro de gases inertes no banho, mas que se ligam facilmente aos gases  $H_2$  e  $O_2$ , como  $N_2$  ou Ar, sendo o último pouco difundido, devido ao seu custo. Este sopro é feito através de uma lança contendo ponta porosa que é inserida no banho e promove o sopro do gás inerte, que incorpora o gás hidrogênio dissolvido e o arrasta até a superfície, onde é despreendido, além de arrastar

também os óxidos que tenham se formado no banho para a superfície, possibilitando sua remoção de forma mecânica, com escumadeiras (FERREIRA, 2010).

Figura 3.15 - Esquema de degaseificação da liga utilizada através de sopro de gás N<sub>2</sub>



METGRAPHITE, 2011

Um elemento considerado como impureza nas ligas de alumínio é o ferro, que reage com o alumínio, formando o Al<sub>3</sub>Fe.

O Al<sub>3</sub>Fe é altamente duro, reduzindo a trabalhabilidade da liga, por reduzir sua ductilidade no estado sólido (COUTINHO, 1980).

Os principais elementos combinados ao alumínio para a obtenção das ligas mais comuns são:

Cobre, magnésio e zinco, que formam soluções sólidas a temperaturas elevadas, porém com baixa solubilidade a temperatura ambiente. O cobre e o magnésio são capazes de originar fases intermediárias que contêm alta energia livre, e necessitam se combinar a outros elementos a fim de se estabilizar, formando assim os compostos intermediários (COUTINHO, 1980).

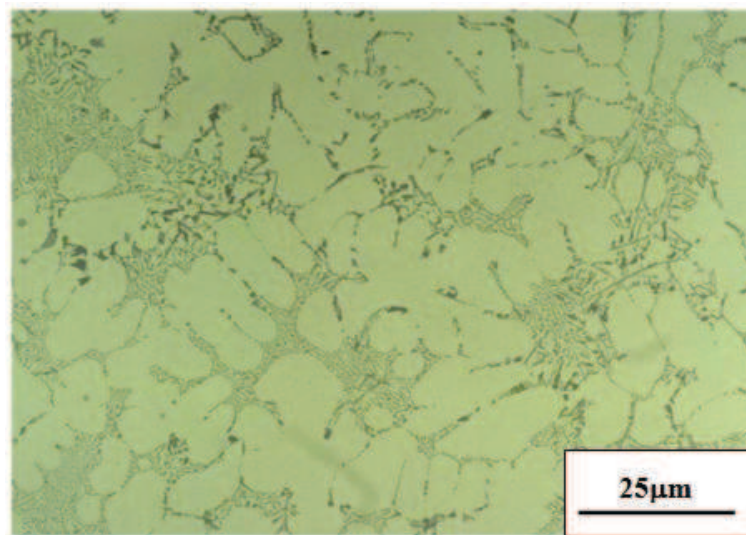
Silício e estanho formam ligas eutéticas quando combinados ao alumínio. Quando as ligas possuem aproximadamente 12,6% de silício, a fase rica em alumínio possui baixos teores de silício em solução, enquanto estanho e alumínio são igualmente insolúveis a temperatura ambiente (COUTINHO, 1980).

Ferro, manganês, níquel, cromo e titânio são pouco solúveis em alumínio, formando compostos intermediários como  $Al_3Fe$ ,  $Al_6Mn$ ,  $Al_3Ni$ ,  $Al_7Cr$  e  $Al_3Ti$ , que alteram significativamente as propriedades mecânicas quando presentes em pequenas quantidades. É válido ressaltar que o cromo e o titânio são utilizados com a finalidade de refinar os grãos. Estanho, chumbo e bismuto, elementos que objetivam facilitar a usinagem e corte do mesmo (COUTINHO, 1980).

Comumente, é utilizada a adição de silício como elemento de liga. O alumínio puro é muito dúctil, e o silício é capaz de reduzir a movimentação de planos atômicos quando ocorre a deformação da peça. Ele reduz a ductilidade da liga, além de promover a melhora de fluidez no vazamento do metal, aumento de resistência mecânica e a redução da expansão térmica durante a variação de temperatura durante a solidificação (FUOCO, 2011).

Por meio da adição de silício e de outros elementos, obtém-se a microestrutura dendrítica, Figura 3.16.

**Figura 3.16 - Microestrutura típica de ligas eutéticas de alumínio-silício**



FUOCO, 2011

Outra característica para as ligas de alumínio silício é a elevada contração de solidificação, que deve ser controlada via sistema de resfriamento controlado do molde. A velocidade de resfriamento é determinante para a formação de rechupes, que são prejudiciais a resistência da peça (FUOCO, 2011).

Além desta característica, pode-se citar o baixo ponto de fusão da liga, próximo a 700°C, o que permite a utilização de moldes metálicos, e conseqüentemente a utilização dos processos de fundição sob pressão e por coquilha (FUOCO, 2011).

O silício é o principal responsável pelo controle do modo da solidificação da liga durante a solidificação. (FUOCO, 2011).

### **3.3.4 Tipos de ligas de alumínio**

As ligas alumínio silício podem ser divididas de acordo com o percentual de silício presente nas mesmas.

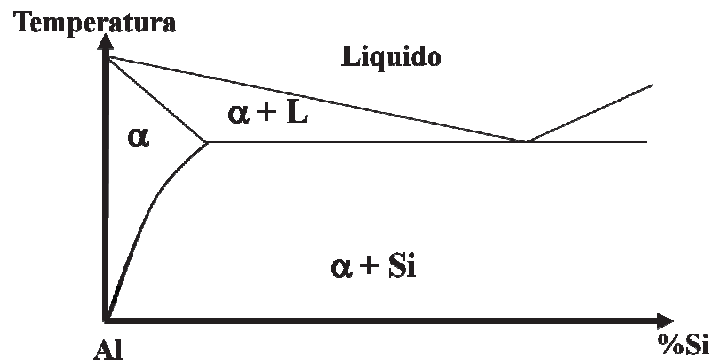
Estas ligas podem ser hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas, Figura 3.17 (FUOCO, 2011).

As hipoeutéticas possuem teores de silício abaixo de 12,6%, sendo muito utilizadas nos processos de fundição sob pressão, ligas estas que por possuírem baixo teor de silício tem maior intervalo de solidificação de 590 a 520°C. Essas ligas possuem por características básicas sua boa fluidez, elevada resistência a formação de juntas frias causadas pelo grande intervalo de solidificação (FUOCO, 2011).

As eutéticas possuem teores de silício variando entre 11 e 13%, não possuindo solidificação pastosa, ou seja, não há a passagem por um campo bifásico na transformação de líquido para sólido. Possuem como características boa fluidez, elevada resistência a formação de trincas a quente, pequenos intervalos de solidificação, variando entre 585°C e 575°C. As ligas eutéticas possuem maior propensão a formação de rechupes (vazios) devido a passagem direta do estado líquido para o sólido. Quando o estado pastoso está presente há facilidade de escoamento da liga para preenchimento de eventuais vazios, o que não ocorre quando há passagem direta de um estado para outro (FUOCO, 2011).

As hipereutéticas possuem teor de silício acima de 13% e são pouco utilizadas nos processos de fundição. Possuem como principal característica a formação de plaquetas de silício primário durante a solidificação, plaquetas estas que aumentam significativamente a dureza do material, conferindo maior resistência ao desgaste para o material. (FUOCO, 2011).

Figura 3.17 - Diagrama de fases das ligas de alumínio-silício



FUOCO, 2011

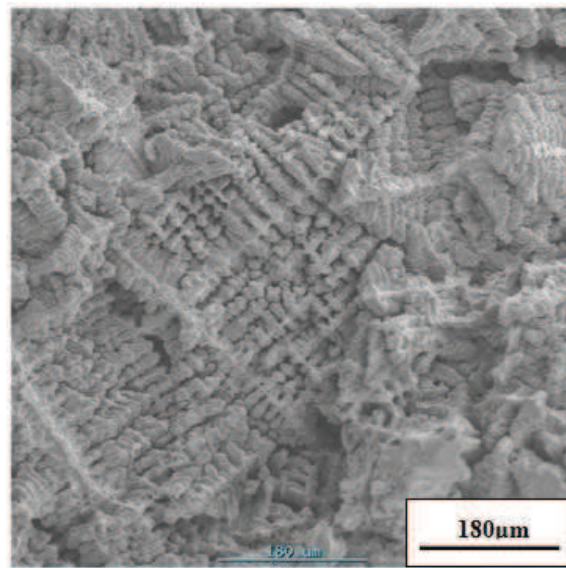
### 3.3.5 Solidificação das ligas de alumínio

Uma etapa em que se deve ter cuidado no controle de geração de descontinuidades, é a etapa de solidificação, que se inicia já no vazamento da liga no molde. A solidificação se processa em duas etapas: Nucleação e crescimento. A nucleação é onde a fase sólida surge de forma estável no seio da fase líquida, sob a forma de pequenos núcleos cristalinos. Estes núcleos crescem às custas do líquido circundante, para formar cristais ou grãos cristalinos. A quantidade de núcleos formados na etapa de nucleação determinará o tamanho dos grãos na estrutura final solidificada, ou seja, se há poucos núcleos, os grãos serão grandes, pois os núcleos terão que crescer muito para preencher a estrutura, e se há muitos núcleos, os grãos serão pequenos, pois terão que crescer pouco para preencher a estrutura (FUOCO, 2011).

A velocidade de crescimento, a constituição da liga e as condições de nucleação determinarão a forma da frente de solidificação e crescimento e, conseqüentemente a forma dos grãos.

A interface sólido líquido pode ter duas formas: Interface lisa que pode resultar do crescimento planar ou celular, e tendem a ocorrer na solidificação de metais puros ou em ligas com composição eutética, que solidificam em temperatura definida. A outra forma é a interface rugosa ou difusa, que pode resultar do crescimento dendrítico e/ou nucleação independente, que tende a ocorrer quando a solidificação ocorre ao longo de um intervalo de temperatura, fato exemplificado pela Figura 3.18 (FUOCO, 2011).

**Figura 3.18 - Formação típica de estrutura dendrítica no resfriamento**



FUOCO, 2011

No crescimento planar, a velocidade de resfriamento é pequena e o gradiente de temperatura é elevado. Conforme há o aumento da velocidade de esfriamento, há a redução do gradiente de temperatura, ocorrendo crescimento celular, crescimento dendrítico e crescimento com nucleação independente (FUOCO, 2011).

Em ligas com intervalo de solidificação relativamente pequeno (embora possam apresentar modo de solidificação do tipo dendrítico), a extensão da “zona pastosa” tende a ser pequena.

Estas ligas solidificam com a formação de uma casca sólida que avança das regiões que fazem contato com o molde em direção aos centros térmicos da peça ou pontos quentes. Em ligas com intervalo de solidificação relativamente grande (normalmente com modo de solidificação do tipo dendrítico), a extensão da “zona pastosa” tende a ser grande. Estas ligas solidificam com a formação de dendritas que aprisionam poças de líquido interdendrítico que tendem a solidificar isoladamente do conjunto, com a formação de microporosidades (micro-rechupes) (FUOCO, 2011).



### **3.4 Motores automotivos**

#### **3.4.1 Características**

Uma das grandes aplicações dos processos de fundição é na fabricação de peças para motores de combustão interna. Um motor de combustão interna é definido como uma máquina térmica que transforma energia originada de uma reação química em energia mecânica.

Esta conversão se dá através de ciclos, denominados ciclos térmicos, constituídos pelas etapas de expansão, compressão e mudança de temperatura dos gases. Os motores de combustão utilizam seus próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Estes gases são responsáveis por fornecer energia para as fases de compressão, aumento de temperatura, expansão e exaustão (DUFFY, 1994).

Estes motores são denominados também por motores de explosão, denominação tecnicamente inapropriada, pois o que ocorre no interior das câmaras de combustão não é uma explosão de gases, mas sim um aumento de pressão interna da câmara, originada pela combustão (queima controlada mediante chama). Explosão é um fenômeno proveniente da detonação de gases, que deve ser evitada nos motores, a fim de aumentar a durabilidade dos mesmos e evitar a emissão de poluentes na atmosfera (DUFFY, 1994).

Os motores de combustão interna possuem pequeno tamanho e fácil manutenção, porém, como desvantagens apresentam limitação de potência, não utilização de combustíveis sólidos, peso elevado, elevada quantidade de peças, e baixa eficiência comparados a outros motores (DUFFY, 1994).

#### **3.4.2 Componentes do motor**

Os principais componentes do motor são divididos em fixos e móveis. Para os fixos temos:

- a) Cabeçote do motor: É a parte superior do motor ligada ao bloco por meio de parafusos. É a tampa de fechamento da parte superior do bloco e das câmaras de

combustão. O cabeçote pode ser feito utilizando-se o mesmo material do bloco do motor ou usando ligas especiais para motores de alto rendimento. É nesse componente que se localizam as velas e válvulas de admissão e escapamento. Estes últimos componentes estão sujeitos a solicitações térmicas elevadas, por isso ao projetar-se um cabeçote, é importante levar este item em consideração, pois o mesmo deve resistir a altas trocas de calor durante o funcionamento do motor (DUFFY, 1994).

- b) Válvulas (localizadas no cabeçote): As válvulas controlam a entrada e saída de gases. Como são componentes de alta solicitação mecânica e térmica, são fabricadas em aço, aço ao níquel ou cromo níquel, e a passagem dos gases mantém sua temperatura entre 250 e 300°C. As válvulas de descarga são em liga de aço, de forte teor de níquel, de cromo e de tungstênio. Sendo que o níquel melhora a resistência, o cromo torna o aço inoxidável e o tungstênio mantém uma forte resistência mecânica em temperaturas elevadas. As válvulas de descarga suportam temperaturas entre 700 e 750°C (DUFFY, 1994).

O motor de combustão interna apresenta quatro cilindros, contendo 4 válvulas em cada cilindro, duas válvulas de admissão e outras duas de escape (DUFFY, 1994).

- a) Eixo de comando de válvulas (localizado no cabeçote): Este eixo é responsável por controlar a abertura e fechamento das válvulas de admissão e descarga e são fabricados geralmente em aços forjados ou ferro fundido, em razão da alta solicitação mecânica a qual é exposto. Podem ainda passar por tratamentos térmicos superficiais, como têmpera superficial, que confere aumento de resistência ao desgaste superficial (DUFFY, 1994);
- b) Velas de ignição: É um dispositivo elétrico que se encaixa na cabeça do pistão e inflama a mistura comprimida de ar/combustível por uma faísca elétrica. Elas possuem um eletrodo central isolado que se conecta através de um cabo blindado a uma bobina ou magneto externo formando, com terminal aterrado na base da vela uma folga de ignição dentro do cilindro. A vela recebe de 20 a 30 mil volts da bobina, através do rotor do distribuidor que faz saltar uma centelha em sua ponta. É esta centelha que provoca a explosão da mistura ar/gasolina (DUFFY, 1994);
- c) Bloco do motor: É a parte central do motor. Normalmente é fabricado em ferro fundido, para motores de maior potencia, ou mais comumente em alumínio para

motores de potencia baixa a média, tendo seus 4 cilindros revestidos com um elemento denominado camisa d'água, em ferro fundido, para que suporte as solicitações térmicas e mecânicas agressivas, evitando seu desgaste (DUFFY, 1994);

- d) Virabrequim: Também pode ser chamado de árvore de manivelas. Possui na extremidade posterior um flange para acoplamento do volante do motor e na extremidade anterior um eixo para transmissão de rotação ao eixo de comando de válvulas. São geralmente fabricados em aço ou ferro fundido (DUFFY, 1994);
- e) Pistão: O pistão é um dispositivo que tem a função de absorver o impacto gerado na combustão, transformando energia térmica gerada na combustão em energia mecânica. Possui ainda ranhuras na parte superior para fixação de anéis no segmento. Anéis estes que servem para impedir a passagem dos gases de compressão e manter assim a pressão constante sobre a cabeça do pistão (DUFFY, 1994);
- f) Biela: Tem forma de haste e transmite o movimento do pistão para o virabrequim. Ela é fixada no virabrequim, não ficando em contato direto com o eixo. Entre a biela e o virabrequim estão os casquilhos para evitar desgastes do virabrequim (DUFFY, 1994);
- g) Cárter: É a parte inferior do motor. Tem a função de armazenar o óleo lubrificante, sendo que a bomba de óleo lubrificante está localizada no cárter (DUFFY, 1994).

Conforme citado anteriormente, motores são máquinas que através do movimento de seus pistões fazem com que a mistura ar/combustível sofra combustão gerando força para fornecer potência e torque através do movimento rotativo do seu eixo principal (virabrequim).

Os motores de combustão interna possuem por princípio o funcionamento em um ciclo, denominado Ciclo de Otto, composto por 4 tempos descritos no item 3.4.3.

### **3.4.3 Funcionamento do motor**

- a) 1º tempo – Admissão: O pistão desce aspirando a mistura ar/combustível para o interior do cilindro;
- b) 2º tempo – Compressão: A mistura aspirada é comprimida pelo pistão;

- c) 3° tempo – Combustão: A mistura se inflama quando uma centelha é solta pelo eletrodo da vela de ignição;
- d) 4° tempo – Escape/Exaustão: Os gases produzidos pela mistura saem do cilindro empurrados pelo pistão para o coletor de escape.

O cabeçote comporta os quatro tempos do motor, através da presença das válvulas de admissão e escape.

No primeiro tempo, o pistão aspira a mistura ar/combustível através da abertura da válvula de admissão presente no cabeçote, que desobstrui a passagem da mistura, possibilitando a entrada da mesma no cilindro.

No segundo tempo, com a mistura já presente no cilindro, a válvula de admissão se fecha, ficando a mistura confinada e sendo comprimida pelo pistão, que se movimenta para que haja a compressão.

No terceiro tempo, a mistura se inflama, ou seja, sofre combustão por uma centelha solta pela vela de ignição. Isto tudo ocorre com as válvulas fechadas.

No quarto tempo, os gases, produtos da combustão da mistura saem, pois a válvula de escape se abre, para que os mesmos saiam, pois os mesmos são empurrados pelo pistão para a saída.

O cabeçote então forma a câmara de combustão, já que possui os elementos fundamentais para o controle da combustão: As válvulas de admissão e escape, a vela geradora de centelha, e ainda cobre os cilindros, onde ocorre a combustão propriamente dita (DUFFY, 2004).

Este componente é um dos elementos mais críticos no projeto de um motor, por combinar quesitos estruturais, fluxo de calor e ainda escoamento de fluidos em uma forma complexa, fluidos presentes na combustão e também no sistema de arrefecimento do motor.

Prefere-se a utilização de ligas de alumínio, pois as mesmas são menos densas que os ferros fundidos, comumente utilizados. Também possuem melhor condução de calor, pois possui condutibilidade térmica 60% maior que a dos ferros fundidos, devido principalmente a diferença de estrutura cristalina entre os mesmos. O fato é que quanto mais condutividade de calor, menor é a chance de formação de pontos quentes nas paredes internas do cabeçote, o que pode gerar concentração de tensão e possível falha no cabeçote (BUDINSKI, 1994).

Quanto à fabricação de cabeçotes prefere-se ainda a utilização de processo de fundição por gravidade, combinando-se os moldes à presença de machos para que os mesmos definam as cavidades da peça.

Prefere-se a utilização de moldes em coquilha, pois é um processo mais barato, não exige grande dispêndio com manutenção de equipamentos e ainda pelo fato do cabeçote não possuir formas complexas quando comparado a peças como o bloco, por exemplo. É também mais fácil a remoção de ar retido no interior da matriz através da utilização de canais de vazamento para o escoamento contínuo de material e saída de gases. As coquilhas tem vida útil maior que os moldes utilizados em processos de fundição sob pressão, pois não são expostas a altas pressões, somente a altas temperaturas, o que ameniza a exposição do molde à concentradores de tensão.

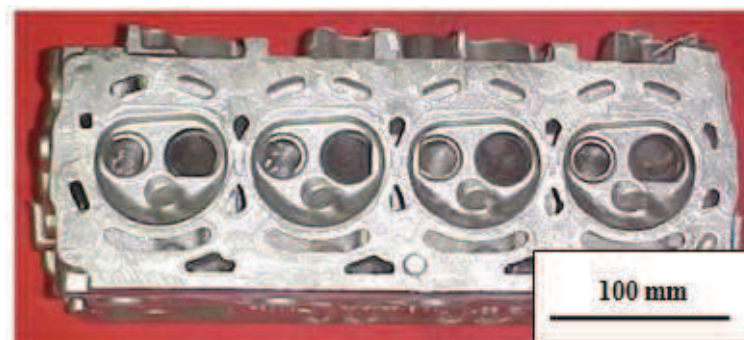
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

No trabalho foram investigadas descontinuidades em cabeçotes de motores de combustão interna de quatro tempos confeccionados em liga de alumínio-silício (Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.)

Para análise das descontinuidades foi utilizado 01 (um) cabeçote de motor de combustão interna de 4 tempos em liga de alumínio-silício produzido na empresa Nematik, que continha as descontinuidades e 01 (um) cabeçote que não continha descontinuidades.

**Figura 4.1 - Cabeçote de motor de combustão interna – Vista das câmaras de combustão**



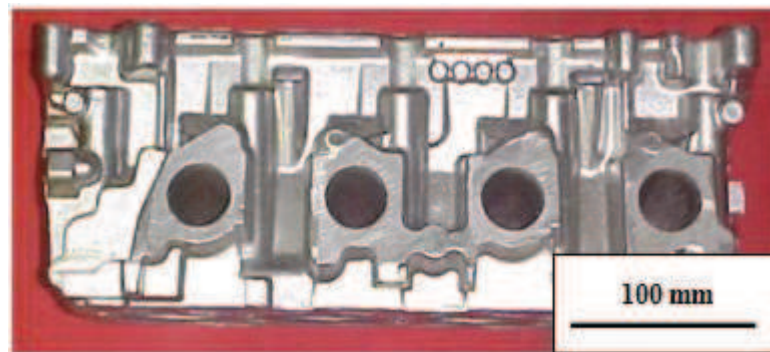
Fonte: Autor

**Figura 4.2 - Cabeçote de motor de combustão interna – Vista dos vãos de óleo**



Fonte: Autor

**Figura 4.3 - Cabeçote de motor de combustão interna – Vista da lateral de admissão**



Fonte: Autor

**Figura 4.4 - Cabeçote de motor de combustão interna – Vista da lateral de escape**



Fonte: Autor

Estes cabeçotes foram fabricados em ligas de alumínio (Al) conforme especificação da norma DIN EN 1706 (1997), descrita na Tabela 1.

**Tabela 1 - Especificação da composição química da liga utilizada para fabricação do cabeçote**

Grupo de liga	Composição química em partes de massa em %											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Sr	Outras Impurezas
AlSi6Cu4	5,0 a 7,0	< 0,60	3,0 a 5,0	0,4 a 0,65	0,2 a 0,3	< 0,3	< 1,0	< 0,1	< 0,1	0,13 a 0,20	< 0,035	< 0,15

DIN EN 1706, 1997

A amostra da liga foi coletada diretamente do forno da empresa Nematik, vazada em um molde próprio, de formato cilíndrico com diâmetro de 50 mm e altura de 10 mm, Figura 4.5. Após resfriamento até a temperatura ambiente, esta foi levada para metalografia.

**Figura 4.5 - Amostra coletada antes de vazar os cabeçotes para realização de análises químicas e metalográficas**



Fonte: Autor



## 4.2 Procedimentos para caracterização do material e das discontinuidades

### 4.2.1 Análise química de regiões com discontinuidades

Foram realizadas análises químicas, por meio de espectrômetro de absorção atômica de chama da marca SpectroLab, modelo LAVM/10, de propriedade da empresa Nematik, Figura 4.6, em regiões com a existência de discontinuidades, a fim de se verificar a influência da presença de elementos químicos na formação da discontinuidade.

As amostras foram obtidas após a identificação das discontinuidades por meio de aparelho de raios-x, conforme descrito no item 4.2.2, e preparadas como descrito no item 4.2.3. As amostras, já preparadas, são colocadas no aparelho previamente calibrado, para ser “queimada”, ou seja, a presença e a quantidade de metais são detectados a partir da absorção de radiação ultravioleta por parte dos elétrons (VOGEL *et al*, 2002).

**Figura 4.6 - Espectrômetro de absorção atômica de chama**



MICROCONSULT, 2011

## 4.2.2 Raios-x

Foram feitas imagens da descontinuidade utilizando um aparelho de raios-x da marca Gilardoni, modelo CST 5 MA 160, de propriedade da empresa Nematik, Figura 4.7, que utiliza ondas eletromagnéticas (não nocivas a saúde humana devido à ausência de elementos radioativos) para visualização da estrutura interior da peça .

Para a realização do ensaio, foi utilizado 1 cabeçote conforme Figura 4.1.

Caso houvesse alguma descontinuidade gerada por falta de material (como rechupe, por exemplo) haveria fácil detecção, já que as ondas atravessam a peça e há a projeção da descontinuidade.

**Figura 4.7 - Aparelho de raios-x utilizado na detecção de descontinuidades internas à peça**



GILARDONI, 2011

## 4.2.3 Metalografia

Para realização dos ensaios metalograficos, o cabeçote contendo as descontinuidades, previamente detectadas nos ensaios de raios-x, foi cortado com a utilização de uma serra

hidráulica com laminas de aço revestidas por carbeto de silício, de propriedade da empresa Nemak, Figura 4.8.

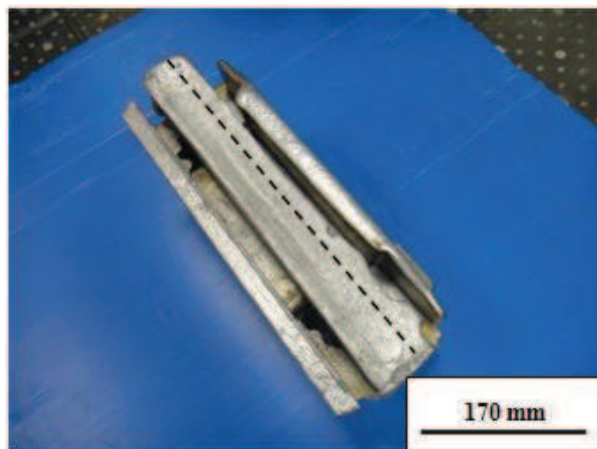
**Figura 4.8 - Serra de fita utilizada para o corte das peças em análise**



Fonte: Autor

A Figura 4.9 mostra o local onde estava localizada a descontinuidade. O corte foi feito neste local.

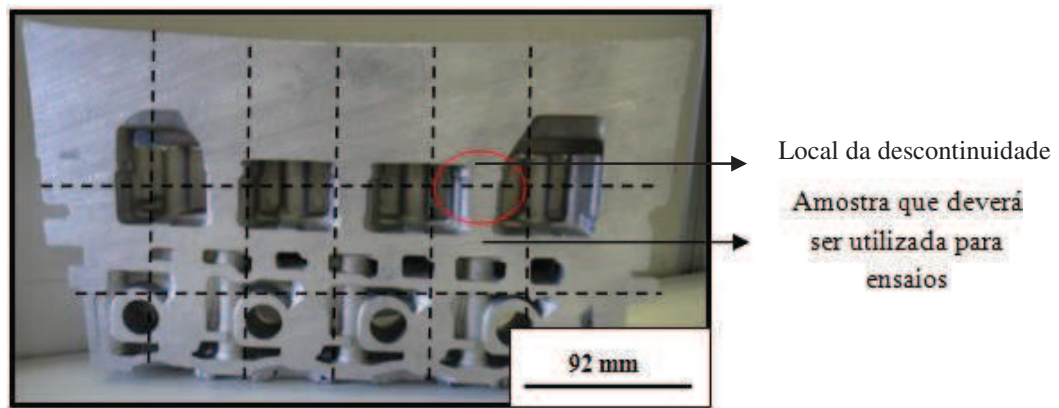
**Figura 4.9 - Local de corte longitudinal**



Fonte: Autor

A seguir, o cabeçote utilizado foi cortado transversalmente como descrito na Figura 4.10. As posições foram escolhidas para que as amostras ficassem em tamanho adequado para manuseio durante a preparação para os ensaios metalográficos.

**Figura 4.10 - Locais de corte transversais, indicando também o local da descontinuidade**



Fonte: Autor

Logo após o corte, foi feita a preparação metalográfica das 18 amostras obtidas, seguindo-se os procedimentos da norma ASTM E3 (2011).

As peças foram lixadas na empresa Nemark utilizando-se politrizes da marca Arotec modelo Aropol 2V com discos rotativos, Figura 4.11. Foram empregadas lixas d'água da marca 3M de granulometrias de 180, 320, 600, 1200 e 2500  $\mu\text{m}$ , umedecidas constantemente por fluxo de água.

**Figura 4.11 - Politriz utilizada no lixamentos dos corpos de prova**



Fonte: Autor

As amostras foram então levadas para o polimento, para a remoção dos arranhões causados pelo processo de lixamento. Neste caso foi utilizado pano de veludo de 2 $\mu$ m, impregnado com suspensão de sílica coloidal da marca Mastermet, fabricada pela Buhler, da Alemanha, e umedecido de forma intermitente com álcool líquido 70%.

O último passo da preparação foi lavar cada uma das amostras com água e detergente líquido e álcool e secá-las com secador, para que então realizar o ataque com reagente químico.

O ataque foi conduzido com reagente químico Ácido Fluorídrico com concentração 0,5% fabricado pela Nitroquímica do Brasil, para que as superfícies das amostras fossem levemente corroídas e houvesse revelação das interfaces entre os diferentes constituintes que compõe a microestrutura do metal em estudo.

O ataque foi realizado por imersão dos corpos-de-prova no ácido por um período aproximado de 10 segundos ou até fosse visualizada uma superfície fosca, indicativo de que a microestrutura já havia sido revelada em decorrência da corrosão gerada pelo agente químico.

As amostras foram lavadas em água para que se interrompesse o ataque, pois se o mesmo não fosse interrompido assim que se revela a microestrutura haveria a possibilidade de formação de sais ácidos que são capazes de queimar a superfície.

Assim que ocorreu o término do ataque, as amostras foram lavadas em água e álcool e secadas com um secador de jato de ar quente.

Por fim, as amostras foram analisadas em um microscópio ótico tipo platina invertida da marca Olympus, modelo GX51, da empresa Nematik, Figura 4.12, com lente de aumento de 50X.

Para a amostra da liga recolhida no forno foi utilizado o mesmo procedimento de preparo com lixamento, polimento e ataque para a visualização de microestrutura presente na amostra. A amostra também foi analisada no microscópio ótico tipo platina invertida da marca Olympus, modelo GX51, Figura 4.12, com lente de aumento de 50X.

**Figura 4.12 - Microscópio utilizado para visualização da microestrutura do material**



Fonte: Autor

#### **4.2.3.1 Medição do espaçamento dendrítico da microestrutura**

O tamanho de grão está diretamente relacionado ao chamado espaçamento dendrítico, definido como o tamanho médio da seção transversal das dendritas, medida através de análise metalográfica da liga em questão. O espaçamento dendrítico representa o quanto refinada estava a microestrutura metalográfica dos grãos de alumínio.

Foram utilizadas para a medição do espaçamento dendrítico as amostras obtidas, Figura 4.9, e um microscópio ótico da marca Olympus, modelo GX51, da empresa Nematik. Assim que a imagem é focalizada, utiliza-se a câmera da marca Olympus, com resolução de 2mp e o software Analysis para fotografar a microestrutura.

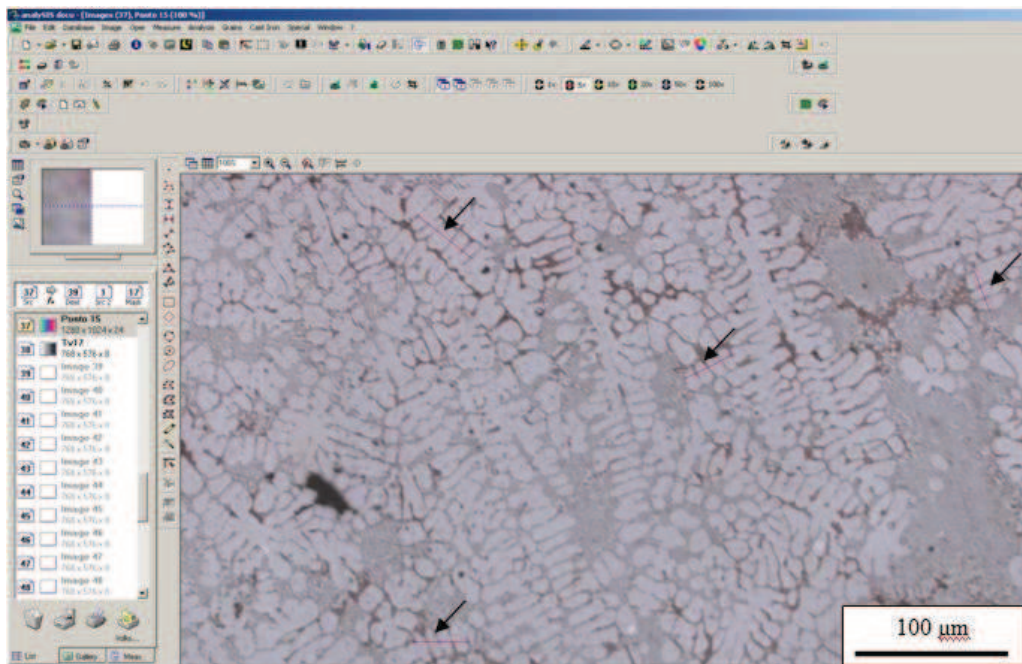
De posse da imagem, conforme exemplificado na Figura 4.13, basta clicar sobre a região do eutético, preferencialmente próxima ao feixe de dendritas cujo se deseja determinar o espaçamento.

Logo após clicar, basta arrastar o ponteiro, e se formará uma linha. Esta linha deve ser paralela ao eixo principal da estrutura dendrítica, de forma a interceptar transversalmente as dendritas, e deve terminar novamente no eutético. Para isto, basta que se solte o *mouse*, e a linha estará traçada.

Deve-se fazer no mínimo cinco feixes de intercepções seguindo o procedimento descrito acima, onde cada feixe deve conter no mínimo 3 e no máximo 5 dendritas interceptadas pela linha de medição.

O software faz a média de todos os espaçamentos encontrados para os feixes, e informa o espaçamento dendrítico médio da área total fotografada para medição.

**Figura 4.13 - Exemplo de medição de espaçamento interdendrítico utilizando-se o software Analysis**



Fonte: Autor

#### 4.2.4 Medição de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados utilizando-se um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu, modelo HMV-2, da empresa Nematik Figura 4.14, que emprega um penetrador de diamante em forma de pirâmide quadrangular, com ângulo entre as faces opostas de  $136^\circ$ .

**Figura 4.14 - Microdurômetro Shimadzu utilizado na medição de microdureza**



Fonte: Autor

A medição se deu de acordo com a norma ASTM E384.

A especificação para valores de microdureza encontra-se listada na norma DIN EN-1706 de 1997. O valor mínimo aceitável é de 85 HV.

Foram realizados 10 ensaios na amostra que apresentava descontinuidades, com a finalidade de verificar se haveria influência nas propriedades mecânicas da peça. Foi calculada a média dos 10 ensaios.

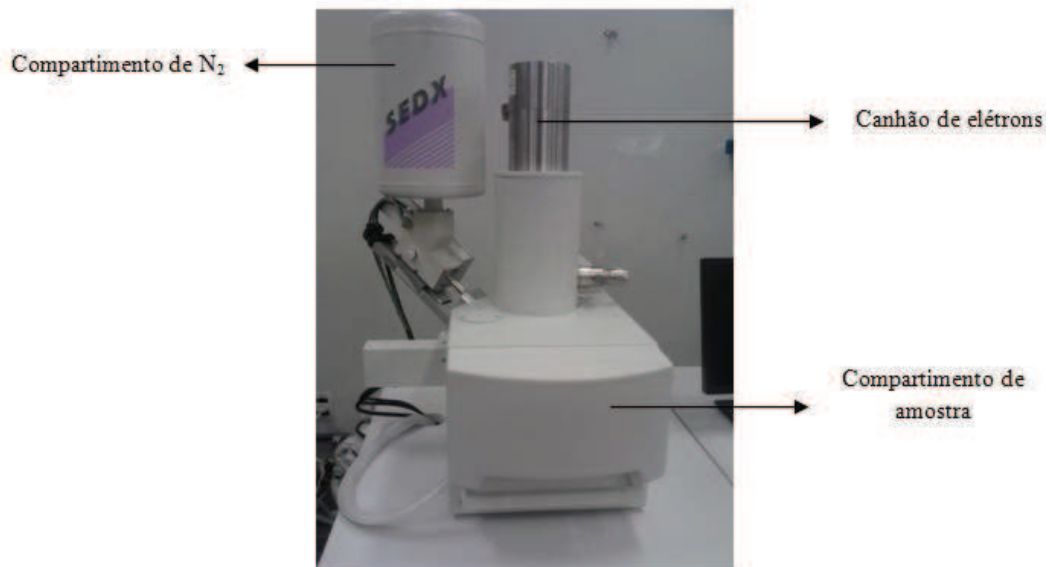
#### **4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Utilizou-se de um microscópio eletrônico de varredura, marca Shimadzu, modelo SSX-550, do CEFET-MG, Figura 4.15, para analisar uma amostra. A análise foi realizada na região da descontinuidade, Figura 4.10, com intuito de verificar a composição química, a microestrutura e verificar se havia relação entre a descontinuidade e a composição química da região. Este tipo de microscópio tem por característica a emissão de elétrons acelerados que interagem com a amostra, possibilitando a obtenção de imagens com ampliações que podem chegar a



mais de 5000 vezes. Além das imagens, o aparelho possibilita a obtenção de análise qualitativa da presença de elementos químicos na amostra, já que possui acoplado um aparelho de fluorescência de raios-x (EDS), que possibilita a visualização da presença de elementos em regiões desejadas na amostra.

**Figura 4.15 - Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu**



Fonte: Autor

#### **4.2.6 Medição das temperaturas dos moldes**

Suspeitando da influência da temperatura dos moldes no momento do vazamento, decidiu-se verificar a temperatura dos mesmos momentos antes do vazamento. A medição de temperatura dos moldes foi realizada nas laterais de admissão e escape, e nos 2 blocos de fundo do molde, regiões mostradas na Figura 3.1. Essas regiões foram escolhidas por terem contato direto com o metal vazado, influenciando em sua solidificação de acordo com a temperatura em que estiverem.

Foram realizadas 10 medições de temperatura em cada região utilizando um termômetro digital a laser infravermelho da marca Minipa, modelo MT-395, da empresa Nematik, Figura 4.16, capaz de medir temperaturas entre -60 e 1500°C. O princípio de medição desse aparelho

consiste na radiação infravermelha emitida pelo equipamento fazer parte do espectro eletromagnético, e estar localizada entre a porção visível do espectro e as ondas de rádio, com comprimento de onda localizado entre 0,7 e 1000  $\mu\text{m}$ , sendo a banda entre 0,7 a 14  $\mu\text{m}$  utilizada para medição de temperatura.

Esta medição se dá em qualquer corpo, excetuando-se os negros, que não emitem energia em nenhum ponto do comprimento do espectro correspondente ao comprimento da luz infravermelha.

Para a medição da temperatura em corpos metálicos, como é o caso do molde, utiliza-se aparelhos que emitam infravermelho com comprimento de onda de 1  $\mu\text{m}$ , pois este tipo de material emite energia nesta faixa de comprimento do espectro.

Qualquer objeto reflete, transmite e emite energia, porém, só a energia emitida é que é importante na medição, pois caracteriza o percentual de energia que é emitido pela superfície.

A intensidade da energia emitida por um objeto aumenta ou diminui proporcionalmente a sua temperatura, e é essa energia emitida que tem que ser corrigida de acordo com o índice de emissividade do material, que indica a temperatura do objeto.

Os termômetros possuem um ajuste de emissividade que permite a medição da temperatura desejada. Neste caso a emissividade foi ajustada para 0,9  $\mu\text{m}$ , pois o aço que compõe o molde é o H13, sendo fosco e pouco reflexivo aproximando-se de um corpo negro.

**Figura 4.16: Termômetro digital infravermelho MINIPA MT-395**



MINIPA, 2012

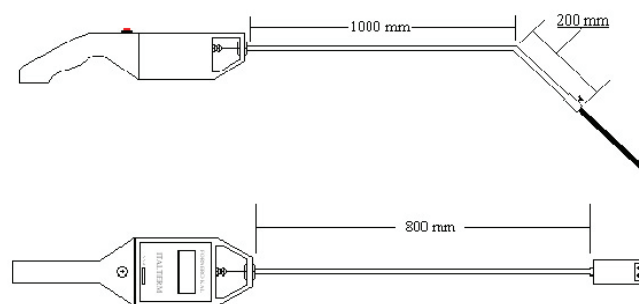
#### 4.2.7 Medição da temperatura da liga

Para verificar a temperatura da liga antes do vazamento, e observar se a mesma se encontrava dentro da faixa recomendada para que a solidificação seja adequada, realizou-se a medição de temperatura da liga em forno foi utilizado um pirômetro de imersão da marca Italterm, modelo Fornero Kal, da empresa Nematik, Figura 4.17, com mostrador digital. Esse pirômetro tem por princípio de funcionamento a utilização de termopares do tipo “k” isolados com pastilhas cerâmicas e faixa de medição que varia de 0 a 1200°C e tempo de resposta de 35 a 50 segundos após imersão no banho.

O mesmo deve ter sua ponta inserida no metal líquido, que fica dentro de uma panela, de forma que o termopar fique totalmente submerso. Deve-se aguardar até que o mostrador dê o valor de temperatura medido.

A temperatura da liga deve ser controlada e deve estar entre 730°C e 770°C. Foram realizadas 10 medições no banho, e o cálculo da média das temperaturas. A cada medição, o pirômetro deve ser imerso em uma região diferente do banho, para que se confirme a homogeneidade de temperatura em todos os pontos do metal líquido.

**Figura 4.17 - Esquema do pirômetro de imersão ITALTERM FORNERO KAL utilizado para medição de temperatura da liga**



ITALTERM, 2012

#### 4.2.8 Medição da densidade da liga

Para verificar se a densidade da liga se encontrava dentro dos valores adequados para obter a solidificação, foi utilizada uma balança da marca Toledo, modelo PL 403, da empresa Nemaq, Figura 4.18, que tem por princípio de medição a pesagem da amostra ao ar, e novamente imersa em água.

**Figura 4.18 - Balança Toledo PL 403**



METTLER TOLEDO, 2012

Para este tipo de liga, exige-se que a densidade mínima seja de  $2,53 \text{ g/cm}^3$ . Foram medidas as densidades e calculada a média de 10 amostras, Figura 4.5.

#### 4.2.9 Testes de resfriamento de amostras

Em função da impossibilidade de executar testes para verificar a influência da velocidade de resfriamento dos cabeçotes fundidos na linha de produção no surgimento das discontinuidades, foram criados procedimentos para simular diferentes resfriamentos em amostras de tamanho reduzido. Para a realização destes testes, foram vazadas três amostras

utilizando-se a mesma liga empregada na linha de produção, cuja composição foi descrita na Tabela 1.

As três amostras foram vazadas em proveta cônica de 40 mm de diâmetro por 70 mm de altura, confeccionadas em aço H13 na empresa Nematik, o mesmo aço utilizado no molde para produção dos cabeçotes em questão, conforme representado na Figura 4.19.

Antes dos testes, essa proveta era aquecida por 30 minutos, com a utilização de um maçarico, da mesma forma que são aquecidos os moldes de produção antes que ocorra o vazamento da peça.

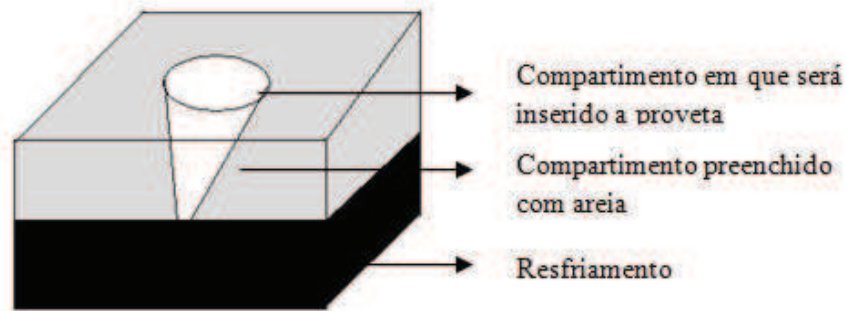
No primeiro procedimento, a amostra foi vazada na proveta aquecida, porém inserida em um molde construído em madeira, em formato cúbico, com 120 mm de lado, com uma cavidade idêntica à da proveta, para que a mesma fosse encaixada no molde, além de estar preenchido com areia, a fim de simular as condições reais de vazamento, onde há a presença de machos de areia que diminuem a velocidade de resfriamento. Esse dispositivo é representado na Figura 4.19.

**Figura 4.19 - Representação da proveta para vazamento em aço H13**



Fonte: Autor

Figura 4.20 - Molde construído em madeira, preenchido por areia misturada em resina



Fonte: Autor

Após ser vazada, a amostra foi deixada ao ar, para resfriamento, e logo depois removida da proveta.

No segundo procedimento, além da utilização do dispositivo descrito anteriormente, após o vazamento a amostra foi colocada em sistema de resfriamento a água, empregado para o resfriamento na linha de produção dos cabeçotes. Neste sistema, a vazão de água é contínua e é de 30L/s.

No terceiro procedimento, a amostra era vazada somente na proveta, e resfriada ao ar.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análises químicas

Conforme descrito na seção 4.2.1, as composições químicas de regiões o cabeçote com a existência de descontinuidade, foram verificados resultados dentro da especificação, conforme Tabela 2.

**Tabela 2 - Composição química encontrada em amostra do cabeçote fabricado contendo a descontinuidade**

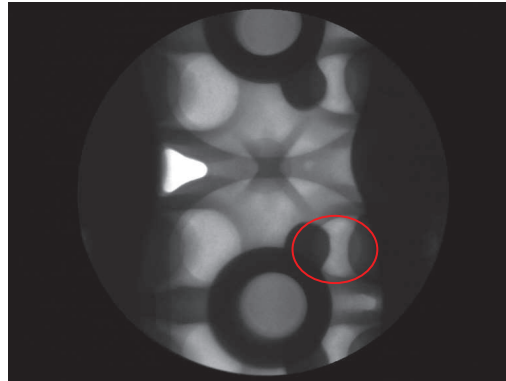
Grupo de liga	Composição química em partes de massa em %										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Sr
AlSi6Cu4	6,51	0,55	3,58	0,42	0,24	0,21	0,70	0,08	0,04	0,16	0,029

Fonte: Autor

### 5.2 Raios-x

De acordo com os procedimentos descritos na seção 4.2.2, a descontinuidade no cabeçote foi localizada por meio do equipamento de raios-X, e obteve-se a imagem detalhada da mesma, conforme Figura 5.1. A partir dessa imagem foi possível obter a localização exata da descontinuidade para que a peça fosse cortada de maneira correta para extração das amostras.

**Figura 5.1 - Imagem da região da descontinuidade obtida via ensaio de raios-x**



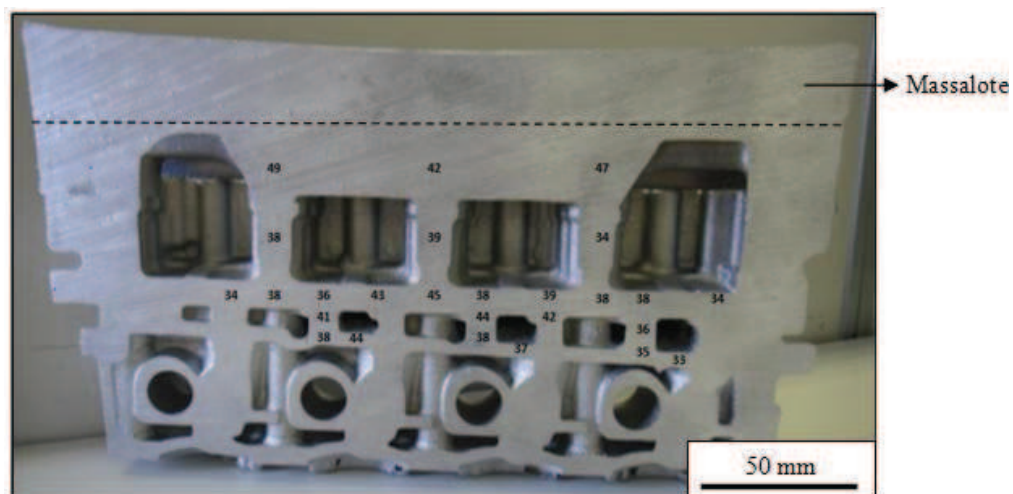
Fonte: Autor

### 5.3 Metalografia

Foi realizada medição de espaçamento dendrítico, obtendo-se o valor de espaçamento entre os braços dendríticos localizados nos pontos conforme Figura 5.2 .

Observa-se que os valores para os espaçamentos localizados próximos à região do massalote e na região da descontinuidade são maiores que os demais. Isso se deve ao fato de a solidificação ocorrer por último no massalote e na região da descontinuidade, o que faz com que se tenha dendritas maiores e, conseqüentemente, espaçamentos dendríticos maiores.

**Figura 5.2 Resultado da medição de espaçamento interdendrítico de peça apresentando descontinuidade**



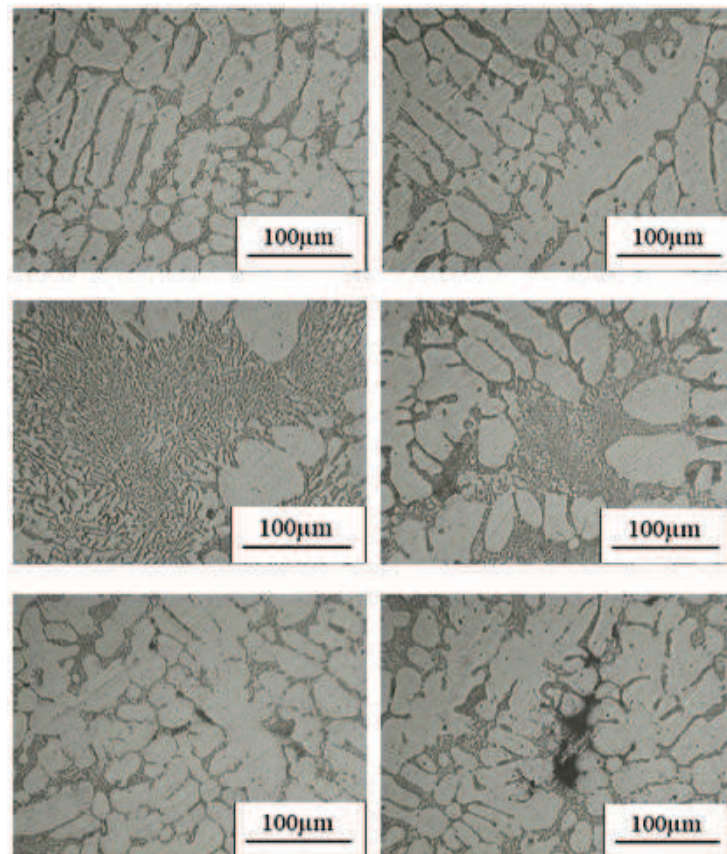
Fonte: Autor



Na sequência, a amostra que contém a descontinuidade obtida a partir do corte da peça, Figura 4.9, foi levada ao microscópio ótico para visualização da microestrutura na região das descontinuidades e suas proximidades. Os resultados obtidos a partir da visualização com microscópio ótico e aumento de 100X são mostrados na Figura 5.3.

Observa-se uma evolução da estrutura, que parte na primeira e segunda figuras de uma estrutura dendrítica convencional para o tipo de liga utilizado, que passa a apresentar segregação de silício na terceira e quarta figuras, e logo em seguida um vazio na quinta e sexta figura, caracterizado pela ausência de material na região dos contornos de grão.

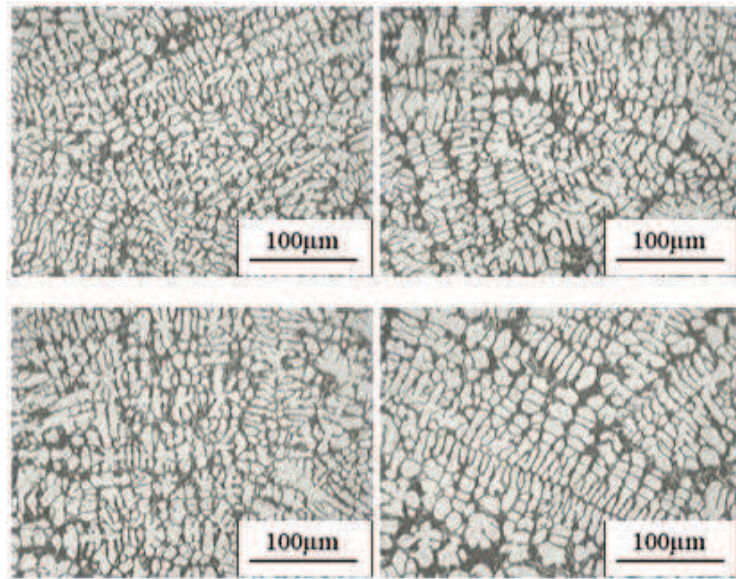
**Figura 5.3 - Resultado da visualização da microestrutura e da descontinuidade em microscópio ótico**



Fonte: Autor

A partir da amostra utilizada para análise química, conforme Figura 4.5, realizou-se a preparação da mesma conforme item 4.2.3, e ao ser levada ao microscópio ótico foi observada a presença de microestrutura característica de ligas em alumínio silício hipoeutéticas, ou seja, microestrutura dendrítica, sem presença de demais características, conforme Figura 5.4.

Figura 5.4 – Visualização de microestrutura da liga utilizada no processo de fundição



Fonte: Autor

#### 5.4 Microdureza

A Tabela 3 apresenta os valores de dureza encontrados para as 10 medições feitas nos entornos de uma descontinuidade.

Tabela 3 - Valores de dureza encontrados em 10 medições

Dureza (HV) - Carga: 50g										
Ensaio n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dureza (HV)	88	88	89	87	90	87	88	91	90	91
Média (HV)	88,9									

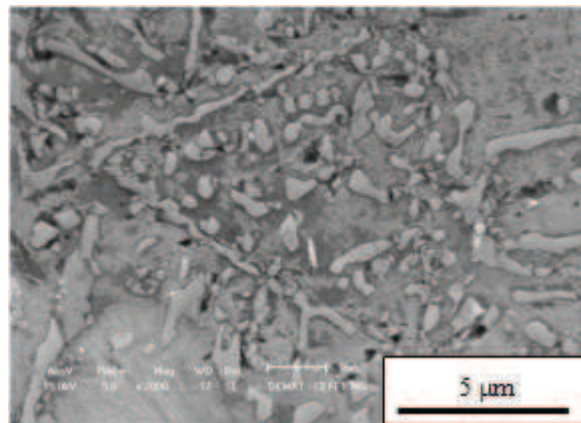
É possível observar que os valores de dureza encontrados atendem à especificação conforme colocado no item 4.2.5, e, além disso, são homogêneas na região próxima à descontinuidade.

## 5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por meio de microscopia eletrônica de varredura, conforme descrito no item 4.2.6, possibilitou o registro de imagens na região da descontinuidade e em seus entornos.

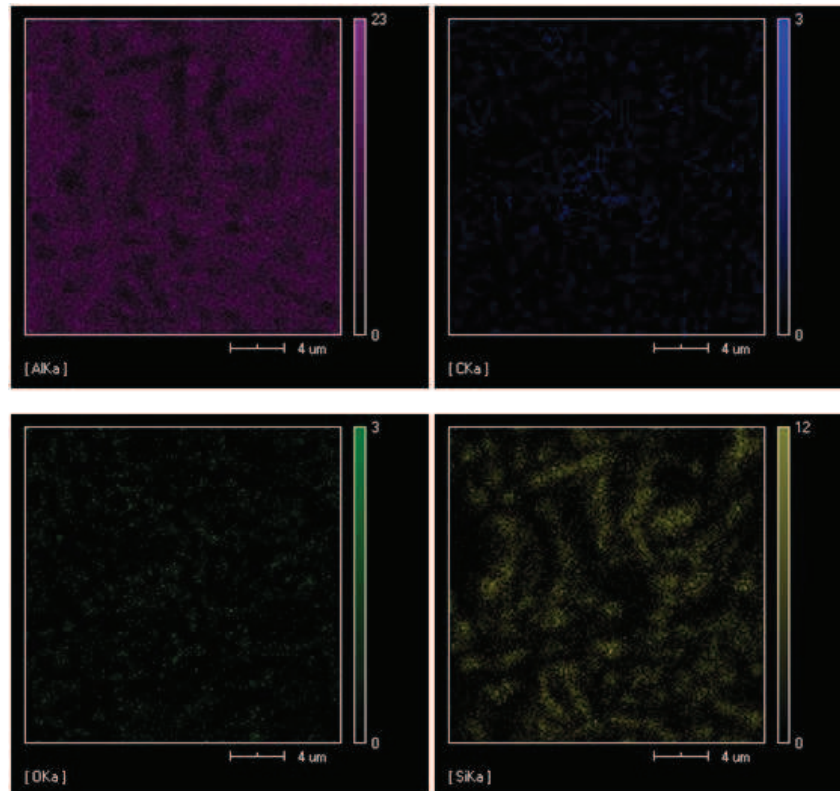
Nas regiões onde se obteve as imagens, realizaram-se, também, análises químicas qualitativas. Na Figura 5.5, pode-se observar a microestrutura típica de ligas alumínio-silício hipoeutéticas, com matriz em alumínio e dendritas em silício, e na Figura 5.6 são observadas as análises químicas qualitativa dessa mesma região, onde a cor roxa representa o elemento alumínio, a cor azul o carbono, a cor verde representa o oxigênio e a cor amarela o silício.

**Figura 5.5 – Microestrutura mostrando matriz em alumínio com estrutura dendrítica em silício**



Fonte: Autor

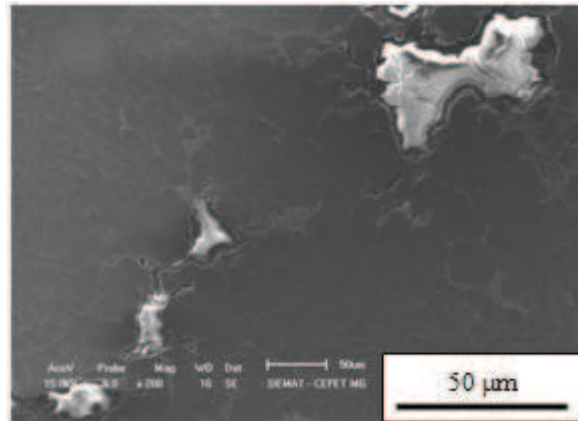
Figura 5.6 - Análise química qualitativa mostrando os principais elementos constituintes da região analisada



Fonte: Autor

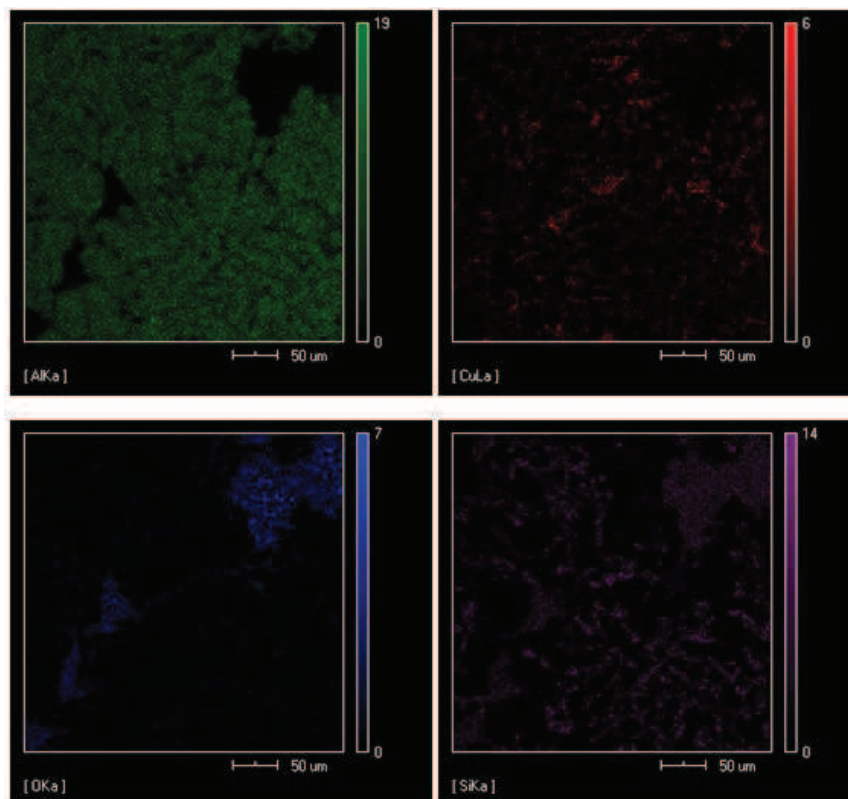
Já na Figura 5.7, já bem ao redor da descontinuidade, observa-se a presença de uma camada caracterizada como óxido de silício, como se pode notar no resultado decorrente da análise química qualitativa na Figura 5.7, onde a cor verde representa o elemento alumínio, a cor vermelha o elemento cobre, a cor azul o elemento oxigênio e a cor roxa o elemento alumínio.

**Figura 5.7 - Microestrutura mostrando matriz em alumínio com filme caracterizado conforme análise química**



Fonte: Autor

**Figura 5.8 – Análise química qualitativa mostrando os principais elementos constituintes da região analisada, destacando-se a presença de Si e O na região do filme, o que caracteriza óxido de silício**

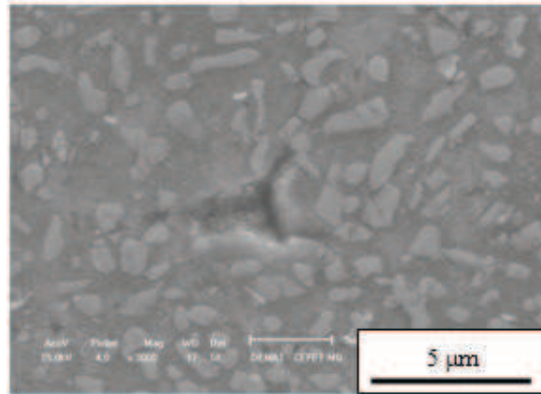


Fonte: Autor

Finalmente, a Figura 5.9 mostra a presença da descontinuidade investigada, ou seja, a presença de um vazio na região. Vazio este cercado pelos elementos verificados na análise

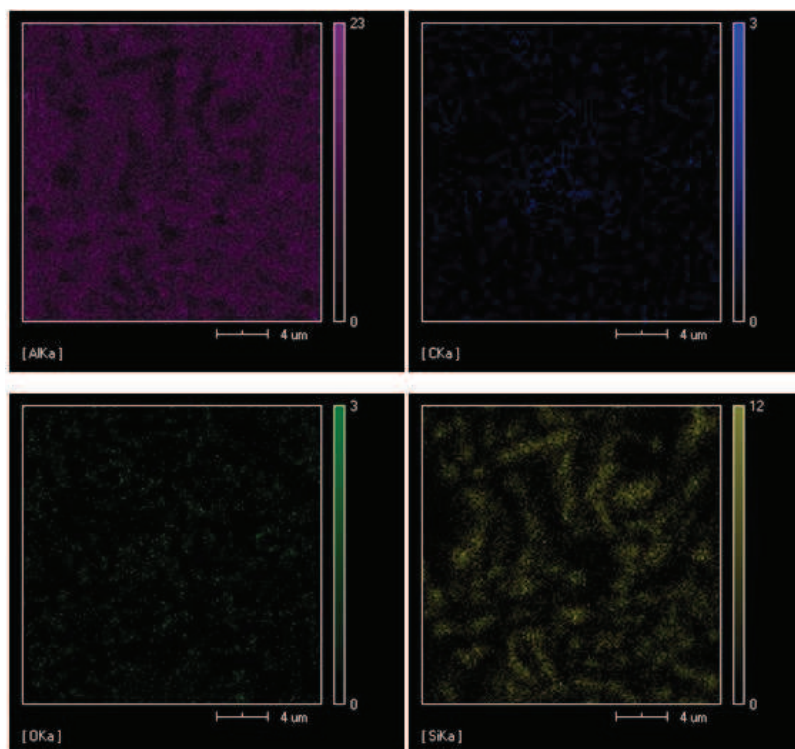
química qualitativa descrita na Figura 5.10. Os elementos principais são o alumínio, na matriz, identificado pela cor roxa, o carbono na cor azul, o oxigênio na cor verde e o silício na cor amarela.

**Figura 5.9 - Microestrutura mostrando descontinuidade presente, na forma de um vazio, cercada por matriz em alumínio com dendritas em silício**



Fonte: Autor

**Figura 5.10 - Análise química quantitativa mostrando os principais elementos constituintes na região analisada**



Fonte: Autor

## 5.6 Medições de Temperatura nos moldes

As medições de temperatura no molde durante a produção normal de cabeçotes fundidos foram realizadas de acordo com o procedimento descrito no item 4.2.7. Foram realizadas 10 medições em cada um dos 04 (quatro) lados que compõe a molde, ou seja, nas laterais correspondentes à região de escape e admissão do cabeçote, e nos blocos de fundo conforme assinalados na Figura 3.1.

Pode ser observado na Tabela 4 que as temperaturas se mostram homogêneas em todas as regiões medidas do molde onde foram vazados os cabeçotes de motor, variando entre 443° e 514°. Porém, observa-se que na lateral de admissão as temperaturas encontradas são maiores.

**Tabela 4 - Valores das temperaturas encontradas no molde**

<b>Temperaturas (°C)</b>				
	Lateral Escape	Lateral Admissão	Bloco de fundo 1	Bloco de fundo 2
	471	513	481	445
	501	503	472	470
	514	510	483	443
	504	490	471	479
	498	488	485	443
	486	490	444	479
	462	486	450	471
	474	490	472	488
	497	502	459	485
	494	500	460	487
<b>Média</b>	490	497	468	469

Fonte: Autor

## 5.7 Medições de Densidade da Liga

De acordo com o procedimento descrito no item 4.2.9, as medições de densidade referente às 10 amostras foram realizadas, Figura 4.5.

As amostras foram recolhidas em turnos de trabalho diferentes.

Os resultados das medições são apresentados na Tabela 5, e é possível verificar que todas as amostras estavam dentro do limite especificado mínimo de 2,53 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 5 - Valores das densidades encontradas nas amostras analisadas**

<b>Amostra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	2,65
2	2,70
3	2,68
4	2,66
5	2,70
6	2,69
7	2,70
8	2,68
9	2,67
10	2,70
Média	2,68

Fonte: Autor

Através dos valores encontrados, observa-se que a densidade é homogênea para todas as amostras, variando entre 2,65g/cm<sup>3</sup> e 2,70g/cm<sup>3</sup>, estando dentro da faixa recomendada, que é de densidade mínima de 2,53 g/cm<sup>3</sup>.



## 5.8 Medições de Temperatura da Liga

De acordo com o procedimento descrito no item 4.2.8, realizou-se as 10 medições de temperatura do banho, e observou-se que nas 10 medições o banho se encontrava dentro da faixa de temperatura especificada, ou seja, entre 730 e 770°C, Tabela 6.

**Tabela 6 - Valores das temperaturas do banho**

<b>Número da medição</b>	<b>Valor da temperatura (°C)</b>
1	738
2	742
3	743
4	765
5	739
6	755
7	742
8	749
9	746
10	750
Média	747

Fonte: Autor

Através da tabela, pode-se observar que a temperatura varia entre 738° e 765°C, dentro do especificado.

## 5.9 Testes de resfriamento de amostras

Para as três amostras vazadas e resfriadas, conforme descrito no item 4.2.10, obteve-se três corpos-de-prova com aproximadamente a mesma dimensão, e mesmo formato, conforme Figura 5.11.

**Figura 5.11 - Amostras obtidas após vazamento e resfriamento**



Fonte: Autor

Para a primeira amostra, vazada em molde de areia e resfriada ao ar, foi feito um corte longitudinal, onde se obteve duas partes com dimensões aproximadamente iguais, como pode ser visto na Figura 5.12.

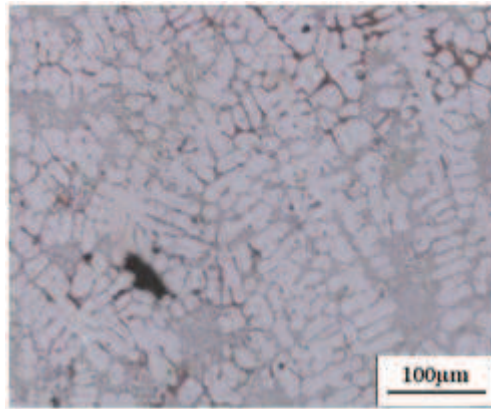
Além disso, preparou-se a amostra para ensaio metalográfico, conforme item 4.2.3, e obtiveram-se imagens exibindo poucas descontinuidades distribuídas em sua extensão, de acordo com a Figura 5.13, que se apresentaram semelhantes à microestrutura mostrada na Figura 5.3, onde se encontram as micrografias da peça, próximo a região da descontinuidade.

**Figura 5.12 - Amostra obtida após vazamento em proveta embutida em molde de areia e resfriada ao ar**



Fonte: Autor

**Figura 5.13 - Micrografia referente à primeira amostra vazada em proveta embutida em molde de areia e resfriada ao ar. Reagente: HF 0,5%**



Fonte: Autor

Já a segunda amostra, que foi vazada utilizando-se o mesmo procedimento da primeira, porém empregando o mesmo sistema de resfriamento para a produção dos cabeçotes, em água corrente a aproximadamente 30 L/s, é exibida, após corte longitudinal na Figura 5.14.

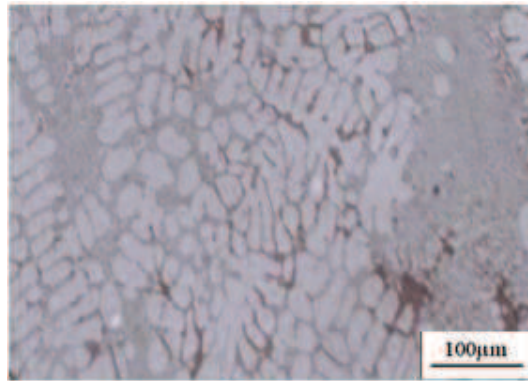
Preparou-se a amostra para ensaio metalográfico, obtendo-se imagens que apresentam microestrutura característica do cabeçote, mostrado na Figura 5.3. Essa microestrutura porém, se comparada a microestrutura obtida para a primeira amostra, apresentou quantidade considerável de descontinuidades, Figura 5.15.

**Figura 5.14 - Amostra obtida após vazamento em proveta embutida em molde de areia e resfriada em água corrente**



Fonte: Autor

**Figura 5.15 - Micrografia referente à segunda amostra vazada em proveta embutida em molde de areia e resfriada em água corrente. Reagente: HF 0,5%**



Fonte: Autor

A terceira amostra que foi vazada utilizando-se somente a proveta, sem a utilização do molde em areia, e resfriada ao ar, também, foi cortada longitudinalmente, conforme Figura 5.16.

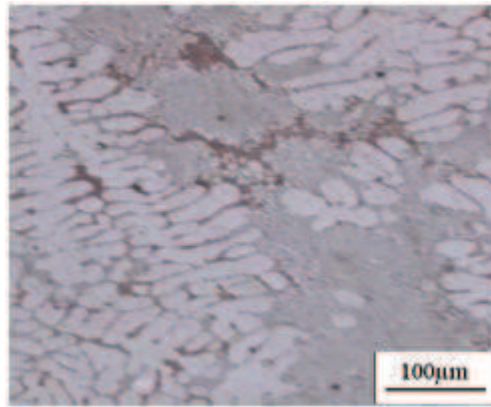
Preparou-se a amostra para ensaio metalográfico, conforme item 4.2.3, e obteve-se imagens apresentando microestrutura característica do cabeçote produzido, Figura 5.3, com grande formação de descontinuidades em sua extensão, conforme Figura 5.17.

**Figura 5.16 - Amostra obtida após vazamento em proveta e resfriada ao ar**



Fonte: Autor

**Figura 5.17 - Micrografia referente à segunda amostra vazada em proveta e resfriada ao ar. Reagente: HF 0,5%**



Fonte: Autor

## 4 CONCLUSÕES

Em função dos resultados, não se estabeleceu relação entre o aparecimento das descontinuidades com variação de composição química da liga.

Considerando a análise microestrutural da amostra, pode-se observar a evolução da microestrutura a partir de um ponto distante da descontinuidade até chegar-se à mesma. Foi observado que a microestrutura se inicia como típica de ligas hipoeutéticas, ou seja, com presença de eutético e dendritas, e logo após apresenta segregação de silício à medida que a imagem aproxima-se da descontinuidade, sugerindo relação da mesma com a presença da descontinuidade.

Em função dos resultados da medição de microdureza, observou-se que a mesma está de acordo com os padrões requeridos pela norma DIN EN-1706 (1997).

A seguir, passando-se à análise via microscopia eletrônica de varredura, foi constatado que a região próxima à descontinuidade contém óxido de silício, reiterando o resultado encontrado durante a análise por microscopia ótica.

Realizou-se também a medição de densidade da liga utilizada no vazamento, através da qual foram verificados valores uniformes para as dez amostras medidas, o que permite concluir que a densidade não está relacionada à descontinuidade.

Prosseguiu-se com análise de temperatura da liga e dos moldes. Para a liga, encontraram-se temperaturas uniformes, o que permite concluir que a mesma não contribui para a formação e desenvolvimento da descontinuidade.

Para os moldes, encontraram-se temperaturas homogêneas em todos os lados do molde, porém as temperaturas eram mais altas na lateral de admissão, que é próxima do local de ocorrência da descontinuidade.

Finalmente, quando se simulou três condições de vazamento para observar a formação ou não da descontinuidade, constatou-se a formação de descontinuidade quando a mesma é resfriada em água, o que sugere que a lateral de admissão, que apresentou maiores temperaturas nas medições de temperatura do molde, troca grande quantidade de calor com a água (fato que acontece na linha de produção), o que pode levar à segregação de silício em um só local,

devido ao brusco resfriamento, que não permite que o silício se “dissipe” adequadamente na formação de estrutura eutética homogênea através da nucleação da microestrutura no resfriamento. Além disso, mostrou-se que quando as amostras são resfriadas ao ar, as mesmas não apresentaram a descontinuidade, fato que reforça a grande importância e influência do meio de resfriamento utilizado na formação da microestrutura e no surgimento ou não de descontinuidades.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AURAS, A; MORO, N. **Processos de Fabricação: Fundição**. Disponível em: <<http://www.norbertocefetsc.pro.br/fundicao.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2011.
  
2. ALUINFO. **Estudo de Caso Mostra as Vantagens do Novo Equipamento da Buhler**. Disponível em: < <http://www.aluinfo.com.br/novo/carat-estudo-de-caso-mostra-as-vantagens-do-novo-equipamento-da-buhler>>. Acesso em: 15. nov. 2011.
  
3. ALUINFO. **Fundição sob pressão**. Disponível em: <<http://www.aluinfo.com.br/novo/materiais/fundicao-sob-pressao>>. Acesso em: 15. nov. 2011.
  
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. West Conshohocken, 2008.
  
5. BORGES, M. **Fundição**. Disponível em: <[http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont\\_html/fundicao.htm](http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/fundicao.htm)>. Acesso em: 26. out. 2011.
  
6. BOTTREL, C. **Materiais Metálicos Para Engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992.
  
7. BRADASCHIA, C. **Fundição de Ligas de alumínio**. São Paulo: ABM, 1993.
  
8. BUDINSKI, K. **Engineering Materials: Properties and Selection**. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
  
9. COUTINHO, T. **Metalografia de Não Ferrosos: Análise e Prática**. São Paulo: Edgar Blucher, 1980.
  
10. CUSTOM PART NET. **Shell Mold Casting**. Disponível em: <<http://www.custompartnet.com/wu/shell-mold-casting>>. Acesso em: 15. nov. 2011.



11. GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **EN 1706: Aluminum and aluminum alloys – Castings: Chemical composition and mechanical properties.** Berlim, 1997.
12. DUFFY, J. **Modern Automotive Technology.** EUA: The goodheart, 1994.
13. FERREIRA, J. **Tecnologia da Fundição.** 3 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.
14. FUOCO, R. **Ligas de Alumínio Fundidas.** Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/64227656/Ligas-de-Aluminio-Fundidas>>. Acesso em: 14. nov. 2011.
15. GILARDONI. **NDT Scanner.** Disponível em: <<http://website.gilardoni.it/pdf/ndtscanner.pdf>>. Acesso em: 21. mar. 2012.
16. INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA. **Utilização de Moldações Cerâmicas no Fabrico de Ferramentas Metálicas.** Disponível em: <<http://www.ipb.pt/~jrocha/Moldcomp%20versao%20final%20do%20lino.pdf>>. Acesso em: 15. nov. 2011.
17. ITALTERM. **Produtos.** Disponível em: <<http://www.italterm.com/item.php?prod=6>>. Acesso em 01. abr. 2012.
18. MACINTYRE, A. J. **Equipamentos industriais e de processo.** Rio de Janeiro: LTC, 1997.
19. METGRAPHITE. **Desgaseificação.** Disponível em: <<http://www.metgraphite.com.br/desgaseificacao1.htm>>. Acesso em: 26. out. 2011.
20. METTLER TOLEDO. **Produtos e Soluções.** Disponível em: <<http://br.mt.com/br/pt/home.html?sem=07090123>>. Acesso em: 5. abr. 2012.
21. MICROCONSULT. **Quantometers and Chemical Analysis Equipment.** Disponível em: <[http://www.microconsult.it/en\\_Quantometri%20analisi%20chimiche.htm](http://www.microconsult.it/en_Quantometri%20analisi%20chimiche.htm)>. Acesso em: 21. mar. 2012.

22. MINIPA. **Produtos**. Disponível em:  
<[http://www.minipa.com.br/Caracteristicas.aspx?ID\\_Sub\\_Categoria=62&ID=459](http://www.minipa.com.br/Caracteristicas.aspx?ID_Sub_Categoria=62&ID=459)>. Acesso em: 01. abr. 2012.
23. MOLDAÇÃO DUNAS. **Macharia em Shell**. Disponível em:  
<<http://www.mdunas.com.br/macharia.htm>>. Acesso em: 16. nov. 2011.
24. RETÍFICA STANDARD LTDA. **Usinagem do Motor**. Disponível em:  
<<http://www.retificastandardltda.com.br/usinagem.htm>>. Acesso em: 14. nov. 2011.
25. SANTOS, D. **Automatização do Processo de Abertura e Fechamento em Moldes Permanentes em Fundição por Ação de Gravidade**. Disponível em:  
<<http://www.scribd.com/doc/52197583/8/Figura-04-Corte-de-uma-matriz-para-fundicao-sob-pressao>>. Acesso em: 23. out. 2011.
26. UFU, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Processos de Fundição**. Disponível em:<[www.moodle.ufu.br/.../Fundicao/PROCESSOS\\_DE\\_FUNDICAO.pdf](http://www.moodle.ufu.br/.../Fundicao/PROCESSOS_DE_FUNDICAO.pdf)>. Acesso em: 25. out. 2011.
27. VETIMEC. **Gravity Die Casting**. Disponível em:  
<<http://www.vetimec.it/conchigliegravita.html>>. Acesso em: 14. nov. 2011.
28. VOGEL, A.R.; MENDHAM, J.; DENNEY, R.C.; BARNES, J.D.; THOMAS, M. **Análise Química Quantitativa**. São Paulo: LTC. 2002.