

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MICRODUREZA DE UMA LIGA DE AL-SI PROCESSADA POR FUNDIÇÃO SOB ALTA E BAIXA PRESSÃO

Raphaelson BRITO (1); Sandro QUEIROGA (2); José MACEDO (3)

IFAM - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Av. Governador Danilo Areosa S/N
Campus Manaus Distrito Industrial; CEP 69075-350, Manaus/ AM

(1) e-mail: rapaelson@gmail.com (2) e-mail: linoqueiroga@yahoo.com.br

(3) UEA - Universidade Estadual do Amazonas, Avenida Darci Vargas, 1200, Parque 10 de Novembro,
CEP 69065-020, Manaus/AM. e-mail: jotamateriais@yahoo.com.br

RESUMO

Neste trabalho é feito um estudo de partes estruturais de motores de motocicletas feitas de ligas de Al-Si produzidas por processos de fundição por alta e baixa pressão. São correlacionadas as propriedades mecânicas do material com suas microestruturas. Para isto utilizou-se ensaio metalográfico, microscopia ótica e ensaios de microdureza. Através deste estudo é possível ter melhor compreensão dos fenômenos metalúrgicos ocorridos durante o processo de fundição, da ação dos refinadores de grão, dos efeitos das elevadas taxas de resfriamento sobre a microestrutura e propriedades mecânicas da liga. Nos resultados observa-se uma variação da microestrutura e microdureza desde a superfície do injetado ao centro da liga. A resistência mecânica do material pode ser aumentada por meio de adição de nucleantes, altas taxas de extração de calor e tratamento de solubilização e envelhecimento artificial ou natural, produzindo precipitação de fase intermetálica. Para carcaças de motores de motocicletas são utilizadas ligas semelhantes às dos cabeçotes, mas são produzidas por processo de fundição por alta pressão. Peças produzidas por este tipo de processo são submetidas a altas pressões e taxa de resfriamento muito alto. Elas não são submetidas a processo de tratamento térmico posterior para aumento de resistência mecânica, pois, este processo produz uma microestrutura mais refinada, com grãos menores. O projeto apresentou resultados consistentes e de interesse para a comunidade científica e educacional.

Palavras-chave: Ligas de alumínio, Fundição, Microdureza.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa analisar as microestruturas desenvolvidas em partes estruturais de motores de motocicletas que são produzidas por ligas Al-Si manufaturadas por processos de fundição por alta e baixa pressão e a partir destes valores relacionar a microestrutura do material com suas propriedades mecânicas.

O alumínio, por suas excelentes propriedades físico-químicas, apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não ferroso mais consumido no mundo. As ligas Alumínio e Silício perfazem aproximadamente 90% de todos os produtos fundidos de alumínio. A razão para a ampla utilização desta série deve-se à atrativa combinação entre propriedades mecânicas e a excelente fundibilidade, baixo coeficiente de expansão térmica e alta resistência ao desgaste ligado com os outros elementos tais como o cobre, magnésio e níquel (HAMN, TALIB, DAUD, 1996). As propriedades das ligas alumínio-silício são fortemente dependentes do processo de fundição empregado, das adições de elementos de liga para modificação do eutético, da estrutura granulométrica, da morfologia do silício primário e do tratamento do metal líquido. Sabe-se que para a maioria das condições de solidificação, a morfologia dendrítica é a característica dominante da microestrutura. Microestruturas dendríticas finas em fundidos, caracterizadas pelos espaçamentos dendríticos, são reconhecidas pelas propriedades mecânicas superiores, particularmente quando se considera a resistência à tração e ductilidade.

O silício também tem a vantagem de não reduzir a boa resistência à corrosão apresentada pelo alumínio, aumentando inclusive a resistência à corrosão em ambientes mediantemente ácidos.

Um refino da estrutura dessas ligas é obtido usando elevadas taxas de resfriamento mediante processos de solidificação rápida, onde podem ser conseguidas taxas de resfriamento na ordem de 10^4 - 10^8 K/s (K/s = Kelvin / Segundo), contrariamente às fundidas convencionalmente, onde são conseguidas taxas na ordem de 10^{-2} a 10^2 K/s. Ligas solidificadas rapidamente caracterizam-se por apresentar estruturas refinadas,

homogêneas sem segregações, fases em estado metaestável ou amorfo que as torna materiais interessantes com excelentes combinações de propriedades físicas e mecânicas (PERES *et al*, 2005).

2. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é um metal de pequena resistência mecânica. A resistência à tração de alumínio puro é cerca de 6 kg/mm² em média. Entretanto, o alumínio comercial tem resistência à tração de 9 a 14 kg/mm². O Alumínio puro tem maior resistência à corrosão que a maioria de suas ligas. Por isso, para certas aplicações onde se torna necessário combinar qualidades mecânicas especiais com boa resistência à corrosão utiliza-se o “*cladding*” da liga que é proteger a liga mais adequada colocando a entre capas de alumínio puro (ABAL, 2006).

2.1. Propriedades mecânicas

Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas; exemplos incluem a liga de alumínio a partir da qual uma asa de avião é construída e o aço do eixo da roda de um automóvel. Em tais situações é necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural a partir do qual ele é feito de tal maneira que qualquer resultante deformação não será excessiva e a fratura não ocorrerá. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Importantes propriedades mecânicas são: resistência mecânica, dureza, ductilidade e rigidez (CALLISTER, 2008).

Os ensaios permitem a determinação mecânica que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000).

2.2. Aumento de resistência da microestrutura

Os mecanismos de aumento de resistência para metais são: diminuição do tamanho do grão, encruamento e formação de ligas por solução sólida (CALLISTER, 2008).

As propriedades mecânicas estão intimamente ligadas com a microestrutura do material, quanto menor o tamanho de grão, maior a área da superfície do grão e consequentemente maior a densidade de discordância e menor será o movimento das discordâncias durante a deformação (HILL, 1973).

Uma técnica para aumentar a resistência e endurecer o metal consiste na formação de ligas com átomos de impurezas que entram por meio de solução sólida intersticial. Um átomo com granulação fina (que possui grãos pequenos) é mais duro e mais resistente do que um que possui uma granulação grosseira (grãos maiores). O que tem uma granulação fina possui uma maior área de contornos de grão dificultando o movimento das discordâncias.

O encruamento é o fenômeno pelo qual o metal dúctil se torna mais duro e resistente quando submetido a uma deformação plástica. Também nos oferece um menor tamanho de grão e com isso temos uma maior resistência mecânica.

2.3. Fundição de ligas de alumínio

A fundição é o processo de fabricação que visa transformar metais e ligas metálicas em peças de uso industrial tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido que é vazado no interior de um molde cuja cavidade é conformada de acordo com a peça que se deseja produzir (CHIAVERINI, 1986).

Na maioria dos casos a fundição é o processo inicial, pois permite a obtenção de peças com os formatos definidos ou possibilita a produção de lingotes para uso posterior em processos de conformação mecânica. O fator que diferencia os processos de fabricação é a confecção do molde que pode ser molde de areia ou molde permanente (coquilha) e a forma como o metal líquido toma a forma da cavidade do molde, que pode ser: por gravidade, baixa pressão, alta pressão. Neste trabalho serão abordados os processos de fabricação em molde permanente moldados por alta pressão (HPDC- *high pressure die casting*) e baixa pressão (LPDC – *low pressure die casting*).

2.3.1. Fundição sob pressão

Consiste em forçar o metal líquido, sob pressão, a penetrar na cavidade do molde, chamado *matriz*. Esta é metálica, portanto de natureza permanente e, assim, pode ser usada por inúmeras vezes.

Devido à pressão e à conseqüente alta velocidade de enchimento da cavidade do molde, o processo possibilita a fabricação de peças de formas bastante complexas e de paredes finas que os processos por gravidades não permitem.

A matriz é geralmente construída em duas partes, que são hermeticamente fechadas no momento do vazamento do metal líquido. Ela pode ser utilizada fria ou aquecida à temperatura do metal líquido, o que exige materiais que suportam essas temperaturas.

Peças produzidas por este tipo de processo são submetidas a altas pressões e altas taxas de resfriamento, elas não são submetidas a processo de tratamento térmico posterior para aumento de resistência mecânica, pois este processo produz uma microestrutura mais refinada, com grãos menores resultando assim em um aumento de sua resistência mecânica.

2.3.2. Processo por baixa pressão (LPDC)

No processo de fundição por baixa pressão o alumínio toma a forma da cavidade do molde por ação de baixa pressão externa de ar ou nitrogênio da ordem de 0,3 kgf/cm². A Figura 1 esquematiza este processo, o alumínio líquido fica armazenado em forno a temperatura da ordem de 750 °C, ar externo é introduzido no forno e o alumínio líquido é forçado a tomar a cavidade do molde (MILLER, MAIJER, 2006) .

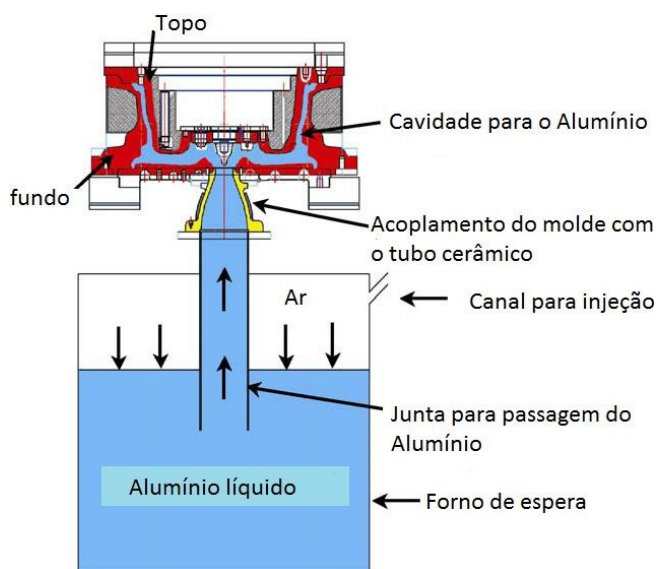


Figura 1 – Ilustração do processo de fundição por baixa pressão - LPDC (MILLER, MAIJER, 2006)

As peças brutas de fusão possuem baixa resistência mecânica devido a sua microestrutura dendrítica grosseira. A sua resistência mecânica poderá ser aumentada por meio de adição de nucleantes, altas taxas de extração de calor e tratamento de solubilização e envelhecimento artificial ou natural, produzindo precipitação de fase intermetálica.

Elementos de ligas são adicionados para modificar a microestrutura dendrítica, esta estrutura no estado não-modificado exibe a fase Si com morfologia acicular na forma de grandes plaquetas. No entanto, essa morfologia pode ser controlada em seu crescimento por modificadores (Na, Sr) que permitem um refino da estrutura eutética e pode melhorar a ductilidade das peças fundidas. A adição de modificadores diminui a temperatura de nucleação e de crescimento na interface sólido/líquido, em razão do refino da estrutura eutética, o que força a fase Si a adotar uma morfologia fibrosa e irregular (CHADWICK, 1972).

2.3.3. Agentes nucleantes

A intensidade da nucleação controla a estrutura final e conseqüentemente as propriedades do sólido formado. Cada grão de uma estrutura cristalina cresce a partir de um único núcleo sendo, portanto, o número de núcleos estáveis disponíveis no volume de líquido que irá determinar o tamanho de grão final. Um agente nucleante é uma substância adicionada ao líquido para agir como um catalisador da nucleação. A eficiência

do agente nucleante aumenta à medida que produza menores ângulos de contatos entre a partícula nucleante, e o núcleo sólido que está se formando. Além disso, um agente nucleante eficiente deve ser o mais estável possível, sendo insolúvel no líquido, e apresentar um máximo de área superficial (GARCIA, 2001).

2.3.4. Solubilização/ envelhecimento

As ligas Al-Si-Cu respondem a esse tratamento térmico de solubilização aumentando sua resistência mecânica. Primeiramente, o metal é aquecido uniformemente até cerca de 500°C, sendo que a temperatura exata depende da liga em particular. Isto ocasiona a dissolução dos elementos de liga na solução sólida (tratamento de solução). Então, segue-se um resfriamento rápido, geralmente em água, que previne temporariamente que estes constituintes se precipitem. Esta condição é instável e, gradualmente, os constituintes precipitam-se de maneira extremamente fina (somente visível através de potentes microscópios), alcançando, assim, o máximo efeito de endurecimento (envelhecimento). Em algumas ligas isto ocorre, espontaneamente, depois de alguns dias (envelhecimento natural), enquanto que em outras ocorre através de reaquecimento por algumas horas a cerca de 175°C (tratamento de precipitação) (CALLISTER, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O metal utilizado para análise microestrutural e de microdureza é o fabricado por ligas de Al-Si. São analisadas ligas processadas por baixa pressão após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, ligas antes do tratamento térmico e ligas processadas por alta pressão.

3.1. Ensaio Metalográfico

Para o ensaio metalográfico as amostras precisam ser embutidas, lixadas e polidas, seguindo a norma NBR30284. Foram utilizadas lixas com granulometria de 400, 600, 800, 1000 e 1200. A variedade da granulação é para evitar arranhões permanentes ao fim do lixamento. Durante o processo de lixamento a posição da amostra foi alternada variando em 90° a cada 20 segundos, evitando a predominância de arranhões em apenas uma direção. Durante este processo houve fluxo constante de água para resfriar a peça.

Para o polimento foi utilizado alumina de 1 μ , 0,3 μ e 0,05 μ , como elemento polidor. Após ser polida a amostra foi submetida a um ataque químico com nital 2% com 2 ml de HNO₃ e 98 ml de álcool (95% ou absoluto), agindo durante 20 segundos na superfície da amostra. Após a microestrutura passar pelo processo de revelação foi utilizado um microscópio metalúrgico Olympus de modelo BX51M com aumento de 100X até 1000X. As imagens das microestruturas foram analisadas usando o Motican 100 software. E para o teste de microdureza Vickers o equipamento em uso foi o microdurômetro HM-100 com 0,025kgf.

3.2. Medidas de Microdurezas

Para o ensaio da microdureza utilizou-se um microdurômetro Mitutoyo modelo HM-100 versão 5.0 com uma carga de 1kgf. Foram realizadas medidas na amostra desde o metal de base até o ponto de fusão. Cinco medidas foram realizadas da superfície até o centro da amostra em medidas distantes 1mm.

3.3. Metodologia

Na Figura 2, vê-se o fluxograma que mostra, quais foram os passos utilizados no projeto. Partiu-se da escolha do material de pesquisa, depois houve o processo de preparação da amostra do material escolhido – partes de motores de motocicleta fabricado com ligas de Al-Si – com o lixamento e o polimento para levá-la aos ensaios de microscopia óptica e de microdureza. Feito o ensaio metalográfico comparou-se com as microestruturas padronizadas encontradas no *ASM handbook* (GEORGE, VANDER VOORT, 2004) caso não houvesse correspondência entre elas o processo seria refeito. O próximo passo é de ensaio de microdureza: novamente foi feita comparação com o material já catalogado no *ASM handbook* (GEORGE, VANDER VOORT, 2004), desta vez, relacionou-se as microdurezas de baixa pressão (sem tratamento), baixa pressão (com tratamento) e alta pressão - como pode ser visto na Figura 3.

Ao correlacionar as três microdurezas, como mostra a Figura 3, observou-se que as ligas processadas por baixa pressão com e sem tratamento térmico possuem maior dureza que as ligas processadas por alta pressão. Esperava-se que a maior dureza estivesse na liga processada por alta pressão, depois a liga processada por baixa pressão com tratamento térmico, com a segunda maior dureza, e por último a liga processada por baixa pressão sem tratamento térmico com a menor dureza.

Para aumentar a resistência de metais é necessário: diminuição do tamanho do grão, encruamento e formação de ligas por solução sólida (CALLISTER, 2008).

Não foi possível definir a composição química do material, portanto, a explicação encontrada para que as ligas processadas por baixa pressão com e sem tratamento térmico possuam maior dureza que as ligas processadas por alta pressão é a diferença na quantidade de elemento químico para carcaças dos motores e cabeçotes fazendo com que suas microdurezas também sejam diferentes.

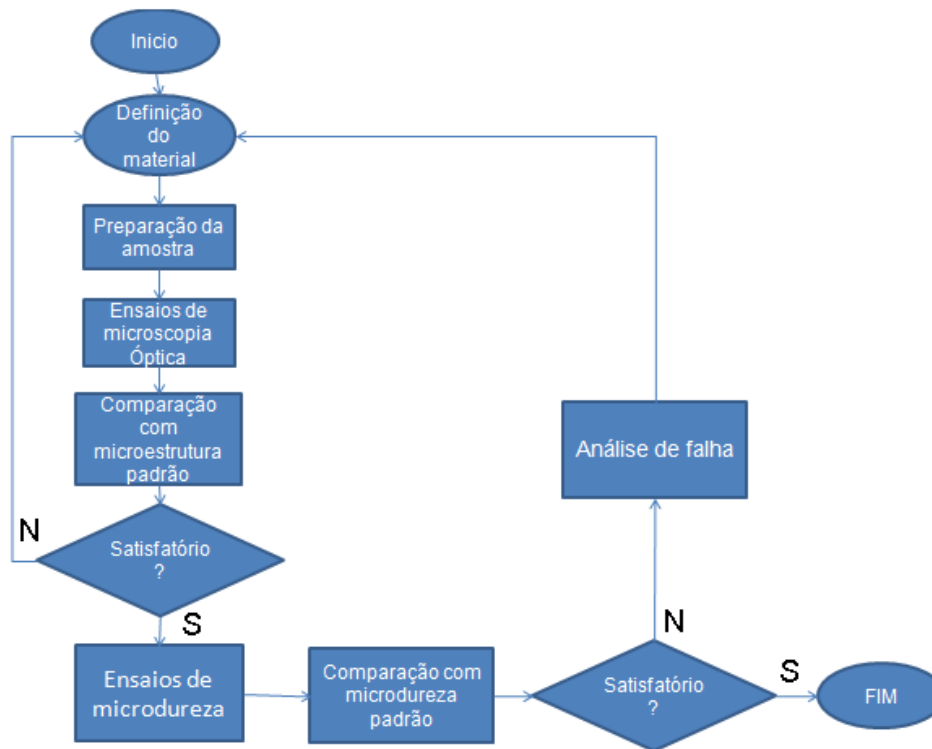


Figura 2 – Fluxograma que ilustra a metodologia utilizada no projeto

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio de microscopia óptica, observou-se que a microestrutura da liga processada por baixa pressão antes e após tratamento térmico está isenta de porosidades e inclusões de óxidos (ver Figuras 4 e 5). Já a microestrutura da liga processada por alta pressão apresenta porosidade que ocorre devido à falha de preenchimento do material ou microrechupe. Essa falha de preenchimento ocorre durante a solidificação do metal que se inicia pelas partes que estão em contato com as paredes do molde ou na parte superior, onde o metal está exposto ao ar.

O metal ao passar do estado líquido para o estado sólido diminui seu volume, desse modo aparecem porosidades na região central, nos lingotes, ou nas peças: que neste caso são peças de motores, carcaças e cabeçotes que são chamadas de rechupe. As marcas de chupagem ou rechupe geralmente aparecem sob pontos de acúmulo de material (pontos de variação da superfície da peça, próximo a nervuras e castelos de fixação), como uma depressão na superfície da peça moldada se a contração do material não for compensada. Espessuras de parede diferentes numa mesma peça podem ocasionar qualquer tipo de *rechupe*, tanto devido ao alívio de tensões, como à concentração de tensões no moldado (CALLISTER, 2008).

As medições de microdurezas vistas na Tabela 1 e Figura 3 revelaram que a microdureza diminui desde a superfície até o centro. Isso ocorre devido à microestrutura superficial ser mais refinada devido à maior extração de calor, exceto a liga processada por alta pressão.

Tabela 1. Medição da microdureza realizada na amostra.

POSIÇÃO (mm)	BAIXA PRESSÃO (SEM TRATAMENTO)	BAIXA PRESSÃO (COM TRATAMNTO)	ALTA PRESSÃO
1	90,8	126,55	70,55
2	86,75	122,3	66,4
3	80,4	121,6	68,8
4	83,65	120,2	70,25
5	79,75	115,7	73,1

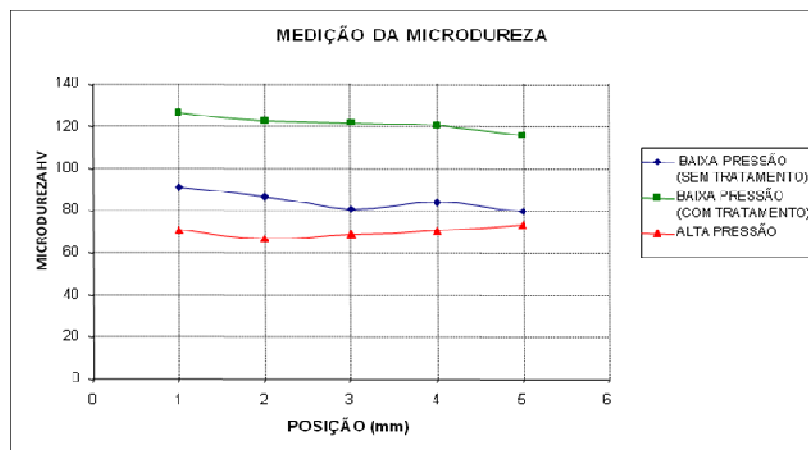


Figura 3 – Gráfico de comparação entre as microdurezas das ligas processadas por baixa pressão (com e sem tratamento térmico) e alta pressão.

É possível observar pela granulometria, que a microestrutura da Figura 6 é mais refinada que a microestrutura da Figura 4 quando comparamos o tamanho do grão, no entanto sua microdureza é menor. A resistência mecânica é inversamente proporcional ao tamanho de grão, quanto menor o tamanho de grão maior é a resistência mecânica do material (CALLISTER, 2008). Esta contradição deve-se ao fato da composição química das ligas serem diferentes.

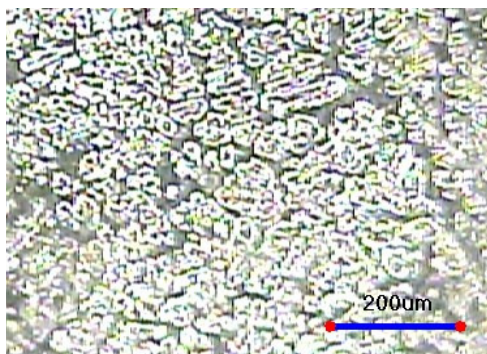


Figura 4. Micrografia de amostra fundida por baixa pressão antes de tratamento térmico

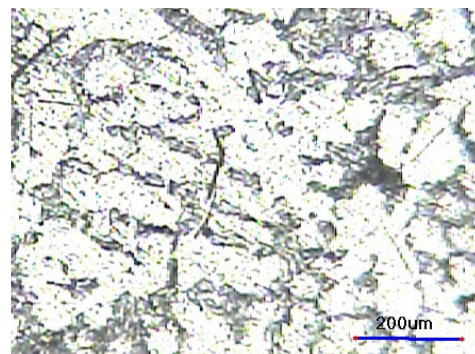


Figura 5. Micrografia de amostra fundida por baixa pressão após tratamento térmico

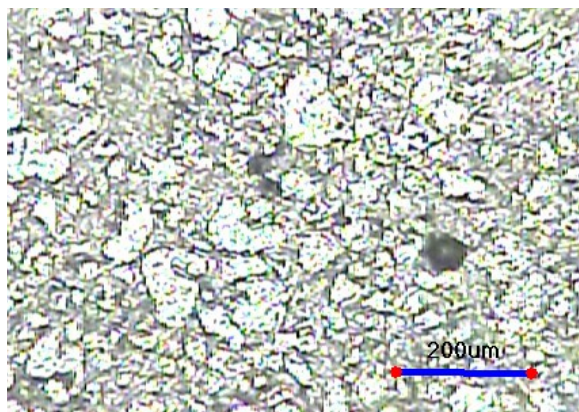


Figura 6. Micrografia de amostra fundida por alta pressão.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível avaliar as propriedades mecânicas de partes estruturais de motores de motocicletas fundidas por processos de baixa pressão e alta pressão. A microdureza sofre uma redução desde a superfície até o centro da peça, exceto a fundida por alta pressão. A microestrutura da liga processada por alta pressão é mais refinada que a fundida por baixa pressão sem tratamento térmico, mas possui microdureza inferior isso devido às ligas possuir composição química diferente. A microestrutura da liga processada por baixa pressão não apresenta inclusão de óxidos e micro-trinca isto caracteriza continuidade de propriedade mecânica. Já a liga processada por alta pressão apresenta poros que podem ser falhas de preenchimento ou micro-rechue, defeitos estes que tendem a diminuir a resistência mecânica.

6. AGRADECIMENTOS

À UEA e ao IFAM por cederem os laboratórios para realização deste trabalho. À FAPEAM pelo auxílio através do Programa de Apoio a Iniciação Científica (PAIC) e pelo financiamento de passagens.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023** : Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 2002a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: Características físico químicas**. São Paulo, 2004. 81p.

CHADWICK, G. A. **Metallography of phase transformation**. Londres: Butterworth, 1972. 302 p.

CHIAVERINI, V. **Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo, 1986. Editora McGraw-Hill LTDA.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ªEd. 2008. Editora Edgard Blucher.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo 2001, Editora da Unicamp, 399p.

GARCIA, A.; SPIM, J.; A., SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, 2000. Editora LTC S.A.

GEORGE, F.; VANDER, VOORT. **Metallography and Microstructures**. ASM Handbook , 2004. The Volume was prepared under the direction of the ASM Handbook Committee, V.9.

HAMN, M.; TALIB, LA.; DAUD, A.R. **Effect of element additions on wear property of eutectic aluminium-silicon alloys.** 1996, WEAR, Vol 194, p.54-59.

HILL, R. E. R. **Princípios de Metalurgia Física.** 2 ed. Rio de Janeiro 1973. Editora Guanabara Dois, 775 p.

MILLER, A.E.; MAIJER, D.M. 2006. **Investigation of erosive-corrosive wear in the low pressure die casting of aluminum A356.** Materials Science and Engineering , Vol. 435–436, p. 100–111.

PERES, M.M.; PINTO, C. P.; RIOS, C. T.; KIMINAMI, C. S.; BOTTA, W. J.; BOLFARINI, C. jan./dez. 2005. **Caracterização da liga de alumínio A356 solidificada rapidamente por centrifugação e fundida em areia.** Projeções. Vol. 23, p. 55-62. São Paulo, 2005.