

A IMPORTÂNCIA DA INTERDISCIPLINARIDADE PARA A FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO: Teoria, pratica de laboratório e simulação computacional integrados em trabalho de conclusão de curso

Resumo: *O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do modo de resfriamento, durante a solidificação no processo de fundição, na microestrutura de uma liga de alumínio da série 300 e estudar suas prováveis consequências para as propriedades mecânicas do material. As amostras foram fundidas em quatro tipos de moldes diferentes, sendo eles: molde de areia furânica com massalote, molde aberto de areia furânica, molde aberto de areia verde e molde metálico. Todas as amostras foram analisadas em sua forma bruta de fusão, sem a aplicação de tratamentos térmicos. Evidenciou-se que a amostra fundida em molde metálico foi a que apresentou uma microestrutura mais refinada o que, teoricamente, permite a obtenção de melhores propriedades mecânicas. Estes resultados experimentais comprovam que, uma maior velocidade de solidificação proporciona uma estrutura mais refinada e, possivelmente, um melhor comportamento mecânico.*

Palavras-chave: *Fundição, Solidificação, Liga de alumínio, Microestrutura, Propriedades mecânicas.*

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), o alumínio é o metal mais jovem a ser utilizado em escala industrial. Seu uso foi impulsionado pela necessidade de se fabricar produtos leves e resistentes. Além de possuir um baixo peso específico, possui outras propriedades favoráveis, como elevada resistência à corrosão, boa condutividade elétrica e térmica, propriedade antimagnética e capacidade de reciclagem.

Comercialmente, entretanto, o alumínio puro é pouco utilizado em virtude de sua baixa resistência mecânica e moldabilidade inferior (BRADASCHIA, 1989). A adição de elementos de liga permite uma melhora nas características de fundição e propriedades mecânicas do metal. Neste trabalho, foi estudada uma liga fundida da série 300, conforme nomenclatura definida pela ANSI e Aluminum Association. Esta série abrange ligas de alumínio contendo o silício como elemento de liga principal e adição de cobre.

Sabe-se que a microestrutura de um material afeta profundamente suas propriedades mecânicas. Assim, o estudo acerca da microestrutura formada é essencial para o entendimento e aprimoramento dos parâmetros de processo. Este trabalho considera a avaliação da influência de um único parâmetro: o modo de resfriamento.

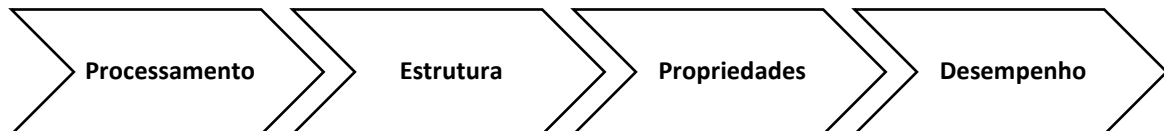
Desenvolveu-se um experimento onde quatro amostras foram fundidas em diferentes moldes: molde de areia furânica com massalote, molde aberto de areia furânica, molde aberto de areia verde e molde metálico.

A caracterização da liga em sua forma bruta de fusão, após a etapa de solidificação e preparação das amostras, foi realizada através de microscopia ótica. Por fim, foi desenvolvida uma análise simulação de solidificação indicando as prováveis propriedades mecânicas formadas como consequência da estrutura encontrada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir do conhecimento em Ciência dos Materiais e Tecnologia da Fundição, obtidos ao longo do curso de Engenharia Mecânica e, também, através da revisão bibliográfica e estudos desenvolvidos ao longo do ano letivo de 2015, para o trabalho de conclusão de curso da aluna Mariana Ribeiro Mendes. A produção do material adequado, exige a observação de quatro etapas sequenciais, as quais estão apresentadas abaixo, na Figura 1.

Figura 1 – Os quatro componentes da ciência e engenharia de materiais



Fonte: CALLISTER, 2012

O trabalho experimental foi desenvolvido conforme especificado a seguir:

- **Processamento:** Consiste no processo de fabricação do lingote, nesse caso, a fundição. Não foram realizados tratamentos térmicos na peça. Logo, essa etapa consistiu na preparação do modelo, confecção do molde, fusão do material, vazamento dentro dos diferentes moldes e retirada do corpo de prova de dentro do molde.
- **Estrutura:** Nesta etapa foi executada a preparação das amostras retiradas dos corpos de prova fundidos para a análise metalográfica.
- **Propriedades:** A partir da microestrutura formada, foram feitas considerações empíricas, acerca das possíveis propriedades mecânicas formadas em função da estrutura observada.
- **Desempenho:** Consiste na etapa final do experimento, onde os corpos de prova serão submetidos a ensaios mecânicos e/ou outros ensaios a serem definidos durante a parte experimental, para se verificar, na prática, a resposta de cada corpo de prova às solicitações externas, e, portanto, comparar com os dados empíricos e concluir o experimento. Neste trabalho, não foram realizados ensaios mecânicos.

2.1 Composição química

A composição química da liga Al-Si-Cu fundida, foi identificada através do espectrômetro de emissão ótica modelo Foundry Master Xpert da Oxford Instruments, pertencente ao Laboratório de Fundição do CEFET-MG.

Conforme Silva (2013), o espectrômetro permite a identificação dos elementos presentes no material através da excitação do corpo de prova por meio de uma tensão elétrica. Foram realizadas três queimas no corpo de prova e, a média aritmética das composições encontradas em cada uma das queimas, indica a composição química do material. A composição química encontrada através do espectrômetro está indicada na figura 2.

Portanto, esta é uma liga Al-Si-Cu, parte de um grupo de ligas da série 300, segundo a classificação da Aluminum Association e da ANSI.

Figura 2 – Composição química da liga

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	85,6	7,90	1,48	3,80	0,0894	0,419	0,445	0,0205
2	85,7	7,95	1,46	3,77	0,0859	0,413	0,414	0,0228
3	85,3	8,01	1,69	3,83	0,0965	0,410	0,394	0,0174
Ave	85,5	7,95	1,54	3,80	0,0906	0,414	0,418	0,0202

	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0,0339	0,0267	0,0002	> 0,0200	0,0001	0,108	0,0044	0,0010
2	0,0315	0,0308	0,0002	> 0,0200	0,0001	0,103	0,0052	0,0009
3	0,0299	0,0281	0,0002	> 0,0200	< 0,0001	0,131	0,0080	0,0008
Ave	0,0318	0,0285	0,0002	> 0,0200	< 0,0001	0,114	0,0059	0,0009

	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0,0037	0,0011	< 0,0008	0,0042	0,0008	0,0088	< 0,0003	0,0074
2	0,0058	0,0011	< 0,0008	0,0043	0,0012	0,0084	< 0,0003	0,0069
3	0,0064	0,0009	< 0,0008	0,0027	0,0003	0,0087	< 0,0003	0,0010
Ave	0,0053	0,0010	< 0,0008	0,0037	0,0008	0,0086	< 0,0003	0,0051

	Ag	Hg	In	Sb	P	Ce	La
1	< 0,0001	< 0,0010	0,0040	< 0,0050	< 0,0020	0,0024	0,0064
2	< 0,0001	< 0,0010	0,0027	< 0,0050	< 0,0020	0,0009	0,0055
3	< 0,0001	< 0,0010	< 0,0005	< 0,0050	< 0,0020	< 0,0006	0,0024
Ave	< 0,0001	< 0,0010	0,0022	< 0,0050	< 0,0020	0,0011	0,0048

Fonte: Laboratório de fundição CEFET-MG

2.2 Procedimento experimental

Todo o trabalho experimental foi desenvolvido nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais, no campus I do CEFET-MG. A preparação do material, confecção dos moldes e fundição da liga foram realizadas no laboratório de Fundição. A preparação da amostra para análise metalográfica e microscopia ótica foi realizada no laboratório de Metalografia. Além do trabalho experimental, foi desenvolvida, em parceria com a empresa MAGMA Engenharia do Brasil Ltda., uma simulação computacional dos processos de fundição realizados, a qual permitiu a visualização de diversos parâmetros do processo como o resfriamento do metal dentro do molde, a velocidade de escoamento, os tamanhos de grão obtidos e espaçamentos interdendríticos formados. Os resultados obtidos por esta simulação serão apresentados no item 3.2.

2.3 Fundição das amostras

A fundição do material foi realizada em um forno a gás GLP de cadinho, marca Grion, cuja a temperatura de vazamento utilizada foi de 690 °C. O modelo utilizado para a confecção dos moldes em areia, tem dimensões, em milímetros, conforme apresentado na figura 3.

Figura 3 – Dimensões do modelo

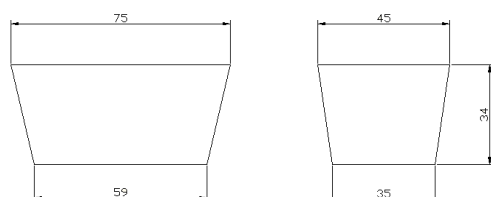
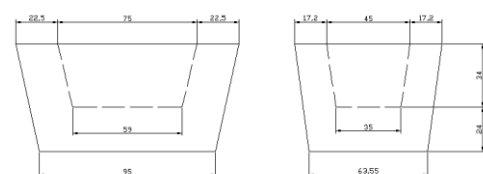


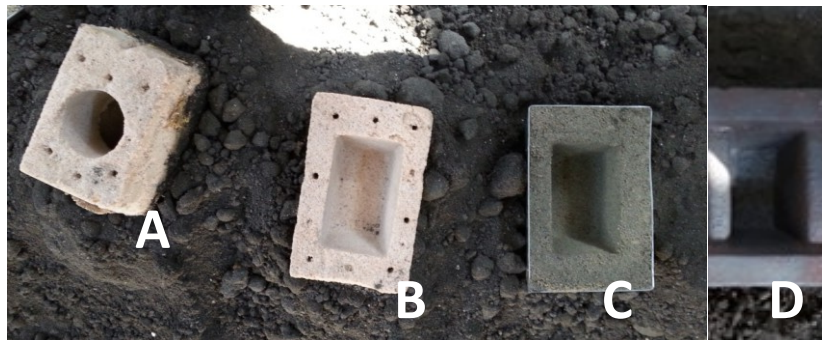
Figura 4 – Dimensões dos moldes



Ao todo, foram avaliados quatro moldes: areia furânica com massalote, areia furânica aberto, areia verde aberto e molde metálico. A figura 4 indica as dimensões, em milímetros, dos moldes. O massalote utilizado para fundição no molde de areia furânica tem formato cilíndrico e foi posicionado centralmente sobre a cavidade do molde. Suas dimensões foram 58 mm de altura por 38 mm de diâmetro, calculadas utilizando-se o critério volumétrico para cálculo de massalote. A figura 5, apresenta os moldes em areia confeccionados, sendo eles:

- Molde A: areia furânica com massalote;
- Molde B: areia furânica aberto;
- Molde C: areia verde;
- Molde D: permanente de ferro fundido.

Figura 5 – Moldes



As tabelas 1 e 2 a seguir indicam a composição dos moldes feitos em areia. O endurecimento do molde feito em areia furânica foi realizado através da gasagem com dióxido de carbono (CO₂). O molde em areia verde foi desenvolvido para uma umidade de 3,5%.

Tabela 1 – Composição da areia furânica

Composição do molde de areia furânica	
Areia de sílica – Módulo de finura 45/55AFS	97%
Silicato de sódio	3%

Tabela 2 – Composição da areia verde

Composição do molde de areia verde	
Areia de sílica – Módulo de finura 45/55AFS	86%
Água	3%
Argila (bentonita)	10%
Carvão	1%

As peças finais obtidas pela fundição da liga nos diferentes moldes estão representadas na Figura 6.

Figura 6 – Peças finais obtidas pela fundição



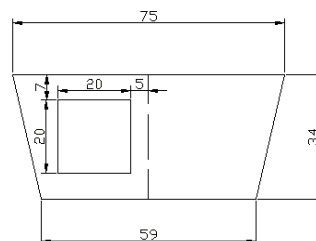
As amostras foram identificadas com letras do alfabeto, de A à D, da esquerda para a direita. Cada letra indica um molde, conforme descrito a seguir:

- Amostra A: molde em areia furânica com massalote;
- Amostra B: molde aberto em areia furânica;
- Amostra C: molde aberto em areia verde;
- Amostra D: molde metálico.

2.4 Metalografia

A análise metalográfica foi realizada em seções quadradas de 20 mm x 20 mm retiradas dos lingotes de A à D, conforme apresentado na figura 7.

Figura 7 – Seção retirada para análise metalográfica



As quatro seções (A à D), foram preparadas por embutimento à frio, seguindo ao lixamento em lixas com granulometrias cada vez menores, variando a direção em cada lixa subsequente em 90°, até que os riscos da lixa anterior tenham desaparecido, cujas granulometrias foram de: 120, 220, 320, 400 e 600. O polimento das amostras foram realizados em feltros próprios para materiais não ferrosos, com pasta de diamante, de: 9µm, 3µm e 1µm. Finalizou-se ataque da superfície, com um algodão embebido numa mistura de ácido clorídrico e nítrico num tempo recomendado de 30 s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microscopia Ótica

De uma maneira geral, observou-se a formação de agulhas cinza claro e, em alguns pontos, estruturas cinza claro arredondadas. Além dessas estruturas, percebe-se a formação de um eutético com coloração mais escura. Segundo Ferrarini (2005), as agulhas e as estruturas arredondadas de coloração cinza claro consistem em uma fase ternária de AlSiFe, enquanto a estrutura escura consiste em um eutético ternário $Al_2Cu-Si-Al$. Ainda de acordo com Ferrarini (2005), o comprimento médio dessas agulhas está diretamente relacionado à depreciação das propriedades mecânicas da liga. Comparando as imagens obtidas para cada amostra, observa-se que as amostras A e B apresentam um grau de refinamento muito semelhante, enquanto a amostra C indica um grau de refinamento levemente superior às anteriores e, por fim, a microestrutura encontrada para a amostra D é a mais refinada do grupo. Assim, pode-se deduzir que as propriedades mecânicas da amostra D são superiores às propriedades das outras amostras. Sabe-se que as agulhas formadas funcionam como um concentrador de tensões, o que prejudica as propriedades da peça. Quanto maiores e mais pontiagudas foram essas agulhas, maior será a concentração de tensão e, portanto, piores serão as propriedades obtidas. Mais uma vez, a amostra D apresenta as melhores características dentre o grupo, sendo que as agulhas formadas em D possuem um comprimento muito menor do que as demais amostras. Além disso, pode-se notar que a amostra A também apresenta bons resultados, uma vez que a fase AlSiFe foi evidenciada sob a forma de estruturas arredondadas e as agulhas formadas, quando comparadas às amostras B e C, mais grossas e menos pontiagudas. Apesar de atuarem como um concentrador de tensões, as agulhas são estruturas muito duras, as quais fornecem à liga uma maior resistência ao desgaste. Dessa forma, o aspecto da fase AlSiFe na amostra A, indica que, provavelmente, esta amostra possui maior resistência ao desgaste. As figuras apresentadas a seguir representam a microestrutura observada, através de um microscópio ótico, para cada uma das quatro amostras estudadas. As figuras 8, 9, 10 e 11 apresentam as amostras vistas ao microscópio ótico com um aumento de 100x. Nessas figuras nos permitem visualizar as diferentes estruturas formadas durante o processo de solidificação e o espaçamento interdendrítico.

Figura 8 – Amostra A: Molde fechado em areia furânica (com massalote). Aumento de 100X

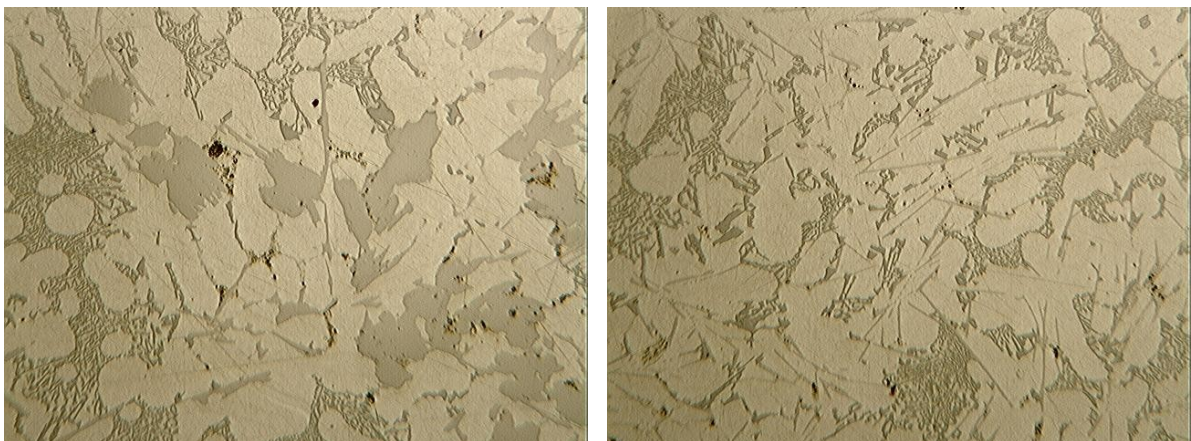


Figura 9 – Amostra B: Molde aberto em areia furânica. Aumento de 100X

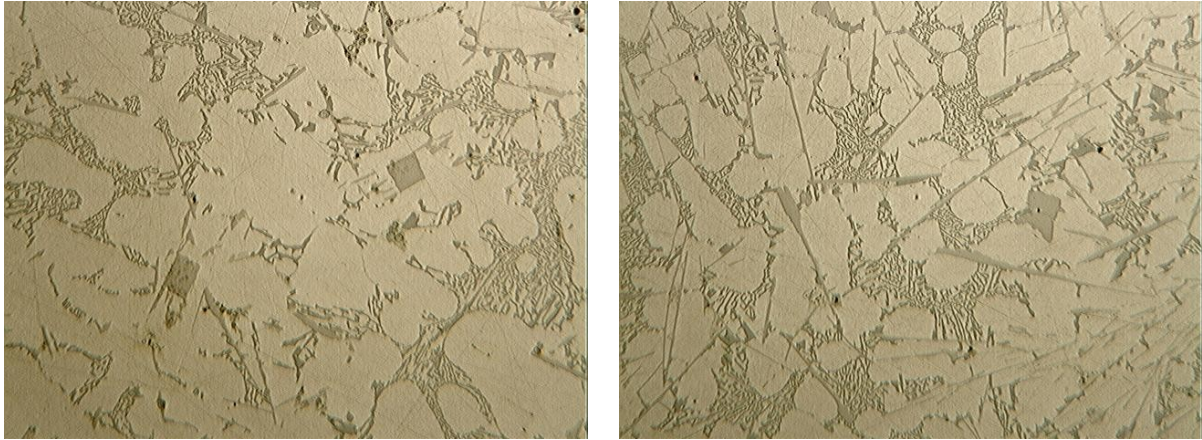


Figura 10 – Amostra C: Molde aberto em areia verde. Aumento de 100X

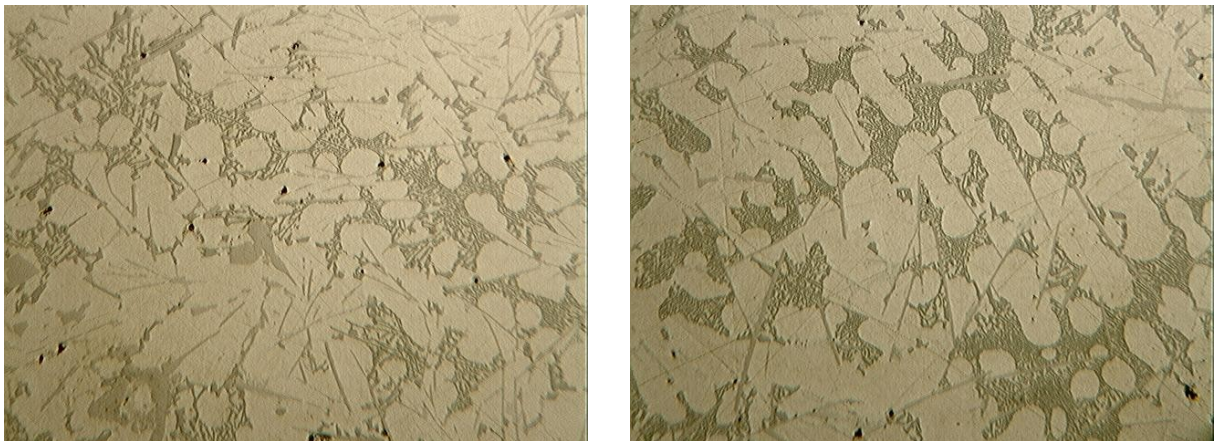
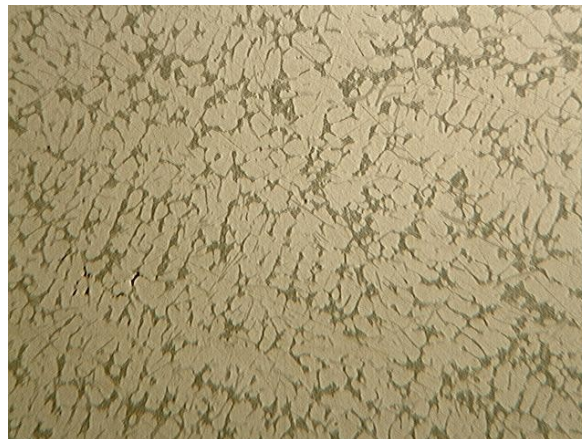


Figura 11 – Amostra D: Molde metálico aberto. Aumento de 100X



3.2 Simulação de Solidificação

As simulações foram desenvolvidas em parceria com a empresa MAGMA Engenharia do Brasil Ltda. e permitiram a visualização do processo de enchimento da cavidade do molde e a solidificação. Além disso, foi possível comparar os resultados obtidos na prática com os resultados empíricos obtidos através da simulação e adquirir novos dados que não foram possíveis de serem obtidos no experimento. As simulações foram desenvolvidas apenas para três das quatro amostras, sendo elas: amostras A, B e C. A simulação da taxa de resfriamento de cada material forneceu o seguinte tempo de resfriamento para cada amostra:

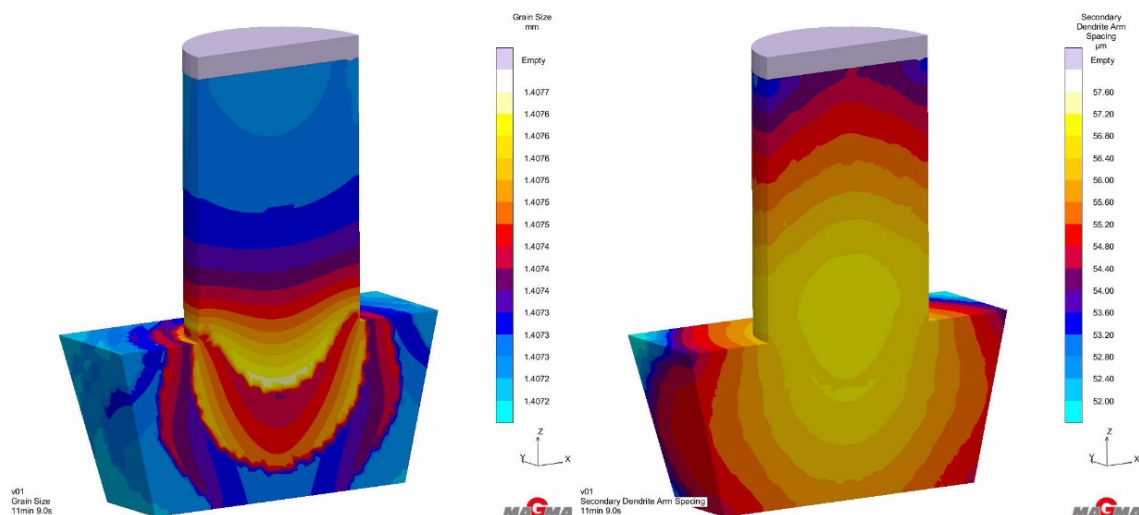
- Amostra A: aproximadamente 10 minutos e 30 segundos;
- Amostra B: aproximadamente 10 minutos e 30 segundos;
- Amostra C: aproximadamente 8 minutos e 30 segundos.

Portanto, conforme já avaliado no experimento prático, o tempo de resfriamento do metal no molde de areia verde é menor do que o tempo de resfriamento em ambos os moldes de areia furânica. Isso ocorre devido à umidade presente na areia verde, a qual permite uma troca de calor mais intensa através do processo de condução. Percebe-se, também, que o tempo de resfriamento entre os moldes de areia furânica não variou de forma significativa, o que indica que a taxa de resfriamento é, em especial, dependente do material do molde, ou seja, o principal meio de transferência de calor do metal é através da condução.

Um aspecto importante avaliado nas simulações de solidificação foi o tamanho dos grãos e espaçamento interdendrítico formado. O refinamento dos grãos e espaçamento interdendrítico permite prever a qualidade das propriedades mecânicas do material. Quanto mais refinados os grãos e menores os espaçamentos interdendríticos, melhor será o desempenho do material fundido.

As figuras 12, 13 e 14 apresentadas a seguir foram obtidas através da simulação de solidificação e representam o tamanho de grão médio ao longo do corpo de prova e os espaçamentos interdendríticos formados dos moldes A, B e C respectivamente.

Figura 12 – Molde A: Tamanho de grão e espaçamento interdendrítico



As figuras confirmam as hipóteses elaboradas e os resultados experimentais obtidos. O tamanho de grão e o espaçamento interdendrítico no molde de areia verde foram maiores que aqueles encontrados nos moldes de areia furânica. Sabe-se que a taxa de resfriamento tem influência direta no refinamento do grão, portanto, como a taxa de resfriamento no molde de

areia verde foi maior, já era esperado que seus grãos fossem mais refinados do que aqueles formados nos moldes de areia furânica.

Figura 13 – Molde B: Tamanho de grão e espaçamento interdendrítico

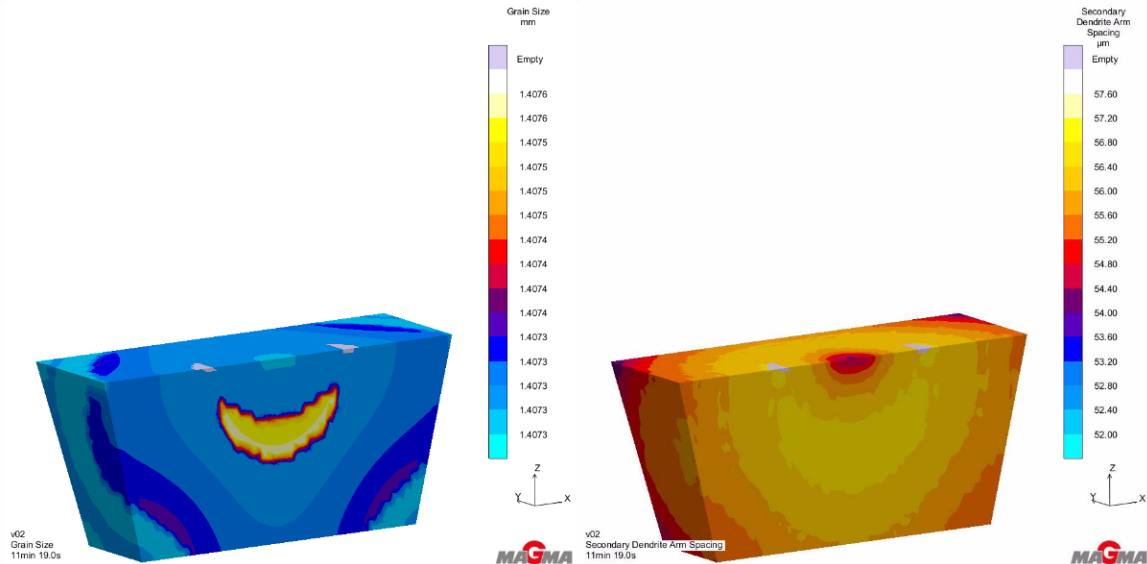
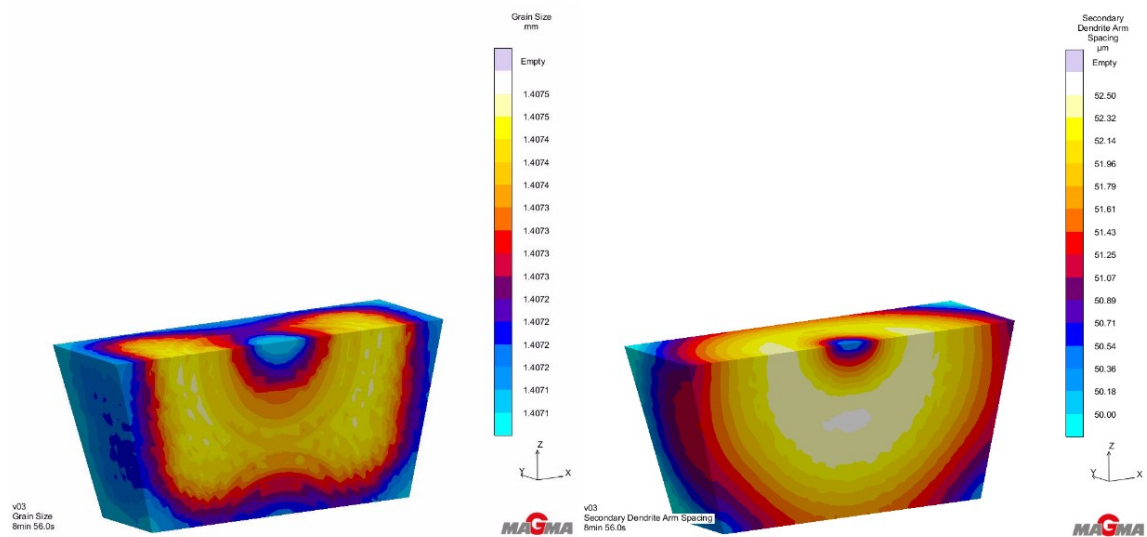


Figura 14 – Molde C: Tamanho de grão e espaçamento interdendrítico



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados experimentais e das simulações apresentados nesse trabalho, permitem as seguintes conclusões:

- Os experimentos demonstram claramente que o modo de resfriamento do material no processo de fundição tem influência direta na microestrutura formada, e teoricamente, nas propriedades mecânicas do material. Quanto maior for a taxa de resfriamento do material, mais refinados serão os grãos e, melhores serão as propriedades mecânicas.
- A maior taxa de resfriamento ocorreu no molde metálico, seguido pelo molde em areia verde e, por fim, os moldes em areia furânica. As microestruturas das amostras dos moldes em areia furânica, com e sem massalote, foram muito parecidas, dessa forma conclui-se que o principal

fator que contribui para o resfriamento, é o material do molde e, portanto, a forma de transferência de calor predominante no processo é a condução. Comparado aos outros moldes, o molde metálico indicou possuir as melhores propriedades mecânicas, por conter grãos mais refinados.

5 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

Agradecimentos

À empresa MAGMA Engenharia do Brasil Ltda pela simulação computacional dos processos de fundição realizados, a qual permitiu a visualização de diversos parâmetros do processo como o resfriamento do metal dentro do molde.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO Brasileira do Alumínio. **Ligas**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>>. Acesso em: 14 jan. 2015.

BRADASCHIA, Clovis *et all*. **Fundição de Ligas Não Ferrosas**. 3 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1989.

CALLISTER, W.D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. 8 ed. São Paulo: LTC, 2012.

FERRARINI, C. F. **Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Si Hipoeutéticas Conformadas por Spray**. Tese de doutorado. São Paulo: UFSCar, 2005.

SILVA, P. S. BOING, D. **Influência do Acabamento da Superfície no Ensaio de Composição Química por Espectroscopia de Emissão Óptica**. Revista da UNIFEBA, v.1, n. 11, jan/jul 2013.

METALOGRAPHIC ANALYSIS OF A CASTING ALLOYS AL-SI-CU WITH DIFFERENT FORMS COOLING

Abstract: *This study aimed to evaluate the influence of the cooling mode, during solidification in the casting process, on the microstructure of a series 300 aluminum alloy and study its presumable consequences for the mechanical properties of the material. The samples were cast in four different types of molds, as follows: closed chemically bonded sand mold, open chemically bonded sand mold, open green sand mold and metallic mold. All samples were analyzed right after casting, without any heat treatments. It was clear that the metallic mold sample showed the most refined microstructure which, theoretically, allows the achievement of better mechanical properties. These experimental results show that a higher solidification rate provides a finer structure and possibly a better mechanical behavior.*

Key-words: Casting, Solidification, Aluminum alloys, Microstructure, Mechanical properties.