

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA A CORROSÃO EM ROTORES DE MOTOBOMBAS FUNDIDOS USANDO LIGAS AISiMg.

Guilherme Ourique Verran

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade do Estado de Santa Catarina
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n – Bairro Bom Retiro
89223-100 – Joinville – Santa Catarina – Brasil
gverran@joinville.udesc.br

Vilmar Luis Rossi

Schneider Motobombas
lab@schneider.ind.br

Ângelo Antônio Verri

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade do Estado de Santa Catarina
mecanicaudesc@ig.com.br

Resumo. A corrosão consiste na degradação dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo ou não estar associada com esforços mecânicos. No caso em estudo (rotores de motobombas) existe a combinação de diversos fatores agressivos ao componente em questão. A idéia de estudar os efeitos das condições de processamento e da qualidade da matéria prima surgiu a partir da ocorrência de corrosão severa em um lote de rotores de motobombas produzidos sob condições normais de fundição em moldes de areia usando a liga AA356. Foram realizados diversos ensaios de campo e desenvolvido um programa experimental em escala de laboratório que permitiram investigar as influências dos parâmetros de fundição, do acabamento superficial e das condições de usinagem, bem como da qualidade da matéria prima, com especial ênfase para os teores dos elementos Cu, Zn e Fe como impurezas, na ocorrência de corrosão em rotores e corpos de prova fundidos sob condições controladas em laboratório e sob condições normalmente utilizadas na indústria, usando as ligas similares à AA356. A resistência à corrosão foi avaliada através da perda em massa após as amostras terem sido submetidas a ensaios de corrosão intergranular realizados de acordo com a norma ASTM G110-92. Os resultados obtidos indicam uma forte influência do elemento cobre no aumento da tendência à corrosão das duas ligas investigadas e uma grande relação entre a ocorrência de corrosão e as condições superficiais das amostras e peças analisadas.

Palavras-chave: ligas de alumínio, fundição, corrosão, composição química, corrosão intergranular.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão em ligas metálicas é um fenômeno muito complexo que envolve a influência de diversos fatores como o ambiente ao qual um componente metálico está submetido, o tipo de liga que constitui este componente, a existência ou não de esforços mecânicos atuando sobre o componente, além de uma série de outros fatores.

A ocorrência de corrosão em peças de alumínio e suas ligas obtidas por processos de fundição, além dos problemas inerentes ao processo de fabricação, pode estar associada com a qualidade da matéria prima de fusão utilizada, indicando a necessidade de controle efetivo não somente do processo, mas também das composições químicas da matéria prima de fusão e do produto.

A bibliografia específica sobre o problema em estudo apresenta poucos artigos que tratam da resistência à corrosão em ligas de alumínio ⁽¹⁻⁵⁾.

No caso das ligas de alumínio é bastante comum a ocorrência de corrosão intergranular. A corrosão intergranular acontece quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grão, fazendo com que ocorra remoção de material à medida que a corrosão se propaga. Para as ligas de alumínio com a presença de cobre a corrosão intergranular ocorre devido a presença de precipitados de CuAl_2 , que são mais nobres que a matriz rica em alumínio e agem como cátodos acelerando a corrosão da região vizinha ao contorno do grão empobrecida em cobre ^(1,6)

Este trabalho aborda a ocorrência de corrosão severa em rotores de motobombas fundidos em moldes de areia usando a liga denominada de 356 segundo a classificação da *Aluminum Association* (AA), cuja composição nominal é Al7Si0,3Mg , tendo sido investigados parâmetros relacionados com os processos de fundição e usinagem, bem como a influência de variações nas composições químicas da liga utilizada.

2. METODOLOGIA

2.1 Levantamento do Problema e Avaliação da Liga Utilizada

A partir da ocorrência de corrosão severa e prematura em rotores de motobombas, foi realizada uma abordagem inicial visando determinar as possíveis causas do problema.

Nesta etapa foram avaliados os procedimentos utilizados na fabricação dos rotores, desde o processo de fundição até a usinagem final das peças em linha de produção. Adicionalmente foram realizadas análises químicas e metalográficas de amostras retiradas de peças que apresentaram corrosão.

Com base no levantamento do problema foi elaborado um programa experimental no qual a única variável foi a composição química da liga, tomando-se como padrões de comparação as ligas comerciais A356 e 356.

Foram avaliadas duas ligas produzidas por uma empresa especializada na fabricação de ligas de alumínio, seguindo as especificações das normas para as ligas A356.1 e 356.1 e uma liga obtida a partir de materiais considerados como sucata do processo de fundição da empresa fabricante da peça em estudo. As composições químicas das ligas investigadas são mostradas na tabela 1.

Tabela 1. Composições químicas das ligas estudadas*

Identificação	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb
A356.1	6,42	0,16	<0,01	<0,01	0,20	<0,01	<0,01	<0,01	0,026	0,005
356.1	6,43	0,35	0,07	0,31	0,21	0,01	0,02	0,05	0,05	0,02
Sucata	6,95	0,38	0,17	0,26	0,16	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02

* percentuais em peso

2.2 Ensaios de Campo

Foram utilizados rotores fundidos sob condições normais de fabricação na indústria e sob condições controladas em laboratório, sendo os mesmos posteriormente usinados de acordo com o procedimento normal da fábrica.

Os ensaios de campo tiveram como objetivo buscar informações práticas, com especial ênfase aos ambientes aquosos, verificando a compatibilidade entre um determinado meio corrosivo e o material do rotor.

Dentre as inúmeras variáveis que poderiam ser utilizadas optou-se por avaliações em condições de ambientes aquosos estáticos (rotores em condições estáticas em determinados ambientes), podendo ser divididos em duas abordagens.

2.2.1 Verificação da Influência da Composição Química da Liga e do Processo de Fundição

Teve como objetivo comparar de forma visual, rotores fundidos usando as ligas 356.1 e A356.1, obtidos sob condições normais de fundição da indústria e sob condições controladas em laboratório.

As amostras foram submetidas às mesmas condições durante um mesmo período de tempo em um tanque com 8000 litros de água da rede, que é utilizada nos ensaios de performance hidráulica de motobombas, sendo esta movimentada, filtrada e tratada com cloro em níveis de pH de 7 ± 1 . Os resultados foram avaliados com base no aspecto superficial da corrosão ocorrida nos rotores e serão apresentados na forma de figuras.

2.2.2 Verificação da Influência do Processamento do Rotor

Utilizou-se como parâmetro de avaliação as condições de usinagem do rotor, variando-se o tipo de fluido de corte, utilizando lubrificantes de corte alternativos como o querosene e álcool, ou usinagem a seco.

Como meio corrosivo utilizou-se água potável da rede de fornecimento (contendo cloro e outros produtos) ou água natural em uma cuba de plástico com capacidade para 2 litros de água. A figura 1 mostra uma vista geral das cubas e dos rotores após os ensaios.



(a) rotores em teste



(b) após ensaios de corrosão

Figura 1. Vista geral dos ensaios de campo para avaliação da resistência à corrosão

Para permitir comparações entre as amostras (rotores) ensaiadas usando as diferentes variáveis testadas, foram estabelecidos diferentes índices de corrosão em função da severidade do ataque corrosivo sofrido pelas diferentes amostras, conforme indicado na tabela 2.

Tabela 2. Índices de corrosão em função da severidade do ataque corrosivo

Índice de Corrosão	Severidade do Ataque
1	Ataque desprezível
2	Ataque médio
3	Ataque severo
4	Ataque muito severo

2.3 Programa de Experiências de Laboratório

Foram realizadas diferentes séries de corridas experimentais nas quais foram variados os percentuais de elementos residuais (contaminantes) considerados prejudiciais quanto a resistência à corrosão, conforme mostra a tabela 3.

Como corpo de prova padrão utilizou-se uma “bolacha” fundida em coquilha por gravidade com diâmetro de 50 mm e espessura de 5 mm, com peso de aproximadamente 30 g e o peso total (bolacha+massalote) de aproximadamente 140 g. Em todas as corridas realizadas foram fundidos 08 corpos de prova.

Tabela 3. Programa de corridas experimentais realizadas em laboratório

Corrida	Identificação da Amostra	% Cu Adicionado (em peso)	% Zn Adicionado (em peso)	% Fe Adicionado (em peso)
01	A1(Liga A356)	-	-	-
02	A2b	0,07	0,07	-
03	A3b	0,11	0,10	-
04	A4b	0,27	0,36	-
05	A5b	0,53	0,72	-
06	A2c	0,07	-	-
07	A3c	0,11	-	-
08	A4c	0,21	-	-
09	A5c	0,51	-	-
10	A6c	1,02	-	-
11	A2z	-	0,35	-
12	A3z	-	0,70	-
13	A4z	-	1,00	-
14	A2f	-	-	1,00

As corridas experimentais foram realizadas um forno elétrico à indução usando cadinho de carboneto de silício com capacidade de carga para aproximadamente 1200 g da referida liga. Após a fusão da liga base, foram adicionados os elementos contaminantes (Cu, Zn ou Fe) e o banho mantido a temperaturas da ordem de $780\pm 10^{\circ}\text{C}$ durante 25 ± 10 minutos para total dissolução dos elementos adicionados. A seguir o metal foi devidamente, desgaseificado e escorificado, e então vazado em temperaturas da ordem de $700^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ na coquilha.

Em todas as corridas foram retiradas amostras para análises químicas via Espectroscopia de Emissão Ótica. A temperatura foi controlada com termopar de imersão tipo K, com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

2.3 Ensaios de Corrosão em Laboratório

Os ensaios de laboratório foram realizados seguindo as recomendações contidas nas normas ASTM G110-92 ⁽⁷⁾, que trata da avaliação da resistência à corrosão intergranular em ligas de alumínio, e ASTM G1-90 ⁽⁸⁾, que descreve os procedimentos para remoção dos produtos de corrosão após o ensaio de corrosão intergranular. Estes procedimentos possibilitaram avaliar e comparar a resistência à corrosão para as diferentes variáveis estudadas, conforme descrito com detalhe em outra publicação ⁽⁹⁾.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Levantamento do Problema e Avaliação da Liga

Os resultados das análises químicas realizadas em três diferentes amostras de rotores corroídos são apresentados na tabela 4, que mostra variações significativas nos teores dos elementos

considerados como prováveis responsáveis pela ocorrência de corrosão nestes rotores (cobre, zinco e ferro).

Tabela 4. Composição química de rotores que apresentaram corrosão em serviço*

Rotor	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Ti	Pb	Al
Peça 01	7,13	0,26	0,57	0,25	0,19	0,20	0,01	0,04	0,03	Balanço
Peça 02	6,70	0,27	0,45	0,19	0,15	0,11	0,01	0,04	0,02	Balanço
Peça 03	6,72	0,28	0,37	0,09	0,35	0,05	0,01	0,04	0,02	Balanço

* percentuais em peso

As análises metalográficas realizadas mostraram que os rotores apresentavam corrosão acentuada e que o tipo de corrosão atuante foi predominantemente intergranular com ataque superficial generalizado ⁽⁹⁾.

Os resultados dos ensaios de corrosão para a série experimental na qual foram comparadas as ligas 356 e A356, bem como amostras da liga 356 consideradas como sucata do processo de fabricação dos rotores são apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Valores de perda em massa para a liga base com variações nos teores de residuais

Liga	Perda em Massa Média (% em peso)	Desvio Padrão (%)
A356.1	0,27	0,03
356.1	0,73	0,04
356.1 (sucata)	1,09	0,08

Os resultados apresentados na tabela 5 indicam que a resistência à corrosão desta ligas, medida através da perda em massa, apresenta uma forte relação com a composição química, ocorrendo acréscimos consideráveis na perda em massa à medida que ocorrem incrementos nos percentuais dos elementos considerados residuais.

Estas observações reforçam a necessidade de uma avaliação dos efeitos individuais ou combinados dos elementos considerados contaminantes e como prováveis responsáveis pela ocorrência de corrosão severa e prematura nos componentes em estudo.

3.2 Ensaios de Campo

Foram comparadas as condições de fundição em um forno a cadinho utilizado em grande escala na indústria, com as condições de fundição em um forno elétrico à indução em laboratório sob condições de rígido controle dos parâmetros de processamento. As amostras foram fundidas usando a liga comercial 356 com composição química conforme indicado na tabela 1. As figuras 2 (a) e 2 (b) mostram o aspecto superficial dos produtos de corrosão de dois rotores após 270 dias de exposição nas condições descritas nos item 2.2.



Figura 2 - Rotor em liga de Alumínio 356 fundido em condições normais da indústria (a) e em laboratório (b)

As fotos da figura 2 mostram que os dois rotores apresentaram grande quantidade de pontos com produtos de corrosão, indicando que o problema de corrosão não está diretamente relacionado com o processo de fundição.

A seqüência de fotos apresentada na figura 3 mostra a evolução macroscópica do desenvolvimento do processo de corrosão em amostra fundida com liga A356.1, usinada com álcool e submersa em água potável da rede para os períodos de 24 hs, 30 e 120 dias (produtos de corrosão após secagem).

De acordo com as fotos apresentadas na figura 3 pode-se observar a ocorrência de corrosão após um curto período de exposição (aproximadamente 30 dias), mesmo para o uso de uma liga com menores teores de impurezas, quando o rotor ficou imerso em água da rede (com adição de cloro), indicando que a agressividade do meio também exerce uma forte influência sobre a resistência à corrosão no caso em estudo.

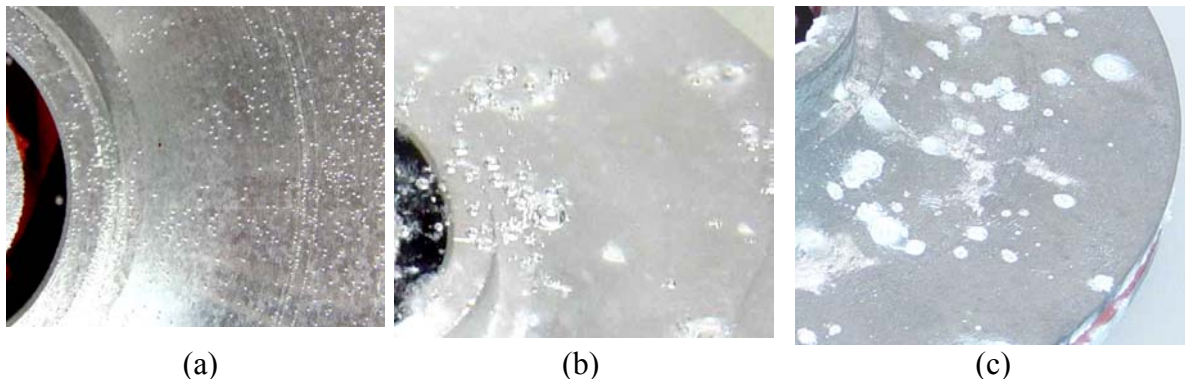


Figura 3 (a) – Rotor mantido imerso em água da rede durante diferentes tempos, (a)24hs, (b) 30 dias, (c) 120 dias mostrando produtos de corrosão após secagem.

Para avaliar a dificuldade em se remover os resíduos do processo de usinagem, foram obtidas amostras usinadas com querosene (fluido alternativo não viável em um processo industrial), sendo algumas amostras fervidas em água por 30 minutos antes da exposição no ambiente de ataque. As figuras 4(a) e 4(b) ilustram os resultados obtidos nesta avaliação.

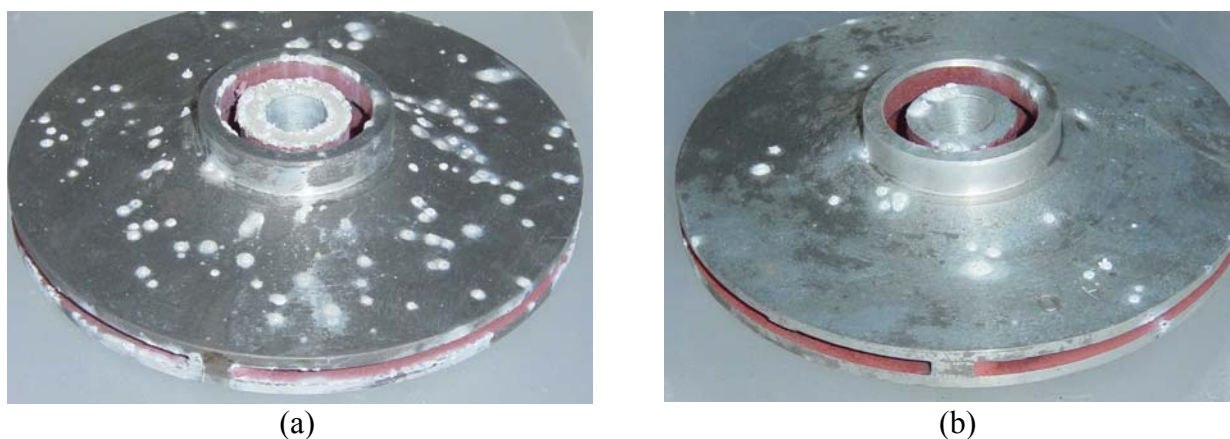


Figura 4. Rotor em liga A356 usinado com querosene e submerso em água tratada por um período de 120 dias (a) e usinado com querosene, fervido em água por 30 minutos e submerso em água tratada por um período de 120 dias (b).

De acordo com as figuras 4(a) e 4(b), pode-se observar de forma macroscópica a importância da limpeza superficial das amostras na avaliação dos resultados de um ensaio de corrosão.

A tabela 6 apresenta um resumo geral das observações realizadas a partir dos resultados obtidos nos ensaios de campo.

Os resultados apresentados na tabela 6 permitem uma análise qualitativa sobre as influências individuais dos diferentes parâmetros e condições investigadas. De acordo com os índices de corrosão mostrados nesta tabela pode-se afirmar que a composição química da liga é realmente a variável que mais interferiu na intensidade de corrosão observada nos diferentes rotores avaliados. As condições superficiais das amostras e o meio corrosivo também levaram a variações na severidade de corrosão, mas com um efeito visual menos pronunciado em comparação com a variação na composição química da liga.

Tabela 6 – Quadro comparativo da intensidade de corrosão em função das variáveis e condições testadas

Variável	Condição	Índice de Corrosão
Pureza da Liga	356.1 (menos pura)	3
	A356.1 (mais pura)	1
Processo de Fundição (Liga 356.1)	Convencional (fábrica)	3
	Controlado (laboratório)	2
Meio Corrosivo (Liga A356.1)	Água de Rede (c/cloro)	2
	Água Natural	1
Condições Superficiais da Amostra (Liga A356.1)	Superfície Mais Limpa	1
	Superfície Menos Limpa	2
Tipo de Fluido de Corte	Convencional	Não conclusivo
	Alternativo	

3.4. Ensaios de Laboratório

Os resultados dos ensaios de corrosão realizados em laboratório seguindo os procedimentos descritos nas normas ASTM G110-92 e ASTM G1-90 são apresentados na tabela 7.

Os valores apresentados na tabela 7 indicam que o elemento cobre é o principal responsável pelo aumento na perda em massa da liga em estudo, o que significa que este elemento realmente aumenta a tendência à corrosão desta liga.

Os efeitos do zinco e do ferro são bem menores em relação ao cobre quanto a ocorrência de incrementos na resistência à corrosão, tendo sido observados aumentos significativos na perda em massa apenas para elevados teores de zinco (aproximadamente 0,90% em peso).

Os resultados indicam que o elemento cobre é o principal responsável pela ocorrência de corrosão intergranular na liga em estudo e que a corrosão se torna mais severa para teores de cobre muito baixos, aproximadamente 0,05 % em peso de cobre na liga.

A princípio esta variação na suscetibilidade à corrosão das ligas de alumínio com pequenos teores de cobre deve ser atribuída a presença de precipitados da fase intermetálica CuAl_2 , no entanto para a confirmação desta hipótese se torna necessário um estudo mais aprofundado usando microanálise ou microscopia eletrônica de transmissão, já que as técnicas de metalografia ótica e microscopia eletrônica de varredura usadas nesta pesquisa⁽⁹⁾ não se mostraram efetivas na detecção da presença destes precipitados.

Tabela 7. Valores de perda em massa para as diferentes corridas experimentais

Identificação da Amostra	Composição Química*	Perda em Massa (%)	Desvio Padrão (%)
A1	Liga Base	0,27	0,03
A2b	0,03Cu-0,07Zn	0,88	0,08
A3b	0,10Cu-0,10Zn	1,36	0,11
A4b	0,18Cu-0,33Zn	1,46	0,09
A5b	0,46Cu-0,65Zn	1,89	0,06
A2c	0,03Cu	0,73	0,04
A3c	0,09Cu	1,12	0,07
A4c	0,20Cu	1,21	0,07
A5c	0,50Cu	1,43	0,07
A6c	1,00Cu	1,81	0,09
A2z	0,29Zn	0,26	0,03
A3z	0,63Zn	0,38	0,04
A4z	0,90Zn	0,49	0,04
A2f	0,80Fe	0,26	0,05

*Percentuais em peso medidos usando Espectroscopia de Emissão Ótica

Este resultado confirma a hipótese inicial de que a liga utilizada anteriormente para a produção de peça em questão, a liga 356.1 com aproximadamente 0,07% em cobre, apresentava uma alta suscetibilidade à corrosão, e que no caso específico desta peça a utilização de liga A356 de torna obrigatória para reduzir a ocorrência deste tipo de corrosão. Também cabe salientar que o teor de cobre a partir do qual a tendência à corrosão sofre um aumento significativo está muito abaixo dos teores máximos de cobre admissíveis para estas ligas, 0,20% no caso da liga A356 e 0,25% para a liga 356. O gráfico da Figura 05 ilustra esta afirmação.

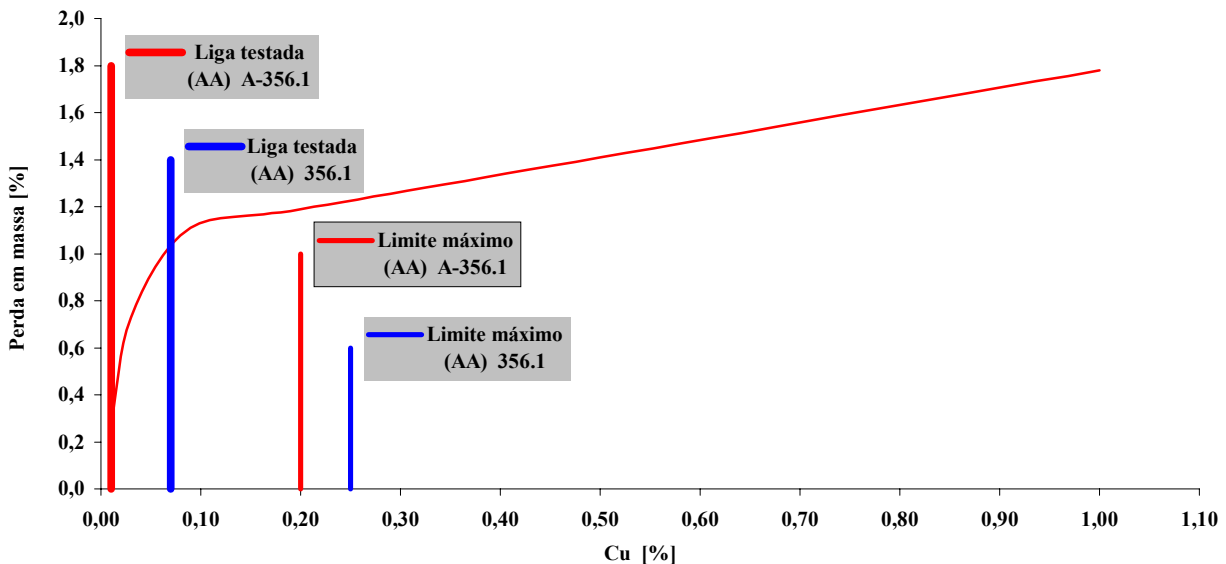


Figura 06. Variação da corrosão em função do teor de cobre e percentuais de cobre para as ligas em estudo e limites máximos recomendados pelas normas AA.A356.1 e AA.356.1

4. CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho foram as seguintes:

- o processo de fundição não apresentou uma influência significativa na ocorrência de corrosão nas ligas em estudo,
- o acabamento e a limpeza superficial das amostras podem interferir na avaliação dos resultados de um ensaio de corrosão,
- a composição química da liga foi a variável que apresentou maior influência sobre a resistência a corrosão dentro das condições utilizadas neste estudo,
- a resistência à corrosão intergranular das ligas A356 e 356 depende fundamentalmente dos teores de elementos residuais presentes, em especial o elemento cobre,
- acréscimos nos teores de zinco e de ferro não resultaram em variações significativas na resistência à corrosão das ligas estudadas,
- os teores de cobre a partir dos quais ocorreram aumentos significativos na corrosão das ligas A356 e 356 são muito inferiores aos teores máximos admitidos pelas normas internacionais de especificação destas ligas,
- o ensaio de corrosão intergranular se mostrou efetivo na caracterização da resistência à corrosão das ligas estudadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Indústrias Schneider S.A. pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa e ao Programa de Bolsas de Iniciação Científica da Udesc pela bolsa concedida.

6. REFERÊNCIAS

01. GALVELE, J.R. and MICHELI, S.M. Mechanism of Intergranular Corrosion of Al-Cu Alloys, **Corrosion Science**, v.10, p.795-803, 1970.
02. ZAMIN, M. The role of Mn in the Corrosion Behavior of Al-Mn Alloys, **Corrosion**, v.37, p627-34, 1981.

03. CARROLL, M.C., GOUMA, P.I., DAEHN, G.S., MILLS, M.J. Effects of minor Cu additions on a Zn-modified Al-5083 alloy. **Materials Science and Engineering**, A319-321, p.425-28, 2001.
04. GABRISCH, H., KJELDGAARD, L., JOHNSON, E. DAHMEN, U. Equilibrium shape and interface roughening of small liquid Pb inclusions in solid Al, **Acta Materialia**, v.49, p.4259-69, 2001.
05. GENTIL, V. **Corrosão**, 3ª Ed., Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994.
06. GEMELLI, Enori. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2001.
07. ASTM G110-92 **Standard Practice for Evaluating Intergranular Corrosion Resistance of Heat Treatable Aluminium Alloys by Immersion in Sodium Chloride + Hidrogen Peroxide Solution**, Annual Book of ASTM Standards, 1995.
08. ASTM G1-94 **Standard Practice for Claening, and Evaluation Corrosion Test Specimens**, Annual Book of ASTM Standards, 1995.
09. ROSSI, V.L. **Influência da composição química e dos parâmetros de processo sobre a resistência à corrosão em peças fundidas usando as liga 356 e A356**, 2004, 102 páginas. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROCESSING CONDITIONS OVER CORROSION RESISTANCE OF THE WATER PUMBS IMPELLERS CASTINGS USING AISiMg ALLOYS

Guilherme Ourique Verran

Mechanics Engineering Department – Santa Catarina State University
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n – Bairro Bom Retiro
89223-100 – Joinville – Santa Catarina – Brasil
gverran@joinville.udesc.br

Vilmar Luis Rossi

Schneider MotorPumbs
lab@schneider.ind.br

Ângelo Antonio Verri

Mechanics Engineering Department – Santa Catarina State University
mecanicaudesc@ig.com.br

Abstract. Corrosion is a form of degradation of the materials by chemical or electrochemical action of the environment, can to be or not associated with mechanical stress. In this study to have the combination of several factors witch attack the component in investigation. The existence of severe corrosion in water pumps has motivated a study aiming at assessing the influence of the raw material quality and of the process controls over the corrosion resistance of the alloy used to cast the components, in this case a commercial Aluminium alloy 356 (Al7Si0, 3Mg). The main assessing parameter was the chemical composition, with special emphasis on the quantity of copper

and zinc at residual levels. It was evaluated individual and combined influences of increasing quantities of copper and zinc over the corrosion resistance of A356 alloy, a variant of 356 alloy with lower level of impurities. The corrosion resistance was measured by intergranular corrosion tests performed according to ASTM G110-92 and ASTM G01-90. The results were evaluated by mass loss and the corrosion depth by qualitative optical metallography. The results indicate that even small percentage increments of copper causes significant increase of the corrosion tendency of the corresponding alloy; even though such amounts were smaller than those usually present in the majority of the commercial alloys used in the aluminium casting industry.

Keywords: aluminium alloys, casting, corrosion, intergranular corrosion.