

PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA AURAL INJETADA SOB PRESSÃO E SUBMETIDA AO TRATAMENTO T5*

Dirceu da Silva Junior¹
Temístocles Macedo Netto²
Estéfano Aparecido Vieira³
Franco Chiesa⁴

Resumo

As ligas de alumínio para injeção vêm sendo utilizadas em aplicações críticas como blocos de motores e, até agora, em componentes não críticos da estrutura de chassis automotivos. No caso de ligas Al-Si que contém Fe são formadas fases intermetálicas indesejáveis que causam grandes perdas de resistência e ductilidade. Por outro lado, sua presença nas ligas usadas nos processos de injeção evita a colagem entre a matriz de aço e a liga injetada (*die soldering*). A liga Aural é um material recentemente desenvolvido com o intuito de acabar com a micro soldagem de peças de alumínio nas matrizes, através do aumento do teor de manganês e redução do teor de ferro. Para avaliar seu uso como alternativa as ligas atuais, foi feito o tratamento térmico T5 em diferentes tempos com medição das propriedades mecânicas. A liga Aural pode ser uma alternativa a liga A380 por apresentar ganho no limite de escoamento após o tratamento T5 e ainda manter alguma ductilidade (Alongamento > 1%).

Palavras-chave: Liga Aural; Injeção; Alumínio; Envelhecimento.

MECHANICAL PROPERTIES OF AURAL ALUMINIUM ALLOY SUBMITTED TO THE T5 HEAT TREATMENT

Abstract

Die-casting aluminum alloys have been used in critical applications such as engine blocks and, up to now, non-critical components of the automotive chassis structure. A common impurity in aluminum alloys is the Fe that is inevitably added during melting and casting process. However, the Fe in die-casting alloys avoids sticking between the steel mold and the injected alloy called die soldering. The Aural alloy is a material that has been developed recently to avoid die soldering through the increasing of the Mn and lowering the Fe contents. To evaluate the use of Aural alloy as an alternative to common alloys, a T5 heat treatment has done using different times and mechanical properties have been measured. The Aural alloy could be an alternative to A380 alloy due to the gain in the yield strength after T5 treatment while still maintaining some ductility (> 1% Elongation).

Keywords: Aural alloy; die-casting; aluminum; ageing.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PROPEMM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PROPEMM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

⁴ Pesquisador Ph.D. do Centre de Métallurgie du Québec, Trois-Rivières, Qc, Canada.

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio para fundição utilizadas em aplicações na engenharia constantemente fazem uso do silício para melhorar por exemplo, sua fluidez facilitando o preenchimento do molde quando vazado e a resistência a trincas de contração quando o metal líquido se solidifica. Também é de costume utilizar cobre e magnésio visando aumentar a resistência mecânica e tornar a liga termicamente tratável. Um dos grupos de ligas de alumínio para aplicação na indústria automotiva são aquelas que se baseiam no sistema alumínio-silício-magnésio como por exemplo as ligas A357 e A380 ou alumínio-cobre-silício como por exemplo a liga A242. A liga A242 possui excelentes propriedades mecânicas, mas baixa resistência a corrosão sendo utilizada na fabricação de motores a diesel e de motocicletas. Em casos que exigem elevada resistência a corrosão sob tensão como em componentes de aviação e mísseis a liga A357 é utilizada pois apresenta elevada resistência mecânica, excelente fluidez e resistência a corrosão. Utensílios domésticos em geral são produzidos pelo processo de injeção sob pressão a partir da liga 380 devido ao seu bom acabamento superficial e usinabilidade [1].

Quando é requerida a produção de um grande volume de peças com grande precisão de detalhes com pesos que variam de gramas até aproximadamente 15kg, a fundição por injeção é um processo totalmente automatizado que supre estas necessidades. Na fundição por injeção a liga é forçada a preencher uma matriz de aço sob a força de pressão hidráulica e alta velocidade, entretanto uma pequena quantidade de poros não pode ser evitada uma vez que a alimentação não pode ser feita em todas partes da peça [2]. Este método era tradicionalmente usado para produção de componentes para produção de utensílios domésticos, equipamentos de escritório e componentes de eletrodomésticos. Contudo na década de 70, devido à crise do petróleo as indústrias automotivas foram forçadas a buscar alternativas para redução do peso dos carros e conseqüente redução do consumo de combustível, sendo as ligas de alumínio uma boa opção devido sua reduzida densidade quando comparado com o ferro fundido. Inicialmente na indústria automotiva as peças eram restritas a aplicações de menor importância como suportes, frisos e maçanetas [3]. Atualmente as ligas de alumínio para injeção vêm sendo utilizadas em aplicações mais críticas como blocos de motores e componentes estruturais em chassis de carros como em para choques, pilares estruturais, travessas, berços de motor ou painéis de portas interior como visto na **Figura 1**.

Para a aplicação em componentes de engenharia é essencial que a liga de alumínio tenha uma alta ductilidade, sendo necessário ter um baixo teor de impurezas garantindo-se um alto nível de deformação. Uma impureza muito comum em ligas de alumínio é o ferro, oriundo das matérias primas utilizadas é inevitavelmente adicionado durante a fusão e/ou fundição das ligas, especialmente quando sucata e materiais reciclados são utilizados na elaboração, como no caso da liga A380. O ferro nas ligas alumínio-silício forma fases intermetálicas indesejáveis especialmente a fase β -Al₅FeSi em forma de agulhas que causa grandes perdas de resistência e ductilidade em peças fundidas. Devido à natureza peritética do sistema alumínio-ferro não há a possibilidade de remoção dos precipitados por tratamentos térmicos sendo somente possível a remoção no estado líquido com a refusão da peça.

Audi A8 - Space Frame

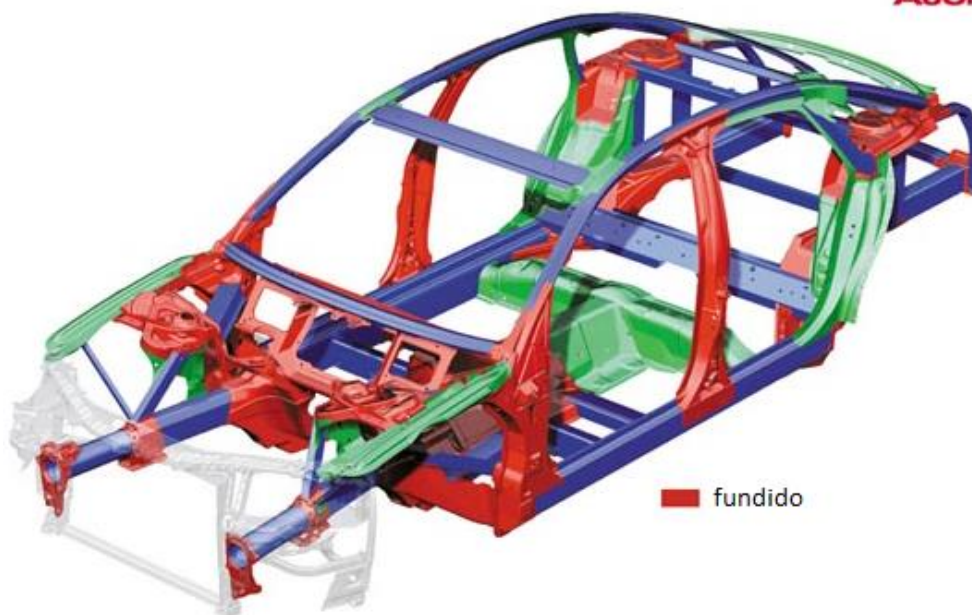


Figura 1 – *Space Frame* de um Audi A8 mostrando estruturas fabricadas por injeção em vermelho [4].

Devido a afinidade do alumínio com o ferro e conseqüentemente também o aço, então nos processos de injeção *die casting*, o alumínio líquido que se solidifica no molde pode experimentar um fenômeno conhecido como soldagem ao molde ou *die soldering*, assim nestes processos de fundição o a presença do Fe pode acabar sendo benéfica uma vez que sua presença pode evitar este problema.

Em ligas modernas para a produção de fundidos de alta integridade por injeção o Fe é parcialmente substituído pelo Mn. Para a utilização em larga escala industrial, a correção do Fe com Mn é aceita como a solução preferida economicamente devido a fácil implementação e seu relativo baixo custo quando comparado a outros elementos corretores como o Sr. Além do Mn prevenir a soldagem entre o molde e a peça durante a fundição [5].

A liga Aural® [6] é um material recentemente desenvolvido com o intuito de acabar com a micro soldagem de peças de alumínio em matrizes na fundição por injeção sem prejudicar as propriedades mecânicas significativamente. Em linhas gerais isso é feito através do aumento do teor de Mn e redução do teor de Fe. Trata-se de uma liga do sistema alumínio-magnésio-silício que possui baixo teor de Fe, cerca de 0,2%, porém com Mn acima de 0,1% podendo chegar a 0,6%. A Tabela 1 apresenta uma típica composição química de uma liga tipo Aural [7]. Um tratamento térmico comum neste tipo de liga é o T5 e o objetivo deste trabalho foi tratar termicamente um lote de amostras fabricadas por injeção. As propriedades mecânicas foram medidas visando definir as condições que maximizam a resistência.

Tabela 1 – Composição química da liga aural[Erro! Fonte de referência não encontrada.]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Sr	Outros cada	Outros total
10-11	0,15-0,2	-	0,45-0,55	0,1-0,6	0,004-0,008	0,01-0,016	0,03	0,1

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho um lote de amostras da liga Aural foi produzido no centro tecnológico de Quebec (*Centre de Métallurgie du Québec Cégep de Trois-Rivières*) e conforme já explicado, o objetivo foi avaliar o comportamento mecânico da liga quando submetida a condição T5. A composição da liga em porcentagem em peso obtida foi a seguinte: Si=10,6; Fe=0,17; Cu=0,05; Mn=0,50; Zn=0,009; Cr=0,004; Ti=0,07 e Sr=0,008. Comparando-se este resultado com a Tabela 1 verifica-se que a liga possui uma composição que está de acordo com a típica sugerida por Lumley et al (2011) [6] com um leve desvio na concentração do Cu e do Sr.

A Figura 2 mostra uma típica amostra fabricada para os ensaios de tração. Todas elas, foram produzidas utilizando-se uma matriz de injeção e as dimensões seguiram a norma ASTM B557. Para cada ciclo de injeção foram produzidas três peças e durava cerca de 50s. No total foram produzidas 39 amostras. O molde ficou estabilizado a uma temperatura de aproximadamente 150 °C, a liga foi injetada a uma temperatura de aproximadamente 780 °C e a velocidade do pistão no segundo estágio foi de 50 m/s.



Figura 2 – Típico corpo de prova produzido através do processo de injeção (Die Casting)

Conforme explicado, o tratamento escolhido para ser explorado neste trabalho foi o T5 que é mais simples que o T6 ou T7 já que os tratamentos de solubilização a alta temperatura e têmpera não são realizados; pela mesma razão, a distorção em fundidos longos e finos é evitada. Assim, a primeira etapa foi realizar tratamentos de envelhecimento artificial de amostras retiradas das peças injetadas. Estas amostras foram utilizadas para fazer o levantamento da evolução da dureza da liga em função do tempo. A temperatura escolhida foi de 180°C e todos tratamentos foram realizados em um forno tipo mufla modelo FL-1300 da marca INTI. A temperatura das amostras foi controlada com o auxílio de um segundo termopar que era inserido dentro de um pequeno orifício feito em uma delas. O tempo necessário para atingir 180 °C foi de aproximadamente 3min que foi descontado do tempo total. O procedimento para o levantamento da curva de dureza foi o seguinte: oito amostras foram inseridas no forno e estas foram retiradas sucessivamente contados a partir do alcance da temperatura de tratamento (180 °C) e descontados os 3 min de rampa. As amostras foram então retiradas para os tempos de 15 min, 30 min, 1h, 2h, 4h, 8h, 16h e 32h e resfriadas em água. A curva de dureza foi obtida utilizando-se utilizando-se um microdurômetro digital da marca Shimadzu Mod. HVS-1000 e a carga aplicada foi de 10N.

A partir da curva de dureza foi possível estabelecer que o tempo de máxima dureza para T5 a 180 °C era de 8h. Portanto, este tempo foi escolhido como referência para o estudo da resistência a tração. Partindo-se de 8 h, escolheu-se então uma progressão geométrica com dois tempos acima e dois abaixo ficando a sequência de 2h, 4h, 8h, 16h e 32h. Para cada um desses tempos foram agrupadas 5 amostras, que foram tratadas juntas no mesmo forno e seguindo o mesmo procedimento já descrito. Cada grupo de amostra foi submetido a ensaio de tração em uma máquina de ensaios universal EMIC DL 10000. Para medir o alongamento foi utilizado um extensômetro de 12,5 mm e a taxa de deformação foi de 1 mm/min. As peças ensaiadas foram identificadas e sujeitas à medição de porosidade como o auxílio do programa computacional *ImageJ*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dureza

A curva de dureza obtida após o tratamento T5 está na Figura 3 e mostra um aumento na dureza até tempos de tratamentos de 8h devido a formação de precipitados finos e coerentes com a matriz. A maior parte deles deve-se a precipitação do Mg_2Si [7]. A partir deste tempo a dureza das amostras começa a cair devido ao crescimento dos precipitados que se tornam incoerentes caracterizando o superenvelhecimento da liga [8].

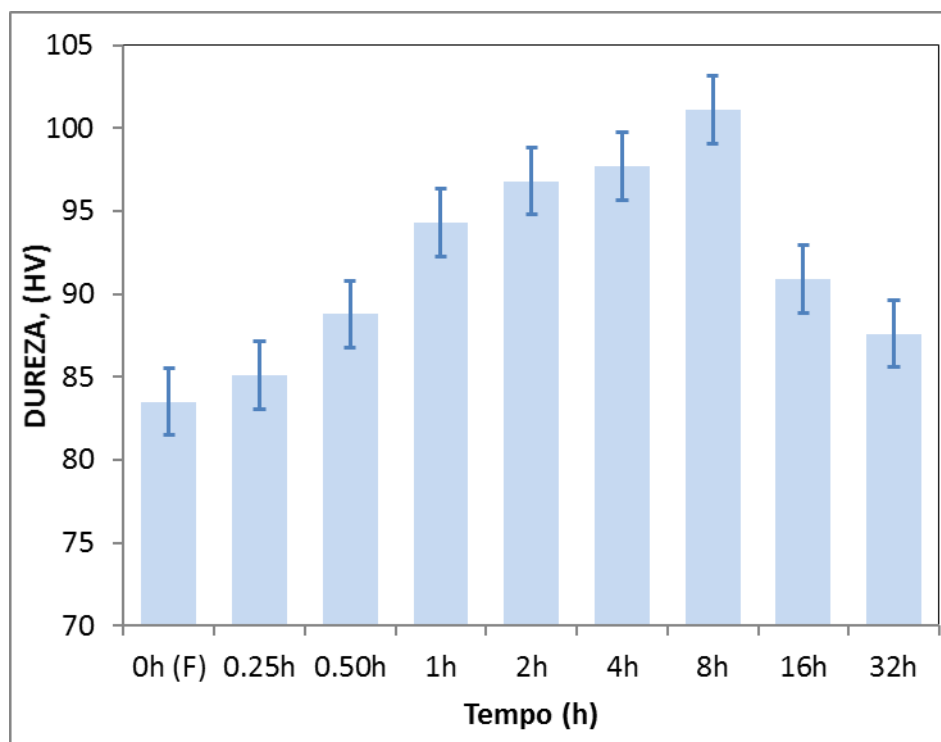


Figura 3 –Curva de Dureza da liga Aural após tratamento térmico T5 a 180°C.

As ligas típicas para injeção sem tratamentos apresentam uma dureza entre 50 e 80 HB [9] que segundo a norma ASTM E140 equivalem a uma faixa de dureza entre 56 e 92HV. A liga Aural apresentou uma dureza como recebida de $83,5 \pm 1,8$ HV logo, dentro do esperado. Após 8h de tratamento T5 se obtém uma dureza máxima de $99,4 \pm 2,1$ HV, um ganho de aproximadamente 15 HV em relação a liga sem

tratamento. Um valor baixo quando comparado a outros tratamentos térmicos como o T6 que pode apresentar um ganho de dureza de até 70 HV na liga A357 em relação a peça sem tratamento para o mesmo intervalo de tempo [10].

3.2 Propriedades de Tração

A evolução das propriedades mecânicas da liga Aural de acordo com o tempo de tratamento, incluindo as propriedades mecânicas da liga sem tratamento é mostrada na Figura 4. Quando analisado o limite de resistência a tração é notado um decréscimo do seu valor inicial de 229,5 MPa até o tempo de 4h após o qual sofre um pequeno incremento com o aumento dos tempos. O máximo atingido foi de 213 MPa com 2h de envelhecimento. Por outro lado, o limite de escoamento tem um valor máximo de 160 MPa após 4h de tratamento com um incremento de aproximadamente 30 MPa em relação a liga sem tratamento que foi 130 MPa, permanecendo aproximadamente neste valor após longos tempos de tratamento apresentando uma redução para 142 MPa após 32h de envelhecimento.

O alongamento inicial da amostra como fabricada foi de 2,8% e sofreu uma perda de 46% após 2h de tratamento chegando a um mínimo de 1% para 4h. Este resultado era esperado pois, é comum redução do alongamento em tratamentos do tipo T5. As ligas tradicionalmente usadas para injeção sem tratamento como a A360, A380 e A413 apresentam valores de algumas propriedades mecânicas superiores ao da liga Aural e normalmente o limite de resistência a tração está entre 289 a 317 MPa e o alongamento é cerca de 3,5%. Contudo, a liga Aural sem tratamento chegou a um limite de escoamento de 160Mpa após 4h de tratamento, o que está dentro do limite de escoamento observado para as ligas A360, A380 e A413 que varia de 131 a 165 MPa.[11].

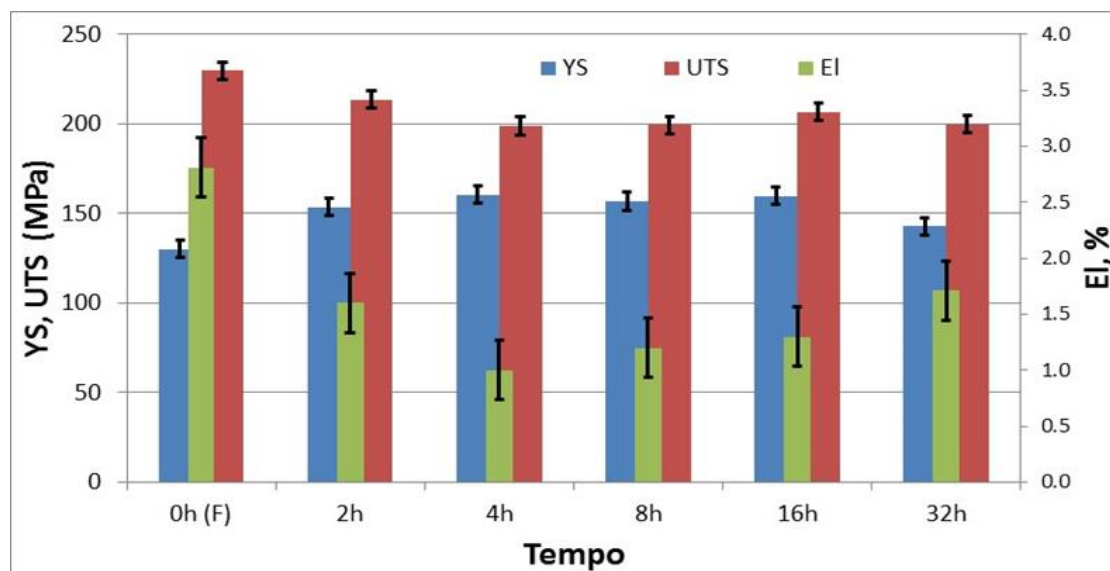


Figura 4 – Variação com tempo de tratamento T5 das propriedades de tração da liga Aural.

Lumley *et al* realizou o tratamento T5 da liga A380 e obteve valores máximos de 234 MPa para o limite de escoamento, 358 MPa para a resistência a tração e um alongamento de 2%. Os resultados deste trabalho comparado com os valores obtidos por obtidos Lumley *et al* apresenta valores inferiores se aproximando apenas

no alongamento podendo esta diferença estar relacionada ao grau de porosidade observado nos corpos de prova da liga Aural [12].

Os índices de resistência K e de encruamento n obtidos através da equação de Hollomon são apresentados na Figura 5. O valor mínimo para K foi abaixo de 600 MPa após 16h de tratamento, enquanto o índice de encruamento chegou a 0,24 passadas 8h de tratamento. Ambos os valores voltam a crescer a partir de 16h de envelhecimento. A variação no valor de n também pode ser notada pela redução da diferença entre o limite de resistência máxima a tração e o limite de escoamento na Figura 4 até o tempo de 8h e seu aumento a partir de 16h.

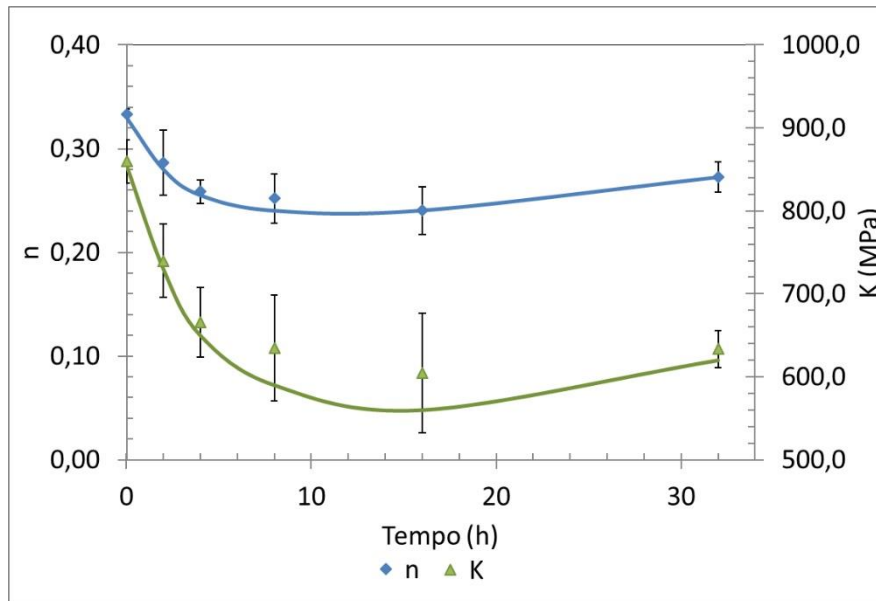


Figura 5 – Variação com o tempo de tratamento T5 do coeficiente de encruamento e do índice de resistência da liga Aural.

Outras ligas comumente utilizadas para injeção do sistema Al-Si-Cu como por exemplo a liga A380 apresentam valores de n que variam de 0,23 a 0,27 e K de 755 a 906 MPa [13,14]. A liga Aural apresenta um valor de n superior, 0,33, entretanto após tratamento esse valor chega próximo ao mínimo visto nas ligas já utilizadas para injeção.

3.3 Porosidade

Devido a presença de Si na liga Aural, cerca de 10,6% em peso, e ao processo de fabricação por injeção sob pressão era esperado um baixo nível de porosidade. Entretanto a liga Aural é normalmente injetada sob vácuo o que não foi o caso destas amostras, o que levou a um nível de porosidade de 3,5% na seção útil dos corpos de prova quando analisada a seção transversal dos corpos de prova através do software *ImageJ*. Este valor pode ser considerado elevado quando comparado a resultados obtidos por Hsu e Do que analisaram 27 corridas da liga de alumínio ADC 10 que possui um teor de Si entre 7,5 e 9,5% e obtiveram valores de porosidade que variaram de 1,7 a 1,95% [15]. Os poros agem como concentradores de tensão e iniciadores do processo de ruptura, assim o elevado nível de porosidade pode ter comprometido a resistência máxima a tração e o alongamento da liga Aural. Na

Figura 6 é possível observar exemplos da presença dos poros na seção útil dos corpos de prova. Alguns poros puderam ser observados a olho nu na fratura após o ensaio de tração mostrados na Figura 6a. Na Figura 6b temos uma imagem comum da superfície plana e a porosidade são as regiões escuras.

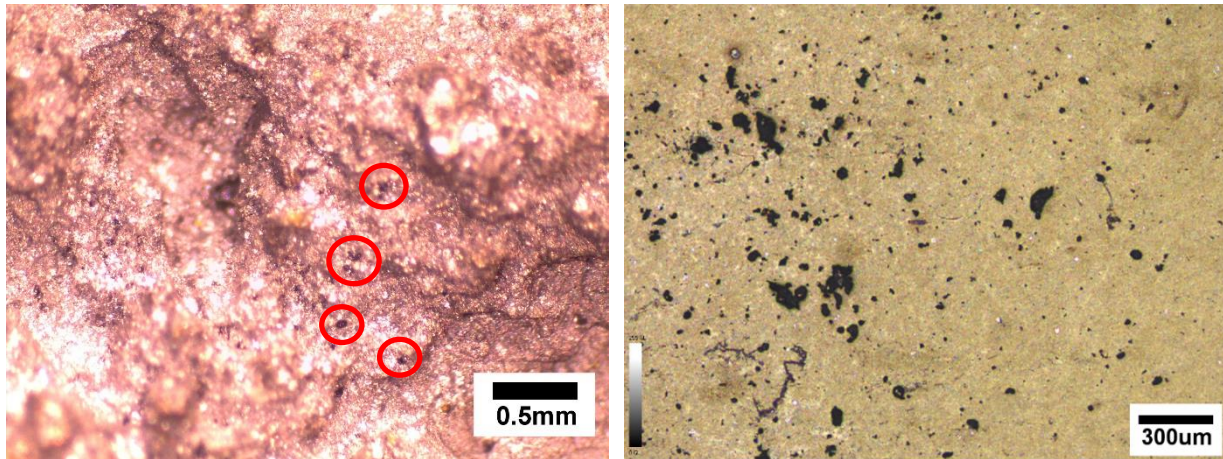


Figura 6 – Poros em destaque (a) na fratura após ensaio de tração e (b) em uma superfície plana e polida.

4 CONCLUSÃO

A liga Aural fabricada através do processo de injeção e tratada termicamente pelo tratamento T5 possui as seguintes características:

Pequeno ganho de dureza em relação a liga sem tratamento;

Após 4h de envelhecimento T5 é possível um incremento de 30 MPa no limite de escoamento equiparando a liga Aural com a A380 sem tratamento, porém o alongamento é muito inferior devido ao alto nível de porosidade formado pela não aplicação de vácuo a cavidade do molde;

Os corpos de prova da liga Aural apresentaram presença de poros que são a causa do baixo desempenho de suas propriedades mecânicas.

Agradecimentos

Agradecemos ao “*Centre de Métallurgie du Québec Cégep de Trois-Rivières*” pelo fornecimento dos corpos de prova da liga Aural e orientação na execução do presente trabalho e também ao IFES pelo laboratórios e equipamentos utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] KEARNEY, A. L.; KEARNEY, A.: ASM HANDBOOK: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. ASM International. v. 2, 1990
- [2] CHIESA, F.; ET AL: Effect of porosity on the tensile properties of die cast aluminium A360, **COM 2015 Conference of metallurgists**, Toronto, Ontario, Canada, 2015.
- [3] MEDEIROS, M.: História da Fundição. São Paulo: Salus, 2009.
- [4] Adaptado de <http://www.audioworld.com/news/02/a8/content.shtml>
- [5] BOSCH, D. ET AL: Secondary Al-Si-Mg High-pressure Die Casting Alloys with Enhanced Ductility, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.46A, 2015, p. 1035-1045.
- [6] LUMLEY ET AL: Aluminium based casting alloy, Int. Cl.C22C 21/12.US 2011/0100515 A1. 30 abr. 2009, 13 jan. 2011. United States Patent Application Publication.
- [7] SHIVKUMAR, S.; KELLER, C.; APELIAN, D.: Aging behavior in cast Al-Si-Mg alloys, **AFS Transactions**, 1990, 905-911.
- [8] SJÖLANDER, E.; SEIFEDDINE, S.: The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, Jönköping, Sweden, v.210, 2010, p. 1249-1258.
- [9] Cast Products and Mould Designer Skills at the European Context - CAE DS. Aluminium Alloys for High Pressure Die Casting. Finlândia, 2007.
- [10] LUMLEY, R. N.; ET AL: New Heat Treatments for age-hardenable aluminum alloys. Heat Treating Progress. Austrália, p. 23-29, Março/Abril, 2005.
- [11] Die Cast Metal Properties. Dynacast. Internacional, 2016. Disponível em: <https://www.dynacast.com/die-cast-metal-properties> Acesso em: 08 Abril, 2016.
- [12] LUMLEY, R.N.; ODONNELL, R.G.; GUNASEGARAM, D.R.; GIVORD,M.: Heat Treatment of High-Pressure Die Castings, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 38A, 2007, p. 2564-2574.
- [13] TIMELI, G.: Constitutive and stochastic models to predict the effect of casting defects on the mechanical properties of High Pressure Die Cast AlSi9Cu3(Fe) alloys, **Metallurgical Science and Technology**, v. 28-2, 2010, p. 9-17.
- [14] LUMLEY, R.; DEEVA, N.; GERSHENZON, M.: An evaluation of quality parameters for high pressure die castings, **International Journal of Metalcasting/Summer**, 2011, p. 37-56.
- [15] HSU, Q. C.; DO, A. T.: Minimum Porosity Formation in Pressure Die Casting by Taguchi Method, **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, 2013, p. 2-9.