

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/332564726>

ANÁLISE DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO EM LIGAS DE AL-X%Zn-2%Mg E CORRELAÇÕES COM CONDIÇÕES DE SOLIDIFICAÇÃO, ESTRUTURAS FORMADAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Conference Paper · April 2019

CITATIONS

0

READS

59

4 authors, including:



Bernardo Póras Reis

OPENIND - Soluções em Inovação Industrial

27 PUBLICATIONS 79 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Carlos Alexandre dos Santos

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

3 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Microstructural Analysis of Corrosion of Welded Joints in Stainless Steel Used in Manufacture of Bioreactors [View project](#)



Analysis of the Mechanical Properties of the Sintered Composite FeCuC in Two Different Atmospheres [View project](#)

ANÁLISE DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO EM LIGAS DE AL-X%Zn-2%Mg E CORRELAÇÕES COM CONDIÇÕES DE SOLIDIFICAÇÃO, ESTRUTURAS FORMADAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

C. T. Ache, M. M. Lopes, B. P. Reis, C. A. dos Santos
Laboratório de Materiais, Escola Politécnica
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Av. Ipiranga, 6681 – Prédio 30, Bloco F, Sala 111
Porto Alegre / RS – CEP: 90619-900
e-mail: carlos.santos@pucrs.br

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi analisar as características de desgaste em ligas fundidas de Al-Zn-Mg, com teores de 5% e 8% de Zn, e 2%Mg, correlacionando com as condições de solidificação e as estruturas formadas. As ligas foram solidificadas unidirecionalmente em forno vertical, com molde de aço resfriado em sua base. As macroestruturas e microestruturas foram analisadas por microscopia óptica, eletrônica e difração de raios-X. Amostras foram extraídas para determinação de dureza e resistência à tração. Ensaio de desgaste foram realizados em tribômetro pino-sobre-disco, com velocidade de 200 rpm, pino de esfera de alumina, carga de 14,7 N e distância de deslizamento de 1000 m. A liga com 5%Zn apresentou maiores espaçamentos dendríticos secundários e menos precipitados $MgZn_2$ e $Al_2Mg_3Zn_3$, refletindo em menores durezas e resistências à tração. Concluiu-se que a liga com 8%Zn apresentou melhor resistência ao desgaste quando comparada a liga com 5%Zn.

Palavras-chave: solidificação, desgaste, ligas Al-Zn-Mg, estruturas, propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

O uso de ligas fundidas de Al-Zn-Mg vem aumentando nas últimas décadas, principalmente em função da baixa massa específica e temperatura de fusão, boa fundibilidade e usinabilidade, elevadas propriedades mecânicas, e facilidade de manufatura. Aliado a isto, a redução de custo nos processos de fabricação tem despertado o interesse para o uso de materiais na condição bruta de solidificação. Diferentemente das ligas trabalháveis ou conformáveis, que estão sujeitas a uma ampla variação dos processos de conformação mecânica ou termomecânica, as ligas de fundição adquirem suas propriedades na condição fundida, e em alguns casos, com tratamentos térmicos posteriores [1-6].

Existem várias informações na literatura para ligas de alumínio conformadas ou processadas, no entanto ainda se observa uma escassez em relação às ligas fundidas, principalmente em relação ao desgaste. Aliado a isto, o avanço da chamada Revolução da Indústria 4.0, e principalmente das tecnologias associadas a Manufatura Aditiva (MA), com a impressão 3D direta a partir de metal líquido como o processo Selective Laser Melting (SLM), tem despertado o interesse de pesquisadores em todo mundo. Este processo permite a obtenção de componentes near-net-shape com geometria complexa e características metalúrgicas e mecânicas distintas ao longo do material. No entanto, a ampliação desta tecnologia só se concretizará se os aspectos relacionados a fusão e solidificação dos materiais metálicos forem dominados, bem como se as propriedades dos produtos obtidos atenderem as especificações de projeto, permitindo propriedades similares ou melhores do que os produzidos convencionalmente [7-10]. Isto só será superado se o correto entendimento das correlações entre as condições de fusão/solidificação, as formações estruturais e as consequentes propriedades físico-químicas forem investigadas, permitindo assim estabelecer pré-programações para os parâmetros do processo. Apesar de alguns trabalhos relatados na literatura, poucos têm investigado a correlação entre as condições de solidificação, estruturas formadas e respostas ao desgaste de ligas fundidas de Al-Zn-Mg. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar as características de desgaste em ligas fundidas de Al-Zn-Mg, com teores de 5% e 8% de Zn, e 2%Mg, correlacionando com as condições de solidificação e as estruturas formadas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As ligas Al-2%Mg-5%Zn e Al -2%Mg-8%Zn, denominadas 752 e 782, respectivamente, foram obtidas a partir dos metais puros alumínio (pureza > 99,5% de pureza), zinco (99,7%) e magnésio (>99,9%). Os metais foram fundidos em um forno tipo poço, em cadinho de carbeto de silício com pintura protetiva de nitreto de boro. Após fusão, amostras foram extraídas para análises de composição química em cada liga. A média de seis medidas realizadas por Espectroscopia de Emissão Óptica (OES) são apresentadas na Tabela 1.

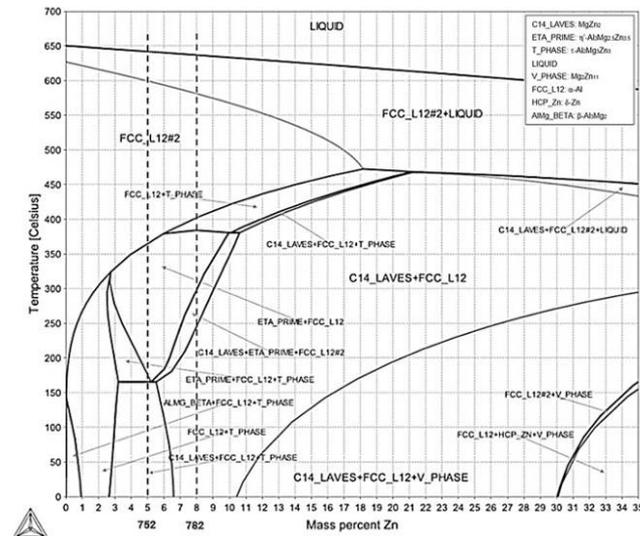
Tabela 1. Composição química das ligas Al-Mg-Zn.

Liga	Elemento (% em massa)								
	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Cr	Ni	Si	Al
752	4,97	2,11	0,012	0,002	0,33	0,01	0,008	0,05	Balanço
782	8,02	2,08	0,008	0,009	0,12	0,01	0,001	0,09	Balanço

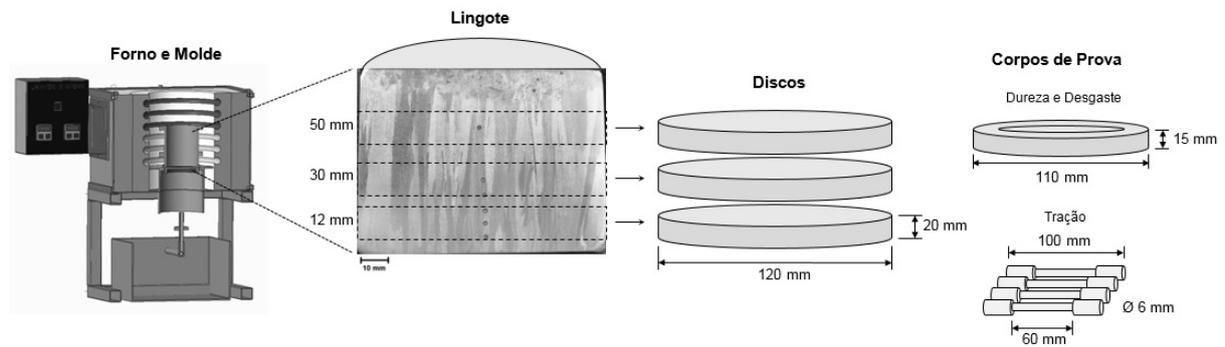
As ligas foram refundidas em forno vertical tubular resistivo, com duas zonas de aquecimento independentes, utilizando molde metálico de aço ABNT/SAE 1020 (ϕ : 110 mm, h: 140 mm), o qual foi resfriado na base por jato de água com controle de vazão de 4 litros/minuto. Termopares tipo K (com diâmetro de 1,6 mm) foram localizados em diferentes posições ao longo da altura do lingote (6, 12, 18, 24, 30 e 50 mm a partir da base do molde) para monitoramento térmico do metal durante solidificação. O sistema de resfriamento foi acionado quando o metal líquido atingiu a temperatura de 720°C. Para cada liga, dois lingotes idênticos foram obtidos, com massa aproximada de 1,9 kg. A Figura 1 apresenta parte do diagrama pseudo-binário do sistema Al-2%Mg-x%Zn, com destaque para as composições químicas analisadas no presente trabalho, bem como representação esquemática do forno unidirecional, do lingote e das amostras/corpos de prova extraídos para as análises. [11].

Após solidificação, discos transversais com 20 mm de espessura foram extraídos dos lingotes nas posições correspondentes aos termopares localizados a 12, 30 e 50 mm da base. Em um lote dos discos, amostras foram extraídas para análises metalográficas. Para revelação da macroestrutura foi utilizado o reagente de Keller modificado (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5 ml HNO₃, 95 ml água destilada)

durante 60 segundos. Para observação da microestrutura, o mesmo reagente foi empregado, porém com tempo de ataque de 10 segundos [12-13]. As análises foram realizadas em microscópio óptico (MO), microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS) e difração de raios-X (EDX).



(a)



(b)

Figura 1. (a) Diagrama pseudo-binário do Sistema Al-2wt%Mg-Zn, (b) representação esquemática do lingote solidificado unidirecionalmente e amostras/corpos de prova extraídos para caracterização metalúrgica.

Medidas de dureza Brinell (utilizando esfera de 5 mm e carga de 2500 N) foram realizadas nas seções transversais dos discos de acordo com a norma ASTM E 10 [14], e os valores médios determinados a partir de 5 medidas em cada superfície dos discos. Um dispositivo pino-sobre-disco foi utilizado para determinação do desgaste por deslizamento em condições à seco, conforme norma ASTM G 99 [15], em cada superfície dos discos (superior e inferior). Os discos com espessura de 15 mm e

diâmetro de 110 mm foram lixados com granulometrias de #220, #320, #400 e #600, obtendo rugosidade média $< 0,8$ mm, limpos em álcool e secos com soprador de ar quente. Esferas de alumina de 10 mm de diâmetro (dureza > 1500 HV), carga aplicada de 14,7 N, velocidade de deslizamento de 1,8 m/s e distância total percorrida de 1000 m foram utilizadas em todos os ensaios. As larguras das pistas de desgaste foram medidas a cada 100 m de distância percorrida em oito posições defasadas em 45° , utilizando um sistema óptico com resolução de 0,01 mm. Os volumes desgastados e os coeficientes de desgaste foram determinados conforme recomendado pela ASTM G 99. Corpos de prova foram extraídos dos discos para realização dos ensaios de tração segundo a norma ASTM E 8 [16]. Quatro corpos de prova foram ensaiados à tração para cada posição em cada lingote.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Parâmetros de Solidificação

As curvas de resfriamento obtidas durante solidificação das ligas 752 e 782 nas posições específicas onde se localizavam os termopares são apresentadas na Figuras 2a e 2b, e foram utilizadas para determinação dos parâmetros de solidificação. Análises térmicas preliminares permitiram obter as temperaturas *Liquidus* e *Solidus* para cada liga, sendo $T_L = 637^\circ\text{C}$ e $T_S = 598^\circ\text{C}$ para a liga 752, e $T_L = 629^\circ\text{C}$ e $T_S = 598^\circ\text{C}$ para a liga 782, que concordam com os valores observados no diagrama da Figura 1a. Os tempos de passagem da isoterma *Liquidus* (t_L) para cada posição de termopar (P) foram utilizados para determinar expressões experimentais do tipo $P_L=f(t_L)$, como mostrado na Figura 2c. Como pode ser observado, as condições de solidificação foram similares para os instantes iniciais (até 50 segundos), e posteriormente, a liga 752 apresentou tempos de passagem da isoterma *Liquidus* menores que a liga 782, o que permite afirmar que a liga 752 solidificou mais rápido. Este comportamento não se refletiu nas taxas de resfriamento determinadas para cada posição dos termopares, pois a liga 782 apresentou taxas de resfriamento levemente mais elevadas que a liga 752. Isto pode ser atribuído aos gradientes térmicos no líquido à frente da interface de solidificação, os quais foram maiores na liga 782 quando comparado à liga 752. Estes resultados concordam com dados relatados em trabalho recente [11].

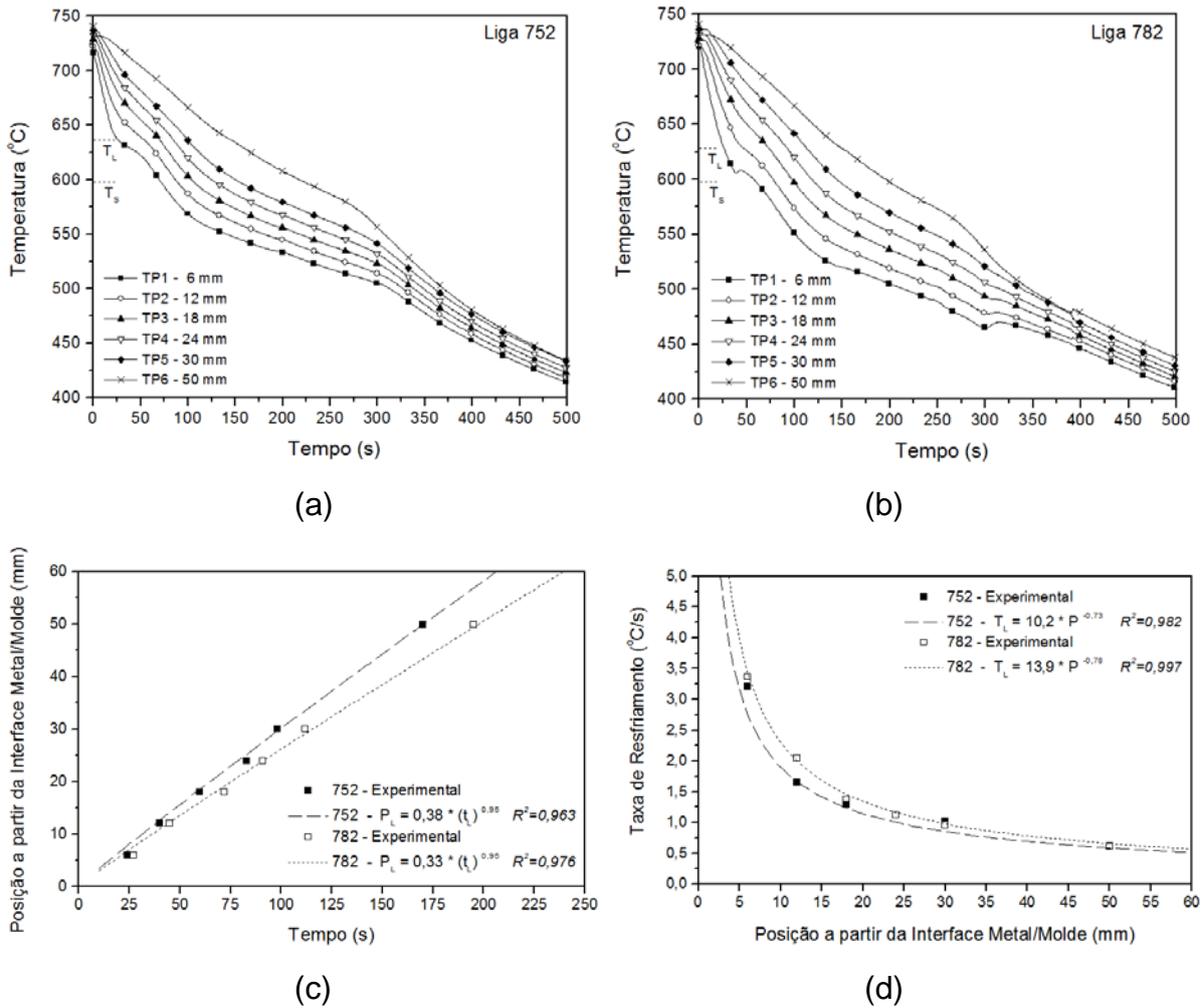


Figura 2. (a-b) Perfis térmicos das ligas 752 e 782, (c) posição da isoterma *Liquidus* em função do tempo durante solidificação, (d) taxas de resfriamento com função da posição ao longo do lingote. R^2 é o coeficiente de determinação.

A revelação das macroestruturas dos lingotes demonstrou a unidirecionalidade do processo de solidificação, obtendo-se estruturas predominantemente colunares nas duas ligas, com diâmetros médios dos grãos colunares aumentando da base para o topo dos lingotes (Figuras 3a e 3b). A liga 752 apresentou transição colunar-equiaxial logo acima do termopar a 50 mm da base, enquanto que a liga 782 apresentou esta transição quase no topo do lingote. Nas microestruturas, os espaçamentos dendríticos secundários (λ_2) foram medidos ao longo dos lingotes (20 medidas para cada posição de termopar), e os resultados médios e seus valores mínimos e máximos apresentados na Figura 3c.

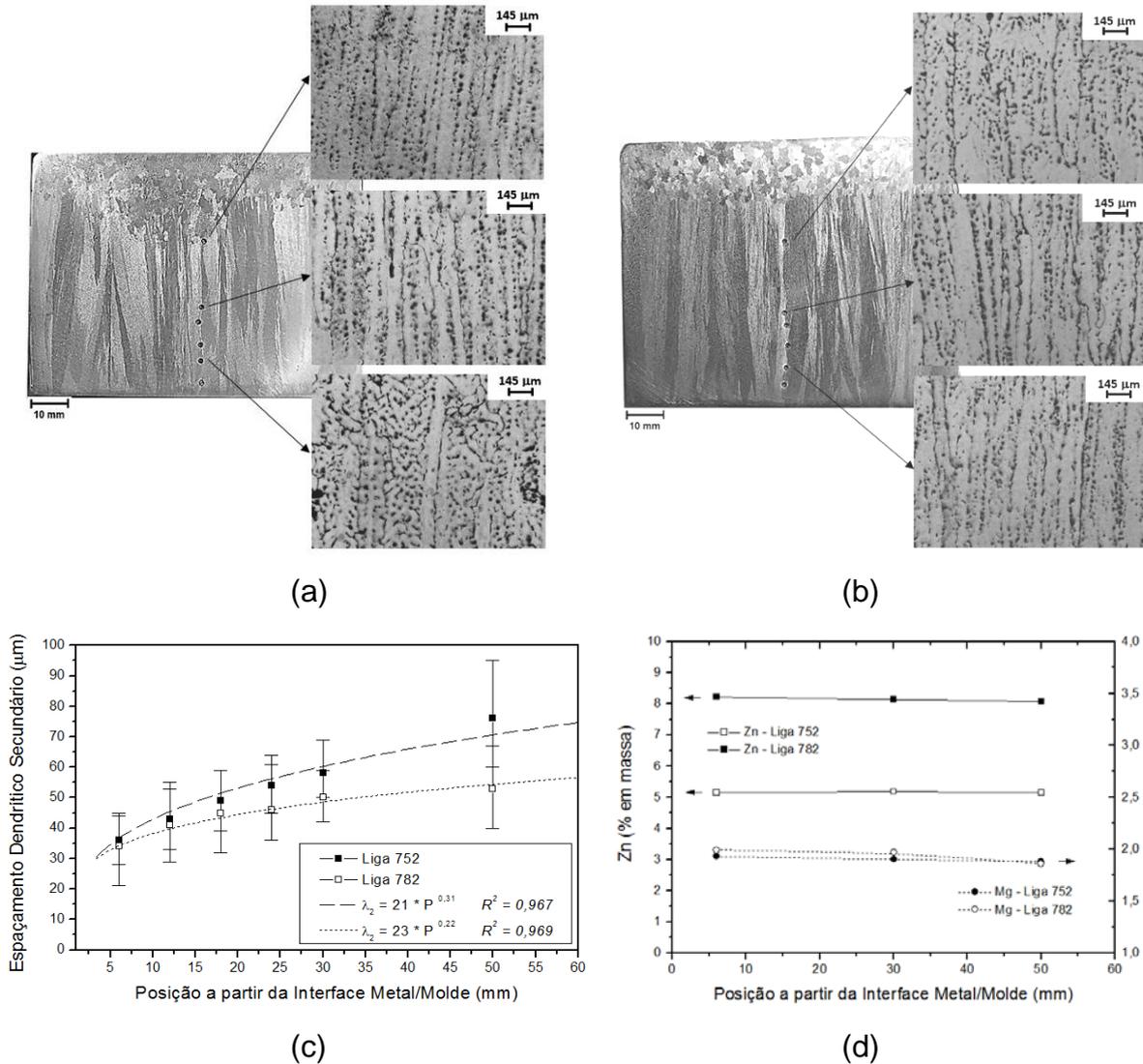


Figura 3. (a-b) Estruturas típicas das ligas 752 e 782, (c) espaçamento dendrítico secundário (λ_2) em função da posição, (d) distribuição do Zn e do Mg em função da posição.

Com o decréscimo das taxas de resfriamento à medida que se afasta da base do molde, os espaçamentos dendríticos aumentam para ambas as ligas. Os menores valores de λ_2 foram observados na liga 782 (com maior teor de Zn), principalmente nas posições mais afastadas da base do lingote, onde foram observados os maiores valores para a liga 752. Também foram verificadas as distribuições dos elementos Zn e Mg para as posições referentes aos termopares TP2, TP5 e TP6 (12, 30 e 50 mm), e conforme apresentado na Figura 3d, a variação destes elementos é quase insignificante para as posições analisadas, o que demonstra que não ocorreu macrossegregação do soluto durante a solidificação.

As análises por difração de raios-X permitiram identificar as fases e precipitados presentes nas ligas, as quais são representadas no difratograma da Figura 4. Ambas as ligas são constituídas de uma matriz de alumínio- α , com os precipitados $MgZn_2$ e $Al_2Mg_3Zn_3$ distribuídos nas regiões interdendríticas, sendo que o primeiro aumenta em quantidade com o aumento do teor de Zn na liga.

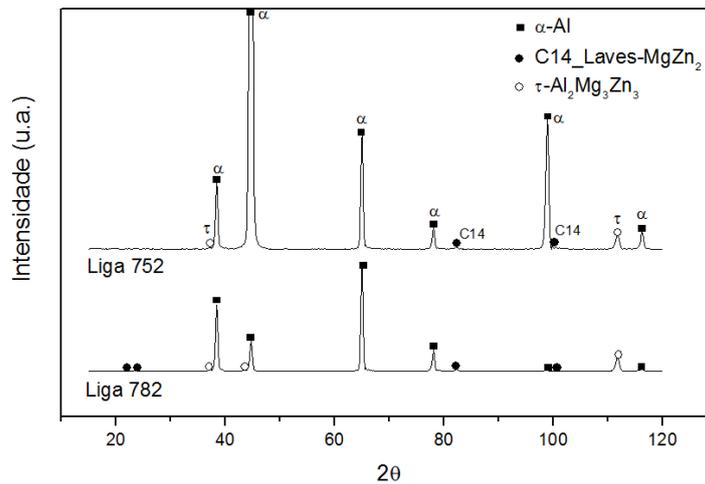


Figura 4. Difratogramas das ligas 752 e 782.

3.2. Propriedades Mecânicas

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para dureza Brinell, deformação até a fratura e limite de resistência à tração em função das posições ao longo dos lingotes, bem como as equações experimentais determinadas a partir dos dados. Conforme se observa, as durezas diminuíram para as posições mais afastadas da base dos lingotes, e isto pode ser atribuído as estruturas mais grosseiras nestas regiões tanto em termos de tamanho de grãos como de espaçamentos dendríticos secundários. Também pode ser notado que a liga com maior teor de Zn apresentou os maiores valores de dureza. Em relação à deformação, a liga 752 apresentou os maiores valores, os quais também diminuem em direção ao topo do lingote. Para o limite de resistência à tração, os comportamentos foram similares aos de dureza, onde a liga 782 apresentou os maiores valores.

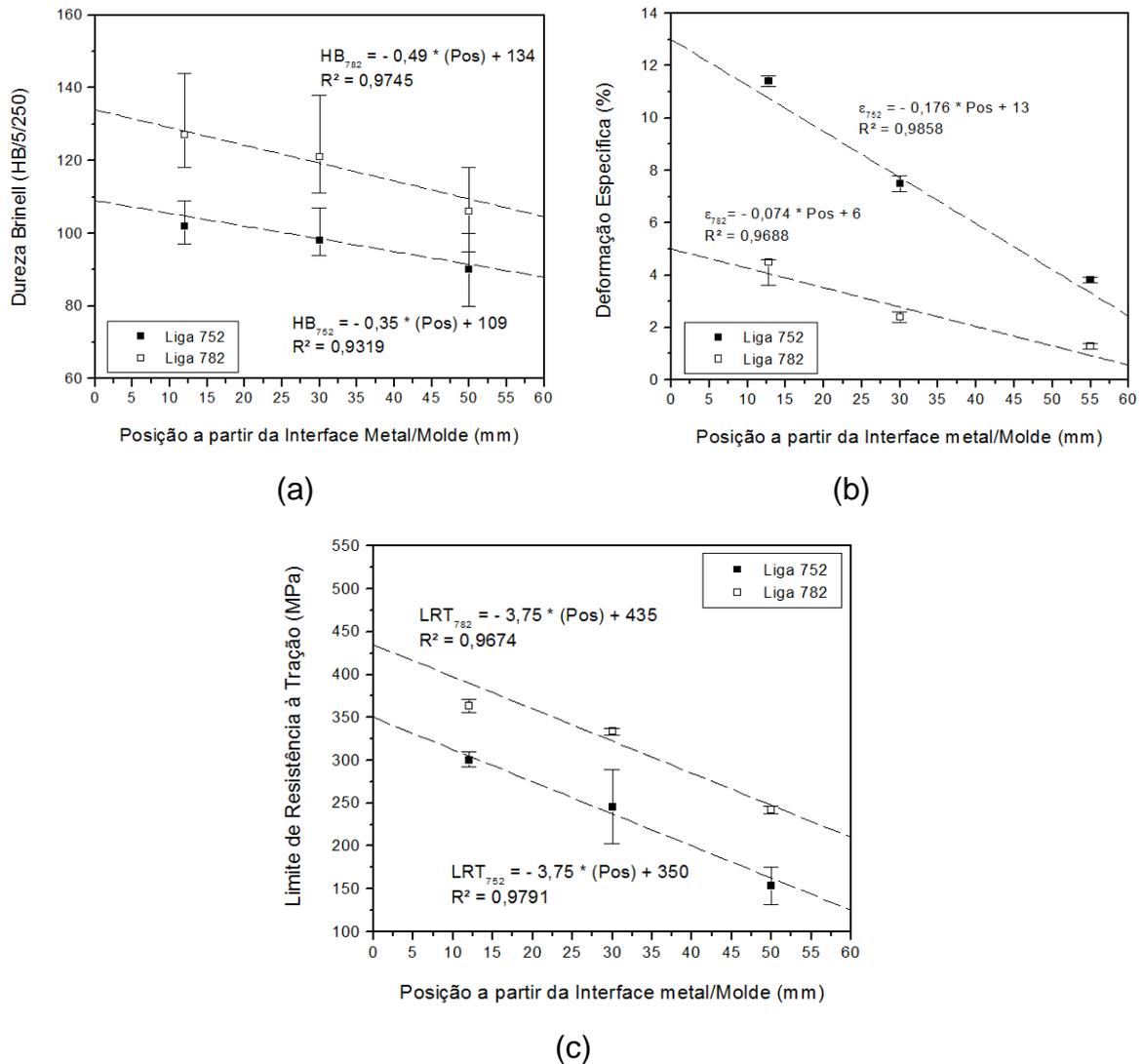


Figura 5. (a) Dureza Brinell, (b) alongamento, (c) limite de resistência a tração em função das posições ao longo dos lingotes das ligas 752 e 782.

Os resultados do volume desgastado determinados durante os ensaios de desgaste, os coeficientes de desgaste calculados e correlacionados em função dos espaçamentos dendríticos secundários e das durezas, e imagens das pistas de desgaste são apresentadas na Figura 6. Conforme observa-se na Figura 6a, o volume desgastado da liga 752 foi maior em todas as posições quando comparada à liga 782, sendo que os valores aumentaram a medida que as posições se afastaram da base do molde. Para os coeficientes de desgaste, estes mostraram uma relação direta com os espaçamentos dendríticos secundários (maiores coeficientes de desgaste para maiores λ_2), permitindo a obtenção de uma única equação experimental para as duas ligas. Comportamento oposto foi observado em relação

às durezas, onde maiores durezas acarretaram em menores coeficientes de desgaste para ambas as ligas.

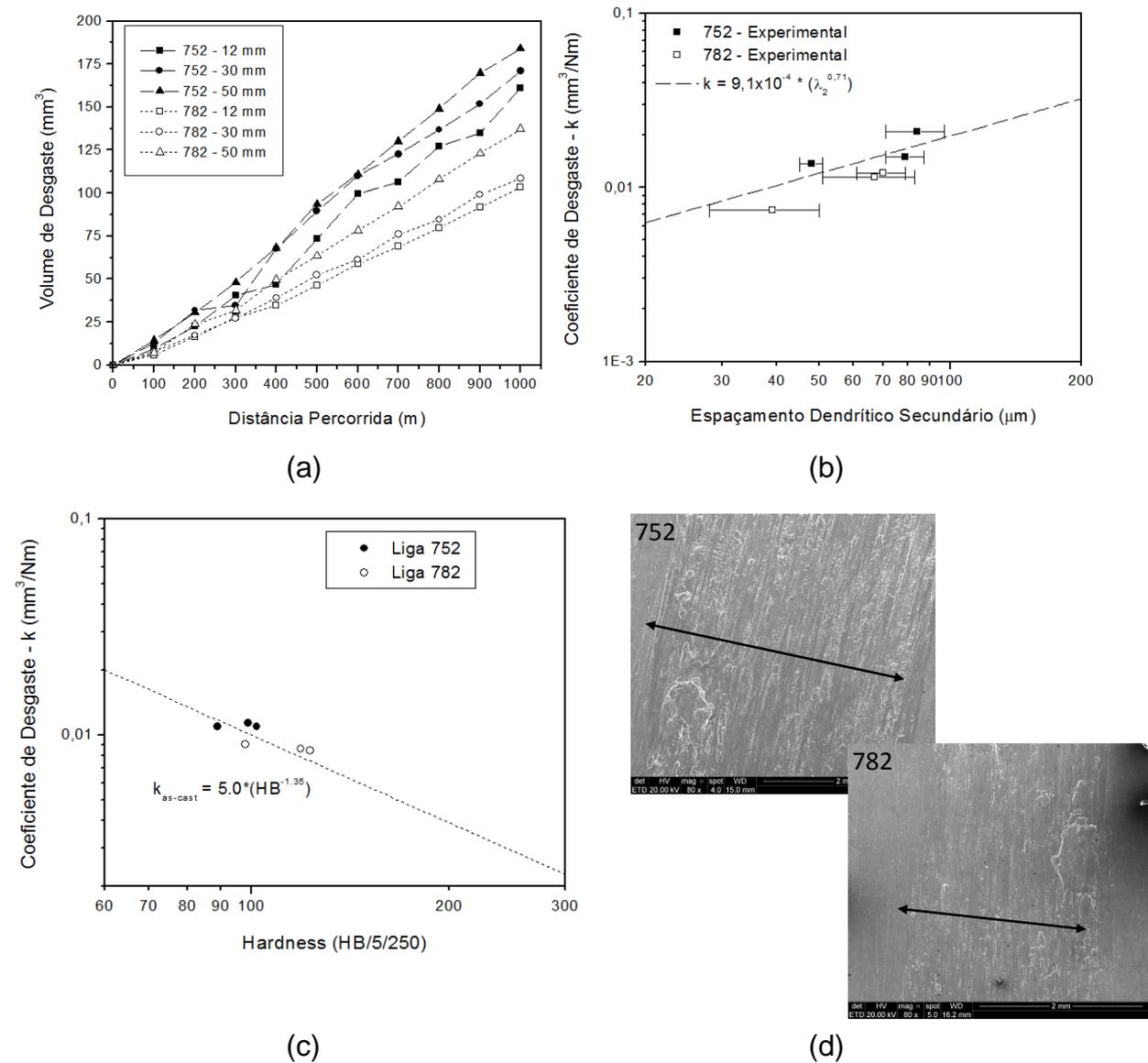


Figura 6. (a) Volume desgastado, (b) coeficiente de desgaste em função de λ_2 , (c) coeficiente de desgaste em função da dureza, (d) pistas de desgaste para as ligas 752 e 782.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- resistência ao desgaste aumentou com o aumento do teor de Zn nas ligas, consequência da diminuição dos espaçamentos dendríticos secundários e das

maiores durezas e resistências observadas;

- equações experimentais correlacionando os coeficientes de desgaste em função dos espaçamentos dendríticos secundários e das durezas foram determinadas, permitindo estimar o comportamento para as condições analisadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Projeto no. 403303/2016-8), à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul), à CAPES e a PUCRS.

REFERÊNCIAS

- [1] ISADARE, A. D.; Aremo, B.; Adeoye, M. O.; Olawale, O. J.; Shittu, M. D. Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy. *Materials Research* v. 16, n. 1, p. 190-194, 2013.
- [2] ENGD AHL, T.; Hansen, V.; Warren, P.J.; Stiller, K. Investigation of fine scale precipitates in Al–Zn–Mg alloys after various heat treatments. *Materials Science and Engineering A*, v. 327, p. 59–64, 2002.
- [3] MARLAUD, T.; Deschamps, A.; Bley, F.; Lefebvre, W.; Baroux, B. Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Acta Materialia*, v. 58, p. 248-260, 2010.
- [4] BELOV, N. A.; Eskin, D. G.; Aksenov, A. A. *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys*. Chapter 6. Elsevier (2005) 193-222.
- [5] ACER, E.; Çadırlı, E.; Erol, H.; Kırındı, T.; Gündüz, M. Effect of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of Al-5.5Zn-2.5Mg alloy. *Materials Science and Engineering A*, v. 26, p. 144-156, 2016.
- [6] PORÁS, B. R.; França, R. P.; Spim, J. A.; Garcia, A.; Costa, E. M.; Santos, C. A. The effects of dendrite arm spacings (as-cast) and aging time (solution heat-treated). *Journal of Alloys and Compounds*, v. 549, p. 324-335, 2013.
- [7] LEPPER, K.; James, M.; Chashechkina, J.; Rigney, D. A. Sliding behavior of selected aluminum alloys. *Wear*, v. 203-204, p. 46-56, 1997.
- [8] PRASADA, A.K., Das, K., Murty, B. S., Chakraborty, M. Effect of grain refinement on wear properties of Al and Al-7Si alloy. *Wear*, v. 257, p. 148-153, 2004.
- [9] PRABHUDEV, M. S.; Auradi, V.; Venkateswarlu, K.; Siddalingswamy, N. H.; Kori, S. A. Influence of Cu addition on dry sliding wear behavior of A356 alloy. *Procedia Engineering*, v. 97, p. 1361-1367, 2014.

- [10] ALHAWARI, K. S.; Omar, M. Z.; Ghazali, M. J.; Salleh, M. S.; Mohammed, M. N. Evaluation of the microstructure and dry sliding wear behavior of thixoformed A319 aluminium alloy. *Materials and Design*, v. 76, p. 169-180, 2015.
- [11] PORÁS, B. R.; Lopes, M. M.; Garcia, A.; Santos, C. A. The correlation of microstructure features, dry sliding wear behavior, hardness and tensile properties of Al-2wt%Mg-Zn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 764, p. 267-278, 2018.
- [12] American Society for Testing and Materials. Standard guide for preparation of metallographic specimens, ASTM E 3, ASTM International: USA, 2017.
- [13] American Society for Testing and Materials. Standard practice for microetching metals and alloys, ASTM E 407, ASM International: USA, 2015.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for Brinell hardness of metallic materials, ASTM E 10a, ASM International: USA, 2017.
- [15] American Society for Testing and Materials. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, ASTM G 99. ASM International: USA, 2004.
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for tension test of metallic materials, ASTM E 8, ASM International: USA, 2016.

DRY SLING WEAR ANALYSES IN AL-X%Zn-2%Mg ALLOYS AND RELATIONSHIP WITH SOLIDIFICATION CONDITIONS, AS-CAST STRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES

The objective of this work was to analyze the wear characteristics of as-cast Al-2wt.%Mg-Zn alloys (5% and 8% Zn contents), correlating with solidification conditions and microstructures. The alloys were unidirectionally solidified in a vertical furnace using a metallic water-cooled mold. The macrostructures and microstructures were analyzed by optical and scanning electronic microscopy, and X-ray diffraction. Samples extracted from the ingots were characterized by Brinell hardness and tensile tests. Dry sliding wear tests were performed in a pin-on-disc device using alumina ceramic balls (10-mm diameter), 14.7 N applied load, 1.8 m/s sliding speed, and 1000 m of total sliding distance. The results showed that alloy with lower Zn content presented higher λ_2 and fewer precipitates ($MgZn_2$ e $Al_2Mg_3Zn_3$), and inferior hardness and tensile strength. The alloy with 8%Zn showed the best wear resistance.

Key-words: solidification, wear, Al-Zn-Mg alloys, structures, mechanical properties.