



CORRELAÇÃO DA FORÇA DE CORTE NO PROCESSO DE USINAGEM COM AS MICROESTRUTURAS BRUTAS DE FUSÃO PARA LIGAS DILUÍDAS DE ALUMÍNIO – NIÓBIO

**Vinícius da S. Rocha¹, Thiago P. Sousa¹, Maycol M. Coutinho¹, Rhander Viana¹,
Michaela S. B. Fialho¹ e Daniel M. Rosa^{1*}**

1 - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF.

**Universidade de Brasília (UnB), Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília - DF,
CEP 70910-900. danielrosa@unb.br*

RESUMO

A solidificação envolve a transformação do metal no estado líquido para o estado sólido. Nesta transformação as microestruturas brutas de fusão formadas exercem forte influência nas propriedades mecânicas e químicas das ligas metálicas produzidas. Poucos estudos na literatura correlacionam as microestruturas brutas de fusão com a força na usinagem do material. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo o estudo da influência das microestruturas brutas de fusão das ligas Al 0,4% Nb e Al 0,8% Nb, solidificadas em um dispositivo de solidificação unidirecional ascendente com fluxo de calor transitório. As microestruturas foram correlacionadas com os parâmetros de usinagem no processo de torneamento usando o dinamômetro Kistler, com a análise da taxa de aquisição de força na direção F_x , F_y e F_z e a resultante F_t , preservando os parâmetros de corte constante em cada superfície e torneada. Os resultados mostraram que comparando as ligas de alumínio-nióbio solidificadas mostram que ao elevar o teor de soluto, neste caso nióbio, no interior das ligas analisadas ocasionou a elevação das propriedades mecânicas e o aumento da força de usinagem com a aproximação da chapa-molde.

Palavras-chave: *Microestrutura, ligas metálicas, solidificação unidirecional ascendente, usinabilidade e ligas Al-Nb.*

INTRODUÇÃO

Estudos revelam que a adição de Nb em ligas ferrosas interfere diretamente nas propriedades mecânicas da liga, elevando o limite de resistência mecânica, a resiliência, e a dureza do material. Nestes estudos, as análises das microestruturas, revelaram o refino da estrutura com adições de 3 ou 5% de Nb sendo este o principal motivo indicado para o aumento das propriedades mecânicas⁽¹⁻⁴⁾.

A literatura indica que a estrutura final da liga e as propriedades dependem do controle das variáveis térmicas de solidificação como a velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (V_L), a taxa de resfriamento (T_x) e o gradiente de temperaturas (G_L). Desta forma, o tamanho e a morfologia dos grãos, aliado aos espaçamentos dendríticos primários (λ_1), secundários (λ_2), distribuição de porosidade, produtos segregados e outras fases são dependentes das variáveis térmicas e por consequência irão definir as propriedades mecânicas, de resistência à corrosão e, de resistência ao desgaste das ligas de metálicas⁽⁵⁻⁹⁾.

Estudos realizados demonstraram que as adições de Nióbio no alumínio puro, obtêm-se estruturas mais refinadas, o que explica as melhoras nas propriedades mecânicas. No processo de usinagem no monitoramento da potência de corte é importante na influência do acabamento superficial da peça usinada, conhecer as forças atuantes sobre a cunha cortante da ferramenta e o estudo de seus componentes é extremamente importante, pois através delas pode-se estimar a potência necessária para realização do corte. Existe também uma relação delas com o desgaste da ferramenta, podendo ter influência na viabilidade econômica do processo, como: evitar o super dimensionamento das máquinas, custos elevados desnecessários do equipamento e de não possuir potência suficiente para o processo destinado. Com o estudo das forças de usinagem é possível a otimização dos parâmetros de corte e assegurar um melhor acabamento, maior vida da ferramenta e menor gasto de energia ^(8,10,11).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes desta pesquisa foram realizados em um torno mecânico paralelo universal da linha NARDINI, modelo NODUS 220, com faixa de rotação 30 a 2360 rpm e com 7,5 CV. A pastilha de corte utilizada nos corpos de provas foi a ISCAR-VNMS-12: insertos rombos de um lado e 35°, usado para materiais macios e não ferrosos com ângulo de inclinação positivo especial para forças de corte moderadas. O fluido de corte utilizado foi o álcool etílico 70% em abundância (jorro), por causa das altas temperaturas geradas na interface cavaco - ferramenta.

Para a realização do experimento preocupou-se em parametrizar o avanço para 0,05 mm/volta, a profundidade do corte em 2 mm e a rotação do torno para 2360 rpm para todos os corpos de prova. Para avaliar a correlação entre força de corte e a microestrutura. A medição das forças de corte na direção F_x , F_y e F_z foi realizada através do dinamômetro estacionário ligado ao amplificador de carga modelo 9257 BA marca Kistler Instrumentos, com três componentes a cristal de quartzo para medição dos três componentes ortogonais de uma força, incorporado com amplificador de carga com quatro faixas de medição comutáveis, 0,5kN a 10kN (F_x , F_y , F_z), possui sensibilidade de 10mV/N (F_x e F_y) e 5mV/N(F_z) com a frequência de trabalho 4000 Hz (F_x),(F_y) e (F_z), conforme figura 1.



Figura 1: Direções de Forças na usinagem.

Quanto menor, ainda que para a mesma profundidade de usinagem e avanço por rotação, a pastilha com menor ângulo de posição produz cavacos com menor espessura, podendo eliminar possíveis vibrações^(12,13). O software Scilab para simulação computacional dos ensaios experimentais e determinação dos parâmetros estatísticos mostra os valores quadráticos médios,

root meansquare (RMS), das forças de corte na direção F_x , F_y e F_z na direção da força axial de corte (Figura 2).

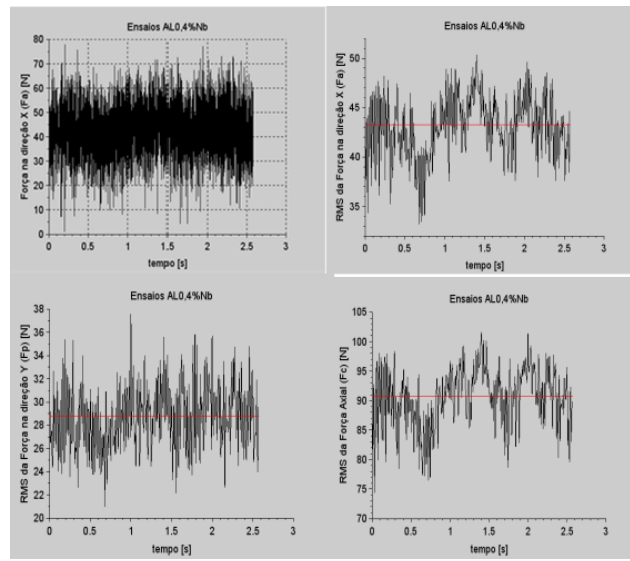


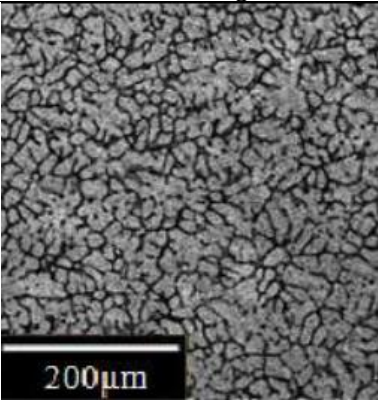
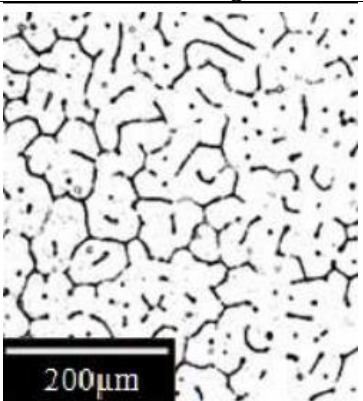
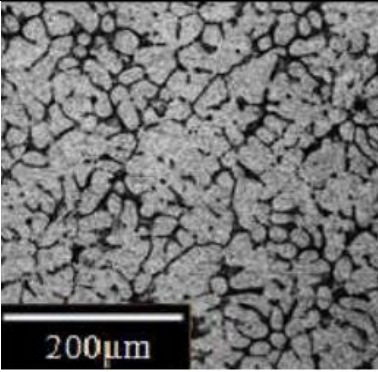
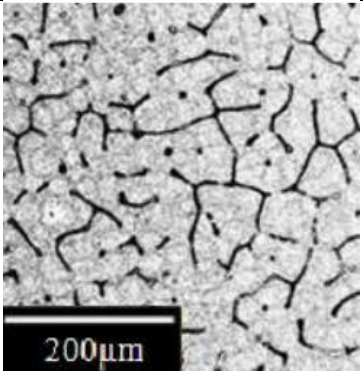
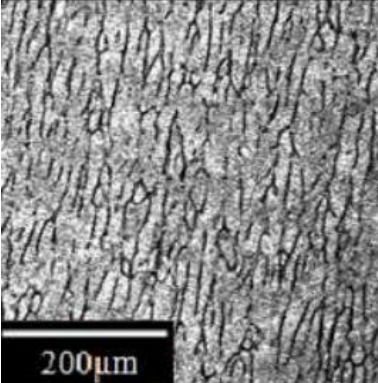
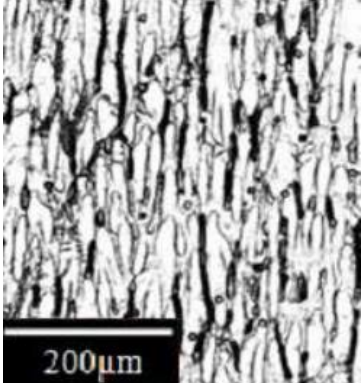
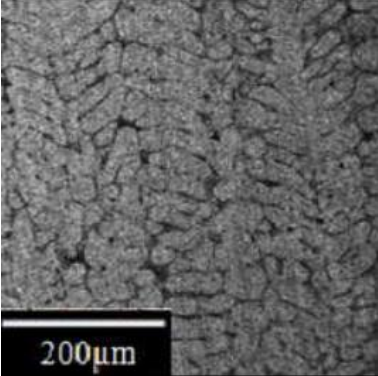
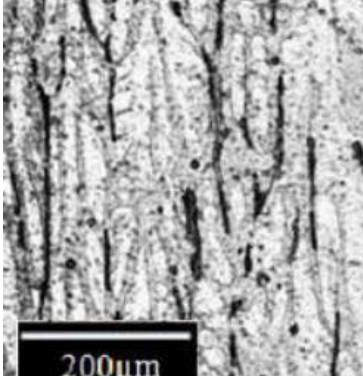
Figura 2: Análise da medição de força de corte na direção F_x – F_y e F_z considerando a frequência de trabalho 2k Hz para (F_x e F_y) e 3,5kHz (F_z), aquisição de 4000 Hz..

Para o ensaio de microdureza Vickers o equipamento utilizado foi o durômetro Emco-Test modelo Surascan 20, com carga de 50 gf e tempo de aplicação de 15 segundos. Foram realizadas 10 medidas para cada posição, 10 mm, 14 mm, 18 mm, 22 mm, 27 mm, analisada ao longo do comprimento do lingote^(14–16).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As microestruturas foram obtidas a partir da análise de secções transversais (λ_1) e longitudinais (λ_2) para diversas posições dos termopares ao longo do comprimento dos lingotes na parte central. Sendo assim, com velocidades e taxas de resfriamento maiores próximo a chapa/molde, mostra-se um refinamento da microestrutura, uma vez que a resistência térmica aumenta devido à camada solidificada formada na qual a troca térmica é mais efetiva, é notável que o perfil de formação dendrítica seja crescente, aumentando os espaçamentos dendrítico (λ_1 e λ_2) de forma crescente em direção ao topo do lingote, conforme abaixo.

Tabela 1: Microestrutura e variáveis térmicas por posição

Liga Al 0,8Nb		Liga Al 0,4Nb	
	P=14,0 mm $\lambda_1 = 33,4\mu\text{m}$ $V_L=1,58\text{mm/s}$ $T_x=4,57^\circ\text{C/s}$		P=14,0 mm $\lambda_1 = 90,4\mu\text{m}$ $V_L=1,1\text{mm/s}$ $T_x=5,90^\circ\text{C/s}$
	P=35,0 mm $\lambda_1 = 72,89\mu\text{m}$ $V_L=1,39\text{mm/s}$ $T_x=3,16^\circ\text{C/s}$		P=35,0 mm $\lambda_1 = 127,6\mu\text{m}$ $V_L=0,96\text{mm/s}$ $T_x=2,93^\circ\text{C/s}$
	P=14,0 mm $\lambda_2 = 34,71\mu\text{m}$ $V_L=1,58\text{mm/s}$ $T_x=4,57^\circ\text{C/s}$		P=14,0 mm $\lambda_2 = 15,4\mu\text{m}$ $V_L=1,1\text{mm/s}$ $T_x=5,90^\circ\text{C/s}$
	P=35,0 mm $\lambda_2 = 57,45\mu\text{m}$ $V_L=1,39\text{mm/s}$ $T_x=3,16^\circ\text{C/s}$		P=35,0 mm $\lambda_2 = 22,8\mu\text{m}$ $V_L=0,96\text{mm/s}$ $T_x=2,93^\circ\text{C/s}$

A tabela 1 apresenta as estruturas dendríticas em que foram somente observadas a formação de braços primários e secundários. Os resultados permitem avaliar a influência da chapa/molde para ambos os experimentos, nota-se o aumento dos espaçamentos conforme a distância aumenta em relação à chapa molde.

As forças de corte durante a usinagem de ligas de alumínio são relativamente baixas, estas, no entanto, podem fornecer um bom indicador para a comparação de diferentes ligas sob as mesmas condições de usinagem⁽¹⁷⁾. Na Figura 3 é realizada uma comparação entre intensidades de força de corte das ligas solidificadas unidirecionalmente.

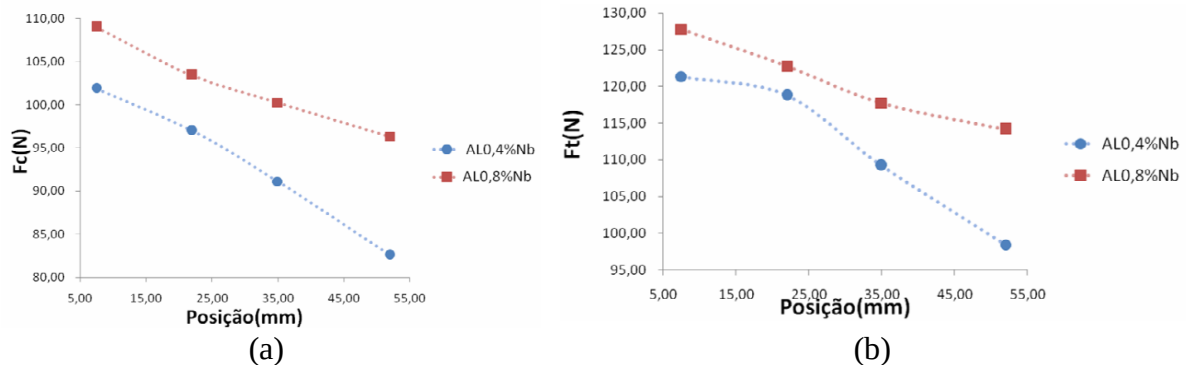


Figura 3: (a) Comparação entre intensidades de força de corte das ligas; (b) Força total de usinagem comparando as ligas AL0,4%Nb e a AL0,8%.

Comparando a intensidade de força de corte das duas ligas, Figura 3 (a), a intensidade da liga AL0,8%Nb apresentou ser maior em cada posição, as duas ligas apresentaram redução conforme se aproxima do final do lingote. De acordo com a Figura 3 (b), a liga com maior teor de soluto, apresentou maior intensidade de força total de usinagem, pois, será necessário para poder cortar o material. O gráfico também apresenta o decaimento de força de corte com a aproximação da chapa/molde, o que segue o esperado visto às durezas e microestruturas obtidas figura 2.

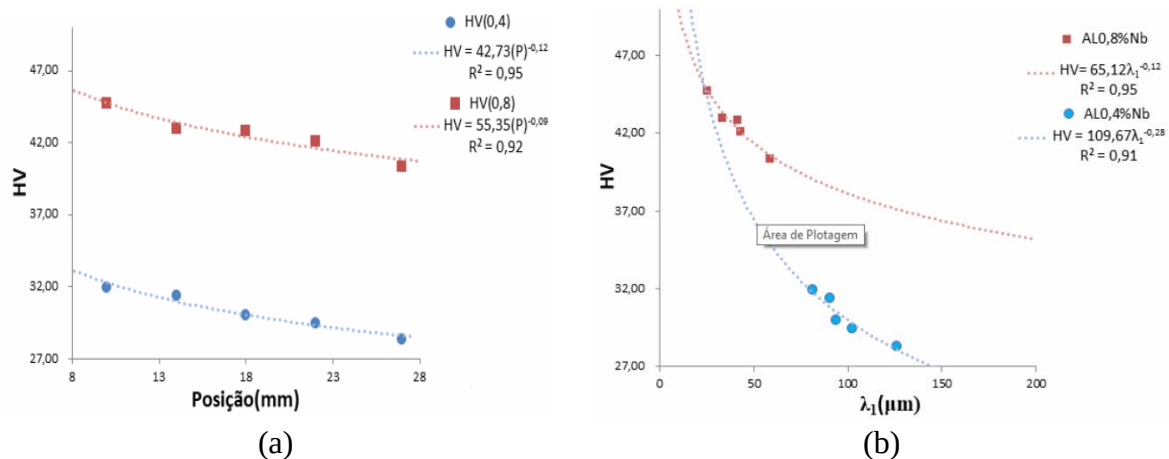


Figura 4: (a) Gráfico da dureza em função da posição; (b) Gráfico da dureza em função do espaçamento dendrítico primário.

Para a correlação da dureza com posição, mostrada na figura 4 (a), pode-se observar que a dureza da liga aumenta com a aproximação da chapa/molde, ou seja, ao se distanciar da chapa/molde na região avaliada, observa-se que a intensidade da dureza diminui. A expressão é dada por $HV=42,73(P)^{-0,12}$ $R^2=0,95$ para a liga Al-0,4%Nb e $HV=55,35(P)^{-0,09}$ $R^2=0,92$ para a liga AL0,8%Nb. Na correlação da dureza com espaçamento dendrítico primário, mostrada na figura 4 (b), pode-se observar que a dureza da liga aumenta com a redução do espaçamento dendrítico, ou seja, ao se distanciar da chapa/molde na região avaliada, observa-se que o espaçamento dendrítico cresce e se torna mais bem definido. A expressão é dada por

$HV=109,67(\lambda_1)^{-0,28}$, $R^2=0,91$ para a liga Al-0,4%Nb e $HV=65,12(\lambda_1)^{-0,12}$ $R^2=0,95$ para a liga Al0,8%Nb.

CONCLUSÕES

Aquisição da Força de usinagem da direção Fx, Fy e Fz com relação entre as ligas Al0,4%Nb e Al0,8%Nb: Os valores das forças aplicadas nas três componentes apresentaram os valores quadráticos do inglês, root meansquare (RMS), mais significativo para Fz, analisado em cada corpo de prova a usinagem de corte das ligas Al0,4%Nb e Al0,8%Nb, comparado com a microestrutura bruta de fusão, conclui-se que quanto mais afastado da chapa/molde os parâmetros experimentais demonstram valores menores que a condição inicial. Para valores de força de usinagem total, os resultados são semelhantes aos resultados da força de corte. Comparado com a microestrutura bruta de fusão, quanto mais próximas da chapa/molde maior a intensidade da força que precisara para poder cortar o material.

AGRADECIMENTOS

À Capes, pelas bolsas de pesquisa e ao Instituto Federal de Goiânia – IFG pelo auxílio no desenvolvimento dos experimentos de usinagem.

REFERÊNCIAS

1. Gündüz M, Çadırlı E. Directional solidification of aluminium–copper alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;327(2):167-185. doi:10.1016/S0921-5093(01)01649-5
2. Yildirim M, Akdeniz MV, Mekhrabov AO. Microstructural evolution and room-temperature mechanical properties of as-cast and heat-treated Fe50Al50–nNb alloys (n=1, 3, 5, 7, and 9at%). *Materials Science and Engineering: A*. 2016;664:17-25. doi:10.1016/j.msea.2016.03.128
3. Ruan Y, Gu QQ, Lü P, Wang HP, Wei B. Rapid eutectic growth and applied performances of FeAlNb alloy solidified under electromagnetic levitation condition. *Materials & Design*. 2016;112:239-245. doi:10.1016/j.matdes.2016.09.072
4. Ghatei Kalashami A, Kermanpur A, Ghassemali E, Najafizadeh A, Mazaheri Y. The effect of Nb on texture evolutions of the ultrafine-grained dual-phase steels fabricated by cold rolling and intercritical annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;694:1026-1035. doi:10.1016/j.jallcom.2016.10.148
5. Gomes RCF. Caracterização térmica e mecânica de ligas hipoeutéticas de alumínio-níquel (Al-Ni). *Thermal and mechanical characterization of hypoeutectic aluminum-nickel alloy (al-ni)*. Published online 2013.
6. Goulart PR. Caracterização da microestrutura de solidificação de ligas Al-Fe e correlação com propriedades mecânicas. *Characterização solidification microstructures of Al-Fe alloys and correlation with mechanical properties*. Published online 2010. Accessed February 27, 2019. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265098>
7. Dantas PP. Caracterização de ligas hipereutéticas de Al-Ni solidificadas unidirecionalmente. *Characterization of hypereutectic Al-Ni alloys unidirectionally solidified*. Published online October 15, 2014. Accessed January 20, 2019. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/16508>

8. Silva JIS. Caracterização microestrutural e mecânica de ligas diluídas de alumínio-nióbio. Published online November 20, 2017. Accessed September 16, 2022. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31361>
9. Misra D, Jansto SG. NIOBIUM IN HEAVY AND MEDIUM SECTIONS FOR HIGH-RISE STRUCTURES. :18.
10. Viana R, Sousa D, SILVA R, et al. *Monitoramento Da Potência Ativa Na Usinagem Utilizando Um Sistema de Baixo Custo.*; 2017. doi:10.26678/ABCM.COBEF2017.COF2017-1316
11. Machado ÁR, Coelho RT, Abrão AM, Silva MB da. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher; 2015.
12. Filho J, De ES. *PROCESSAMENTO, USINAGEM E DESGASTE DE LIGAS SINTERIZADAS PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS*. text. Universidade de São Paulo; 2006. doi:10.11606/T.85.2006.tde-28062007-123420
13. JESUS FILHO E, JESUS E, ROSSI J, SALGADO L, COLOSIO M. SANTOS. Assentos de Válvula Sinterizados—Avaliação da Usinabilidade e Desgaste. In: *XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência Dos Materiais-CBECI Mat*. Vol 17. ; 2006:7358-7368.
14. Coutinho MM. Correlação entre as propriedades mecânicas e microestruturais da liga Al0,4%Nb em diferentes condições de solidificação. Published online July 19, 2018. Accessed January 28, 2019. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/32281>
15. Sousa TP. Evolução da microestrutura bruta de fusão de ligas Al-Cu-Nb solidificadas unidirecionalmente. Published online March 11, 2019. Accessed September 16, 2022. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/35479>
16. Moreira Coutinho M, Saraiva Silva JI, Primo Sousa T, Monteiro Rosa D. Upward Unsteady-State Solidification of Dilute Al–Nb Alloys: Microstructure Characterization, Microhardness, Dynamic Modulus of Elasticity, Damping, and XRD Analyses. *Metals*. 2019;9(6):713. doi:10.3390/met9060713
17. Niknam SA, Tiabi A, Zaghbani I, Kamguem R, Songmene V. Milling Burr Size Estimation Using Acoustic Emission and Cutting Forces. In: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2012:901-909. doi:10.1115/IMECE2011-63824

CORRELATION OF CUTTING STRENGTH IN THE MACHINING PROCESS WITH CRUDE FUSION MICROSTRUCTURES FOR DILUTED ALUMINUM- NIOBIO ALLOYS

ABSTRACT

Solidification involves the transformation of the metal from the liquid to the solid state. In this transformation the gross melt microstructures formed exert a strong influence on the mechanical and chemical properties of the metal alloys produced. Few studies in the literature correlate the gross melt microstructures with the force in the machining of the material. In this context, the objective of this work was to study the influence of the crude melt microstructures of the alloys Al 0.4% Nb and Al 0.8% Nb solidified in an unidirectional solidification device with transient heat flux. The microstructures were correlated with the machining parameters in the turning process using the Kistler dynamometer, with the analysis of the force acquisition rate in the direction F_x , F_y and F_z and the resultant F_t , preserving the constant cutting parameters in each surface and turned. The results showed that the solidified aluminum-niobium alloys show that when the solute content, in this case niobium, was increased within the analyzed alloys, the mechanical properties increased, and the machining force increased with the approach of the mold plate.

Keywords: Microstructure, metal alloys, unidirectional upward solidification, machinability and Al-Nb alloys.