

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ASPECTOS METALÚRGICOS QUE INFLUENCIAM NA USINABILIDADE DE LIGAS DE ALUMÍNIO.

Wendel Leme Beil, wendelleme@yahoo.com.br¹

Wallyson Thomas Alves da Silva, wallyson.silva@sp.senai.br²

¹ UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas - Rua Mendeleev, 200- Cidade universitária “Zeferino Vaz” – Campinas- SP, wendelleme@yahoo.com.br

² SENAI, Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”, Rua Cícero Canuto de Lima, 71 – São Bernardo- Campinas- SP, wallyson.silva@sp.senai.br

Resumo: O presente trabalho aborda a usinabilidade do alumínio e suas ligas e visa propor uma explicação a respeito da baixa usinabilidade, encontrada no fresamento tangencial em dois lotes distintos de materiais fornecidos; porém, supostamente da mesma liga tradicionalmente utilizada. Por ser uma peça utilizada como treino numa instituição de ensino os parâmetros de usinagem já são estabelecidos. Um dos lotes utilizados na fabricação apresentou boa usinabilidade, enquanto o outro, além de não atingir a rugosidade desejada, provocou a quebra da ferramenta utilizada. Por meio da análise de composição química, análise metalográfica, ensaio de dureza Brinell, ensaio de tração e estudo das condições de usinagem, será proposta uma explicação. Os resultados da análise de composição química mostraram que se tratavam de ligas diferentes: uma 6351 Al Mg Si e outra 5052 Al Mg. O ensaio de dureza Brinell revelou que uma das ligas encontrava-se na faixa de dureza, 90 HB, na qual se tem boa usinabilidade; enquanto que a outra estava muito aquém desta faixa. O ensaio metalográfico analisou o processo de fabricação pelo qual os materiais foram submetidos anteriormente e esclareceu que a amostra A, liga (6351) de Al Mg Si, apresentou uma micrografia que sugeriu uma laminação à quente, devido aos grãos estarem todos recristalizados ou uma recristalização devido ao tratamento térmico T6, tipicamente realizados nesta família de ligas de alumínio. Já a liga (5052) Al Mg encontrava-se fortemente encruada, sugerindo por comparação, uma redução promovida por laminação a frio por volta de 80%. A liga 6351 reuniu todas as melhores características de usinabilidade em alumínio enquanto a liga 5052 apesar de encontrar-se encruada reuniu características aquém das necessárias para uma boa usinabilidade.

Palavras-chave: Usinabilidade, Alumínio, estado metalúrgico.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais não-ferrosos possuem propriedades mecânicas, físicas e químicas que lhes possibilitam uma posição garantida entre os materiais utilizados em engenharia. Neste contexto, merecem destaque as ligas de alumínio que tem sido utilizadas em diversas áreas como a aeronáutica, automobilística e aero espacial. O que confere estas utilizações são: suas propriedades mecânicas, elevada resistência à corrosão, baixa densidade, etc. Dentre os processos de transformação das ligas de alumínio encontra-se a usinagem e, dentro dela, o processo de fresamento frontal e tangencial, foco de estudo deste trabalho.

Corriqueiramente pensa-se que a usinabilidade dos materiais está diretamente ligada a dureza que o material apresenta e ao quanto este material suporta de solicitação mecânica. Desta forma, uma conclusão prematura conduz ao pensamento que materiais mais macios são de alta usinabilidade e materiais duros de baixa. No entanto, esta conclusão é equivocada (Diniz et al, 2013).

Comparado com os metais ferrosos o alumínio e suas ligas são de mais fácil usinagem, apresentam pressão específica de corte mais baixas e mais altas velocidades de corte, avanço e grande produção de cavaco. Devido a seu alto coeficiente de dilatação térmica, o alumínio em usinagem deverá ser mantido sempre frio se pretende que suas dimensões apresentem bom controle dimensional e o acabamento superficial seja adequado. As temperaturas de usinagem são geralmente baixas e altas velocidades de corte são utilizadas, porém, ao considerar critérios de usinabilidade como baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio

tenha boa usinabilidade, geralmente em condições normais o cavaco obtido é longo e o acabamento superficial é insatisfatório, devido a alta ductilidade (Diniz et al; Ferraresi, 2013).

Entre os fatores metalúrgicos que afetam a usinabilidade do alumínio e suas ligas, encontram-se as propriedades mecânicas, térmicas, dureza e composição química. Quanto à dureza recomenda-se que seja maior de 80 HB, uma vez que valores inferiores levam a uma tendência de formação de aresta postiça de corte, dificultando a obtenção de rugosidades baixas. Sua ductilidade e dureza pode ser melhorada por meio de trabalho a frio gerando uma microestrutura encruada. Devido ao alumínio apresentar em geral boa usinabilidade, os elementos adicionados para formação de ligas proporcionam melhores propriedades mecânicas e em geral a usinabilidade. Ressalta-se as ligas de Al-Si, embora tenham ampla utilização e aplicação industrial as ligas de alto silício, contendo 5% ou mais de silício, são de usinagem mais difícil. É praticamente impossível obter um acabamento espelhado como se obtém com outras ligas de alta resistência. A presença do silício é determinante para a usinabilidade, para as ligas hipereutéticas. O valor de dureza ultrapassa 400 kgf/cm² e a temperatura de fusão chega 1420°C, resultando em maiores valores de força e potência de usinagem, mas é na abrasividade que o silício impacta na usinabilidade. As ligas com silício apresentam características abrasivas que aumentam conforme a composição fazendo com que a vida da ferramenta seja encurtada (Diniz et al; Ferraresi, 2013; Santos e Sales, 2007).

O presente trabalho tem como objetivo identificar as duas ligas utilizadas na usinagem das peças mostradas na Fig.1, bem como investigar os mecanismos que estão prejudicando o processo de usinagem deste material: quebra de ferramenta, peça com excesso de rebarba e acabamento superficial insatisfatório (inferior a $R_a = 0,8\mu\text{m}$). Baseando-se em aspectos metalúrgicos, como a composição química, histórico de processamento dos materiais usinados, ensaios de dureza, tração, metalografia, análise do cavaco produzido e acabamento superficial, uma explicação será proposta.



Figura 1 – Peças apresentando resultados, ruins à esquerda e bons à direita, após usinagem.

Fonte: O próprio autor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do problema apresentado se deu em 5 etapas :

Análise da composição química; análise metalográfica; ensaio de tração; ensaio de dureza; estudo das condições de corte no processo de fresamento frontal e tangencial. Para a análise metalográfica retirou-se amostras de três pontos distintos das peças para se verificar a homogeneidade do material. Para os ensaios de tração, composição química, dureza e condições de usinagem os ensaios foram replicados.

2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A análise da composição química das ligas estudadas por meio do equipamento de espectrometria ótica Bill-Oes. A preparação do material a ser analisado pelo equipamento se deu da seguinte forma: o material foi serrado na cut off em pequenos pedaços de 20mm por 40mm, em seguida foram lixados com lixa d'água e utilizadas as granulometrias de 220, 320, 400 e 600 Mesh e em seguida ficaram por cerca de 30 segundos no ultrassom para a retirada de qualquer impureza.

2.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica foi realizada utilizando-se microscópio óptico Leica DM ILM com sistema de aquisição de imagens.

As ligas alumínio-magnésio e alumínio-silício-magnésio foram lixadas com lixas de granulometria 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 e polidas com solução de alumina de 3 microns e 1 micron e posteriormente atacadas com reagente Poultons e Keller respectivamente para revelação da microestrutura.

2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para realização dos ensaios de tração foram confeccionados cinco corpos de prova idênticos de cada material, que foram posteriormente ensaiados numa máquina universal de ensaios de marca KRATOS, utilizando-se uma célula de carga com capacidade de 20000 kgf. Os corpos de prova foram adequados às dimensões do material disponível e os ensaios foram realizados utilizando-se parâmetros estabelecidos por norma.

2.4 ENSAIO DE DUREZA BRINELL

O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro austríaco EMCO TEST modelo M4V625, com uma esfera de diâmetro de 2,5 mm com carga de 31,25 kgf e com tempo de permanência da carga por 10 segundos.

O ensaio de dureza foi realizado com a intenção de se obter valores comparativos para relacioná-los com valores considerados referência na literatura.

2.5 ESTUDO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

A máquina utilizada para usinagem dos corpos de prova, foi um Centro de usinagem ROMI, Discovery 760 10 CV, 75 a 8.000 rpm, usinagem com fluido de corte (Blaser Swissslube - Blasocut BC20 - concentração 8-10% - pH 8,7/9,5).

A escolha da ferramenta se deu por uma classe de metal duro sem cobertura (a maioria das coberturas têm, em sua composição o titânio, que não possui afinidade físico-química com o alumínio). Além disso, um inserto sem cobertura, afina as arestas de corte, o que combina excelente resistência ao desgaste por abrasão e agudeza da aresta. Por isso foi escolhida para operação de acabamento no fresamento tangencial uma fresa de topo (sem cobertura) com código R216 32 120 30 AC22P 1630 (Sandvik) e no fresamento frontal um cabeçote fresador com código FCM D080 27 11 ferramenta Duplo-positiva (Iscar) e inserto com código T490 LNMX 0804 PN - R(Iscar). Foram extraídos os parâmetros de corte utilizados nos corpos de prova no fresamento frontal Tab. 1 e tangencial Tab. 2.

Tabela 1 - Levantamento dos principais parâmetros de corte no fresamento Frontal para Amostra A e B

ap (mm)		fn (mm/dente)		vc (m/min)	
Fabricante	Utilizado	Fabricante	Utilizado	Fabricante	Utilizado
(1.5 a 5.0)	0,5	(0.2 a 0.4)	0,357	(70 a 220)	503

Tabela 2 - Levantamento dos principais parâmetros de corte no fresamento tangencial para Amostra A e B

ap (mm)		fn (mm/dente)		vc (m/min)	
Fabricante	Utilizado	Fabricante	Utilizado	Fabricante	Utilizado
Até 26 mm	10	(0.036 a 0.071)	0,097	(45 a 60)	126

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise de composição química podemos constatar que a Amostra “A”, se trata de uma liga de alumínio magnésio silício, pertencente à família das ligas 6XXX, mais especificamente a liga 6351 e a amostra “B”, trata-se de uma liga de alumínio magnésio pertencente à família 5XXX, especificamente a liga 5052. Os resultados obtidos após análise estão expressos nas Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela 3 – Tabela de relação entre valores de referência e valores encontrados após espectrometria da amostra A, liga 6351.

		Amostra A – (usinabilidade boa)							
Possível liga.	Valores Encontrados	Al	Cr	Zn	Mn	Fe	Mg	Cu	Si
		97,139	0,0176	0,013	0,47	0,649	0,656	0,019	0,986
Al Mg Si 6351	Valores de referência		0,05 A 0,25	0,05 A 0,25	0,03 A 1,5	0,2 A 1,,0	0,05 A 2,0	0,05 A 1,5	0,8 A 13,5

Tabela 4 – Tabela de relação entre valores de referência e valores encontrados após espectrometria da amostra B, liga 5052.

		Amostra B – (usinabilidade ruim).							
Possível liga	Valores encontrados	Al	Cr	Zn	Mn	Fe	Mg	Cu	Si
		96,793	0,2146	0,010	0,064	0,202	2,5	0,012	0,086
Al Mg 5052	Valores de referência		0,05 a 0,35	0,05 a 1,8	0,03 a 1,4	0,1 a 0,7	0,2 a 5,6	0,03 a 0,35	0,08 a 0,7

Após a análise de composição química ter possibilitado a identificação de cada uma das amostras em estudo, amostra A liga 6351 (Al Mg Si) e amostra B liga 5052 (Al Mg), esta análise inicial não apontou uma justificativa aceitável para o problema encontrado, embora a amostra B encontra-se encruada sugerindo menos ductilidade, porém na usinagem observou-se, grande deformação plástica e formação de rebarbas. A análise metalográfica consistiu na obtenção das micrografias para posteriormente compará-las com valores encontrados em bancos de imagens metalográficas, inicialmente pode-se observar nas Fig. 2, Fig. 3 e Fig.4 após uma comparação direta que a amostra B encontra-se muito parecida com uma amostra da mesma família da liga onde constata-se que a amostra em questão passou por processamento mecânico a frio com redução menor do que a liga de referência, caracterizado por apresentar grãos muito alongados na direção do processamento apresentando uma microestrutura encruada, porém ainda com contornos de grãos visíveis.

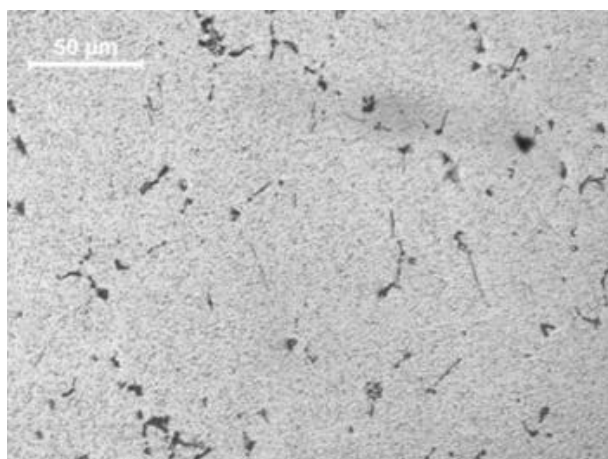


Amostra B

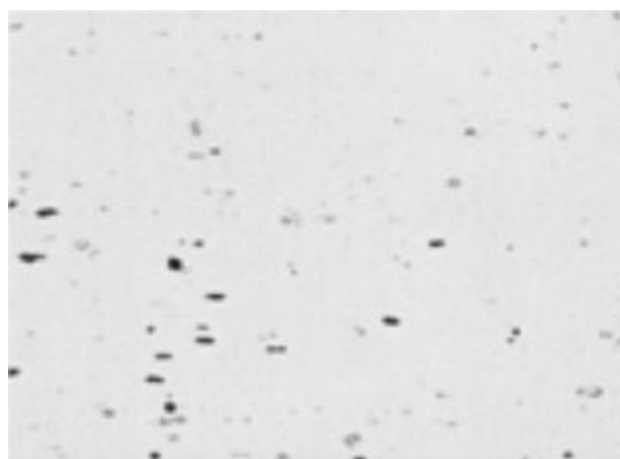


Liga (5057) pertencente a mesma família da amostra “B” utilizada como referencia laminada com 85% de redução (Metals Handbook, 1992).

Figura 2 – micrografia obtida da amostra B (liga 5052) comparada com uma liga 5057 com 85 % de redução.

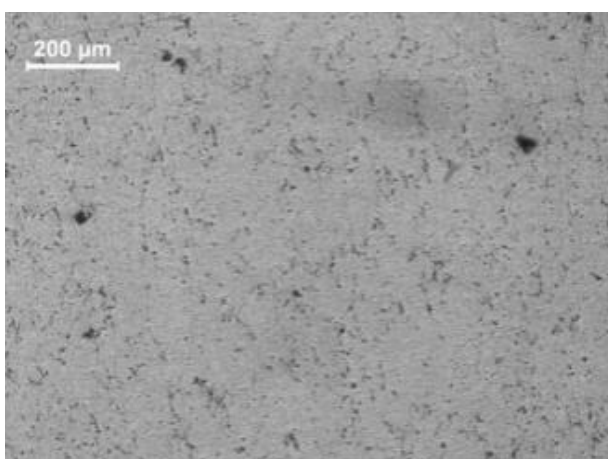


Amostra A



Liga (6061) pertencente a mesma família da amostra “A” utilizada como referencia laminada a quente com 98% de redução (Metals Handbook,1992).

Figura 3 – micrografia obtida da amostra A (liga 6351) comparada com uma liga 6061 com 98 % de redução em um processo de laminação a quente.



6351 Al Si Mg



5052 Al Mg

Figura 4 – micrografia comparando amostra A (liga 6351) com amostra B (liga 5052).

Já a amostra A, embora tenha sido possivelmente submetida a uma redução de 98 %, apresenta grãos basicamente arredondados o que sugere por comparação e análise da micrografia obtida que o material tenha sido submetido a um tratamento térmico T6, que consiste na solubilização, Fig. 3.

Com base no exposto acima e na Figura 4 pode-se afirmar que as amostras em análise possuem estados metalúrgicos completamente distintos. A amostra “A” apresenta-se recristalizada enquanto a amostra B totalmente encruada . Sabe-se que as ligas de alumínio podem ser endurecidas por processamento a frio ou tratamento térmico. Observa-se desta forma que mesmo apresentando-se encruada a amostra “B” apresenta menor resistência do que a amostra “A”. A amostra “A” além de apresentar maior resistência provavelmente oriunda do tratamento térmico T6 ao qual foi submetida, também apresenta maior dureza Fig. 5 e Tab. 5, mesmo exibindo grãos recristalizados.

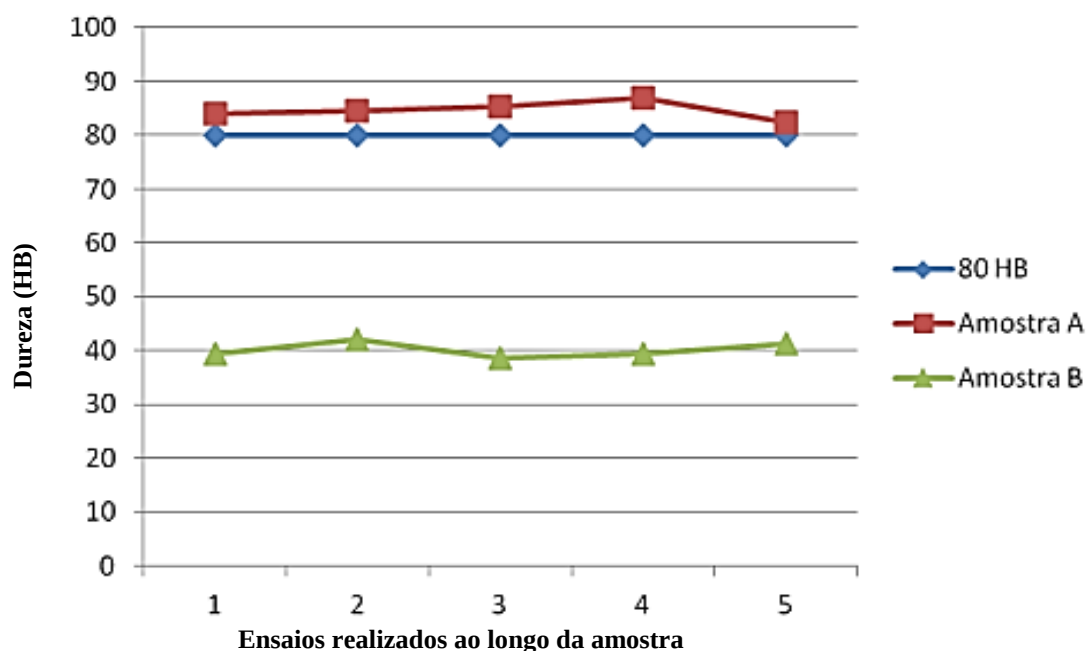


Figura 5 - Resultado do ensaio de dureza.

Tabela 5 - Relação entre dureza e limite de resistência a tração

Amostras	Liga	LRT (kgf/mm^2)	Dureza (HB)
Amostra A	6351	28	89
Amostra B	5052	19	42

Para avaliação da usinabilidade são, geralmente, usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto: Vida da ferramenta, Força de usinagem, Qualidade superficial da peça e Formação de cavacos (forma e tamanho dos cavacos). No entanto, este trabalho focou apenas na avaliação da qualidade superficial da peça e da formação do cavaco, visto que se trata de uma peça de competição entre redes de ensino de educação profissional, a vida da ferramenta e os custos associados ao processo não serão considerados. E quanto a força de corte, a instituição de ensino nem dispõe de dispositivos e instrumentos necessários para correta avaliação.

Tanto para o fresamento frontal, quanto o tangencial, vê-se pelas Tab. 6 e Tab.7, que a peça A apresentou melhor acabamento superficial que a peça B para todos os parâmetros de rugosidade avaliados. Considerando que os fatores de maior influência sobre a rugosidade da peça são a geometria da ferramenta, os parâmetros de corte e a vibração do sistema foram constantes para as duas peças avaliadas. A diferença dos valores de rugosidade entre as peças pode estar associada ao limite de resistência ao corte do material pela ferramenta.

Assim sendo, baixa resistência pode vir seguida de alta ductilidade e isto aumentando área da seção de corte, influenciando também a força de usinagem (Trent, 2000). Análogo à amostra B que apresentou maior ductilidade e menor resistência mecânica que à amostra A. Visto que para os mesmos parâmetros de corte a força de usinagem é afetada, o que aumenta a pressão específica de corte, devido ao aumento da área de seção transversal do cavaco cisalhado. Esse aumento de força causado pelas propriedades metalúrgicas do material, já citadas causaram vibrações regenerativas (Chatter) no processo de corte, causando deflexões na ponta da ferramenta e interferindo negativamente na microgeometria da superfície usinada, que por sua vez piora a rugosidade.

Na operação de faceamento o formato do cavaco é contínuo e helicoidal para um $f_z = 0.071\text{mm/dente}$ X $a_p = 0.5\text{ mm}$ na peça A, apresentando muita deformação do cavaco, isso indica que este material facilita o corte solicitando menos potência da máquina e gerando menos rebarba, preservando a ferramenta dos desgastes por abrasão e craterização, mas por outro lado facilita a formação da aresta postiça.

Tabela 6. Parâmetros de rugosidade no processo de fresamento frontal na operação de faceamento.

Tipo de peça	Processo de fresamento	Parâmetro de rugosidade em micrometro			
		Ra	Rmax	Rt	R3z
Peça A	Frontal	0.925	4.804	5.005	3.235
Peça B		1.239	7.544	7.544	3.711
Peça A	Tangencial	0.345	1.947	2.228	1.141
Peça B		1.055	4.865	4.999	2.533

Já na peça de baixa usinabilidade (peça B) os cavacos apresentaram-se mais quebradiços e rebarbas maiores, mesmo com os avanços e velocidades de corte próximo da peça de boa usinabilidade, mostrando que os aspectos metalúrgicos do material estão interferindo na formação do cavaco, até para avanços e profundidades de corte mais elevados ($f_z = 0.357\text{mm/dente}$ X $a_p = 4\text{ mm}$), em que o cavaco torna-se ainda mais quebradiço e segmentado.

Observa-se na Figura 8 que na operação de faceamento o formato do cavaco é contínuo e helicoidal para um f_z : 0.071 mm/dente X $a_p = 0.5\text{ mm}$ na peça A, apresentando muita deformação do cavaco, isso indica que este material facilita o corte solicitando menos potência da máquina e gerando menos rebarba, preservando a ferramenta dos desgastes por abrasão e craterização, mas por outro lado facilita a formação da aresta postiça. Já na peça de baixa usinabilidade (peça B) os cavacos apresentaram-se mais quebradiços e rebarbas maiores, mesmo com os avanços e velocidades de corte próximo da peça de boa usinabilidade Fig. 6, mostrando que os aspectos metalúrgicos do material estão interferindo na formação do cavaco, até para avanços e profundidades de corte mais elevados ($f_z = 0.357\text{mm/dente}$ X $a_p = 4\text{ mm}$), em que o cavaco torna-se ainda mais quebradiço e segmentado, Fig. 7.



Figura 6 – Região usinada nos diferentes materiais “Amostra A” acima e “Amostra B” abaixo.
Fonte: O próprio autor.

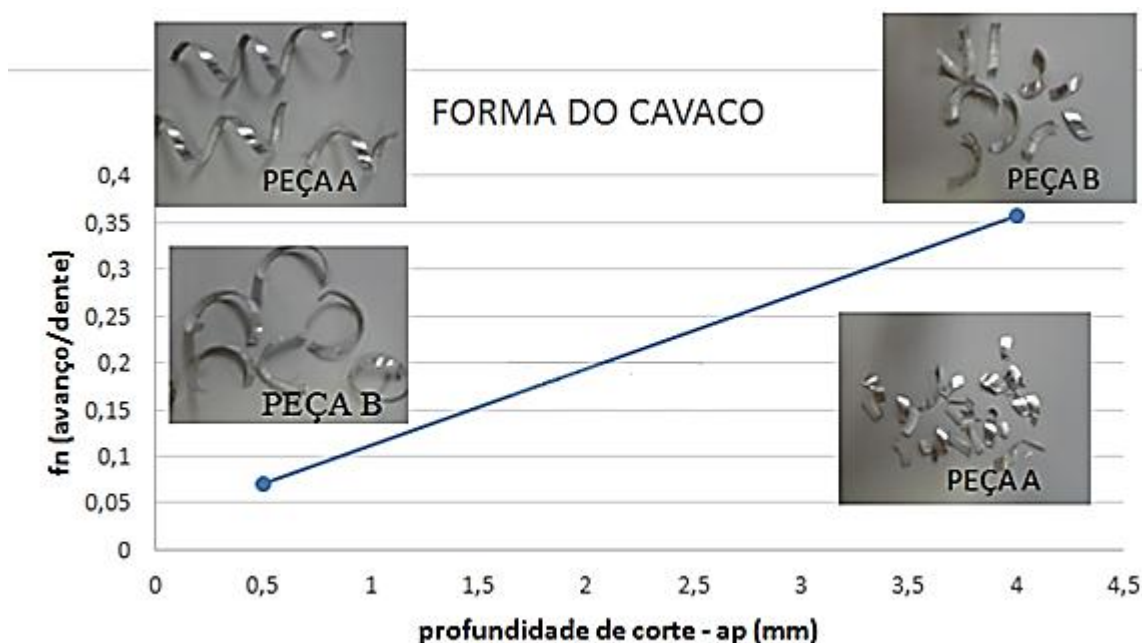


Figura 7 - Formas do cavaco obtidos no fresamento frontal da peça A e B, caracterizado pelo avanço e profundidade de corte.

3.1. CONCLUSÕES

Tendo em vista o exposto acima, conclui-se que:

- As ligas estudadas eram distintas, e uma das ligas tratava-se de uma liga de alumínio 6351 Al Mg Si e a outra 5052 Al Mg, como observado nos resultados expressos nas Tab. 3 e Tab. 4;
- As duas ligas encontravam-se em condições metalúrgicas diferentes, como notado nas Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4;
- Embora a análise metalográfica tenha mostrado que a liga 5052 encontrava-se fortemente encruada conforme mostrado na Fig. 4, foi a liga 6351 que apresentou uma maior resistência e dureza, Tab. 5 e Fig. 5;
- A liga 6351 apresentou uma dureza de 89 HB, enquanto a liga 5052 apresentou apenas 42 HB, o que segundo a literatura, justifica sua baixa usinabilidade;
- Nos critérios de usinabilidade do alumínio, tais como o acabamento superficial e formação de cavaco para as ligas estudadas encontraram-se divergências, embora as condições de corte tenham sido as mesmas. Ao observar a Fig. 7 observa-se que a rugosidade para a liga 5052 está acima do desejado e a forma do cavaco apresentada indica muita deformação plástica, indicada na Fig. 6, gerando maiores rebarbas na peça e provocando, entre outras coisas, a quebra prematura da ferramenta principalmente quando em grandes profundidades de corte são solicitadas (para este trabalho $a_p = 10$ mm), relacionando com a liga 6351, que apresentou melhores valores de rugosidade e facilidade no escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI ROBERTO MANGE pelo apoio e ao professor Dr. Anselmo Diniz pela orientação.

5. REFERÊNCIAS

- ASM Metals Handbook , 1992– Metallografy on microstructures, Aluminium Allys: Atlas of Microstructure for aluminium alloys, vol9.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2013, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, 8ª edição – editora Artliber.
- Ferraresi, D., 2013, “ Fundamentos da usinagem dos metais – 16ª reimpressão – Editora Edgar Blucher LTDA.
- Santos, S., C., Sales, W., F., 2007, “Aspectos tribológicos da usinagem dos matérias – Editora Artliber.
- Trent, E., M., Wright, P., K., 2000- “Metal Cutting” – 4ª edição.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

METALLURGIC ASPECT WHICH CAUSED IMPACTS ON THE MACHINABILITY OF ALUMINUM ALLOYS.

Wendel Leme Beil, wendelleme@yahoo.com.br

Wallyson Thomas Alves da Silva, wallyson.silva@sp.senai.br

1 UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas - Rua Mendeleev, 200- Cidade universitária “Zeferino Vaz” – Campinas- SP, wendelleme@yahoo.com.br

2 SENAI, Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”, Rua Cícero Canuto de Lima, 71 – São Bernardo- Campinas- SP, wallyson.silva@sp.senai.br

Abstract. *This paper mentioned the machinability of aluminum alloys, as well as aim to explain the poor machinability that was found in tangencial milling in two diferents lots, although its apparently belongs to the same used alloys. Considering that amount of parts are used to training students in a technical school the machining parameters have been already established. One of the manufacture lots had good machinability, on the other hand the other one, not only did not reach the expected roughness, but also broke the tool. Therefore, chemical composition analysis, metallographic analysis, Brinell hardness testing, tensile testing of metallic materials and the study of machining conditions that the paper is willing to propose a practical explanation. The analysis results of chemical composition showed diferents alloys, one of them was 6351 Al Mg Si alloy and the second was 5052 Al Mg alloys. The Hardness Brinell testing showed that one of the aluminum alloys were about 90 HB, it indicates good machinability and the other specimen alloy were too low from this range. The metallographic analysis were responsible for analyse the machining process which those materials were previously submitted and make clear the specimen A, (6351) Al Mg Si alloy, showed a micrography that take in account a hot rolling due to all recrystallized grains or it suffer recrystallization microstructure by a thermal treatment T6, typically made by this family of aluminuim alloy. At presente time, the (5052) Al Mg alloy is strongly work-hardened (strain hardening), comparing to the other it suggest a cold-rolled reduction to around 80%. The 6351 alloy gain the best machinability characteristics of aluminum otherwise the 5052 alloys could not gain the necessary machinability characteristics of aluminum material, although is was work-hardened.*

Keywords: *Machinability, Aluminum, metallurgical aspects.*