

ANÁLISE DA USINABILIDADE DE AÇOS E LIGAS DE TITÂNIO SELECIONADOS UTILIZANDO A EQUAÇÃO PROPOSTA POR HENKIN

Luis Ricardo Ribeiro Oliveira, luisricardoluisoliveira@live.com¹

Rafael Lemos Diniz, catedral_rafa20@hotmail.com¹

¹ Universidade Estadual do Maranhão Av. Oeste Externa, 2220 - São Cristovao, São Luís - MA

Resumo. A usinabilidade pode ser confundida com a usinagem, mas se tratam de conceitos diferentes. A usinagem está relacionada com o a remoção de material, enquanto que a usinabilidade se trata da influência dos parâmetros de usinagem no processo. Foi realizado um ensaio de usinabilidade que não requer usinagem, devido a facilidade de execução, sendo o teste de propriedades físicas proposto por Henkin aplicado a dois aços-liga, dois aços inoxidáveis e duas ligas de titânio, no total seis materiais, visando conhecer a influência de tais propriedades físicas sobre o parâmetro de usinabilidade. Para a realização do ensaio foram padronizadas certas unidades, bem como a definição dos parâmetros de corte, objetivando uma melhor compreensão e apresentação dos resultados. Foi feita uma análise, tanto de forma geral como comparativa entre os materiais catalogados, da interação das propriedades físicas com a usinabilidade expressa em velocidade de corte em conjunto com que a literatura diz a respeito da usinabilidade desses materiais, de forma a visualizar a influência dessas propriedades físicas diante dos resultados gerados. Essa análise possibilitou visualizar como as propriedades físicas influenciam na usinabilidade do material, expressa em velocidade de corte.

Palavras chave: Usinabilidade. Velocidade de corte. Aços. Ligas de Titânio

1. INTRODUÇÃO

Usinagem é um processo de remoção de material, que ao conferir à peça forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer desses itens, produz cavacos que são porções removidas do material usinado. A usinagem pode ser realizada, ainda, com ou sem o uso de fluidos lubrificantes ou refrigerantes (Casarin, 2018). O processo de usinagem apresenta vantagens que podem ser citados: Produção de grande diversidade de geometria de peças, elevado grau de precisão dimensional, controle do acabamento superficial bastante refinado e processos envolvendo, geralmente, poucas alterações nas propriedades do material da peça. Tudo isso faz com que os processos de usinagem sejam os principais processos de fabricação de muitas indústrias de produtos, máquinas, equipamentos e bens de consumo. A desvantagem do processo de usinagem inclui altos custos envolvidos quando comparados com outros processos (as principais parcelas dos altos custos da usinagem estão associadas à necessidade de máquinas, de ferramentas e de mão de obra especializada (Rebeyka, 2016).

A usinabilidade de certa forma pode ser confundida com o processo de usinagem, mas são apresentadas muitas diferenças. Porém é difícil de conceituar a usinabilidade de um metal, pois não se trata de uma propriedade específica e sim de um conjunto de parâmetros. Segundo Barrios, *et al* (2011) a usinabilidade é visto como as propriedades do material que possibilita a remoção de cavacos com mais ou menos facilidade, seja pela dificuldade de controle de cavaco, seja pela durabilidade da ferramenta, pela conservação da geometria ou pela precisão e acabamento superficial da peça usinada.

É apontado por Fracaro (2017) que o termo *usinabilidade* abrange principalmente as propriedades de um material que influenciam no processo de usinagem. Pode ser considerada uma propriedade específica do material usinado, porém também pode ser definida sob certos parâmetros. Em certas ocasiões um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, como por exemplo a vida da ferramenta e não possuir boa usinabilidade quando se leva em conta outra propriedade, como por exemplo a rugosidade da peça usinada (Diniz, Marcondes, & Coppini, 1999).

A usinabilidade dos materiais, segundo (Baptista, 2002), depende de diversos fatores dos próprios processos de usinagem, ou seja: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tipos das ferramentas, das máquinas operatrizes e dos fluidos de corte, dessa forma cada material apresenta condições particulares que ditam as normas mais adequadas de usinagem. Para Mills & Redford (1983), o termo “*usinabilidade*” se trata de uma propriedade de um material que rege a facilidade ou dificuldade com a qual um material pode ser usinado com uma determinada ferramenta de corte, sendo um termo amplamente utilizado por aqueles que se preocupam com a fabricação de e produção, mas consultas detalhadas revelariam uma medida de incertezas sobre sua definição precisa, ou mesmo sobre seu significado geral.

1.1. Teste de Propriedades Físicas proposto por Henkin

Citando o trabalho clássico de Mills & Redford (1983), Fracaro (2017) classifica os testes de usinabilidade em dois grupos: Não requer usinagem e requer usinagem, e em dois subgrupos, que são:

- Ranking Testes: São apenas testes classificatórios e indicam a usinabilidade relativa de duas ou mais combinações de pares ferramenta-peça para dada condição de corte. São sempre testes de curta duração.
- Testes Absolutos: Indicam os “méritos” relativos de duas ou mais combinações de pares ferramenta-peça para dada faixa de condições de corte. São testes quase sempre de longa duração.

Fracaro (2017) afirma que os rankings testes também são chamados testes relativos e apresentam utilidade quando de comparação de dois materiais entre si; porém, em geral não quantificam a diferença entre dois materiais, por não se referirem a escalas previsíveis baseadas em uma ou outra qualidade própria do material. São também sempre testes de curta duração e não garantem que seus resultados prevaleçam em condições de uso diferentes daqueles do teste. São muito difundidos pela indústria, já que podem ressaltar qualidades de um material em relação a outros, porém não apresentam resultados confiáveis de classificação.

Dentre os ensaios de usinabilidade são apresentados dois tipos: Os que requerem usinagem e os que não requerem usinagem, no qual dentre eles foi utilizado o que não requer usinagem devido a facilidade na execução, sendo bastantes úteis no sentido de poder oferecer uma resposta rápida à necessidade de gestores na área de projetos, de processos e como embasamento na confecção de novos materiais (Reis, 2015)

Essa técnica foi desenvolvida por Henkin em sua tese de doutorado intitulada *The Influence of some Physical Properties on Machinability of Metals*, sendo classificado como um dos ensaios de usinabilidade que não requer usinagem, citado por Mills & Redford (1983), no qual ele associa propriedades como condutividade térmica, dureza Brinell do material, comprimento característico e redução percentual de área obtido por ensaio de tração convencional com a velocidade de corte que resulta em uma vida útil da ferramenta de 60 minutos, conforme a Eq. 1, e é designada como V_{60} de um material.

$$V_{60} = \frac{B}{L \cdot HB} \sqrt{1 - \frac{Ar}{100}} \quad (1)$$

- B = Condutividade Térmica
- HB = Dureza Brinell
- L = Comprimento Característico
- Ar = Redução percentual da área

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do ensaio é necessária uma padronização nas unidades objetivando uma melhor compreensão e apresentação dos resultados, a partir da equação de usinabilidade mostrada no item 1.2 sem a presença da estrutura da raiz na equação da usinabilidade, por ser adimensional, como é apresentado na Eq. (2);

Tabela 1. Conversão de valores

Btu =	107,6687	Kgf.m
ft =	0,3048	m
mm ² =	0,00001076	ft ²
m =	3,2808	ft
ft/min =	0,3048	m/min
temperatura =	600	°F

$$V_c = \frac{\left(\frac{Btu}{h \cdot ft \cdot ^\circ F} \right)}{(ft) \cdot \left(\frac{kgf}{mm^2} \right)} \quad (2)$$

Utilizando a Tabela 1 de conversão na Eq. 2 obtêm-se uma velocidade de corte que resulta em uma vida útil da ferramenta de 60 minutos, sendo designada como V60, conforme estudado por Henkin (1962). A temperatura de trabalho se refere a temperatura na região onde o metal sofre deformação, neste caso, a região de cisalhamento primário ou zona primária, conforme a Fig.1, no qual as propriedades físicas devem ser avaliadas nessa temperatura, de acordo com Henkin (1962). A temperatura de 600 °F, no qual as propriedades físicas são avaliadas, é um valor de temperatura que é detectada no processo de usinagem, além disso a avaliação das propriedades nessa temperatura deve ser feita pois, conforme De Souza (2011), o aumento da temperatura na região de corte promove mudanças nas características físicas e mecânica das peças Assim os resultados calculados devem ser multiplicados por esses fatores presentes na Tab. 2 para se obter os valores nas unidades correspondentes.

Tabela 2. Fatores de conversão.

V60ft = (Resultado) x	2,28051	ft/min
V60m = (V60ft) x	0,6951	m/min

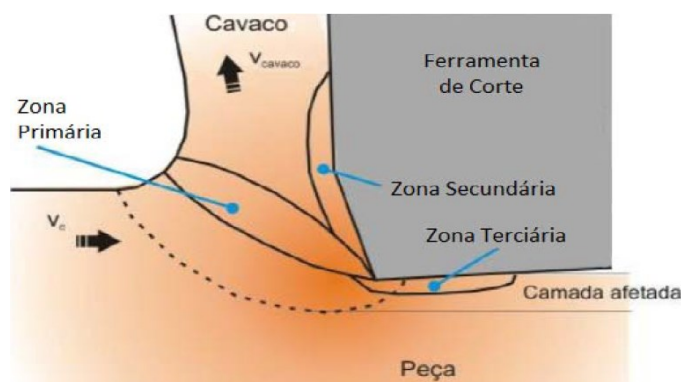


Figura 1. Região de corte do material (De Souza, 2011).

O comprimento característico é determinado pela Eq. 3, no qual a Tab.3 mostra as propriedades e unidades envolvidas na realização dos cálculos.

$$L = w^{1-a} \cdot t^a \quad (3)$$

Tabela 3. Propriedades e unidade do comprimento característico (Henkin, 1962)

Variáveis	Propriedades	Unidades
L	Comprimento Característico	ft
w	largura de corte	ft
t	profundidade de corte	ft
a	constante	-

Para definir o valor de “a” deve-se levar em consideração os parâmetros de corte, nesse caso, a profundidade de corte (t) e a largura de corte (w), conforme pode ser compreendida na Tab. 4.

Tabela 4. Valor de “a” e “L” relacionados ao Comprimento Característico (Henkin,1962)

Relação entre a geometria de corte e o "Comprimento Característico"		
t/w	a	L (ft)
0	1	t
0,15	2/3	$t^{(2/3)} w^{(1/3)}$
1	1/2	$t^{(1/2)} w^{(1/2)}$

Os parâmetros de corte, de acordo com o trabalho de Henkin (1962), foram o seguinte:

- Profundidade de corte (t) = 0,000459 ft
- Largura de corte (w) = 0,0041667 ft
- Relação $t/w = 0,1102$; Se $0,1 \leq t/w \leq 0,2$, então $a=2/3$
- Comprimento Característico (L) = 0,000957 ft

Ao todo foram selecionados seis materiais, sendo eles: Aços-Liga, Aços Inoxidáveis e Ligas de Titânio. A Tabela 5 apresenta os materiais com suas propriedades físicas utilizadas na equação, de acordo com a Eq. 1 apresentado no item 1.1. Dos aços-liga, o Aço-Liga 4140 têmpera a 540 °C e revenimento a 845°C em óleo e o Aço-Liga 6150 têmpera a 540 °C e revenimento a 845°C em óleo, materiais encontrados no *ASM Metal Handbook Vol. 1*, com apenas os valores de condutividade térmica encontrado no site MATWEB. Dois aços inoxidáveis também foram selecionados, o Aço Inoxidável 410 temperado a 233°C e Aço Inoxidável Tipo 651(19-9 DL), laminado a quente e com alívio de tensão a 730 ° C por 8 horas, conforme o site MATWEB, e duas Ligas de Titânio a Liga Ti-5Al-2,5Sn e a Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, encontradas no catálogo técnico *RMI Titanium Company An RTI International Metals, Inc. Company (2000)*.

Tabela 5. Materiais Selecionados para o ensaio

MATERIAIS	Condutividade Térmica (BTU/h.ft.F°)	Redução da Área (%)	Dureza (HB)
Aço-Liga 4140	24,62	44	534
Aço-Liga 6150	26,94	12	570
Aço Inoxidável 410	15,55	43	400
Aço Inoxidável 651	9,71	49,5	226
Ti-5Al-2,5Sn	6,301	45	314
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	6,01	30	360

3. RESULTADOS

Os materiais catalogados com suas respectivas propriedades físicas foram organizados em uma planilha do Microsoft Excel, sendo utilizada também na resolução da Eq. (1) através de cálculos feitos no software, envolvendo os valores das propriedades dos materiais catalogadas com a aplicação dos parâmetros de corte, visto no item 2.2, e dos fatores de conversão de valores, como visto no item 2.1, com os resultados gerados organizados na Tab. 8.

Foram utilizados os recursos de geração de gráficos do Microsoft Excel para realizar a avaliação da influência das propriedades físicas sobre a usinabilidade, sendo expressa em velocidade de corte, comparando os valores dos materiais entre si em conjunto com que autores como Mills & Redford (1983) e Diniz, Marcondes, & Coppini (2014) dizem a respeito.

Tabela 8. Resultado do ensaio que não requer usinagem nas unidades (ft/min) e (m/min)

MATERIAIS	V60 (ft/min)	V60(m/min)
Aço-Liga 4140	82,152	57,104
Aço-Liga 6150	105,537	73,359
Aço Inoxidável 410	69,869	48,566
Aço Inoxidável 651	72,694	50,530
Ti-5Al-2,5Sn	35,427	24,625
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	33,261	23,120
Média	66,490	46,217

A Fig.1 apresenta a usinabilidade em velocidade de corte dos materiais catalogados. De forma geral os maiores valores de velocidade de corte, estão nos aços-liga e nos aços inoxidáveis, e de fato, levando em consideração os materiais determinados, os elementos de liga presentes no aço, por exemplo o Aço-Liga 4140 que apresenta cromo e molibdênio em sua constituinte modificam a estrutura cristalina dos aços influenciando na melhora da usinabilidade (Fracaro, 2017).

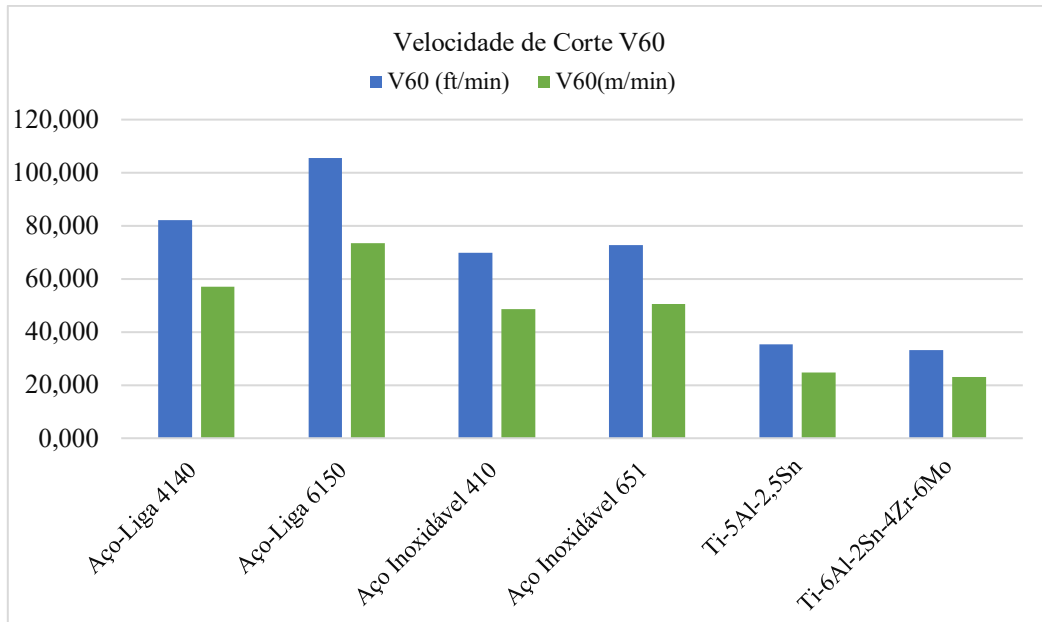


Figura 2. Velocidades de Corte em *feet per minute* (ft/min) e em metros por minutos (m/min).

Para o caso dos aços-liga e dos aços inoxidáveis, ambos os materiais apresentam uma boa usinabilidade, porém existem vários fatores que contribuem para essa boa usinabilidade sendo elas fatores metalúrgicos como a dureza, o tipo de microestrutura, os tipos de inclusões e a presença ou não de elementos de liga, de acordo com (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2014).

A dureza (HB) nos Aços-Liga 4140 e 6150 apresenta valores elevados dentre os materiais catalogados, no entanto, são os que apresentam os maiores valores de velocidades de corte, conforme pode ser visto na Fig.2, o que cai a ideia de que materiais moles são de boa usinabilidade e materiais duros são de baixa usinabilidade, pois a dureza se trata da resistência do material o que leva a fazer essa associação, mas outras propriedades também influenciam na usinabilidade do materiais, favorecendo ou desfavorecendo, conforme (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2014).

O exemplo a citar é o Aço-Liga 6150 que apresenta 570 HB com a maior velocidade apresentada de 32,60 m/min, em comparação com o Aço Inoxidável 651, apresentando a menor dureza, com 226 HB tendo uma velocidade de 22,45 m/min. Mesmo com uma diferença de 344 HB, ainda assim a velocidade de corte do Aço-Liga 6150 é 46 % maior que a do Aço Inoxidável 651.

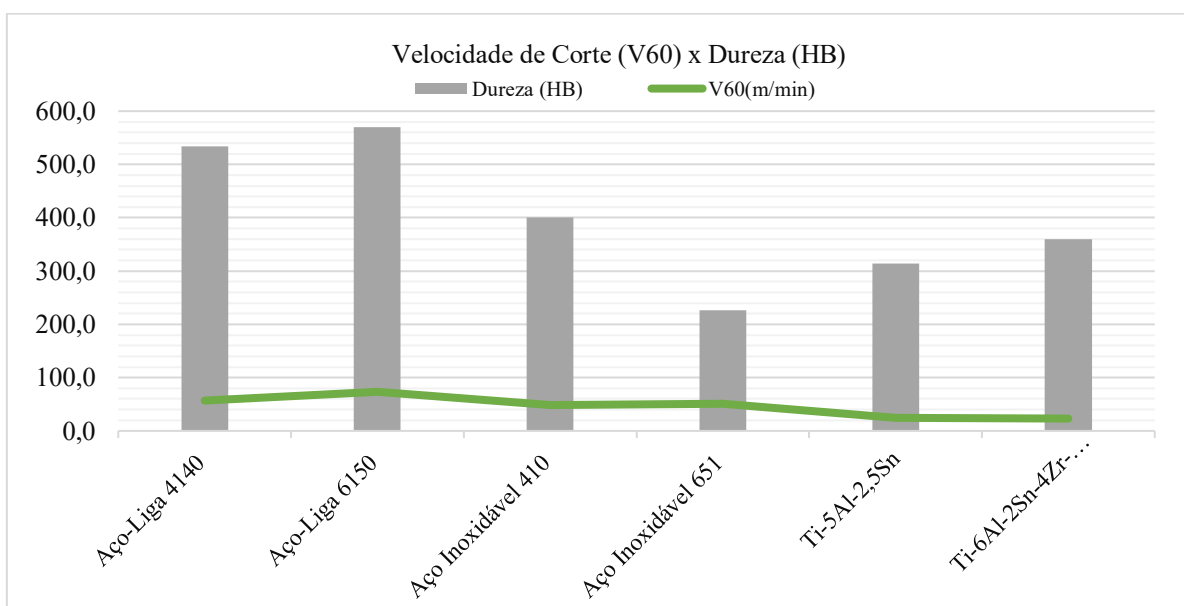


Figura 3. Velocidades de Corte em Relação a Dureza (HB).

A propriedade dureza não é a única que influencia na usinabilidade de um material, ocorrendo tanto na Eq. (1) como na realidade durante o processo de usinagem, pois outra, presente na Eq. (1), é a condutividade térmica, no qual está relacionada diretamente com a temperatura na região de corte, gerado pelo contato entre a peça e a ferramenta de corte (De Souza, 2011). Uma alta condutividade térmica significará uma maior retirada de calor na região de corte ocorrendo redução do desgaste da ferramenta, favorecendo a usinabilidade de corte, o contrário irá desfavorecer a usinabilidade (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2014).

Embora as ligas de titânio tenham uma dureza menor do que os aços-liga, conforme a Tab.5, sua usinabilidade é menor em virtude de sua baixa condutividade térmica, uma característica natural desse tipo de material, conforme a Fig.4, o que traz como consequência um aumento na temperatura na zona de contato da ferramenta (Fracaro, 2017). Fazendo uma breve comparação, temos o Aço-Liga 4140 com 534 HB e 24,62 BTU/h.ft.F° e a liga Ti-5Al-2,5Sn com 314 HB e 6,301 BTU/h.ft.F°, embora o aço-liga 4140 tenha quase 2,5 vezes a dureza do Ti-5Al-2,5Sn, sua condutividade térmica é ainda maior, chegando a ser 4 vezes maior. Como a condutividade térmica está no numerador da Eq. (1), o resultado será diretamente proporcional.

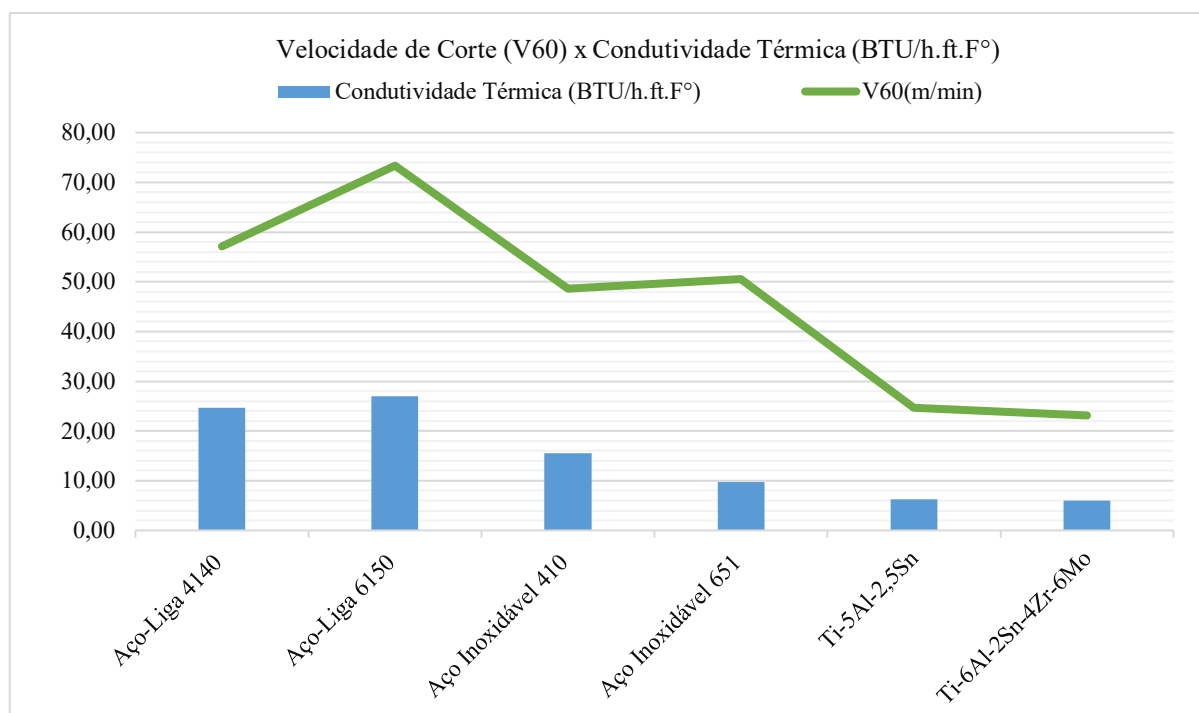


Figura 4. Velocidades de Corte em Relação a Condutividade Térmica (BTU/h.ft.F°).

4. CONCLUSÃO

O ensaio que não requer usinagem, utilizando o teste de propriedades físicas proposto por Henkin, realizado com alguns aços-liga, aços inoxidáveis e ligas de titânio, possibilitou visualizar como as propriedades como dureza, condutividade térmica, com destaque as duas primeiras propriedades, influenciam na usinabilidade do material, expressa na velocidade de corte para uma vida útil de ferramenta de 60 minutos, comparando-os em conjunto com trabalhos de diversos autores sobre a usinabilidade desses materiais, aumentando não somente a compreensão do assunto, mas também o grau de confiabilidade da equação.

Os Aços-Liga e os Aços inoxidáveis apresentam uma boa usinabilidade, no qual fatores metalúrgicos como dureza, o tipo de microestrutura, os tipos de inclusões e a presença ou não de elementos de liga contribuem para a existência dessa boa usinabilidade.

A condutividade térmica apresenta uma influência significativa na usinabilidade do material, pois observou-se que valores baixos de condutividade térmica, mesmo com baixa dureza, apresenta baixa velocidade de corte, como ocorre nas Ligas de Titânio em comparação aos Aços.

Mesmo sendo um ensaio teórico, o teste de propriedades físicas, assim como outros ensaios que não requer usinagem, por serem de curta duração, podem ser utilizados no sentido de oferecer uma resposta rápida às necessidades um estudo preliminar de um processo ou projeto, podendo ser utilizado de forma didática, auxiliando na compreensão de como as propriedades influenciam em conjunto no processo de usinagem dos materiais.

5. REFERÊNCIAS

- Asm handbook. (1990). *Properties and selection: irons steels and high performance* (vol. 1). Metals handbook.
- Asm handbook. (1992). *Properties and selection: nonferrous alloy and special-purpose materials* (vol. 2). Metal handbook.
- Baptista, a. L. (2002). *Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços*. Acesso em 19 de março de 2020, disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0370-44672002000200006&lng=pt&nrm=iso>.
- Barrios, d. B., pivetta, l. A., & yoshikawa, n. K. (2011). *Mecânica: métodos e processos industriais* (vol. 5). São paulo: fundação padre anchieta.
- Casarin, s. J. (2018). *Manufatura mecânica: usinagem*. Lodrina: editora e distribuidora educacional s.a.
- De Souza, p. D. (2011). Apostila de processos de fabricação. *Processos de fabricação por usinagem parte 1*. Porto alegre.
- Diniz, a. E., marcondes, f. C., & coppini, n. L. (2014). *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São paulo.
- Fracaro, j. (2017). *Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle*. Curitiba: intersaberes.
- Henkin, a. (1962). Machinability of metals. *The influence of some physical properties on machinability of metals*, 1(1). The university of michigan.
- Matweb material property data. (s.d.). *Matweb*. Acesso em agosto de 2020, disponível em matweb: online materials information resource.
- Mills, b., & redford, a. H. (1983). *Machinability of engineering materials*,. New york.
- Rebeyka, c. J. (2016). *Princípios dos processos de fabricação por usinagem*. Curitiba: intersaberes.
- Reis, r. (2015). Estudo da influencia de geometria da cunha da ferramenta de aço rápido na usinagem do aço abnt 1045 em diferentes condições lubri-refrigerantes. *Dissertação de mestrado, universidade federal de uberlândia*, 120. Uberlândia.
- Rmi titanium company an rti international metals, inc. Company. (2000). Titanium alloy guide.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF THE MACHINABILITY OF SELECTED ALLOY STEELS AND TITANIUM ALLOYS USING THE EQUATION PROPOSED BY HENKIN.

*Luis Ricardo Ribeiro Oliveira, luisricardoluisoliveira@live.com
Jean Robert Pereira Rodrigues, jroberth@gmail.com*

1 Universidade Estadual do Maranhão Av. Oeste Externa, 2220 - São Cristovao, São Luís - MA

Abstract. Machinability can be confused with machining, but they are different concepts. Machining is related to the removal of material, while machinability is about the influence of the machining parameters on the process. A machinability test that does not require machining was performed, due to the ease of execution, being the physical properties test proposed by Henkin applied to two alloy steels, two stainless steels and two titanium alloys, in a total of six materials, aiming to know the influence of such physical properties on the machinability parameter. To perform the test, certain units were standardized, as well as the definition of the cutting parameters, aiming at a better understanding and presentation of the results. An analysis was made, both in a general and comparative way among the catalogued materials, of the interaction of physical properties with machinability expressed in cutting speed in conjunction with what the literature says about the machinability of these materials, in order to visualize the influence of these physical properties on the results generated. This analysis made it possible to visualize how the physical properties influence the machinability of the material, expressed in cutting speed.

Key words: Machinability. Cutting speed. Steels. Titanium Alloys