



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**VINÍCIUS BELÉM FALCÃO RABELO**

**CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FURAÇÃO DO ALUMÍNIO 6061-T6**

**FORTALEZA**

**2017**

VINÍCIUS BELÉM FALCÃO RABELO

CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FURAÇÃO DO ALUMÍNIO 6061-T6

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francisco E. Lima.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R114c Rabelo, Vinícius Belém Falcão.  
Consumo de Energia no Processo de Furação do Alumínio 6061-T6 / Vinícius Belém Falcão Rabelo. –  
2017.  
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima.
1. Processo de furação. 2. Consumo de energia. 3. Manufatura sustentável. 4. Alumínio 6061-T6. I.  
Título.

CDD 620.1

---

VINÍCIUS BELEM FALCÃO RABELO

CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FURAÇÃO DO ALUMÍNIO 6061-16

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: 21/12/17

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco B. Lima (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Soares Jr  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. William M. Barcellos  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ao meu Deus,

Aos meus pais, Franklin e Marilac.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Deus, em quem tenho crido, que me deu capacidade, sabedoria e discernimento para completar as árduas tarefas neste trabalho e em toda minha formação como engenheiro mecânico.

Aos meus pais, Franklim e Marilac, por me educarem e me suportarem em tudo todos esses anos; e aos meus irmãos, João Victor e Ana Luísa, por estarem sempre ao meu lado.

À minha querida namorada, Bruna Novais, pela motivação, amor e cuidado.

Ao meu orientador professor Dr. Francisco E. Lima, por me passar seus conhecimentos e pelo excelente direcionamento neste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Luiz Soares Jr. e William M. Barcellos pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todos os professores, pelo conhecimento adquirido e experiências na minha formação como engenheiro durante esses anos.

Aos secretários do departamento e da coordenação, Hélio e Fernando pela grande ajuda na parte burocrática durante todo o curso.

Aos colegas da turma de graduação, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

## RESUMO

As atividades do setor produtivo voltadas à manufatura são responsáveis por uma significativa parte do consumo de energia de uma nação. Sabendo-se que os processos de usinagem são largamente utilizados e que grandes esforços estão sendo despendidos para a redução dos impactos ambientais por meio da redução do consumo de energia, este estudo tem como objetivo a análise de dados experimentais de consumo de energia pela máquina-ferramenta no processo de furação. O processo de usinagem foi feito com brocas de aço-rápido não revestida e o material usinado foi a liga de Alumínio 6061-T6. Com a análise dos dados secundários foi possível entender a influência do parâmetro rotação, a consequência no consumo de energia ao se trabalhar com a técnica *with peak* (técnica “pica-pau”) – técnica de movimentação de subida rápida vertical para quebra de cavaco e melhor lubrificação –, a influência da área de corte na demanda de energia variando o diâmetro da ferramenta de corte (broca) e, finalmente, o efeito do desgaste da ferramenta no aumento do consumo de energia. Os resultados obtidos sugerem que a demanda por energia se eleva com o aumento da velocidade de avanço; o uso da técnica *with peak* se assemelha ao não uso da mesma no que se refere ao consumo de energia, para as condições descritas no trabalho. Quanto ao efeito da área de corte, constata-se a influência, no consumo de energia, tanto do diâmetro da broca quanto da velocidade de avanço; o desgaste da ferramenta, para a quantidade de furos executados não foi perceptível a ponto de não resultar em alteração na intensidade de energia demandada pela máquina-ferramenta.

**Palavras-chave:** Processo de furação. Consumo de energia. Manufatura sustentável.  
Alumínio 6061-T6.

## ABSTRACT

The activities of the production sector related to the manufacturing industry are responsible to a significant portion of the energy consumption nowadays. Knowing that the machining processes are largely used techniques for production and that, also, great effort has been done to mitigate the environmental impacts caused by the consumption of these processes, the present study has, as the main goal, the analyze of experimental data of energy consumption of High Speed Steel (HSS) twist drills used to drill the Aluminum alloy 6061-T6, in order to understand better and optimize the process, reducing the energy consumption and contributing for a more sustainable production. The results found suggest that the demand for energy increases when the feed rate gets higher; the peck drilling technique (technique of vertical movement to break chips and lubricate the workpiece) has similar energy consumption when compared to the use without it in the cutting conditions described here in this work. The energy consumption is affected by cutting area and is related to the feed rate; the tool wear for the quantity of holes made has insignificant values in the energy consumption.

**Keywords:** Drilling Process. Energy Consumption. Sustainable Manufacturing. Aluminum 6061-T6.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa das pesquisas nos países mais produtivos.....	20
Figura 2	Tipos de furação estudados.....	27
Figura 3	Parâmetros de corte para furação.....	28
Figura 4	Furadora CNC HAAS utilizada.....	30
Figura 5	Modelo de broca helicoidal com haste cilíndrica.....	30
Figura 6	Peça utilizada (Workpiece).....	33
Figura 7	Arranjo do Experimento.....	34
Figura 8	Analizador de energia.....	34
Figura 9	Perfil de consumo de energia no acionamento da máquina-ferramenta e usinagem pelo processo de furação.....	38
Figura 10	Usinagem na condição 1.1-FC/WP. n (4715 RPM). Vf (23,575 in/min) .....	39
Figura 11	Usinagem na condição 1.2-FC/WP. n (4366 RPM). Vf (21,828 in/min) .....	40
Figura 12	Usinagem na condição 1.3-FC/WP. n (5239 RPM). Vf (26,195 in/min) .....	40
Figura 13	Usinagem na condição 1.4-FC/SP. n (4366 RPM). Vf (21,828 in/min) .....	41
Figura 14	Três áreas de corte das brocas.....	43
Figura 15	Usinagem na condição 1.5-FC/WP. n (2750 RPM). Vf (16,500 in/min) .....	45
Figura 16	Usinagem na condição 1.6-FC/WP. n (2063 RPM). Vf (12,378 in/min) .....	45
Figura 17	Usinagem na condição 1.1-PF/WP. n (2063 RPM). Vf (12,378 in/min) .....	46
Figura 18	Usinagem de desgaste condição 3.3-FC/WP. n (5239 RPM). Vf (36,670 in/min) .....	47
Figura 19	Média das correntes no desgaste .....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição das Publicações entre os países/ territórios.....	19
Gráfico 2 – Tendência sobre pesquisa de manufatura sustentável.....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Distribuição dos registros nas agências financiadoras no mundo.....	20
Tabela 2	Top 10 organizações mundiais de pesquisa em manufatura sustentável .....	21
Tabela 3	Top 10 categorias de estudo relacionado à manufatura sustentável.....	22
Tabela 4	Top 10 autores mais proeminentes.....	22
Tabela 5	Anos de publicação e suas contagens de registros.....	23
Tabela 6	Especificações da broca 7/32” .....	31
Tabela 7	Especificações da broca 3/8” .....	31
Tabela 8	Especificações da broca 1/2” .....	31
Tabela 9	Broca de diâmetro 7/32” (0,21875) .....	35
Tabela 10	Broca de diâmetro 3/8” (0,375) .....	35
Tabela 11	Broca de diâmetro 1/2” (0,5) .....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
FC	Furação em Cheio
FP	Furação com Pré-furação
HPD	<i>High-Performance Drilling</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
LMAS	<i>Laboratory for Manufacturing And Sustainability</i>
MQL	<i>Minimum Quantity Lubrication</i>
RPM	Rotações por minuto
SFM	<i>Surface Feet per Minute</i>
SP	Sem Peak
UCB	<i>University of California, Berkeley</i>
WP	With Peak

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_p$	Profundidade de corte ou largura de usinagem (mm)
A	Ampère
d	Diâmetro da peça (mm)
f	Avanço (mm/rev)
$f_c$	Avanço de corte (mm)
$f_z$	Avanço de corte por aresta (mm)
n	Rotação (rpm)
V	Volts
$V_c$	Velocidade de corte (m/min)
$V_f$	Velocidade de avanço (in/min)
$\eta$	Coefficiente de eficiência
$\omega$	Velocidade Angular
®	Marca Registrada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b> .....	16
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> .....	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>3.1</b>	<b>Cenário atual</b> .....	18
<b>3.2</b>	<b>Trabalhos desenvolvidos na área</b> .....	24
<b>3.2.1</b>	<i>Modelos sobre consumo de energia em usinagem</i> .....	25
<b>3.2.1.1</b>	<i>Processo de Furação</i> .....	26
<b>3.2.1.1.1</b>	Tipos de Furação.....	26
<b>3.2.1.1.2</b>	Parâmetros e Grandezas de usinagem por furação.....	27
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	29
<b>4.1</b>	<b>Máquina-ferramenta</b> .....	29
<b>4.2</b>	<b>Ferramenta</b> .....	30
<b>4.3</b>	<b>Material de trabalho</b> .....	32
<b>4.4</b>	<b>Analisador de energia</b> .....	34
<b>4.5</b>	<b>Parâmetros de corte do processo</b> .....	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
<b>5.1</b>	<b>Consumo de energia</b> .....	38
<b>5.1.1</b>	<i>Efeito da velocidade de avanço no consumo de energia</i> .....	38
<b>5.1.2</b>	<i>Efeito da técnica “peak” no consumo de energia</i> .....	41
<b>5.1.3</b>	<i>Efeito da área de corte no consumo de energia</i> .....	43
<b>5.1.4</b>	<i>Efeito da pré-furação no consumo de energia</i> .....	46
<b>5.1.5</b>	<i>Efeito do desgaste no consumo de energia</i> .....	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	48
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	49
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51
	<b>ANEXO A – ALUMÍNIO 6061-T6</b> .....	53

<b>ANEXO B – GENERAL PURPOSE HIGH-SPEED STEEL JOBBERS’ DRILL BITS.....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO C – CNC VERTICAL MACHINING CENTER HAAS VF-2 .....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO D – GUIDELINES FOR DRILLING.....</b>	<b>58</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se crescido fortemente a preocupação com a sustentabilidade dos processos produtivos na indústria. Essa preocupação tem moldado a sociedade e a indústria (mais intensamente nos últimos anos). Isso acontece pelo fato desses processos estarem ligados à demanda crescente da população mundial e aos recursos naturais do planeta serem limitados. Além disso, o melhoramento da eficiência energética, por exemplo, pode aumentar a competitividade entre fabricantes, à medida que os custos de produção diminuem e a dependência de fontes de energia não-renováveis sofre redução. Como consequência, os impactos causados à natureza são amenizados, contribuindo para um ambiente mais sustentável (BI, 2012). Corroborando com essa ideia, os consumidores atuais estão cada vez mais exigentes e atentos ao uso de produtos sustentáveis.

## 1.1 Motivação

Pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de mitigar esse problema e reduzir os impactos causados ao ambiente, direta e indiretamente, de modo que as gerações futuras não sofram as más consequências decorrentes do uso irrestrito dos recursos escassos do planeta.

Segundo Duflou et al. (2012), a espinha dorsal da indústria é a manufatura<sup>1</sup>, que domina o consumo de energia desse setor. A manufatura tem grande importância para o mundo, pois é dela que vem a imensa parte dos bens de consumo essenciais para o homem. Estima-se que o setor manufatureiro consome cerca de 37% da energia gerada no mundo (PARK *et al.*, 2009) e aproximadamente um terço no Brasil<sup>2</sup>, sendo a usinagem<sup>3</sup> um dos processos mais amplamente usados por conferir excelente precisão geométrica e boa eficiência econômica (YOON *et al.*, 2011).

A furação é um dos três principais processos convencionais de usinagem<sup>4</sup>, compondo aproximadamente um terço das operações. Sabendo disso, este trabalho tem como objetivo maior analisar o consumo de energia gerado pelo processo de usinagem por furação segundo a influência de seus parâmetros de corte, valores numéricos que representam deslocamento da

---

<sup>1</sup>Todo processo de produção padronizado que transforma matéria-prima em produtos acabados.

<sup>2</sup> Disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro 2017.

<sup>3</sup> Processo mecânica o que se utiliza da remoção de material para produção de peças.

<sup>4</sup> Os três principais são: furação, torneamento e fresamento.

ferramenta, para melhor entendimento do processo e para elaborar sugestões para reduzir os custos e, assim, torná-lo mais sustentável.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

A organização deste estudo está dividida como se segue: i) A atual seção é a Seção 1 que consiste da introdução sobre o assunto abordado e aspectos do trabalho; ii) Seção 2 tratou dos objetivos específicos e gerais almejados; iii) Na Seção 3, tem-se a revisão bibliográfica onde se fala das abordagens feitas sobre manufatura sustentável, o consumo de energia etc. na usinagem até o momento; iv) A Seção 4 descreve o procedimento experimental estudado; v) Na Seção 5, têm-se os resultados encontrados e a discussão dos dados experimentais e de seus resultados, bem como sua análise; e vi) Seção 6 resume o trabalho e discute as perspectivas futuras sobre o tema abordado, e por fim, conclusões são dadas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar dados experimentais e entender a influência de parâmetros de corte, emprego de técnicas e a influência do diâmetro da ferramenta de corte no consumo de energia, quando usinando alumínio pelo processo de usinagem por furação.

### 2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos temos a avaliação da influência dos seguintes tópicos no consumo de energia do processo de furação:

- A área de corte para uma mesma velocidade na área de superfície da broca;
- A velocidade de corte e a rotação;
- A furação com aplicação da técnica de furação denominada *peak*<sup>5</sup>, do inglês, ou *peck drilling*;
- A influência do desgaste da broca no consumo de energia.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Cenário atual

Utilizou-se o programa VOSviewer<sup>®</sup> versão 1.6.4, disponível gratuitamente na internet, para uma melhor percepção e análise do cenário atual, bem como de suas tendências com respeito às pesquisas e aos investimentos na área de manufatura sustentável.

VOSviewer é uma ferramenta de software para construção e visualização de redes bibliométricas. Essas redes podem, por exemplo, incluir revistas, pesquisadores, ou publicações individuais e elas podem ser construídas com base em co-citação, ligação bibliográfica ou relações de co-autoria. VOSviewer também oferece funcionalidade de mineração de texto que podem ser usados para construir e visualizar redes de ocorrência de termos importantes extraídos a partir de um corpo de literatura científica.<sup>6</sup> (Tradução nossa).

---

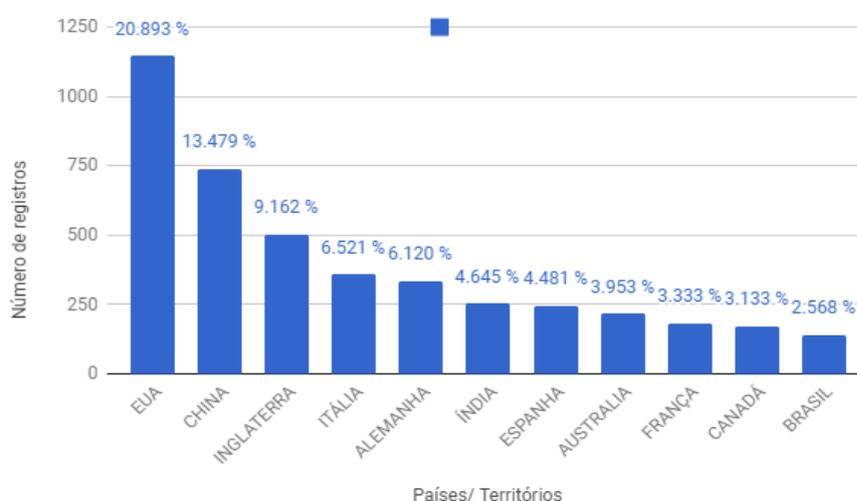
<sup>5</sup> Técnica de movimentação de subida rápida da broca para quebra de cavaco. Também é popularmente denominado pica-pau, pois assemelha-se com a movimentação do pássaro de mesmo nome.

<sup>6</sup>VOSviewer is a software tool for constructing and visualizing bibliometric networks. These networks may for instance include journals, researchers, or individual publications, and they can be constructed based on citation, bibliographic coupling, co-citation, or co-authorship relations. VOSviewer also offers text mining functionality that can be used to construct and visualize co-occurrence networks of important terms extracted from a body of scientific literature. Disponível em: <<http://www.vosviewer.com>>. Acesso em: 24/06/2017.

Uma pesquisa bibliométrica para visualizar o cenário panorâmico das pesquisas realizadas nos últimos anos foi desenvolvida. A pesquisa bibliométrica é uma poderosa ferramenta para se analisar grandes quantidades de informações, por isso ela está sendo muito difundida no meio acadêmico e científico, permitindo uma análise quantitativa dos dados e parâmetros das publicações. Com o uso do banco de dados extraído do *Web of Science*<sup>7</sup>, mantido pela Thomson Reuters Scientific®, obteve-se um número de mais de cinco mil registros de pesquisas realizadas na área. Para tal busca, utilizaram-se as palavras-chave “Sustainable” e “Manufacturing” (ou sustentável e manufatura, em português), devido sua importância, selecionando um período de tempo até o momento deste trabalho. Dentro desses documentos extraídos estão artigos publicados em congressos e jornais, revisões bibliográficas. Os resultados encontrados foram analisados e expostos em gráficos, tabelas e figuras para melhor entendimento.

No Gráfico 1, pode-se notar os dez principais países e regiões com maior número de publicações nessa área, e por último o Brasil como décimo quarto dos países com mais publicações. No topo das colunas do gráfico estão mostradas suas porcentagens em relação ao número total pesquisado. Note que os Estados Unidos da América e a China são os países que lideram em investimentos na pesquisa de manufatura sustentável, porém eles são também os países que mais emitem gases poluentes como o CO<sub>2</sub>, que agravam o efeito estufa na atmosfera<sup>8</sup>.

Gráfico 1 – Distribuição das Publicações entre os países/ territórios



Fonte: *Web of Science* (adaptado pelo autor).

<sup>7</sup> Web of Science é um banco de dados online que tem acesso aos principais periódicos científicos no mundo.

<sup>8</sup>Disponível em: <[http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=CO2ts\\_pc1990-2015](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=CO2ts_pc1990-2015)> Acesso em: 16 outubro 2017.

Na Tabela 1 logo abaixo, pode-se ver a lista das grandes agências de financiamento em todo o mundo que mais investem na área de manufatura, sendo a chinesa *National Natural Science Foundation of China* a maior delas. A agência brasileira CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico está na oitava posição da lista.

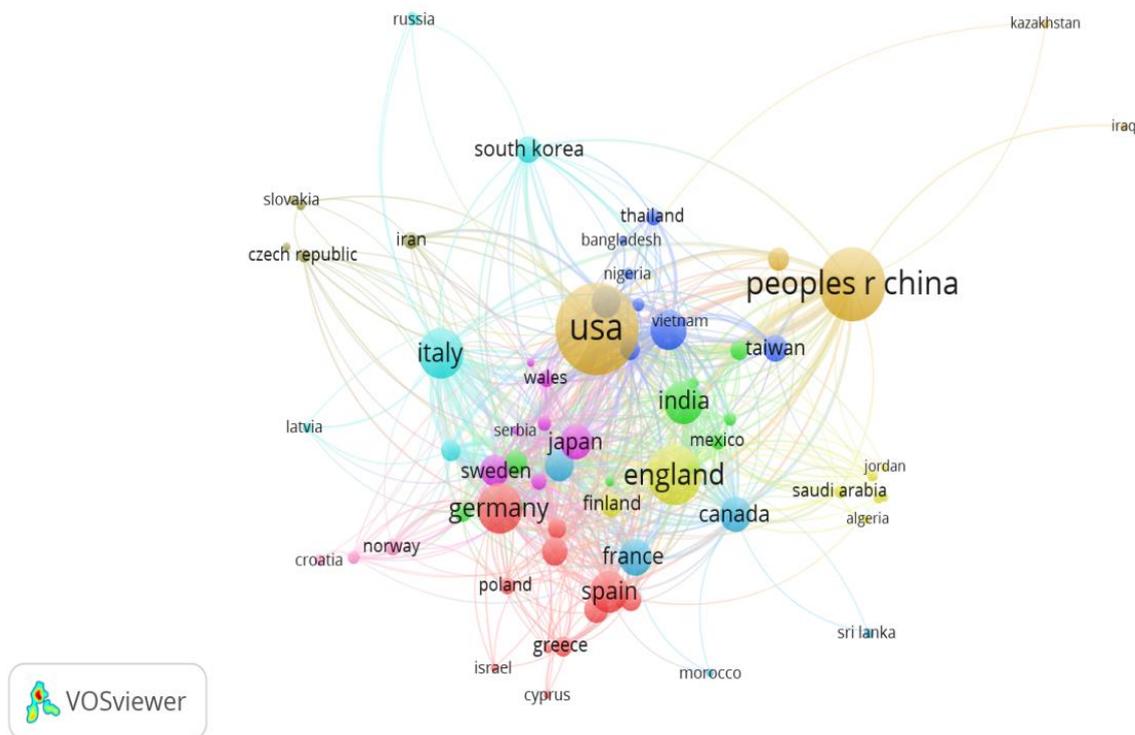
Tabela 1 – Distribuição dos registros nas agências financiadoras no mundo

<b>Agências financiadoras</b>	<b>Contagem do registro</b>	<b>% de 5486</b>
National Natural Science Foundation of China	124	2.26
National Science Foundation	32	0.583
European Commission	28	0.51
NSF	27	0.492
EPSRC	25	0.456
Fundamental Research Funds for The Central Universities	24	0.437
European Union	20	0.365
CNPQ	16	0.292
Spanish Ministry of Science and Innovation	13	0.237
EU	11	0.201
<b>Total</b>	<b>320</b>	<b>5.833</b>

Fonte: *Web of Science* (WoS).

Na Figura 1, abaixo, pode-se ter uma noção de como se está distribuído a quantidade de pesquisas de cada país e a interação entre eles. Observe que os tamanhos dos círculos representam o número de publicações de cada país e que a espessura das linhas que os ligam representa relações e parcerias entre pesquisadores que cada país possui em suas publicações, observando que quanto maior a espessura das linhas que os ligam, quanto maior a relação. Ainda, a cor dos círculos dita a relação de proximidade de cada grupo, mostrando que os pais de mesma cor possuem mais parcerias. Pode-se notar também, que países como os Estados Unidos, República Popular da China, Inglaterra e Alemanha são os maiores polos de pesquisa sobre manufatura sustentável.

Figura 1 – Mapa das pesquisas nos países mais produtivos



Fonte: elaborado pelo autor (VOSviewer).

Na Tabela 2, a seguir, estão relacionadas as dez primeiras organizações que mais se destacam na produção de pesquisas sobre manufatura sustentável atualmente.

Tabela 2 – Top 10 organizações mundiais de pesquisa em manufatura sustentável

<b>Organizações</b>	<b>Contagem do registro</b>	<b>% de 5490</b>
Polytechnic University of Milan	53	0.965
NIST	45	0.82
University of Cambridge	45	0.82
University of California, Berkeley	40	0.729
University of Illinois	40	0.729
Tech. University Berlin	39	0.71
Cranfield University	33	0.601
University of Malaya	33	0.601
National Institutes of Technology (NITs)	32	0.583
University of Manchester	32	0.583
<b>Total</b>	<b>392</b>	<b>7.141</b>

Fonte: Web of Science (WoS).

O *Web of Science* (WoS) categoriza os registros em temas que são relevantes para análise de acordo com a Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Top 10 categorias de estudo relacionado à manufatura sustentável

<b>Categorias do Web of Science</b>	<b>Contagem do registro</b>	<b>% de 5490</b>
Environmental Sciences	961	17.505
Engineering Manufacturing	888	16.175
Green Sustainable Science Technology	689	12.55
Engineering Industrial	686	12.495
Engineering Environmental	651	11.858
Materials Science Multidisciplinary	510	9.29
Management	429	7.814
Operations Research Management Science	428	7.796
Engineering Mechanical	416	7.577
Energy Fuels	362	6.594
<b>Total</b>	<b>6020</b>	<b>109.654</b>

Fonte: Web of Science (WoS).

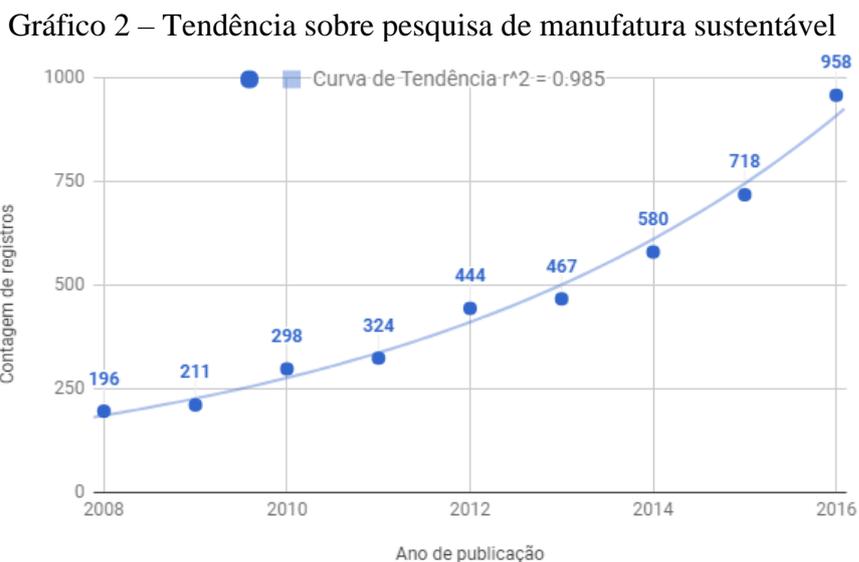
A lista da Tabela 4 mostra os autores mais produtivos na área. Sendo o Marco Taisch da Politecnico di Milano o maior contribuidor deles.

Tabela 4 – Top 10 autores mais proeminentes

<b>Autores</b>	<b>Contagem do registro</b>	<b>% de 5490</b>
Taisch M.	28	0.51
Haapala Kr.	24	0.437
Li L.	24	0.437
Evans S.	23	0.419
Seliger G.	23	0.419
Vinodh S.	21	0.383
Liu Y.	20	0.364
Zhang H.	16	0.291
JawahirIs.	15	0.273
Mani M.	15	0.273
<b>Total</b>	<b>209</b>	<b>3.806</b>

Fonte: Web of Science (WoS).

No Gráfico 2, abaixo, pode-se observar claramente a tendência crescente do número de publicações, informados na Tabela 5. Para melhor percepção, foi plotado uma curva exponencial como modelo estatístico generalizado de ajustamento com o coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 0,985<sup>9</sup>. Nota-se a crescente importância nos últimos anos voltada à pesquisa de manufatura sustentável.



Fonte: Web of Science (adaptado pelo autor).

Tabela 5 – Anos de publicação e suas contagens de registros

Anos de publicação	Contagem do registro	% de 5490
2016	958	17.45
2015	718	13.078
2014	580	10.565
2013	467	8.506
2012	444	8.087
2011	324	5.902
2010	298	5.428
2009	211	3.843
2008	196	3.57
<b>Total</b>	<b>4636</b>	<b>84.444</b>

Fonte: Web of Science (WoS).

<sup>9</sup> O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é um valor de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado.

### 3.2 Trabalhos desenvolvidos na área

Como visto nas seções anteriores, cada vez mais se torna de fundamental importância a solução do problema que envolve a sustentabilidade dos processos produtivos na manufatura devido aos seus impactos ambientais. Esse problema só poderá ser resolvido com extensas pesquisas e investimentos na área com a elaboração de técnicas e de métodos inovadores e sustentáveis (UNNIKRISHNAN; RAO, 2017). Alguns trabalhos desenvolvidos por engenheiros e por cientistas foram abordados aqui com esse fim. Mais especificamente, trabalhos relacionados à conservação de energia e dos recursos naturais foram expostos, uma vez que são áreas chaves na busca por uma manufatura mais sustentável.

A fabricação por usinagem de materiais é um dos processos mais utilizado na indústria e possui grande capacidade de aperfeiçoamento e de otimização devido sua grande complexidade e seus inúmeros fatores. Byrne e Scholta (1993) exploraram as possíveis rotas para se atingir um processo de usinagem mais limpo na perspectiva ambiental, utilizando a técnica de Análise Total de Processo (*Total Process Analysis*) e levando em conta o triângulo ecologia, tecnologia e economia. Byrne dividiu em cinco grande área de investigação, sendo elas: geral, fluido de corte e limpeza, sensores e processos alternativos.

Os fluidos de corte na usinagem, usados para lubrificar e refrigerar, têm sido bastante discutidos devido aos seus impactos diretos ao ambiente. Chetan, Ghosh e Rao. (2015) elaboraram uma revisão das modernas técnicas sustentáveis praticadas que envolvem quantidade mínima de fluido de corte (MQL), hidrogênio líquido, óleo vegetal ou ar comprimido. Tais fluidos são considerados biodegradáveis e contribuem para um processo economicamente mais viável e ecológico. Já Zeilmann e Vacaro (2008) fizeram um estudo com a usinagem a seco, isto é, sem fluido de corte, e o que isso influencia no processo de furação.

Teorias de lógica Fuzzy, Redes Neurais, ou mesmo uma mistura de ambas, tem sido usada também para tornar os processos mais eficientes. Haber-Guerra *et al.* (2008), implementaram um sistema de rede *fuzzy* de controle para melhorar a eficiência em processos de furação de alto rendimento (HPD) para controlar a força de corte.

Sabe-se que, recentemente, a redução do consumo de energia na manufatura e, mais especificamente, nos processos de usinagem vem sendo estudada mais intensamente nos últimos anos. May *et al.* (2016), fizeram uma revisão bibliográfica sobre o gerenciamento de energia na manufatura, provendo orientação para pesquisas futuras. Pesquisadores vem estudando formas de se elaborar modelos que tentam caracterizar o consumo desses processos.

Yoon *et al.* (2014a), fizeram um estudo empírico da eficiência energética de vários processos de usinagem e os comparou entre si. Em seu outro artigo, Yoon *et al.* (2014b), elaboraram um modelo empírico de consumo de energia para remoção de material em fresa de três eixos. Já Kalla *et al.* (2011) analisaram o consumo de energia do ciclo de vida (ou, em inglês, *Life Cycle Assessment* - LCA) do processo geral com o objetivo de melhorar as máquinas e o perfil ambiental do produto.

Outros modelos tratam mais especificamente da otimização do processo por meio da configuração dos parâmetros de corte do processo de usinagem. Tais modelos servem como embasamento para este estudo e serão melhor explicados nas seções seguintes.

### **3.2.1 Modelos sobre consumo de energia em usinagem**

A usinagem é o processo de remoção de material que se utiliza máquinas ferramentas para conferir forma aos produtos. Ela possui grande complexidade devido a seus vários fatores envolvidos, por isso muitos pesquisadores desenvolvem modelos matemáticos para melhor entendimento e, assim, otimizar o processo. Nesta seção alguns trabalhos relacionados à análise e à modelagem de consumo de energia na usinagem foram apresentados.

Em sua pesquisa, Ma *et al.* (2014) avaliaram o consumo de energia e eficiência energética no processo de torneamento levando em consideração a geometria da ferramenta e os parâmetros de corte. Por meio da investigação feita com experimentos numéricos com simulação utilizando o método de elementos finitos (MEF), os pesquisadores elaboraram uma série de estratégias para minimizar a energia de corte e maximizar a eficiência energética.

Yoon *et al.* (2013), em outro estudo, elaboraram um novo modelo para controlar o consumo de energia e custo da manufatura de furação em microescala. Os resultados encontrados indicaram que os parâmetros dos processos têm grande importância nessa relação entre custo e consumo e que usinagem com maiores velocidades podem reduzir a energia, porém aumentam o seu custo.

Em outro caso, Bi e Wang (2012) elaboraram um novo modelo baseado no comportamento cinemático e dinâmico da ferramenta de usinagem para aperfeiçoar os parâmetros do processo, resultando em redução consumo de energia.

Segundo Yoon *et al.* (2013) a potência total de consumo de energia em um processo de furação em cheio pode ser expresso pela soma de cada componente do processo com a seguinte expressão matemática:

$$P_{Total} = P_{Básica} + P_{Eixo} + P_{Etapa} + P_{usinagem} \quad (1)$$

Onde o  $P_{Básica}$  expressa os gastos básico que envolve tudo aquilo que é necessário para o preparo como o consumo quando a máquina está ociosa e iniciando, e ainda o consumo de dispositivos auxiliares na máquina.  $P_{Eixo}$  e  $P_{Etapa}$  são os gastos referentes ao consumo das partes moveis na máquina para fazer o eixo girar e para a movimentação de preparo das etapas, respectivamente. Já  $P_{usinagem}$  é a potência de consumo gerada pela remoção de material, ou seja, a usinagem pura.

### 3.2.1.1 Processo de Furação

O processo de furação consiste na remoção de material, com o uso de brocas (*twist drills*) como ferramentas, para a formação de furos cilíndricos. Para tal, são necessários parâmetros iniciais como uma rotação transmitida pelo eixo-árvore da furadeira<sup>10</sup>, um avanço da broca e uma profundidade de corte. Esses parâmetros geram as grandezas da usinagem que são a velocidade de corte e de avanço, a área de corte, o tempo de corte e ainda a taxa de remoção do material. As influências causadas pela variação desses parâmetros para o processo são diversas e algumas delas serão estudadas mais profundamente neste trabalho com o objetivo de reduzir o custo total do processo.

A usinagem por furação é um dos processos de remoção de cavaco mais usados no setor industrial, sendo cerca de uma em cada três operações de usinagem a furação. Além disso, vários estudos indicam que é uma das operações de corte de metal que mais demandam tempo. Astakhov (2012) estima que 36% de todas as horas de usinagem são gastas na furação (40% para CNC), opondo-se a 25% do torneamento e 26% da fresagem. Por isso, o uso de técnicas que melhorem a eficiência deste processo é importante, porém não é fácil devido à complexidade envolvida.

#### 3.2.1.1.1 Tipos de furação

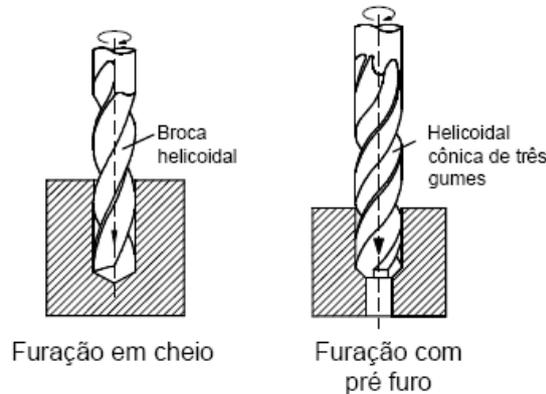
Existem dois tipos principais de furação que iremos estudar neste trabalho: a furação em cheio, onde não existe um furo prévio feito no material e todo o material removido é convertido em cavaco; e a com pré-furo, onde já existe um furo de diâmetro menor ao da broca atual feito

---

<sup>10</sup>No caso do torno mecânico, a broca fica fixa e a peça possui uma rotação.

no material. Existem outros tipos de furação como a furação escalonada, a furação de centros e a trepanação, mas eles não serão explorados aqui.

Figura 2 – Tipos de furação estudados



Fonte: DIN 8589.

### 3.2.1.1.2 Parâmetros e Grandezas de usinagem por furação

Para melhor se entender o processo de furação é imprescindível a compreensão das forças que agem nesse processo que são geradas pela movimentação de corte e de avanço da broca sobre a peça. Em seu livro, *Applied Machining Technology*, Tschätsch (2008) fez uma introdução a respeito das forças de corte que atuam na furação e como são calculados o torque, as forças e a potência em furação. As principais equações estão replicadas logo abaixo, bem como outras equações básicas de furação.

Para a potência de furação temos uma relação entre o torque, a rotação, a velocidade angular e a eficiência de furação:

$$P = \frac{Mn}{9,55s/\min(\frac{10^3W}{kW})\eta} = M\omega \quad (2)$$

Onde  $\omega$  é a velocidade angular (em  $s^{-1}$ ), P é a potência (em kW), M o torque (em Nm), n a rotação (em rpm),  $\eta$  a eficiência na furação (0,7 a 0,9) e a constante 9,55 (em s/min) derivada da equação  $2 \cdot \pi \cdot n/60$  s/min.

Alguns parâmetros são fundamentais para se entender a furação. Alguns deles são n a rotação, f o avanço,  $a_p$  a profundidade de corte. Esses parâmetros geram as grandezas de corte na furação. A velocidade de corte na furação pode ser entendida com a seguinte equação:

$$V_c = \frac{\pi dn}{1000} \quad (3)$$

Onde  $d$  corresponde ao diâmetro (em mm),  $n$  a rotação de corte (em rev/min). Já a velocidade de avanço é dada por:

$$V_f = fn \quad (4)$$

Onde o avanço (em mm/rev) multiplica a rotação. Sua unidade é expressa em mm/min.

$$f_z = \frac{f_n}{z} \quad (5)$$

Onde  $f_z$  é o avanço de corte por aresta (em mm),  $f_n$  é o avanço por revolução e o  $z$  significa o número de laminas na furação (normalmente  $z=2$  para furação).

Já a área de corte é definida como o produto da profundidade de corte  $a_p$  ou  $h$  e do avanço, como mostrado na equação seguinte:

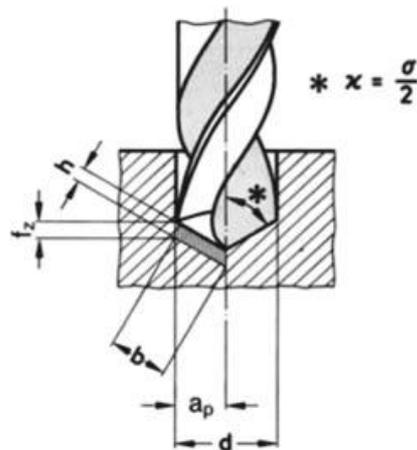
$$a_c = f_n a_p \quad (6)$$

Onde o avanço é expresso em milímetros por revolução e profundidade por aresta, em mm.

Ainda se tem a equação do tempo de corte que é descrita pela razão entre o comprimento de corte  $l_c$  e a velocidade de avanço  $V_f$ .

$$t_c = \frac{l_c}{V_f} \quad (7)$$

Figura 3 – Parâmetros de corte para furação



Fonte: Tschätsch (2008).

## **4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Análises de resultados de investigação de dados coletados por meio de procedimentos experimentais de furação foram o escopo desta pesquisa. Os dados foram coletados na UCB - Universidade da Califórnia, Berkeley, pelo professor Dr. F. E. Lima no ano de 2015, no LMAS - *Laboratory for Manufacturing And Sustainability*. A velocidade de avanço da ferramenta, a rotação e a área de corte foram os dos parâmetros de corte do processo analisado. Além disso, a influência de técnicas de furação como a denominada “pica-pau” (movimentação de subida vertical para quebra de cavaco e lubrificação da peça) ou *peck drilling*, do inglês, e a técnica de pré-furação foram analisadas, bem como o desgaste da ferramenta. Isso foi feito porque a alteração de parâmetros e técnicas, de fato, é a solução mais viável de otimização, uma vez que grandes mudanças não precisam ser feitas no sistema, como projetar uma nova máquina. Diâmetros variados de broca de aço rápido para propósitos gerais, sem revestimento, foram utilizados. Essas brocas serão especificadas nas seções subsequentes. Também foi estudado a influência do consumo energético da furação com pré-furação. O material utilizado para a perfuração foi a liga de Alumínio 6061-T6. Gráficos de consumo de energia para diferentes casos foram plotados para comparação e conclusões foram extraídas.

Note que as unidades estão no sistema americano, visto que as ferramentas e máquinas são todas americanas. Sugere-se, para melhor entendimento, que o leitor transforme em SI - Sistema Internacional se assim desejar.

### **4.1 Máquina-ferramenta**

Neste trabalho, a máquina-ferramenta utilizada foi um Centro de Usinagem Vertical Haas de CNC (@HAAS Automation Inc. modelo VF-2, Estados Unidos), sendo suas dimensões 762 x 406 x 508 mm, de potência 22,4 kW unidade de vetor (*vector drive*) e rotação máxima de 8100 rpm. Para informações adicionais ver anexos.

Figura 4 – Furadora CNC HAAS utilizada



Fonte: Lima, F.E.

## 4.2 Ferramenta

Para os experimentos de furação, utilizaram-se uma broca sem revestimento com três variações de diâmetro. As Tabelas de 6 a 8 a seguir mostram os diâmetros brocas utilizadas no experimento secundário, bem como suas especificações dadas pelo fabricante Hertel®.

Figura 5 – Modelo de broca helicoidal com haste cilíndrica



Tabela 6 – Especificações da broca 7/32”

<b>7/32 in, Ângulo de 118°, Acabamento Bright, Broca de Aço Rápido Tipo Jobber</b>	
Diâmetro (in)	7/32
Diâmetro (in em decimal)	.2188”
Comprimento (in)	3-3/4
Comprimento (in)	3.7500”
Tipo	Jobber <sup>11</sup>
Material	HSS <sup>12</sup>
Acabamento	Bright <sup>13</sup>
Com Refrigerante	Não
Tamanho de Flauta (in)	2-1/2
Comprimento de Flauta (in)	2.5000
Ângulo de Ponta (°)	118

Fonte: Fabricante, Hertel.

Tabela 7 – Especificações da broca 3/8”

<b>3/8 in, Ângulo de 118°, Acabamento Bright, Broca de Aço Rápido Tipo Jobber</b>	
Diâmetro (in)	3/8
Diâmetro (in em decimal)	.3750”
Comprimento (in)	5
Comprimento (in)	5.0000”
Tipo	Jobber
Material	HSS
Acabamento	Bright
Com Refrigerante	Não
Tamanho de Flauta (in)	3-5/8
Comprimento de Flauta (in)	3.6250
Ângulo de Ponta (°)	118

Fonte: Fabricante, Hertel.

<sup>11</sup> Broca para propósitos gerais.

<sup>12</sup> High Speed Steel.

<sup>13</sup> Broca sem revestimento.

Tabela 8 – Especificações da broca 1/2”

<b>1/2 in, Ângulo de 118°, Acabamento Bright, Broca de Aço Rápido Tipo Jobber</b>	
Diâmetro (in)	1/2
Diâmetro (in em decimal)	.5000”
Comprimento (in)	6
Comprimento (in)	6.0000”
Tipo	Jobber
Material	HSS
Acabamento	Bright
Com Refrigerante	Não
Tamanho de Flauta (in)	4-1/2
Comprimento de Flauta (in)	4.5000
Ângulo de Ponta (°)	118

Fonte: Fabricante, Hertel.

#### 4.3 Material de trabalho

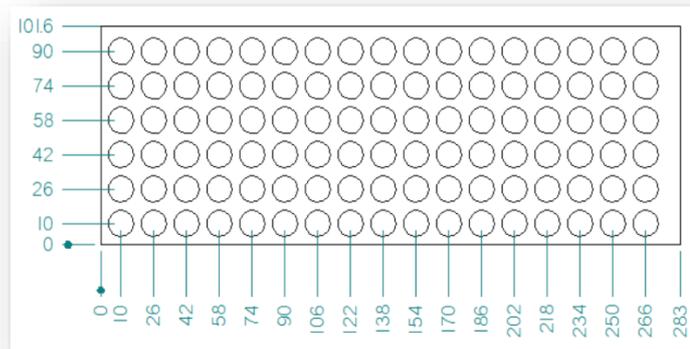
O Alumínio 6061-T6 foi usado como material para testes. Este material é amplamente utilizado em aplicações para acessórios em aeronaves, navios, pistões hidráulicos, válvulas dentre outros. Ele ainda pode ser usado em caminhões, canoas, vagões de trem, mobílias e tubulações.

Segundo Callister (2011) e as normas AISI e ASTM, essa liga de alumínio possui grande resistência e excelentes características de acabamento, tornando-a ideal para elaboração de peças que requerem bom acabamento superficial. Ela possui excelente resistência a corrosão em alguns ambientes comuns e facilidade de solda. A indicação T6 após o hífen simboliza a designação de revenido básica<sup>14</sup> e representa um tratamento térmico por solubilização seguido por um envelhecimento artificial. Esta liga é de uso geral e muito popular com boa facilidade de usinagem apesar do tratamento térmico artificial. Suas propriedades básicas e mais detalhes estão no Anexo A.

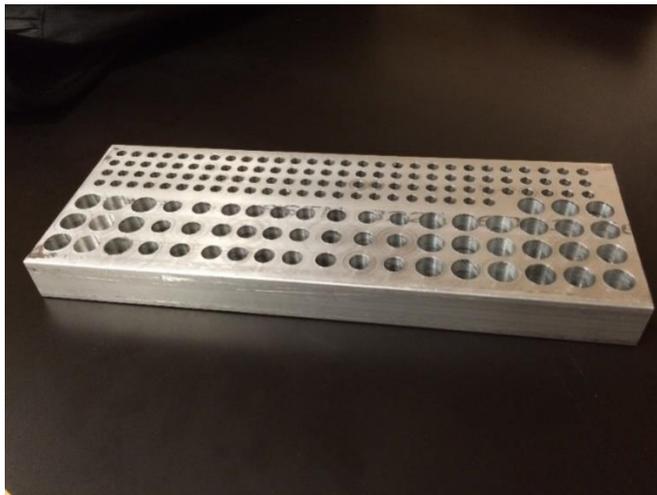
<sup>14</sup>Uma letra e, possivelmente, um número de um a três dígitos, o qual indica o tratamento mecânico e/ou térmico ao qual a liga foi submetida.

O experimento foi realizado usando uma chapa de Alumínio 6061-T6 de comprimento aproximado entre 10 e 12 polegadas (254 mm), largura 4 polegadas (101,6 mm) e espessura de 1 polegada (25,4 mm), como visto na Figura 6.

Figura 6 – Peça utilizada (*Workpiece*)



a) Desenho da peça como as coordenadas dos furos feitos.

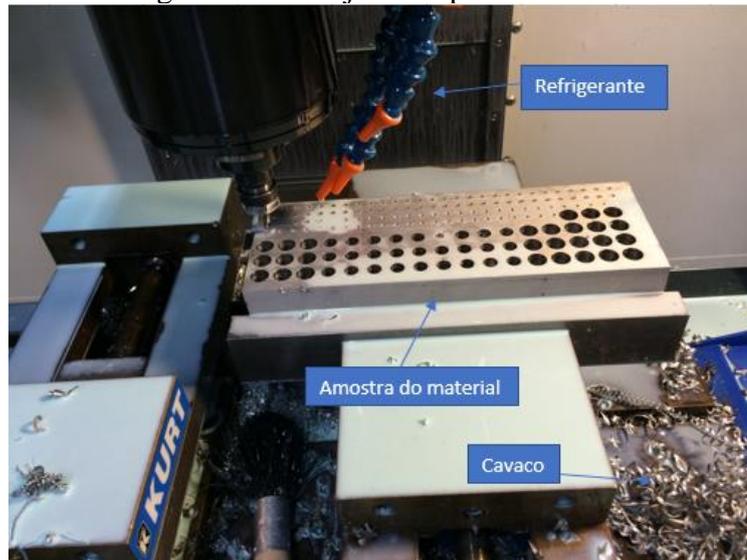


b) Peça real após todas os furos serem feitos.

Fonte: Lima, F. E.

Na Figura 7, pode-se ver o arranjo do experimento: a amostra assentada sobre fixadores na base da máquina CNC; os tubos de onde o líquido refrigerante sai para refrigerar e assim dissipar o calor mais rápido, conseqüentemente, aumentando a eficiência do processo; o cabeçote com o eixo-árvore (no caso da figura citada, uma broca de centro está preparando os furos).

Figura 7 – Arranjo do experimento

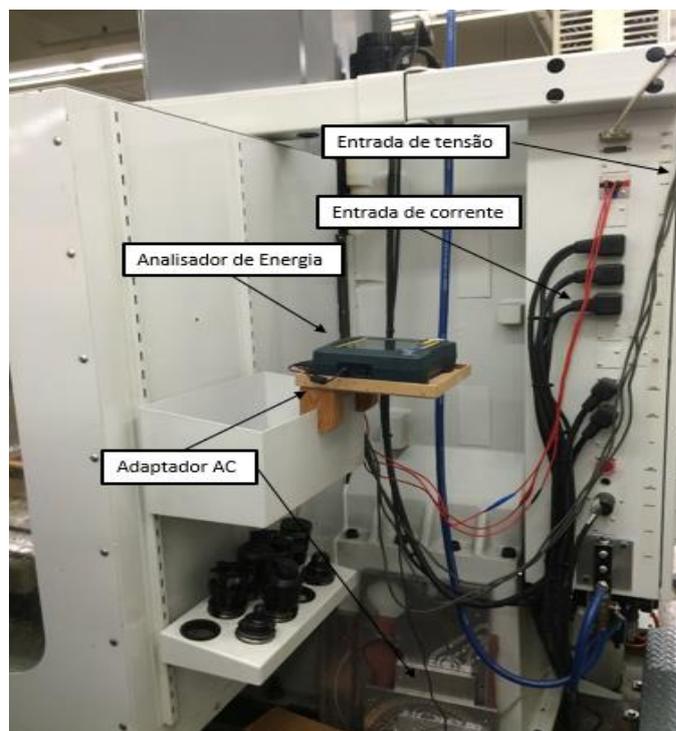


Fonte: Lima, F.E (adaptado pelo autor).

#### 4.4 Analisador de energia

O analisador de energia (Power Meter, em inglês) da Yokogawa® M&C Corporation CW240 Clamp-on foi utilizado para medição dos dados de tensão, corrente e potência da máquina-ferramenta (Figura 8).

Figura 8 – Analisador de energia



Fonte: Prof. Lima (adaptado pelo autor).

#### 4.5 Parâmetros de corte do processo

Os parâmetros de corte estudados neste trabalho foram a rotação e a velocidade de avanço. Logo abaixo pode-se ver as tabelas explicativas que mostram como as medições terciárias foram feitas. No experimento estudado, três furos para cada condição de corte foram realizados, o que garante melhor precisão nas medições. Os incrementos de avanço de penetração da broca que foram utilizados, quando usado o método do “pica-pau” ou *peak*, foram o do diâmetro das respectivas brocas usadas. O “pica-pau” é uma técnica de furação usado para quebra de cavaco e melhor penetração dos líquidos refrigerantes na peça. Ela é realizada com uma movimentação de subida rápida, voltando para a posição inicial da broca, após uma penetração na peça.

Tabela 9 – Broca de diâmetro 7/32” (0.21875)

<b>Rotação n (RPM)</b>	<b>Velocidade de Avanço <math>V_f</math> (in/min)</b>	<b>Tipo de Furação</b>	<b>Sistema “Pica pau” (with peak - WP)</b>	<b>Operação</b>
4715	23.575	Furação em cheio (FC)	Com	1.1
	28.289			2.1
	33.005			3.1
4366	21.828	Furação em cheio	Com	1.2
	26.196			2.2
	30.562			3.2
5239	26.195	Furação em cheio	Com	1.3
	31.434			2.3
	36.670			3.3
4366	21.828	Furação em cheio	Sem (Sem <i>peak</i> – SP)	1.4
	26.196			2.4
	30.562			3.4

Tabela 10 – Broca de diâmetro 3/8” (0,375)

<b>Rotação n (RPM)</b>	<b>Velocidade de Avanço <math>V_f</math> (in/min)</b>	<b>Tipo de Furação</b>	<b>Sistema “Pica pau” (with peak)</b>	<b>Operação</b>
2750	16.500	Furação em cheio	Com	1.5
	19.252			2.5
	22.000			3.5
2750	16.500	Furação c/ pré-furação FP (da de 7/32”)	Com	1.2
	19.252			2.2
	22.000			3.2
3056	18.336	Furação c/ pré-furação FP (da de 7/32”)	Com	1.3
	21.392			2.3
	24.447			3.3
3361	20.166	Furação c/ pré-furação FP (da de 7/32”)	Sem	1.4
	23.530			2.4
	26.888			3.4

Tabela 11 – Broca de diâmetro 1/2” (0,5)

<b>Rotação n (RPM)</b>	<b>Velocidade de Avanço <math>V_f</math> (in/min)</b>	<b>Tipo de Furação</b>	<b>Sistema “Pica pau” (with peak)</b>	<b>Operação</b>
2063	12.378	Furação em cheio (FC)	Com	1.6
	16.502			2.6
	20.630			3.6
2063	12.378	Furação com pré-furação PF (da de 7/32”)	Com	1.1
	16.502			2.1
	20.630			3.1
2063	12.378	Furação com pré-furação PF (da de 3/8”)	Com	1.5
	16.502			2.5
	20.630			3.5

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de consumo de energia, obtidos para cada uma das condições testadas, foram coletados pelo analisador de energia empregado e descrito no procedimento experimental. Estes resultados foram transferidos para planilhas e, com isso, plotados gráficos no Microsoft Excel<sup>®</sup>. A obtenção das medidas de corrente elétrica se deu à frequência de dez medidas por segundo.

Tendo em mente que a corrente elétrica utilizada pela máquina é uma boa medida para se compreender as forças na furação uma vez que está ligada a potência requerida necessária para a furação, médias de tendências dos dados de correntes (média das três fases) de cada condição de corte do processo de furação (três furos para cada condição) foram comparadas graficamente com o objetivo de analisar as influências de alguns parâmetros e ver o comportamento do processo. As movimentações realizadas pelos motores para troca das ferramentas no magazine<sup>15</sup> não foram levadas em consideração na análise. Sendo assim, somente a força necessária na furação foi analisada. Pelo fato de o pico de corrente para troca de posicionamento de furo afetar minimamente a tendência (pois o número de dados dos três furos é grande), ele não foi retirado da análise de tendência.

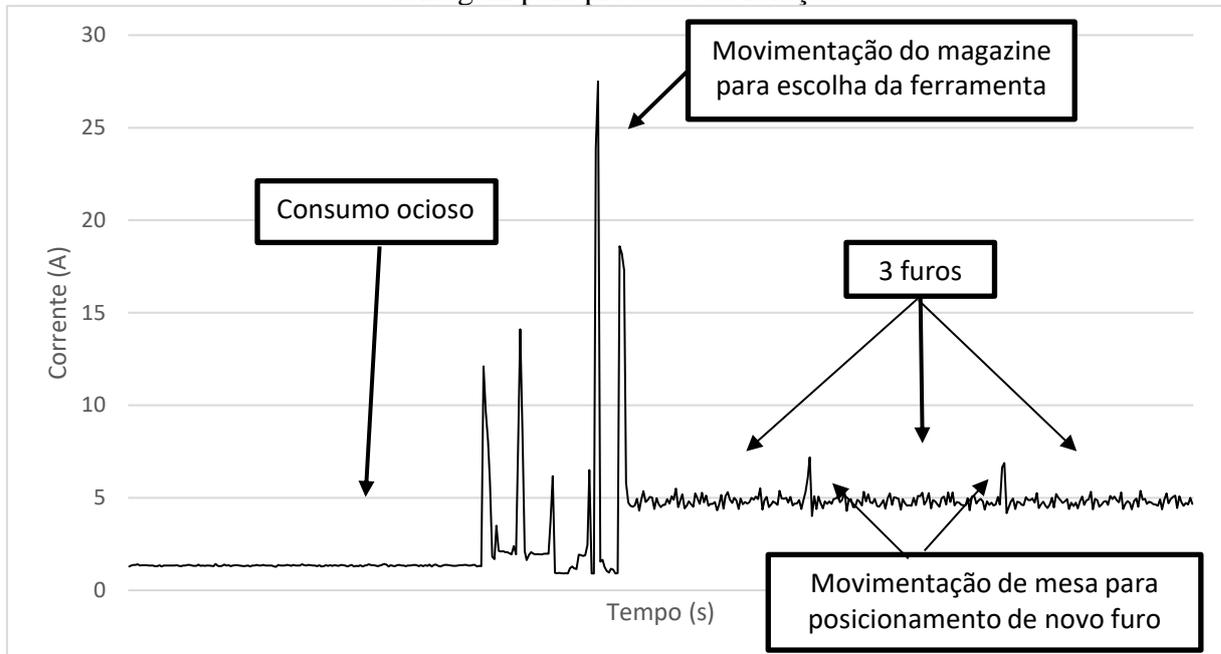
A furação possui a característica de corte interrompido devido a broca ser uma ferramenta multicortante que possui duas arestas de corte, neste caso, podendo ter mais. A característica descrita atribuída ao processo de furação faz com que o consumo de energia por parte do motor de acionamento do eixo-árvore da máquina-ferramenta não seja exatamente constante o que faz gerar um gráfico de consumo de energia caracterizado pela presença de picos e vales.

Olhando para a Figura 9, tem-se a representação visual do perfil do consumo de energia na furação de três furos realizados pela máquina CNC já descrita. Este perfil é resultado do gráfico da corrente de energia em função do tempo no processo.

---

<sup>15</sup> Magazine é o equipamento na máquina CNC onde estão organizadas e armazenadas as ferramentas para uso.

Figura 9 – Perfil de consumo de energia no acionamento da máquina-ferramenta e usinagem pelo processo de furação



Fonte: autor.

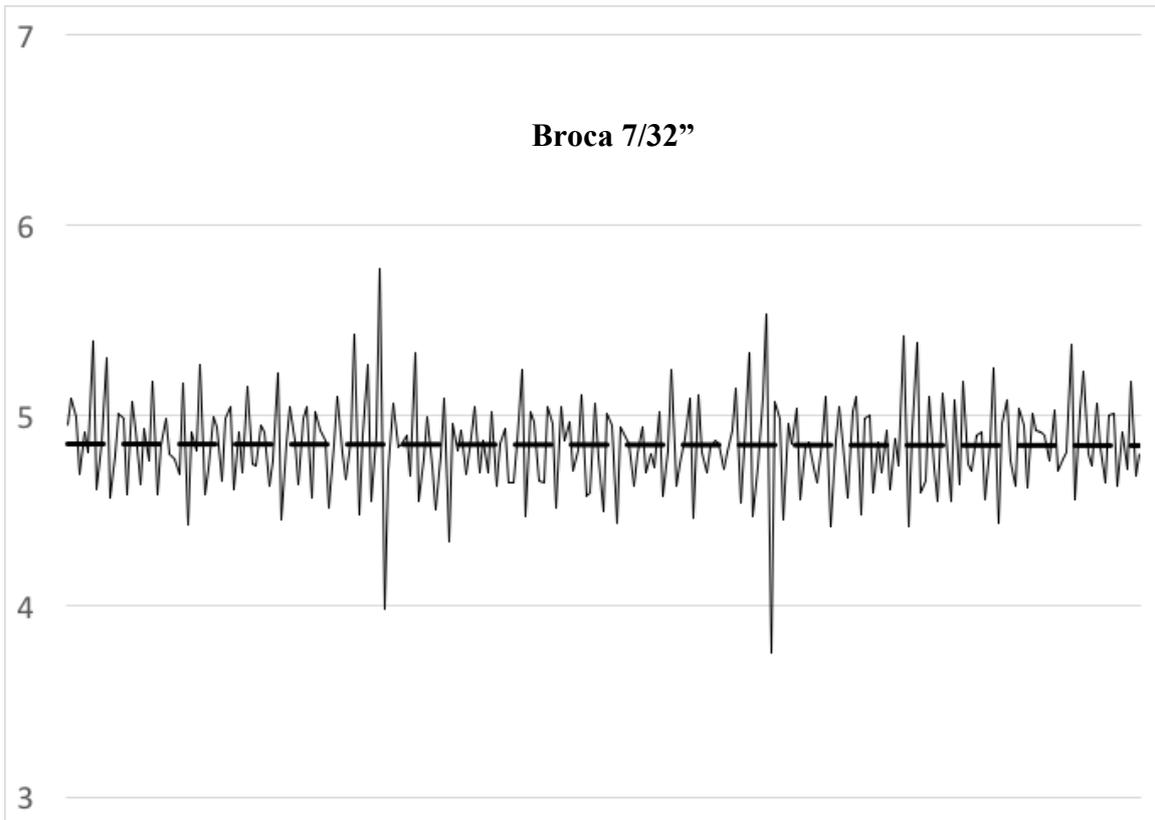
## 5.1 Consumo de energia

O consumo de energia por parte das máquinas-ferramentas durante a usinagem depende de inúmeras variáveis, dentre elas os parâmetros e grandezas de corte. Nesse estudo, foi realizado observando o comportamento da corrente, em ampères (A), para uma tensão de 211V (Volts). Para as análises foram retirados os perfis somente dos três furos para cada condição de corte, juntamente com os dois picos para movimentação da mesa.

### 5.1.1 Efeito da velocidade de avanço no consumo de energia

Para uma primeira análise deste estudo compara-se as condições de trabalho (1.1, 1.2 e 1.3) na operação de furação em cheio da broca de menor diâmetro, 7/32 polegadas. Abaixo são expostos os gráficos representativos do consumo de energia durante do processo de usinagem nas três condições descritas, Figuras 10 a 12.

Figura 10 – Usinagem na condição 1.1-FC/WP. n (4715 RPM).  $V_f$ (23,575 in/min)

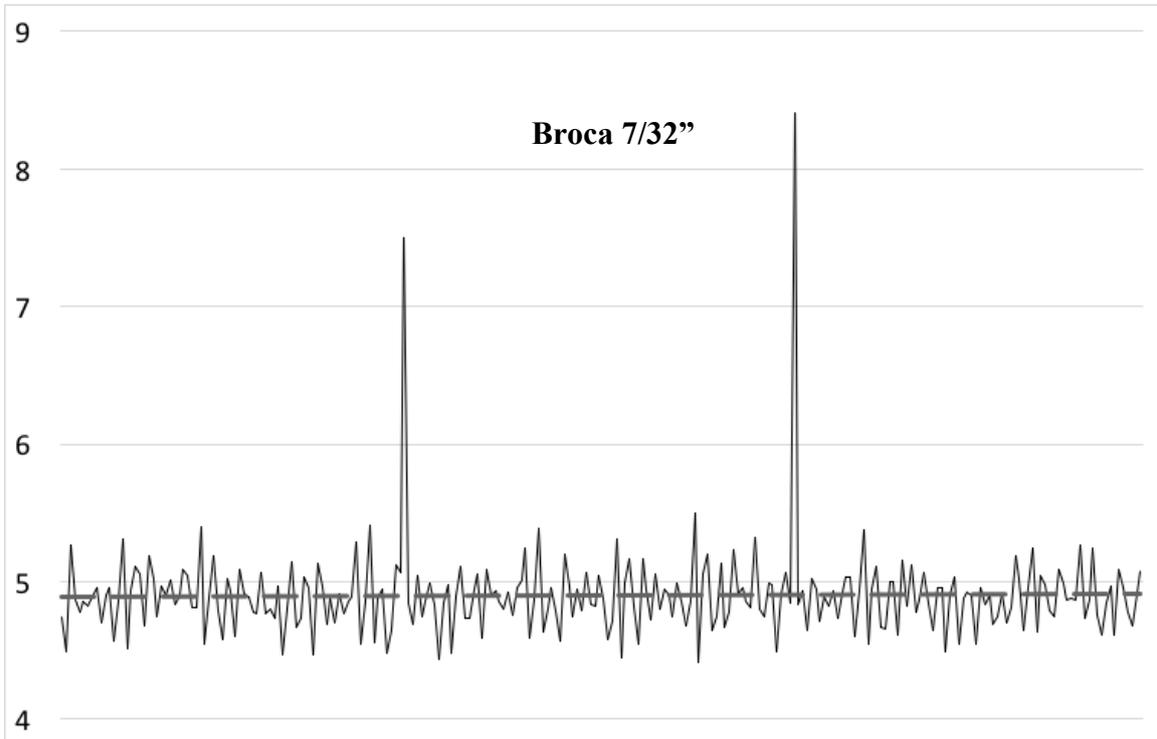


Na Figura 10 tem-se representado, graficamente, o comportamento no consumo de energia pela máquina-ferramenta quando usinando com rotação de 4715 RPM e velocidade de avanço de 23,575 in/min (valores intermediários adotados neste estudo para rotação e velocidade de avanço).

Analisando o citado gráfico constata-se o consumo médio da corrente elétrica próximo de 5A e uma frequência moderada na presença de picos e vales representativos da variação de consumo de energia.

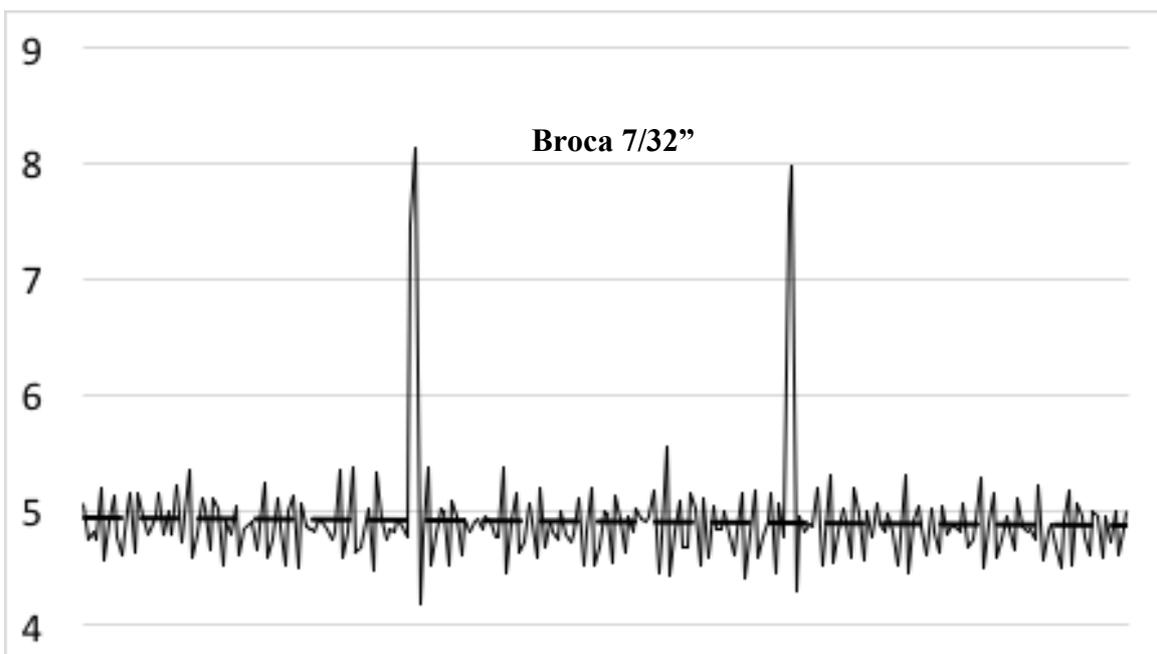
Na análise do gráfico da Figura 11 constata-se que ao trabalhar com menor rotação (4366 RPM), conseqüentemente menor velocidade de avanço (21,828 in/min), tem-se o valor médio da corrente elétrica consumida, próximo de 5A (contudo, esse valor tende a ser ligeiramente maior quando comparado àquele apresentado pela Figura 10) e com menor incidência de variações de consumo representadas pelos picos e vales. Este comportamento é esperado uma vez que a ferramenta (broca) é multicortante (de duas arestas) e para cada rotação tem-se a incidência das duas arestas de corte.

Figura 11 – Usinagem na condição 1.2-FC/WP.  $n$  (4366 RPM).  $V_f$  (21,828 in/min)



Na Figura 12 percebe-se uma discreta elevação do valor da corrente média consumida pela máquina-ferramenta quando usinando com o maior valor de rotação (5239 RPM) e, por óbvio, o maior valor da velocidade de avanço (26,195 in/min).

Figura 12 – Usinagem na condição 1.3-FC/WP.  $n$  (5239 RPM).  $V_f$  (26,195 in/min)

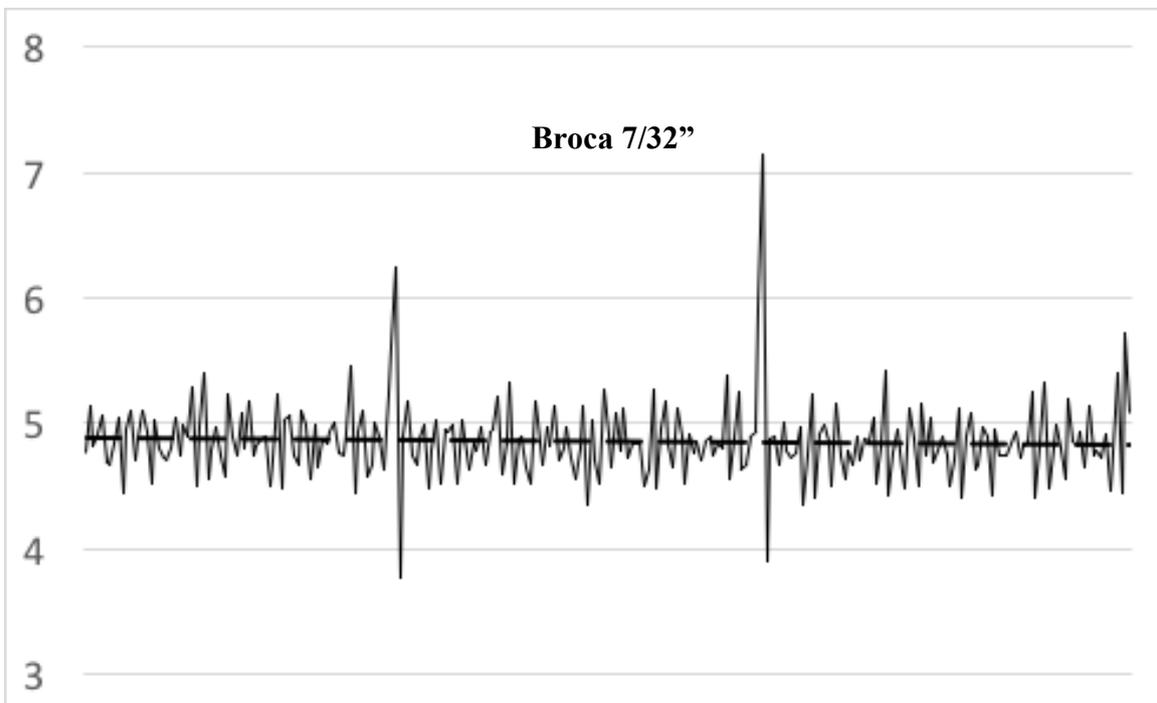


Sabe-se que a potência consumida pelo motor da máquina-ferramenta é diretamente dependente da velocidade e da força de avanço e essa última tende a diminuir com o aumento da rotação, pois em uma velocidade maior o material tem menos tempo para deformar na zona de corte, assim resultando em menor força, como descrito por Ma. (2014). Além disso, o calor gerado pelo atrito com maior rotação na peça facilita o cisalhamento do material. Contudo, diferentemente da usinagem na condição 1.2 (menor velocidade de avanço), agora tem-se a predominância da grandeza de velocidade de avanço no consumo de energia, em detrimento da força de avanço.

### 5.1.2 Efeito da técnica “peak” no consumo de energia

Para fazer esta análise, comparou-se a condição de corte 1.2 em cheio, utilizando-se o sistema “pica-pau”, com a condição 1.4, sem a utilização da técnica (Tabela 9). As Figuras 13 e 11 (Figura 11 está repetida para melhor visualização) mostram graficamente os resultados quanto ao consumo de energia quando usinando nas condições descritas, 1.2 e 1.4, respectivamente.

Figura 13 – Usinagem na condição 1.4-FC/SP.  $n$  (4366 RPM).  $V_f$  (21,828 in/min)

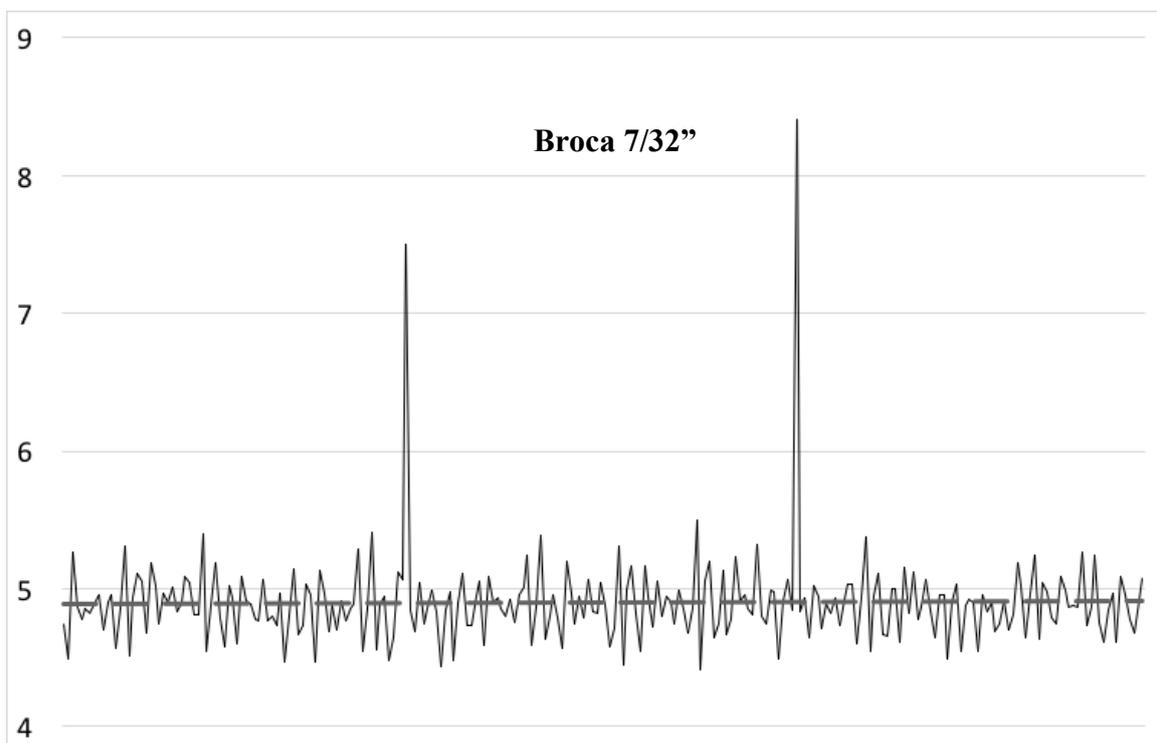


Na Figura 13, tem-se representado, graficamente, o comportamento no consumo de energia pela máquina-ferramenta quando usinando sem *peak* com rotação de 4366 RPM e velocidade de avanço de 21,828 in/min (valores adotados neste estudo para rotação e velocidade de avanço para ambas as condições de corte).

Analisando o citado gráfico constata-se o consumo médio da corrente elétrica próximo de 5A e uma frequência moderada na presença de picos e vales representativos da variação de consumo de energia.

Comparando com a Figura 11, nota-se que, quanto ao consumo médio de energia, ambas as condições possuem valores similares, próximo a 5A, o que sugere que o sistema “pica-pau” não influenciou significativamente o consumo. Porém, percebe-se que a Figura 11 possui maior frequência de picos de corrente. Isso está relacionado ao incremento do *peak*, pois sabe-se que o uso da técnica do *peak* na usinagem causa o acionamento do eixo-árvore de modo a elevar o consumo de energia a picos maiores. Contudo, esse acionamento tem relação direta com o diâmetro da broca e a broca empregada que foi de apenas de 7/32 polegadas. Como sugestão, um estudo mais aprofundado com brocas de diâmetros superiores a esse seria aconselhável para se perceber uma mudança mais significativa na média da corrente e, assim, no consumo de energia.

Figura 11 – Usinagem na condição 1.2-FC/WP. n (4366 RPM).  $V_f$ (21,828 in/min)



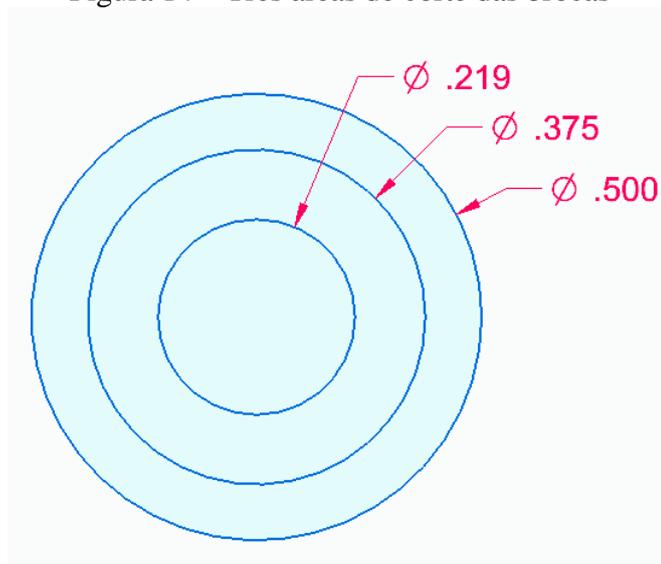
Assim, diante do exposto pode-se inferir que os resultados são sugestivos de que o uso da técnica conhecida como “pica pau” (*with peak*) deve ser empregada sem receio de elevar o consumo de energia (principalmente, em se tratando do uso de broca de pequeno diâmetro), pois o resultado obtido com a melhoria da refrigeração e com a quebra de cavaco se sobrepõe aos custos com energia, pois aumentaria a vida útil da ferramenta e qualidade da peça. Por outro lado, devido a movimentação da ferramenta no *peak*, há uma elevação no tempo de corte no processo o que deve ser levado em consideração e melhor estudado.

### 5.1.3 Efeito da área de corte no consumo de energia

Para a análise da área de corte e sua influência no consumo na furação, comparou-se três condições de corte: a 1.1 de broca de diâmetro 7/32” (Fig. 10), a 1.5 de broca 3/8” (Fig. 15) e a condição 1.6 de broca 1/2” (Fig. 16). Todos os processos foram com furação em cheio, somente variando o diâmetro das brocas utilizadas e mantendo-se a grandeza de corte SFM (*Surface Feet Per Minute*)<sup>16</sup> em 270. Para fácil visualização, a Figura 10 foi repetida abaixo.

Para melhor entendimento, a Figura 14, elaborada no Solid Edge®, mostra o desenho das áreas de corte realizadas pelo diâmetro das três brocas, unidades em polegadas decimais. Da menor para maior tem-se, o furo da broca de 7/32”, depois a broca de 3/8” e por fim a broca de 1/2”.

Figura 14 – Três áreas de corte das brocas

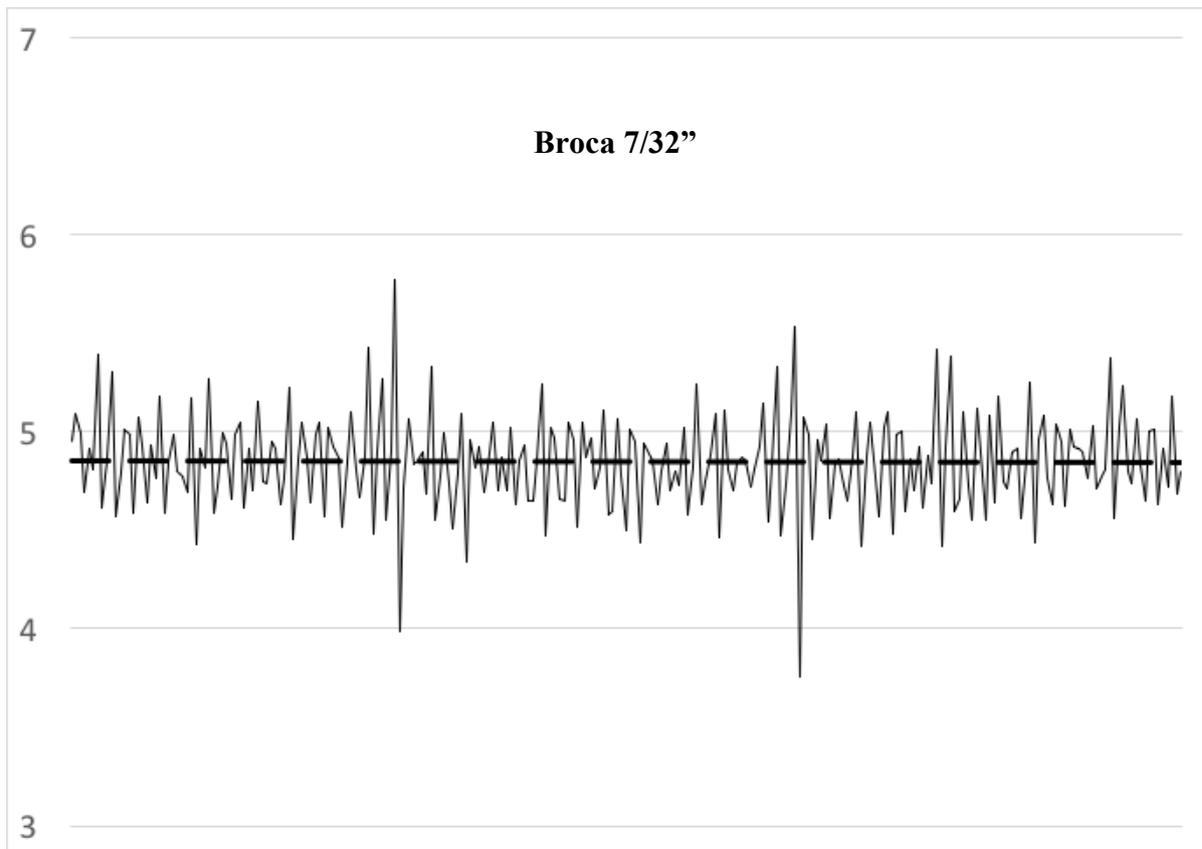


Fonte: autor.

<sup>16</sup> Expressa a velocidade tangencial na superfície da broca. Mais detalhes no Apêndice D.

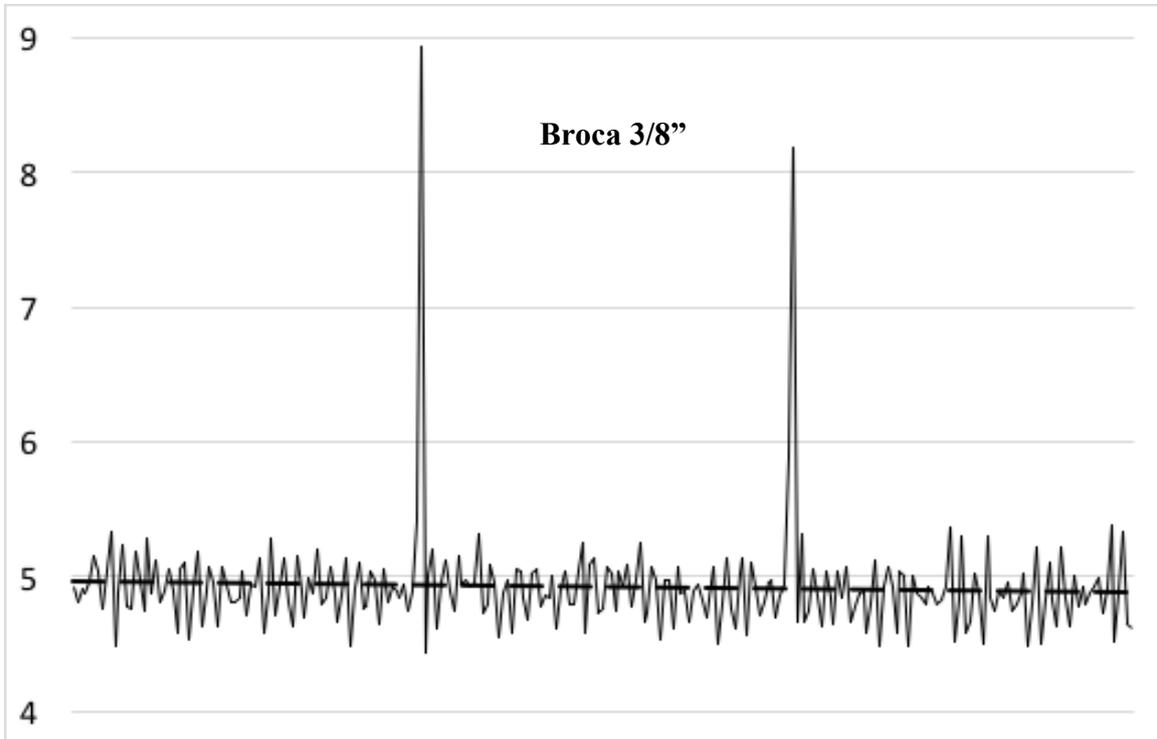
Na Figura 10 tem-se representado, graficamente, o comportamento no consumo de energia pela máquina-ferramenta quando usinando com rotação de 4715 RPM e velocidade de avanço de 23,575 in/min. Como visto anteriormente, esse gráfico possui consumo médio da corrente elétrica próximo de 5A e uma frequência moderada na presença de picos e vales representativos da variação de consumo de energia.

Figura 10 – Usinagem na condição 1.1-FC/WP. n (4715 RPM).  $V_f$ (23,575 in/min)



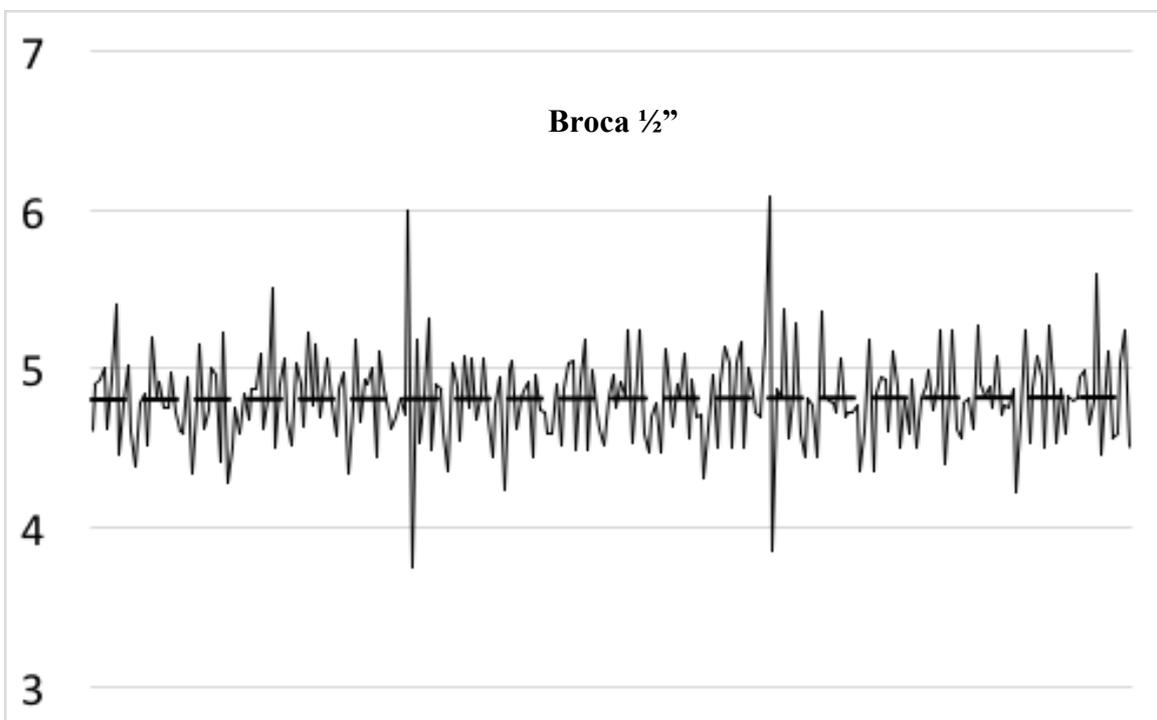
Na análise do gráfico da Figura 15, condição 1.5, constata-se que ao trabalhar com menor rotação (2750 RPM), conseqüentemente a menor velocidade de avanço (16,500 in/min), mas com a mesma velocidade tangencial na superfície, tem-se o valor médio da corrente elétrica consumida mais próximo de 5A (esse valor é maior quando comparado àquele apresentado pela Figura 10) e com menor incidência de variações de consumo representadas pelos picos e vales. Este comportamento é esperado uma vez que a profundidade de corte aumentou (diâmetro maior de broca), e conseqüentemente a área de corte e as forças de reação necessárias para cisalhar o material. Além disso, mesmo reduzindo o avanço, o que resulta em maiores forças de corte, o fator de área de corte predominou no consumo.

Figura 15 – Usinagem na condição 1.5-FC/WP.  $n$  (2750 RPM).  $V_f$  (16,500 in/min)



Na Figura 16 percebe-se uma diminuição do valor da corrente média consumida pela máquina-ferramenta quando usinando com o menor valor de rotação (2063 RPM) e de velocidade de avanço (12,378 in/mim), mantendo-se a mesma velocidade na superfície.

Figura 16 – Usinagem na condição 1.6-FC/WP.  $n$  (2063 RPM).  $V_f$  (12,378 in/min)



Pode-se perceber, pelo comportamento do gráfico, que mesmo com uma média inferior de corrente comparada com a média de corrente da broca 3/8" (menor área de corte), houve um aumento na frequência de picos e vales na condição 1.6 (Figura 17), isso pode ser explicado pelo uso da técnica “pica pau” ou *peck drilling* onde o incremento de avanço é o diâmetro da broca (1/2"). Além disso, esse comportamento é explicado pelo fato do aspecto da velocidade de avanço (menor consumo para uma menor velocidade de avanço) influenciar mais que o aspecto da área de corte.

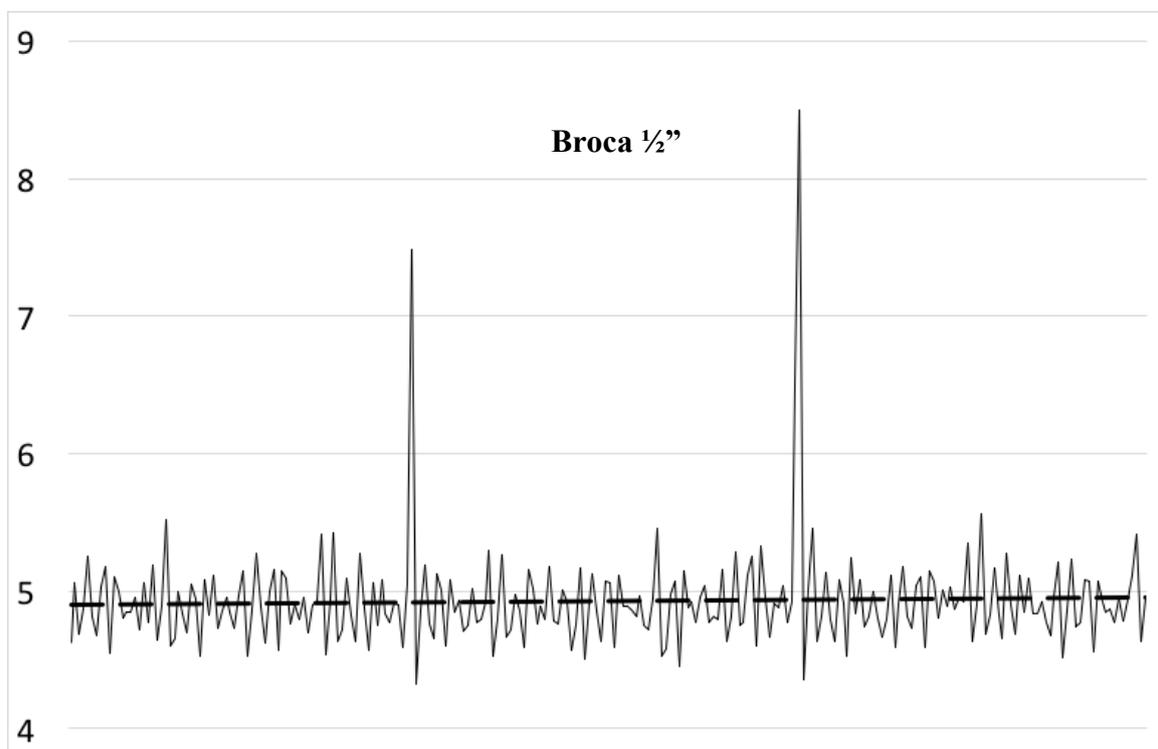
Assim, diante do exposto, pode-se tirar a conclusão de que a área de corte influencia no consumo de energia.

#### 5.1.4 Efeito da pré-furação no consumo de energia

Para a análise da influência no consumo de energia utilizando a pré-furação comparou-se as condições de corte 1.6 (Fig. 16, na página anterior) e a 1.1 com pré-furação (Fig. 17) para a broca de diâmetro de meia polegada.

Na Figura 17 percebe-se que não houve uma diferença significativa do valor da corrente média consumida pela máquina-ferramenta quando usinando com o mesmo valor de rotação (2063 RPM) e uma velocidade de avanço (12,378 in/min) utilizando-se a pré-furação. Esse fato pode estar relacionado ao pequeno diâmetro da broca que fez a primeira furação.

Figura 17 – Usinagem na condição 1.1-PF/WP. n (2063 RPM).  $V_f$  (12,378 in/min)



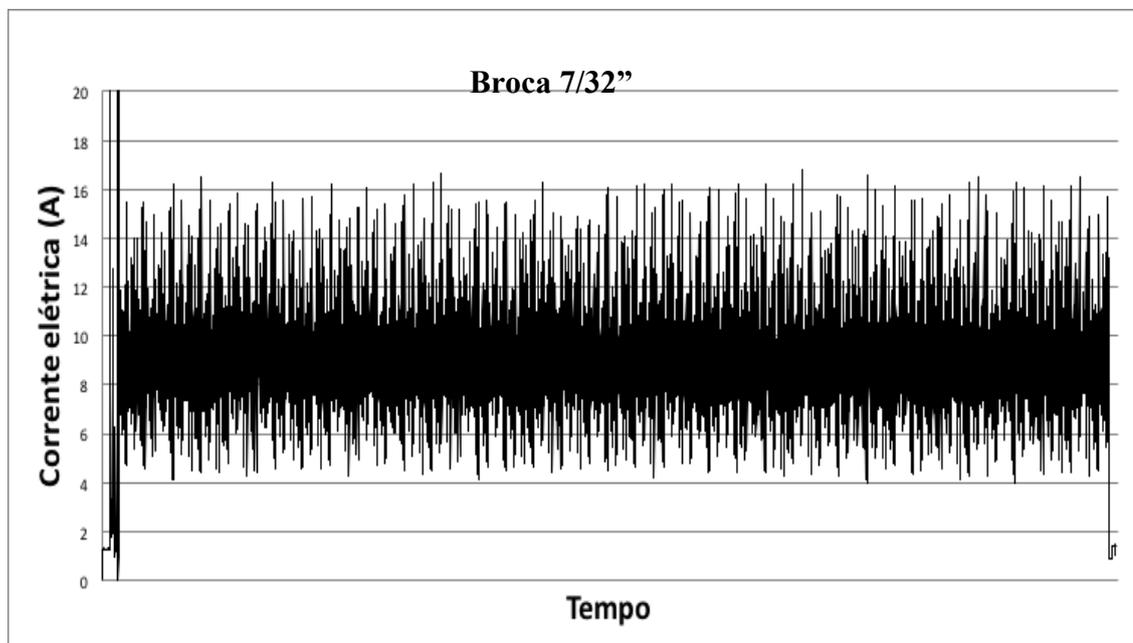
Pode-se ver que, ao contrário do que se esperava, o processo de furação com pré-furação possui consumo similar, porém percebe-se que a furação em cheio possui um comportamento mais instável, com mais vales e picos. Isso pode ser explicado pelo pequeno diâmetro do furo já feito (broca 7/32”).

Com vista nos dados analisados, a furação com pré-furação exige um estudo mais aprofundado para se entender melhor esses resultados, pois do contrário que se esperava (uma área de corte menor implicando menor consumo) os dados são inconclusivos.

### 5.1.5 Efeito do desgaste no consumo de energia

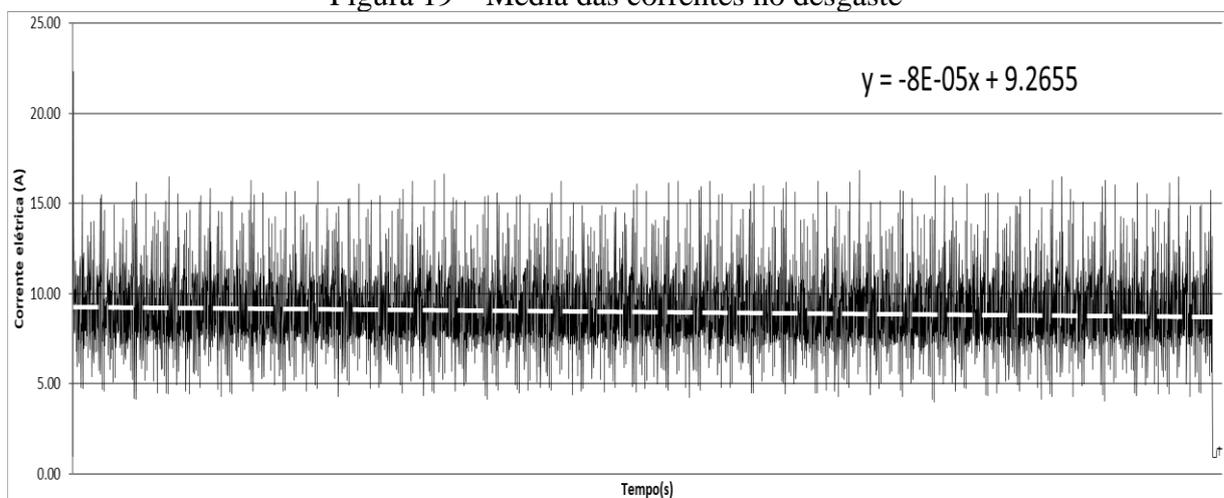
Para se analisar a influência do desgaste no consumo de energia foram usinados 110 furos em um período de tempo de 11 minutos. Na Figura 19 tem-se representado, graficamente, o comportamento no consumo de energia pela máquina-ferramenta quando usinando vários furos sucessivos com rotação de 5239 RPM e velocidade de avanço de 36,670 in/min da broca de diâmetro 7/32 polegadas.

Figura 18 – Usinagem de desgaste condição 3.3-FC/WP. n (5239 RPM).  $V_f$  (36,670 in/min)



A priori, o efeito do desgaste no consumo pode ser percebido por meio da média de tendência, graficamente. Posteriores análise podem ser feitas utilizando diferentes métodos analíticos.

Figura 19 – Média das correntes no desgaste



Pode-se ver que aparentemente não existem variações significativas na corrente. Porém, analisando a tendência da corrente na figura, pode-se perceber uma leve inclinação negativa na reta (Fig. 20). Tal inclinação pode ser explicada pelo aquecimento da máquina-ferramenta quando essa estava usinando os furos. Quando aquecida, a máquina possui melhor desempenho e conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia na furação. Da mesma forma a ferramenta. Fato esse que leva a operadores de máquinas deixarem elas operando em vazio antes de iniciarem a usinagem. Porém, esse comportamento no gráfico não está ligado à influência ao consumo de energia do desgaste em si, o que torna os resultados conclusivos para a insignificância do desgaste no consumo de energia.

## 6 CONCLUSÃO

O efeito no consumo de energia ligados aos parâmetros e grandezas de corte no processo de usinagem por furação foram o foco deste estudo.

Com o uso dessas informações, sugestões de alguns métodos para otimizar o desempenho do processo de furação foram feitos. Ainda, recomendações para futuras pesquisas na área para se melhor investigar a influência desses parâmetros e condições foram possíveis ser feitas.

As principais recomendações que puderam ser vistas neste trabalho estão resumidas logo abaixo:

1. Maiores velocidades de avanço aumentam o consumo de energia do processo de furação, porém altas rotações diminuem a força de corte, diminuem o consumo, como

foi visto nas três condições descritas. É preciso que se estabeleça um método para se encontrar um ponto intermediário desses valores onde tem-se um menor consumo.

2. A utilização da técnica de furação “pica pau” ou *peak* não afetou significativamente o consumo de energia na furação, usando broca de aço-rápido sem revestimento, quando utilizada com diâmetros pequenos (7/32”), quando o incremento de avanço for o diâmetro da broca.
3. Maiores áreas de corte aumentam o consumo de energia na furação, porém somente até o ponto onde a velocidade de avanço diminui tanto que chega a influenciar mais que a área de corte.
4. A média do consumo de energia provocado pelo desgaste da ferramenta quando usinando Alumínio 6061-T6 é praticamente constante para um total de 110 furos (11 min), implicando que o desgaste da ferramenta é imperceptível para o caso onde a aresta da broca sem revestimento percorreu 274,3227 m, uma vez que a corrente média não sofre alterações visíveis.
5. A pré-furação, contrário do esperado, não alterou o consumo, porém tal fato deve melhor ser investigado para as condições de corte descritas.

Note que as afirmações descritas acima relacionam apenas o aspecto do consumo de energia e somente devem ser usadas para tal, pois outros aspectos podem influenciar os custos do processo. Por exemplo, maiores velocidades de corte aumentam o consumo, porém aumentam o desgaste da ferramenta, diminuindo a vida útil da mesma. Da mesma forma, a próprio influência do desgaste da ferramenta. Assim, trabalhos que envolvam diversos aspectos do processo podem ser adotados para selecionar melhor os parâmetros de corte para furação.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho pode-se ver que ainda existe uma gama de possibilidades de linhas de investigação para se entender melhor o processo de furação e a influência de seus parâmetros e grandezas no consumo de energia. De fato, o processo de usinagem por furação exige um vasto conhecimento devido à complexidade envolvida e seus vários fatores que influenciam o processo. Algumas sugestões de pesquisa estão enumeradas abaixo:

1. Estudar a influência da técnica “pica pau” no consumo de energia. Mais especificamente, as vantagens de se ter lubrificação (aumentando da vida útil da ferramenta) e quebra de cavaco em frente as desvantagens de aumento de tempo de corte

e do consumo energia;

2. Averiguar o consumo de energia para outros materiais;
3. Estudar a influência do funcionamento pleno, quando a máquina está aquecida, da máquina-ferramenta no consumo de energia.
4. Averiguar até que ponto a velocidade de corte influência mais do que a área de corte no consumo de energia.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup>ASTAKHOV, V. P. Geometry of single-point turning tools and drills: Fundamentals and Practical Application. **Springer Series in Advanced Manufacturing**, p. 205, 2010. ISSN 1860-5168. DOI 10.1007/978-1-84996-053-3.
- <sup>2</sup>BI, Z. M.; WANG L. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 2, p. 420-428, Jul. 2012. ISSN: 0278-6125; DOI: 10.1016/j.jmsy.2012.07.002. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000351138700007 >.
- <sup>3</sup>BYRNE, G; SCHOLTA, E. Environmentally Clean Machining Processes – A Strategic Approach. *Annals of the CIRP*, v. 42, p. 471-474, 1993.
- <sup>4</sup>CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 7 ed. – [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-1595-8.
- <sup>5</sup>CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P. V. Application of Sustainable Techniques in Metal Cutting for Enhanced Machinability. **Journal of Clean Production**, vol 100, p. 17-34. March 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.039>.
- <sup>6</sup>CICEK, A.; KIVAK, T.; EKICI, E. Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 26, n. 2, p. 295-305, Apr 2015. ISSN 0956-5515. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000351138700007 >.
- <sup>7</sup>DOMINGO, R. et al. A Sustainable Evaluation of Drilling Parameters for PEEK-GF30. **Materials**, v. 6, p. 5907-5922. ISSN 1996-1944. DOI:10.3390/ma6125907. Dez 2013. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/materials>.
- <sup>8</sup>DUFLOU, J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **Cirp Annals-Manufacturing Technology**, v. 61, n. 2, p. 587-609, 2012. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000309082300001 >.
- <sup>9</sup>FRANCO, A.; RASHED, C. A. A.; ROMOLI, L. Analysis of energy consumption in micro-drilling processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1260-1269, Nov 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000391079300113 >.
- <sup>10</sup>HABER-GUERRA, R. E.; HABER-HABER, R.; ANDRÉS, M. D.; PALOMAR, A. A. Networked Fuzzy Control System for High-Performance Drilling Process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, p. 031009-1 - 031009-6, June 2008. DOI: 10.1115/1.2783280.
- <sup>11</sup>KALLA, D. K. et al. Energy Consumption in Discrete Part Production. **Proceedings of the ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC 2011**, p. 1-7, 2011, June 13-17, Corvallis, Oregon, USA.

- <sup>12</sup>MA, J. et al. Assessment of Cutting Energy Consumption and Energy Efficiency in Machining of 4140 Steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 9-12, p. 1701-1708, Oct 2014. ISSN 0268-3768. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000343048300046 >.
- <sup>12</sup>MAY, G.; STAHL, B; TAISCH, M.; KIRITSIS, D. Energy Management in Manufacturing: From Literature Review to a Conceptual Framework. **Journal of Clean Production**, p. 1-26, Oct 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.191 >.
- <sup>13</sup>PARK, C. W. et al. Energy consumption reduction technology in manufacturing - A selective review of policies, standards, and research. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 10, n. 5, p. 151-173, Dec 2009. ISSN 2234-7593. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000273787400022 >.
- <sup>14</sup>RAUCH, E. et al. Sustainability in Manufacturing through Distributed Manufacturing Systems (DMS). In: KARA, S. (Ed.). **22nd Cirp Conference on Life Cycle Engineering**. Amsterdam: Elsevier Science Bv, v.29, 2015. p.544-549. (Procedia CIRP).
- <sup>18</sup>TSCHÄTSCH, H. **Applied Machining Technology**. Translation from the German language edition: Praxis der Zerspantechnik by Heinz Tschätsch. Springer, 8th ed. 2008. DOI 10.1007/978-3-642-01007-1. ISBN 978-3-642-01006-4. e-ISBN 978-3-642-01007-1.
- <sup>18</sup>UNNIKRISHNAN, A; RAO, P. V. M. An Improved Predictive Model for Energy Estimation in Milling. **Smart and Sustainable Manufacturing Systems**, ASTM International, v. 1, n. 1, p. 203-231, Aug 2017. DOI:10.1520/SSM 20170008. Disponível em: <https://www.astm.org/ >.
- <sup>15</sup>YOON, H. S. et al. Empirical study of the power efficiency of various machining processes. In: DORNFELD, D. e HELU, M. (Ed.). **6th Cirp International Conference on High Performance Cutting**. Amsterdam: Elsevier Science Bv, v.14, 2014. p.558-563. (Procedia CIRP).
- <sup>16</sup>\_\_\_\_\_. Control of machining parameters for energy and cost savings in micro-scale drilling of PCBs. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 41-48, Sep 2013. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000322354200006 >.
- <sup>17</sup>\_\_\_\_\_. Geometric Optimization of Micro Drills using Taguchi Methods and Response Surface Methodology. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 12, n. 5, p. 871-875, Oct 2011. ISSN 1229-8557. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000297580800016 >.
- <sup>19</sup>ZEILMANN, R. P; VACARO, T. Aplicações de broca de aço-rápido na usinagem a seco do aço AISI P20. **Estudo Tecnológico** – vol. 4, nº 3: 180 – 187. Set/ Dez 2008. DOI:10.4013/ete. 20083.04. ISSN 1808 7310.

## ANEXO A – ALUMÍNIO 6061-T6

**Subcategories:** 6000 Series Aluminum Alloy; Aluminum Alloy; Metal; Nonferrous Metal.

**Key Words:** al6061, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T6, AD-33 (Russia); AA6061-T6; 6061T6, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T651, AD-33 (Russia); AA6061-T651

Tabela A1 – Composição do Alumínio 6061-T6

Component	Wt. %
Al	95.8 - 98.6
Cr	0.04 - 0.35
Cu	0.15 - 0.4
Fe	Max 0.7
Mg	0.8 - 1.2
Mn	Max 0.15
Other, each	Max 0.05
Other, total	Max 0.15
Si	0.4 - 0.8
Ti	Max 0.15
Zn	Max 0.25

### Material Notes:

Information provided by Alcoa, Starmet and the references. General 6061 characteristics and uses: Excellent joining characteristics, good acceptance of applied coatings. Combines relatively high strength, good workability, and high resistance to corrosion; widely available. The T8 and T9 tempers offer better chipping characteristics over the T6 temper.

**Applications:** Aircraft fittings, camera lens mounts, couplings, marines fittings and hardware, electrical fittings and connectors, decorative or misc. hardware, hinge pins, magneto parts, brake pistons, hydraulic pistons, appliance fittings, valves and valve parts; bike frames.

**Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.**

Tabela A2 – Propriedades Alumínio 6061-T6

	<b>Metric</b>	<b>English</b>	<b>Comments</b>
<b>Physical Properties</b>			
<b>Density</b>	2.7 g/cc	0.0975 lb/in <sup>3</sup>	AA; Typical
<b>Mechanical Properties</b>			
<b>Hardness, Brinell</b>	95	95	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
<b>Hardness, Knoop</b>	120	120	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Hardness, Rockwell B</b>	40	40	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Hardness, Vickers</b>	60	60	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Tensile Strength, Ultimate</b>	107	107	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Tensile Strength, Yield</b>	310 MPa	45000 psi	AA; Typical
<b>Elongation at Break</b>	276 MPa	40000 psi	AA; Typical
<b>Modulus of Elasticity</b>	12 %	12 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
<b>Poisson's Ratio</b>	17 %	17 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
<b>Charpy Impact</b>	68.9 GPa	10000 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
<b>Shear Modulus</b>	324 MPa	47000 psi	2.5 cm width x 0.16 cm thick side-notched specimen, Kt = 17.
<b>Electrical Properties</b>			
<b>Electrical Resistivity</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Thermal Properties</b>			
<b>CTE, linear 20°C</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>CTE, linear 250°C</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F

<b>CTE, linear 500°C</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Specific Heat Capacity</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Thermal Conductivity</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Melting Point</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Solidus</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Liquidus</b>	3.99e-006 ohm-cm	3.99e-006 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
<b>Processing Properties</b>			
<b>Solution Temperature</b>	529 °C	985 °F	
<b>Aging Temperature</b>	160 °C	320 °F	Rolled or drawn products; hold at temperature for 18 hr
<b>Aging Temperature</b>	177 °C	350 °F	Extrusions or forgings; hold at temperature for 8 hr

### **Aluminum 6061-T6; 6061-T651**

Most of the data in MatWeb has been supplied directly by the manufacturers. Other data has been taken from similar materials and known relationships by the MatWeb staff. For more information about this specific material, see the following source(s):

Information provided by The Aluminum Association, Inc. from **Aluminum Standards and Data 2000** and/or **International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys** (Revised 2001).

**Metals Handbook**, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.

**Structural Alloys Handbook**, 1996 edition, John M. (Tim) Holt, Technical Ed; C. Y. Ho, Ed., CINDAS/Purdue University, West Lafayette, IN, 1996.

**Metals Handbook**, Howard E. Boyer and Timothy L. Gall, Eds., American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.

## ANEXO B – GENERAL PURPOSE HIGH-SPEED STEEL JOBBERS' DRILL BITS

### HSS Jobber Drills

- HSS works well in free-cutting and carbon steels, as well as with soft nonferrous materials like aluminum, brass, bronze and copper
- Oxide coating aids in wear resistance and chip flow
- 118° Point allows for quick penetration
- 135° Split Point offers self-centering and prevents "walking"



High-speed steel combined with ideal reach, drilling depth, and rigidity make these bits highly versatile.

**Uncoated (bright finish)** bits are for use on carbon steel, aluminum, copper, brass, bronze, and plastic. **Black-oxide** bits are for use on steel, stainless steel, and cast iron. Black-and-gold-oxide bits are for use on steel, stainless steel, aluminum, copper, and plastic. **Long-life TiN** (titanium nitride) coated bits last longer than black-oxide and black-and-gold-oxide bits. For use on alloy steel, stainless steel, cast iron, brass, bronze, plastic, and fiberglass. **Extra-life TiCN** (titanium carbonitride) coated bits last longer than long-life TiN-coated bits.

**135° Point Angle** – Perform better than 118° point angle bits on hard materials and produce smaller chips to prevent clogging. They also have a split point that keeps the bit centered without a pilot hole and meet NAS 907 Type B aerospace specifications, unless noted.

**118° Point Angle** – Metric-size 118° point angle bits are made to DIN length specifications.

## ANEXO C – CNC VERTICAL MACHINING CENTER HAAS VF-2

Vertical Machining Center; 30" x 16" x 20" (762 x 406 x 508 mm), 40 taper, 30 HP (22.4 kW) vector drive, 8100 rpm, inline direct-drive, 20-station carousel tool changer, 1000 IPM (25.4 m/min) rapids, power-failure detection module, 1 GB program memory, 15" color LCD monitor, USB port, memory lock keyswitch, rigid tapping and 55-gallon (208 liter) flood coolant system.

Figura C1 – Máquina-ferramenta CNC Haas



Fonte: Site do fabricante, Haas Automation Inc<sup>®</sup>.

## ANEXO D – GUIDELINES FOR DRILLING

### FEED and SPEED - Viking Drill and Tool

*"Different drilling conditions make it impossible to develop any rigid rules for feeds and speeds."*

The following tables contain guidelines which can be utilized when **drilling standard materials**. Also, the following **"rules of thumb"** can be used to determine proper feeds and speeds for drilling ferrous materials (**NOTE:** varying conditions can easily require adjustments ).

● **Feed equals:**

.001" per revolution for every 1/16" of drill diameter, plus or minus .001" on the total.

● **Speed equals:**

80 surface feet per minute in 100 Brinell hardness material and the speed should be reduced 10 surface feet per minute for each additional 50 points Brinell hardness.

● **Feed and speed rates:**

should be **reduced up to 45-50%** when drilling holes deeper than **4 drill diameters**.

#### Feeds and Speeds - Formulas

**R.P.M.** = (3.8197 / Drill Diameter) x **S.F.M.**

**S.F.M.** = 0.2618 x Drill Diameter x **R.P.M.**

**I.P.M.** = I.P.R. (feed) x **R.P.M.** (speed)

**Machine Time** (seconds) = (60 x Feed minus Stroke) / **I.P.M.**

<b>R.P.M.</b> = Revolutions Per Minute	<b>I.P.R.</b> = Inches Per Revolution
<b>S.F.M.</b> = Surface Feet Per Minute	<b>Feed Stroke</b> = Drill Depth + 1/3
<b>I.P.M.</b> = Inches Per Minute	<b>Car Reamer</b> = 1/2 Speed of Drill

#### Recommended Feeds of Various Diameter Drills

Diameter of Drill - Inches	Feed Inches per Revolution
Under 1/8	.001 to .003
1/8 to 1/4	.002 to .006
1/4 to 1/2	.004 to .010
1/2 to 1 inch	.007 to .015
1 inch and over	.015 to .025

## Recommended Speeds for Standard Materials with H.S.S. Drills

Material	Recommended speed (sfm)
Aluminum and its Alloys	200-300
Brass and Bronze (Ordinary)	150-300
Bronze (High Tensile)	70-150
Die Casting (Zinc Base)	300-400
Iron-Cast (Soft) -Cast (medium hard) Hard Chilled Malleable	75-125 50-100 10-20 80-90
Magnesium and its Alloys	250-400
Monel Metal or High-Nickel Steel, Stainless Steel	30-50
Plastics or Similiar Materials	100-300
Steel Mild .2 carbon to .3 carbon Steel .4 carbon to .5 carbon Tool 1.2 carbon Forgings Alloy - 300 to 400 Brinell	80-110 70-80 50-60 40-50 20-30
High Tensile (Heat Treated)	(Consult your material supplier)