

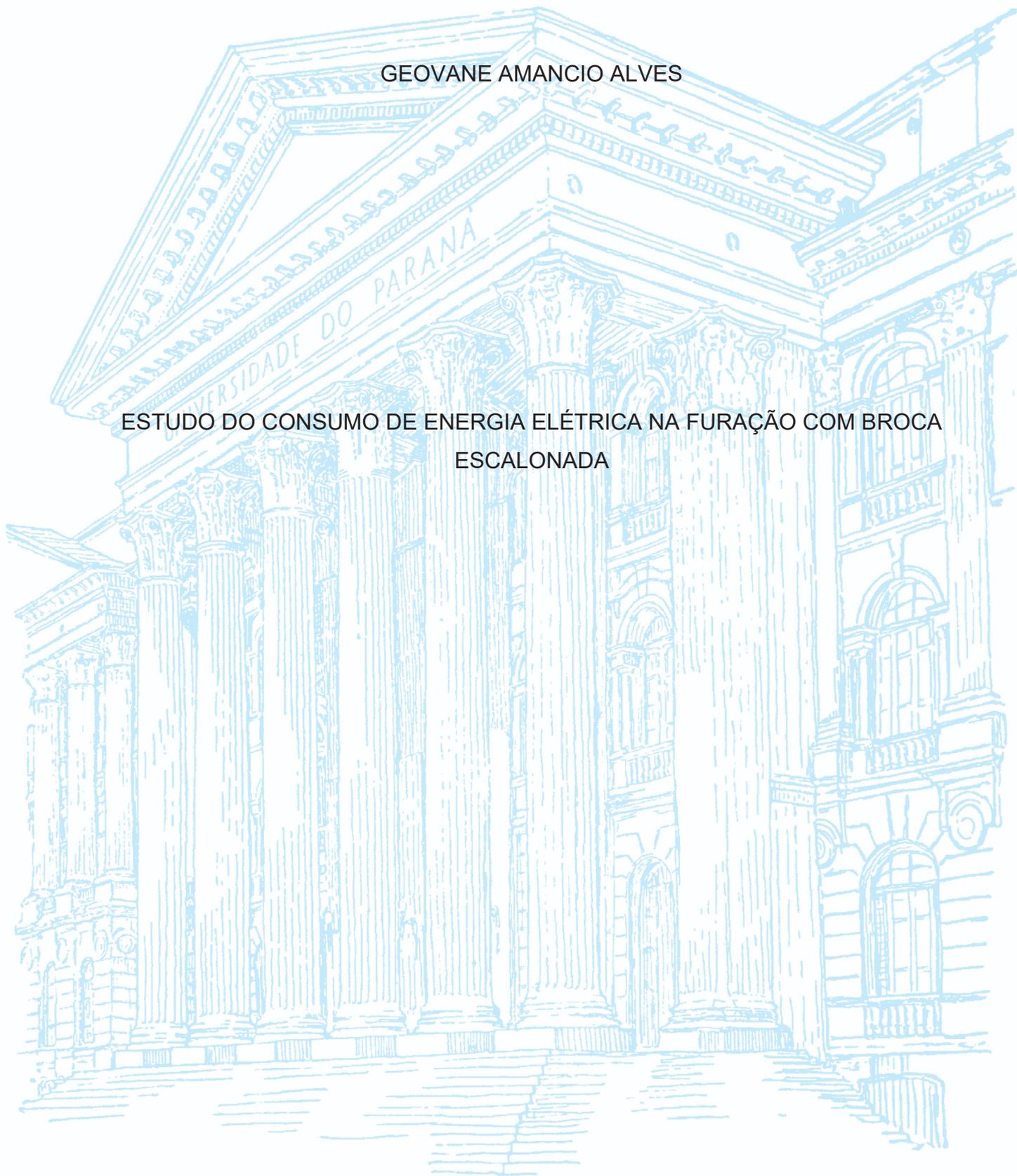
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GEOVANE AMANCIO ALVES

ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA FURAÇÃO COM BROCA
ESCALONADA

CURITIBA

2022



GEOVANE AMANCIO ALVES

ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA FURAÇÃO COM BROCA
ESCALONADA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre, do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Prof. Orientador: Dr. Dalberto Dias da Costa
Prof. Coorientador: Dr. Claudimir José Rebeyka

CURITIBA

2022

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A474e Alves, Geovane Amâncio

Estudo do consumo de energia elétrica na furação com broca
escalonada [recurso eletrônico] / Geovane Amâncio Alves – Curitiba, 2022.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia para
obtenção do título de mestre e Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Claudimir José Rebeyka

1. Energia elétrica - consumo. 2. Manufatura. I. Costa, Dalberto Dias
da. II. Rebeyka, Claudimir José. III. Universidade Federal do Paraná. IV.
Título.

CDD 621.312

Bibliotecária: Vilma Machado CRB-9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GEOVANE AMANCIO ALVES** intitulada: **ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA FURAÇÃO COM BROCA ESCALONADA**, sob orientação do Prof. Dr. DALBERTO DIAS DA COSTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 16 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica
19/12/2022 10:32:40.0
DALBERTO DIAS DA COSTA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
19/12/2022 10:22:12.0
RODRIGO DIAS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TUIUTI DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
26/01/2023 18:14:28.0
CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
19/12/2022 09:56:04.0
CLAUDIMIR JOSÉ REBEYKA
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Dedico esta pesquisa a minha mãe **Marcília Ramos Alves** minha referência, conselheira e melhor amiga, sempre do meu lado me incentivando a ser uma pessoa melhor e nunca desistir dos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e forças para seguir nesta trajetória e finalizar este desafio, sempre me guiando e me mostrando o melhor caminho.

Agradeço minha esposa Francielle Daniel Alves e minha filha Isabella Daniel Alves, por me apoiarem nesta etapa da minha vida, sempre estando ao meu lado, me incentivando e compreendendo minha ausência em diversos momentos para me dedicar a esta pesquisa. “Amo vocês”.

A empresa Robert Bosch Limitada na figura dos Srs. Alfredo Bocchi Barbalho, Guillermo Meister Filho, Guilherme Otaviano, Fabricio Roepcke, Mozarte Reck, José Alexandre Carrari, Emilio Andres Agramunt Bassa, Emanuel Vitor Ceccon, Renato Grotoli, Allan Suplicy, Jairo Muller Wolf, Guilherme Maurilio da Silva Littig Mugnaini, Claiton Correa de Oliveira, Fabricio Konrad Vozniack, Edilson Rodrigues Santos, Paulo Celso Smockovicz Barros, Fabio Silveira, Rafael Orlatei, Leandro Ribeiro Juski, Celso da Cruz Camargo, Willian Astolpho, Lucio Mainardes, Elizeu Americo e demais colegas que me deram todo o apoio, auxilio e incentivo para realização desta pesquisa. “Muito Obrigado”.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) e departamento de Engenharia de Manufatura (PPGEM) pela oportunidade de realização deste curso.

Ao Prof. Dr. Milton Luiz Polli e Me. Moises Izaias de Santana da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo empréstimo do dinamômetro e todo auxilio com a coleta de dados, criação do dispositivo de fixação e corpos de prova.

Ao Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel pelas instruções e *feedbacks* no desenvolvimento da pesquisa, também a contribuição com seus conhecimentos enriquecendo este trabalho.

Ao Prof. D.Sc. Rodrigo Dias que me incentivou a iniciar o curso de mestrado e esteve ao meu lado me apoiando e motivando em toda esta trajetória.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Claudimir José Rebeyka que fez parte da minha formação e me ajudou no desenvolvimento da pesquisa e artigos publicados.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa pela valiosa ajuda, orientação, auxilio nas análises e interpretações dos dados. Também pelo apoio em todo o desenvolvimento desta pesquisa, mais que um orientador um amigo e conselheiro, estando sempre disposto e motivado para que este estudo acontecesse. “Muito Obrigado”.

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir”

Albert Einstein

RESUMO

A broca escalonada é largamente utilizada na indústria devido a sua capacidade de furar múltiplos diâmetros em apenas um movimento de avanço. Obviamente, isto implica em elevada produtividade. Entretanto, esse processo é, ainda, pouco pesquisado e o número de pesquisas diminui quando se incorpora a essa temática a questão da eficiência energética. O baixo número de pesquisas sobre esse assunto foi o elemento motivador para o desenvolvimento desta dissertação. O objetivo principal do presente trabalho foi investigar se existe uma diferença significativa na furação com uma broca escalonada quando comparada à usinagem do mesmo furo com brocas separadas. Além disso, valores de torque foram medidos nos testes realizados com a broca escalonada sob diferentes condições de corte (rotação e avanço). Todos os experimentos foram realizados em um centro de usinagem (marca Haas, modelo VF-2SS) com corpos de prova de aço ABNT 1020 e brocas com dois diâmetros confeccionadas em metal duro revestido. A potência elétrica foi medida com um analisador digital (marca Fluke, modelo 434) instalado no painel da máquina e também próximo ao motor do eixo árvore. O torque foi medido por meio de um dinamômetro piezoelétrico (marca Kistler, modelo 9272). A partir dos resultados obtidos, pôde se observar que tanto a rotação quanto o avanço influenciam diretamente o consumo de energia. Quanto à comparação entre as duas técnicas de furação, conclui-se que a furação com a broca escalonada é muito produtiva, mas o seu consumo de energia não foi significativamente mais baixo, quando comparado à furação com brocas separadas, sob as condições de corte utilizadas.

Palavras-chave: Broca Escalonada. Energia Elétrica. Furação.

ABSTRACT

The step drill is widely used in industry due to its ability to drill multiple diameters in just one feed motion. Obviously, this implies a high level of productivity. However, this process is still understudied, and the number of studies drops when the issue of energy efficiency is added into this theme. The scarcity of research on this topic was a driving factor for the development of this dissertation. The primary goal of this study was to see if there is a significant difference between drilling with a step drill and machining the same hole with separated drills. Torque values were also measured in tests performed with the stepped drill under various cutting conditions (rotation and feed). All experiments were carried out in a machining center (Haas brand, model VF-2SS) using ABNT 1020 steel specimens and coated carbide drills with two diameters. A digital analyzer (Fluke brand, model 434) installed on the machine panel and close to the spindle motor was used to measure the electrical power. A piezoelectric dynamometer (Kistler brand, model 9272) was used to measure torque as well. According to the results, both the rotation and the feed have a direct influence on the energy consumption. In terms of comparing the two drilling techniques, it was observed that while drilling with a stepped drill is very productive, its energy consumption was not significantly lower when compared to drilling with separated drills under the cutting conditions used.

KeyWords: Step Drill. Electric Energy. Drilling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NUMERO DE PUBLICAÇÕES ENCONTRADAS NA BUSCA.....	16
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DE PESQUISA	17
FIGURA 4- DIAGRAMA SISTEMÁTICO DE UM CENTRO DE USINAGEM CNC	21
FIGURA 5 - ESQUEMA ELÉTRICO CENTRO DE USINAGEM 3 EIXOS	21
FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS PERDAS EM UM MOTOR	26
FIGURA 7 - TIPOS DE FURAÇÃO	27
FIGURA 8 - PARTES DA BROCA HELICOIDAL.....	28
FIGURA 9 - BROCAS DE PERFIL ESCALONADO E COM CHANFRO.....	30
FIGURA 10 - BROCA DE PERFIL ESCALONADO COM 3 DIÂMETROS	31
FIGURA 11 - BROCA SUBLAND	32
FIGURA 12 - MOVIMENTO DA FERRAMENTA E DA PEÇA.....	33
FIGURA 13 - GRANDEZAS DE CORTE BROCA HELICOIDAL DE 2 GUMES	34
FIGURA 14 – FORÇAS ATUANTES NA ARESTA DA BROCA.....	35
FIGURA 15 - FORÇA DE AVANÇO E MOMENTO TORÇOR	37
FIGURA 16 - FORMAÇÃO DE CAVACO NA BROCA HELICOIDAL.....	39
FIGURA 17 - PRINCIPAIS ÂNGULOS DE UMA BROCA HELICOIDAL.....	43
FIGURA 18 - ESQUEMA PARA MONITORAMENTO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ...	47
FIGURA 19 - DINAMÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE FORÇA DE CORTE	51
FIGURA 21 - CENTRO DE USINAGEM HASS VF-2SS.....	53
FIGURA 22 – DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO (A) E CORPOS DE PROVA (B).....	54
FIGURA 23 - DIMENSÃO DO FURO	54
FIGURA 24 – BROCA ESCALONADA UTILIZADA NO ESTUDO.....	55
FIGURA 27 - INSTALAÇÃO DINAMOMETRO E FIXAÇÃO CORPOS DE PROVA.....	58
FIGURA 28 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	58
FIGURA 29 – ENSAIO COM BROCA ESCALONADA	61
FIGURA 30 – ENSAIO MULTIPLAS FERRAMENTAS.....	62
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE PARA A TÉCNICA DE FURAÇÃO COM BROCAS SEPARADAS, COM ROTAÇÃO EM 1000 RPM E AVANÇO DE 0,07MM/V	72
FIGURA 32 – VARIAÇÃO DA FORMA DO CAVACO EM DIFERENTES ESTÁGIOS DA FURAÇÃO, COM ROTAÇÃO EM 1000 RPM E AVANÇO DE 0,07MM/V	74

FIGURA 33 – VARIAÇÃO DO TORQUE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE PARA OS TRÊS AVANÇOS E DIFERENTES ROTAÇÕES. (A) 1200 RPM; (B) 1400 RPM; (C) 1600RPM.....	77
FIGURA 34 – VARIAÇÃO DO TORQUE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE PARA AS TRÊS ROTAÇÕES E DIFERENTES AVANÇOS. (A) 0,05 MM/V; (B) 0,075 MM/V; (C) 0,1 MM/V.....	78
FIGURA 35 – ENERGIA DE CORTE PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE ROTAÇÃO (N) E AVANÇO (F)	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE (μc) PARA DIFERENTES MATERIAIS.....	47
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO CENTRO DE USINAGEM HASS VF-2SS	55
TABELA 3 - VALORES ADOTADOS NO EXPERIMENTO.	64
TABELA 4 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA ENERGIA DE CORTE.....	78
TABELA 5 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA ENERGIA ELÉTRICA.....	80

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - QUANTIDADE DE DOCUMENTOS ENCONTRADOS NAS BASES	15
QUADRO 2 - DIVISÕES DO OEE.....	19
QUADRO 3 - FORMAS DE CAVACO NO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM 2020	12
GRÁFICO 2 - GRÁFICO DE CONSUMO DE ENERGIA EM RELAÇÃO AO TEMPO EM UM CENTRO DE USINAGEM CNC.....	23
GRÁFICO 3 - PERFIL DE ENERGIA EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO.....	42
GRÁFICO 4 - COMPARATIVO POTÊNCIA EIXO-ÁRVORE x PAINEL GERAL COM ROTAÇÃO EM 1000 RPM E AVANÇO DE 0,07MM/V	66
GRÁFICO 5 - COMPARATIVO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA COM ROTAÇÃO EM 1000 RPM E AVANÇO DE 0,07MM/V	67
GRÁFICO 6 - VARIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES ROTAÇÕES.....	70
GRÁFICO 7 - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA	71
GRÁFICO 9 - ENERGIA ELÉTRICA ATIVA REGISTRADA NAS DUAS TÉCNICAS DE FURAÇÃO, COM ROTAÇÃO EM 1000 RPM E AVANÇO DE 0,07MM/V	74

LISTA DE SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AlCrN	-	Nitreto de cromo e alumínio
BEN	-	Balanco Energético Nacional
BTA	-	<i>Boring Trepanning Association</i>
CNC	-	Controle Numérico Computadorizado
IEA	-	International Energy Agency
IROG	-	Índice de Rendimento Operacional Global
Labusig	-	Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Paraná
MF	-	Máquina-Ferramenta
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
UTFPR	-	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PBE	-	Prática Baseada em Evidências
PPGEM	-	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Manufatura
RI	-	Revisão Integrativa
RPM	-	Rotação por minuto
MQL	-	<i>Minimum Quantity Lubrication</i>
OEE	-	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
SEC	-	<i>Specific Energy Consumption</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

D	-	Diâmetro maior ou na periferia da broca
dF_{ij}	-	Variável da seção da ponta da broca
dM_{ij}	-	Variável da seção da ponta da broca
F	-	Força em N
F_c	-	Força de Corte
F_f	-	Força de Avanço
F_p	-	Força Passiva
i	-	Variável do perfil de afiação da broca
M_t	-	Momento Torçor
N	-	Newton
n	-	Rotação da ferramenta
nf	-	Número de arestas da broca
$P_{auxiliar}$	-	Potência auxiliar
P_c	-	Potência de corte
P_{idle}	-	Potência ociosa

LISTA DE UNIDADES

m	-	Metro
mm	-	Milímetro
min	-	Minuto
m/min	-	Metro por minuto
mm/volta	-	Milímetro por volta
rpm	-	Rotações por minuto
µm	-	Micrômetro
°C	-	Graus Celsius
%	-	Porcentagem
pç	-	Peça
N	-	Newton
Nm	-	Newton metro
m/s	-	Metros por segundo

LISTA DE ABREVEATURAS

A/D	-	Analógico/Digital
Me	-	Mestre
Dr.	-	Doutor
Eng.	-	Engenheiro
<i>et al.</i>	-	<i>And others</i>
PhD	-	<i>Doctor of Philosophy</i>
Pr.	-	Pastor
Prof.	-	Professor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	15
2.2	EFICIÊNCIA NOS PROCESSOS PRODUTIVOS	17
2.2.1	As seis grandes perdas de Nakajima	18
2.3	CONSUMO DE ENERGIA EM MÁQUINA-FERRAMENTA.....	19
2.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA.....	23
2.4.1	Perda de energia motor elétrico	25
2.5	PROCESSO DE FURAÇÃO.....	26
2.6	BROCA HELICOIDAL	27
2.7	BROCA ESCALONADA	29
2.8	BROCA ESCALONADA COM HELICES INDEPENDENTES	31
2.9	MOVIMENTO DO PROCESSO DE FURAÇÃO	32
2.10	GRANDEZAS DE CORTE.....	33
2.11	FORÇAS ATUANTES NO PROCESSO DE FURAÇÃO	34
2.12	FORÇA DE USINAGEM.....	35
2.13	FORÇA DE CORTE (F_c).....	35
2.14	FORÇA DE AVANÇO (F_f)	35
2.15	FORÇA PASSIVA (F_p).....	36
2.16	MOMENTO TORÇOR (M_t)	36
2.17	POTÊNCIA DE CORTE (P_c)	37
2.18	CAVACO NO PROCESSO DE FURAÇÃO	38
2.18.1	influência do cavaco no consumo de energia do processo de furação	40
2.19	CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	41
2.20	INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E MATERIAL DA BROCA SOBRE O CONSUMO DE ENERGIA.....	42
2.21	FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	44
2.22	ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	45

2.23	MEDIÇÃO DE ENERGIA EM MÁQUINA-FERRAMENTA.....	46
2.24	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA.....	46
2.25	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA	49
2.25.1	Multimedidores de Grandezas elétricas:	50
2.25.2	Dinamômetro	50
2.25.3	Sensores	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	MÁQUINA-FERRAMENTA, CORPOS DE PROVA, FERRAMENTA E INSTRUMENTAÇÃO.....	53
3.2	INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO	56
3.2.1	Instalação do analisador de energia FLUKE 434	56
3.2.2	Instalação do dinamômetro.....	57
3.2.3	Ensaio com a broca escalonada.....	58
3.2.4	Ensaio com brocas separadas	59
3.2.5	Planejamento fatorial para análise da energia consumida na furação com broca escalonada	60
3.2.6	Medição de potência com variação de rotação	62
3.2.7	Cálculo da energia consumida	62
4	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	66
4.1	POTÊNCIA ELÉTRICA EM DIFERENTES ESTÁGIOS DA FURAÇÃO	65
4.2	INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO SOBRE A POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA....	70
4.3	ENERGIAS CONSUMIDAS EM DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE FURAÇÃO.....	71
4.4	INFLUÊNCIAS DA ROTAÇÃO E DO AVANÇO SOBRE A ENERGIA DE CORTE.....	75
4.5	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NA FURAÇÃO COM BROCA ESCALONADA	79
5	CONCLUSÕES	80
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS.....	83
	APÊNDICE 1 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA ENSAIOS BROCA ESCALONADA	90
	APÊNDICE 2 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA ENSAIOS MULTIPLAS FERRAMANTAS	91

APÊNDICE 3 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA ENSAIOS A VARIÇÃO DE ROTAÇÃO	92
APÊNDICE 4 – DESENHO CORPO DE PROVA.....	93
APÊNDICE 5 – DESENHO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO CORPO DE PROVAS	94
APÊNDICE 6 – GRÁFICOS DE POTÊNCIA DE CORTE, POTÊNCIA ELÉTRICA, FORÇA E MOMENTO TORÇOR N1200 E F50,75 E 100	95
APÊNDICE 7 – GRÁFICOS DE POTÊNCIA DE CORTE, POTÊNCIA ELÉTRICA, FORÇA E MOMENTO TORÇOR N1400 E F50,75 E 100	96
APÊNDICE 8 – GRÁFICOS DE POTÊNCIA DE CORTE, POTÊNCIA ELÉTRICA, FORÇA E MOMENTO TORÇOR N1600 E F50,75 E 100	97

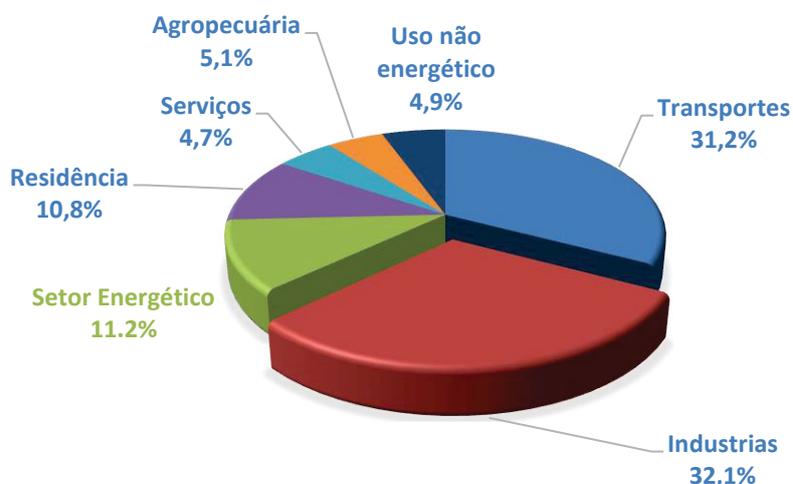
1 INTRODUÇÃO

Os setores industriais do mundo têm um alto consumo de energia elétrica, isso se deve à grande expansão das indústrias de transformação, principalmente as químicas, mineradoras, siderúrgicas, petroquímica, e a produção de máquinas e equipamentos BEN (2021). Este consumo de energia poderá ter um aumento de 40% até 2040, tal como previsto pela IEA (*International Energy Agency*) (2021). Entretanto, a maior parte da energia elétrica produzida e consumida no mundo não provem de fontes renováveis causando um grande impacto ambiental, exceto o Brasil que tem 65,2% advinda da geração hidráulica (BEN, 2021). A expansão e a diversificação de fontes renováveis no Brasil cresceram exponencialmente nos últimos anos e deverão representar 86% da geração de energia elétrica no país até 2024 (GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2021).

O Brasil tem uma população de aproximadamente 213.993.437 e apresenta um consumo de energia elétrica 2,620 *quilowatts* por pessoa por ano, atualmente em 69º no *ranking* do consumo mundial per capita (EPE, 2020).

Como pode-se observar no Gráfico 1, do consumo total de energia no Brasil em 2020 o setor industrial liderou o ranking com 32,1% (BEN, 2021). Este consumo de energia causa um grande impacto ambiental, gerando preocupação com a sustentabilidade (WYSOKIÁ,KA-SENKUS, 2019).

GRÁFICO 1 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM 2020



Fonte: Adaptado de Ben (2021).

Em diversas indústrias percebe-se que um dos principais problemas são os altos custos de fabricação, o que se torna um ponto estratégico, na área da manufatura, o estudo da eficiência energética (ZHU *et al.*, 2019).

O estudo da eficiência energética no processo de usinagem é um tema que vem sendo explorado pelo setor industrial, buscando-se reduzir estes custos de fabricação. Segundo Schudeleit *et al.* (2016) a melhoria da eficiência energética poupa recursos naturais e diminui os custos de produção, possibilitando a fabricação de bens mais baratos e competitivos, aumentando o desempenho econômico das empresas.

Ainda, segundo a Agência Internacional de Energia IEA:

A eficiência energética é a única fonte de energia que todo país do mundo tem em abundância, pois uma forte política de eficiência energética leva a resultados políticos que reduzem os gastos do estado em prol da redução da poluição e da proteção ambiental IEA (2021).

Para Hameed *et al.* (2016) inúmeras pesquisas têm mostrado que a eficiência energética dos processos de usinagem é muito baixa, geralmente inferior a 30%. A furação faz parte do grupo de processos de fabricação por usinagem de geometria definida, sendo um dos processos mais utilizados na manufatura e uma das primeiras operações de usinagem executadas na história. Junto com o torneamento, a furação é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem e é responsável por um grande consumo de energia industrial (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016).

De acordo com Wang *et al.* (2019) as análises de estudos voltados para o consumo de energia elétrica se concentram principalmente no torneamento ou fresamento, e existem poucas pesquisas de energia para a furação e quando se trata da broca escalonada não existem estudos do ponto de vista energético. Diante disso, torna-se premente realizar estudos do consumo de energia elétrica durante o processo de furação, principalmente com broca de perfil escalonado que tem o objetivo de obter alta produtividade e possibilitar a usinagem de furos de múltiplos diâmetros com o mesmo movimento de avanço (ASTAKHOV, 2014).

Este trabalho está organizado como segue:

- No Capítulo 1: Introdução e Objetivos.
- No Capítulo 2: Revisão bibliográfica.
- No capítulo 3: Métodos.
- No capítulo 4: Resultado e Discussões.
- No capítulo 5: Conclusões.

No capítulo 1: apresenta-se a introdução ao tema, motivação para realização da pesquisa, objetivos principais e os objetivos específicos que serão tratados/desenvolvidos neste trabalho.

No capítulo 2: realizar-se-á uma ampla revisão bibliográfica em artigos, teses e livros que tratam dos assuntos desenvolvidos neste trabalho e os que permeiam o tema desenvolvido.

No capítulo 3: apresenta-se os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios.

No capítulo 4: apresenta-se os resultados e discussões encontrados.

No capítulo 5: apresentam-se as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo do consumo de energia elétrica no processo de usinagem de furos com múltiplos diâmetros utilizando broca escalonada, por meio da análise da potência elétrica na manufatura de uma mesma operação.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos com relação a este trabalho são:

- Comparativo da potência elétrica em diferentes estágios da furação;
- Análise da influência da rotação sobre a potência elétrica ativa;
- Análise das energias consumidas em diferentes estratégias de furação;
- Estudo da Influências da rotação e do avanço sobre a energia de corte;
- Análise da energia elétrica consumida na furação com broca escalonada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para a presente pesquisa foi realizada uma Revisão Integrativa (RI) da literatura, um dos métodos utilizados na Prática Baseada em Evidências (PBE). A RI é entendida como um tipo de revisão de natureza complexa, que demanda métodos normatizados e sistemáticos para garantir o necessário rigor requerido na pesquisa científica e a legitimidade das evidências estabelecidas (SOARES *et al.*, 2014).

Pela RI é possível a inclusão de estudos experimentais e não experimentais para a análise profunda do tema de pesquisa de forma amplificada, sendo desenvolvida em seis etapas: 1. a determinação da questão a ser pesquisada; 2. a definição de critérios de inclusão e exclusão para a busca na literatura; 3. o estabelecimento de informações a serem extraídas dos estudos; 4. a análise dos estudos incluídos; 5. a interpretação dos resultados; 6. e a síntese de dados de relevância.

Para desenvolvimento dessa pesquisa buscou-se referenciais de autores nacionais e internacionais, com suas pesquisas publicadas nas bases de dados: *Scopus*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Google Scholar*. Para tanto, utilizou-se a combinação das palavras-chave conforme Quadro 1, com o objetivo de realizar uma análise da quantidade de artigos publicados voltados para o consumo de energia elétrica nos processos de manufatura. Para cada nível foi utilizado uma palavra-chave que corresponde a cada tipo de usinagem, no nível 1 utilizou-se a palavra *machining*, nível 2 *turning*, nível 3 *milling*, nível 4 *Drilling* e por fim nível 5 *Step Drilling*.

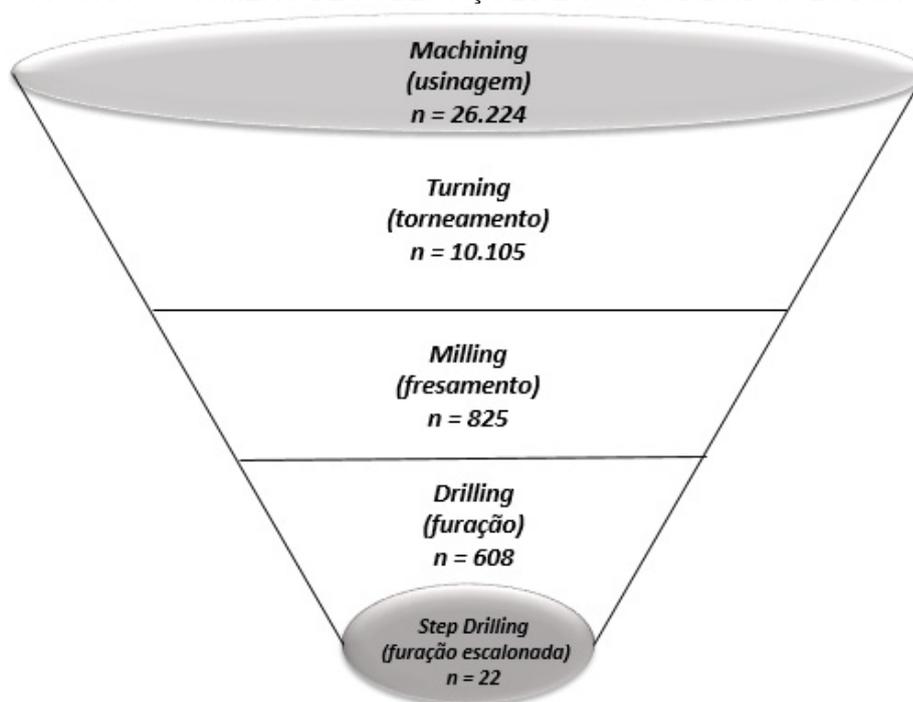
QUADRO 1 - QUANTIDADE DE DOCUMENTOS ENCONTRADOS NAS BASES DE DADOS

Nível	Palavras-chave	Scopus	Science Direct	Web of Science	Google Scholar	Total
1	energy AND efficiency AND eletric AND machining OR energy AND eletric AND consumption AND machining	52	46	10.226	15.900	26224
2	energy AND efficiency AND eletric AND turning OR energy AND consumption AND eletric AND turning	48	50	4.801	5.206	10105
3	energy AND efficiency AND eletric AND milling OR energy AND consumption AND eletric AND milling	62	54	307	402	825
4	energy AND efficiency AND Drilling AND eletric OR energy AND eletric AND consumption AND Drilling	31	36	233	308	608
5	energy AND efficiency AND Drilling AND Step Drill AND eletric OR energy AND consumption AND Step Drilling AND eletric	3	8	6	5	22

Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com o Quadro 1 quando realizado a pesquisa pelas combinações de palavras-chave utilizando *Drilling* temos um resultado do somatório das bases de 608 artigos, este número reduz quando realizado a busca com *Step Drill* ou *Step Drilling*, como ilustra a Figura 1.

FIGURA 1 – NUMERO DE PUBLICAÇÕES ENCONTRADAS NA BUSCA



Fonte: Autoria própria (2022).

Após a busca dos documentos nas bases de dados foram analisados os 630 artigos voltados para furação (somatório de 608 *Drilling* e 22 *Step Drilling*) e realizados os seguintes filtros:

- i) Pesquisas publicadas de 2015 a 2021;
- ii) Remoção artigos repetidos;
- iii) Alinhamento dos títulos em relação à pesquisa realizada e exclusão dos que não apresentavam relação com a pesquisa.
- iv) Leitura dos resumos e alinhados de acordo com a pesquisa.

A Figura 2 ilustra o fluxograma de como foi realizada a seleção dos artigos. Para gerenciamento dos periódicos foi utilizado o programa *Mendeley Desktop*.

FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DE PESQUISA



Fonte: Autoria própria (2022).

Após toda a análise chegou-se ao número de 45 documentos alinhados com o tema da pesquisa, todavia, somente 5 eram sobre broca escalonada no processo de usinagem e nenhum sobre consumo de energia elétrica com broca escalonada. Isso motivou a realização desta pesquisa.

Além da pesquisa nos periódicos científicos os livros clássicos da área de usinagem e manuais técnicos dos instrumentos foram adicionados no decorrer do trabalho.

2.2 EFICIÊNCIA NOS PROCESSOS PRODUTIVOS

As empresas buscam a melhoria contínua em seus processos produtivos eliminando os desperdícios, de tal forma que seus recursos sejam utilizados ao máximo (JURKO, 2011; LOTT, 2011).

As empresas buscam 100% de Índice de Rendimento Operacional Global (IROG) o que é considerado a perfeição em termos de produção, fabricando apenas peças boas, o mais rápido possível e sem tempo de parada, todavia, este número é

utópico pois em todo processo há perdas. (LEAN PRODUCTION, 2022). Os índices em torno de 85% de IROG é um padrão de classe mundial para fabricantes (JURKO, 2011; LOTT, 2011), e é considerado um valor ideal, porém a maioria das plantas industriais dispõe de índices em torno dos 60%, o que indica que há espaço substancial para melhorias (ROTONDARO, 2002). Não é incomum para empresas de manufatura que estão apenas começando a rastrear e melhorar seu desempenho de manufatura, encontrar valores de IROG na faixa dos 40%. É uma pontuação baixa e, na maioria dos casos, pode ser facilmente melhorada por meio de medidas diretas de monitoramento e controle de perdas (LEAN PRODUCTION, 2022).

2.2.1 As seis grandes perdas de Nakajima

De acordo com Guinato (1996) classificam-se as perdas em seis grandes grupos que são eles: a) Perdas por Quebra; b) Perdas por Setup e Regulagens; c) Perdas por Ociosidade e Pequenas Paradas; d) Perdas por Redução de Velocidade; e) Perdas por problemas de qualidade e retrabalhos; f) Perdas por Queda de Rendimento. Ainda segundo Ohno (1997) seis grandes perdas dos equipamentos estão associadas aos três índices que formam o cálculo do IROG. Onde: quebra, falhas, *Setup* e regulagens fazem parte do índice de disponibilidade, as perdas associadas à performance são paradas com tempo inferior a três minutos e perda no ritmo produtivo, enquanto o índice de qualidade é composto pelas perdas por peça rejeitada. O índice de disponibilidade representa a relação existente entre o tempo total disponível do equipamento, dependendo do período de análise que pode ser diário, semanal ou mensal, também chamado de tempo de carga, com o tempo em que o equipamento efetivamente ficou em operação (COSTA, 2014). O tempo de carga resulta da diferença entre o tempo de jornada de trabalho e tempo de paradas programadas pela produção representada por manutenções programadas, manutenções preventivas, limpeza do equipamento, intervalo, treinamentos, entre outros (CHISTÉ, 2012).

O indicador *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), sigla referente a Efetividade Global do Equipamento, é um indicador de extrema importância para as indústrias de manufatura, uma vez que ele aponta o real nível de eficiência dos equipamentos. O Quadro 2 ilustra a divisão do OEE, todas estas perdas tem relação com o consumo de energia, pois uma máquina que não está produzindo é um grande

disperdício tanto de energia quanto de recursos sendo assim problema com o custo agregado do produto manufaturado.

QUADRO 2 - DIVISÕES DO OEE

		Tempo Total				
OEE = Disponibilidade * Performance * Qualidade	Disponibilidade = B / A	A	Tempo programado para produzir		Horário não planejado	Horário não alocado
		B	Tempo produzindo	Perdas de Disponibilidade: -Quebra de Máquina -Ociosidade -Setup	Horário de não responsabilidade da equipe de produção	Horário em que fábrica está com as portas fechadas
	Performance = D / C	C	Produção Teórica	Perdas de Performance: -Velocidade reduzida -Pequenas paradas		
		D	Produção Real			
	Qualidade = F / E	E	Boas + Ruins	As Grandes Perdas de Produção		
		F	Boas		Perdas de Qualidade: -Refugos de Partida -Refugos de Produção	

Fonte: TECNOLOGIA (2022).

2.3 CONSUMO DE ENERGIA EM MÁQUINA-FERRAMENTA

Na manufatura industrial, a matéria prima é transformada em produtos por meios de processos tecnológicos (LI *et. al.*, 2011). Esta transformação na maioria dos casos é realizada por máquinas-ferramenta (MFs) (SIHAG e SANGWAN, 2020). As MFs consistem em estruturas fixas e componentes moveis que possibilitam realizar atividades complexas, assim atendendo as especificações do produto a ser fabricado (ZEIN, 2012).

Com os anos o mercado passou a ter maior exigência em seus produtos e assim aumentar a complexidade de manufatura, com isso as MFs passaram por melhorias ligadas à tecnologia, como a introdução do comando numérico, assim automatizando o processo movimentando os eixos da máquina a partir de códigos, surgindo as máquinas comando numérico computadorizado (CNC) (SIHAG e SANGWAN, 2020), automatizando o processo de manufatura que até então era puramente mecânico e manual, trazendo benefícios como: aumento da repetibilidade das medidas a serem usinadas, realização da fabricação de geometrias complexas, melhor acabamento nos produtos, aumento de produtividade e redução de custo operacional (LI *et. al.*, 2011).

As MFs são compostas por vários componentes mecânicos e elétricos, para realizar as funções desejadas, elas transformam energia elétrica em energia mecânica e outras energias (SIHAG e SANGWAN, 2020), são responsáveis por uma grande parte do consumo de energia no setor industrial. A fonte de energia para o uso de MFs é exclusivamente a eletricidade (LI *et. al.*, 2011). Componentes elétricos em MFs são classificados em acionamentos elétricos, motor eixo-árvore, servo motores dos eixos lineares, sistema hidráulico, sistema de refrigeração e componentes auxiliares (ZEIN, 2012).

Do ponto de vista elétrico, MFs são sistemas complexos com diversos circuitos (LI *et. al.*, 2011). Segundo Yingjie (2014), para avaliar o consumo de energia elétrica é necessário decompor a MF em diversos perfis de consumo de energia em função da composição do sistema, dos modos de operação, do tipo de consumo constante/variável, dos componentes principais e das funções de movimento, como ilustra a Figura 3.

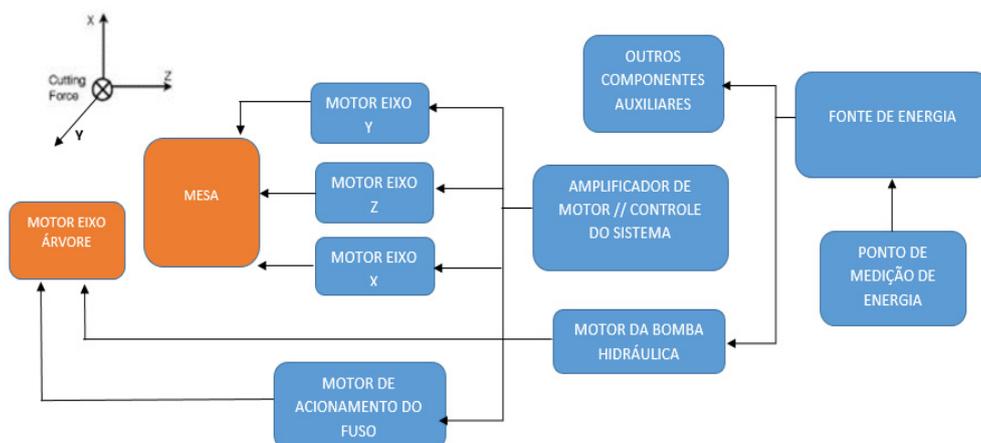
FIGURA 3 - DECOMPOSIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM MF



Fonte: Adaptado YINGJIE (2014).

Segundo Bi e Wang (2012), os fabricantes raramente especificam o consumo de energia de uma MFs, por conta da complexidade de realizar esta análise, de vários componentes elétricos e da quantidade de esforços que estes estarão expostos em trabalho. É ilustrado na Figura 4 o diagrama dos componentes elétricos de uma máquina-ferramenta.

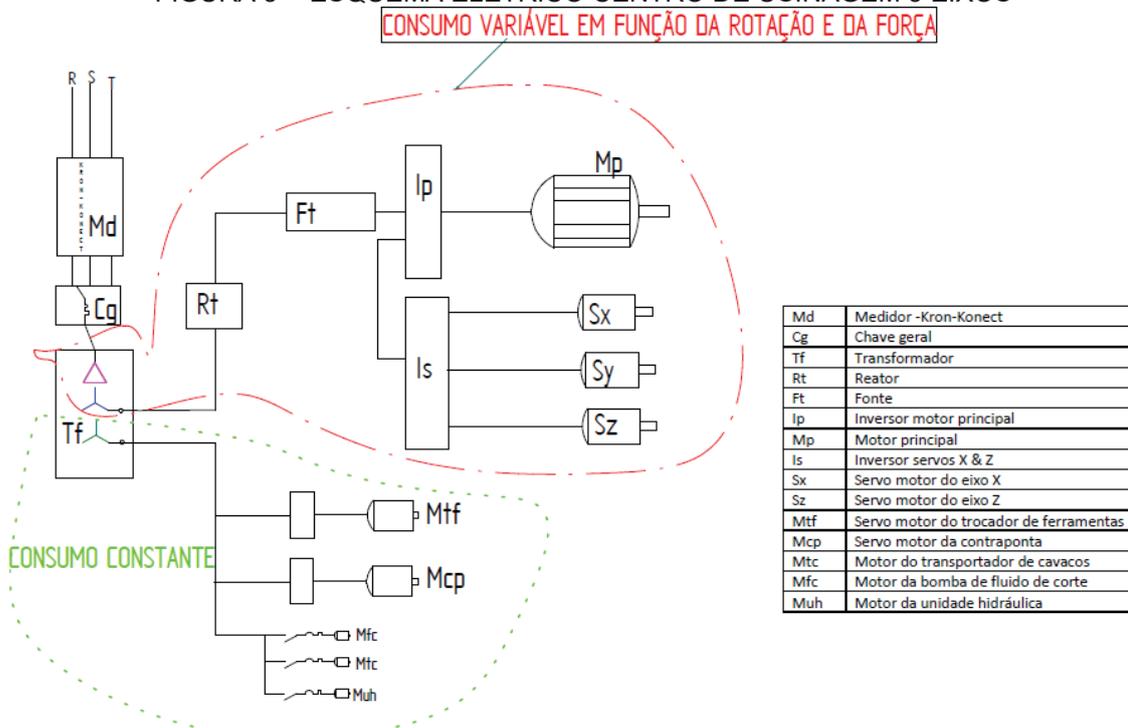
FIGURA 4 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM CENTRO DE USINAGEM CNC As MFs



Fonte: Adaptado Li e Kara (2011).

A análise do consumo de energia de uma MFs está diretamente ligada aos componentes que estão em funcionamento em um determinado intervalo de tempo (LI; KARA, 2011). A Figura 5 ilustra o esquema elétrico de um centro de usinagem com 3 eixos e uma divisão dos componentes que apresentam consumo de energia elétrica variável e constante.

FIGURA 5 - ESQUEMA ELÉTRICO CENTRO DE USINAGEM 3 EIXOS



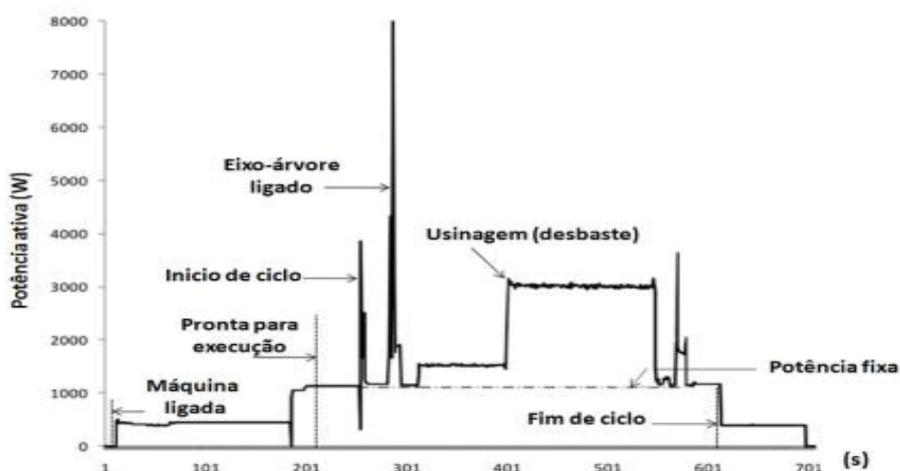
Fonte: Autoria própria (2022).

O consumo variável é atribuído ao processo de usinagem e aos componentes utilizados para execução, um exemplo é a aceleração e frenagem do eixo árvore e/ou variação da velocidade de corte (LI e KARA, 2011).

Já o consumo constante é atribuído aos componentes necessários para que a MF entre em execução de um processo, como por exemplo, motores e acionamentos, sistema hidráulico, sistema de lubrificação e sistema pneumático, entre outros (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016). Diferentemente das MFs convencionais, as máquinas CNC consomem energia em tempo de espera, o que afeta o consumo de energia em todo o ciclo produtivo, por isso a importância da realização de um estudo de consumo de energia.

Para determinar o consumo total de energia é necessário realizar uma avaliação minuciosa em vários fatores, como: tipo do processo, ferramenta, material a ser usinado, esforços de corte, refrigeração, componentes auxiliares entre outros (LI; KARA, 2011). No Gráfico 2 pode-se observar a variação da potência elétrica em um centro de usinagem CNC, quando a máquina está ligada a potência elétrica ativa é baixa, o que implica em um consumo de energia mais baixo, na sequência um leve aumento da potência com a preparação da máquina e início do ciclo, em seguida um pico de potência representando o início de giro do eixo-árvore tirando-o da inércia em um curto intervalo de tempo, após isso apresenta o corte do material, e pôr fim a desaceleração do eixo-árvore e final do ciclo.

GRÁFICO 2 - GRÁFICO DE CONSUMO DE ENERGIA EM RELAÇÃO AO TEMPO EM UM CENTRO DE USINAGEM CNC



Fonte: Adaptado LI e KARA (2011).

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA

Com o passar dos anos com as exigências propostas pelos governos para redução do consumo de energia, diversas indústrias pelo mundo realizam vários estudos para produzir seus produtos mantendo a qualidade consumindo menos energia. Zein (2012) define eficiência energética como sendo a redução da demanda de energia de produtos e serviços ou obter a mesma qualidade e mesmo produto final com menos energia disponível, a IEA (2021) considera a eficiência energética como a meta de reduzir a demanda energética de produtos e serviços, ou de obter a mesma qualidade e a mesma energia de uso final com um menor consumo de energia. Por exemplo, eficiência de conversão, demanda de energia teórica / energia realmente usada (PATTERSON, 1996).

O termo eficiência energética é universal e analisado de diferentes pontos de vista (WANG *et. al.*, 2019). Avaliar uma máquina ferramenta em termos de eficiência não é um assunto bem definido (SIHAG e SANGWAN, 2020), levando em consideração que há dificuldades para definir métricas confiáveis, pois as MFs têm vários componentes elétricos para realizar os movimentos desejados e para cada operação a energia consumida varia.

As características do processo de usinagem têm influência direta no consumo de energia em uma máquina ferramenta também o correto dimensionamento do equipamento em relação aos motores tem um papel importante. Segundo Jia *et. al.* (2021) no que diz respeito às condições de processos em MFs, a perda de energia está relacionada com a potência reativa a qual afeta a eficiência energética devido a não representar trabalho no produto final, como por exemplo, a energia consumida para se manter a MF ligada ou em modo de espera movimentos em vazio, aceleração e desaceleração dos eixos lineares e eixo-árvore. Perdas também ocorrem devido à inércia causada pela má qualidade de componentes mecânicos, operação das MFs e estratégias de produtividade (SIHAG e SANGWAN, 2020).

Segundo Liu (2013) a eficiência energética em MFs pode ser dividida em “eficiência energética de processo” em que é expressa a quantidade de peças produzidas dividido pela demanda de energia multiplicada pelo tempo, e “Eficiência energética instantânea”, que descreve a relação de potência de corte e a potência de entrada nas máquinas, representada na Equação 1,

$$N(t) = \frac{P_c(t)}{P_t(t)}. \quad (1)$$

Em que:

$N(t)$ = Função que define a eficiência energética instantânea,

$P_c(t)$ = Função que define a potência de corte,

$P_t(t)$ = Função que define a potência de entrada.

Em teoria, quando se busca minimizar o consumo de energia, busca se os candidatos a máximo/mínimo locais da função $\frac{d}{dt} \left(N(t) - \frac{P_c(t)}{P_t(t)} \right) = 0$, que seja um máximo ou um mínimo local a depender de como se olha para função objetivo (GUIDORIZZI, 2001). A partir do capítulo 2.18 deste trabalho mostra os fatores que influenciam a eficiência.

Em alguns estudos, utiliza-se o consumo específico de energia *Specific Energy Consumption (SEC)*, para realizar a avaliação do consumo de energia em máquinas ferramentas. A SEC é uma forma comum utilizada para estimar o consumo de energia e avaliar a eficiência energética cobrindo a relação entre a potência e o volume de material removido (LI e KARA, 2011). Como descreve a Equação 2,

$$SEC = \frac{\text{Demanda de Energia}}{\text{Volume do material}}. \quad (2)$$

Segundo Li e Kara (2011) *SEC* é definida como a energia necessária para remoção de 1cm^3 de material. Porém, após a criação desta equação, outros pesquisadores buscaram aprimorá-la incluindo outras variáveis dos componentes da máquina que dissipam energia, tais como a rotação do fuso, o sistema hidráulico e o sistema de refrigeração, tal como descrito por (SIHAG e SANGWAN, 2020).

A quantificação da eficiência energética é importante para analisar como a implementação de estratégias de economia de energia impactam o desempenho energético das máquinas-ferramenta (LI e KARA, 2011). É evidente que apenas uma pequena porcentagem do consumo total de energia é usada para remoção de material, enquanto uma parte significativa é consumida em operações auxiliares ou desperdiçada (JIA *et. al.*, 2021). A eficiência energética de um processo de usinagem

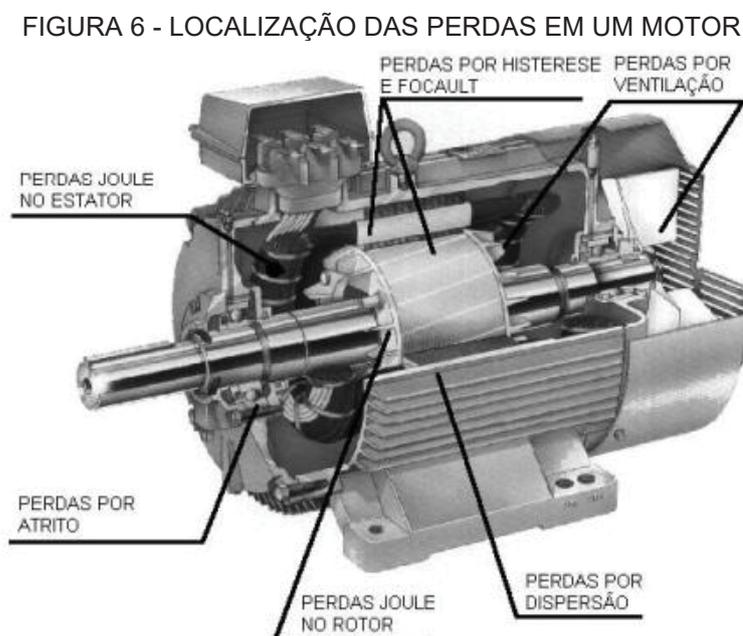
pode ser melhorada reduzindo o desperdício de energia e aumentando a porcentagem de energia de remoção de material (SIHAG e SANGWAN, 2020).

2.4.1 Perda de energia do motor elétrico

O motor é um conversor eletromecânico que, apoiado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica no eixo, quanto maior a rotação do eixo maior a energia elétrica consumida, porém esta conversão não é completa devido à existência das perdas que ocorrem no interior da máquina durante este processo. Para Bortoni (2007) as perdas energéticas estão relacionadas com o tipo de material utilizado e a tecnologia de fabricação dos motores e são determinantes no rendimento do motor e podem ser agrupada em quatro classes, conforme descritos a seguir:

- **Perdas por efeito Joule no estator:** As perdas por efeito Joule são as que ocorrem nos condutores do estator e do rotor pelo efeito da passagem da corrente. Para obter-se uma redução na perda Joule no estator pode-se aumentar a área transversal dos condutores de cobre do estator (DEL TORO, 1994).
- **Perdas no Ferro:** Para Bortoni (2007) as perdas no ferro são devidas às correntes parasitas (Foucault) e às perdas por histerese. Estas perdas variam com a frequência, e como no rotor a variação do fluxo é muito pequena, estas são desprezadas no mesmo, ficando as perdas no ferro restritas somente ao estator
- **Perdas por atrito e ventilação:** As perdas por atrito e ventilação ocorrem devido aos atritos nos mancais e à ventilação do motor, por isso dependem do tipo de mancal, da lubrificação, do sistema de ventilação, da velocidade de rotação e do estado de conservação do motor, no que diz respeito à limpeza do mesmo. São chamadas também de perdas mecânicas e geralmente em condições normais constituem a menor parcela de perdas em motores (LITMAN, 1990).
- **Perdas por dispersão em carga:** Incluem todas as perdas classificadas anteriormente e normalmente que crescem com o carregamento da máquina. Alguns dos fatores que são causadores de tais perdas são: o fluxo de dispersão, a distribuição não uniforme da corrente, imperfeições mecânicas e irregularidades no entreferro (AGAMLOH, 2005).

A Figura 6 apresenta o esquema de um motor de indução trifásico, com as perdas que ocorrem em seu interior.



Fonte: Bortoni (2007).

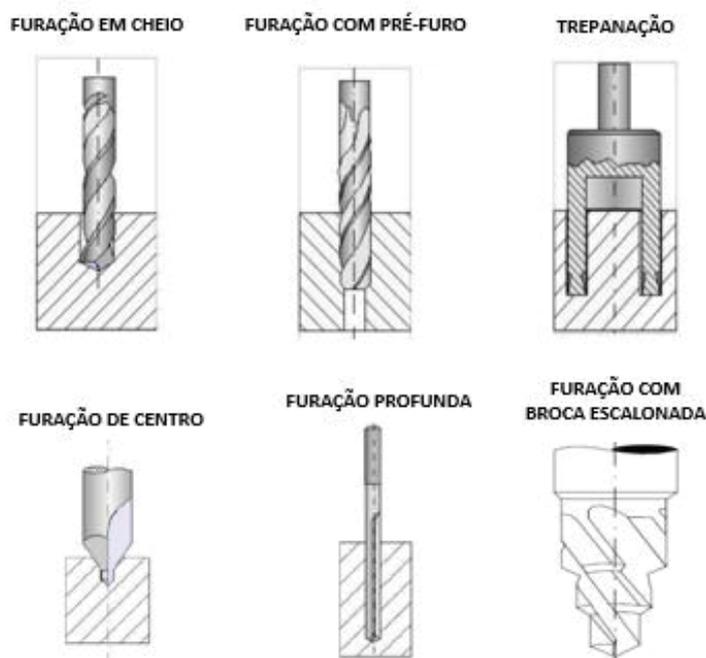
2.5 PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação consiste em um processo de usinagem de movimento circular, a ferramenta denominada broca contém movimento de avanço somente na direção do eixo de rotação (ASTAKHOV, 2014). A furação com brocas está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com arestas de geometria definida, ele é um processo muito importante na indústria manufatureira (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016).

Para Stemmer (2008), a furação é um processo que se destina a obter furos que são geralmente cilíndricos e obtidos a partir de ferramentas multicortantes. A ferramenta ou a peça gira e, simultaneamente, a peça ou a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea. O processo de furação é realizado sob condições relativamente severas, dentre as quais podem ser citadas: A velocidade de corte não é uniforme, variando de zero no centro do furo até máximo na periferia, há uma distribuição inadequada de calor na região de corte, ocorrendo assim atrito e desgaste

pronunciado nas quinas com cantos vivos (GROOVER, 2016). A Figura 7 ilustra os tipos de furação.

FIGURA 7 - TIPOS DE FURAÇÃO



Fonte: Adaptado de Din 8589 (2003).

2.6 BROCA HELICOIDAL

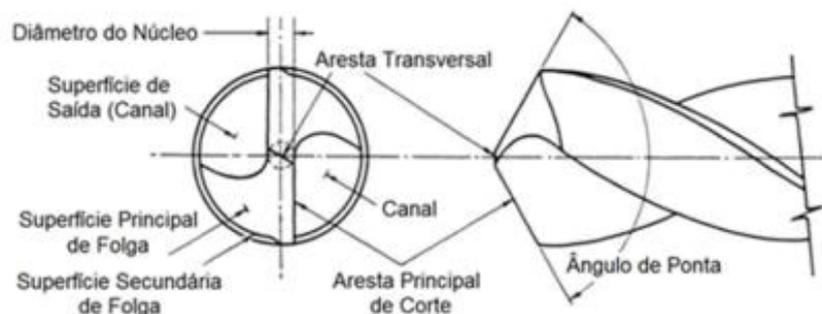
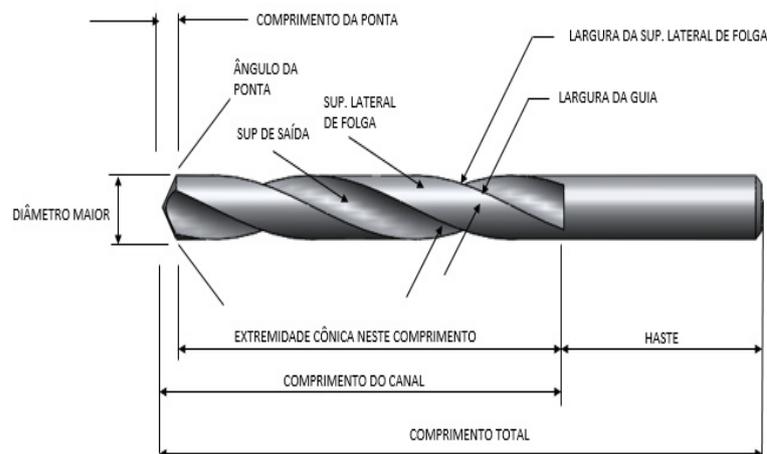
A broca do tipo helicoidal é a mais utilizada no processo de furação, segundo Groover (2016) as brocas helicoidais são amplamente utilizadas na indústria para produzir furos de forma rápida e econômica. Elas são as ferramentas mais utilizadas na execução de furos, seja na furação em cheio ou para aumentar o diâmetro de furos existentes (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002). Desde seu surgimento em 1820 a broca do tipo helicoidal teve várias alterações e estudos por ser a principal ferramenta do processo de furação.

- **Canais helicoidais:** são as superfícies de saída da ferramenta e são destinadas à remoção dos cavacos.
- **Arestas principal de corte:** as arestas agem diretamente no corte do material. As duas arestas principais de frente são paralelas entre si e, vistas de lado, formam o ângulo de ponta (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016).

- **Aresta transversal de corte:** é a aresta que une as duas arestas principais. Seu comprimento depende do diâmetro do núcleo (STEMMER, 1995).
- **Guias:** servem para diminuição do atrito da ferramenta com a parede do furo, reduzindo a superfície de contato e direcionando o trabalho da broca (DINIZ *et. al.*, 2006).
- **Haste:** tem a função de fixar a broca no porta-ferramentas, podendo apresentar-se na forma cônica ou cilíndrica (ASTAKOV, 2014) .
- **Núcleo:** confere rigidez à broca e possui espessura de aproximadamente $0,16D$ (DINIZ *et. al.*, 2006).

As partes de uma broca helicoidal são descritas na Figura 8.

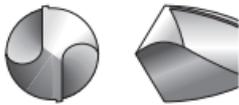
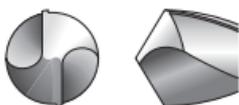
FIGURA 8 - PARTES DA BROCA HELICOIDAL



Fonte: Adaptado de Diniz *et. al.*, (2006)

De acordo com Agapiou (2016) a geometria da aresta de corte é muito importante para o processo de furação, para se obter um melhor desempenho e qualidade da manufatura. A Quadro 3 traz os tipos de afiação e seus efeitos.

TABELA 1 - FORMATO DAS ARESTAS DE CORTE

Tipo de afiação	Formato	Características e aplicações	Aplicação
Detalonado		<ul style="list-style-type: none"> O flanco é cônico e o ângulo de folga aumenta em direção ao centro da broca. 	<ul style="list-style-type: none"> Uso Geral
1 face		<ul style="list-style-type: none"> O flanco é reto. Fácil afiação. 	<ul style="list-style-type: none"> Principalmente para brocas de diâmetros pequenos.
3 faces		<ul style="list-style-type: none"> Como não há aresta transversal, resulta em alta força centrípeta e pequena majoração do furo. Requer máquina especial para afiação. Afiação das três superfícies. 	<ul style="list-style-type: none"> Para operações de furação que requerem alta precisão do furo e de posição.
Spiral point		<ul style="list-style-type: none"> A afiação cônica combinada à hélice variável para aumentar o ângulo de folga próximo ao centro da broca. Aresta transversal tipo S com alta força centrípeta e precisão de usinagem. 	<ul style="list-style-type: none"> Para furação que requer alta precisão.
Ponta curva		<ul style="list-style-type: none"> A aresta de corte é retificada radialmente com o intuito de dispersar a carga. Alta precisão de usinagem e rugosidade da superfície acabada. Para furos passantes, pequenas rebarbas na base. Requer máquina especial para afiação. 	<ul style="list-style-type: none"> Ferro Fundido, Ligas de Alumínio Para placas de ferro fundido. Aço
Center point		<ul style="list-style-type: none"> Esta geometria possui ângulo de ponta em dois estágios para melhor concentricidade e redução do choque na saída do furo. 	<ul style="list-style-type: none"> Para furação de chapas finas.

Fonte: Mitsubishi (2021).

2.7 BROCA ESCALONADA

Segundo Ferraresi (1972) e Agapiou, (2016), as brocas escalonadas são empregadas para produção em série, dependendo do número de degraus, da relação entre diâmetros e do comprimento de cada degrau, empregam-se diferentes construções normalmente direcionadas para o perfil e dimensões da furação desejada. A construção mais simples e mais conhecida é a broca escalonada com dois canais helicoidais, semelhante a broca helicoidal. Pode apresentar um ou mais degraus. Um detalhe importante, o diâmetro do núcleo deve ser o suficiente para garantir a resistência da broca no momento da operação.

A Figura 9 exemplifica alguns modelos de brocas de perfil escalonado, muito utilizados na indústria, porém como já mencionado o perfil de cada broca escalonada é desenvolvido de acordo com a necessidade do processo e da operação de manufatura (ASTAKHOV, 2014).

FIGURA 9 - BROCAS DE PERFIL ESCALONADO E COM CHANFRO



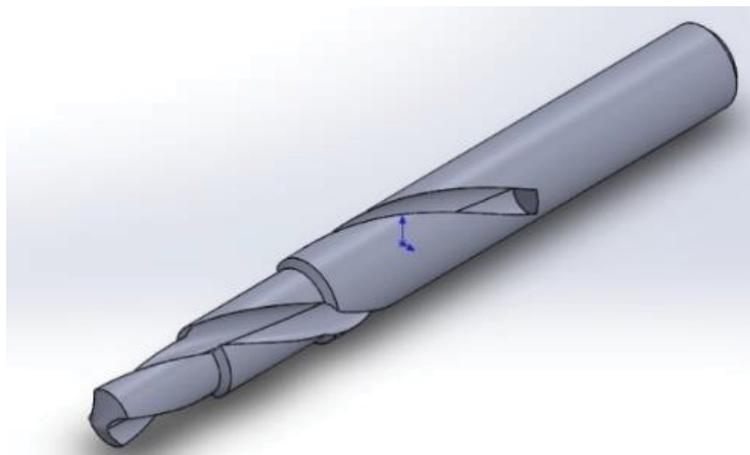
Fonte: SANDIVIK (2022).

As brocas com este perfil realizam a abertura de furos de dois ou mais diâmetros, o objetivo da furação escalonada é aumentar a produtividade realizando a usinagem de furos de múltiplos diâmetros, eliminando o tempo de parada para a troca de ferramentas. Pode-se empregar o processo de furação escalonada também quando existe a necessidade de rebaixos em peças para ocultar cabeças de parafusos ou porcas (FITZPATRICK, 2013). Quando utilizar uma ferramenta com vários diâmetros, o desafio é conseguir uma boa quebra de cavaco em todas as arestas em corte (ASTAKHOV, 2014). Em materiais produzem cavacos longos, como o aço com baixo teor de carbono e aços inoxidáveis os testes iniciais deverão ser feitos em etapas:

- i) Verificar a formação de cavaco na broca
- ii) Verificar a formação de cavaco na pastilha, ou diâmetro de escalonamento
- iii) Verificar a formação de cavaco na pastilha de chanfrar.

A Figura 10 mostra uma broca de perfil escalonado com 3 diâmetros.

FIGURA 10 - BROCA DE PERFIL ESCALONADO COM 3 DIÂMETROS



Fonte: Autoria própria (2022).

2.8 BROCA ESCALONADA COM HELICES INDEPENDENTES

Apesar de não haver uma distinção clara na norma ABNT NBR-ISO 5419, as brocas escalonadas podem ser classificadas em “escalonadas com hélices independentes” ou “escalonadas com mesmas hélices”. A broca escalonada com hélices independentes, denominada por *subland drill* na literatura inglesa, é, basicamente, a composição de uma, ou mais, brocas de diâmetros diferentes em uma única ferramenta, mas mantendo suas propriedades individuais, tais como os canais helicoidais. Por conseguinte, os cavacos formados nos diferentes diâmetros serão escoados pelos seus canais helicoidais próprios.

Por outro lado, nas brocas escalonadas com mesmas hélices, denominadas por *step drill* na literatura inglesa, o diâmetro menor termina nas arestas de corte do diâmetro seguinte e ambos compartilham os mesmos canais helicoidais. De acordo com Stephenson e Agapiou, 2016, além de possuir canais individuais para o escoamento dos cavacos, a broca do tipo *subland* mantém uma geometria consistente para todos os diâmetros, mesmo após sucessivas reafiações, o que propicia o prolongamento da sua utilização.

A Broca *Subland* não deve ser utilizada quando o diâmetro menor é inferior a 50% do diâmetro maior. A profundidade do furo não deve exceder 4 vezes o diâmetro menor, todavia, uma profundidade maior do furo pode ser alcançada retirando a ferramenta e avançado para melhor saída dos cavacos (RTS CUTTING TOOLS, 2002). A Figura 11 ilustra a broca *Subland*.

FIGURA 11 - BROCA SUBLAND



Fonte: RTS CUTTING TOOLS (2002).

2.9 MOVIMENTO DO PROCESSO DE FURAÇÃO

Segundo Astakov (2014) todos os movimentos, direções de movimentos e velocidades são definidos relativamente a peça. Os principais movimentos estão descritos neste tópico da dissertação.

- **Velocidade de avanço:** é a velocidade instantânea do movimento principal do ponto selecionado da aresta de corte em relação a peça. (STEMMER, 1995).
- **Velocidade de corte:** A velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta segundo a direção e sentido de corte, (FITZPATRICK, 2013). Conforme Equação 3,

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (3)$$

Em que:

V_c = Velocidade de corte [m/min],

D = Diâmetro maior ou na periferia da broca [mm],

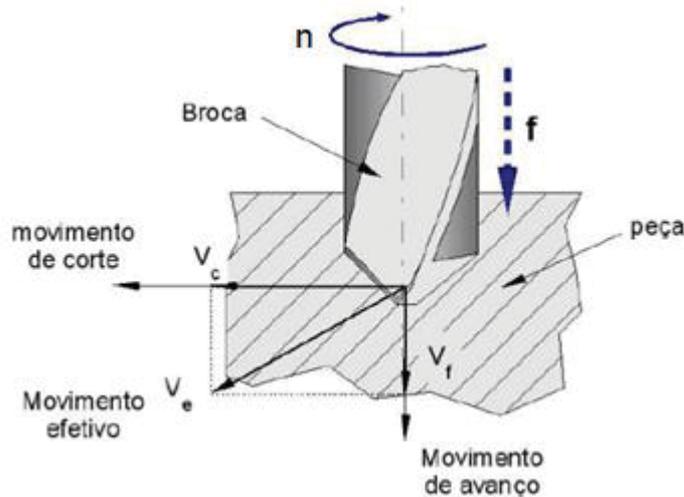
n = Velocidade do fuso [rotação por minuto (RPM)].

- **Movimento de avanço (f):** é o movimento produzido entre a peça e a ferramenta quando em conjunto ao movimento de corte, leva a remoção de material, (GROOVER, 2016).
- **Rotação (n):** é o movimento circular realizado pela ferramenta girando em torno de seu próprio eixo (MACHADO *et al.*, 2015).
- **Movimento resultante de corte:** é o movimento resultante dos movimentos de corte e avanço (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016).

- **Direção resultante de corte:** é a direção instantânea do movimento resultante de corte no ponto selecionado da aresta de corte em relação a peça. (ASTAKHOV, 2014).

A Figura 12 exemplifica os movimentos da ferramenta em relação a peça.

FIGURA 12 - MOVIMENTO DA FERRAMENTA E DA PEÇA



Fonte: Adaptado de Stemmer (1995).

2.10 GRANDEZAS DE CORTE

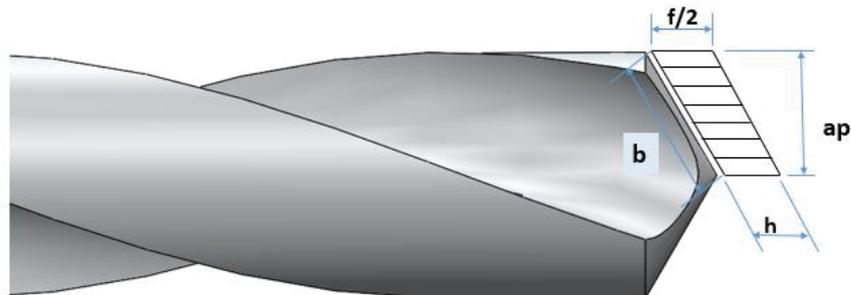
As grandezas de corte são aquelas que devem ser ajustadas na máquina, direta ou indiretamente, para que a ferramenta execute a retirada de cavacos. As grandezas de corte são:

- **Avanço (f)** - É o percurso de avanço em cada volta. Com o aumento do avanço, são obtidos cavacos de maior espessura. Assim, diminui a possibilidade de um enrolamento sobre o núcleo da broca. O avanço é limitado pela resistência estrutural da ferramenta e pela capacidade da máquina ferramenta. Na furação com avanços pequenos ocorre vibração pela falta de pressão suficiente ao corte, aumentando o atrito e a geração de calor (DINIZ *et. al.*, 2006).
- **Profundidade de corte (ap)** - A profundidade de corte é a profundidade de penetração do gume principal sobre a superfície da peça, medido perpendicularmente ao gume num plano que contém o eixo de rotação da ferramenta. Na furação em cheio corresponde à metade do diâmetro da broca (GROOVER, 2016).

- **Largura de usinagem (b)** - A largura de usinagem, na furação em cheio, corresponde ao comprimento de cada gume (MACHADO *et. al.*, 2015).
- **Espessura de usinagem (h)** - A espessura de usinagem é a espessura da seção de usinagem e é medida perpendicularmente ao gume, na direção de avanço. Na furação esta espessura depende do número de gumes cortantes e do ângulo de ponta da broca (FERRARESI, 1972).
- **Profundidade do furo-** é a distância em que a broca irá penetrar na peça. Para brocas helicoidais a profundidade máxima usual é de 10 diâmetros. A operação de furação pode ser realizada de uma só vez quando a profundidade do furo é de até no máximo 5 diâmetros. A partir deste valor, é necessário retirar a broca para a retirada dos cavacos e para a sua refrigeração. Relações profundidade/diâmetro maiores que 5 são consideradas furações profundas e merecem considerações especiais (FITZPATRICK, 2013).

A Figura 13 mostra as grandezas de corte na ponta de uma broca de afiação cônica.

FIGURA 13 - GRANDEZAS DE CORTE BROCA HELICOIDAL DE 2 GUMES



Fonte: Adaptado de Diniz *et. al.* (2006)

2.11 FORÇAS ATUANTES NO PROCESSO DE FURAÇÃO

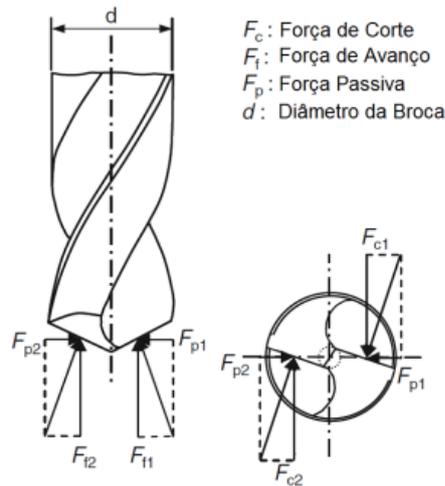
Segundo Astakov (2014) em qualquer trabalho de furação, para vencer o momento da torção e a força de avanço, verificam-se as seguintes características de resistências:

- Resistência devido ao corte do material, nas duas arestas principais de corte.
- Resistência devido ao corte e a extrusão (esmagamento) do material, na aresta transversal de corte.
- Atrito nas guias e atrito entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

2.12 FORÇA DE USINAGEM

Ela é a força resultante que atua na aresta de corte de uma ferramenta, durante a usinagem, como descrito na Figura 14.

FIGURA 14 – FORÇAS ATUANTES NA ARESTA DA BROCA



Fonte: Adaptado de Stemmer (1995).

2.13 FORÇA DE CORTE (F_c)

Corresponde à parcela da força de corte (F_c) que atua em cada um dos gumes cortantes e é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua na furação.

2.14 FORÇA DE AVANÇO (F_f)

A força de avanço (F_f) é a resultante da soma das parcelas das reações ao avanço do gume de corte e do gume transversal. É importante conhecê-la para se ter certeza que o eixo da máquina é capaz de suportar a operação. Ela pode ser calculada a partir da Equação 4. O cálculo das variáveis desta equação podem encontradas no livro de (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016).

$$F_f = \sum_{j=1}^{nf} \sum_{i=1}^N dF_{ij}, \quad (4)$$

Em que:

F_f = Força de avanço [N],

nf = Número de arestas da broca,

N = Número de divisões da ponta da broca,

dF_{ij} = Variável da seção da ponta da broca,

i = Variável do perfil de afiação da broca,

j = Variável do perfil de afiação da broca.

2.15 FORÇA PASSIVA (F_p)

Atua em uma parcela do gume principal. As forças passivas atuantes nos gumes tendem a se anular mutuamente. É desprezível quando comparada com as forças de corte e de avanço (atuando na direção radial). Contudo, para afiações assimétricas dos gumes ou mesmo em brocas não simétricas, tais como brocas canhão, Boring Trepanning Association (BTA) e Ejektor, essas são importantes (ASTAKHOV, 2014).

2.16 MOMENTO TORÇOR (M_t)

Resultado das forças atuantes nos gumes principais da ferramenta são responsáveis pelo momento torçor (ASTAKHOV, 2014) como é ilustrado na Figura 15. O momento torçor pode-se calcular a partir da Equação 5. O cálculo das variáveis desta equação podem encontradas no livro de (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016).

$$M_t = \sum_{j=1}^{nf} \sum_{i=1}^N dM_{ij}, \quad (5)$$

Em que:

M_t = Momento torçor [N.m],

nf = Número de arestas da broca,

N = Número de divisões da ponta da broca,

dM_{ij} = Variável da seção da ponta da broca,

i = Variável do perfil de afiação da broca,

j = Variável do perfil de afiação da broca.

2.17 POTÊNCIA DE CORTE (P_c)

A potência de corte é a resultante do produto entre o momento torçor e a velocidade angular da ferramenta, a Figura 15 ilustra a força e momento torçor atuantes na broca helicoidal. Há vários fatores que podem influenciar na força e potência de corte, tais como a velocidade de corte, dimensões de corte, ângulo de incidência, ângulo de saída, desgaste da ferramenta, material da ferramenta, dureza do material a ser usinado, microestrutura, encruamento e a temperatura da peça usinada, (ASTAKOV, 2014). Como descreve-se na Equação 6.

$$P_c = \frac{Mt \cdot n}{9,549} \quad (6)$$

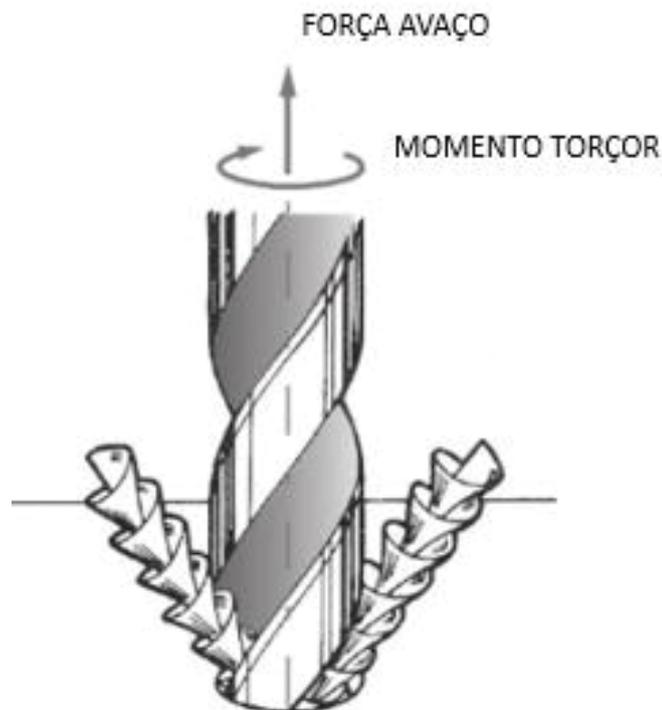
Em que:

P_c =Potência de corte [KW],

Mt = Momento torçor [N.m]

n = Rotação da ferramenta [rpm].

FIGURA 15 - FORÇA DE AVANÇO E MOMENTO TORÇOR



Fonte: Astakov (2014).

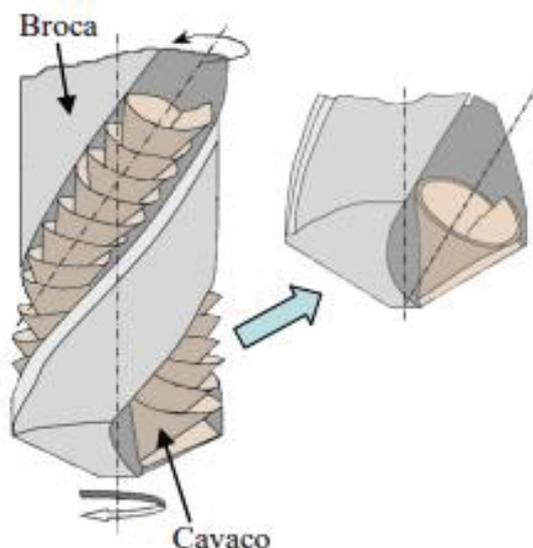
2.18 CAVACO NO PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação tem um processo de remoção de material complexo, e a alta temperatura e a tensão de cisalhamento concentrada nas zonas de cisalhamento tendem a influenciar as propriedades mecânicas do material (FITZPATRICK, 2013). Durante a formação do cavaco, a velocidade de corte e o ângulo de saída variam ao longo do gume da broca. Como resultado, uma complexa morfologia do cavaco é formada em diferentes etapas do processo (Li *et al.*, 2008).

Na furação, a formação do cavaco não está concluída quando o cavaco deixa o gume (DEGENHARDT *et al.*, 2005). Apesar de apresentar a forma inicial de cone espiral, o cavaco tende a ter sua forma alterada ao longo do processo, devido às interações com os canais da broca e a parede do furo. Quando os cavacos são inicialmente gerados, devido ao fato de a região próxima ao centro do gume se mover mais lentamente do que a região externa, o cavaco na região interna é mais curto do que o cavaco externo. Essa diferença no comprimento do cavaco força o fluxo para o centro da broca, em vez de perpendicular ao gume (BOEIRA *et al.*, 2009). Durante a transição de cavacos em espiral para a forma de fitas lamelares, existem alguns tipos de formas intermitentes, dependendo do material, espessura do cavaco e tamanho da broca (KE *et al.*, 2005; 2006).

Cavacos produzidos pelo processo de furação devem sair através dos canais helicoidais da broca. À medida que o furo é executado, os cavacos que não são removidos da hélice da broca tão rapidamente quanto são formados, devido ao aumento do coeficiente de atrito, podem levar ao entupimento do canal, que por sua vez, aumenta as forças resultantes e quebra da broca. Portanto, qualquer tentativa para quebrar o cavaco em pequenos pedaços, pode levar a uma melhor retirada (FITZPATRICK, 2013). A condição normalmente apresenta o corte principal do material sendo realizado pelos gumes da broca, e o escoamento do cavaco seguindo a trajetória helicoidal dos canais da ferramenta, como ilustra a Figura 16.

FIGURA 16 - FORMAÇÃO DE CAVACO NA BROCA HELICOIDAL



Fonte: Boeira *et al.* (2009).

A espessura do cavaco, que varia com o avanço, também tem uma grande influência na formação de cavacos. Com o aumento do avanço, que aumenta a espessura do cavaco, minimiza-se a possibilidade de obstrução dos canais da broca pelos cavacos enrolados. Um avanço máximo, no entanto, é limitado pela resistência da estrutura da broca e da capacidade da máquina. O ciclo pica-pau pode ser utilizado para a remoção de cavacos quando furos profundos são realizados, mas esta prática não é recomendada para a usinagem de materiais duros (KE *et al.*, 2005; 2006).

Na operação de furação, cavacos de tamanhos pequenos e bem quebrados são desejáveis. Isto porque, à medida que aumenta o tamanho dos cavacos, eles escoam com maior dificuldade através dos canais, o que aumenta os requisitos de torque, podendo causar a quebra da broca (BATZER *et al.*, 1998). Cavacos longos também podem ficar emaranhados em torno da broca, podem levar à má qualidade do furo, e são mais difíceis de serem geridos quando retirados do furo, aumentando assim os custos de produção e reduzindo a produtividade (DEGENHARDT *et al.*, 2005). Com isso, o sucesso de uma operação de furação depende muito da capacidade de produção de cavacos que podem ser rapidamente removidos do furo (BOEIRA *et al.*, 2009). O Quadro 4 ilustra as formas de cavaco no processo de furação.

QUADRO 3 - FORMAS DE CAVACO NO PROCESSO DE FURAÇÃO

Tipos de Cavacos	Formato	Características
Espiral Cônico		Cavacos com formato de espiral cônico são cortados pela aresta de corte e encurvados pelo canal. Este tipo de cavaco é produzido quando a taxa de avanço de um material nodular é pequena. Se o cavaco quebrar após inúmeras voltas, o desempenho de saída do cavaco é satisfatório.
Fita Longa		Este tipo de cavaco é gerado sem refrigeração. Ele se enrolará facilmente em volta da broca.
Leque		Este é um tipo de cavaco gerado pela restrição causada pelo canal da broca e a parede do furo usinado. É gerado quando a taxa de avanço é alta.
Segmento		Um cavaco cônico-espiral antes que alcance um grande comprimento no formato longo pela restrição causada pela parede do furo usinado devido à insuficiência de indutibilidade. Excelente eliminação e descarga de cavacos.
Zig-zag		Este cavaco é curvado e dobrado devido ao formato do canal e às características do material. Causa facilmente acúmulo de cavaco no canal.
Agulha		Este tipo de cavaco é quebrado pela vibração ou trepidação, e é encaracolado devido ao raio pequeno. O desempenho de expulsão é satisfatório, mas estes cavacos podem se acumular.

Fonte: Adaptado de Mitsubishi (2021).

O ciclo pica-pau e o avanço intermitente têm como objetivo influenciar a forma do cavaco e facilitar a retirada dos mesmos dos furos. Existem recomendações na literatura técnica e de fabricantes de máquinas-ferramentas para o ciclo pica-pau que dizem respeito à profundidade após a qual se dá início ao ciclo pica-pau. Geralmente efetua-se uma furação até uma profundidade de 3 a 4 vezes o diâmetro da broca, quando se interrompe o avanço e retira-se a ferramenta, transportando com isto os cavacos para fora do furo. Após esta profundidade de furação os ciclos pica-pau são repetidos para acréscimos na profundidade de 2 a 1 vez o diâmetro e 1 vez o diâmetro da ferramenta nas vezes subsequentes (KE et al., 2005; 2006).

2.18.1 Influência do cavaco no consumo de energia do processo de furação

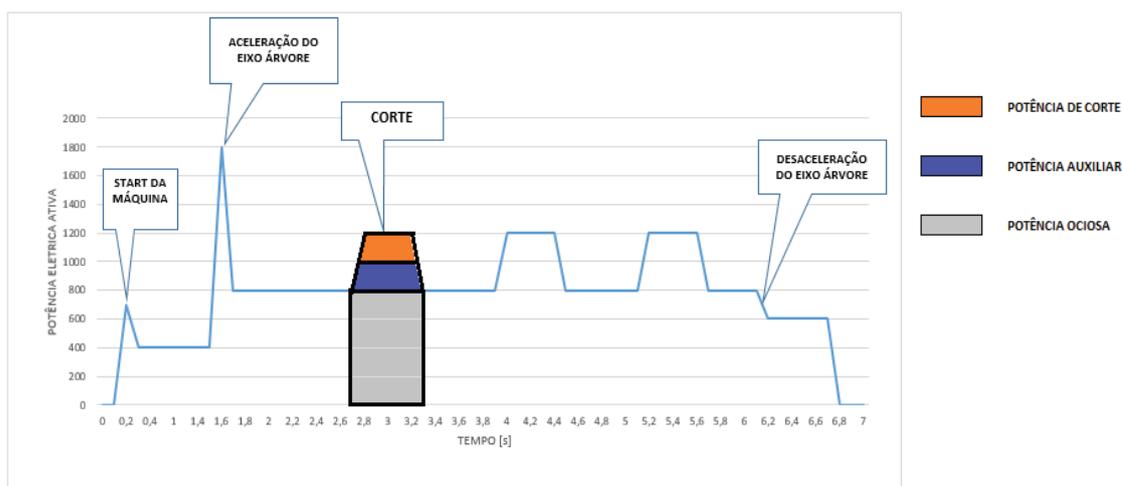
O formato do cavaco tem uma influência direta na eficiência energética do processo de furação, isso se deve ao atrito gerado entre a ferramenta e o material no momento da usinagem. Segundo Koklu e Coban (2020) o processo será suave desde que os cavacos sejam quebrados e fragmentados em pequenos pedaços. Entretanto, à medida que o cavaco fica maior, torna-se mais difícil a sua evacuação por meio das canaletas da broca, o que resulta em um maior torque e, por conseguinte, em um maior consumo de energia. Além disso, o cavaco do tipo contínuo, e na forma de fitas, demanda a utilização de um equipamento auxiliar para promover a sua quebra com o intuito de facilitar o seu transporte e armazenagem (ASTAKHOV, 2014).

2.19 CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FURAÇÃO

Segundo Jia *et. al.*, (2021) a furação é a principal tecnologia de processamento para o desbaste e semiacabamento de furos, entretanto, a sua eficiência é relativamente baixa, o que leva a enormes níveis de consumo de energia durante o processo.

De acordo com Wang *et. al.*, (2019) um processo de usinagem completo geralmente consiste em três estados operacionais: o estado de inicialização, o estado ocioso e o estado de usinagem. O Gráfico 3 mostra um perfil geral de consumo de energia para um processo de furação, o qual é composto por três operações de furação com condições de corte constantes, potência de corte, potência auxiliar e potência ociosa.

GRÁFICO 3 - PERFIL DE ENERGIA EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO



Fonte: Adaptado de Wang *et. al.* (2019).

Conforme visto nas seções anteriores, uma máquina ferramenta possui vários componentes. Entretanto, de acordo com o Gráfico 4 e como exemplifica a Equação 7, o consumo total de energia da máquina ferramenta pode ser dividido em:

- Potência auxiliar ($P_{auxiliar}$), é definido pelos componentes da máquina, também envolve o desempenho da máquina e processo de usinagem.
- Potência ociosa (P_{idle}), é definida como o consumo de energia que inclui apenas a rotação do fuso.
- Potência de corte (P_{corte}), é a resultante do produto entre o momento torçor, a velocidade angular da ferramenta e as perdas do motor.

Todas as potências da Equação 7 são dadas em Watts (W).

$$P_{total} = P_{corte} + P_{idle} + P_{auxiliar}. \quad (7)$$

A potência de corte pode ser otimizada de acordo com: geometria da broca e material, formação do cavaco, tipo e técnica de aplicação de fluido de corte, o material da broca, material da peça a ser usinada. As Potências auxiliares e ociosa variam de acordo com a estrutura de cada máquina pela energia elétrica consumida de cada componente.

O consumo de energia durante o processo de furação é causado pelo movimento relativo da ferramenta e material da peça. O acionamento rotativo e o acionamento de avanço são os principais modos desse movimento relativo. A modelagem de dois modos diferentes de movimento pode ser usada para calcular o consumo de energia de corte da broca durante a usinagem (STEPHENSON, DAVID A.; AGAPIOU, 2016).

2.20 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E MATERIAL DA BROCA SOBRE O CONSUMO DE ENERGIA

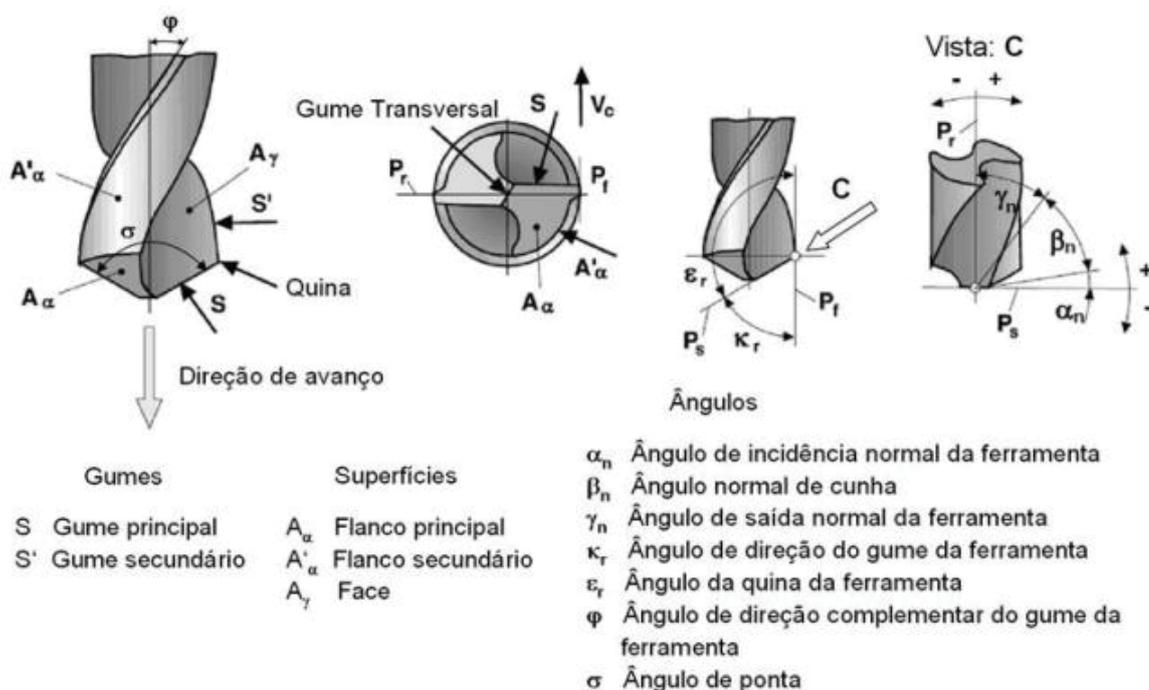
A geometria é a parte cortante da broca e é definida de acordo com a operação desejada, material a ser usinado, bem como pela qualidade do produto a ser fabricado. Ela tem uma grande influência no consumo de energia no momento da usinagem.

Segundo Boeira (2010) a geometria da ferramenta de corte exerce influência na usinagem dos metais, mas especificamente na forma da zona de deformação da peça, distribuição de tensão, temperatura e esforço de corte. A Figura 16 contém uma ilustração da geometria de broca helicoidal com afiação cônica.

- O ângulo de saída influi decisivamente na força e potência necessária ao corte, no acabamento superficial, no calor gerado na saída do cavaco e consequentemente no consumo de energia.
- Segundo Boeira (2010) a variação do ângulo da ponta da broca pode diminuir ou aumentar a espessura do cavaco e consequentemente aumentar ou diminuir o comprimento atuante do gume principal, elevar a resistência mecânica e dissipação de calor também tem influência na direção de saída do cavaco e nas forças atuantes na broca.

- O ângulo de incidência tem a principal função evitar o atrito entre a superfície de corte e o flanco da ferramenta e permitir que gume penetre no material, realizando o corte.
- A Figura 17 ilustra os principais ângulos de uma broca helicoidal.

FIGURA 17 - PRINCIPAIS ÂNGULOS DE UMA BROCA HELICOIDAL



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 3002-1 (2013) e Boeira *et al.* (2009).

A geometria da broca tem relação direta com o consumo de energia, isso devido os esforços que atuam nas arestas da ferramenta, sendo que o consumo de energia é diretamente proporcional à rotação e ao momento torçor, sendo este o produto da resultante da força de corte pelo diâmetro da broca, (ASTAKHOV, 2014).

De um modo geral, o material da ferramenta exerce influência sobre o consumo de energia, pois para cada par ferramenta-peça existe um coeficiente de atrito. Entretanto, a seleção do material da broca raramente é guiada pela eficiência energética, mas sim pela vida da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015). No caso específico de brocas uma alternativa interessante que vem sendo estudada é micro texturização de suas superfícies (FITZPATRICK, 2013). Embora isso não represente uma mudança de material, as micro texturizações alteram o coeficiente de atrito, o que conduz a reduções da força axial e do torque e, por conseguinte, reduz o consumo de energia durante o corte (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016). Em um estudo

conduzido por Niketh e Samuel (2018) sobre a furação de peças da liga Ti-6Al-4V, observou-se uma redução de 10.68% na força de avanço e de 12.33% no torque.

2.21 FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Fluidos de corte são largamente empregados nos processos de usinagem e têm como principais funções a lubrificação das superfícies da ferramenta e/ou o seu resfriamento. Quando a função de lubrificação é alcançada, observa-se uma redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e peça e entre a ferramenta e o cavaco, reduzindo-se assim os esforços de corte e, por conseguinte, a energia consumida (SALLES, 2001).

Na função de resfriamento não se observa uma influência direta sobre a energia consumida no corte, porém existe um efeito indireto que é o aumento da vida da ferramenta (CHINCHANIKAR *et. al.*, 2021). Isto conduz a um consumo menor de brocas para a produção de um determinado lote de peças, o que pode reduzir o consumo global de energia, quando se analisa toda a cadeia produtiva associada ao processo de furação.

Deve-se levar em consideração que 85% desses fluidos de corte são compostos por emulsões de óleo sintético / mineral (PEREIRA *et. al.*, 2019). Do ponto de vista econômico, sua utilização no setor automotivo implica em gastos entre 7 e 17% dos custos totais de fabricação, esses valores, no caso do setor aeronáutico, podem ser aumentados até atingir valores de 20-30% e seu tratamento de descarte supõe entre 2 e 4 vezes seu preço de compra (SHOKRANI, DHOKIA E NEWMAN, 2016).

No trabalho reportado por Khanna *et. al.*, (2021) foi realizado um estudo com o objetivo de avaliar a influência da aplicação, ou não, de fluido de corte sobre a eficiência energética e impacto ambiental no processo de furação de ligas de titânio. Os fluidos de corte analisados foram as emulsões (aplicadas por inundação) e o resfriamento por criogenia (CO₂ e N₂ líquidos). Segundo esses autores, a utilização de nitrogênio líquido teve um menor consumo de energia, menor impacto na saúde humana e uma redução do consumo de energia (CHINCHANIKAR; KORE; HUJARE, 2021). Isso é atribuída à alta quebra de cavacos resultante da fragilização do material, e reduz o comprimento de contato do cavaco da ferramenta, como também relatado

por (GROSS *et. al.* ,2019).

Ainda segundo Khanna *et. al.* (2021) a refrigeração por inundação apresenta menor eficiência energética em relação aos criogênicos devido a energia consumida pelo motor da bomba de circulação do refrigerante, pois esta energia não contribui diretamente no corte. No processo de refrigeração *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) observou melhor acabamento superficial, forças de corte mais baixas e, portanto, menor consumo de energia, maior vida útil da ferramenta com usinagem de nano fluido em comparação à usinagem a seco e usinagem com resfriamento por inundação.

A ausência de fluido de corte aumenta o atrito entre a interface ferramenta-cavaco na usinagem a seco, resultando em um valor mais alto de energia de corte, além disso, os cavacos mais longos observados para furação a seco resistem à evacuação devido ao atrito com superfície do furo. Isso resulta em maior torque e conseqüentemente maior consumo de energia na usinagem a seco (PEREIRA *et. al.*, 2016).

2.22 ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO

A energia específica de corte μ dado em $KW/(cm^3/min.)$ para furação é definida como a energia necessária para remover uma unidade de volume de material (cm^3). Esta definição é fundamental para se determinar e comparar o consumo de energia em diferentes condições de corte, como também na furação de diferentes materiais, tal como reportado por (KOKLU E COBAN ,2020) e (SIHAG E SANGWAN, 2020). Ela pode ser calculada dividindo-se as forças de usinagem pela área do cavaco ou como a razão entre a potência de corte e a taxa de remoção do material, (STEPHENSON, AGAPIOU, 2016) e (ASTAKOV, 2014).

As condições de corte (velocidade e avanço), a técnica e tipo de lubrificação/resfriamento, assim como a geometria e material da broca exercem influência direta na energia específica para a furação de um dado material de peça.

Sob condições idênticas de corte, os materiais podem ser classificados em função da energia específica de corte, tal como relacionado na Tabela 1.

TABELA 1 - ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE (μ_c) PARA DIFERENTES MATERIAIS

Material	u_c (kW/cm ³ /min)
Ferros fundidos	0,044-0,08
Aços ($0 < R_c < 45$)	0,065-0,09
Aços ($50 < R_c < 60$)	0,09-0,2
Aços Inoxidáveis	0,055-0,09
Ligas de magnésio	0,007-0,009
Titânio	0,053-0,066
Ligas de alumínio	0,012-0,022
Ligas refratárias (a base der Ni e Co)	0,09-0,15
Latão	0,056-0,07
Ligas de cobre ($R_b < 80$)	0,027-0,04
Ligas de cobre ($R_b < 80 < 100$)	0,04-0,057

Fonte: Adaptado de Stephenson e Agapiou (2016).

2.23 MEDIÇÃO DE ENERGIA EM MÁQUINA-FERRAMENTA

Nas MFs o consumo de energia é dinâmico que também é um fator que dificulta na avaliação. Para Li e Kara (2011) a potência ativa (energia real consumida pelo trabalho realizado) é a principal grandeza mensurada para diversos trabalhos de pesquisa.

2.24 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA

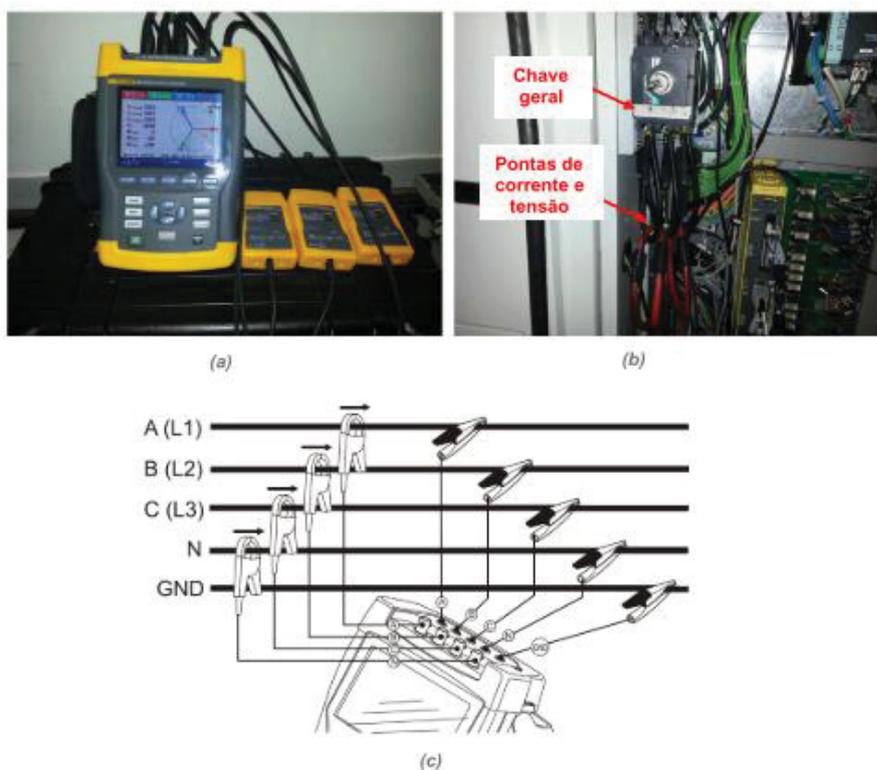
De acordo com LI (2015b) para medição de energia deve-se levar em consideração alguns pontos para se obter resultados satisfatórios como:

- Resolução de saída do instrumento de medição;
- Dados de potência ativa, potência aparente, potência reativa e fator de potência precisam ser gravados para avaliação posterior.
- A interface de comunicação, se houver, deve ser compatível com a resolução de amostragem de dados.
- O sistema de monitoramento deve processar grande quantidade de dados em tempo real;
- O sistema precisa ser portátil e de fácil instalação.

Para Pelegrino (2018) a demanda de energia foi medida usando um analisador de qualidade de energia, a conexão foi feita no painel elétrico da MF e constituindo

um sistema trifásico. Os valores da potência ativa e do consumo de energia foram adquiridos durante os testes. O analisador de qualidade de energia foi conectado nos cabos da chave geral da MF que estava desconectada da rede elétrica, conforme mostrado na Figura 18(b). As pontas de corrente e tensão foram conectadas à alimentação principal, obedecendo o fluxo de corrente fornecido a carga conforme Figura 18(c). A taxa de aquisição de dados é de 5 Hz (PELEGRINO, 2018). Os dados são salvos automaticamente no próprio analisador a cada teste executado, permitindo avaliação posterior.

FIGURA 18 - ESQUEMA PARA MONITORAMENTO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA



Fonte: Pelegrino (2018).

Para Li e Kara (2011), para estimar o consumo total de energia em torno CNC, *Colchester Tornado A50*, utiliza-se ferramentas como: *software Minitab15* e *Labview*, pinças de corrente *Fluke* conectadas no disjuntor principal da MF, obtendo os valores em tempo real da potência ativa, potência reativa e do fator de potência total.

Behrendt, Zein e Min (2012) desenvolveram uma metodologia de medição e uma peça padrão a ser usinada com o objetivo de avaliar a eficiência energética em MFs e, assim, identificar pontos comuns entre MFs distintas, neste caso, nove centros de usinagem. Em primeiro momento as MFs foram classificadas em pequenas,

médias e de grande porte, em função da área de trabalho disponível. Nos testes, cada periférico da MF foi ativado por três vezes para se ter uma medida confiável. O consumo do eixo-árvore foi medido aumentando a rotação a cada 10 segundos até o valor de 10.000 rpm. Os autores concluem que analisar a eficiência energética de MFs depende exclusivamente de uma metodologia padronizada, sendo que a mesma possa ser aplicada em diversas MFs de diferentes fabricantes para caracterizar a demanda de energia e assim determinar ações que possibilitem a melhoria do processo.

Guo *et. al.*, (2012) para realização dos experimentos de torneamento foram realizados em um torno CNC “Mori Seiki NL2000 / 500”. A fim de desenvolver o modelo de energia para esta máquina foram utilizados dois analisadores de energia (C.A.8335) foram usados no experimento de torneamento. Um dispositivo foi aplicado para medir a potência total da máquina, enquanto o outro foi usado para a medição da potência de processo, incluindo o fuso e as unidades de eixo. Os dados medidos foram adquiridos e visualizados através do *software* experimentos de torneamento foram realizados em aço (11SMnPb30) e alumínio (AlCuMgPb). Durante a usinagem de uma amostra a velocidade de corte foi adaptada descontinuamente (alterando a velocidade de rotação), enquanto o avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes.

Matumoto (2016) realizou a medição em um torno CNC e um torno convencional a fim de se analisar o consumo de energia nos dois casos tendo em vista que o torno CNC por ter vários componentes elétricos o gráfico de eficiência energética é diferente do convencional não tendo o tempo de espera. Para realizar os ensaios o autor utilizou 3 corpos de prova para cada experimento, para coleta dos dados se utilizou um cronometro para medição do tempo e um Wattímetro Kron modelo Mult-K 120. Para o estudo, foi adquirido somente os dados de potência ativa da máquina na frequência de 2 Hz, porém ele também possibilita a medição de outros parâmetros elétricos como a frequência, corrente e fator de potência. O wattímetro foi conectado diretamente na fonte de entrada de energia dos tornos, e a aquisição de dados referem-se aos dados globais de potência, não diferenciando cada motor da máquina, principalmente no torno CNC. Esses dados foram exportados através de uma interface RS485, e convertidos em um microcomputador através de um código implantado em Microsoft Visual Basic para a interpretação dos dados adquiridos (MATUMOTO, 2016).

Os autores Kant & Sangwan (2015) buscaram em sua pesquisa o monitoramento de energia utilizando rede neural, com foco na energia de corte eles conduziram os experimentos de fresamento para facear na peça de aço carbono médio com diâmetro de 24 mm, ferramenta de metal duro com 3 canais em ambiente de corte a seco. Um centro de usinagem CNC com potência do fuso de 5,6 kW e a velocidade máxima do fuso de 6000 rpm foi usada para realizar os experimentos. Um sensor de energia trifásico foi usado para medir a demanda de energia. O sensor foi capaz de medir sistemas de baixa tensão até 380 V do condutor ao terra e corrente de até 40 A. O ponto de medição foi escolhido no barramento principal do quadro elétrico para obter o consumo de energia total. O sensor foi configurado para registrar a potência ativa da máquina-ferramenta e a frequência era de 10 Hz, também realizou a divisão da rede neural em 4 neurônios de entrada (correspondendo a quatro parâmetros de usinagem n , f , ap , ae) uma camada oculta com nove neurônios e um neurônio de saída na camada de saída. O autor chegou no resultado de precisão satisfatório para prever o consumo de energia de corte em máquinas ferramentas e abriu uma discussão para trabalhos futuros.

No artigo *“Energy modeling and visualization analysis method of drilling processes in the manufacturing industry”*, de acordo com Jia *et. al.*, (2021) buscou criar um painel de dados para monitoramento de energia em tempo real do processo de furação, coletando estes dados através de sensor de corrente, coletor de dados, sensor de voltagem e uma interface no computador para modelagem dos dados para transformar no painel, nele contendo o histograma, diagrama de bolha e acompanhamento de energia.

2.25 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA

Como pode-se observar no tópico anterior, diversos autores realizaram ensaios utilizando diferentes formas para a coleta de dados de energia, todavia, a precisão para estes dados depende dos instrumentos de medição sua precisão e tecnologia (HOLMAN, 2012). Para realizar esta medição os autores em suas pesquisas buscaram utilizar instrumentos como:

2.25.1 Multimeditores de Grandezas eletricas:

Os Multimeditores são dispositivos que fazem a medição de diversas grandezas elétricas como por exemplo, corrente elétrica, tensão, potência e etc, (HOLMAM, 2012). Os Multimeditores se baseiam em circuitos eletrônicos compostos de A/D (conversores analógico/digital) que convertem os sinais de tensão e corrente em sinais digitais e microprocessadores (ou microcontroladores) que realizam os cálculos matemáticos para medição de cada grandeza elétrica.

2.25.2 Dinamômetro

Os dinamômetros são dispositivos capazes de indicar valores de carregamentos mecânicos (estáticos e/ou dinâmicos) por meio da utilização de transdutores baseados em diferentes princípios e métodos de medição. Segundo Qin *et. al.* (2017) na usinagem, dinamômetros baseados em piezoelétricos são mais amplamente utilizados, principalmente em aplicações laboratoriais. Isso se deve à facilidade de construção e de montagem; ao menor custo e à alta sensibilidade à deformação desses transdutores. Os dinamômetros podem ser classificados como rotativo e estacionário. Os dinamômetros podem ser classificados em rotativos quando existe movimento relativo angular entre o dispositivo e o material usinado. Normalmente, são acoplados ao eixo-árvore da máquina-ferramenta. Nesse tipo de montagem, o maior desafio é minimizar os distúrbios causados por frequências de ressonância nos sinais de força, devido à alta rotação do porta-ferramenta. Tendo em vista a natureza desse movimento, o sistema de transferência de dados deve ser sem fio (TOTIS *et. al.*, 2010). Por outro lado, dinamômetros estacionários não apresentam movimento angular entre o dispositivo e o material usinado. Geralmente, são compostos por uma base inferior montada na mesa da máquina-ferramenta; por uma base superior, onde material usinado é fixado; e por um, ou mais, componentes mecânicos em que os transdutores são posicionados, normalmente, denominados elementos elásticos (KISTLER, 2021). Na Figura 19 mostra um dinamômetro para medição de força de corte.

FIGURA 19 - DINAMÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE FORÇA DE CORTE



Fonte: Kistler (2021).

2.25.3 Sensores

Um sensor é um dispositivo capaz de detectar/captar ações ou estímulos externos e responder em consequência (HOLMAM, 2012). Estes aparelhos podem transformar as grandezas físicas ou químicas em grandezas elétricas. Como exemplo o “*EcoMonitor Light*” desenvolvido pela Mitsubishi para coleta de dados de energia de máquinas, segundo a *Mitsubishi Electric* com ele é possível saber precisamente o consumo individual das máquinas de uma linha de produção, com isso pode-se realizar o monitoramento em tempo real destes equipamentos possibilitando tomadas de decisões como manutenções preventivas através de uma avaliação de alto consumo. Ele é compacto e pode ser montado direto no painel elétrico da máquina e envia os dados coletados para uma plataforma onde é possível sua modelagem para melhor visualização (MITSUBISHI, 2021). Existem outros diversos sensores com o mesmo objetivo no mercado. A sistemática de coleta de dados de energia basicamente consiste na instalação do sensor, coleta destes dados e modelagem em formato de gráficos para melhor análise (TUO *et al.*, 2018).

A partir da revisão bibliográfica realizada, observou-se que a busca pela eficiência é uma constante nas empresas. Entretanto, o consumo de energia em máquinas-ferramenta ainda é tratado de forma marginal, principalmente nos processos de furação e, mais especificamente, na furação com broca escalonada. Essa carência de estudos e ou interesse é o fator motivador desta dissertação. No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos empregados nos experimentos realizados neste trabalho.

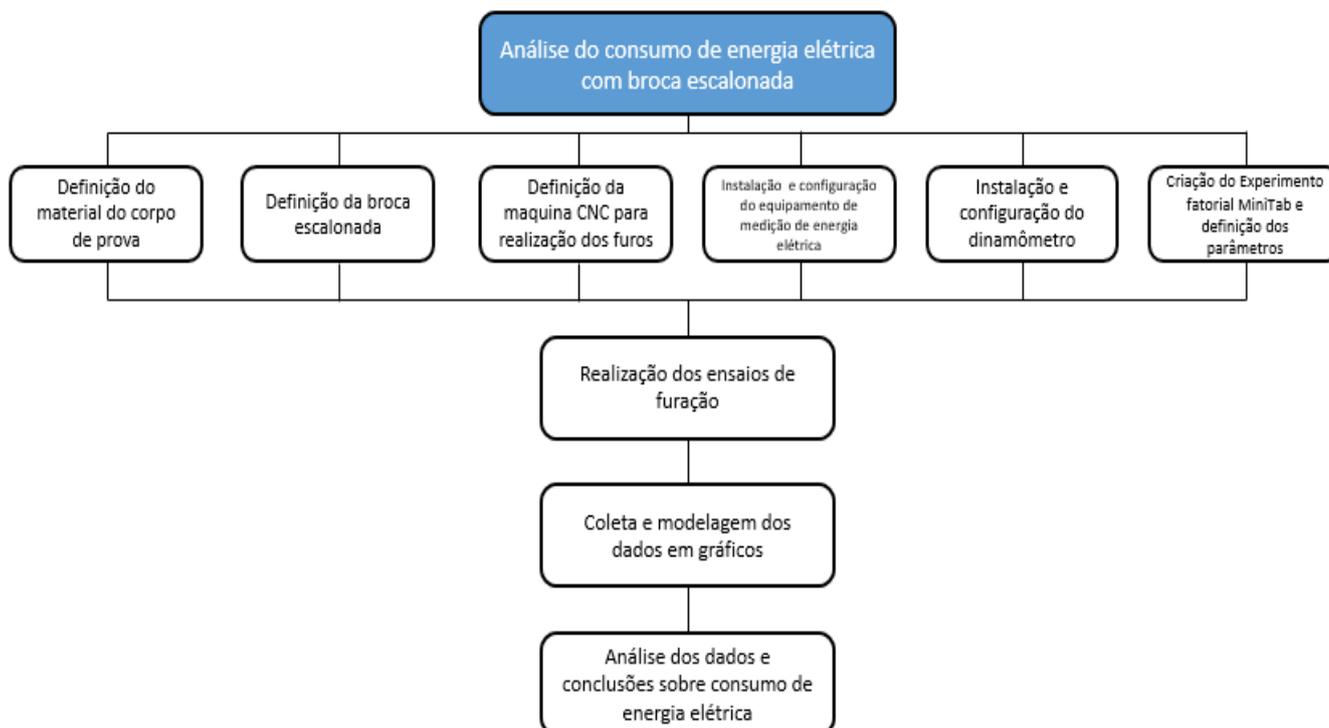
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos descritos a seguir foram planejados com o intuito de realizar os experimentos necessários para se alcançar os objetivos descritos na seção 2.1. Na sua maioria, os experimentos foram realizados nas instalações da empresa *Robert Bosch Ltda.*, planta de Curitiba-PR, a qual cedeu a máquina-ferramenta, instrumentos, materiais para os corpos de prova e pessoal técnico para suporte.

Alguns poucos experimentos foram realizados no Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Paraná (Labusig/UFPR) com o intuito de apenas confirmar alguns resultados obtidos, mas não serão descritos nesta dissertação. Registra-se também que a instrumentação (plataforma dinamométrica e sistema de aquisição) para medição do torque durante os ensaios foi emprestada pelo Laboratório de Usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

A Figura 20 traz o fluxograma de um resumo da metodologia utilizada para realização desta pesquisa.

FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA, CORPOS DE PROVA, FERRAMENTA E INSTRUMENTAÇÃO

A máquina utilizada para realizar os ensaios foi o centro de usinagem HASS VF-2SS (Vide Figura 21), cujas características principais são apresentadas na Tabela 2. Um aspecto importante desta máquina é o acionamento direto do eixo-árvore, denominado pelo fabricante por “*InlineDirectDrive*” o qual dispensa o uso de transmissão mecânica, por exemplo polia, engrenagens e correias.

FIGURA 21 - CENTRO DE USINAGEM HASS VF-2SS



Fonte: Escola Técnica Robert Bosch Ltda. Curitiba (2022).

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO CENTRO DE USINAGEM HASS VF-2SS

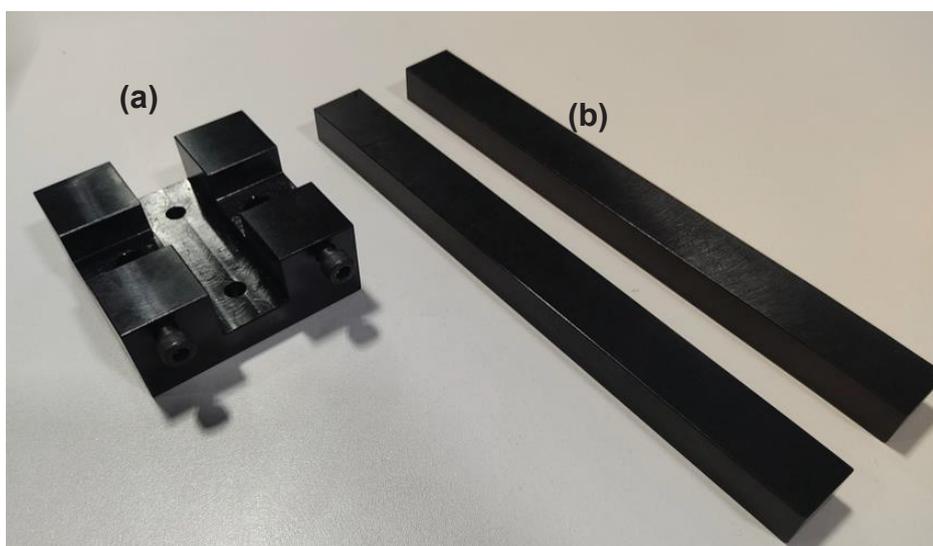
Número de eixos	3 eixos
Orientação do eixo árvore	Vertical
Outras características	Alta velocidade com acionamento direto
Curso X	762 mm
Curso Y	406 mm
Curso Z	508 mm
Velocidade máxima de rotação	12 000 rpm
Velocidade em G0	35,6 m/min
Potência do motor do Spindle (Motor eixo árvore)	22,4 KW
Tensão de C.A. de entrada (3 fases)	35 A
Input AC Voltagem (3 fases)	440 VAC

Fonte: Hass (2021).

Um aço de baixo carbono (ABNT 1020) foi escolhido para a confecção dos corpos de prova. Na Figura 22 (b) ilustra os corpos de prova utilizado nos experimentos, suas dimensões são apresentadas no desenho apresentado no Apêndice 4.

Devido às características construtivas do dinamômetro, desenvolveu-se um dispositivo para melhor fixação dos corpos de prova, conforme imagem na Figura 22 (a). Desenhos do dispositivo de fixação podem ser encontrados no Apêndice 5.

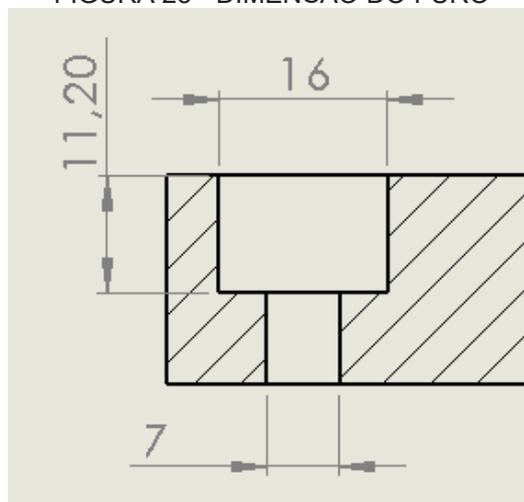
FIGURA 22 – DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO (a) E CORPOS DE PROVA (b)



FONTE: Autoria Própria (2022).

As dimensões dos furos executados nos experimentos podem ser vistas na figura 23.

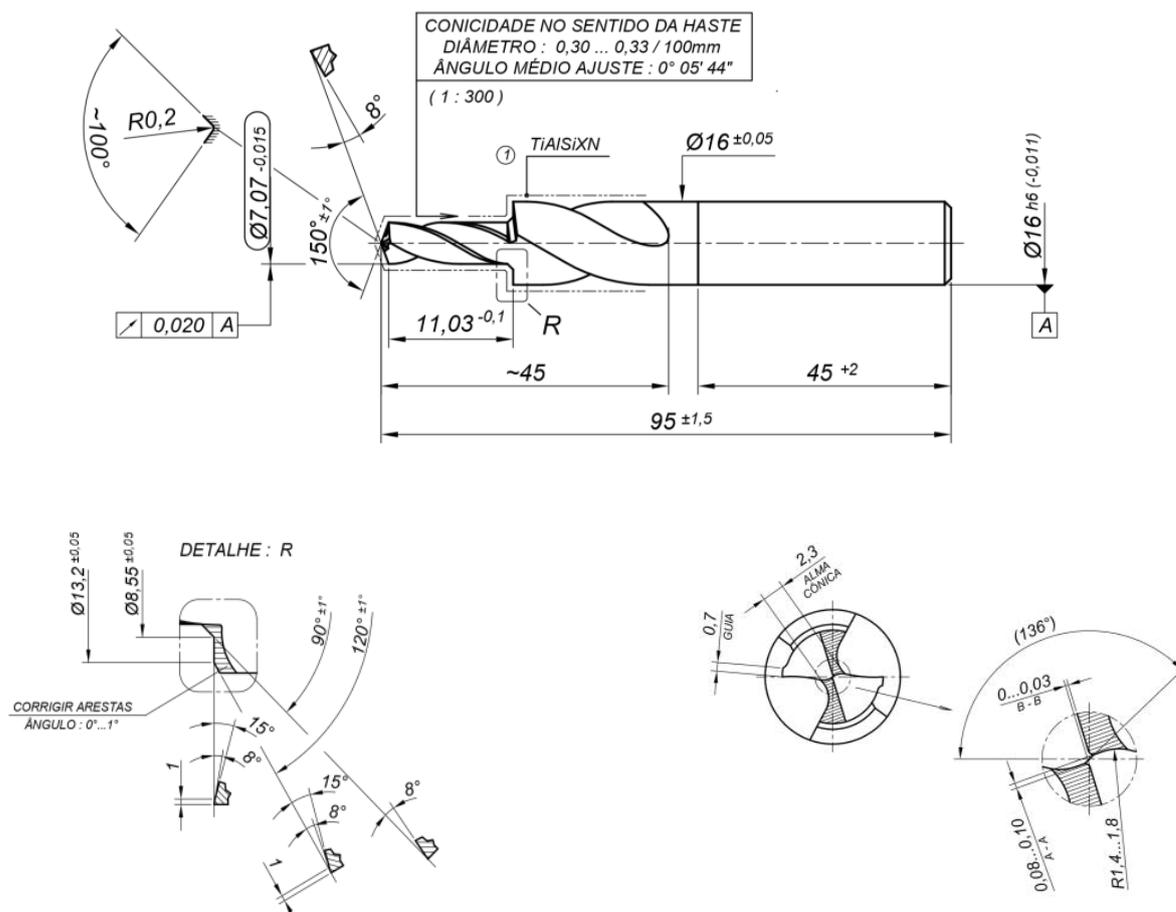
FIGURA 23 - DIMENSÃO DO FURO



FONTE: Autoria Própria (2022).

As ferramentas utilizadas para realização dos ensaios foram brocas helicoidais com afiação cônica, conforme dimensões e geometria apresentadas no desenho da Figura 24. Essas brocas foram fabricadas em metal duro com cobertura de AlCrN nos dois diâmetros.

FIGURA 24 – BROCA ESCALONADA UTILIZADA NO ESTUDO



Fonte: Departamento de Projetos Multinacional (2022).

O instrumento utilizado para medição da potência elétrica ativa foi o analisador de energia FLUKE 434. Esse instrumento possibilita a medição dos principais parâmetros elétricos de circuitos CA trifásicos. Os valores medidos, a uma taxa máxima de 4 leituras por segundo, podem ser armazenados em memória para análise posterior. Mais detalhes sobre aplicação, configuração e recursos podem ser encontrados no seu manual de operação disponível em (FLUKE, 2022).

Para a medição do momento torçor foi utilizado um sistema de medição de

esforços de corte composto por um dinamômetro piezoelétrico (marca Kistler, modelo 9272), um amplificador de sinal conversor de carga (marca Kistler, modelo 5070A), um cartão de conversão analógico-digital (A/D), da marca National Instrument, modelo 9222 montado em uma placa de aquisição de dados modelo USB cDAQ-9178. Maiores detalhes sobre o dinamômetro e o conversor de carga podem ser vistos no website do fabricante (KISTLER, 2021) e sobre a placa A/D em (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022). O programa para aquisição de dados foi desenvolvido em *MathLab* na *Robert Bosch Ltda.*

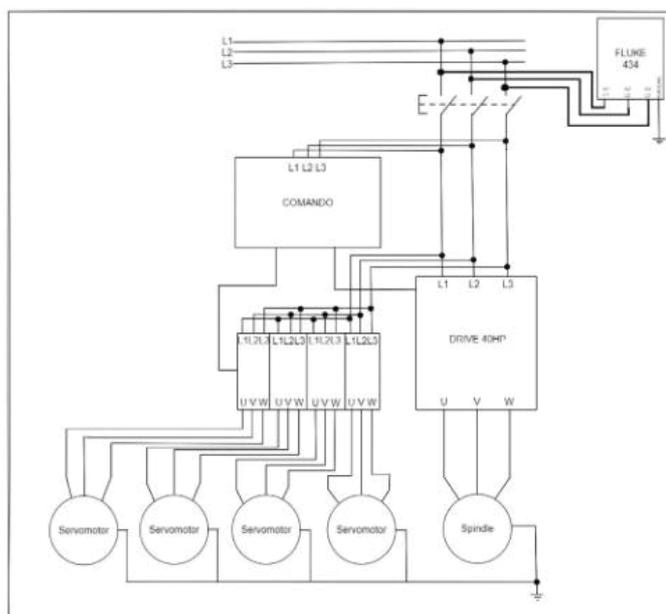
3.2 INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

3.2.1 Instalação do analisador de energia FLUKE 434

O analisador de energia foi instalado em duas posições diferentes e em momentos distintos. Primeiramente, ele foi instalado no quadro geral da máquina, tal como esquematizado na Figura 25. Esta instalação possibilitou a medição do consumo energético da máquina durante todos os estágios dos experimentos, incluindo a energia dispendida durante os tempos improdutivos (aproximação e troca da ferramenta), bem como o corte propriamente dito.

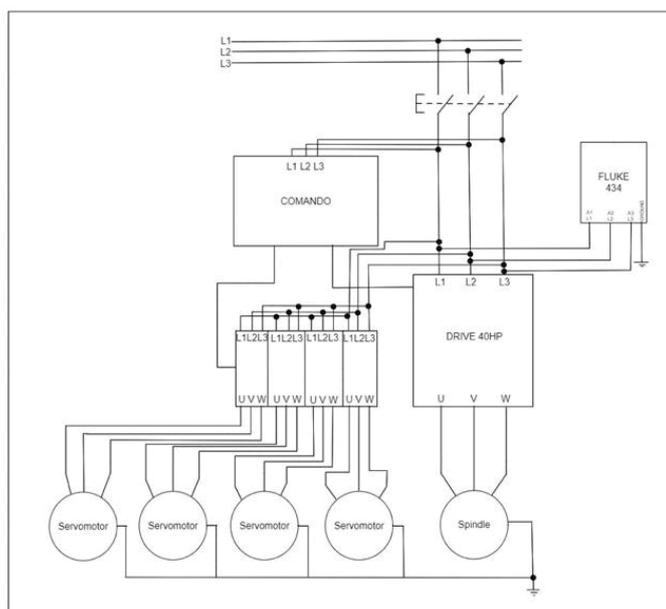
Em um segundo momento o analisador foi instalado antes do inversor de frequência do motor principal (vide Figura 26). Nesta montagem, apenas a energia dispendida com a rotação do motor e o corte foi medida. O objetivo aqui foi o de reduzir a interferência do motor de avanço (eixo Z) e de outros periféricos do centro de usinagem.

FIGURA 25 - ESQUEMA ELÉTRICO DA INSTALAÇÃO DO FLUKE NO PAINEL DA MÁQUINA



Fonte: Próprio autor (2022).

FIGURA 26 - ESQUEMA ELÉTRICO DA INSTALAÇÃO DO FLUKE NO EIXO-ÁRVORE



Fonte: Próprio autor (2022).

3.2.2 Instalação do dinamômetro

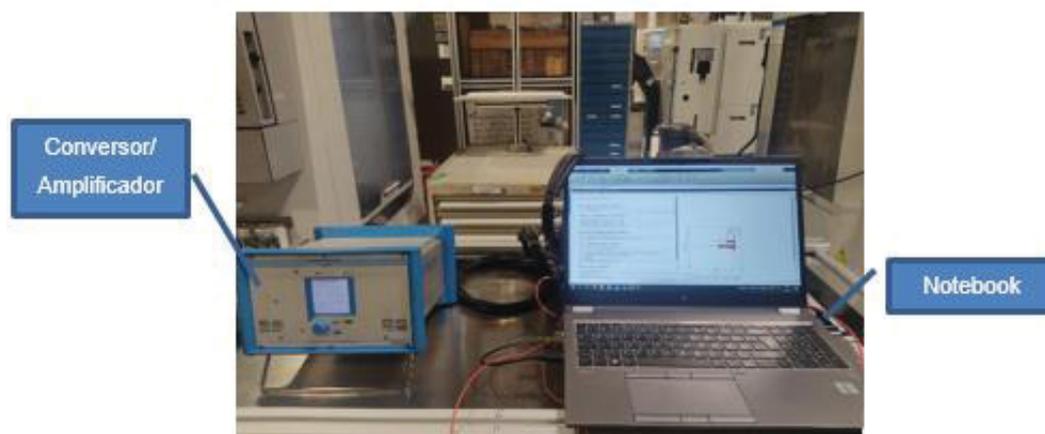
O dinamômetro foi montado diretamente sobre a mesa do centro de usinagem, tal como mostrado na Figura 27. Os corpos de prova foram fixados ao dinamômetro por meio de um dispositivo desenvolvido especialmente para os experimentos aqui realizados.

O referido dinamômetro possibilita a medição de três componentes da força de usinagem do momento torçor. Entretanto, para este trabalho apenas os dados referentes ao torque foram analisados. O conversor/amplificador de carga foi configurado com um fator de calibração de -160 pC/Nm e uma relação Torque/Volt de 10 Nm/V . A taxa de amostragem e conversão A/D foi definida em 1000 leituras/s. As aquisições de dados foram realizadas por meio de um notebook, tal como mostrado na Figura 28.

FIGURA 27 - INSTALAÇÃO DINAMOMETRO E FIXAÇÃO CORPOS DE PROVA



FIGURA 28 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS



FONTE: Próprio autor (2022).

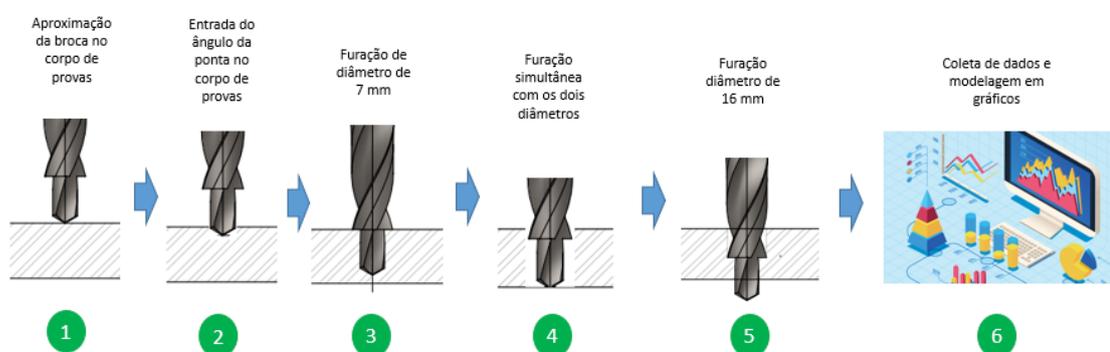
3.2.3 Ensaios com a broca escalonada

Para os ensaios com a broca escalonada os valores de potência ativa, com o analisador instalado conforme esquema mostrado na Figura 26, foram medidos simultaneamente durante 5 estágios de furação, tal como esquematizado na Figura

29. O primeiro estágio é aquele aonde a ponta da boca toca o corpo de prova e se inicia a furação. O segundo compreende apenas a penetração da ponta cônica da broca para, em um terceiro instante, ocorrer a furação com o primeiro escalonado (diâmetro de 7mm). A penetração do segundo diâmetro (16mm) ocorre no quarto estágio, sendo este caracterizado pela penetração completa da ferramenta. O último estágio ocorre com a saída completa da parte cônica (furação passante).

As condições de corte adotadas para a furação com a broca escalonada foram: Rotação (N) = 1000 rpm, avanço (f) = 0,07 mm/v e sem utilização de fluido de corte.

FIGURA 29 – ESQUEMATIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM BROCA ESCALONADA



FONTE: Próprio autor (2021).

3.2.4 Ensaio com brocas separadas

A condição “brocas separadas” deve ser entendida aqui como sendo a técnica padrão, adotado na usinagem de furos complexos, mas com baixa produção, isto é, pequenos lotes de peças. Esse método também é denominado por furação com pré-furação. Neste caso, adotam-se duas, ou mais, ferramentas com diâmetros diferentes e com pausas na furação para suas trocas.

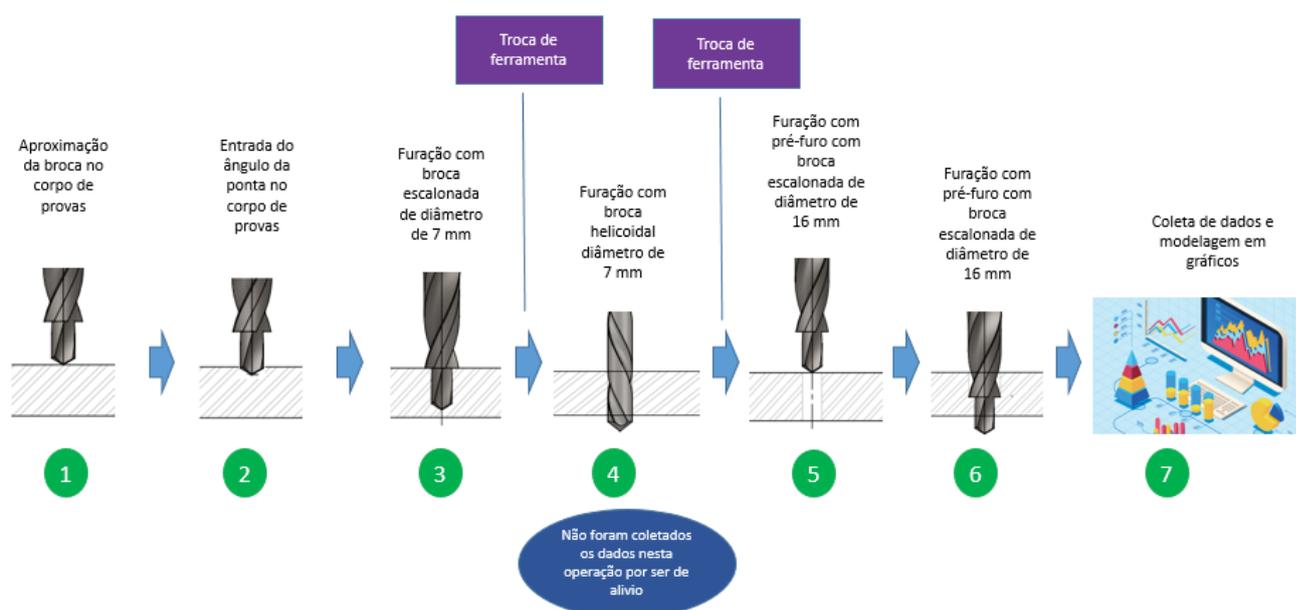
Com o intuito de comparar essa técnica com aquela descrita para a broca escalonada de dois diâmetros, utilizou-se neste caso a mesma broca, porém com a inclusão de uma segunda ferramenta (broca de diâmetro 7mm) para finalizar o furo iniciado com o primeiro diâmetro. Dessa forma, mantiveram-se as condições (geometria das brocas) para fins de comparação das duas técnicas.

A Figura 30 contém uma esquematização da técnica de furação com brocas separadas. A potência elétrica ativa foi registrada com o analisador instalado conforme esquema apresentado na Figura 26, o que possibilitou a medição da energia gasta na troca das ferramentas, o que corresponde ao intervalo entre os estágios 4 e 5. A troca

entre os estágios 3 e 4 não foi avaliada, pois a broca de 7mm foi utilizada apenas para criar um furo passante e, dessa forma, possibilitar a medição da energia dispendida apenas na furação com o diâmetro de 16mm.

As condições de corte — rotação (N) e o avanço (f) em m/v — foram idênticas àquelas adotadas para a furação com broca escalonada, ou seja: $N = 1000$ rpm e $f = 0,07$ mm/v e sem aplicação de fluido de corte.

FIGURA 30 – ENSAIO BROCA SEPARADAS



Fonte: Próprio autor (2022).

3.2.5 Planejamento fatorial para análise da energia consumida na furação com broca escalonada

Sabendo-se que na furação com a broca escalonada, o torque varia em função do diâmetro; e que a influência da rotação (N) e do avanço (f) sobre a energia não é facilmente modelada, delineou-se um experimento, tendo como base o método estatístico clássico conhecido por “planejamento fatorial” (NETO *et al.*, 1996). O objetivo deste planejamento fatorial foi o de estimar a influência desses fatores (N/f) sobre o consumo de energia elétrica.

Esse planejamento também se justifica pelos seguintes motivos:

- i) Alguns pesquisadores, vide por exemplo ASTAKHOV (2014) e FERRARESI (1972), afirmam que o impacto da rotação sobre o torque pode ser desconsiderado. Por outro lado, o avanço (ou espessura de corte) exerce

uma influência significativa sobre o torque. STEPHENSON e AGAPIOU (2016) afirmam que tanto o avanço como a rotação exercem influência sobre o torque seguindo uma relação exponencial.

- ii) Em se tratando da potência de corte, pode-se afirmar que, para um valor constante de avanço, ela varia diretamente proporcional com a rotação, tal como definido pela Equação 8.
- iii) Maiores rotações implicam em maior corrente elétrica nos motores e acionamentos da máquina. As perdas por efeito Joule vide (Auinger, 2006) aumentam com o quadrado da corrente o que, por conseguinte, acarretam em um maior consumo de energia.
- iv) Entretanto, quando se avalia a energia consumida deve-se levar em conta que o tempo de corte possui uma relação inversamente proporcional tanto com o avanço como com a rotação. Por sua vez, o consumo de eletricidade varia de forma diretamente proporcional ao tempo de corte.
- v) Diante disso, a influência tanto da rotação como do avanço são difíceis de serem modeladas.

O planejamento fatorial foi delineado foi do tipo 3^k e processado com auxílio do *software Minitab*[®], seguindo as condições apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 - VALORES ADOTADOS NO EXPERIMENTO

Níveis	Rotação (rpm)	Avanço (mm/v)
-1	1200	0,05
0	1400	0,075
1	1600	0,1

Fonte: Próprio autor (2022).

Para minimizar os ruídos foram realizados:

- 3 réplicas do experimento totalizando 27 ensaios;
- Inserido no início de cada furação 30 segundos para estabilização do fuso da máquina;
- Todos os ensaios sem o uso do fluido de corte, visando reduzir seu impacto no consumo de energia, seja pelo uso do motor da bomba, como também por possível influência no torque;

- Instalação do analisador de energia (Fluke 434) para medir apenas a energia dispendida no acionamento (inversor) e no motor principal, conforme esquema apresentado na Figura 27; e
- Medição simultânea do torque com auxílio do dinamômetro (Kistler 9272).

3.2.6 Medição de potência com variação de rotação

Para medição da potência consumida em diferentes rotações foi utilizado o analisador *Fluke 434* instalado no eixo-arvore e criação do programa (vide Apêndice 3) onde a rotação varia de 500 RPM à 5000 RPM.

3.2.7 Cálculo da energia consumida

A energia elétrica ativa foi estimada a partir da potência elétrica ativa, obtida com o uso do analisador *Fluke 434*. A energia de corte (mecânica) foi estimada tendo como base a potência de corte obtida pela medição do torque no dinamômetro (Kistler 9272) e multiplicação pela rotação conforme Equação 8. Ambas energias foram determinadas para um mesmo intervalo aplicando o método do cálculo da área definido no espaço tempo (t_c) e potência (P).

Como se trata de uma medição discreta, a área definida no espaço t_c - P deve ser aproximada pela área de um polígono irregular cujos vértices são obtidos nos arquivos de dados gerados pelos sistemas de medição. Essas áreas podem ser calculadas pelo método do produto vetorial (VENTURI, 2015), tal como descrito a seguir.

Supondo que a curva (t_c - P) seja discretizada na forma de pontos no espaço definido por X-Y, onde X corresponda ao tempo (t_c) e Y à potência (P), m vetores \vec{U} e \vec{V} podem ser construídos a partir desse conjunto de N pontos, onde $N \geq 3$ e $m = N-1$, da seguinte maneira: $\vec{U}_i = (X_i - X_0, Y_i - Y_0, 0)$; $\vec{V}_i = (X_{i+1} - X_0, Y_{i+1} - Y_0, 0) \dots \vec{U}_m = (X_n - X_0, Y_n - Y_0, 0)$; e $\vec{V}_m = (X_n - X_0, 0, 0)$, considerando um polígono fechado. Sendo \vec{Q}_i o vetor resultante do produto vetorial ($\vec{U}_i \times \vec{V}_i$), a área (A) pode ser determinada pela Equação 8, onde \vec{k} é o vetor unitário (0,0,1).

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=0}^m (\vec{Q}_i) \cdot \vec{k} \right| \quad (8)$$

Na seção seguinte são apresentados os resultados e discussões dos experimentos aqui delineados

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e avaliações dos dados coletados a partir dos experimentos realizados. Devido à alta taxa de amostragem (1000 leituras por segundo no caso do dinamômetro) e aos longos intervalos para estabilização (30s) antes do início da furação, os arquivos com os dados de torque ficaram muito grandes, dificultando a sua análise e determinação dos estágios da furação. Além disso, existe uma variação causada pelo sistema de aquisição, pela dinâmica do processo, e pelo fluxo de cavacos nos canais da broca.

Para reduzir o volume, como também o ruído, os dados foram previamente processados automaticamente¹, por meio de duas técnicas relativamente simples. A primeira consistiu na separação da região de interesse, i. e., desde o ponto em que a broca tocou a peça até o fim do percurso de avanço. A segunda compreendeu a aplicação de uma média móvel com janela de 50 leituras, o que corresponde a um intervalo de 50 *ms*. Dessa forma, houve uma redução de 30×10^3 pontos, correspondentes ao intervalo de estabilização e 80% dos valores medidos durante o percurso de avanço, o qual contém o corte propriamente dito.

No caso das medições da potência elétrica ativa, não houve necessidade de se aplicar um processamento automático, pois o volume de dados foi bem inferior àquele obtido com o dinamômetro. Diante disso, os estágios de furação foram manualmente, e facilmente, identificados.

Os resultados são apresentados e discutidos a seguir e estão organizados nos seguintes tópicos: Potência elétrica em diferentes estágios da furação; influência da rotação sobre a potência elétrica ativa; energias consumidas em diferentes estratégias de furação; influências da rotação e do avanço sobre a energia de corte; e energia elétrica consumida na furação com broca escalonada.

¹ Essa automação foi realizada por meio de um procedimento implementado em MS-Visual Basic, possibilitando estimar o instante no qual a broca encostou na peça. Essa estimativa é baseada no cálculo da inclinação da reta interpolada pelo método da regressão linear de um intervalo de 200*ms*, o qual corresponde a 200 valores lidos. Quando a direção dessa reta, em relação ao eixo do tempo (horizontal) for superior a um limiar previamente estabelecido, detecta-se o ponto no qual a broca tocou a peça. Depois da separação da região de interesse, o arquivo resultante foi processado pelo método da média móvel.

4.1 POTÊNCIA ELÉTRICA EM DIFERENTES ESTÁGIOS DA FURAÇÃO

A potência elétrica ativa e, por conseguinte, a energia elétrica ativa, variam conforme o ponto de medição dentro da máquina. O Gráfico 4 contém o resultado dessa avaliação para a furação com a broca escalonada. Primeiramente, o analisador (*Fluke 434*) foi instalado no quadro geral de alimentação da máquina conforme esquema apresentado na Figura 27. Posteriormente, ele foi reinstalado próximo ao inversor/motor (vide Figura 28) e um outro ensaio com as mesmas condições de corte foi executado. O que se esperava aqui seria a medição de maiores valores de potência com o instrumento instalado próximo ao quadro geral.

Entretanto, observa-se que próximo ao estágio E6, o qual corresponde à furação simultânea com os dois diâmetros da broca e ao grande fluxo de cavacos, os valores de potência praticamente se equivalem. Essa pequena diferença pode ser explicada pela baixa resolução² do medidor, tal como comentado na abertura deste Capítulo. Não obstante, nos demais estágios, a potência medida no quadro de alimentação foi sempre superior àquela registrada com o instrumento próximo ao inversor/motor do eixo principal.

No estágio E1, o qual corresponde à partida do motor principal, foi possível registrar um pico de potência de curta duração. Posteriormente, dentro do período de estabilização (E2) observou-se uma ligeira queda de energia³, porém sem ligação com o corte propriamente dito. O início da furação é identificado no estágio E3 mostrado no Gráfico 5. Entretanto, o instante exato no qual a broca toca a peça fica difícil de ser determinado. Isto contrasta com as medições diretas do torque com o dinamômetro, as quais serão discutidas nas próximas seções. O estágio E4 é aquele no qual a broca percorre o comprimento do furo com o seu primeiro diâmetro. Observa-se que, dentro da resolução do medidor, a inexistência de variação na potência elétrica.

O estágio E5 compreende a entrada na peça do segundo diâmetro da broca. O maior valor de potência foi observado quando a ferramenta está, por completo, dentro da peça. O fluxo intenso de cavacos, provenientes de ambos os diâmetros, se

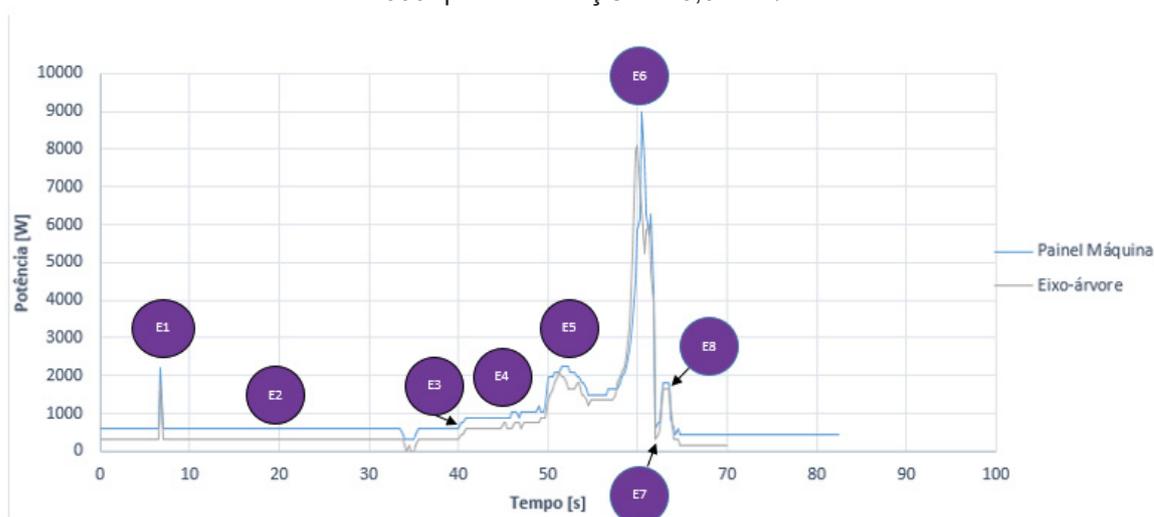
² Para esta montagem, a resolução alcançada foi de 150W.

³ Essa queda de energia foi observada em todos os ensaios realizados, porém ainda sem uma explicação. O que pôde ser observado foi que ela ocorreu sempre que os motores dos eixos da máquina (X,Y,Z) foram acionados com a velocidade máxima para o posicionamento da broca antes do início da furação.

misturam entre os canais da broca e a parede do furo provocando um aumento abrupto do torque e, por conseguinte, da potência elétrica, tal como indicado no estágio 6

Após um determinado tempo, a broca atravessa o corpo de prova produzindo um furo passante. Nesse instante (estágio 7) a potência elétrica cai bruscamente por um intervalo muito curto ($< 0,5s$) e, depois, retorna a um patamar (estágio 8) que corresponde à energia gasta com a furação com pré-furo, ou seja, o corte é realizado apenas pelo segundo diâmetro da ferramenta.

GRÁFICO 4 - COMPARATIVO POTÊNCIA EIXO-ÁRVORE x PAINEL GERAL COM ROTAÇÃO EM 1000 rpm E AVANÇO DE 0,07mm/v

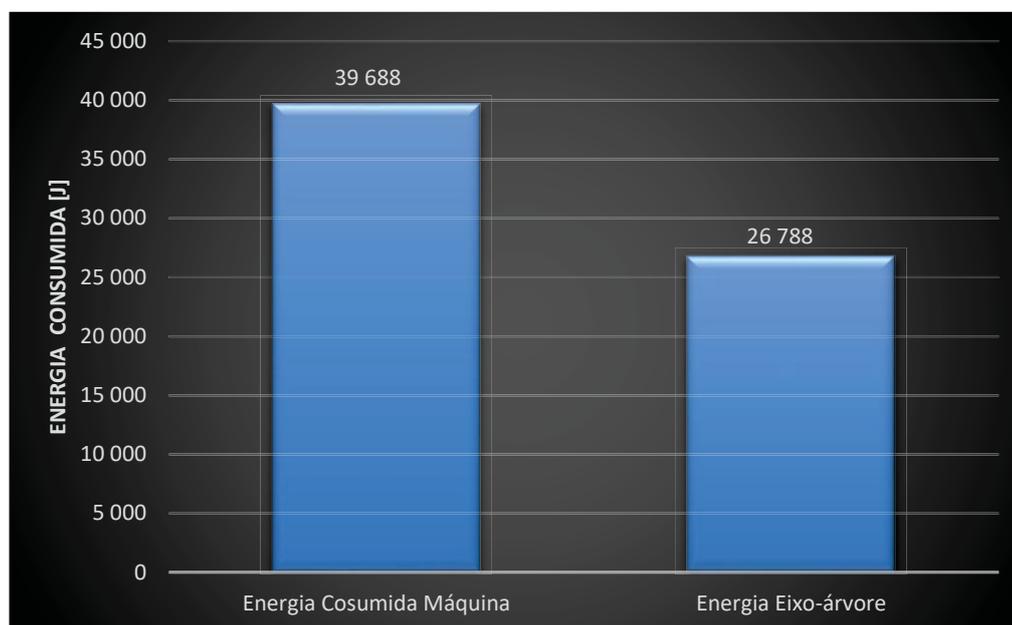


FONTE: Próprio autor (2021).

Utilizando a Equação 8, as áreas definidas no Gráfico 5 podem ser calculadas e, assim, estimar as energias consumidas em diferentes pontos da máquina. No painel geral da máquina a energia consumida foi, aproximadamente, de 39.688 J e próximo ao inversor/motor foi de 26.788 J, uma diferença de 67,49%, tal como ilustrado no Gráfico 5.

Essa diferença registrada é suportada pela literatura atual, vide por exemplo Pimenov *et al* (2022), e considerada extremamente crítica, pois ela representa o consumo constante da máquina, o qual independe das operações e condições de corte adotadas. Por conseguinte, a redução dos tempos improdutivos relacionados à preparação, paradas para troca de ferramentas e carga/descarga de peças são condições mandatórias para redução dessa diferença.

GRÁFICO 5 - COMPARATIVO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA COM ROTAÇÃO EM 1000 rpm E AVANÇO DE 0,07mm/v



Fonte: Próprio autor (2022).

O consumo durante o corte depende muito da rotação adotada na furação, pois parte dele está relacionado à energia necessária para manter o eixo árvore em movimento, antes mesmo da entrada da broca, tal como evidenciado no estágio 2 do Gráfico 4. A influência da rotação sobre a potência elétrica ativa foi avaliada para a máquina aqui utilizada e será apresentada na próxima seção.

4.2 INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO SOBRE A POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA

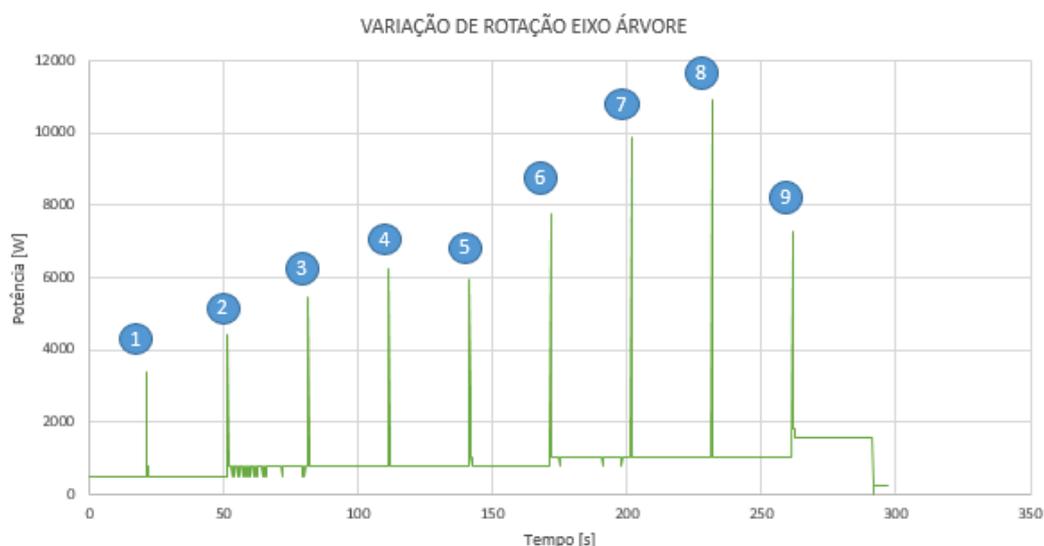
A energia gasta para manter o motor da máquina girando aumenta com o aumento da rotação, tal como mostrado no Capítulo 2.4.1. No Gráfico 6 são apresentados os resultados das medições da potência elétrica ativa para diversas rotações. As linhas verticais grandes indicam os picos de potência devido à aceleração do motor a cada mudança de rotação. Os trechos horizontais correspondem à potência elétrica ativa após a estabilização da rotação, a qual variou, partindo de 500 rpm até 5000 rpm, em intervalos de 500 rpm.

Baseando na literatura corrente vide por exemplo (Albertelli, 2017) pequenos aumentos de rotação provocam um aumento da força viscosa nos mancais do motor e do eixo árvore. Além disso, o aumento dessas forças provoca um aumento da corrente elétrica no inversor e no motor. Entretanto, devido à baixa resolução das

medidas de potência com o instrumento aqui utilizado, não foi possível detectar essas pequenas variações.

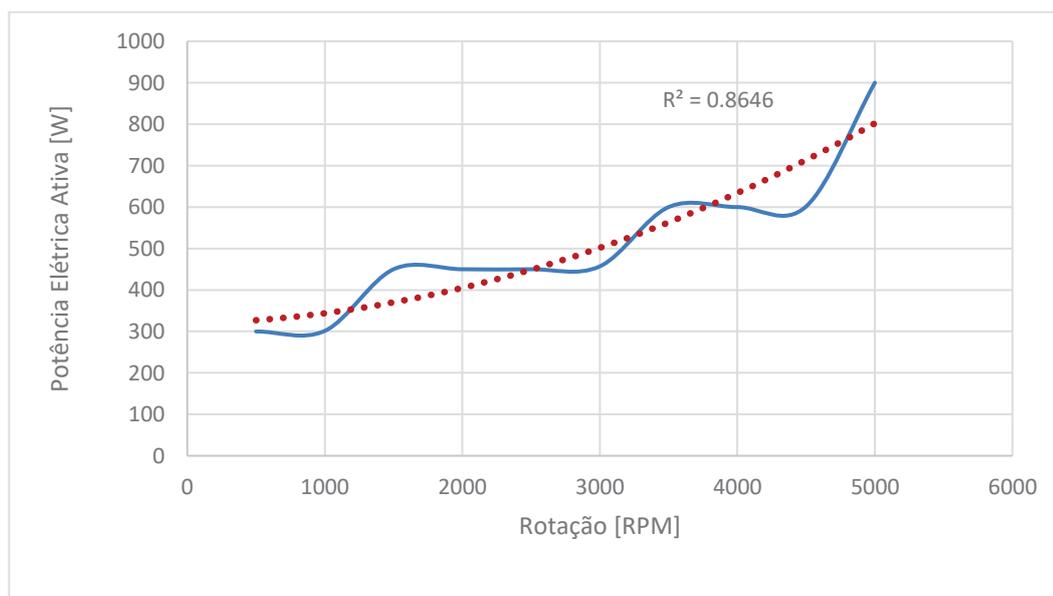
Não obstante, a partir do Gráfico 7 é possível concluir que maiores rotações acarretam maiores potências. A curva em linha tracejada foi obtida por meio de uma regressão polinomial (grau 3) com um coeficiente de correlação (R^2) > 0,85.

GRÁFICO 6 - VARIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES ROTAÇÕES



Fonte: Próprio autor (2022).

GRÁFICO 7 – INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA

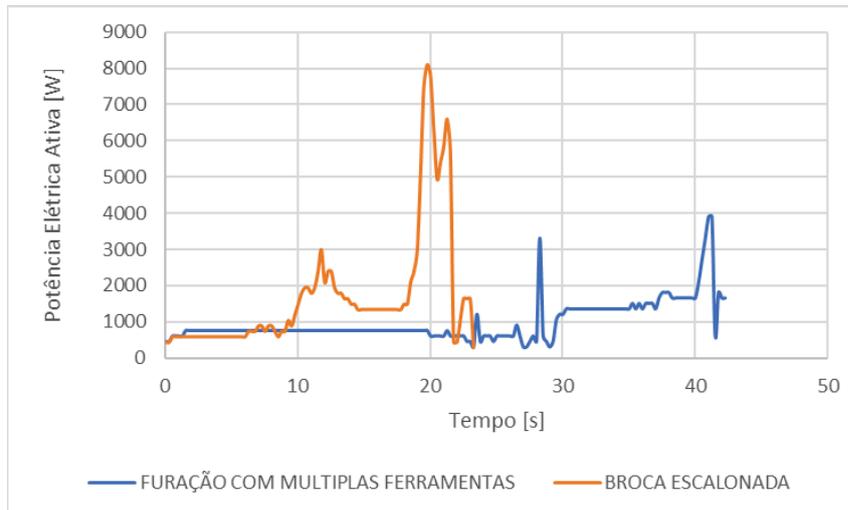


Fonte: Próprio autor (2022).

4.3 ENERGIAS CONSUMIDAS EM DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE FURAÇÃO

A principal vantagem da furação com a broca escalonada, quando comparada com a técnica de brocas separadas, é a redução do tempo do ciclo, pois a usinagem de furos complexos pode ser feita sem a necessidade de troca de ferramentas. Entretanto, tal como discutido no Capítulo 2.1, não existem estudos comparativos sobre o consumo de energia nestas duas técnicas. O Gráfico 8 contém as curvas (tempo X potência elétrica) para ambas as técnicas. Elas foram obtidas em um ensaio realizado com rotação (N) de 1000 rpm, avanço (f) de 0,07 mm/v e percurso de avanço (lf) de 27,03mm. Nessas condições, a diferença de tempo entre as duas técnicas foi muito elevada, alcançando mais de 80% para a furação com brocas separadas, quando comparada ao método de usinagem com broca escalonada. Na produção de grandes lotes de peças, essa diferença é muito significativa e, per se, justifica o investimento em brocas escalonadas.

GRÁFICO 8 – COMPARATIVO DA POTÊNCIA ELÉTRICA E DO TEMPO DE CORTE PARA AS DUAS TÉCNICAS DE FURAÇÃO

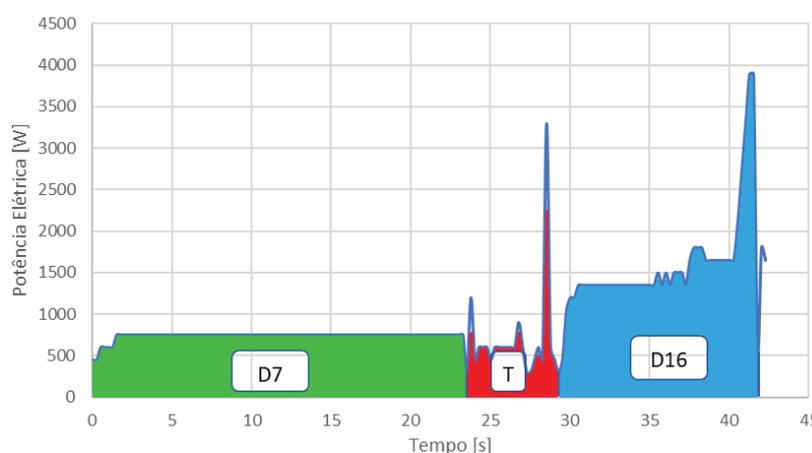


Fonte: Próprio autor (2022).

O maior tempo de processamento associado à furação com brocas separadas (42s) pode ser explicado com auxílio da imagem mostrada na Figura 31. O tempo gasto com a troca da broca (T) foi de aproximadamente 6s, o que é uma característica do trocador de ferramentas da máquina avaliada neste trabalho e independe das condições de corte (N,f) adotadas. A primeira broca (D7) avançou por 27,03mm para produzir o furo passante, gastando 23s, o que é, exatamente, o tempo gasto pela

broca escalonada. O restante desse tempo (cerca de 13s) foi dispendido com o avanço da segunda broca (D16).

FIGURA 31 – VARIAÇÃO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE PARA A TÉCNICA DE FURAÇÃO COM BROCAS SEPARADAS, COM ROTAÇÃO EM 1000 rpm E AVANÇO DE 0,07mm/v



Fonte: Próprio autor (2022).

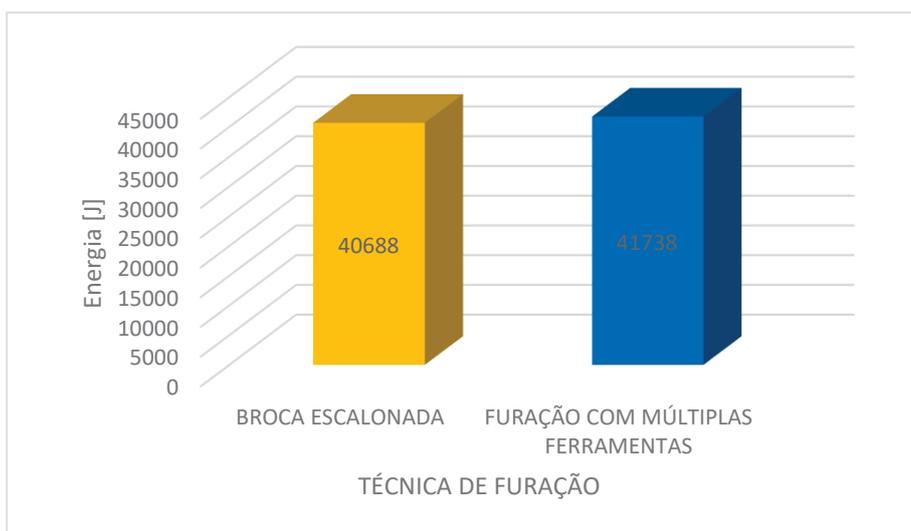
Entretanto, a diferença entre as energias consumidas nas duas técnicas foi, percentualmente, muito inferior (2,5% - Gráfico 8) àquela registrada para os tempos de corte (80% - Gráfico 8). Essa pequena diferença é causada por dois fatores. O primeiro, que pode ser abstraído pela visualização do Gráfico 8, decorre do grande aumento da área da seção transversal quando a broca escalonada encontra-se com os dois degraus (diâmetros) dentro da peça. A potência de corte aumenta com o aumento da área, tal como explicado no Capítulo 2.17 desta dissertação.

O segundo fator está relacionado com o fluxo de cavacos nos canais da broca escalonada. Quando o segundo diâmetro (16mm) penetra na peça, formam-se dois fluxos de cavaco. O primeiro, proveniente do primeiro degrau (7mm), tem sua saída dificultada pelo segundo (16mm).

A Figura 32 contém imagens dos cavacos formados em três momentos distintos. No início da furação formam-se cavacos em lascas. Posteriormente, com a entrada do segundo degrau (16mm) o cavaco muda para helicoidal e, ao final do diâmetro de 16mm aparece um cavaco na forma de fita. A interferência do cavaco nos esforços de corte é amplamente registrada na literatura especializada, vide por exemplo Lqbal *et al*, (2019); Pervaiz e Deiab, (2015). De um modo geral, os cavacos formados atiram com a parede do furo e, em alguns casos, podem ser reusinados

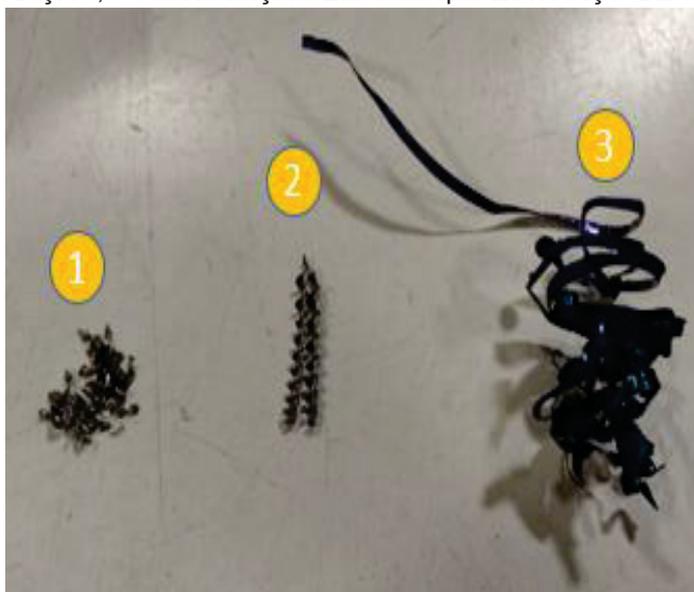
dentro da peça, o que, certamente, implicará em aumento do torque. Nos ensaios realizados, em duas ocasiões, as brocas quebraram dentro dos furos no momento em que os cavacos passaram de helicoidal para fita.

GRÁFICO 9 – ENERGIA ELÉTRICA ATIVA REGISTRADA NAS DUAS TÉCNICAS DE FURAÇÃO, COM ROTAÇÃO EM 1000 rpm E AVANÇO DE 0,07mm/v



Fonte: Próprio autor (2022).

FIGURA 32 – VARIAÇÃO DA FORMA DO CAVACO EM DIFERENTES ESTÁGIOS DA FURAÇÃO, COM ROTAÇÃO EM 1000 rpm E AVANÇO DE 0,07mm/v



Fonte: Próprio autor (2022).

Do ponto de vista prático, pode-se dizer que a diferença de energia, nas duas técnicas de furação, é desprezível ou, em alguns casos, essa diferença poderá ser favorável à furação com brocas múltiplas. Utilizando os dados de potência para

construção do Gráfico 9, estimou-se que a energia gasta com a troca da ferramenta foi de aproximadamente 4000 J. Deve ser lembrado que essa energia varia conforme projeto e construção do trocador de ferramentas e, também, conforme as distâncias entre as ferramentas a serem trocadas. Ela é independente das condições de corte e da técnica de furação em si. Dessa forma, pode-se argumentar que essa parcela de energia, que embora sempre existirá na técnica de brocas separadas, pode ser menor em outros centros de usinagem, tornando a energia total gasta equivalente em ambos os métodos de furação.

Além disso, no caso de usinagem de mais de um furo por peça, ou de usinagem de várias peças em um mesmo dispositivo de fixação, o tempo, e a energia, gastos com a troca serão rateados entre os furos/peças produzidos. Consequentemente, a energia total para a produção de mais furos, com a técnica de furação com brocas separadas, será inferior àquela gasta com a técnica de furação por brocas escalonadas.

Outro aspecto digno de nota é a possibilidade de variação do avanço e rotação, de forma independente, para os diferentes estágios da furação com múltiplas brocas, possibilitando-se a identificação das melhores condições de corte do ponto de vista do tempo, energia e forma de cavaco.

Não obstante às diferenças de comportamento das duas técnicas quando avaliadas sob os critérios de tempo de corte e energia consumida, deve-se registrar que elas são exclusivas das ferramentas, condições de corte e materiais aqui utilizados e não permitem fazer uma generalização para outras condições de usinagem.

4.4 INFLUÊNCIAS DA ROTAÇÃO E DO AVANÇO SOBRE A ENERGIA DE CORTE

As energias de corte foram estimadas a partir das medições do torque com o dinamômetro e pelo cálculo das potências por meio da Equação 8. Os ensaios foram realizados apenas com a broca escalonada, conforme condições delineadas no planejamento fatorial e resumidas na Tabela 3.

A Figura 32 contém a variação do torque em função do tempo, para uma mesma rotação (N) e diferentes avanços. A mesma informação é dada na Figura 29, mas para um mesmo valor de avanço (f) e diferentes rotações. As energias de corte

para todas as combinações N,f são apresentadas na Figura 33. As curvas apresentadas representam a média das três replicações para as 9 combinações.

Pode-se observar que os maiores valores de torque ocorrem quando a broca penetra os dois degraus (diâmetros) dentro da peça. Isto, obviamente, era esperado pois a profundidade de corte é máxima nesse instante. Dentre as condições ensaiadas, o maior torque (> 27 Nm) ocorreu para $N = 1600$ e $f = 0,1$ mm/v. O aumento do torque com o aumento do avanço já foi amplamente reportado na literatura científica, vide por exemplo Astakhov (2014). Entretanto, isso só ocorreu para a rotação de 1600 rpm, indicando que a sua influência sobre o torque depende da rotação.

Entretanto, o valor elevado ($M_z > 25$ Nm) para o avanço de 0,05 mm/v foi inesperado. Supõe-se aqui que esse comportamento seja devido a um desgaste prematuro da broca, porém não houve acompanhamento do desgaste das brocas durante os ensaios.

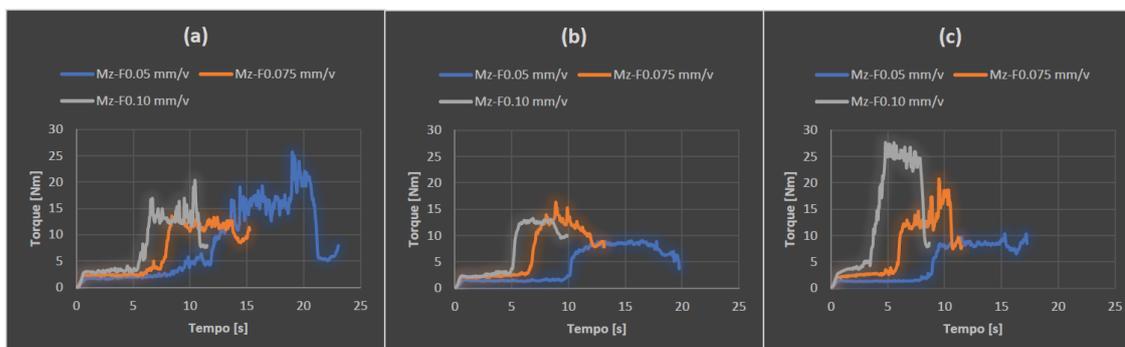
A partir dos valores de torque, determinaram-se que a energia de corte aumenta com o aumento da área. Em seguida, os valores da energia de corte para cada uma das condições ensaiadas foram estimados pelo método descrito no Capítulo 3 (vide Equação 8) e os resultados médios (média de três repetições) estão apresentados na Figura 33. A partir do que foi discutido no Capítulo 2, esperava-se que a energia de corte não fosse influenciada pela rotação.

Sobre o efeito do avanço na energia de corte, pode-se considerar como aceitável, pois tal como comentado anteriormente ele tem influência sobre o torque. Por outro lado, o efeito da rotação sobre a energia só ocorrerá se ela também influenciar o torque, mesmo que indiretamente. Entretanto, na literatura especializada, não existe consenso sobre essa influência. Por exemplo, STEPHENSON e AGAPIOU (1992) observaram que a força de corte, por conseguinte o torque, varia significativamente com a velocidade em testes realizados com a aplicação de fluido de corte, mas sem efeito na sua ausência. Para Astakhov (2014), a velocidade de corte tem pouca influência sobre o torque. Nas palavras dele: "*As the cutting speed has a weak influence on the cutting force, it also has little influence on the drilling torque*". Em uma série de experimentos planejados para avaliar o efeito do avanço, ângulo de saída, e velocidade de corte sobre as pressões específicas de corte (normal e tangencial), Hamade *et al* (2006) reportaram que para a furação da liga de alumínio 6061 T6, a velocidade influencia os esforços de corte. Ainda segundo eles, a energia

específica de corte diminui com o aumento da velocidade de corte, pois até um certo limite, as forças aumentam com o aumento da velocidade até a ocorrência do efeito de amolecimento devido ao calor gerado dominar os efeitos do encruamento provocados pelo aumento da deformação e da taxa de deformação. Devido ao elevado gradiente de velocidade ao longo da aresta de corte, existe a possibilidade de formação de aresta postiça, principalmente em velocidades mais baixas. A aresta postiça altera o mecanismo de formação de cavaco e, por conseguinte influencia o torque. Dessa forma, pode-se dizer que, indiretamente, a velocidade de corte pode influenciar o torque. Uma discussão mais aprofundada sobre os efeitos da aresta postiça nos esforços de corte em furação, pode ser vista em Rubenstein (1991).

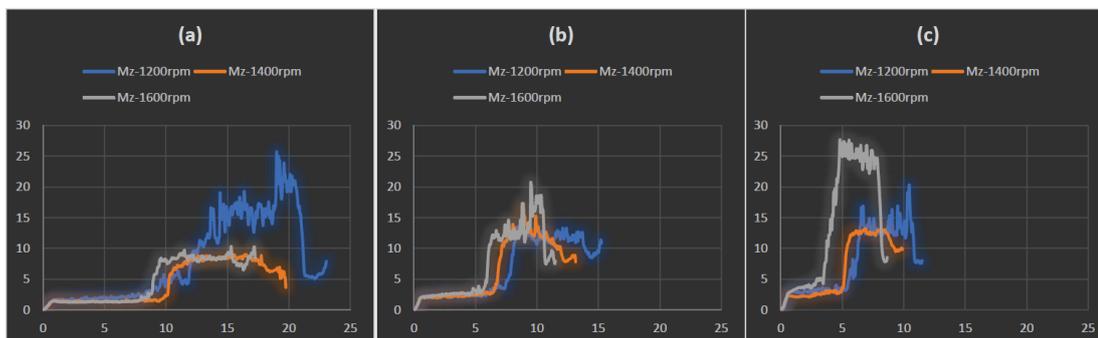
Os experimentos aqui realizados não permitiram avaliar a formação da aresta postiça, bem como o efeito direto da velocidade (encruamento e amolecimento) sobre o torque. Entretanto, deve ser registrado que, pela inexistência de um acompanhamento rigoroso da deterioração das brocas, existe a possibilidade de que os elevados valores de torque medidos, principalmente na condição $N = 1200\text{rpm}$ e $f = 0,05\text{ mm/v}$, tenham sido influenciados pelo desgaste prematuro das arestas de corte.

FIGURA 33 – VARIAÇÃO DO TORQUE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE PARA OS TRÊS AVANÇOS E DIFERENTES ROTAÇÕES. (A) 1200 rpm; (B) 1400 rpm; (C) 1600 rpm



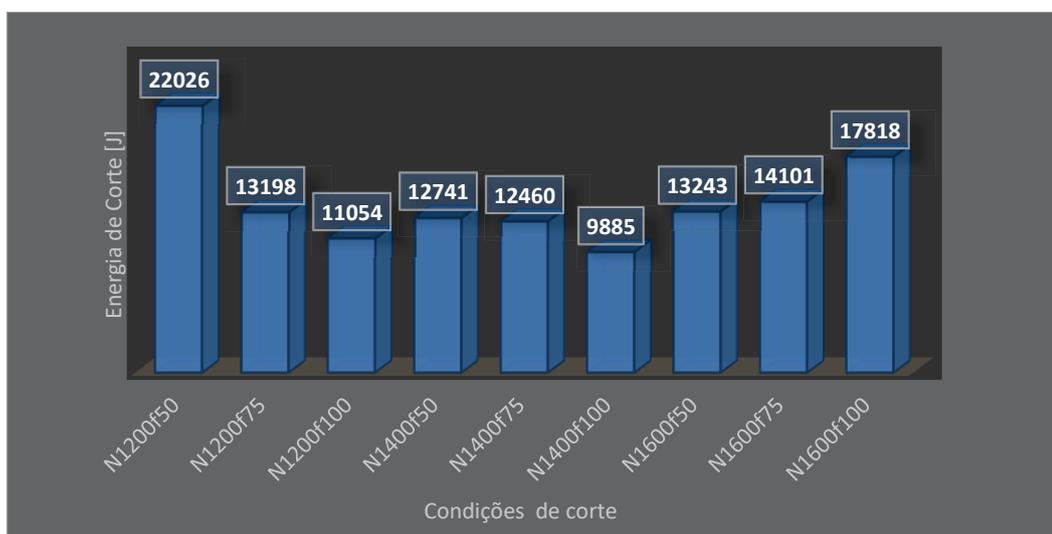
Fonte: Próprio autor (2022).

FIGURA 34 – VARIAÇÃO DO TORQUE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE PARA AS TRÊS ROTAÇÕES E DIFERENTES AVANÇOS. (a) 0,05 mm/v; (b) 0,075 mm/v; (c) 0,1 mm/v



Fonte: Próprio autor (2022).

FIGURA 35 – ENERGIA DE CORTE PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE ROTAÇÃO (N) E AVANÇO (f)



Fonte: Próprio autor (2022).

TABELA 4 – ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA ENERGIA DE CORTE

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	329251608	41156451	13,83	0,000
Linear	4	127577703	31894426	10,72	0,000
N	2	51567005	25783502	8,67	0,002
F	2	76010699	38005349	12,77	0,000
Interações de 2 fatores	4	201673905	50418476	16,95	0,000
N*F	4	201673905	50418476	16,95	0,000
Erro	18	53554818	2975268		
Total	26	382806426			

Fonte: Próprio autor (2022).

4.5 ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NA FURAÇÃO COM BROCA ESCALONADA

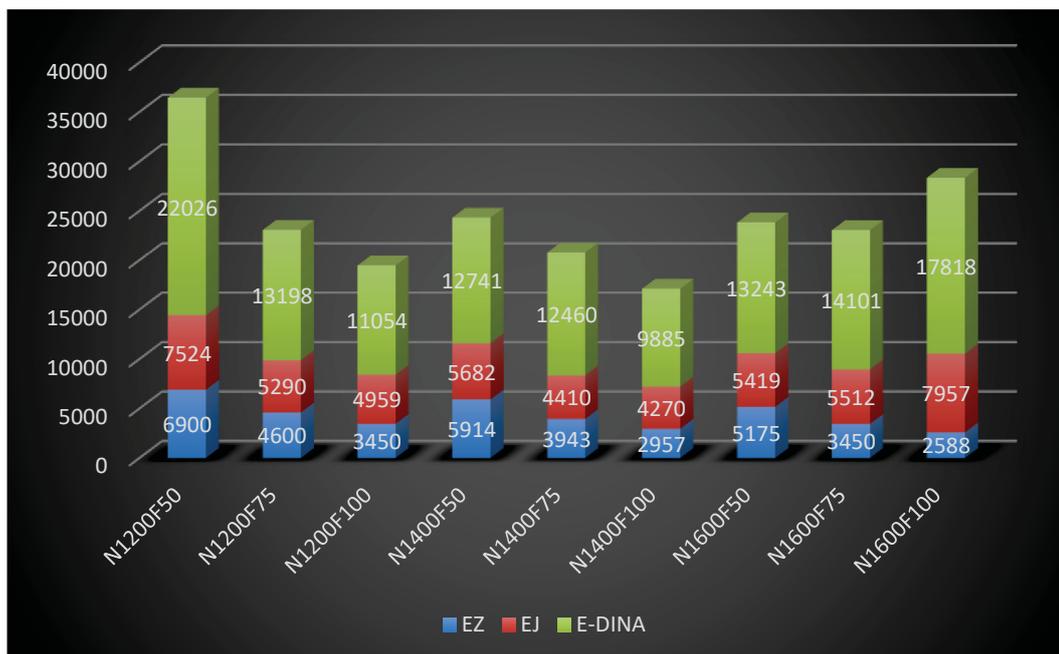
Os resultados apresentados nesta seção referem-se às medições realizadas com o medidor instalado próximo ao inversor, tal como esquematizado na Figura 35. Apesar de não representar a energia total consumida no processo de furação em uma máquina CNC, essa parcela compreende todo o consumo de energia que varia com as condições corte (ferramenta, rotação e avanço). O Gráfico 9 contém os resultados médios de três replicações para as nove condições avaliadas.

No referido Gráfico 10, EZ refere-se à energia elétrica dissipada para manter o motor na rotação programada, também denominada energia em vazio. O termo EJ indica a energia dissipada por efeito Joule no motor e no inversor, mas que não foi convertida em trabalho. Essa parcela representa um acréscimo que é medido durante o corte. A energia gasta no corte (E-DINA) é, exatamente, aquela estimada a partir das medições do torque e já apresentadas na Figura 35. No gráfico 10, a rotação (rpm) está indicada pelos números subsequentes às letras N e os avanços (mm/v) pelos valores indicados após as letras F. Assim, a informação N1200F50 significa uma rotação de 1200 rpm e um avanço de 0,05 mm/v.

A energia dissipada para manter o motor na rotação programada foi obtida a partir da leitura de potência durante o período de estabilização, tal como informado no Gráfico . Os valores médios de potência foram multiplicados pelos tempos de corte, em cada uma das condições ensaiadas, obtendo-se assim uma estimativa de EZ. Os valores de EJ foram obtidos pela subtração da energia total (medida na entrada do inversor da máquina) dos valores de EZ e E-DINA.

Considerando o planejamento fatorial 3^2 delineado, pode-se observar que ambos os fatores (rotação e avanço) e a interação entre eles influenciam a energia total (ET) medida antes do inversor, tal como revelado pela análise da variância realizada e resumida na TABELA 4. Diferentemente do que foi discutido a respeito da energia de corte na seção anterior, o efeito da rotação sobre a ET era esperado, pois maiores rotações demandam maiores valores de EZ, tal como apresentado no Gráfico 10. Entretanto, o valor elevado, registrado para a condição $N = 1200$ rpm e $f = 0,05$ mm/v, não corrobora esta afirmação. O motivo desse comportamento estranho pode ser creditado ao desgaste prematuro da broca quando da execução dos experimentos nessa condição

GRAFICO 10 – CONSUMO DE ENERGIA AVALIADO NA ENTRADA DO INVERSOR E DISTRIBUÍDO NAS FASES DE CORTE (E-DINA), VAZIO (EZ) E ACRÉSCIMO POR EFEITO JOULE



Fonte: Próprio autor (2022).

TABELA 5 – ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA ENERGIA ELÉTRICA

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	762113233	95264154	31,34	0,000
Linear	4	388918575	97229644	31,98	0,000
N	2	154368663	77184331	25,39	0,000
F	2	234549913	117274956	38,58	0,000
Interações de 2 fatores	4	373194658	93298665	30,69	0,000
N*F	4	373194658	93298665	30,69	0,000
Erro	18	54717713	3039873		
Total	26	816830946			

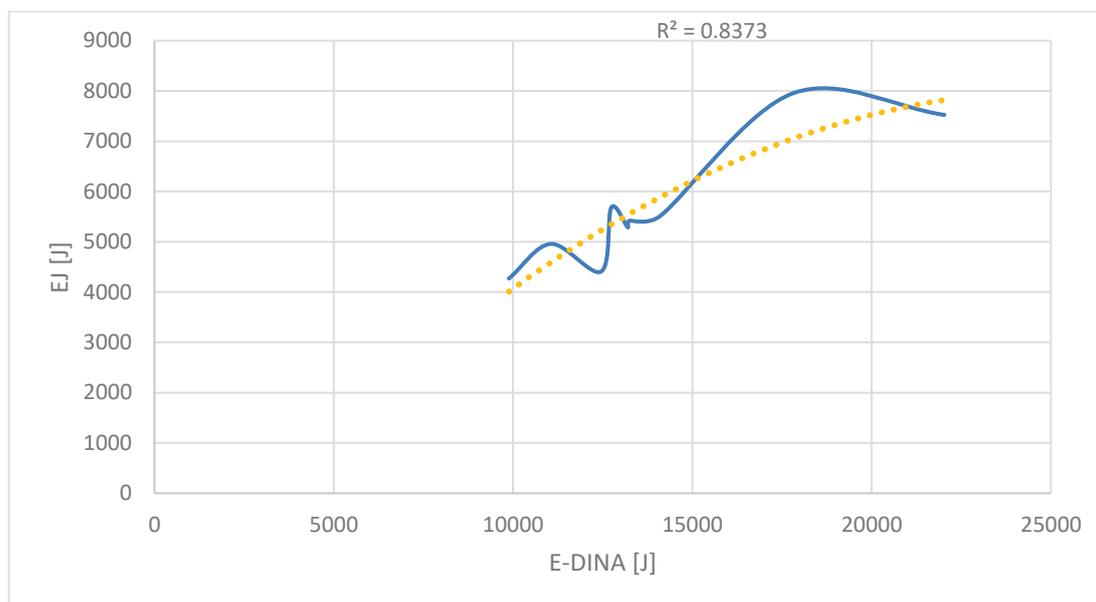
Fonte: Próprio autor (2022).

A partir dos dados apresentados no Gráfico 10, pode-se concluir que os valores de EJ são relativamente elevados, indicando que um parcela significativa da energia utilizada na furação não é transferida para a rotação da broca, mas sim convertida em calor. A partir do que foi apresentado no Capítulo 2, esse comportamento era esperado, pois as perdas nos motores elétricos aumentam com carregamento aplicado, seguindo uma relação quadrática. A relação entre o

carregamento, definido aqui pela energia E-DINA, e as perdas por efeito Joule (EJ) pode ser vista no Gráfico 11, o qual contém ainda uma curva de tendência ajustada por um polinômio de grau 2 com $R^2 > 0,83$.

A aparência da curva real (em azul) pode ser explicada pela baixa resolução do instrumento utilizado na medição da potência elétrica ativa, a qual foi adotada tanto para a estimativa da energia total quanto da energia em vazio (EZ).

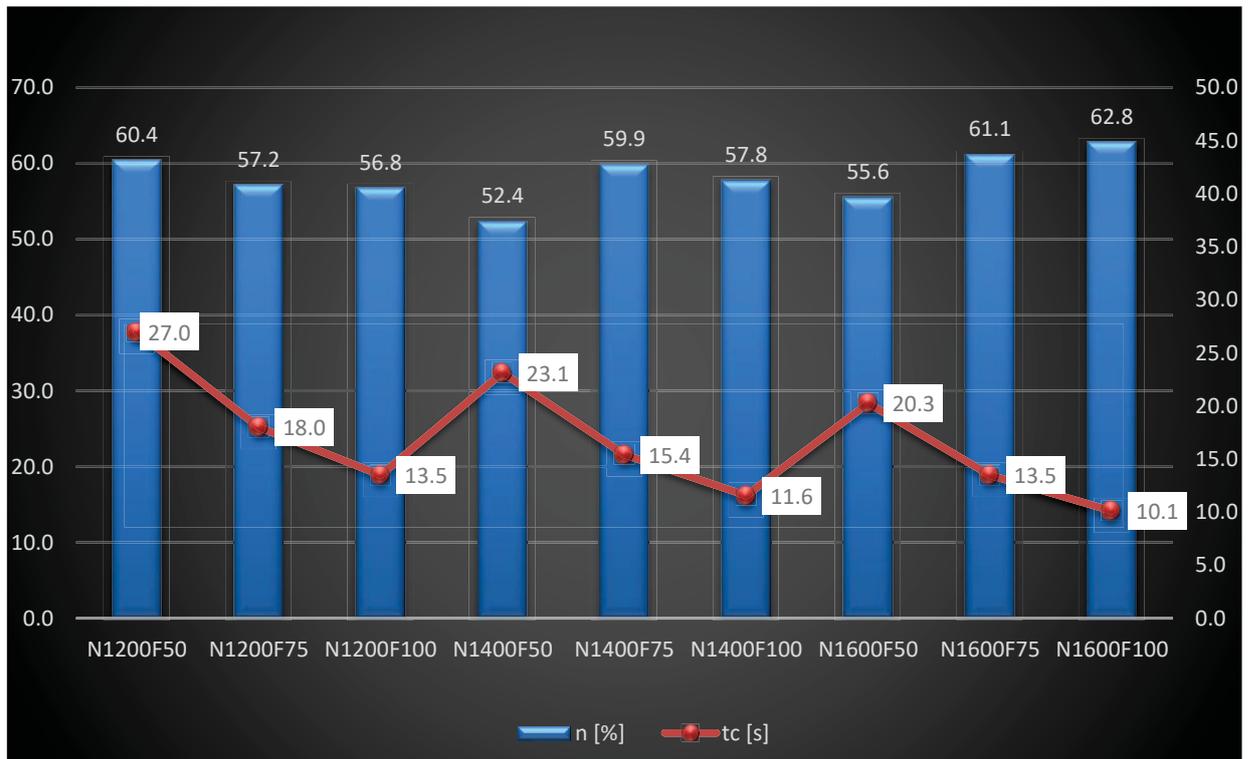
GRAFICO 11 - RELAÇÃO ENTRE O CARREGAMENTO (E-DINA) E AS PERDAS POR EFEITO JOULE NO SISTEMA INVERSOR/MOTO



Fonte: Próprio autor (2022).

Apesar de não ser objetivo deste trabalho, os resultados obtidos possibilitam avaliar a eficiência energética do sistema inversor/motor da máquina utilizada, tal como indicado no Gráfico 12. Neste caso, a eficiência (η) foi estimada pela relação E-DINA/ET. O referido gráfico contém ainda o tempo de corte (t_c) para cada uma das condições ensaiadas. A situação ideal seria uma eficiência mais alta com um baixo tempo de corte, tal como registrado para a condição $N = 1600 \text{ rpm}$, $f = 0,10 \text{ mm/v}$. Por outro lado, uma alta eficiência energética da operação associada a um tempo elevado não é desejada, pois não necessariamente essa eficiência representa a eficiência do processo. Maiores tempos implicam maiores inventários em processo e uma maior ocupação de máquina, os quais, quando associados, podem acarretar maior consumo de energia para a produção de um certo lote de peças.

GRAFICO 12 – EFICIÊNCIA DO SISTEMA INVERSOR/MOTOR E TEMPOS DE CORTE



Fonte: Próprio autor (2022).

5 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo do consumo de energia elétrica no processo de usinagem de furos com múltiplos diâmetros utilizando broca escalonada, por meio da análise da potência elétrica na manufatura de uma mesma operação. Neste sentido realizou-se pesquisas de artigos voltados para o tema em diversas bases de dados, todavia, não foram encontrados estudos para este ferramental do ponto de vista energético. Perante isso, a motivação do desenvolvimento desta pesquisa foi realizar este estudo para alimentar o conhecimento acadêmico e industrial.

Houve o comparativo de energia elétrica consumida no painel geral em relação ao eixo-árvore. No painel geral da máquina a energia consumida foi, aproximadamente, de 39.688 J e próximo ao inversor/motor foi de 26.788 J, uma diferença de 67,49%, este valor que está registrado é suportado pela literatura atual, vide por exemplo Pimenov *et al* (2022), e considerada extremamente crítica, pois ela representa o consumo constante da máquina, o qual independe das operações, condições de corte adotadas e dimensionamento de cada máquina. Por conseguinte, a redução dos tempos improdutivos relacionados à preparação, paradas para troca de ferramentas e carga/descarga de peças são condições mandatórias para redução dessa diferença.

Pode-se comprovar através do ensaio de variação de rotação, que quanto maior a rotação resultam em maiores a potências e em contra partida maior o consumo de energia elétrica. Baseando na literatura corrente, vide por exemplo Albertelli (2017) pequenos aumentos de rotação provocam um aumento da força viscosa nos mancais do motor e do eixo árvore. Além disso, o aumento dessas forças provoca um aumento da corrente elétrica no inversor e no motor.

Nos experimentos realizados a diferença entre as técnicas de furação a broca escalonada apresentou-se 80% mais produtiva e uma diferença de 2,5% menor do ponto de vista energético em relação a brocas separadas. Na produção de grandes lotes de peças, essa diferença é muito significativa e, per se, justifica o investimento em brocas escalonadas por sua alta produtividade. Não obstante às diferenças de comportamento das duas técnicas quando avaliadas sob os critérios de tempo de corte e energia consumida, deve-se registrar que elas são exclusivas das ferramentas,

condições de corte e materiais aqui utilizados e não permitem fazer uma generalização para outras condições de usinagem.

De acordo com os experimentos realizados a rotação e avanço teve-se influência na energia de corte na utilização de broca escalonada. Este resultado devido a influência destes itens tiveram no torque no momento da usinagem, isso devido, ao cavaco formado para cada etapa da furação e a dificuldade da sua saída no momento da furação.

Considerando o planejamento fatorial 3^2 delineado observou-se que ambos os fatores (rotação e avanço) e a interação entre eles influenciam a energia total (ET) medida antes do inversor, o efeito da rotação sobre a ET era esperado, pois maiores rotações demandam maiores valores de energia elétrica dissipada para manter o motor na rotação programada, pode-se concluir que os valores de energia dissipada por efeito Joule no motor e no inversor são relativamente elevados, indicando que um parcela significativa da energia utilizada na furação não é transferida para a rotação da broca, mas sim convertida em calor. Esse comportamento era esperado, pois as perdas nos motores elétricos aumentam com carregamento aplicado, seguindo uma relação quadrática.

De acordo com o estudo realizado recomenda-se para o processo de furação com broca escalonada a mudança dos parâmetros de corte para usinagem com cada diâmetro e/ou utilizando-se a estratégia de furação pica-pau que apresenta o avanço e recuo até o final da furação para retirar o cavaco do furo, bem como melhorar sua quebra. Assim evitando altos esforços de corte e por consequência o alto consumo de energia elétrica na manufatura, entretanto, este estudo deve ser realizado pela engenharia de processos levando em consideração as combinações de materiais, ferramental e maquinário.

De forma geral a broca escalonada é uma ferramenta que apresenta alta produtividade e com consumo de energia elétrica próximo a utilização de brocas separadas, assim sendo a melhor escolha para os processos de usinagem de múltiplos furos em alta escala de produção, todavia, ainda pouco explorada pelos pesquisadores.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas sugere-se:

- Realizar estudo do consumo de energia elétrica com broca Subland.
- Realizar estudo do consumo de energia elétrica com broca escalonada utilizando diferentes tipos de refrigeração.
- Pesquisa de otimização do consumo de energia elétrica e de corte com broca escalonada ou Subland.
- Pesquisa com furação com broca escalonada em diferentes tipos de materiais.
- Estudo da influência de diferentes tipos de afiação de brocas escalonadas com a energia elétrica consumida.

REFERÊNCIAS

- AGAMLOH, E. B.; WALLACE, A. K.; JOUANNE, A.; ANDERSON, K. J. AND ROOKS, J. A., **Assessment of Nonintrusive Motor Efficiency Estimators. IEEE Transactions on Industry Applications**, volume 41, número 1, janeiro/fevereiro 2005.
- AUINGER, H. **Efficiency of electric motors under practical conditions**, Power Engineering Journal 2006;15(3):163-7
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Brocas Helicoidais - Termos, definições e tipos. **ABNT NBR ISO 5019**, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gradezas Básicas em Usinagem e Retificação. **ABNT NBR ISO 3002-1**, 2013.
- ASTAKHOV. **Drills: science and technology of advanced operations**. 2014.
- ALBERTELLI, P. (2017). **Energy saving opportunities in direct drive machine tool spindles**. *Journal of cleaner production*, 165, 855-873.
- BATZER, S.A., Haan, D.M., Rao, P.D., Olson, W.W. and Sutherland, J.W., 1998, “**Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast aluminum alloys**”, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 79, pp. 72–78.
- BEN. **Balanco Energetico Nacional**. 2019. p. 73, 2021.
- 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. 4, p. 420–428, 2012.
- BOEIRA, A. et al. **Descrição da geometria de brocas helicoidais a partir de modelos matemáticos combinados a métodos de medição tridimensional**. 5 Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, p. 10, 2009.
- BOEIRA, A. M. G. **Modelagem e Simulação das Forças na Furação com Brocas Helicoidais a Partir de Dados Obtidos no Torneamento de Segmentos Cilíndricos**. p. 190, 2010.
- BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; ET ALI.; **Eficiência Energética: Teoria e Prática**. Fupai, Unifei, PROCEL/Eletronbras, 2007.
- BURDEN, R. e FAIRES, D. **Análise Numérica**. Editora Perason. Ed. 1. 2003.
- CHINCHANIKAR, S.; KORE, S. S.; HUJARE, P. A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, n. PA, p. 56–70, 2021.

CHISTÉ, M. **A INFLUÊNCIA DO IROG NA GESTÃO E MELHORIA CONTÍNUA DOS EQUIPAMENTOS E PROCESSOS: ESTUDO DE CASO EM UMA CÉLULA DE MANUFATURA NA EMPRESA MASTER SISTEMAS AUTOMOTIVOS LTDA.** 2012.

COSTA, f.s et al. **Ganhos de produtividade e redução de perdas com o uso de sistemas toolsetter laser.** In: encontro nacional de engenharia de produção, 34.; 2014, curitiba. Anais... Curitiba: up, 2014. P 1-14.

CITISYSTEMS. **Fator de Potência: Legislação na Distribuição e Correções - Citisystems.** Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/fator-de-potencia-legislacao-distribuicao-correcoes/>>. Acesso em: 10 out. 2021.

DEGENHARDT, J.A., DeVor, R.E. and Kapoor, S.G., 2005, “**Generalized groove-type chip breaker effects on drilling for different drill diameters and flute shapes**”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 45, pp. 1588-1597.

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 5. ed., São Paulo: Artliber Editora Ltda., 255 p, 2006.

DIN 8589, **Manufacturing processes chip removal.** Editora Beuth GmbH, 2003.

DEL TORO, V., **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** Editora Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1994.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 - Ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética,** p. 256, 2020.

FITZPATRICK, M. **Introdução aos Processos de Usinagem,** 2013..

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: E. Blücher, 1972.

FERRARESI, D. **Apostila de Furação.** São Paulo: E. Blücher, 1972.

FLUKE. **Analísadores de Energia e de Qualidade de Energia Fluke 434/435 | Fluke.** Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/434-435>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **Brasil Rumo à Energia Limpa - GBC Brasil.** Disponível em: <<https://www.gbcbrasil.org.br/brasil-rumo-a-energia-limpa/>>. Acesso em: 2 out. 2021.

GUIDORIZZI, H. L. **Um curso de cálculo.** 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, Vol. 1. 2001.

GHINATO, Paulo. **Sistema Toyota de Produção: mais do que simplesmente Just-intime**. Caxias do Sul: Editora da UCS, 1996.

Guidorizzi, H. L., Um curso de Cálculo, V. 1, Livros Técnicos e Científicos Ed. Ltda, 5a edição (2001).

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems**. 2016.

2.26 GHINATO, P. SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO: MAIS DO QUE SIMPLES JUST-IN-TIME- AUTOMAÇÃO E ZERO DEFEITO. CAXIAS DO SUL: EDUCS, 1996.

GROSS, D. et al. **Investigation of the influence of lubricating oils on the turning of metallic materials with cryogenic minimum quantity lubrication**. *Procedia CIRP*, v. 80, p. 95–100, 2019.

GUO, Y. et al. Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning. *Procedia CIRP*, v. 1, n. 1, p. 512–517, 2012.

HAMEED, S. et al. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 5–8, p. 1835–1841, 2016.

HASS. **Centro de usinagem de 3 eixos - VF-2SS - Haas Automation - vertical / de alta velocidade / com acionamento direto**. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/haas-automation/product-7235-1054149.html>>. Acesso em: 16 set. 2021.

IQBAL, A., Suhaimi, H., & He, N. (2019). **A sustainability comparison between drilling and milling for hole-enlargement in machining of hardened steels**. *Machining Science and Technology*, 23(5), 712-733.

JIA, S. et al. Energy modeling and visualization analysis method of drilling processes in the manufacturing industry. *Energy*, v. 228, p. 120567, 2021.

JURKO, J. et al. **Study on screw drill wear when drilling X6Cr16Ni8Mo**.

KANT, G.; SANGWAN, K. S. **Predictive modelling for energy consumption in machining using artificial neural network**. *Procedia CIRP*, v. 37, p. 205–210, 2015.

Ke, F., Ni, J. and Stephenson, D.A., 2006, “**Chip thickening in deep-hole drilling**”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 46, pp. 1500-1507.

Ke, F., Ni, J. and Stephenson, D.A., 2005, “**Continuous chip formation in drilling**”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 45, pp. 1652-1658.

KHANNA, N. et al. **Energy Consumption and Lifecycle Assessment Comparison of Cutting Fluids for Drilling Titanium Alloy**. *Procedia CIRP*, v. 98, p. 175–180, 2021.

KISTLER. **Dinamómetros para a medição da força de corte** | Kistler. Disponível em: <<https://www.kistler.com/pt/solucoes/testes-de-investigacao-e-desenvolvimento/dinamometros-para-a-medicao-da-forca-de-corte/>>. Acesso em: 8 jul. 2021.

KOKLU, U.; COBAN, H. Effect of dipped cryogenic approach on thrust force, temperature, tool wear and chip formation in drilling of AZ31 magnesium alloy. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 2870–2880, 2020.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. *Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren*. 5 ed. Berlin: Springer, 471 p, 1997.

LEAN PRODUCTION, **OEE (OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS)**, Disponível em: <https://www.leanproduction.com/oeef/>. Acesso em: maio 2022.

LI, R., Riester, L., Watkins, T.R., Blau, P.J. and Shih, A.J., 2008, “**Metallurgical analysis and nanoindentation characterization of Ti–6Al–4V workpiece and chips in high-throughput drilling**”, *Materials Science and Engineering A*, No. 472, pp. 115-124.

LI, W. et al. **An investigation into fixed energy consumption of machine tools**. *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. **Anais...**2011

LI, W.; KARA, S. **An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: A case of turning process**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. **Anais...**set. 2011 *stainless steel. Journal Manufacturing Engineering*, v.2, p.17-20, 2011.

LIU, F. **Content Architecture and Future Trends of Energy Efficiency Research on Machining Systems**. *Journal of Mechanical Engineering*, v. 49, n. 19, p. 87, 2013.

LOTT, P. *et al.* **Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM)**. *Physics Procedia*, n.12, p. 683–690, 2011.

LITMAN, T.; MACCOY, G. A.; DOUGLASS, J. G.; **Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook**. Washington State Energy Office, outubro, 1990.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2015.

MATUMOTO, B. H. **Análise Da Eficiência Energética Em Processos De Usinagem – Comparação De Tempo e Potência**. n. 2015, 2016.

MITSUBISHI ELECTRIC DO BRASIL. Disponível em: <<https://br.mitsubishielectric.com/fa/pt/index.html>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Product Documentation - NI**. Disponível em: <<https://www.ni.com/docs/en-US/>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

Neto, B. B., Scarminio, I. S., & Bruns, R. E. (1996). **Planejamento e otimização de experimentos** (p. 298). Ed. da UNICAMP.

QIN, Y.; & ZHAO, YULONG; LI, Y.; ZHAO, YOU; WANG, P. A novel dynamometer for monitoring milling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v 92. p. 2535–2543, 2017.

PELEGRINO, D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas - ferramentas**. p. 111, 2018.

PEREIRA, O. et al. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 440–449, 2016.

PEREIRA, O. et al. Process performance and life cycle assessment of friction drilling on dual-phase steel. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 1147–1156, 2019.

Pimenov, D. Y., Mia, M., Gupta, M. K., Machado, Á. R., Pintaude, G., Unune, D. R., ... & Kuntoğlu, M. (2022). **Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112660.

OHNO, T. O Sistema Toyota de Produção. **Além da Produção em Larga Escala**. Bookman, Porto Alegre, RS, 1997.

RUBENSTEIN, C. (1991). **The torque and thrust force in twist drilling—II. Comparison of experimental observations with deductions from theory**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 31(4), 491-504.

PERVAIZ, S., & Deiab, I. (2015). **Surface roughness and energy consumption analysis of conventional and peck drilling approaches**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(12), 2180-2195.

ROTONDARO, R.G. **Six Sigma: estratégia gerencial para melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo: Atlas, 2002.

RTS CUTTING TOOLS. **Fabricante de furadeiras escalonadas Subland - Furadeira Subland (2-2) | Ferramentas de corte RTS, Inc**. Disponível em:

<<https://www.rtscut.com/subland-tools.html>>. Acesso em: 3 out. 2022.

RUIZ, L. G. B. et al. **A case study on understanding energy consumption through prediction and visualization (VIMOEN)**. Journal of Building Engineering, v. 30, n. August 2019, p. 101315, 2020.

SANDVIK. **Furação escalonada e com chanfros**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/pages/step-drilling-or-step-and-chamfer-drilling.aspx>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

S. Niketh, G. L. **Samuel Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy J Clean Prod**, 167 (2018), pp. 253- 270, 10.1016/j.jclepro.2017.08.178.

SCHUDELEIT, T. et al. **The Total Energy Efficiency Index for machine tools. Energy**, v. 102, p. 682–693, 2016.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida**. Tradução Rolf Bertrand Schroeter e Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2002.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 21, p. 172–179, 2016.

Soares, C. B., Hoga, L. A., Peduzzi, M., Sangaletti, C., Yonekura, T., & Silva, D. R. (2014).

SIHAG, N.; SANGWAN, K. S. **A systematic literature review on machine tool energy consumption**. Journal of Cleaner Production, v. 275, p. 123125, 1 dez. 2020.

STAL. **Multa de Energia Reativa Excedente | Stal**. Disponível em: <<https://www.stalengenharia.com.br/post-multa-energia-reativa-excedente.html>>. Acesso em: 10 out. 2021.

STEPHENSON, David A. AGAPIOU, John S. **Metal Cutting Theory and Practise**. 3 Edição. 2016.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de Corte**. 2. 4. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 314 p, 2008

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de Corte**. 1. 2. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 249 p, 1995.

TUO, J. et al. **Energy efficiency evaluation for machining systems through virtual part. Energy**, v. 159, p. 172–183, 2018.

TECNOLOGIA, V. S. E. **Como calcular o OEE? | OEE.com.br**. Disponível em:

<<https://www.oeo.com.br/como-calcular-o-oeo/>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

TOTIS, G.; ADAMS, O.; SORTINO, M.; VESELOVAC, D.; KLOCKE, F. Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications. *Measurement*, v. 19, p. 164-181, 2010.

VENTURI, J. J. (2015). **Álgebra Vetorial e Geometria Analítica**. 10ª Edição. *Biblioteca Central UFPR*.

VIEIRA, S. **Fundamentos De Estatística**. p. 194, 2018.

WANG, Q. et al. Energy consumption model for drilling processes based on cutting force. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 22, 2019.

W. F. Sales, A.E. Diniz, A. R. Machado **Application of cutting fluids in machining processes**. *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, 23 (2) (2001), 10.1590/s0100-73862001000200009.

WHITAKER, J. C. **Power Systems Handbook**. Third Edition. [s.l.] CRC Press 2006, 2007.

WPR. **Consumo de energia por país 2021**. Disponível em: <<https://worldpopulationreview.com/country-rankings/energy-consumption-by-country>>. Acesso em: 2 out. 2021.

WYSOKIÁ,KA-SENKUS, A. **Effective energy management in the organization in the context of implementing the sustainability concept**. Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020. **Anais...2019**

YINGJIE, Z. Energy efficiency techniques in machining process: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, n. 71, p. 1123– 1132, 2014.

ZEIN, A. **Transition Towards Energy Efficient Machine Tools**. p. 212, 2012.

ZHOU, L. et al. **Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review**. *Journal of Cleaner Production*, 2019.

APÊNDICE 1 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA ENSAIOS BROCA ESCALONADA

O00902 (MESTRADO);

G40 G17 G80 G54;

G0 G28 G91 Z0;

(BROCA ESCALONADA);

G49 T14 M6;

G90;

G43 H05;

M3 S1200;(Valor varia de acordo com Fatorial)

G4 P30000;

G0 X0 Y0;

G0 Z10;

G1 Z2 F300;

G81 Z-23 F120; (Valor varia de acordo com Fatorial)

G80;

G1 Z5 F5000;

G0 G28 G91 Z0;

M30;

APÊNDICE 2 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA ENSAIOS MULTIPLAS FERRAMANTAS

O00903(MESTRADO);

(PROGRAMA ENSAIO BROCA 7 mm);

G40 G17 G80 G57;

G0 G28 G91 Z0;

(BROCA ESCALONADA - CENTRO);

G49 T14 M6;

G90;

G43 H14;

M3 S1000;

G4 P30000;

G0 X0 Y0;

G0 Z10;

G1 Z2 F300;

G81 Z-10.5 F70; (AVANÇO)

G80;

G1 Z2 F500;

G0 G28 G91 Z0;

(BROCA D7 - PASSANTE);

G49 T21 M6;

G90;

G43 H2;

M3 S1000

G4 P30000

G0 X0 Y0;

G0 Z10;

G1 Z2 F300;

G81 Z-27.03 F70; (AVANÇO)

G80;

G1 Z5 F500;

G0 G28 G91 Z0

(BROCA ESCALONADA – DIAMETRO 16mm);

G49 T14 M6;

G90;

G43 H14;

M3 S1000

G4 P30000;

G0 X0 Y0;

G0 Z10;

G1 Z2 F300;

G81 Z-27.03 F70; (AVANÇO)

G80;

G1 Z5 F500;

G0 G28 G91 Z0;

G0 G28 G91 Y0;

M30;

APÊNDICE 3 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA ENSAIOS A VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO

O00905(TESTE DE ROTAÇÕES)

G40 G17 G80 G54;

G0 G28 G91 Z0;

(BROCA ESCALONADA);

G49 T14 M6;

G90;

G43 H14;

M3 S500

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S1000;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S1500;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S2000;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S2500;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S3000;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S3500;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S4000;

G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S4500;

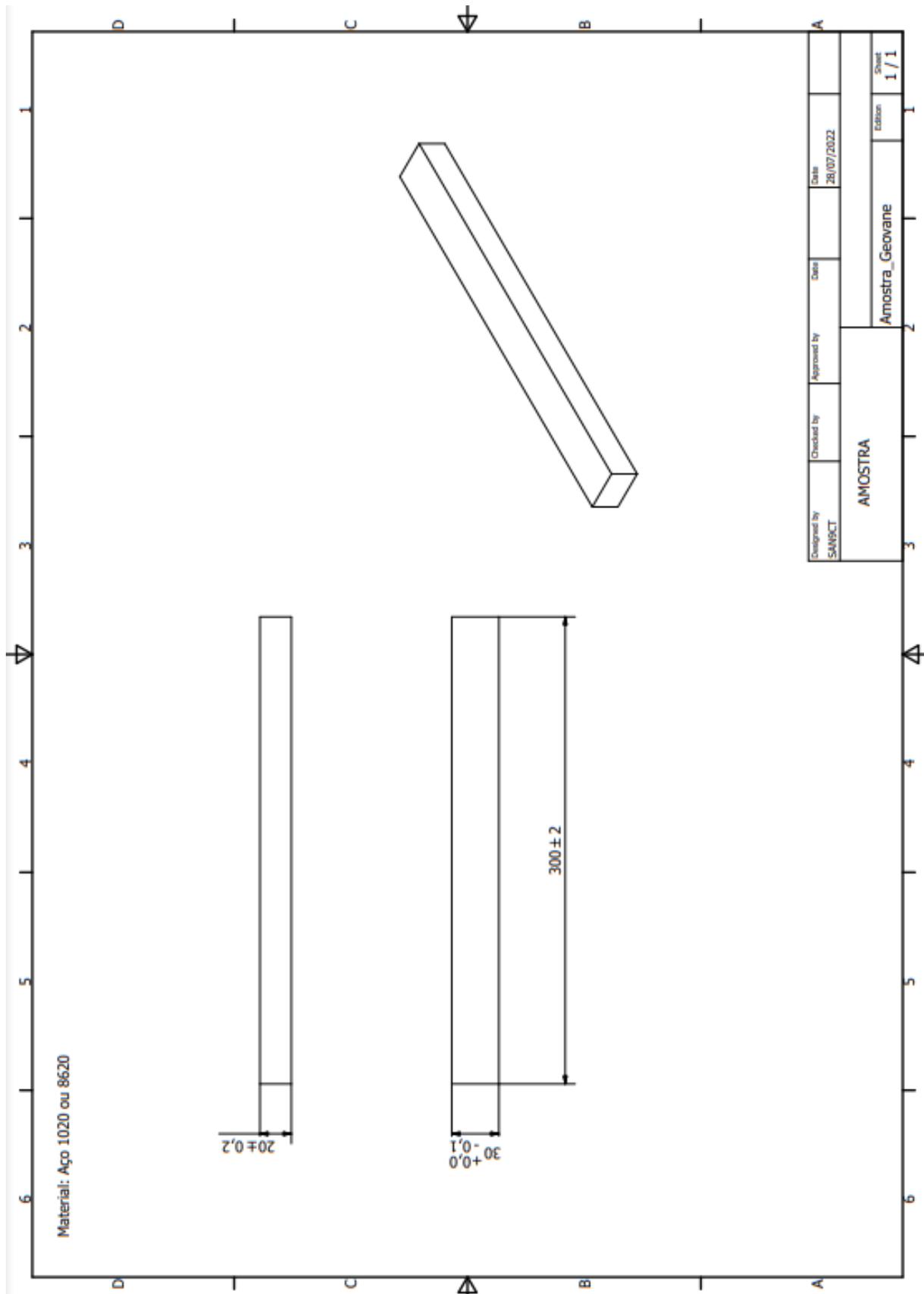
G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M3 S5000;

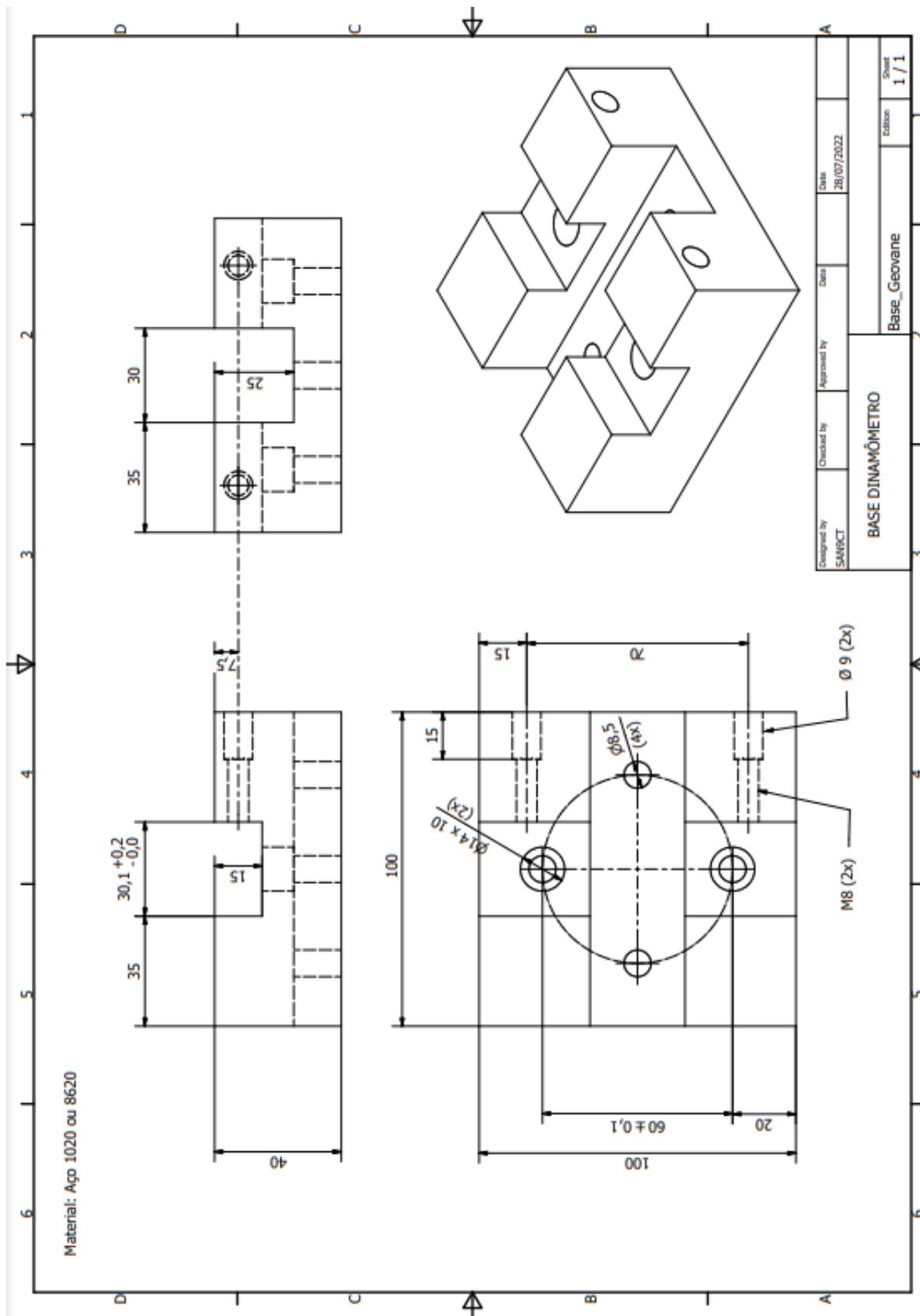
G4 P30000 (TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO)

M30;

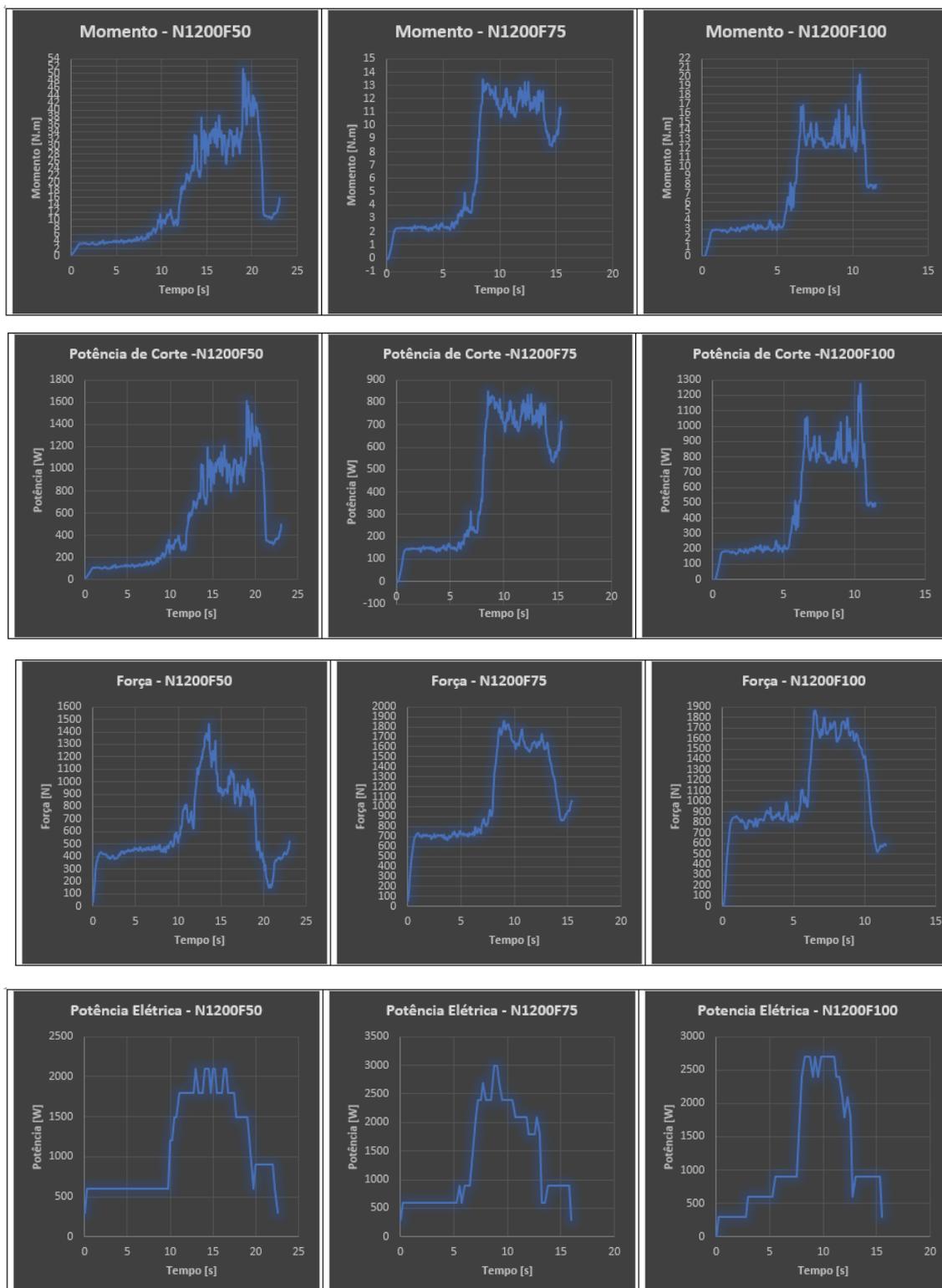
APÊNDICE 4 – DESENHO CORPO DE PROVA



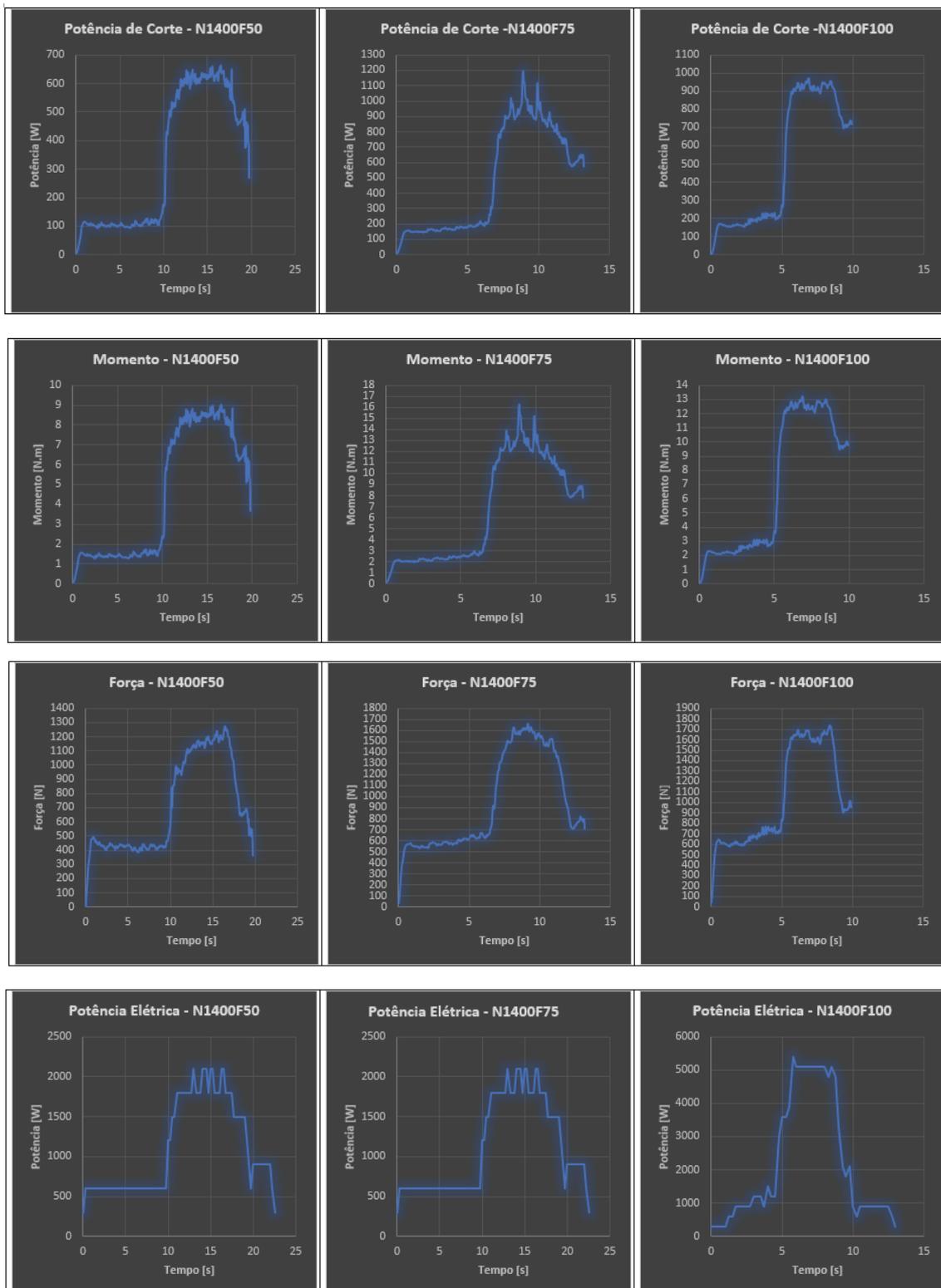
APÊNDICE 5 – DESENHO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO CORPO DE PROVAS



APÊNDICE 6 – GRÁFICOS DE POTÊNCIA DE CORTE, POTÊNCIA ELÉTRICA, FORÇA E MOMENTO TORÇOR N1200 F50, 75 E 100



APÊNDICE 7 – GRÁFICOS DE POTÊNCIA DE CORTE, POTÊNCIA ELÉTRICA, FORÇA E MOMENTO TORÇOR N1400F50, N1400F75 E N1400F100



APÊNDICE 8 – GRÁFICOS DE POTÊNCIA DE CORTE, POTÊNCIA ELÉTRICA, FORÇA E MOMENTO TORÇOR N1600 E F50,75 E 100

