



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**REBECA GOMES DANTAS CAETANO**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
EM PROCESSOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Maracanaú, Ceará

2019

**REBECA GOMES DANTAS CAETANO**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
EM PROCESSOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Energias Renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nélio Costa Freitas.

Maracanaú, Ceará

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário  
Gláucio Barreto de Lima - CRB-3/995

C128 Caetano, Rebeca Gomes Dantas.  
Influência dos parâmetros de corte na  
eficiência energética em processos de usinagem por  
torneamento / Rebeca Gomes Dantas Caetano -- 2019.  
135 f.

Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) -  
- Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Ceará, Campus Maracanaú, 2019.  
Orientador: Prof. Dr. Francisco Nélio Costa  
Freitas.

1. USINAGEM. 2. TORNEAMENTO. 3. EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA. I. Título.

CDD 621.942

Sistema AutoCata(Desenvolvido por Cledson Oliveira)  
SIBI/PROEN - Biblioteca Rachel de Queiroz - IFCE-Maracanaú

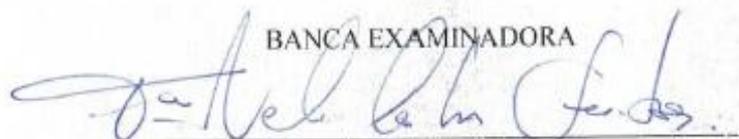
REBECA GOMES DANTAS CAETANO

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM  
PROCESSOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO

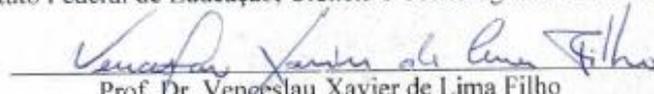
Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 22/08/2019.

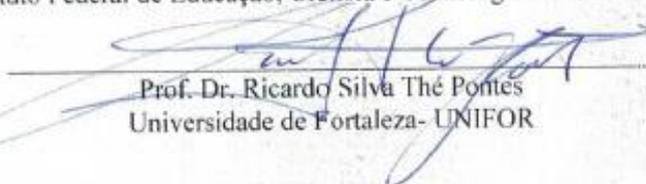
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco Nélcio Costa Freitas (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Venésclau Xavier de Lima Filho  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes  
Universidade de Fortaleza- UNIFOR

## DEDICATÓRIA

*A Deus,*

*Aos meus pais,*

*Aos meus avós,*

*Ao meu namorado Yago,*

*Aos meus familiares e amigos,*

*A todos que colaboraram com minha  
formação intelectual e moral.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar a chegar até aqui, permitindo a conclusão do mestrado, também por colocar pessoas essenciais na minha vida e me abençoar sempre.

Aos meus pais, Saulo e Germana, pelo amor, carinho, dedicação, aprendizado, suporte, por me acalmarem nos momentos de desespero e almejarem o melhor para mim.

À minha Bisa, in memoriam, aos meus avós, pelo amor incondicional, cuidados comigo, por participarem de cada instante da minha vida.

Ao Yago, meu amor, pelo apoio, força, incentivo, paciência, por me reerguer nos momentos de fraqueza, torcendo e acreditando em mim, sempre estando ao meu lado nas dificuldades e nas conquistas. Além da ajuda desde o início do mestrado, estudando comigo e fornecendo suporte (material) para a minha pesquisa.

À minha tia Sâmia, in memoriam, tios, primos, Nena e tios do coração por todas as orações, carinho, atenção, mimos e pensamentos positivos.

Aos meus sogros, César e Viviane, por disponibilizarem a Usinagem Santa Bárbara como local de estudo, fornecerem material para a pesquisa e por eliminarem minhas dúvidas.

Ao meu orientador, professor Nélio Freitas, pela caminhada neste trabalho, viabilizando os meus conhecimentos, conselhos, dedicação, sabedoria transmitida e por me guiar neste novo mundo de estudo. Obrigada por acreditar em mim e me tornar uma profissional melhor.

Aos professores do colégio, da Unifor e do IFCE, em especial os professores Graça Rufino, Ricardo Thé, bem como membro da banca de qualificação e defesa, Venício Soares, José Ciro, Frederico Matos, Rodrigo Freitas, Marcelo Parente, Geraldo Ramalho, Venceslau Xavier pelos conhecimentos agregados, participação direta ou indireta na elaboração do trabalho e na minha formação como mestre. Gostaria de agradecer ao professor Luiz Flávio pelo experimento realizado no LACAM (UFC), ao professor Pedro Pedrosa por participar da banca de qualificação e ao professor Venceslau Xavier pela participação na banca de defesa, com suas valiosas contribuições.

Aos meus amigos, em especial, Larissa, Noely, Thais, Bianca, Isabel, Raylla, João, Dário, Julietty, Igor, Caio (parceria como representantes dos discentes), Christine, Rafaelly, Diego e Beatriz por terem participado da minha vida estudantil e por estarem ao meu lado nos momentos bons e ruins.

Aos bolsistas que contribuíram para a realização da pesquisa, Rodrigo, João, Ronilson, Carlos, Renato, William, Ícaro e Camila, a ajuda de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui, também agradeço pelo companheirismo e dedicação ao meu trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

## RESUMO

A eficiência energética tem como objetivo o aumento do rendimento de uma produção, reduzindo o consumo de energia elétrica, diminuindo impactos ambientais sem afetar a qualidade do produto final. Dentro do setor industrial, a usinagem é responsável pelo consumo de 22% da energia elétrica do Brasil. Um método de obter eficiência energética no processo de usinagem é através do estudo da influência dos parâmetros de corte no gasto energético do processo. Esta pesquisa é motivada pela falta de estudos que relacionem parâmetros de processo com o consumo de energia elétrica no processo de torneamento, além da possibilidade de utilizar aços de diferentes propriedades mecânicas. Como objetivo geral, o presente trabalho propõe realizar o estudo da influência dos parâmetros de usinagem na eficiência energética das operações de usinagem na manufatura de componentes mecânicos, a fim de relacionar os parâmetros de processo com os gastos energéticos por meio da potência mecânica utilizada para a remoção do material e da avaliação da energia elétrica utilizada durante o processo. A metodologia proposta é composta pelas seguintes etapas: Analisar a microestrutura dos materiais a serem estudados, através da metalografia, com a finalidade de descrever as características dos aços, analisar a resistência mecânica dos materiais a serem estudados, através do ensaio de microdureza, pré-determinar os parâmetros de usinagem que irão sofrer variações durante o processo, analisar a rugosidade média dos materiais a serem estudados, analisar o consumo de energia elétrica em função do avanço por rotação, tempo de processo, velocidade de corte, rendimento, espessura de corte, força, potência e energia de corte e potência elétrica, utilizados no processo, para cada material a ser estudado, através da operação de faceamento no processo de torneamento, avaliar a facilidade de usinagem dos materiais. Os resultados apresentam que para obter um processo mais eficiente, necessita-se trabalhar com rotações elevadas, maiores avanços e altas velocidades de corte, uma vez que nessas condições tem-se: redução do tempo de processo, maior rendimento da produção, menor força de corte, conseqüentemente, menor desgaste da ferramenta de corte, redução da energia de corte, do consumo de energia elétrica e da potência elétrica.

**Palavras-chave:** Consumo de Energia Elétrica, Eficiência Energética e Parâmetros de Usinagem.

## ABSTRACT

Energy efficiency aims to increase the yield of a production, reducing the consumption of electric energy, reducing environmental impacts and without affecting the quality of the final product. Within the industrial sector, the machining is responsible for the consumption of 22% of the electric energy of Brazil. One method of obtaining energy efficiency in the machining process is through the study of the influence of the cutting parameters on the energy expenditure of the process. This research is motivated by the lack of studies that relate the process parameters to the electric energy consumption in the turning process, besides the possibility of using steels of different mechanical properties. As a general objective, the present work proposes to study the influence of machining parameters on the energy efficiency of machining operations in the manufacture of mechanical components, in order to relate the process parameters to energy expenditures by means of the mechanical power used for the removal of the material and evaluation of the electrical energy used during the process. The proposed methodology is composed of the following steps: To analyze the microstructure of the materials to be studied, through the metallography, to describe the characteristics of the steels, to analyze the mechanical strength of the materials to be studied, through the microhardness test, to determine the parameters of machining that will undergo variations during the process, analyze the average roughness of the materials to be studied, analyze the electric energy consumption as a function of the advance by rotation, process time, cutting speed, yield, cutting thickness, force, power and cutting power and electrical power, used in the process, for each material to be studied, through the faceting operation in the turning process, to evaluate the ease of machining of the materials. As results, to obtain a more efficient process, it is necessary to work with high rotations, greater advances and high speeds of cut, since in these conditions one has: reduction of the process time, greater yield of the production, lower cutting force, consequently, less wear of the cutting tool, reduction of cutting power and electric, of electric power.

**Keywords:** Electric Energy Consumption, Energy Efficiency and Machining Parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Componentes Forças de Usinagem no Torneamento.....	25
Figura 3.1 – Rugosímetro .....	44
Figura 3.2 – Microscópio Óptico Olympus GX 51 e Computador para Capturar Imagens ....	46
Figura 3.3 – Equipamentos Utilizados na Preparação Metalográfica .....	46
Figura 3.4 – Ferramenta de Corte.....	47
Figura 3.5 – Pastilha .....	47
Figura 3.6 – Torno Mecânico .....	48
Figura 3.7 – Representação do Faceamento .....	48
Figura 3.8 – Operação de Faceamento no Torneamento .....	49
Figura 3.9 – Analisador de Energia .....	52
Figura 3.10 – Bancada de Teste.....	52
Figura 3.11 – Curva Característica do Motor .....	53
Figura 3.12 – Fluxograma com as Etapas da Pesquisa.....	54
Figura 4.1 – Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 1020.....	55
Figura 4.2 – Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020 .....	57
Figura 4.3 – Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020 .....	58
Figura 4.4 – Tempo de Processo do Aço 1020.....	59
Figura 4.5 – Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020 .....	60
Figura 4.6 – Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020 .....	62
Figura 4.7 – Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020 .....	64
Figura 4.8 – Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020 .....	65
Figura 4.9 – Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020.....	67
Figura 4.10 – Potência Elétrica do Aço 1020 .....	68
Figura 4.11 – Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 1045.....	69
Figura 4.12 – Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	70
Figura 4.13 – Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	72
Figura 4.14 – Tempo de Processo do Aço 1045.....	73
Figura 4.15 – Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	74
Figura 4.16 – Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	75
Figura 4.17 – Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	77
Figura 4.18 – Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	78

Figura 4.19 – Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045 .....	80
Figura 4.20 – Potência Elétrica do Aço 1045 .....	81
Figura 4.21 – Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 4140.....	82
Figura 4.22 – Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140. .....	84
Figura 4.23 – Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140 .....	85
Figura 4.24 – Tempo de Processo do Aço 4140.....	86
Figura 4.25 – Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140 .....	87
Figura 4.26 – Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140 .....	89
Figura 4.27 – Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140 .....	91
Figura 4.28 – Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140 .....	92
Figura 4.29 – Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140.....	94
Figura 4.30 – Potência Elétrica do Aço 4140.....	95
Figura 4.31 – Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 4340.....	96
Figura 4.32 – Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340.....	97
Figura 4.33 – Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340 .....	99
Figura 4.34 – Tempo de Processo do Aço 4340.....	100
Figura 4.35 – Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340.....	101
Figura 4.36 – Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340.....	103
Figura 4.37 – Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340.....	105
Figura 4.38 – Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340.....	106
Figura 4.39 – Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340.....	108
Figura 4.40 – Potência Elétrica do Aço 4340.....	109
Figura 4.41 – Fotomicrografia Borda e Centro do Aço VC.....	110
Figura 4.42 – Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	111
Figura 4.43 – Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	112
Figura 4.44 – Tempo de Processo do Aço VC.....	113
Figura 4.45 – Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	114
Figura 4.46 – Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	116
Figura 4.47 – Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	118
Figura 4.48 – Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	119
Figura 4.49 – Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC.....	121

Figura 4.50 – Potência Elétrica do Aço VC.....	122
--	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Artigos Mais Relevantes.....	41
Tabela 3.1 – Composição Química dos Aços.....	44
Tabela 3.2 – Variação dos Parâmetros de Usinagem .....	50
Tabela 3.3 – Coeficiente de Força Específica de Corte.....	51
Tabela 4.1 – Redução do Consumo de Energia Elétrica com Aumento de 533,3% da Rotação.....	126

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Controle Numérico Computadorizado
EAM	Usinagem de Arco Elétrico
EDM	Usinagem de Descarga Elétrica
LAM	Usinagem Auxiliar a Laser
MRR	Taxa de Remoção de Material
SAE	“Society of Automotive Engineers”

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
<b>1.1 Justificativa</b> .....	21
<b>1.2 Objetivos</b> .....	22
<i>1.2.1 Objetivo Geral</i> .....	22
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i> .....	22
<b>1.3 Estrutura do Trabalho</b> .....	23
<b>2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
<b>2.1 Parâmetros de Usinagem</b> .....	24
<i>2.1.1 Força de Usinagem</i> .....	25
<b>2.1.1.1 Fatores que Afetam as Forças de Usinagem</b> .....	26
<b>2.1.1.2 Estado da Arte das Forças de Usinagem</b> .....	28
<i>2.1.2 Potência de Corte</i> .....	29
<i>2.1.3 Estado da Arte dos Parâmetros de Corte</i> .....	30
<b>2.2 Energia Específica de Corte</b> .....	32
<i>2.2.1 Estado da Arte da Energia Específica de Corte</i> .....	33
<b>2.3 Facilidade do Material em ser Usinado</b> .....	34
<i>2.3.1 Rugosidade Superficial</i> .....	35
<i>2.3.2 Estado da Arte da Facilidade do Material em ser Usinado</i> .....	35
<b>2.4 Outros Métodos de Obter Eficiência Energética na Usinagem</b> .....	36
<b>2.5 Considerações Finais</b> .....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	43
<b>3.1 Materiais</b> .....	43
<i>3.1.1 Corpos de Prova</i> .....	43
<b>3.2 Métodos</b> .....	44
<i>3.2.1 Características dos Materiais</i> .....	44
<b>3.2.1.1 Rugosidade Média</b> .....	44
<b>3.2.1.2 Microdureza</b> .....	45
<b>3.2.1.3 Microestrutura</b> .....	45
<i>3.2.2 Processos de Usinagem</i> .....	46
<b>3.2.2.1 Ferramenta de Corte</b> .....	47
<b>3.2.2.2 Equipamento para Tornear</b> .....	47
<i>3.2.2.2.1 Processo de Torneamento</i> .....	48

3.2.2.3 Parâmetros de Processo .....	49
3.2.2.4 Coeficiente de Força Específica de Corte .....	50
3.2.2.5 Obtenção da Força, Potência e Energia de Corte.....	51
3.2.2.6 Avaliação da Facilidade do Material em ser Usinado .....	51
3.2.3 <i>Medição do Consumo de Energia Elétrica</i> .....	51
3.3 Avaliação dos Resultados.....	53
3.4 Considerações Finais.....	54
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 1020 .....</b>	<b>55</b>
4.1.1 <i>Fotomicrografia e Dureza Vickers</i> .....	55
4.1.2 <i>Rugosidade</i> .....	56
4.1.3 <i>Diâmetro e Avanço por Rotação</i> .....	58
4.1.4 <i>Tempo de Processo</i> .....	59
4.1.5 <i>Velocidade de Corte</i> .....	60
4.1.6 <i>Rendimento</i> .....	61
4.1.7 <i>Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte</i> .....	63
4.1.8 <i>Espessura de Corte</i> .....	63
4.1.9 <i>Força de Corte</i> .....	65
4.1.10 <i>Energia de Corte</i> .....	66
4.1.11 <i>Potência Elétrica</i> .....	68
<b>4.2 1045 .....</b>	<b>69</b>
4.2.1 <i>Fotomicrografia e Dureza Vickers</i> .....	69
4.2.2 <i>Rugosidade</i> .....	70
4.2.3 <i>Diâmetro e Avanço por Rotação</i> .....	71
4.2.4 <i>Tempo de Processo</i> .....	73
4.2.5 <i>Velocidade de Corte</i> .....	73
4.2.6 <i>Rendimento</i> .....	75
4.2.7 <i>Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte</i> .....	76
4.2.8 <i>Espessura de Corte</i> .....	76
4.2.9 <i>Força de Corte</i> .....	78
4.2.10 <i>Energia de Corte</i> .....	79
4.2.11 <i>Potência Elétrica</i> .....	81
<b>4.3 4140 .....</b>	<b>82</b>
4.3.1 <i>Fotomicrografia e Dureza Vickers</i> .....	82

4.3.2 <i>Rugosidade</i> .....	83
4.3.3 <i>Diâmetro e Avanço por Rotação</i> .....	85
4.3.4 <i>Tempo de Processo</i> .....	86
4.3.5 <i>Velocidade de Corte</i> .....	87
4.3.6 <i>Rendimento</i> .....	88
4.3.7 <i>Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte</i> .....	90
4.3.8 <i>Espessura de Corte</i> .....	90
4.3.9 <i>Força de Corte</i> .....	92
4.3.10 <i>Energia de Corte</i> .....	93
4.3.11 <i>Potência Elétrica</i> .....	95
4.4 4340 .....	96
4.4.1 <i>Fotomicrografia e Dureza Vickers</i> .....	96
4.4.2 <i>Rugosidade</i> .....	97
4.4.3 <i>Diâmetro e Avanço por Rotação</i> .....	98
4.4.4 <i>Tempo de Processo</i> .....	100
4.4.5 <i>Velocidade de Corte</i> .....	101
4.4.6 <i>Rendimento</i> .....	102
4.4.7 <i>Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte</i> .....	104
4.4.8 <i>Espessura de Corte</i> .....	104
4.4.9 <i>Força de Corte</i> .....	106
4.4.10 <i>Energia de Corte</i> .....	107
4.4.11 <i>Potência Elétrica</i> .....	109
4.5 VC .....	110
4.5.1 <i>Fotomicrografia e Dureza Vickers</i> .....	110
4.5.2 <i>Rugosidade</i> .....	110
4.5.3 <i>Diâmetro e Avanço por Rotação</i> .....	112
4.5.4 <i>Tempo de Processo</i> .....	113
4.5.5 <i>Velocidade de Corte</i> .....	114
4.5.6 <i>Rendimento</i> .....	115
4.5.7 <i>Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte</i> .....	117
4.5.8 <i>Espessura de Corte</i> .....	117
4.5.9 <i>Força de Corte</i> .....	119
4.5.10 <i>Energia de Corte</i> .....	120

<b>4.5.11 Potência Elétrica.....</b>	<b>122</b>
<b>4.6 Avaliação da Facilidade do Material em ser Usinado .....</b>	<b>123</b>
<b>4.7 Discussão Geral.....</b>	<b>124</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>127</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>129</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>130</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento crescente no consumo de energia elétrica, tornou-se necessária a sua conservação, a qual não envolve apenas custos, mas também é uma questão ambiental, visto que é importante que haja redução na emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Sendo assim, tornou-se primordial a busca por maior eficiência no sistema de manufatura e sustentabilidade dos processos.

Eficiência Energética busca melhorar o rendimento de uma produção sem aumentar o consumo de energia, utilizando as fontes de energia da melhor forma. Bem como, reduzindo os impactos ambientais e visando maior uso de fontes de energias renováveis. Uma forma de se obter eficiência é a modernização de equipamentos e melhoria nos processos para reduzir o tempo de fabricação e os custos (ABESCO,2015).

De acordo com He et al. (2017) o processo industrial que mais consome energia elétrica é o mecânico, típico da indústria de transformação. Os processos fabris no Brasil são responsáveis pelo consumo de 22% da energia (EPE, 2018).

Um dos processos de manufatura é a usinagem, na qual um método de obter eficiência energética é através do estudo da facilidade do material em ser usinado, destarte descrevendo as dificuldades apresentadas pelo mesmo em sua usinagem, compreendendo as propriedades as quais influenciam no processo. É caracterizada pela vida útil da ferramenta, forças de corte, potência de corte, acabamento superficial e facilidade de retirada do cavaco (GROOVER, 2010).

Parâmetros de usinagem, como velocidade e profundidade de corte, tipo de processo, geometria da ferramenta de corte e fluidos de corte influenciam na facilidade da usinagem do aço, ocorrendo a relação entre o processo, a composição química do aço e a estrutura da matriz de composição do material (LALBONDRE et al., 2014).

Um dos critérios para avaliação da facilidade de usinagem de um material é a força de corte, influenciando no mecanismo de desgaste e indicando o colapso da ferramenta de corte, determinando as condições de corte, analisando a precisão da máquina-ferramenta, além de funcionar como parâmetro para o controle adaptativo do processo e na inspeção dos seus componentes, que é fundamental para o projeto do equipamento (FERRARESI, 1970).

Desde o início do século XX, vem sendo pesquisado a respeito da relação entre a facilidade do material em ser usinado e algumas propriedades tecnológicas de um determinado metal. Wallich e Dabringhaus, em 1930, estudaram sobre a usinagem do aço carbono através de ferramentas de aço rápido e puderam concluir, por exemplo, que ao se desbastar o eixo de

um material com resistência à ruptura de  $45\text{kg/mm}^2$ , utilizando a profundidade de corte de 8 mm e o avanço de 2 mm/giro, deve-se portanto executar o processo com velocidade de corte de 23 m/min de modo a obter 60 minutos de vida na ferramenta de aço rápido (FERRARESI, 1970).

A energia de corte é um parâmetro para o estudo da eficiência energética na usinagem e pode ser calculada por meio do monitoramento das forças de corte, relacionando-se com a potência de corte e a taxa de remoção do material (KING; HAHN,1986).

Um processo de usinagem que pode ser utilizado para realizar a avaliação da facilidade em se usinar um aço é o torneamento, no qual a ferramenta remove o material enquanto a peça está girando, através do corte em um ponto fixo. Para este procedimento, os principais parâmetros são velocidade de corte, profundidade de corte e avanço, que é o espaço deslocado pela ferramenta a cada rotação. Este processo é bastante utilizado nas indústrias na fabricação de diversas peças (TRENT; WRIGHT,2000).

## 1.1 Justificativa

As indústrias de manufatura estão buscando por novas tecnologias a fim de obter maior produtividade e tecnologias de produção que possuem eficiência energética a qual dispõem de vantagem competitiva para a empresa. De acordo com a tecnologia empregada no processo de fabricação, os custos de energia têm impacto relevante no preço final do produto produzido e a conservação de energia é um fator importante na vantagem de mercado devido a prática que visa sustentabilidade (AHN et al. 2016; RIEF et al. 2017).

Carvalho e Gomes (2015) afirmam que os custos com energia na usinagem consistem em um terço do custo total e são propensos a aumentarem anualmente devido a integração de novos processos. Por conseguinte essa tendência motivou, mundialmente, pesquisadores a buscar pela diminuição dos gastos energéticos na indústria manufatureira em diversos modos de uma série de suprimentos no processo unitário (DUFLOU et al., 2012).

A relevância da avaliação da facilidade do material em ser usinado está na possibilidade dos fabricantes de ferramentas e usuários em inteirar-se sobre a capacidade de usinagem de um material, visando à maior produtividade das indústrias (BAPTISTA, 2002).

Após uma análise de inúmeros artigos, esta pesquisa é motivada pela falta de estudo que relacione a força de corte com o consumo de energia elétrica no processo de torneamento convencional, além da possibilidade de utilizar aços de diferentes propriedades mecânicas, uma

vez que muitos trabalhos, como Lalbondre et al. (2014), He et al. (2017), Wang et al. (2017), Balogun et al. (2018), entre outros, utilizam um ou dois aços.

O presente trabalho propõe contribuir através da análise dos gastos energéticos de cinco aços de diferentes propriedades mecânicas no processo de torneamento. Com a avaliação da facilidade do material em ser usinado, é possível entender os efeitos causados pelos parâmetros de corte na força de corte, energia específica de corte e energia elétrica, de modo alcançar ganhos de eficiência energética.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Como objetivo geral, o presente trabalho propõe realizar o estudo da influência dos parâmetros de usinagem na eficiência energética das operações de usinagem na manufatura de componentes mecânicos, a fim de relacionar os parâmetros de processo com os gastos energéticos por meio da potência mecânica utilizada para a remoção do material e da avaliação da energia elétrica utilizando durante o processo.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Analisar a microestrutura dos materiais a serem estudados, através da metalografia, a fim de descrever as características dos aços;
- Analisar a resistência mecânica dos materiais a serem estudados, através do ensaio de microdureza;
- Pré-determinar os parâmetros de usinagem que irão sofrer variações durante o processo;
- Analisar a rugosidade média dos materiais a serem estudados;
- Analisar o consumo de energia elétrica em função do avanço por rotação, tempo de processo, velocidade de corte, rendimento, espessura de corte, força, potência e energia de corte e potência elétrica, utilizados no processo, para cada material a ser estudado, através da operação de faceamento no processo de torneamento;
- Avaliar a facilidade de usinagem dos materiais.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está ordenado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, contextualizando a pesquisa, contendo a definição de eficiência energética, abordando o processo de torneamento, assim como a importância da pesquisa, os objetivos (geral e específico) e, por fim, a estrutura que está sendo mostrada nesse item.

O Capítulo 2 aborda a revisão da literatura e as fundamentações teóricas relacionadas ao tema, como a explicação sobre parâmetros de corte, força de usinagem, potência de corte, energia específica de corte, facilidade do material em ser usinado e eficiência energética em processos de usinagem.

No capítulo 3, apresenta os materiais e métodos utilizados nos experimentos para atingir os objetivos estabelecidos.

O capítulo 4 trata dos resultados obtidos nos experimentos e a discussão sobre os mesmos.

No penúltimo capítulo, é explanada a conclusão do trabalho de acordo com os dados atingidos no capítulo anterior, destarte, validando a proposta de pesquisa, além de conter as contribuições da pesquisa.

No último capítulo têm-se as sugestões para trabalhos futuros, de modo a dar continuidade a esta pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo a seguir explana uma revisão da literatura a respeito do assunto necessário ao desenvolvimento do trabalho. Por meio de pesquisas em livros, teses e artigos abordam-se os principais temas, como parâmetros de corte, força de usinagem, potência de corte, energia específica de corte, facilidade do material em ser usinado e eficiência energética em processos de usinagem.

Usinagem consiste na forma de fabricação, na qual cria peças e objetos dos mais distintos materiais, sendo um processo bastante versátil. Na usinagem, promove-se a retirada de material da peça pelo corte através de forças opostas cisalhantes, após a peça sofrer deformações plásticas e elásticas. Proveniente desse processo, tem-se o cavaco, que é o material removido (SHAW,1984).

### 2.1 Parâmetros de Usinagem

Parâmetros de corte são dimensões para representar valores de deslocamento da ferramenta ou da peça ou de outras variáveis, inclusive elétricas, de acordo com a necessidade de cada trabalho que será realizado, com o material a ser usinado e com o material da ferramenta (FERRARESI,1970).

Os parâmetros de corte interferem de forma significativa nos erros das máquinas-ferramentas, definindo a precisão da usinagem final. Sendo assim, é possível obter eficiência energética ao realizar a combinação dos parâmetros de corte de acordo com o consumo de energia e com o erro da máquina-ferramenta (LIU et al.,2017).

De acordo com Liu et al. (2017), na usinagem, o consumo total de energia é expressado pelo resultado dos parâmetros de corte, a peça usinada, o caminho da ferramenta, o corte e da máquina-ferramenta. Para haver redução dos gastos, se torna necessária a otimização dos parâmetros de corte, o que explica o porquê de inúmeras pesquisas nesta área.

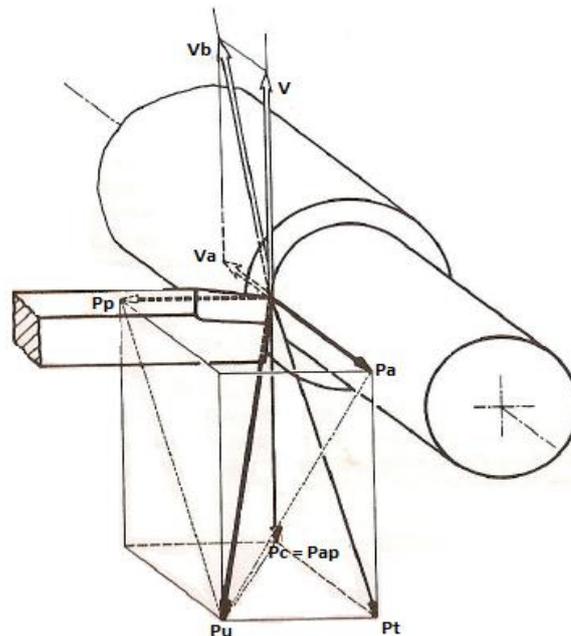
Neste estudo, os parâmetros força de corte e potência de corte são relevantes no que diz respeito à eficiência energética, enquanto que a redução do tempo da máquina, em especial para executar a troca de valores de rotação do eixo-árvore, está para a benfeitoria do processo.

### 2.1.1 Força de Usinagem

Para a compreensão dos processos de usinagem convencional é de suma importância as forças utilizadas no corte de metais. Para a hipótese da potência solicitada e para o projeto das máquinas operatrizes se faz necessário conhecer as forças de corte, que também é um indicador de facilidade de usinagem do material bastante relevante (TRENT; WRIGHT, 2000).

Força de usinagem corresponde à resultante dos impulsos que exercem sobre a cunha cortante. A microestrutura do material a ser usinado e a geometria da ferramenta possuem grande influência nas forças de corte. Os componentes da força de usinagem ( $P_u$ ) são: velocidade efetiva de corte ( $V_e$ ), velocidade de corte ( $V$ ), velocidade de avanço ( $V_a$ ), força passiva ( $P_p$ ), força de avanço ( $P_a$ ), força de corte ( $P_c$ ), força de apoio ( $P_{ap}$ ) e força ativa ( $P_t$ ), apresentadas na Figura 2.1 (FERRARESI, 1970).

Figura 2.1 Componentes Força de Usinagem no Torneamento



FONTE: FERRARESI, 1970

As forças de usinagem são determinadas através dos seus componentes, que são alcançadas na direção dos eixos do sistema de referência, uma vez que  $P_t$  e  $P_p$  são ortogonais, logo pode-se definir a força de usinagem de acordo com a Equação 1 (FERRARESI, 1970):

$$Pu = \sqrt{Pt^2 + Pp^2} \quad (N) \quad (1)$$

Baseada nesta equação, tem-se a Equação 2, na qual a força ativa é dividida em duas componentes (FERRARESI, 1970):

$$Pt = \sqrt{Pc^2 + Pa^2} \quad (N) \quad (2)$$

Sabe-se que no torneamento a força de corte dada pela Equação 3 (FERRARESI, 1970):

$$P_c = k_c \times fr \times a_p \quad (N) \quad (3)$$

No qual,  $k_c$  é o coeficiente de força específica de corte em MPa, valor tabelado de acordo com material e avanço,  $fr$  é o avanço por rotação em mm/rot e  $a_p$  é a profundidade de corte em mm.

Para a pesquisa, é de suma importância a fórmula da velocidade de corte, conforme a Eq. 4.

$$v = \frac{\pi \times Di \times L}{1000 \times fr \times T} \quad (m/min) \quad (4)$$

Em que  $Di$  e  $L$  são o diâmetro inicial e comprimento da amostra em mm, respectivamente, e  $T$  é o tempo de processo em minutos.

### 2.1.1.1 Fatores que Afetam as Forças de Usinagem

A força de usinagem se divide, basicamente, em três componentes, força de corte, força de avanço e força passiva. Para obter um melhor processo de usinagem, é necessário o conhecimento das variáveis as quais afetam as forças de usinagem (AMORIM, 2002).

Os principais fatores que afetam a força de corte são: desgaste da ferramenta, velocidade de corte, material da peça e da ferramenta, geometria da ferramenta, área da seção de corte e o uso de fluido de corte (AMORIM, 2002).

O desgaste da ferramenta é causado pelo aumento no atrito, o qual gera o aumento da força de corte e também pelo aumento da área de contato cavaco-ferramenta. Entretanto, quando há desgaste de flanco e desgaste de cratera este aumento não é constante, pois acarreta na dominação de diferentes momentos da vida da ferramenta e de diferentes tipos de desgaste, variando a força de corte (DINIZ et al., 2006).

O segundo fator a ser tratado é a velocidade de corte, na qual, para todos os metais, quando está em torno de 50m/min e aumenta, causa a redução na força de corte. Tal efeito ocorre até a velocidade atingir aproximadamente 100 m/min, mas apenas nos materiais onde não ocorre à aresta postiça de corte, que é a camada de cavaco cuja adere à aresta de corte, dessarte, há a estabilização da força de corte (AMORIM, 2002).

Porém, quando há camada de cavaco aderida à aresta de corte, as forças de corte diminuem em baixas velocidades de corte até que cresça novamente. Para que o material volte ao normal, a aresta postiça de corte deve ser inexistente, que é quando há velocidades de corte altas (MACHADO, SILVA; 1999).

Baseando-se em Callister Júnior (2008), o material da peça influencia nas forças de usinagem no quesito de que quanto maior a resistência e dureza do material, maior será a força de corte, uma vez que o corte dos metais depende da ruptura por cisalhamento e da deformação plástica.

Kenda et al. (2014) ratificam que os materiais com melhores propriedades funcionais, de alto desempenho e o processo eficiente são importantes ao desenvolverem produtos em setores mais competitivos, como: automotivos, ferroviários, aeronáuticos, máquinas operatrizes, entre outros, apresentando assim a relevância que o material tem no sistema.

Normalmente, a interferência do material da ferramenta em relação à força de corte é mínima, mas é importante em relação a interação com o material da peça, pois pode ocorrer uma zona de aderência forte, aumentando a força de corte. No caso da diminuição da força, acontece quando há redução do atrito cavaco-ferramenta (AMORIM, 2002).

O outro fator que afeta a força de corte é a geometria da ferramenta, em que os ângulos de saída e de inclinação influenciam de modo mais significativo, uma vez que ao aumentarem, fazem com que haja a diminuição da força de corte causada pela menor deformação do cavaco (FERRARESI, 1970).

Em metais dúcteis, a força de corte é reduzida quando há grandes deformações da ferramenta antes da quebra do cavaco. Em metais frágeis, há uma variação da força de corte ao

se aumentar os ângulos de inclinação e de saída, porque ocorre uma baixa deformação do cavaco antes que se rompa, tornando a ferramenta sujeita a falha (FERRARESI, 1970).

A área de seção de corte corresponde ao avanço e a profundidade de corte, que atuam de forma distinta sobre a força de corte, que possui um crescimento não linear em função do aumento da área de seção de corte, o aumento da força é em menor proporção (SHAW, 1984).

O ângulo de posição e a força de avanço são proporcionais, mas com a força passiva ocorre o inverso. Com o aumento do raio de ponta da ferramenta, tem-se a elevação da força passiva e a redução da força de avanço. No caso da velocidade de corte, a variação das forças de avanço e passiva é maior do que na força de corte e as mesmas diminuem quando há estabilidade na velocidade de corte (DINIZ et al., 2006).

### **2.1.1.2 Estado da Arte em Forças de Usinagem**

O estudo de Sanchez et al. (2017) abordou uma metodologia para o monitoramento do desgaste da ferramenta baseado na averiguação das forças de corte durante a usinagem a seco com ligas de titânio que se deu por meio de técnicas de fabricação de aeronaves, nos processos de fresagem, trituração, perfuração e torneamento, de modo entender os mecanismos de formação de cavacos a fim de desenvolver dispositivos capazes de identificar o início do desgaste da ferramenta de corte, caracterizando as ligas de titânio.

Tal estudo estabeleceu o processo de morfologia do cavaco em função da força de corte e os mecanismos de desgaste da ferramenta, sendo assim a melhor combinação de condições de corte. A morfologia do cavaco é do tipo serrilhado, que depende da força de corte, a qual afeta na superfície usinada e na eficiência do processo. Além disso, o método proposto é capaz de obter e identificar a geometria do cavaco da liga Ti6Al4V de acordo com os parâmetros de corte (SANCHEZ et al., 2017).

Wang et al. (2017) apresentou um planejamento do processo adaptativo assentado em recursos dinâmicos que otimizam o custo e tempo de usinagem, bem como o consumo de energia. O gasto energético é estimado analiticamente com base na força de corte instantânea em função dos parâmetros de cortes reais de acordo com cada operação de usinagem, em que ocorre o modo de corte unificado.

Por intermédio do planejamento do processo, há melhoria da eficiência energética, otimizando os parâmetros de corte por mérito do modo de corte unificado em cada operação (WANG et al., 2017).

A pesquisa de Zhang et al. (2017) consistiu na investigação do processo não-linear através de um modelo de simulação tridimensional de elementos finitos, que foi estabelecido de acordo com o perfil da superfície usinada. Foi realizada uma comparação das forças de corte simuladas com os resultados dos experimentos, verificando assim seu efeito.

Através do estudo, constatou que as forças de corte aumentam com o aumento do avanço por rotação e que os efeitos da velocidade de corte não são consideráveis, dessarte, a pesquisa é importante para a compreensão do mecanismo e otimização dos parâmetros de corte (ZHANG et al., 2017).

### 2.1.2 Potência de Corte

De acordo com Ferraresi (1970), potência de corte é a força realizada pela máquina para remover certa quantidade de material a uma determinada velocidade. Depende do material que está sendo trabalhado, do avanço de corte, da profundidade de corte, da velocidade de corte, da eficiência da máquina e do coeficiente de força específica de corte.

Os componentes da potência de usinagem são as mesmas da força de usinagem junto com: potência de corte ( $N_c$ ), potência de avanço ( $N_a$ ), força efetiva de corte ( $P_e$ ) e potência efetiva de corte ( $N_e$ ). O cálculo das potências de corte, de avanço e efetiva de avanço é apresentado por meio das Equações 5, 6 e 7, respectivamente (FERRARESI, 1970).

$$N_c = \frac{P_c \times v}{60 \times 75} \text{ (CV)} \quad (5)$$

$$N_a = \frac{P_a \times v_a}{1000 \times 60 \times 75} \text{ (CV)} \quad (6)$$

$$N_e = \frac{P_e \times v_e}{60 \times 75} \text{ (CV)} \quad (7)$$

Em que  $P_c$  é a força de corte em kgf,  $v$  é a velocidade de corte em m/min,  $P_a$  é a força de avanço em kgf,  $v_a$  é velocidade de avanço em m/min,  $P_e$  é a força efetiva de corte em kgf e  $v_e$  é a velocidade efetiva de corte em m/min.

Utilizando a Equação 5, tem-se a força de corte em kgf e a velocidade de corte de corte em m/min. Passando  $P_c$  para Newton, tem-se a Equação 8:

$$N_c \cong \frac{P_c \times v}{60 \times 75 \times 10} \text{ (CV)} \quad (8)$$

Passando a potência de cavalo-vapor para quilo-watts e sabendo que  $\eta$  é o coeficiente de eficiência da máquina, tem-se a Equação 9:

$$N_c \cong \frac{(P_c \times v \times 0,735 / 60 \times 75 \times 10)}{\eta} \text{ (kW)} \quad (9)$$

$$N_c \cong \frac{P_c \times v}{60 \times 10^3 \times \eta} \text{ (kW)} \quad (9)$$

Sabe-se que a força de corte pode ser dada pela Equação 3, portanto substituindo-a na Equação 9 da potência de corte, tem-se a Equação 10:

$$N_c \cong \frac{k_c \times f \times a_p \times v}{60 \times 10^3 \times \eta} \text{ (kW)} \quad (10)$$

Enquanto a potência fornecida pelo motor da máquina operatriz é dada pela Equação 8, sabendo-se que  $\eta$  é o rendimento da máquina operatriz. Este equipamento é responsável pelo movimento de corte e avanço (FERRARESI, 1970).

$$Nm = \frac{Nc}{\eta} \text{ (kW)} \quad (11)$$

### 2.1.3 Estado da Arte dos Parâmetros de Corte

O trabalho de He et al. (2017) objetivou a otimização dos parâmetros de usinagem em relação a escolha entre sustentabilidade e a economia, desenvolvendo modelos para força

de corte, tempo de processamento e consumo de energia em relação aos parâmetros manuais de velocidade de corte e avanço.

Como resultado da pesquisa tem-se que os modelos são capazes de selecionar algoritmos que ajustam as condições dos problemas específicos, além de serem eficazes ao escolher entre diminuição do tempo do processo e conservação de energia. Tal método desenvolvido é habilitado para ser estendido em diversos processos de usinagem que possuam *trade off* entre questões ambientais e econômicas (HE et al., 2017).

Kreitlein et al. (2017) visaram à validação da combinação das interfaces dos parâmetros e das fontes, previamente determinadas para a avaliação da eficiência energética na implementação em uma fresadora. Os experimentos se deram através da derivação dos parâmetros do material a fim de calcular a demanda de menor energia com base nos conceitos de modelos microscópicos, tendo uma demanda de menor energia como valor de referência para avaliar a eficiência energética no processo e determinando a demanda de menor energia como aplicação operacional ao processo de corte, para assim então realizar a avaliação que é baseada no processo de fresagem.

Por consequência, como resultado, o artigo relatou que a demanda de menor energia é determinada neste processo consoante com os princípios químicos e físicos, além de que pode ser calculada independentemente do método de produção e máquinas e que o cálculo da eficiência energética de um processo de produção é possível (KREITLEIN et al., 2017).

Rief et al. (2017) pretenderam elaborar um modelo simples e abrangente que seja capaz de prever o uso da energia durante as operações de usinagem cujo disponibilize a possibilidade de determinar a demanda de energia elétrica da operação antes da usinagem real. É possível que o usuário mude os parâmetros após analisar os resultados.

É necessário que se entenda quais os fatores afetam a demanda de energia no processo. O modelo criado se adequa a cada variável que pode vir a comprometer a demanda. O processo de energia consiste em dois fatores principais: mover a máquina e remover o cavaco. Por fim, a demanda de energia elétrica para o processo de usinagem pode ser prevista de forma suficiente (RIEF et al., 2017).

Conclui-se que a abordagem desenvolvida é capaz de solucionar o problema do conhecimento insuficiente da energia real em operações por moagem, além de contribuir para um uso da energia elétrica mais eficiente na fabricação, mas cada máquina operatriz possui o seu modelo (RIEF et al., 2017).

Luoque et al. (2019) desenvolveram um modelo o qual visa a redução do consumo de energia de usinagem, utilizando torno CNC, considerando a energia gasta no processo de

troca de rotação e ferramenta de corte. Foi utilizado um simulador com o objetivo de encontrar a relação entre o eixo-árvore e o avanço por rotação que impacta no consumo de energia, também foi feito um estudo de caso com cinco peças de diferentes comprimentos para obter relação entre o tamanho da peça e o eixo-árvore.

É possível concluir que através da melhor seleção dos parâmetros de giro no planejamento do processo tem-se a redução do consumo de energia. Também foi visto que na parte mais curta da peça necessita de um eixo-árvore menor para poupar energia. Por fim, é ideal resolver o conflito entre consumo de energia e tempo de usinagem, pois mesmo que haja redução do consumo com um menor tempo, a máquina pode vir a dar problemas de atraso ao realizar processos de menor duração (LUOKE et al., 2019).

## 2.2 Energia Específica de Corte

Segundo Rodrigues (2005), uma grandeza de suma importância na usinagem é a energia específica de corte, bem como a força de corte, tempo de usinagem e desgaste da ferramenta. A energia total por unidade de tempo pode ser determinada através da multiplicação da força de corte pela velocidade de corte.

Contudo, King e Hahn (1986) afirmam que são diversos os parâmetros os quais afetam o valor da energia consumida, dessarte há uma regularização em que se baseia na taxa de remoção material da peça, que é o produto entre a espessura de corte, largura de corte e velocidade de corte, como mostra a Eq. 12.

$$u = \frac{Pc \times v}{hxbxv} = \frac{Pc}{hxb} \text{ (J/mm}^3\text{)} \quad (12)$$

No qual,  $u$  é a energia específica de corte em  $\text{J/mm}^3$ ,  $b$  é a largura de corte em mm e  $h$  é espessura de corte em mm. Ou seja, a energia específica de corte consiste na razão entre a potência específica de corte e a taxa de remoção do material. Sabendo que a espessura de corte e a largura de corte são dadas nas Eq. 13 e 14, respectivamente (KING; HAHN,1986).

$$h = fr \times \text{sen}(Xr) \text{ (mm)} \quad (13)$$

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}(Xr)} \text{ (mm)} \quad (14)$$

Em que  $Xr$  significa o ângulo de direção do gume da ferramenta de corte e  $a_p$  é a profundidade de corte, conforme a Eq. 15 (FERRARESI, 1970).

$$a_p = \frac{Di - Df}{2} \text{ (mm)} \quad (15)$$

E  $Df$  é o diâmetro da amostra após o processo de usinagem em mm.

Nos processos de usinagem, a energia específica de corte é utilizada quando se determina a potência consumida pela máquina operatriz. É possível ponderar as forças de corte de modo a determinar os processos que afetam a qualidade do produto e as precisões estruturais da máquina, uma vez que as forças de corte influenciam na energia específica de corte (ERSOY, 2004).

Para se obter melhor eficiência, é necessária a redução do caminho da ferramenta, pois ocasionará menores perdas de energia, uma vez que os movimentos dos eixos da máquina, das bombas, dos fusos e sistema hidráulico diminuirão (CARVALHO; GOMES, 2015).

Dietmair e Eberspaecher (2009) buscaram por métodos os quais otimizam os parâmetros da máquina e da planta controláveis de acordo com cada situação. Para tal, através de modelos de sistemas de fabricação integrados ocorre à previsão e integração do consumo de energia de diversas máquinas, esses modelos consideram o tempo, o custo e a quantidade de produtos, prevendo a redução absoluta da quantidade de energia consumida.

### **2.2.1 Estado da Arte da Energia Específica de Corte**

Wang et al. (2016) estudaram a influência dos parâmetros de corte e ângulo da ferramenta de corte no consumo de energia durante a usinagem de alta velocidade, visando otimizar o processo para que seja possível reduzir o consumo de energia na usinagem de alta velocidade. Para isso, utilizaram liga de alumínio em uma fresadora CNC, medindo força de corte e considerando a temperatura.

Também pesquisaram os efeitos da velocidade de corte, espessura do cavaco e ângulo de inclinação da ferramenta no consumo de energia. Concluiu-se que a velocidade de corte aumenta à medida que a energia cinética do cavaco aumenta, o ângulo de inclinação da

ferramenta decresce enquanto o consumo de energia específica aumenta, os ângulos de inclinação positivos da ferramenta são indicados a fim de reduzir o consumo total de energia. Por fim, foi constatado que a espessura do cavaco deformado diminuindo, o consumo específico de energia aumenta (WANG et al., 2016).

Lee et al. (2017) propuseram um método baseado em simulação com o objetivo de otimizar a condição de usinagem e minimizar o consumo de energia. Para tal, foi estimado um consumo de energia no processo de usinagem em uma máquina-operatriz virtual em modelos de simulação de um controlador CNC e o processo de usinagem é projetado. É possível testar diversas condições de usinagem independentemente de tempo e recursos.

Os resultados mostram a eficácia do método proposto de simulação, pois o consumo de energia e as forças de corte do processo de usinagem são estimados com precisão de 96,7%. Quanto ao consumo de energia do processo, foi reduzido em 13% mesmo com tempo maior de processamento (LEE et al., 2017).

Chetan et al. (2018) desenvolveram um modelo matemático capaz de prever a energia de corte durante a usinagem de uma liga à base de níquel utilizando quantidade mínima de lubrificante, tal modelo considera os componentes de energia de cisalhamento e fricção e para validação do modelo desenvolvido, foram utilizadas diferentes velocidades de corte durante o processo de usinagem.

Por conseguinte, a pesquisa resultou que o aumento de vazão e pressão durante a aplicação do lubrificante reduziu a energia devido à redução do contato entre a ferramenta e a tensão de fluxo de cisalhamento sobre a face da peça. Além disso, o modelo desenvolvido previu a energia de corte adequadamente, sendo totalmente validado (CHETAN et al., 2018).

### **2.3 Facilidade do Material em ser Usinado**

Sabe-se que a facilidade do material a ser usinado está relacionada tanto a propriedade mecânica do mesmo quanto ao material da ferramenta, considerando os aspectos do processo.

Para Trent (1984), o modo como o material se comporta enquanto é usinado não se trata de uma propriedade, mas sim de uma forma de avaliação do mesmo. No caso de Ferraresi (1970), tal facilidade do material a ser usinado trata-se de um valor numérico que comparada às propriedades de usinagem do material conforme o padrão.

Um material pode apresentar índices de facilidade de usinagem diferentes, ou seja, de acordo com cada critério estabelecido, por isso, é complexo e criterioso a determinação deste

índice, além disso, são diversas as propriedades e parâmetros que influem na capacidade de usinagem do material (AMORIM,2002).

### ***2.3.1 Rugosidade Superficial***

De acordo com Ferraresi (1970), a rugosidade superficial é uma característica relevante na facilidade em se usinar dos metais, está ligada a qualidade das superfícies das peças através do acabamento obtido no processo e pelas propriedades do metal na camada superficial. Tais propriedades podem ser modificadas durante a usinagem devido à pressão da ferramenta contra a peça, calor gerado no processo de corte, formação do cavaco, vibração da ferramenta e da máquina, atrito do metal na região de deformação plástica, entre outros.

Nigro e Villa (2013) afirmam que a importância da rugosidade está ligada aos seguintes fatores: precisão e tolerância, resistência a corrosão, uma vez que acabamentos superficiais mais rudimentares facilitam o processo de corrosão, resistência à fadiga devido ao acabamento rudimentar proporcionar uma concentração de tensão que leva a formação de trincas, transmissão de calor já que quanto maior a rugosidade maior a região de contato entre as superfícies que leva a maior transmissão de calor, lubrificação e escoamento de fluidos em que superfícies com melhor acabamento reduzem a turbulência de escoamento.

### ***2.3.2 Estado da Arte da Facilidade do Material em ser Usinado***

Lalbondre et al. (2013) investigaram a facilidade do material em ser usinado dos aços ABNT SAE 9320 e ABNT SAE 4340 através do torneamento por faces, apresentando o desenvolvimento do desgaste das ferramentas, estudos de mecanismos de desgaste, acabamento superficial e vida da ferramenta. A avaliação é feita por meio do tempo de corte necessário para a ferramenta atingir o desgaste do flanco, mecanismos de desgastes envolvidos na usinagem e índices de facilidade do material a ser usinado da peça de trabalho.

O resultado da pesquisa demonstrou que o método de torneamento por faces pode ser utilizado para monitorar alterações que visam facilitar a usinagem do material, uma vez que o desenvolvimento do desgaste da ferramenta para ambos os materiais está de acordo com os métodos de usinagem. Também foi possível observar que a facilidade em se usinar do aço ABNT SAE 9320 é melhor do que do aço ABNT SAE 4340 de acordo com o desgaste da ferramenta e o acabamento superficial (LALBONDRE et al., 2013).

Parida e Maity (2018) analisaram morfologia, força, desgaste da ferramenta e rugosidade da superfície no torneamento a quente de Inconel e Monel e compararam com as correspondentes condições de usinagem da temperatura ambiente. Foi realizado o aquecimento por chama no processo de torneamento.

A pesquisa resultou que o efeito do aquecimento aumenta significativamente a vida útil da ferramenta. O acabamento superficial das peças de Inconel foi melhor que as peças do outro material sob as mesmas condições de corte. Observou-se a redução consideravelmente da força de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade da superfície e aumento da vida útil da ferramenta na usinagem a quente em comparação com a usinagem em temperatura ambiente (PARIDA; MAITY, 2018).

Palanisamy et al. (2018) analisaram a facilidade do material a ser usinado do aço inoxidável de acordo com a variação de velocidade de corte e avanço em três níveis. Para medir o desempenho da facilidade do material a ser usinado, foram utilizados força de corte, rugosidade superficial e microdureza. Os experimentos foram conduzidos com base no planejamento fatorial completo.

Concluiu-se que o avanço é o parâmetro mais influente, no caso, a força de corte e a rugosidade superficial aumentaram proporcional ao avanço. Para se obter um melhor acabamento superficial, é necessário que a velocidade de corte seja elevada e o avanço baixo. A facilidade do material a ser usinado foi atingida com o avanço moderado e maior velocidade de corte (PALANISAMY et al., 2018).

## **2.4 Outros Métodos de Obter Eficiência Energética na Usinagem**

O presente tópico embasa-se em artigos sobre estudos que buscam avaliar novas abordagens de eficiência energética no processo de usinagem. Os trabalhos estão sequenciados em ordem cronológica, de 2014 a 2017.

Li e Kara (2015) propuseram experimentos que caracterizem a eficiência energética em processos de usinagem de descarga elétrica (EDM) de forma extrair modelos que sejam capazes de prever o consumo de energia do processo. Sabe-se que EDM consiste em uma operação de remoção de materiais duros que visam atingir formas complexas.

A metodologia utilizada no artigo constitui da utilização de duas máquinas que operam de acordo com EDM a fim de testar diferentes modelos de taxa de remoção de material

(MRR) e se deu em quatro etapas: design do experimento, experiências físicas, análise da modelagem e validação do modelo utilizado (LI; KARA, 2015).

A conclusão foi que os modelos testados são capazes de prever o consumo de energia, tendo menos de 10% como margem de erro, porém o modelo MRR dos processos de EDM é bastante lento quando comparado com os procedimentos convencionais de remoção e não é suficiente ao avaliar o desempenho do processo quanto ao acabamento superficial e desgaste da ferramenta. De tal forma que o artigo contribuiu para a obtenção de eficiência energética (LI; KARA, 2015).

Carvalho et. al. (2015) propuseram um método a fim de avaliar a eficiência energética por máquina de um sistema de fabricação independente da sua produção, objetivando calcular a eficiência energética das máquinas CNC e sistemas de fabricação, comparando diferentes máquinas e identificando suas perdas.

A metodologia consiste em determinar as perdas elétricas na linha de fabricação, destarte discernindo processos e máquinas com baixo rendimento, em seguida é realizada a classificação dos centros de usinagem CNC em intervalos de eficiência energética. O estudo baseou-se em comparar os processos de usinagem de um sistema de máquinas de ferro fundido, com 10 processos de usinagem, e o sistema de máquinas de alumínio, com 9 processos de usinagem (CARVALHO et al, 2015).

Carvalho et al. (2015) obtiveram como resultado que a maior redução da eficiência na fabricação de ferro fundido e devido ao maior consumo de energia no modo de espera na planta de ferro fundido, contudo o estudo mostrou que houve maior uso da energia elétrica na produção com ferro fundido (34,8% e alumínio foi 13%). Também foram identificados quais processos precisam ser melhorados. Foi possível concluir que a escolha da máquina-ferramenta correta depende do material, destarte, a eficiência energética do processo de usinagem depende exclusivamente da máquina.

Dong et al. (2016) utilizaram o Inconel 718 para analisar o modelo matemático entre a usinagem dos parâmetros por meio da metodologia em superfície, no qual se usa máquinas com alta velocidade, máquinas EDM de fresagem para realizar o cálculo dos parâmetros e a análise da taxa de remoção. Concluindo que o modelo estudado é eficiente ao determinar a influência da corrente de pico no processo.

Uhlmann et al. (2016) objetivou investigar o desempenho energético total do sistema de usinagem com robôs, assim originando um balanço energético do sistema, detectando os parâmetros de corte e estratégias de caminho da ferramenta para o uso otimizado da energia.

Ahn et al. (2016) verificou a eficiência energética de a usinagem auxiliar a laser (LAM) de modo comparar com a usinagem convencional na fabricação de peças de aço SAE 1045. Para tal confrontação, as condições de usinagem são determinadas com fundamentação na análise térmica e na energia específica de corte, considerando a força tangencial e a taxa de remoção do material (MRR). A energia de corte foi correlatada em cada profundidade de corte, conforme a velocidade de rotação e a taxa de alimentação.

Os resultados apresentaram que a força de corte diminuiu em todas as profundidades de corte durante a LAM e quando a profundidade de corte aumentou, a força de corte diminuiu consideravelmente, que tal fenômeno pode ser explicado pelo amolecimento do material com a fonte de calor a laser, reduzindo o atrito na borda do material (AHN *et al.*, 2016).

Ao se comparar os dois processos, foi possível concluir que a LAM obteve maior eficiência quanto à energia e a força de corte, por exemplo, ao se utilizar a profundidade de corte de 0,2mm, a energia específica de corte diminuiu em 60%, além disso, a LAM apresenta maior produtividade, que reduz o tempo de usinagem e estende a vida útil da ferramenta (AHN *et al.*, 2016).

Zhang et al. (2017) trabalharam com usinagem de arco elétrico (EAM), investigando a remoção do material e organização da distribuição de energia. Houve a comparação com a usinagem por descarga elétrica (EDM) quanto à eficiência energética, a qual é a energia utilizada no processo de retirada do material em relação à energia da usinagem completa, e quanto à eficiência de remoção, que analisa a porção de material removido.

O processo de energia elétrica foi convertido em calor e distribuído entre o eletrodo de ferramenta e a peça de trabalho. A capacidade de remoção foi definida como sendo a razão do volume de material removido e ao volume total de material fundido na peça de trabalho, já a eficiência energética é a relação entre a energia consumida para a remoção de material e a energia distribuída na peça de trabalho (ZHANG et al.,2017).

Foi verificado que no caso da EAM, a maior parte da energia de descarga foi distribuída na peça de trabalho e no eletrodo de ferramenta, e mais de 50% de energia foi utilizada para remoção do material e no caso da EDM, a maior parte da energia foi consumida pela condução de calor. Sendo assim, conclui-se que a EAM é muito mais eficiente que a EDM, porque na primeira, a eficiência por remoção é de 90% e na segunda é de 5% (ZHANG et al.,2017).

Cai et al. (2017) trabalharam com *benchmark* de energia que consiste em uma metodologia analítica e efetiva a fim de obter progresso na eficiência e no desempenho de utilização da energia. A proposta do trabalho é uma inovação do *benchmark* de energia

dinâmica, cuja busca favorecer o gerenciamento de energia em sistemas de usinagem objetivando se sobrepuser em relação aos métodos de *benchmark* existentes.

A pesquisa foi elaborada em quatro etapas: formação do banco de dados, demarcação da energia, obtendo o seu consumo, e criação do sistema que classifica referências com base no *benchmark*. Para tal, realizou-se a usinagem de uma peça e analisou a planta de fabricação, indicando a viabilidade do projeto. Concluiu-se que a metodologia apresentada sobressaiu às existentes e possibilita a medição e a quantificação do nível de eficiência de cada plano de usinagem (CAI et al., 2017).

O trabalho de Hacksteiner et al. (2017) explanou uma abordagem que visa estabelecer a eficiência energética relevante no processo de usinagem fundamentado na interpretação em tempo real dos dados do sensor e de controle do equipamento. A pesquisa se desenvolveu através da comparação do consumo real da energia durante o processo com um modelo energético sem carga, assim possibilitando o cálculo da eficiência e da duração do processamento primário. O estudo foi realizado em um centro de fresagem e torneamento CNC com medidores de potência e sensores de ar comprimido.

Com conclusão, tem-se que o procedimento adotado é apropriado na comparação de diferentes máquinas e no cálculo da eficácia geral do equipamento, além de que a abordagem é capaz de aumentar a conscientização do uso da máquina por parte dos operadores (HACKSTEINER et al., 2017).

Lenz et al. (2017) propuseram a implementação de um monitoramento de energia em uma máquina operatriz de moinho na produção sustentável de bens com energia elétrica mínima. A metodologia é composta por uma análise em cada componente e de um sistema que possui um dispositivo para mostrar a solução no chão de fábrica da empresa.

Desse modo, foi possível concluir que o processo de fabricação não houve alterações e teve uma redução do consumo de energia de 28% e que ao alterar os componentes auxiliares da máquina, ocorreu o aumento da eficiência do equipamento (LENZ et al., 2017).

Döbbleler e Klocke (2017) calcularam a energia dissipada a partir da zona de corte, considerando a energia de corte, a energia térmica expelida pelo fluido refrigerante e a energia hidráulica, investigando a eficiência e o desgaste da ferramenta, além de haver a variação da pressão e do diâmetro do canal de fornecimento de lubrificante. Foi comprovado que o fluxo volumétrico e a alta pressão induzem ao menor desgaste da ferramenta, mas não eleva a eficiência energética obrigatoriamente.

O último artigo apresentado neste tópico é de Sangwan e Kant (2017), que apresentaram que um modelo o qual prever e otimiza o processo consoante com a metodologia

de superfície de resposta integrada e a abordagem de um algoritmo para antever o consumo de energia e os parâmetros de usinagem durante a fabricação de peças com o aço SAE 1045, e com uma ferramenta de carboneto de tungstênio por meio de experimentos os quais utilizam design Taguchi no desenvolvimento do modelo preditivo, utilizado na formulação de uma função objetiva para o algoritmo genérico, e irão validar o modelo criado.

A conclusão que Sangwan e Kant (2017) chegaram foi que a redução do pico de carga por meio da otimização resultará na redução do consumo de energia das máquinas operatrizes, enquanto não realizam o movimento de corte e que a pesquisa será conveniente para as indústrias uma vez que selecionarão as máquinas de acordo com o consumo de energia.

## **2.5 Considerações Finais**

A Tabela 2.1 apresenta os artigos mais relevantes para pesquisa, apresentados durante o presente capítulo, de modo compará-los entre si.

Tabela 2.1 Artigos Mais Relevantes

<b>ARTIGOS</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>MÁQUINA- OPERATRIZ</b>	<b>PARÂMETROS DE ENTRADA</b>	<b>MODO DE AVALIAÇÃO</b>	<b>TIPO DE EXPERIMENTO</b>
<b>Wang et al.,2016</b>	Alumínio	Fresadora CNC	Velocidade de corte e Ângulo da ferramenta	Consumo de energia e Força de corte	Prático
<b>Hacksteiner et al.,2017</b>	Não especificado	Fresadora CNC e Torno CNC	Dados de controle da máquina	Potência elétrica	Prático
<b>He et al.,2017</b>	Aço carbono C45E4	Torno e Fresadora	Velocidade de corte e Avanço	Força de corte e Consumo de energia	Simulação
<b>Rief et al.,2017</b>	Aço não especificado	Moagem CNC	Rotação e Avanço	Demanda de energia	Simulação
<b>Sangwan e Kant,2017</b>	Aço ABNT SAE 1045	Torno CNC	Avanço por rotação	Consumo de energia	Simulação
<b>Wang et al.,2017</b>	Liga de titânico	Fresadora	Avanço e Velocidade de corte	Tempo de processo e Força de corte	Prático
<b>Zhang et al., 2017</b>	Aço ABNT SAE H 13	Fresadora	Velocidade de corte e Avanço por rotação	Força de corte	Simulação e Prático
<b>Chetan et al.,2018</b>	Liga à base de níquel	Torno CNC	Velocidade de corte	Energia de corte	Simulação
<b>Palanisamy et al.,2018</b>	Aço inoxidável	Torno CNC	Velocidade de corte e Avanço	Força de corte, Rugosidade e Microdureza	Prático
<b>Parida e Maity,2018</b>	Inconel e Monel	Torno	Temperatura	Força de corte e Rugosidade	Prático
<b>Luoke et al.,2019</b>	Aço SAE 1045	Torno CNC	Rotação e Avanço	Tempo, Energia elétrica e Rugosidade	Simulação

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Por meio da Tabela 2.1 é possível concluir que não há diversidade dos materiais, não havendo o uso de aços de diferentes propriedades mecânicas, como na presente pesquisa, além disso, o torno convencional é pouco utilizado como máquina-operatriz, mesmo o torno CNC sendo mais tecnológico, no Brasil, ainda há bastante o uso do torno convencional nas indústrias. Já em relação aos parâmetros de entrada e o modo de avaliação, esta pesquisa também se baseia no avanço, na rotação e na velocidade de corte para analisar energia de corte e elétrica, força de corte e rugosidade, ou seja, não há estudos que considere inúmeras variáveis como no presente trabalho.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão abordados os procedimentos, os materiais utilizados, aços e ferramentas, além da metodologia empregada na pesquisa, detalhando a preparação metalográfica das amostras. Por conseguinte, é apresentado o estabelecimento dos parâmetros a ser variado, a descrição do processo de torneamento e de medição da energia elétrica, obtenção da força e potência de corte, além da medição da rugosidade superficial e como será feita a avaliação da facilidade de usinar dos aços. Por fim, tem-se o relato de como será avaliado o consumo energético, visando obter eficiência energética. Os experimentos foram realizados na oficina do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, no campus Maracanaú.

#### **3.1 Materiais**

##### ***3.1.1 Corpos de Prova***

Os aços utilizados no desenvolvimento da pesquisa foram doados pela Usinagem Santa Bárbara, não houve tratamento térmico antes do processo de torneamento e não foi necessário tratar durante o estudo, porém os aços 4140 e 4340 vieram recozidos de fábrica. Para o trabalho são utilizadas amostras de mesmo tamanho dos aços ABNT SAE 1020, 1045, VC, 4140 e 4340, cujo diâmetro e comprimento são 25mm e 80mm, respectivamente, no qual foram aplicadas 15 amostras de cada aço, totalizando 75 testes.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química dos aços trabalhados a partir de uma espectroscopia feita no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) na Universidade Federal do Ceará.

Tabela 3.1 Composição Química dos Aços

AÇOS	ELEMENTOS (%)							
	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Fe	Cu
<b>SAE 1020</b>	0,210	0,140	0,260	0,036	0,028	0,022	0,260	0,010
<b>SAE 1045</b>	0,440	0,280	0,500	0,024	0,026	0,022	0,680	0,015
<b>SAE 4140</b>	0,400	0,260	0,060	0,020	0,880	0,190	0,400	0,190
<b>SAE 4340</b>	0,390	0,190	0,470	0,022	0,680	0,200	0,330	0,240
<b>VC - 131</b>	1,800	0,290	0,220	0,014	0,710	0,082	-	-

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Características dos Materiais

Este tópico irá apresentar os métodos de obtenção da rugosidade média, microdureza e microestrutura.

#### 3.2.1.1 Rugosidade Média

Com o objetivo de obter a rugosidade média, antes e após a usinagem, é utilizado o rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ-201, utilizando um Cutoff de 0,25  $\mu\text{m}$ , a unidade de medição da rugosidade média  $\mu\text{m}$  é fornecido pelo Laboratório de Inspeção e Análises de Falhas do IFCE – campus Maracanaú, e o equipamento é mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Rugosímetro



FONTE: MITUTOYO,2011

### 3.2.1.2 Microdureza

Ao se estudar um material, é necessário conhecer as suas propriedades mecânicas, pois definem o comportamento do material quando aplicada uma força externa, mostrando a capacidade de a amostra deformar. Sabendo da importância desse conhecimento, realiza-se um ensaio de microdureza com carga de 9,807 N e duração de 10 segundos por amostra, no qual são feitas 10 medidas em cada aço e calcula-se o valor médio, tal experimento é feito no Laboratório de Materiais (LMAT) no Instituto do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, no campus Maracanaú.

### 3.1.2.3 Microestrutrua

Para obtenção da microestrutura de cada aço, realiza-se uma metalografia do tipo qualitativa, é realizada no Laboratório de Materiais (LMAT), no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, no campus Maracanaú, com o objetivo de obter as características de cada aço utilizado, iniciando-se com a preparação das amostras através do corte, do embutimento a quente em baquelite. Em seguida é feito o lixamento na lixadeira através de movimento radial, após esse procedimento, é realizado o polimento nas amostras, utilizando uma pasta de alumina na máquina politriz e o tempo de realização dessa técnica é de 1 a 2 horas para cada amostra (COLPAERT,2008).

Por conseguinte, realiza-se o ataque químico, que tem o objetivo de revelar a microestrutura do material de acordo com a composição química do material e do reagente, considerando também o tempo e temperatura em que a amostra é exposta ao ataque. Nesse processo, as amostras são submersas a uma solução química de Nital, composta por 98% de álcool etílico e 2% de ácido nítrico para os aços 1020, 4340 e 4140 e 97% de álcool etílico e 3% de ácido nítrico para os aços 1045 e VC, por, aproximadamente, 15 segundos, de modo que após o ataque seja possível revelar a microestrutura do material, revelando os contornos de grãos. Por isso, para remover a escória do Nital, é feita uma limpeza por meio da lavagem em álcool e secagem com jato de ar quente (COLPAERT,2008).

Para finalizar, é feita a análise microscópica, utilizando o microscópio óptico Olympus GX 51, como mostra na Figura 3.2 com aumento de 500 e 1000 vezes. A Figura 3.3 mostra os equipamentos utilizados na preparação metalográfica, máquina de corte, embutidora, lixadeira e politriz.

Figura 3.2 Microscópio Óptico Olympus GX 51 e Computador para Capturar as Imagens



FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Figura 3.3 Equipamentos Utilizados na Preparação Metalográfica



FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

### 3.2.2 *Processo de Usinagem*

Esta sessão irá apresentar a ferramenta de corte e o equipamento para tornear utilizados, além dos parâmetros de processo, o processo de torneamento, o coeficiente de força específica de corte, cálculo da força, potência e energia de corte e a avaliação da facilidade do material em se usar.

### 3.2.2.1 Ferramenta de Corte

A ferramenta empregada é a pastilha de carboneto metálico, são as mais utilizadas na usinagem devido a sua alta resistência, dessa forma, demorando a se desgastar. O modelo da ferramenta é o 2020 K16 da marca MTJNR/L, cujo modelo da pastilha é o TCGW 090204 LN-7 da marca T-TURN, possuindo um diâmetro de 5,56 mm e um ângulo de direção de 60°, as Figuras 3.4 e 3.5 mostram a ferramenta e a pastilha, respectivamente.

Figura 3.4 Ferramenta de Corte



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Figura 3.5 Pastilha



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

### 3.2.2.2 Equipamento para Tornear

Como máquina operatriz será utilizado o torno mecânico horizontal, da marca Nardini, modelo NODU 220 SE, acionado por um motor WEG W22 Dahlander de potência 5cv, a tensão é 380V e a corrente máxima é 10,5 A. A máquina tem a capacidade de variar a rotação de 30 a 2360 rpm e o avanço varia de 0,053 a 1,013 mm de forma mecânica. A Figura 3.6 mostra o torno utilizado.

Figura 3.6 Torno Mecânico

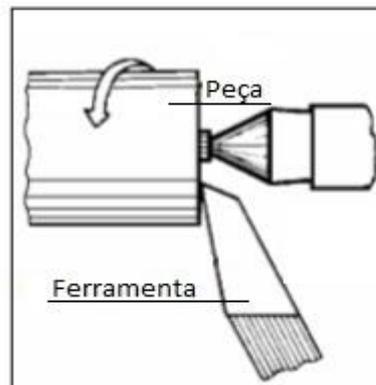


FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

### 3.2.2.2.1 *Processo de Torneamento*

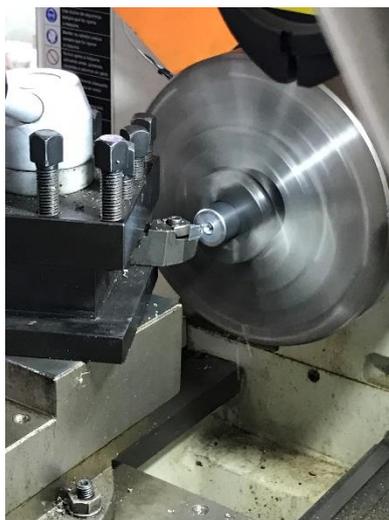
No processo de torneamento, são realizados 15 testes para cada aço, realizando o faceamento do centro para a periferia e variando a rotação e o avanço, de modo obter uma superfície plana, a representação do processo está representada pela Figura 3.7 e a Figura 3.8 apresenta o torneamento real.

Figura 3.7- Representação do Faceamento



FONTE: GROOVER,2010

Figura 3.8- Operação de Faceamento no Torneamento



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Antes de realizar o torneamento, é feita a medição da rugosidade de cada amostra. Logo, por seguinte, são feitas as seguintes aferições: diâmetro e rugosidade da amostra após o torneamento, avanço por rotação (mm/rot), duração do faceamento (min), corrente elétrica (A), ângulo de direção do gume da ferramenta, potência (kW) e energia elétrica (kWh).

Para a obtenção da velocidade de corte (m/min), da profundidade de corte (mm), da espessura de corte (mm) e da largura de corte (mm) são utilizadas as Equações 4, 15, 13 e 14, respectivamente.

### 3.2.2.3 Parâmetros de Processo

Os parâmetros de usinagem que irão variar são o avanço de corte e a rotação, de modo haver o distanciamento entre valores máximos e mínimos, de acordo com o limite de facilidade de usinar do material e vida útil da ferramenta, é feita uma combinação entre valores altos e baixos com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros na eficiência do processo, conforme a Tabela 3.2 mostrada abaixo.

Tabela 3.2 Variações de Parâmetros de Usinagem

<b>TESTE</b>	<b>Rotação(rpm)</b>	<b>Avanço (mm)</b>
1	150	0,116
2	300	
3	475	
4	600	
5	950	
6	150	0,320
7	300	
8	475	
9	600	
10	950	
11	150	0,554
12	300	
13	475	
14	600	
15	950	

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

#### 3.2.2.4 Coeficiente de Força Específica de Corte

É obtido o coeficiente de força específica de corte de cada material, consoante com as devidas espessuras de corte e por meio de interpolação, como mostra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Coeficiente de Força Específica de Corte

TESTE	ESPESSURA DE CORTE (mm)					COEFICIENTE DE FORÇA ESPECÍFICA DE CORTE (MPa)				
	1020	1045	4140	4340	VC	1020	1045	4140	4340	VC
1	0,470	0,465	0,470	0,477	0,477	4025	3020	4043	3910	2960
2	0,533	0,429	0,487	0,465	0,503	1760	1615	1965	2018	1395
3	0,486	0,433	0,430	0,460	0,505	1243	1021	1380	1290	888
4	0,533	0,490	0,454	0,482	0,485	906	709	1040	972	731
5	0,486	0,433	0,478	0,473	0,452	625	500	600	620	497
6	1,108	1,192	1,298	1,285	1,358	1686	1148	1470	1460	1040
7	1,732	1,371	1,239	1,226	1,358	551	521	760	765	525
8	1,459	1,237	1,435	1,217	1,226	418	368	418	487	369
9	1,732	1,371	1,704	1,349	1,358	279	262	290	346	262
10	1,459	1,443	1,435	1,420	1,226	207	157	202	203	179
11	1,847	2,110	2,272	2,452	2,264	1030	673	835	763	609
12	2,771	2,285	2,726	2,248	2,264	335	306	334	419	316
13	1,250	2,165	2,152	2,130	1,716	483	211	293	280	262
14	1,732	2,285	2,272	2,248	1,698	280	158	207	208	209
15	1,459	2,165	2,152	2,13	2,145	207	103	122	133	101

FONTE: ADAPTADO PELO AUTOR DE DINIZ et. al., 2006

### 3.2.2.5 Obtenção de Força, Potência e Energia de Corte

Para obter a força de corte (N), a potência de corte (kW) e energia de corte ( $J/mm^3$ ), utiliza-se as Equações 3, 10 e 12, respectivamente.

### 3.2.2.6 Avaliação da Facilidade do Material em ser Usinado

A facilidade do material em ser usinado será avaliada de acordo com a força de corte, a potência de corte obtida, com o desgaste da ferramenta, com a velocidade de corte e com a rugosidade, sendo analisadas as rugosidades iniciais e finais.

### 3.2.3 Medição do Consumo de Energia Elétrica

Para obtenção da energia, potência e corrente elétrica durante o processo, é utilizado um analisador de energia cuja marca é Minipa, modelo ET-5050, fornecido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como mostra a Figura 3.9.

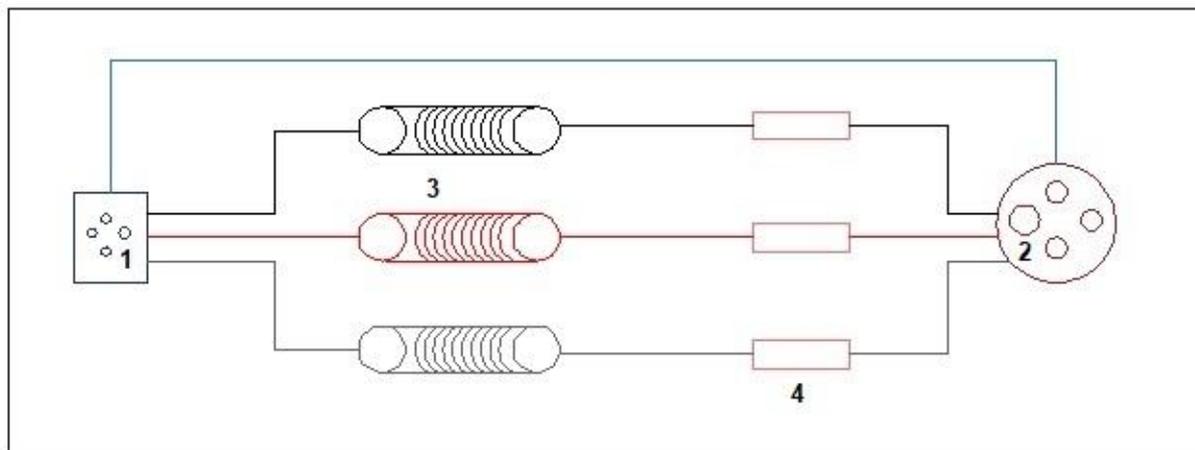
Figura 3.9 Analisador de Energia



FONTE: MINIPA,2002

Para ser feita a medição, é projetada e montada uma bancada de teste, na qual são conectados o torno e o analisador, a bancada é mostrada na Figura 3.10.

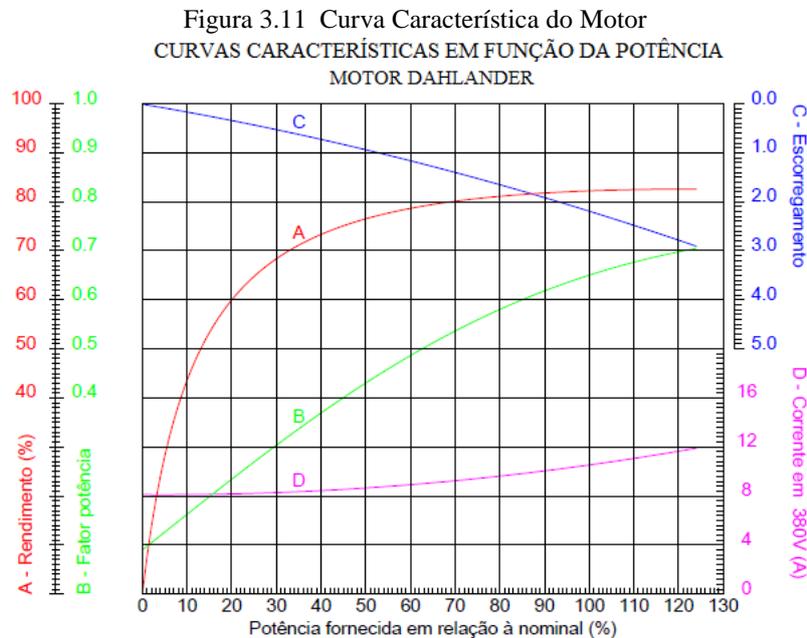
Figura 3.10 Bancada de Teste



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

De acordo com a Figura 3.10, o número 1 representa a tomada para conexão do torno à bancada, o número 2 corresponde ao plug para conexão da bancada à rede de energia elétrica, o número 3 refere-se ao sistema de medição da corrente elétrica e possui espiras para aumentar o fundo de escala na medição, por fim, o número 4 equivale aos barramentos para conexão das garras para medição de tensão.

Em seguida, através da curva característica do motor e do valor de corrente elétrica, obtém-se o rendimento em cada teste. Trata-se de um motor Dahlander, da marca WEG, modelo W22, de 4 pólos, com potência de 5cv e sua curva característica é apresentada no Figura 3.11.



FONTE: WEG, 2019

A importância da potência elétrica (potência ativa) é o fato de ser uma potência que engloba a potência de corte e suas perdas.

### 3.3 Avaliação dos Resultados

Os resultados são avaliados através de gráficos que apresentam, separadamente, a relação da rugosidade final, avanço por rotação, velocidade de corte, rendimento, espessura de corte, força e energia de corte com a potência de corte e a energia elétrica, em função da rotação, de cada aço. Conseqüentemente, por meio destas curvas é possível analisar onde a eficiência energética pode atuar.

### 3.4 Considerações Gerais da Metodologia

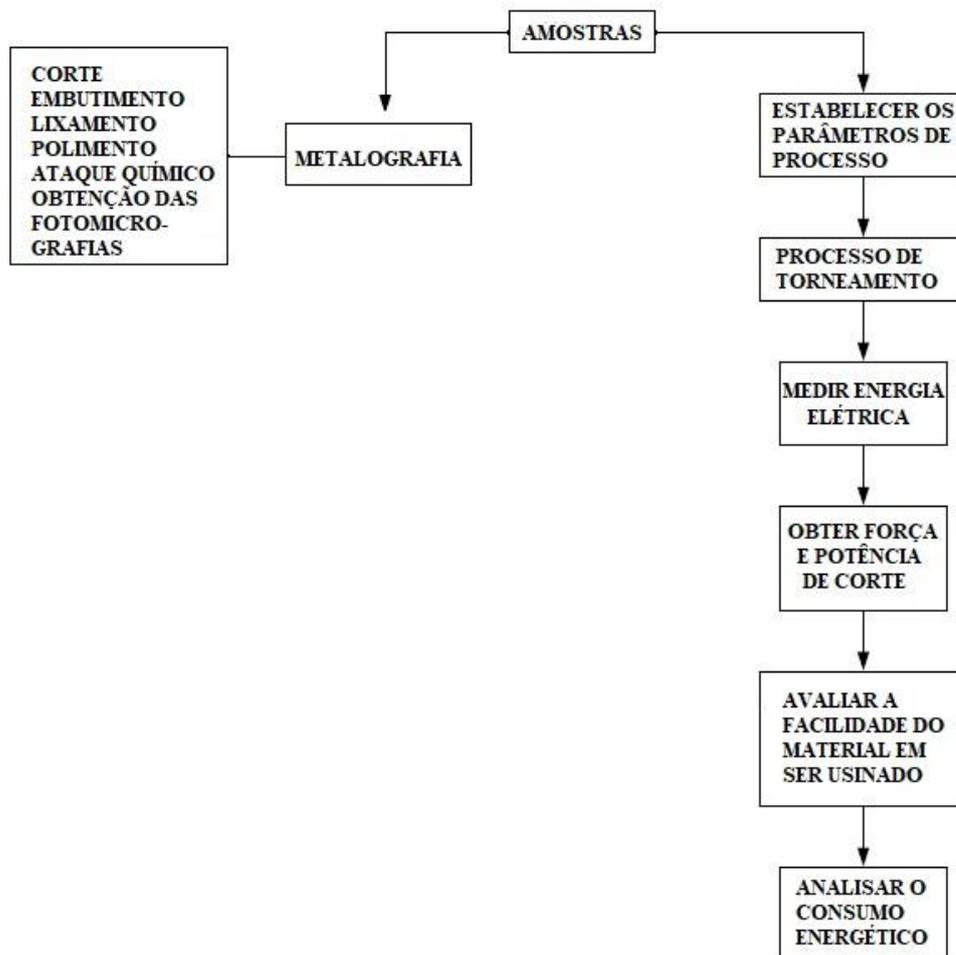
Este capítulo contribuiu com as informações dos materiais de corpo de prova, bem como a ferramenta de corte e os equipamentos, como analisador de energia e rugosímetro utilizados. Também apresentou a máquina-operatriz empregada no processo junto com a bancada de teste desenvolvida.

Por conseguinte, são apresentadas, de forma detalhada, as etapas de elaboração da pesquisa para maior compreensão do trabalho a ser realizado.

A principal colaboração deste capítulo se dar por meio da análise da influência dos parâmetros de corte no gasto energético do processo e da avaliação facilidade em se usinar do material.

A metodologia empregada na pesquisa está dividida nas seguintes etapas conforme apresenta o fluxograma mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 Fluxograma com as Etapas da Pesquisa



FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo a seguir retrata os resultados obtidos por meio dos ensaios citados no capítulo anterior, bem como fotomicrografia, rugosidades iniciais e finais, diâmetro, avanço por rotação, tempo de processo, velocidade de corte, rendimento, profundidade de corte, espessura de corte, largura de corte, ângulo de direção do gume, potência elétrica, energia elétrica, força de corte, potência de corte e energia de corte de cada amostra, tendo como objetivo analisar a forma de obtenção de eficiência energética com relação a facilidade de usinagem dos aços através da análise dos parâmetros avaliados.

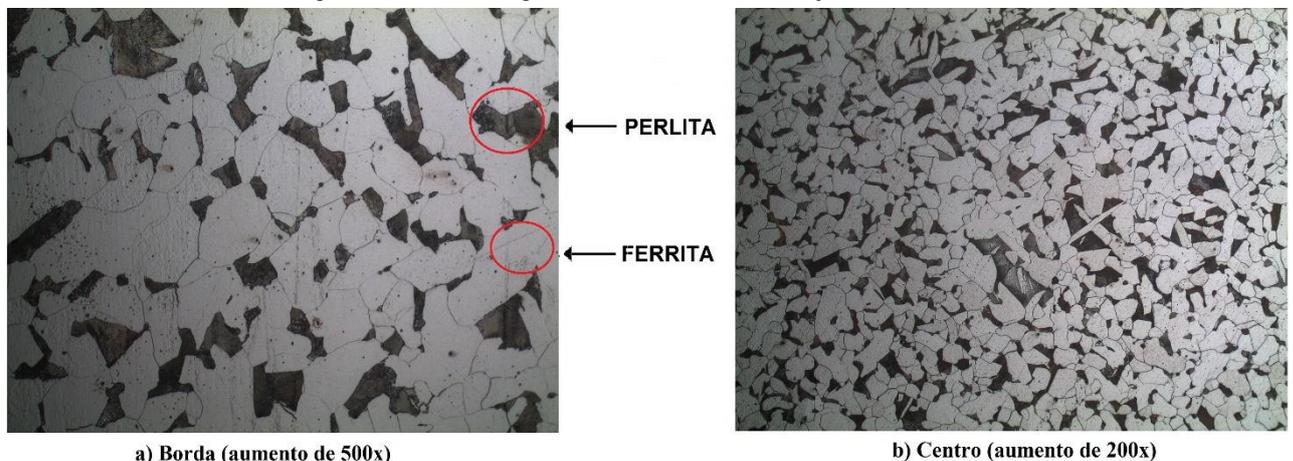
### 4.1 1020

O presente tópico apresenta a fotomicrografia, a dureza Vickers, as rugosidades iniciais e finais, o diâmetro, o avanço por rotação, o tempo de processo, a velocidade de corte, o rendimento, a profundidade de corte, o ângulo de direção do gume da ferramenta, a espessura e largura de corte, a força de corte, a potência de corte, a energia de corte, a potência elétrica e a energia elétrica referentes aos experimentos realizados no aço 1020.

#### 4.1.1 Fotomicrografia e Dureza Vickers

A Figura 4.1 representa a fotomicrografia da borda e do centro, no qual é possível ver o contorno de grão.

Figura 4.1 Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 1020



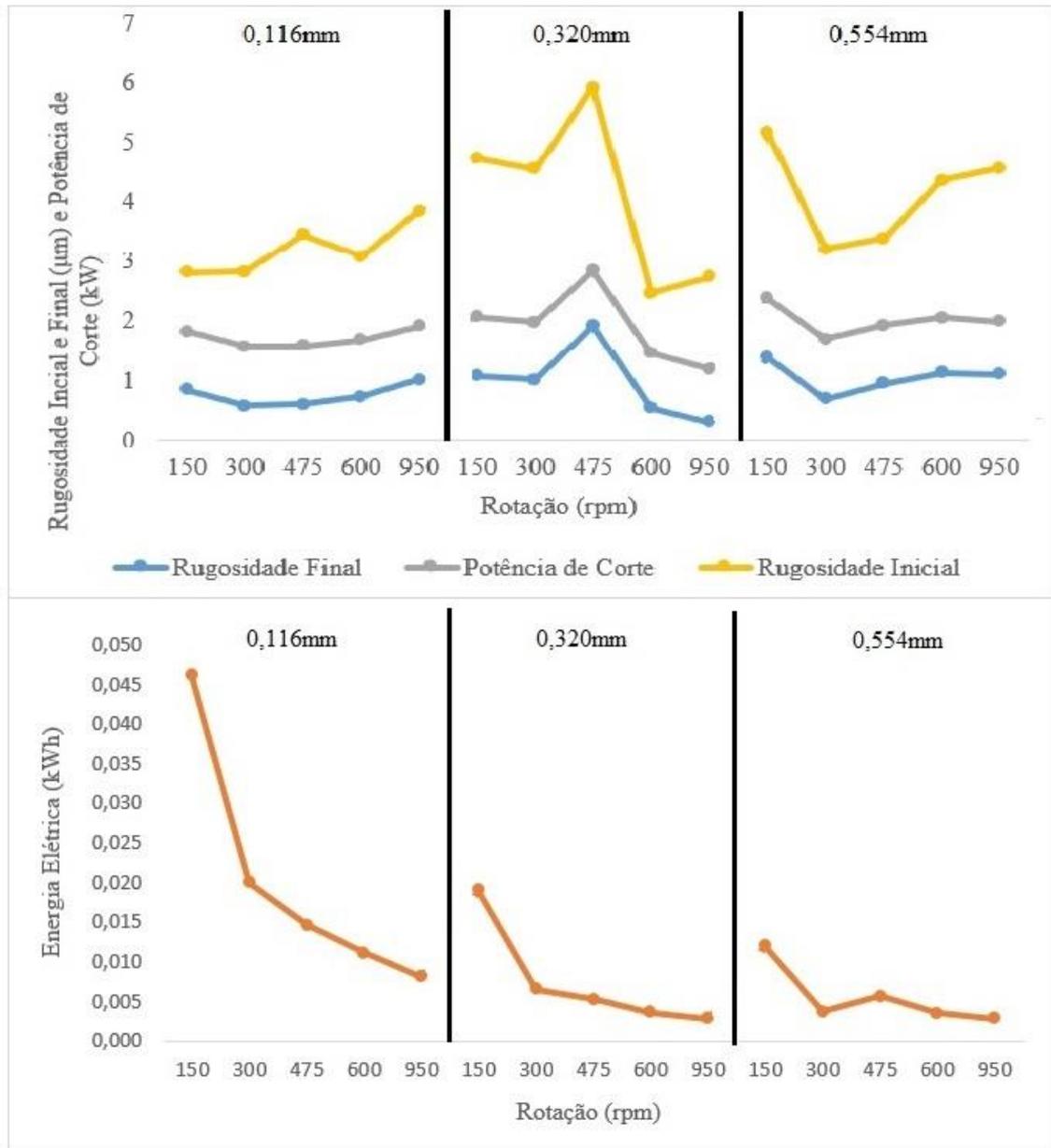
A dureza Vickers do aço 1020 é 185HV. Como resultado da metalografia, tem-se que este aço possui microestrutura constituída de ferrita e perlita, sendo predominante a ferrita. De acordo com Colpaert (2008), a presença de ferrita indica baixa dureza e resistência à tração, enquanto a presença de perlita mostra que o aço não possui baixa dureza, mas também não possui dureza elevada, depende da quantidade de ferrita, ou seja, da relação entre as fases.

A perlita é constituída pela mistura de ferrita e cementita (carboneto de ferro), produzida a 723°C, apresentando-se em forma reticular, globular e laminar, nas fotomicrografias é a parte mais escura. Para a ciência dos materiais, ferrita é o termo utilizado para o ferro puro com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, dando ao ferro e ao aço suas propriedades magnéticas, nas fotomicrografias é a parte mais clara (COLPAERT,2008).

#### ***4.1.2 Rugosidade***

A rugosidade média também é considerada como um parâmetro de avaliação da facilidade de usinagem do material e no presente trabalho, tem-se a rugosidade inicial, ou seja, medida quando as amostras foram adquiridas e a rugosidade após o torneamento junto com a potência de corte e a energia elétrica, como mostra a Figura 4.2.

Figura 4.2 Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica Aço do 1020



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Através dos resultados, é possível ver que houve redução da rugosidade em todas as condições de corte, de forma significativa. As variações mais bruscas foram registradas com o avanço de 0,320mm e nas rotações de 300 e 450 rpm, assim como no trabalho de Kondo et al.,2018. Ao aumentar a rotação 533,3%, há uma melhora da rugosidade de 71,3% e 20% nos avanços de 0,320mm e 0,554mm, respectivamente, além disso, há uma redução da rugosidade em 85,86% para o avanço de 0,116mm, 21,50% para o avanço de 0,320mm e 4,20% para o avanço de 0,554mm após o torneamento.

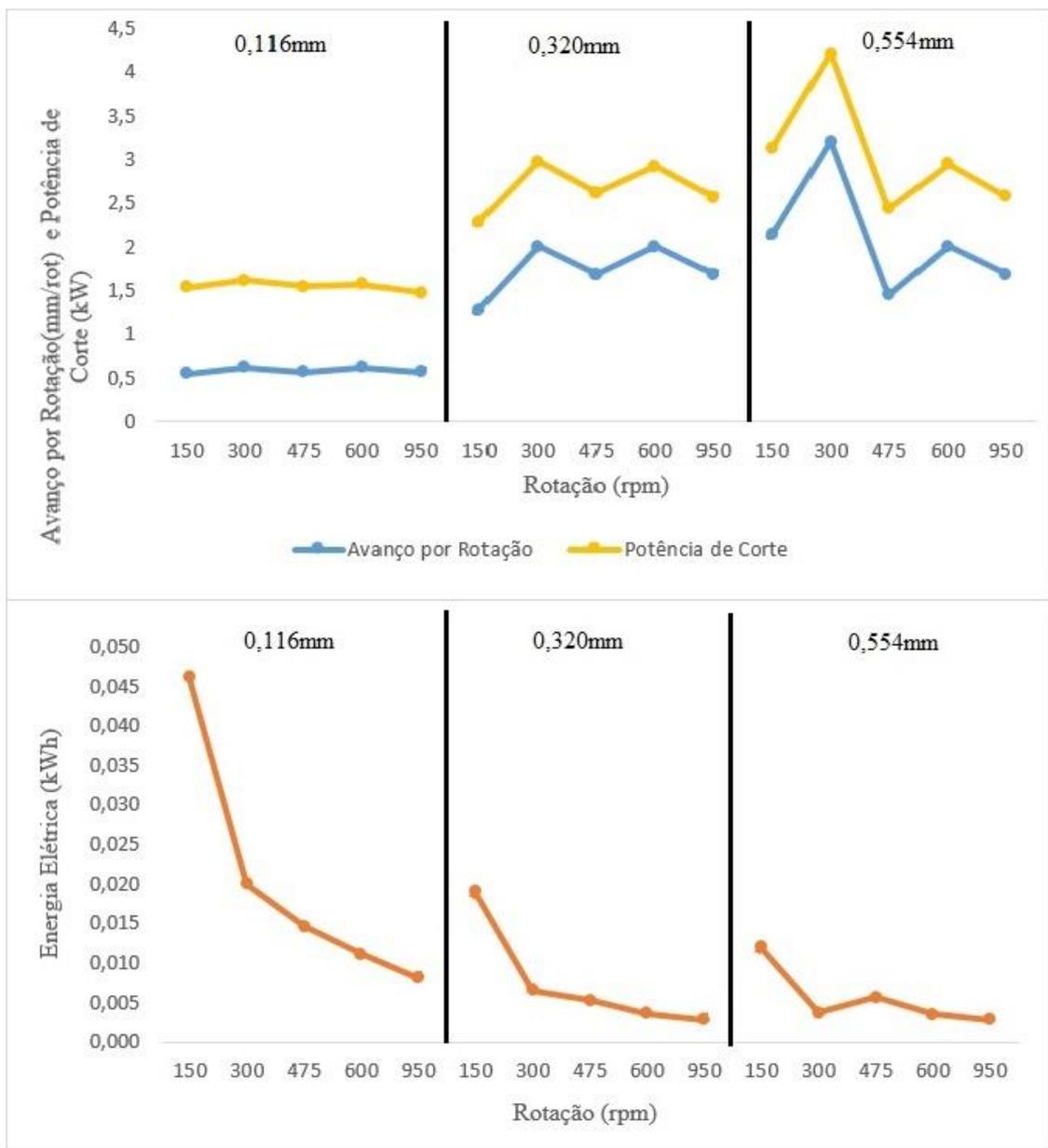
A potência de corte e a rugosidade possuem baixo valor quando a rotação é elevada, com isso a potência de corte segue a mesma variação da rugosidade em relação à rotação. Por

meio da Figura, tem-se que os melhores acabamentos necessitaram de menor potência de corte e maior consumo de energia elétrica.

#### 4.1.3 Diâmetro e Avanço por Rotação

O diâmetro do aço 1020 em todas as amostras foi 22mm e o avanço por rotação junto com potência de corte e energia elétrica é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020



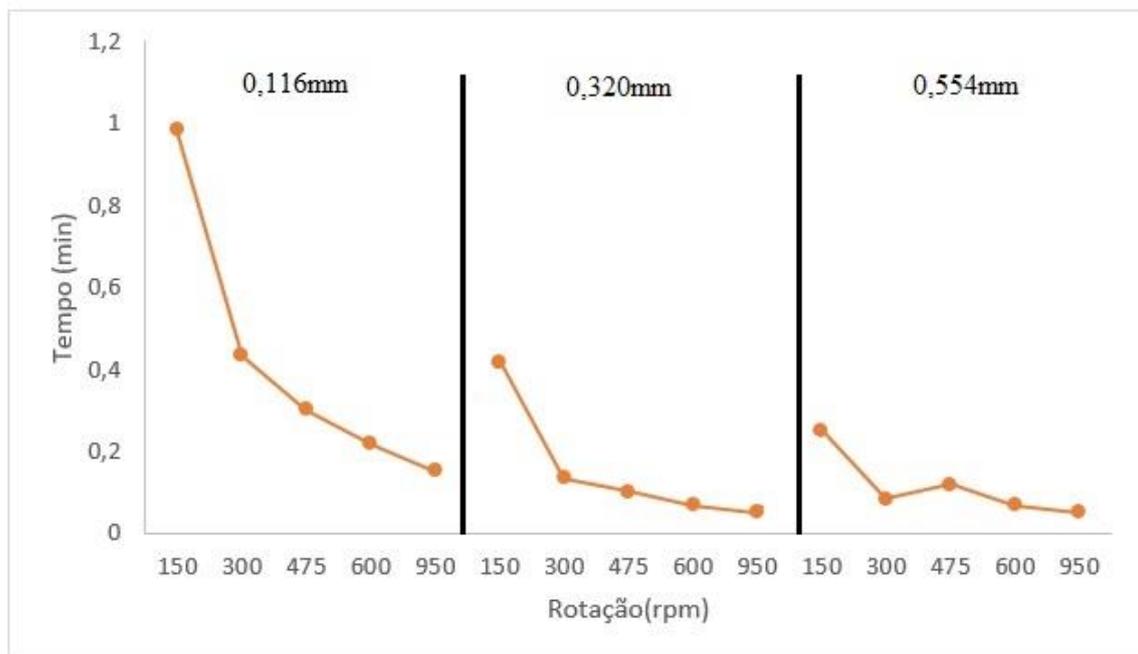
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Para o aço 1020, as variações de avanço por rotação foram bruscas. O maior valor foi registrado no avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Ao ser ter um avanço por rotação elevado, tem-se a potência de corte elevada e o consumo de energia elétrica baixo, mas registra-se aumento de avanço por rotação, potência de corte e energia elétrica quando há mudança de avanço.

#### 4.1.4 Tempo de Processo

Este tópico apresenta o tempo que durou o processo de cada amostra, conforme a Figura 4.4.

Figura 4.4 Tempo de Processo do Aço 1020



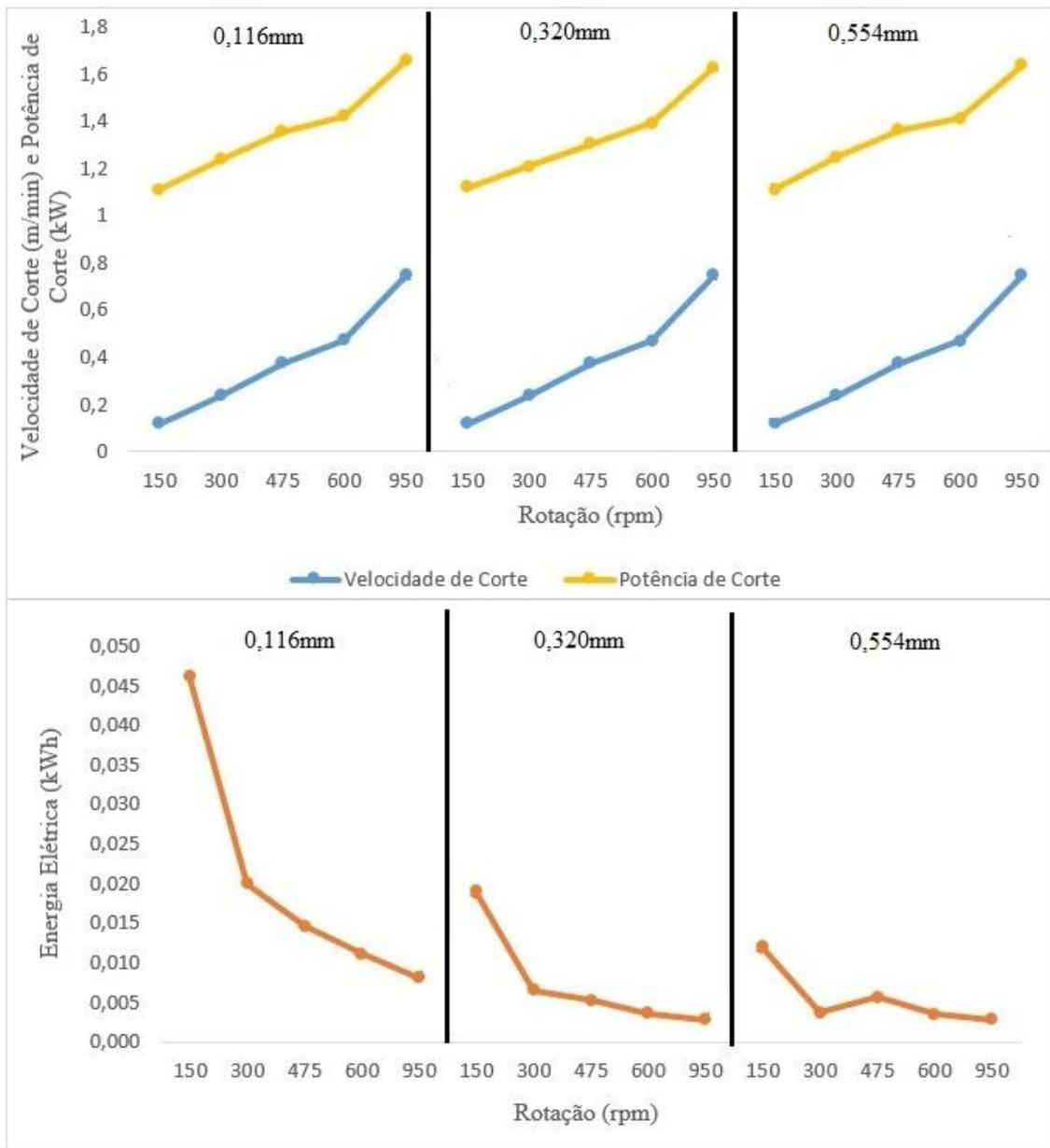
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Foi registrada a necessidade de maior demanda de tempo quando se tem rotações menores, assim, o ideal é trabalhar com rotações mais elevadas para que o processo não se estenda por bastante tempo, independente do avanço. Quando houve o aumento de 533,3% da rotação, a redução do tempo de processo foi maior com o avanço de 0,320mm e foi menor com o avanço de 0,554mm.

#### 4.1.5 Velocidade de Corte

Este tópico explana a velocidade de corte de cada amostra para as devidas condições de teste, conforme a Equação 4. A Figura 4.5 apresenta a velocidade de corte junto com a potência de corte e energia elétrica. A velocidade de corte é dada em m/rot, mas o valor foi dividido por 100 para melhor visualização da curva.

Figura 4.5 Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

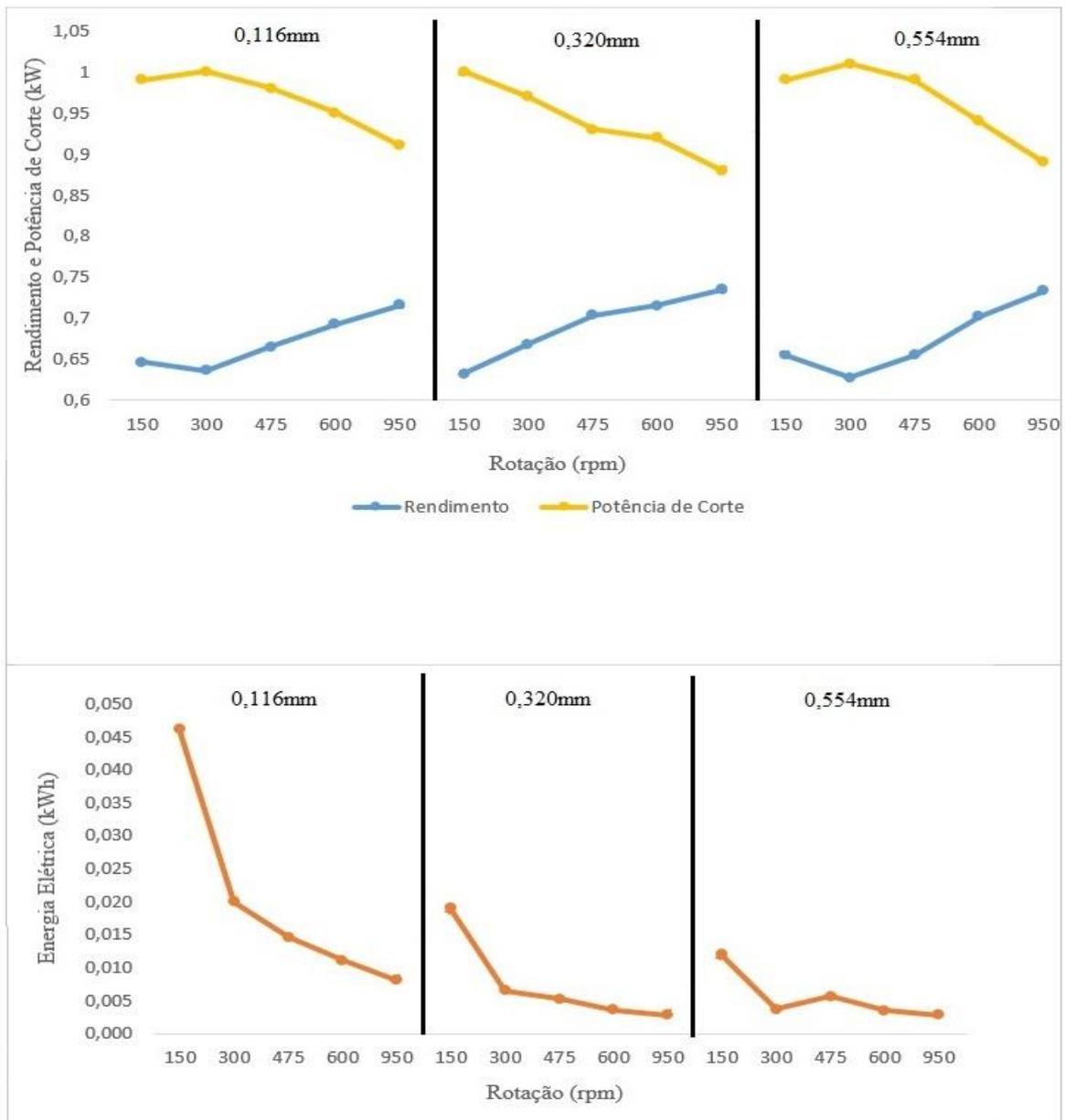
A velocidade de corte é uma variável dependente do diâmetro inicial, do comprimento da amostra, do avanço por rotação e do tempo, segundo Groover (2010), no presente trabalho, o diâmetro inicial e o comprimento de todas as amostras são iguais, assim, a velocidade de corte está totalmente em função do tempo e tem-se menor gasto de tempo ao se trabalhar com altas velocidade de corte. Por tanto, quando o aço 1020 necessita de maior tempo, sua velocidade de corte é menor.

Analisando a Figura acima, a potência de corte é elevada quando se tem altos valores de velocidade de corte e a curva seguem um padrão em todos os avanços. Quanto ao consumo de energia elétrica, para ter reduzido consumo, necessita-se de velocidade de corte elevada.

#### **4.1.6 *Rendimento***

De acordo com o tópico 3.2.3, o analisador de energia obteve o valor da corrente elétrica em cada teste e por intermédio da curva característica do motor, tem-se o rendimento do motor durante o torneamento de cada amostra, a Figura 4.6 apresenta o rendimento junto com a potência de corte e a energia elétrica.

Figura 4.6 Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

De acordo com Mamede (2017), a potência útil do motor é diretamente proporcional a rotação e como o rendimento depende desta potência, conclui-se que o rendimento possui ligação direta com a rotação, destarte, a Figura apresenta que o valor do rendimento é maior quando se tem rotações elevadas, ou seja, o aumento da velocidade aumenta o carregamento do motor, o que provoca o aumento do rendimento da produção.

Quando houve aumento de 533,3% da rotação, para o avanço de 0,116mm, houve aumento de rendimento em 10,83%, para o avanço de 0,320mm, o rendimento aumentou 16,30% e para o avanço de 0,554mm, esse aumento foi de 11,90%, assim, nota-se que a

porcentagem aumentou quando o avanço vai de 0,116 para 0,320, mas diminuiu quando foi para 0,554mm.

Como era de ser esperado, o rendimento é baixo para valores de potência de corte e consumo de energia elétrica elevados, pois com a elevação da potência ativa, têm-se mais perdas.

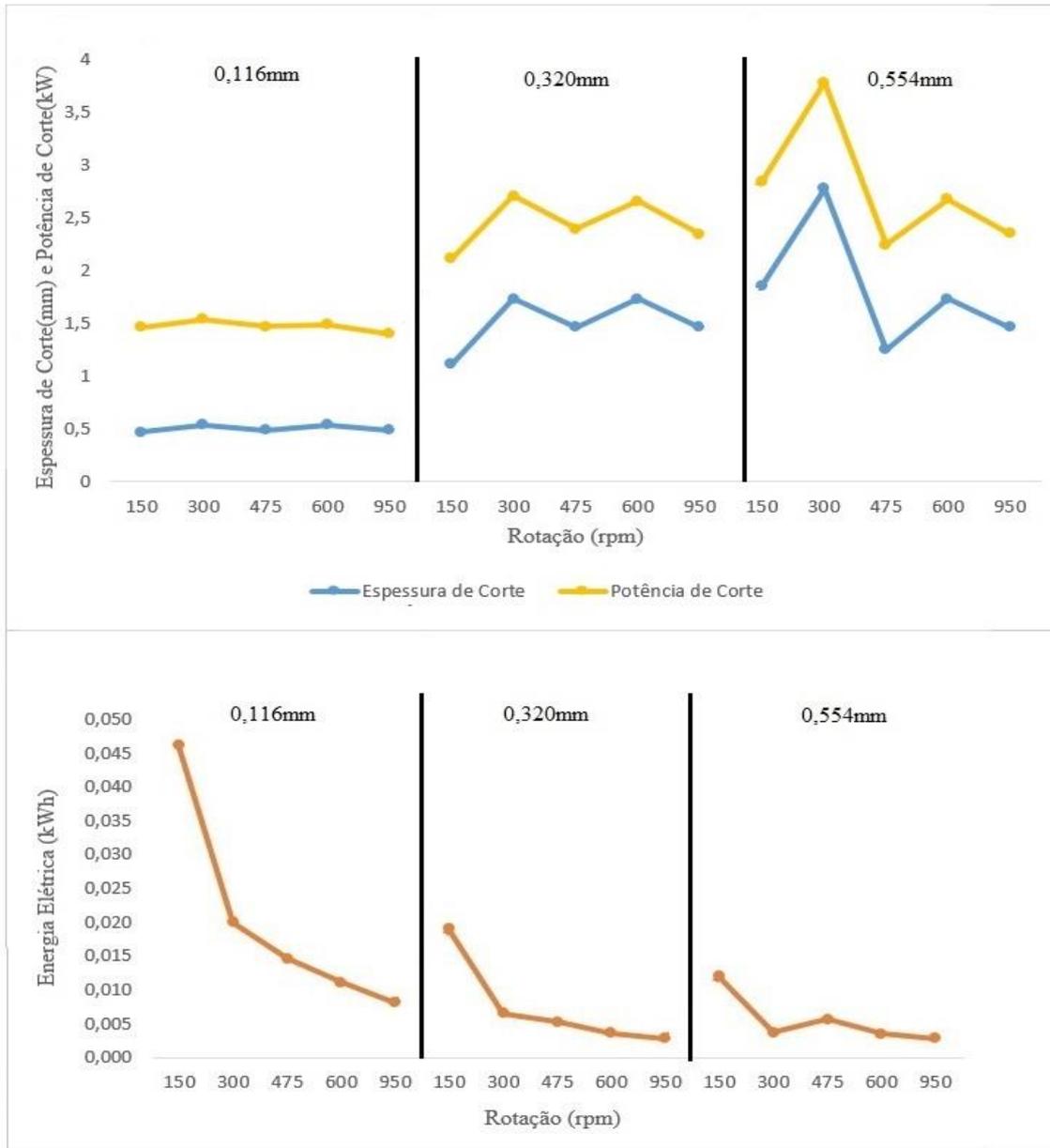
#### ***4.1.7 Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte***

Baseado nas Equações 14 e 15, pode-se calcular os valores da largura de corte e da profundidade de corte, respectivamente. A profundidade de corte, e consequentemente a largura de corte, são as mesmas em todas as amostras, o valor da profundidade de corte é 1,500mm e a largura de corte é igual a 1,732mm. O ângulo de direção do gume da ferramenta é 60° para o aço 1020.

#### ***4.1.8 Espessura de Corte***

Através da Equação 13, tem-se o cálculo da espessura de corte, a Figura 4.7 mostra a espessura de corte junto com a potência de corte e a energia elétrica de cada amostra.

Figura 4.7 Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020



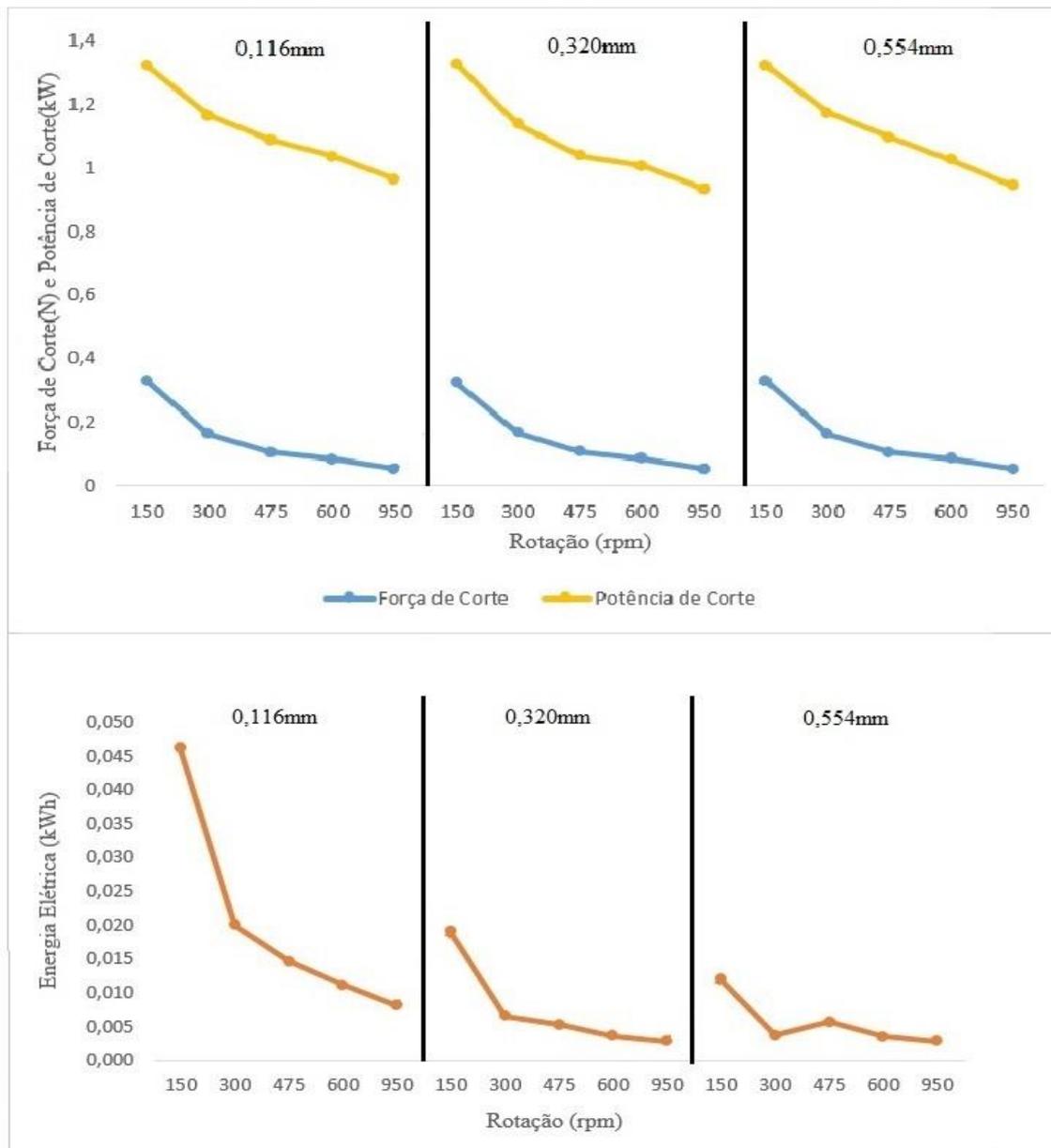
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A espessura de corte depende do avanço por rotação, discutido no tópico 4.1.3, de modo que houve um pico para o avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Sendo assim, como no avanço por rotação, a espessura de corte elevada causa uma potência de corte elevada e baixo consumo de energia elétrica, exceto para o avanço de 0,116mm.

#### 4.1.9 Força de Corte

Conforme a Equação 3, citada anteriormente, apresenta-se o cálculo da força. Os resultados da força de corte junto com a potência de corte e energia elétrica podem ser vistos na Figura 4.8. A força de corte é dada em N, mas o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.8 Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Observou-se que não há mudanças bruscas nos resultados com a mudança de avanço, segue um padrão. Quando houve aumento de 533,3% na rotação, a redução da força de

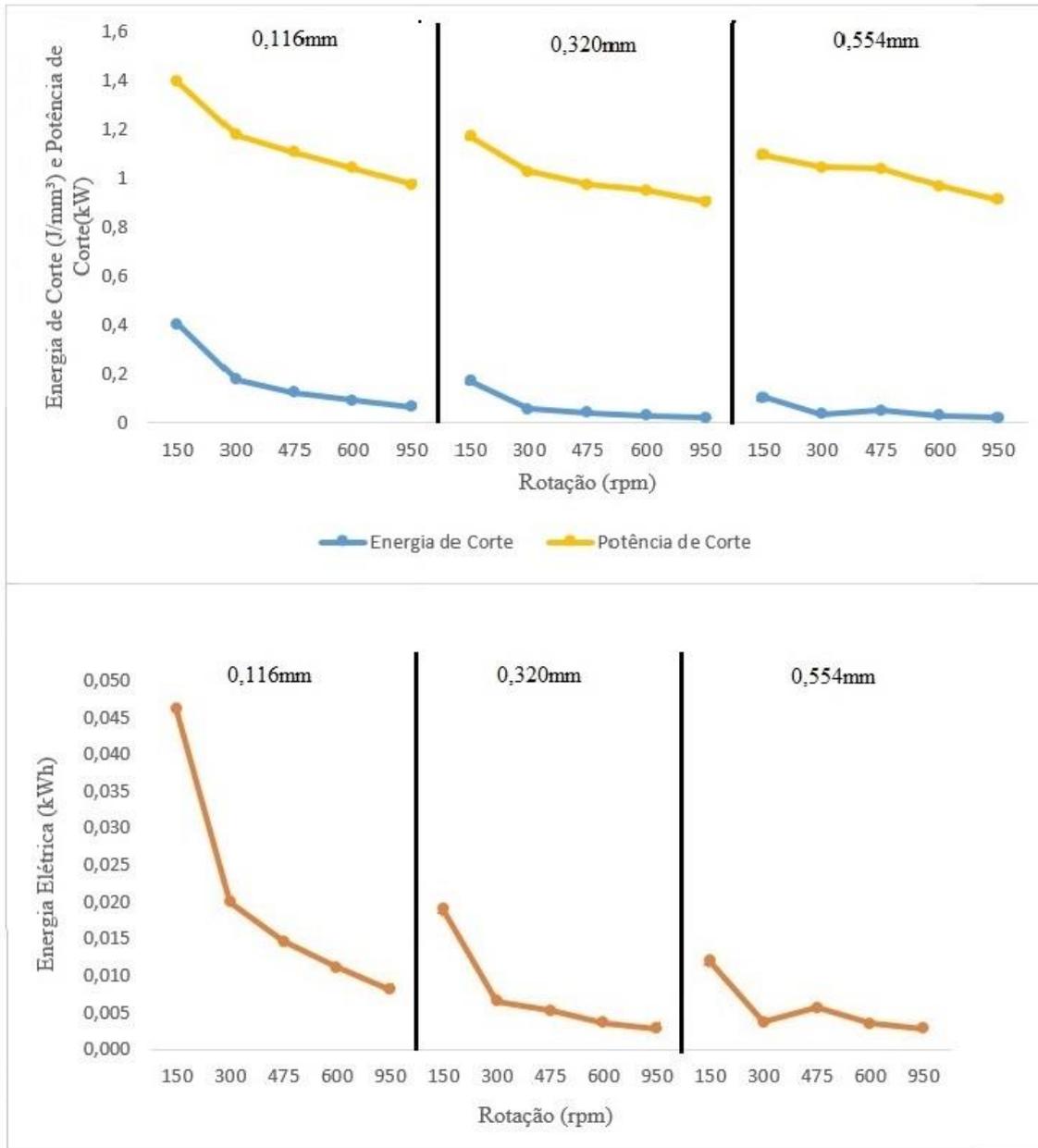
corte foi de 84% para o avanço de 0,116mm, 83,88% para o avanço de 0,320mm e 84,12% para o avanço de 0,554mm, tais valores são próximos devido os valores da força de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço e no caso do aço 1020, nota-se que a porcentagem diminuiu quando o avanço aumentou de 0,116mm para 0,320mm, mas aumentou quando o avanço se tornou 0,554mm.

A força de corte é proporcional a potência de corte, uma vez que é uma variável utilizada no cálculo da potência, no numerador, para elevados valores de força de corte, maior é o consumo energia elétrica, porque quanto mais esforço se necessita para realizar o corte, mais potência é consumida e mais tempo é gasto.

#### ***4.1.10 Energia de Corte***

Baseado na Equação 12 contém o cálculo da energia de corte, mostrado na Figura 4.9 junto com a potência de corte e a energia elétrica. A energia de corte é dada em J/mm<sup>3</sup>, mas o valor foi dividido por 10000 objetivando a melhor visualização da curva.

Figura 4.9 Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1020



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Houve redução da energia de corte com o aumento da rotação e do avanço, uma vez que a espessura de corte depende do avanço por rotação. A maior variação da energia de corte é quando a rotação aumenta de 150 rpm para 300 rpm com o avanço de 0,116mm.

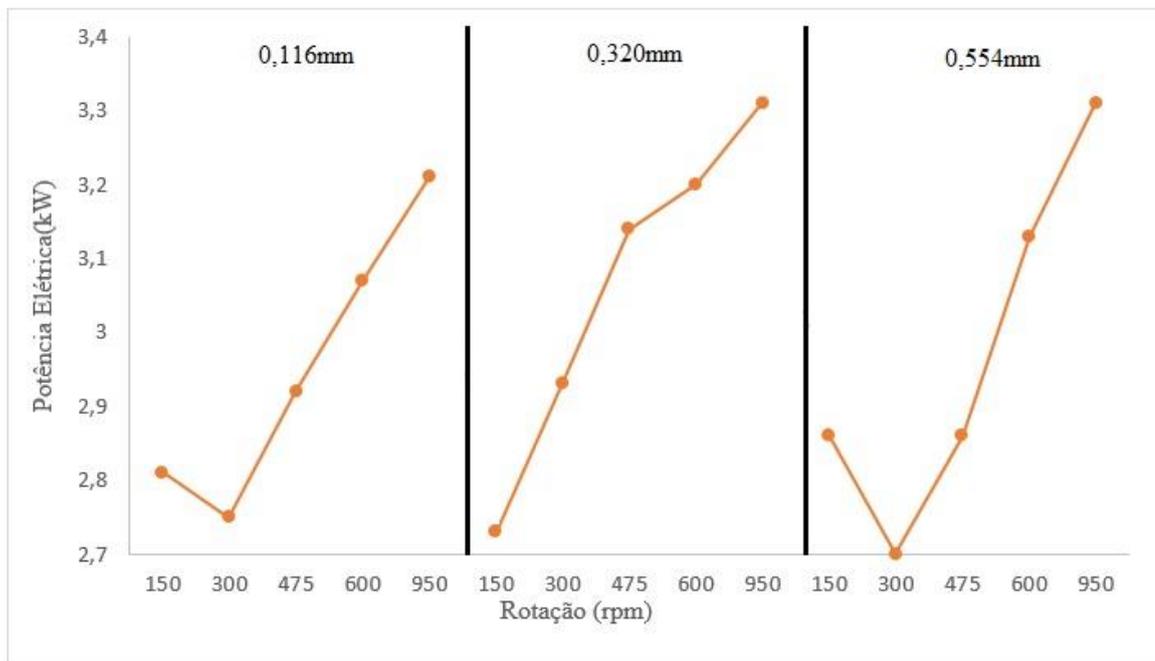
Com o aumento da rotação em 533,3% da rotação, houve redução da energia de corte de 84,45% para o avanço de 0,116mm, 87,76% para o avanço de 0,320mm e 79,90% para o avanço de 0,554mm, assim como na força de corte, é possível ver que tem-se valores muito próximos devido aos valores de energia de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço.

As variações de energia e potência de corte não são tão bruscas com a mudança de rotação e avanço. Para elevados valores de potência de corte, tem-se elevados valores de energia de corte, pois ambas dependem da força de corte, discutida anteriormente.

#### 4.1.11 Potência Elétrica

Conforme os resultados obtidos a partir do uso do analisador de energia, tem-se a potência elétrica fornecidas em cada teste, mostrada na Figura 4.10.

Figura 4.10 Potência Elétrica do Aço 1020



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Nota-se variações bruscas da potência elétrica conforme a mudança de rotação e de avanço, uma vez que esta aumenta consoante há aumento da rotação, porém quanto ao avanço, houve aumento da potência quando foi de 0,116mm para 0,320mm e uma diminuição da potência quando foi de 0,320mm para 0,554mm.

Quando obtém-se um aumento de 533,3% da rotação, a potência elétrica registra um aumento de 14,23% para o avanço de 0,116mm, 21,24% para o avanço de 0,320mm e 15,73% para o avanço de 0,554mm.

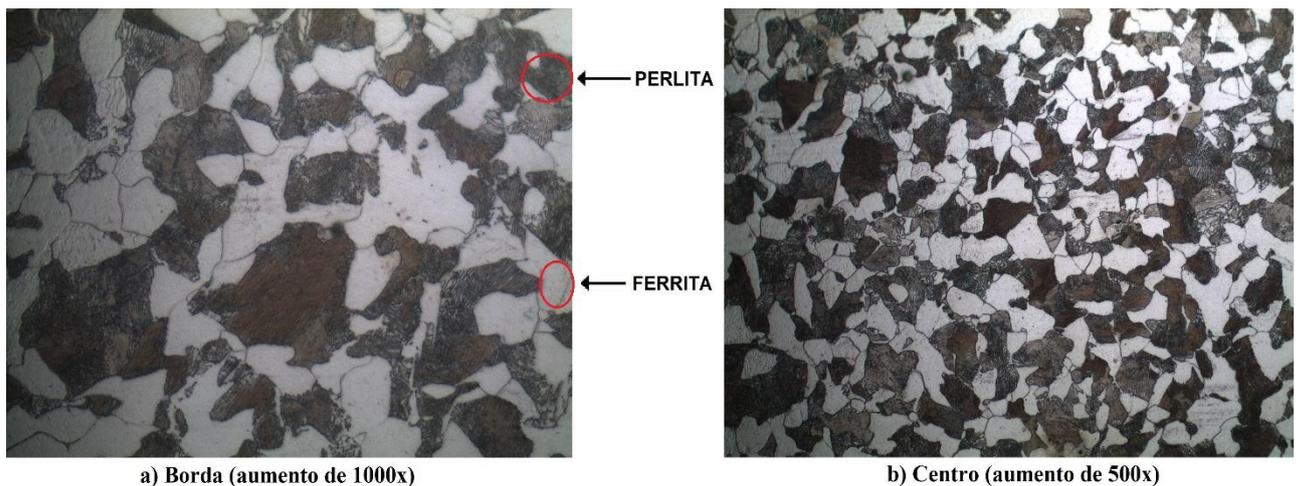
## 4.2 1045

O presente tópico apresenta a fotomicrografia, a dureza Vickers, as rugosidades iniciais e finais, o diâmetro, o avanço por rotação, o tempo de processo, a velocidade de corte, o rendimento, a profundidade de corte, o ângulo de direção do gume da ferramenta, a espessura e largura de corte, a força de corte, a potência de corte, a energia de corte, a potência elétrica e a energia elétrica referentes aos experimentos realizados no aço 1045.

### 4.2.1 Fotomicrografia e Dureza Vickers

A Figura 4. 11 representa a fotomicrografia da borda e do centro, no qual é possível ver o contorno de grão.

Figura 4.11 Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 1045



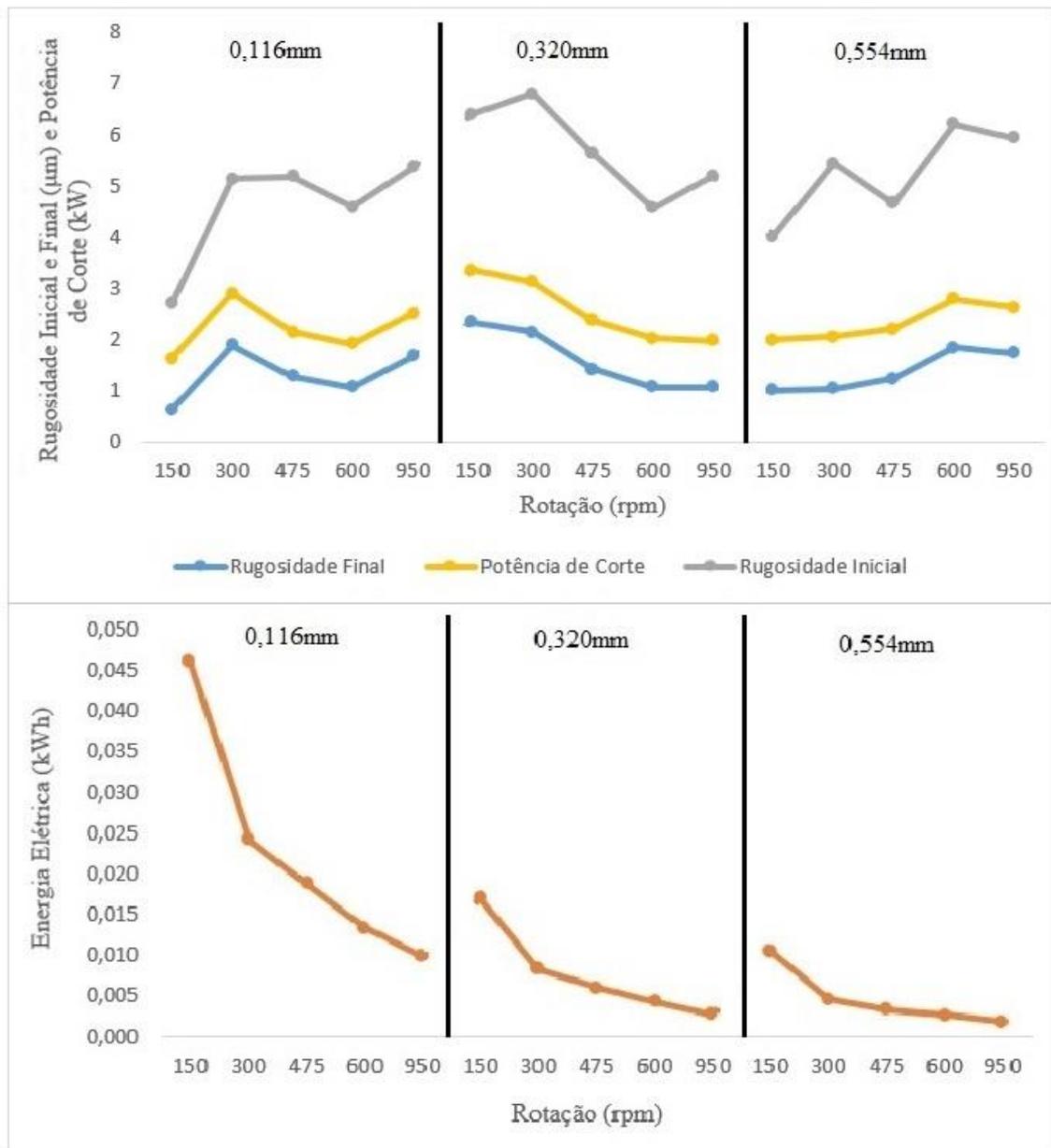
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

A dureza Vickers do aço 1045 é 262HV. Como resultado da metalografia, tem-se que este aço possui microestrutura constituída de ferrita e perlita, sendo predominante a perlita. De acordo com Colpaert (2008), a presença de ferrita indica baixa dureza e resistência à tração, enquanto a presença de perlita mostra que o aço não possui baixa dureza, mas também não possui dureza elevada, depende da quantidade de ferrita, ou seja, da relação entre as fases.

### 4.2.2 Rugosidade

A rugosidade média também é considerada como um parâmetro de avaliação da facilidade de usinagem do material e no presente trabalho, obtém-se a rugosidade inicial, ou seja, medida quando as amostras foram adquiridas e a rugosidade após o torneamento junto com a potência de corte e a energia elétrica, como mostra a Figura 4.12.

Figura 4.12 Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Através dos resultados, é possível ver que houve redução da rugosidade em todas as condições de corte, de forma significativa. As variações mais bruscas foram registradas com o avanço de 0,32mm e nas rotações de 300 e 450 rpm, assim como no trabalho de Kondo et al.(2018). Ao aumentar a rotação 533,3%, há uma melhora da rugosidade de 54,07% no avanço de 0,320mm, além disso, há uma redução da rugosidade em 63,02% para o avanço de 0,116mm, 66,82% para o avanço de 0,320mm e 35,03% para o avanço de 0,554mm após o torneamento.

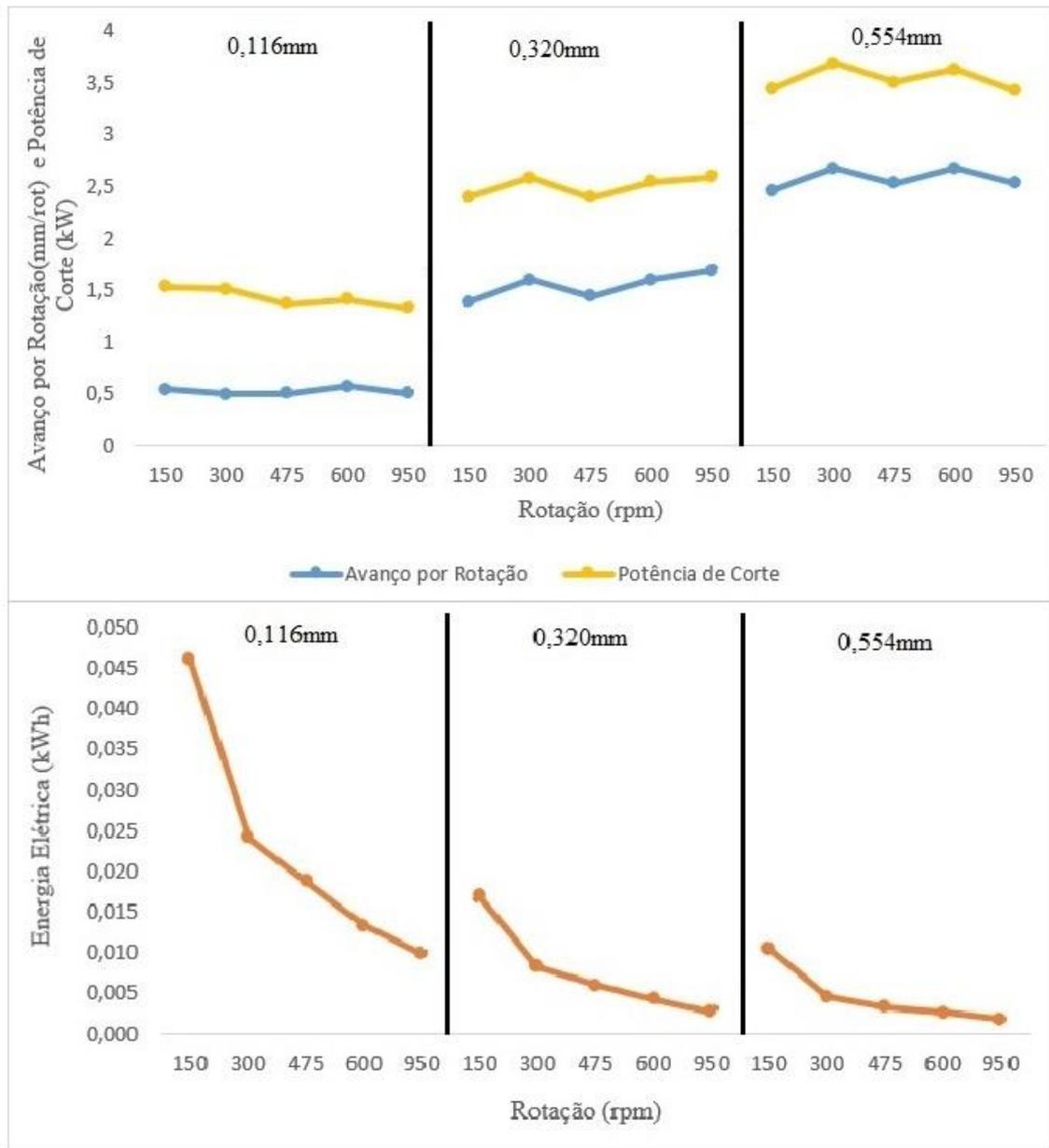
Biasibetti et al. (2019) investigaram que os parâmetros de maior influência na rugosidade no aço 1045 são: avanço, velocidade de corte e ângulo de direção do gume da ferramenta. Sendo o avanço o mais significativo e o ângulo de direção do gume da ferramenta menos significativo. Nesta pesquisa, verificou-se que ao comparar esses três parâmetros, o avanço tem maior impacto sobre a rugosidade do que os demais.

Como discutido no tópico 4.1.2, a potência de corte e a rugosidade possuem baixo valor quando a rotação é elevada, com isso a potência de corte segue a mesma variação da rugosidade em relação à rotação. Por meio da Figura, tem-se que os melhores acabamentos necessitaram de menor potência de corte e maior consumo de energia elétrica, havendo apenas alguns picos.

### ***4.2.3 Diâmetro e Avanço por Rotação***

O diâmetro do aço 1045 em todas as amostras foi 21 mm e o avanço por rotação junto com potência de corte e energia elétrica é mostrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045



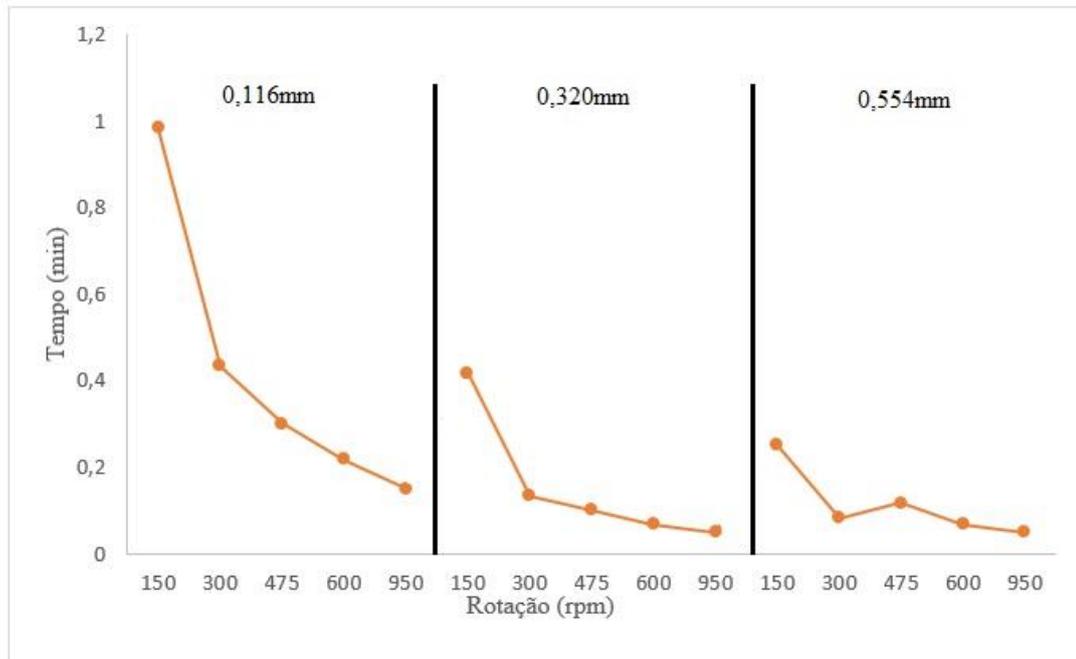
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Para o aço 1045, registrou a maior retirada de material ao completar o processo de faceamento e as variações de avanço por rotação foram bruscas. O maior valor foi registrado no avanço de 0,554mm com as rotações de 300 e 600 rpm. Assim como avaliado no item 4.1.3, ao ser ter um avanço por rotação elevado, tem-se a potência de corte elevada e o consumo de energia elétrica baixo, contudo quando o avanço é de 0,116mm, tem-se que há maior variação de energia e menor variação do avanço por rotação, além do avanço por rotação decrescer junto com a energia elétrica.

#### 4.2.4 Tempo de Processo

Este tópico apresenta o tempo que durou o processo de cada amostra, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.14 Tempo de Processo do Aço 1045



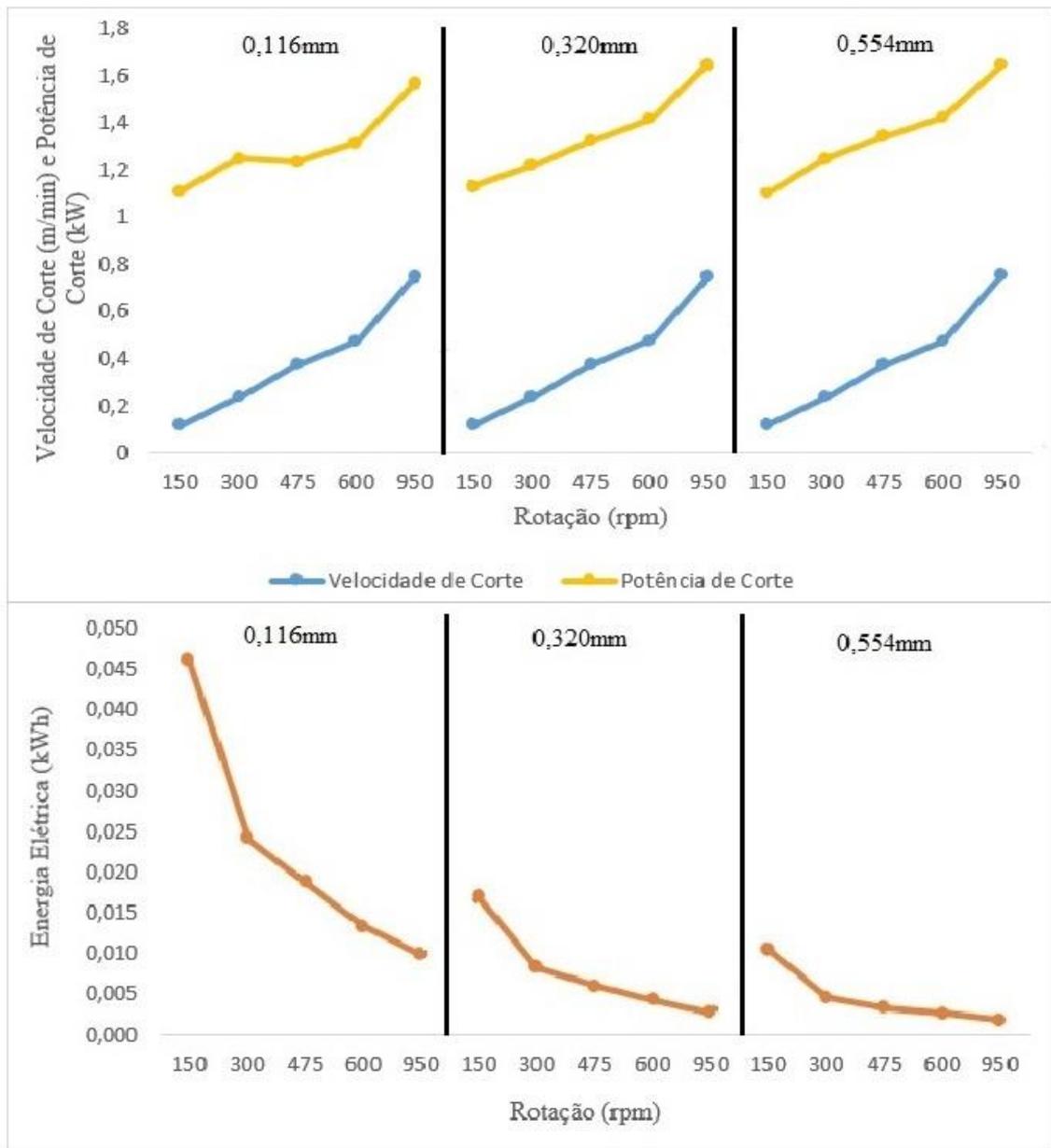
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Foi registrada a necessidade de maior demanda de tempo quando se tem rotações menores, assim, o ideal é trabalhar com rotações mais elevadas a fim de que o processo não se estenda por bastante tempo, independente do avanço. Quando houve o aumento de 533,3% da rotação, a redução do tempo de processo foi maior com o avanço de 0,320mm e foi menor com o avanço de 0,116mm.

#### 4.2.5 Velocidade de Corte

Este tópico explana a velocidade de corte de cada amostra para as devidas condições de teste, conforme a Equação 4. A Figura 4.15 apresenta a velocidade de corte junto com a potência de corte e energia elétrica. A velocidade de corte é dada em m/rot, todavia o valor foi dividido por 100 para melhor visualização da curva.

Figura 4.15 Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

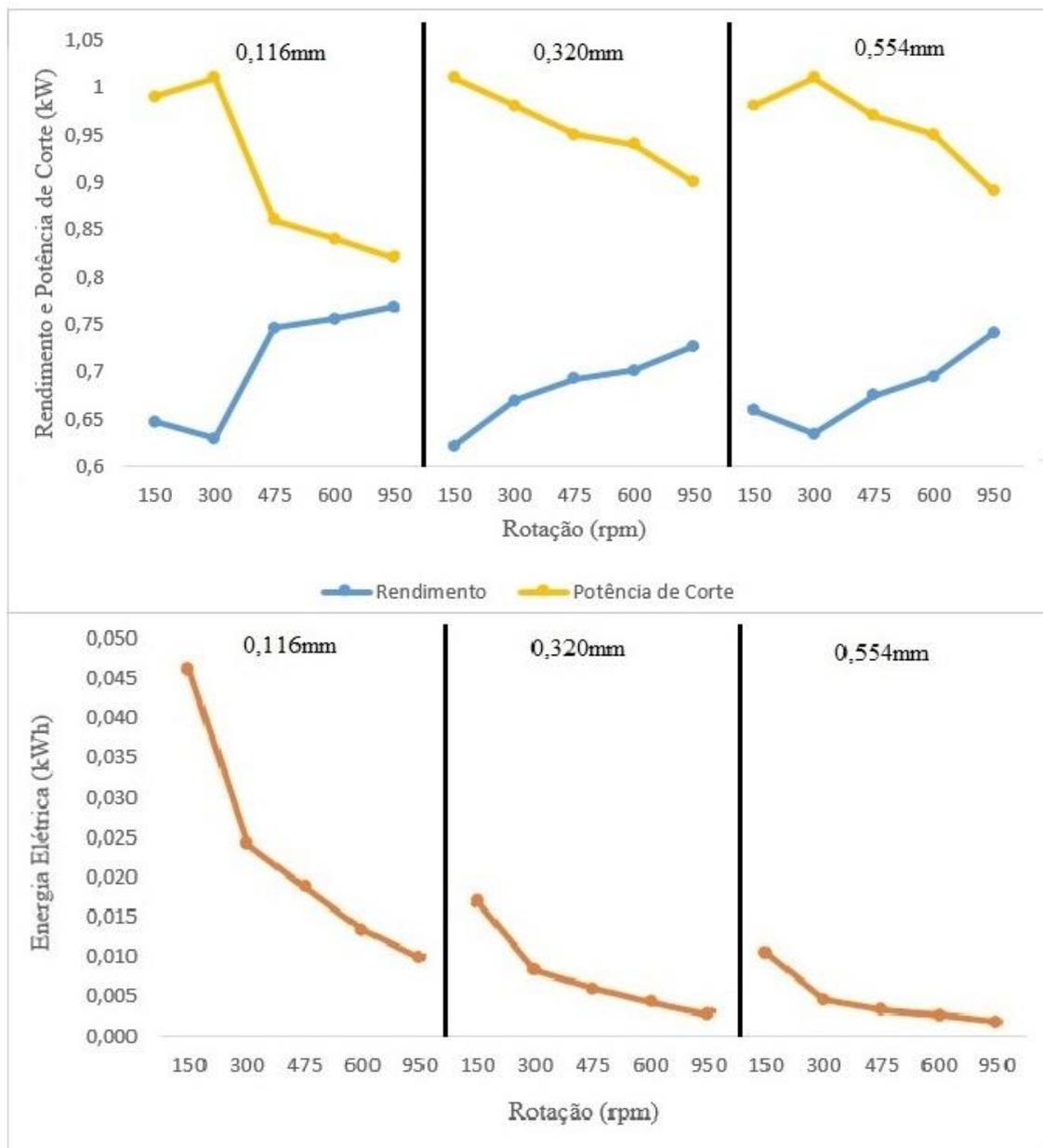
Quando o aço 1045 necessita de maior tempo, sua velocidade de corte é menor. Também nota-se que houve aumento da velocidade de corte conforme foi aumentando o avanço.

Analisando a Figura acima, como no tópico 4.1.5, a potência de corte é elevada quando se tem altos valores de velocidade de corte e a curva seguem um padrão em todos os avanços. Quanto ao consumo de energia elétrica, para ter reduzido consumo, necessita-se de velocidade de corte elevada.

#### 4.2.6 *Rendimento*

De acordo com o t3pico 3.2.3, o analisador de energia obteve o valor da corrente el3trica em cada teste e por interm3dio da curva caracter3stica do motor, tem-se o rendimento do motor durante o torneamento de cada amostra, a Figura 4.16 apresenta o rendimento junto com a pot3ncia de corte e a energia el3trica.

Figura 4.16 Rendimento, Pot3ncia de Corte e Energia El3trica do A3o 1045



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Quando houve aumento de 533,3% da rotação, para o avanço de 0,116mm, houve aumento de rendimento em 18,70%, para o avanço de 0,320mm, o rendimento aumentou 17,07% e para o avanço de 0,554mm, esse aumento foi de 12,44%, assim, nota-se que a porcentagem diminuiu quando o avanço aumenta.

Como visto no tópico 4.1.6, era de se esperar, o rendimento é baixo para valores de potência de corte e consumo de energia elétrica elevados, pois com a elevação da potência ativa, têm-se mais perdas. Também nota-se diminuição do rendimento quando o avanço de foi 0,116mm para 0,320mm, no entanto esta variável aumentou novamente quando avanço foi para 0,554mm.

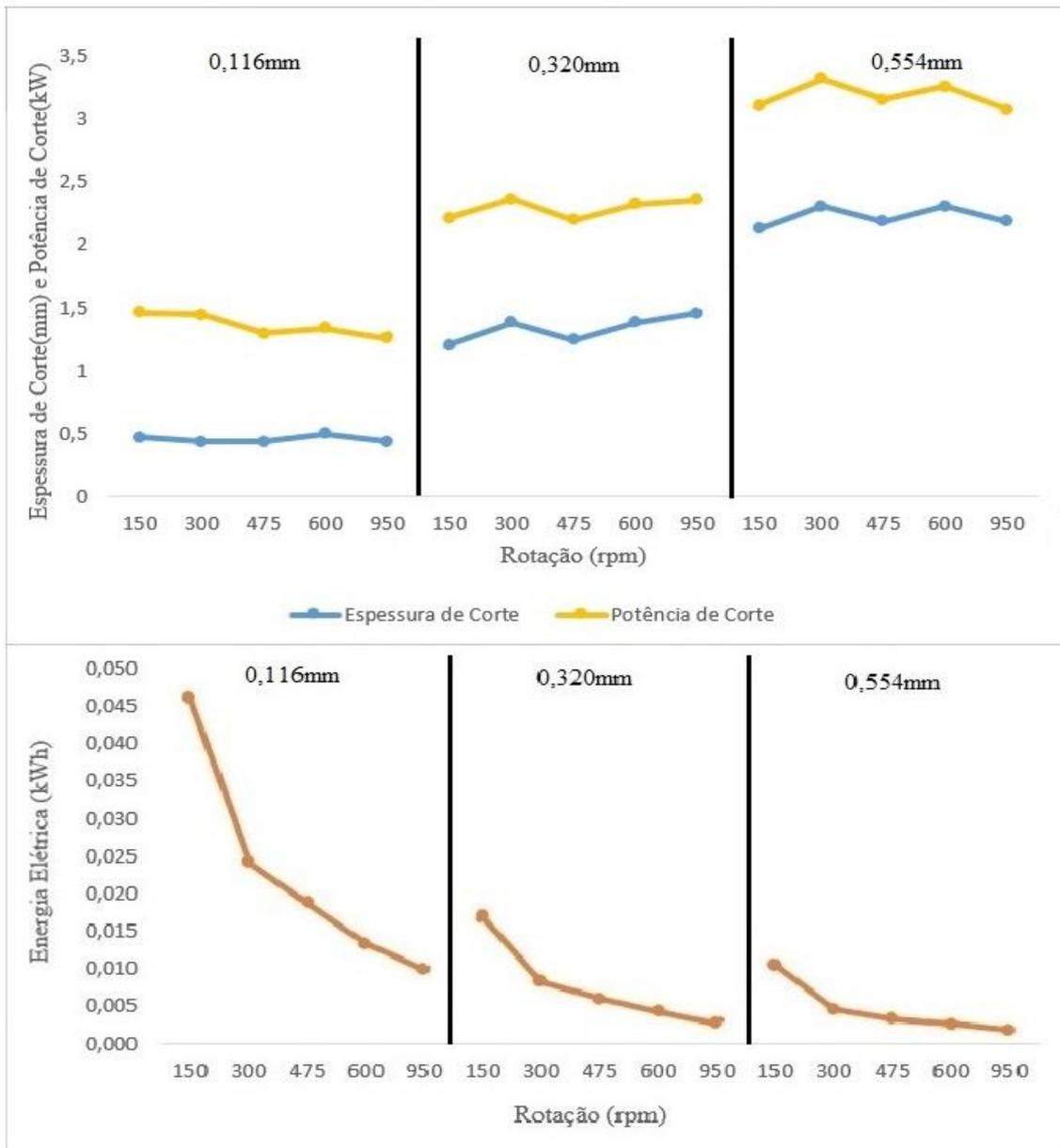
#### ***4.2.7 Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte***

Baseado nas Equações 14 e 15, pode-se calcular os valores da largura de corte e da profundidade de corte, respectivamente. A profundidade de corte, e consequentemente a largura de corte, são as mesmas em todas as amostras, o valor da profundidade de corte é 2mm e a largura de corte é igual a 2,315mm. O ângulo de direção do gume da ferramenta é 59,8° para o aço 1045.

#### ***4.2.8 Espessura de Corte***

Através da Equação 13, tem-se o cálculo da espessura de corte, a Figura 4.17 mostra a espessura de corte junto com a potência de corte e a energia elétrica de cada amostra.

Figura 4.17 Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045



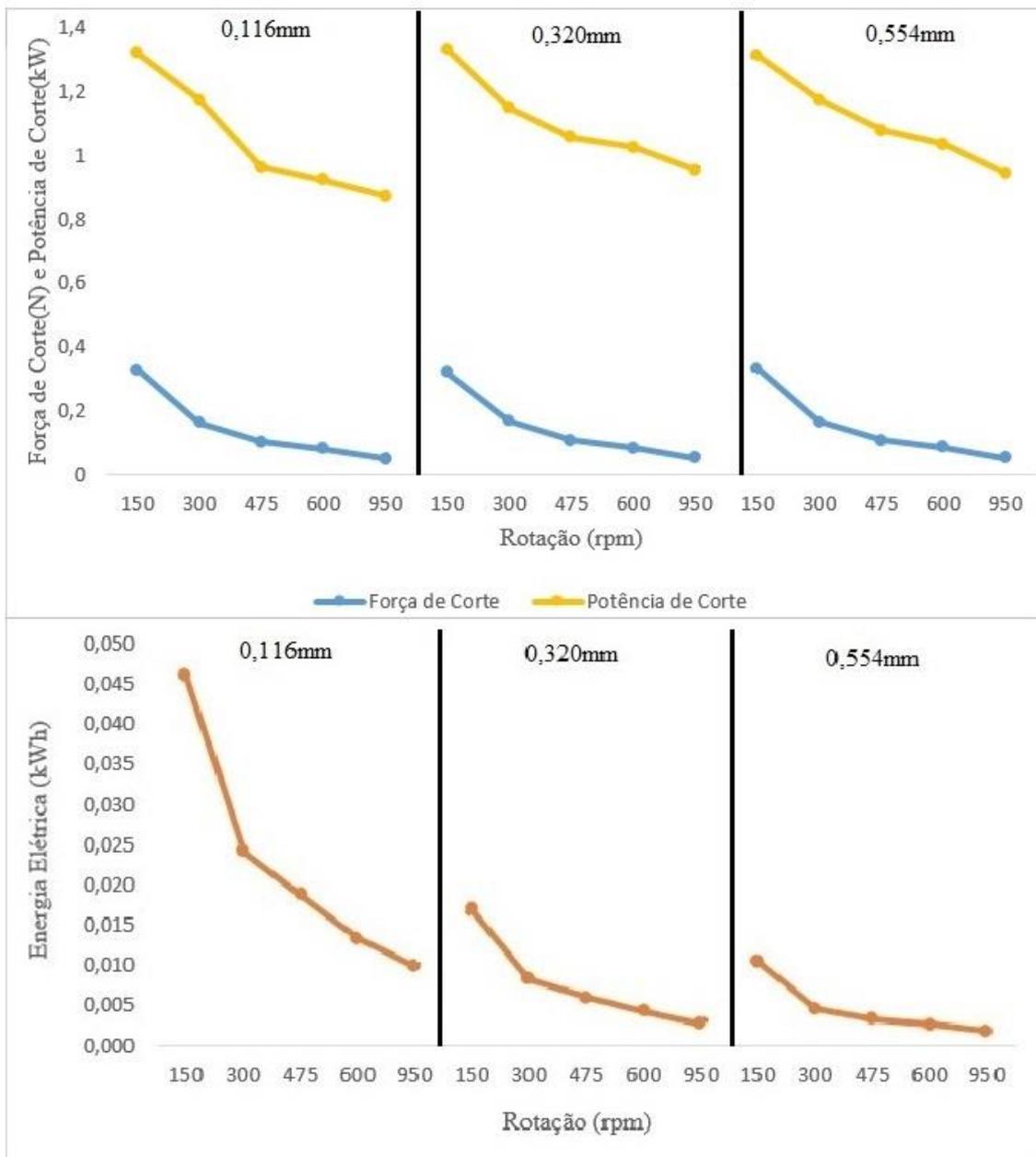
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A espessura de corte depende do avanço por rotação, discutido no tópico 4.2.3, de modo que houve um pico para o avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Sendo assim, como no avanço por rotação, a espessura de corte elevada causa uma potência de corte elevada e baixo consumo de energia elétrica, exceto para o avanço de 0,116mm, como foi visto no tópico 4.1.8.

### 4.2.9 Força de Corte

Conforme a Equação 3, citada anteriormente, apresenta-se o cálculo da força. Os resultados da força de corte junto com a potência de corte e energia elétrica podem ser vistos na Figura 4.18. A força de corte é dada em N, mas o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.18 Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

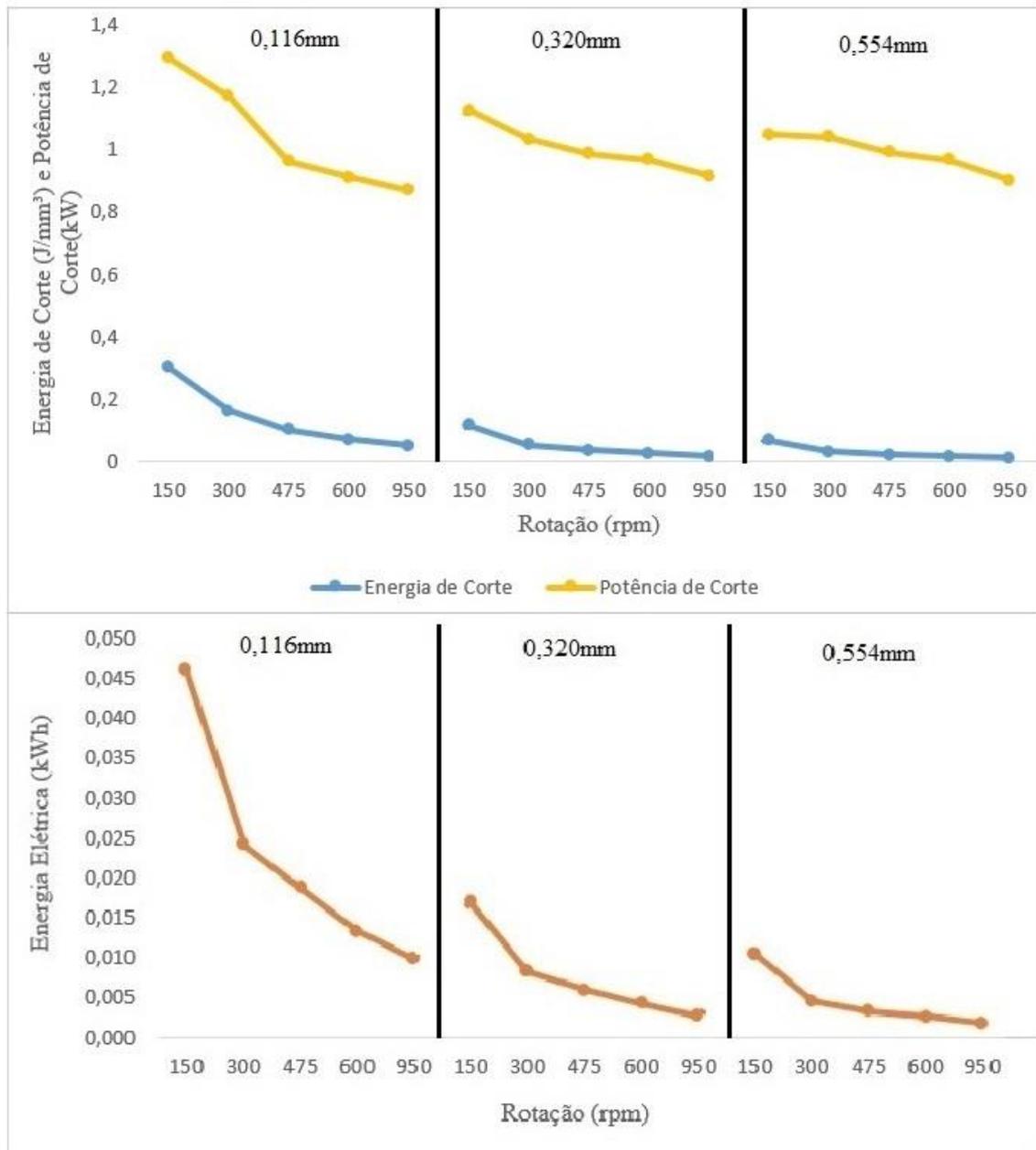
Observou-se que não há mudanças bruscas nos resultados com a mudança de avanço, segue um padrão. Quando houve aumento de 533,3% na rotação, a redução da força de corte foi de 84,57% para o avanço de 0,116mm, 83,46% para o avanço de 0,320mm e 84,22% para o avanço de 0,554mm, tais valores são próximos devido os valores da força de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço e no caso do aço 1045, nota-se que a porcentagem diminuiu quando o avanço aumentou de 0,116mm para 0,32mm, entretanto aumentou quando o avanço se tornou 0,554mm.

Conforme discutido no tópico 4.1.9, a força de corte é proporcional a potência de corte, uma vez que é uma variável utilizada no cálculo da potência, no numerador, para elevados valores de força de corte, maior é o consumo energia elétrica, porque quanto mais esforço se necessita para realizar o corte, mais potência é consumida e mais tempo é gasto.

#### ***4.2.10 Energia de Corte***

Baseado na Equação 12 tem-se o cálculo da energia de corte, mostrado na Figura 4.19 junto com a potência de corte e a energia elétrica. A energia de corte é dada em  $J/mm^3$ , não obstante o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.19 Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 1045



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Houve redução da energia de corte com o aumento da rotação e do avanço, uma vez que a espessura de corte depende do avanço por rotação e é inversamente proporcional a energia de corte. A maior variação da energia de corte é quando a rotação aumenta de 150 rpm para 300 rpm com o avanço de 0,116mm.

Com o aumento da rotação em 533,3% da rotação, houve redução da energia de corte de 83,43% para o avanço de 0,116mm, 86,33% para o avanço de 0,320mm e 84,63% para o avanço de 0,554mm, assim como na força de corte, é possível ver que tem-se valores muito

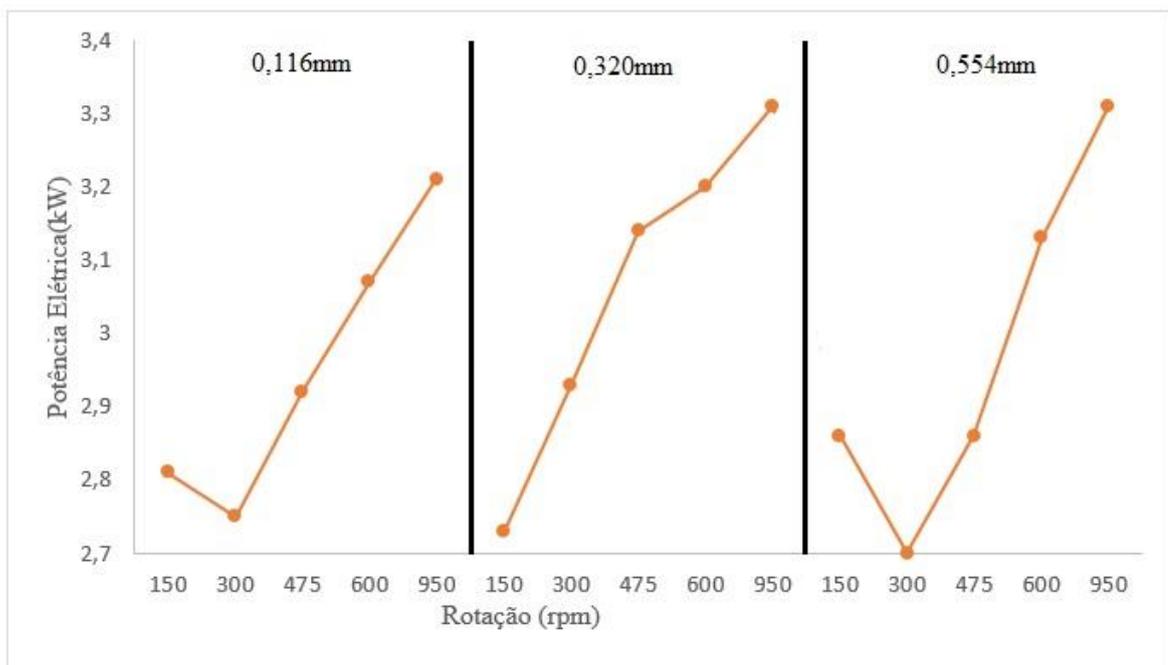
próximos devido aos valores de energia de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço.

Como analisado no tópico 4.1.10, as variações de energia e potência de corte não são tão bruscas com a mudança de rotação e avanço. Para elevados valores de potência de corte, tem-se elevados valores de energia de corte, pois ambas dependem da força de corte, discutida anteriormente.

#### 4.2.11 Potência Elétrica

Consoante os resultados obtidos a partir do uso do analisador de energia, tem-se a potência elétrica fornecidas em cada teste, mostrada na Figura 4.20.

Figura 4.20 Potência Elétrica do Aço 1045



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Têm-se variações bruscas da potência elétrica como a mudança de rotação e de avanço, uma vez que esta aumenta conforme há aumento da rotação, porém quanto ao avanço, houve aumento da potência quando foi de 0,116mm para 0,320mm e uma diminuição da potência quando foi de 0,32mm para 0,554mm.

Quando se tem um aumento de 533,3% da rotação, a potência elétrica registra um aumento de 24,55% para o avanço de 0,116mm, 22,93% para o avanço de 0,320mm e 16,32%

para o avanço de 0,554mm, neste caso, a porcentagem do aumento da potência elétrica diminui com o aumento do avanço.

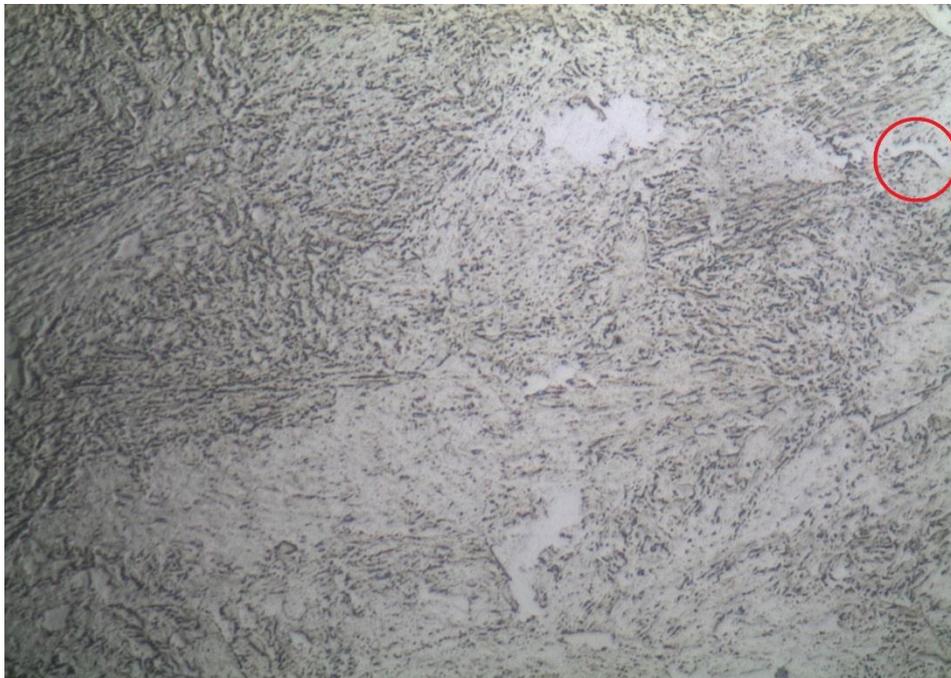
### 4.3 4140

O presente tópico apresenta a fotomicrografia, a dureza Vickers, as rugosidades iniciais e finais, o diâmetro, o avanço por rotação, o tempo de processo, a velocidade de corte, o rendimento, a profundidade de corte, o ângulo de direção do gume da ferramenta, a espessura e largura de corte, a força de corte, a potência de corte, a energia de corte, a potência elétrica e a energia elétrica referentes aos experimentos realizados no aço 4140.

#### 4.3.1 Fotomicrografia e Dureza Vickers

A Figura 4. 21 representa a fotomicrografia do centro, no qual é possível ver o contorno de grão.

Figura 4.21 Fotomicrografia Centro do Aço 4140



**Centro (aumento de 1000x)**

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

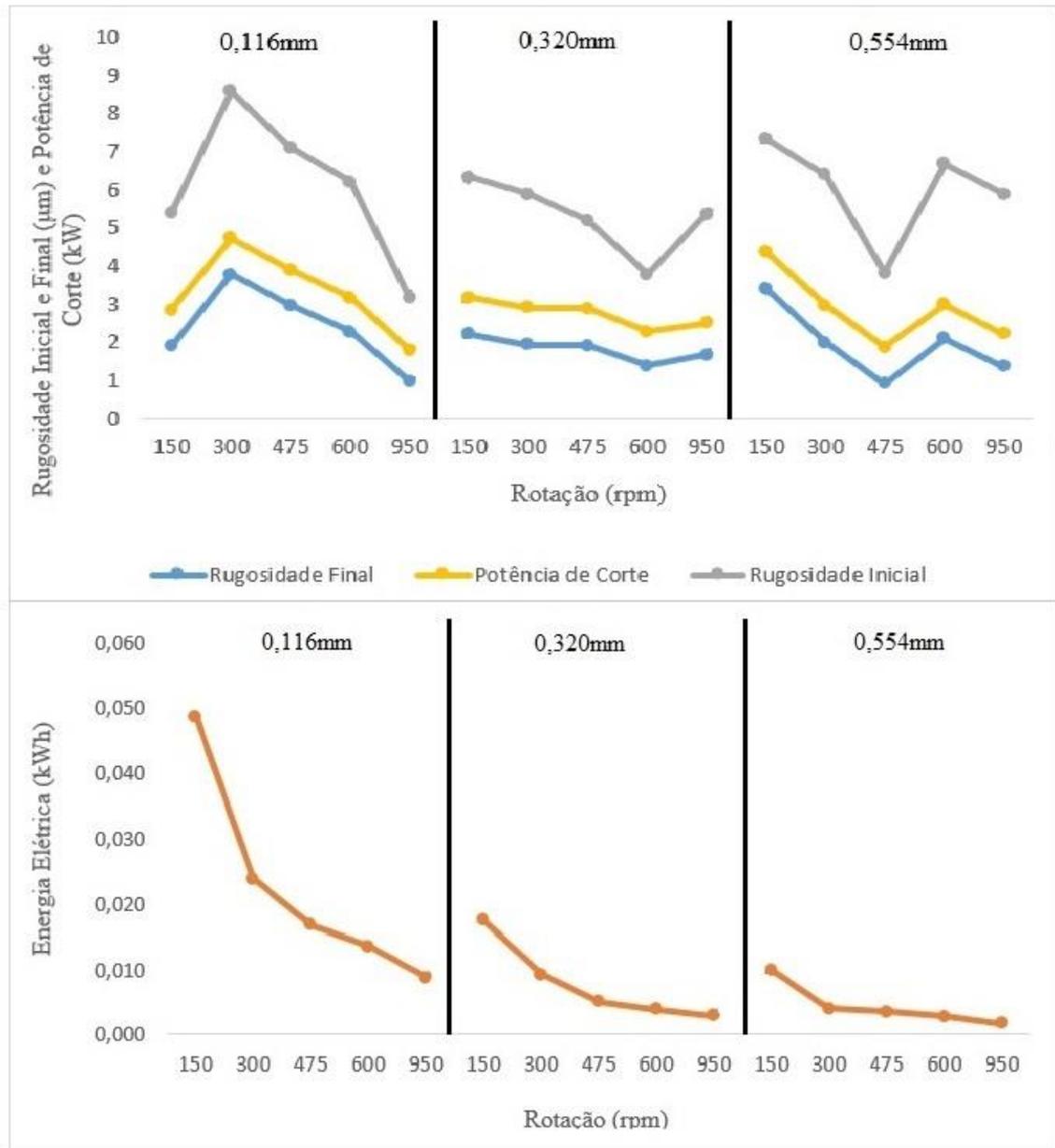
A dureza Vickers do aço 4140 é 316HV. Como resultado da metalografia, tem-se que este aço possui microestrutura constituída de martensita. De acordo com Colpaert (2008), a presença da martensita significa dureza elevada.

A martensita, é uma solução sólida, supersatura de carbono em ferro, sendo o constituinte estrutural da têmpera dos aços (COLPAERT, 2008).

#### **4.3.2 Rugosidade**

A rugosidade média também é considerada como um parâmetro de avaliação da facilidade de usinagem do material e no presente trabalho, tem-se a rugosidade inicial, ou seja, medida quando as amostras foram adquiridas e a rugosidade após o torneamento junto com a potência de corte e a energia elétrica, como mostra a Figura 4.22.

Figura 4.22 Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Através dos resultados, é possível ver que houve redução da rugosidade em todas as condições de corte, todavia neste caso não foi tão significativo. Ao aumentar a rotação 533,3%, há uma melhora da rugosidade em todos os avanços e a maior porcentagem é com o avanço de 0,116mm, que corresponde a 48%, além disso, há uma redução da rugosidade em 65% para o avanço de 0,116mm, 20,66% para o avanço de 0,320mm e 17,02% para o avanço de 0,554mm após o torneamento.

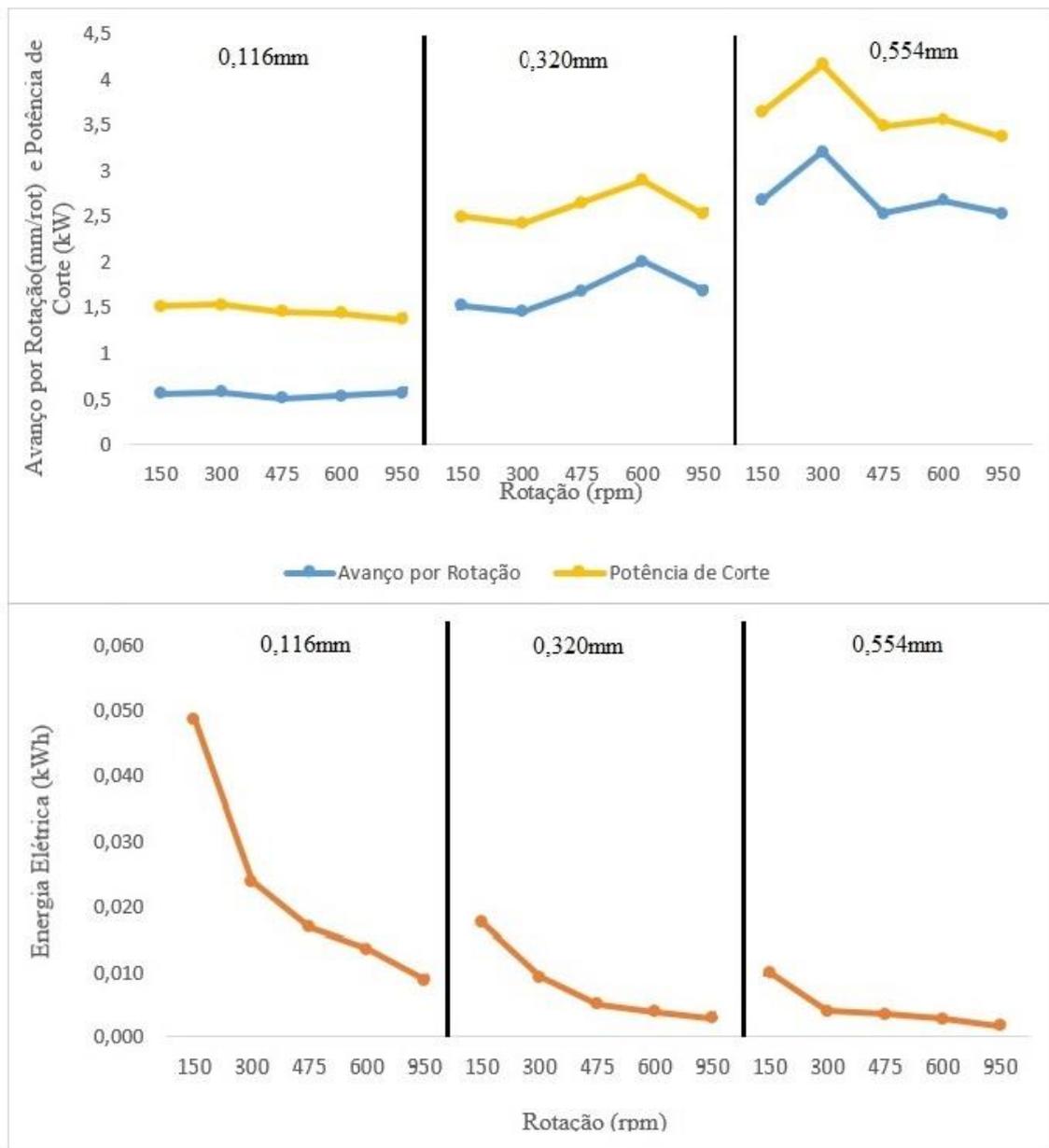
Como discutido no tópico 4.1.2, a potência de corte e a rugosidade possuem baixo valor quando a rotação é elevada, com isso a potência de corte segue a mesma variação da

rugosidade em relação à rotação. Por meio da Figura, tem-se que os melhores acabamentos necessitaram de menor potência de corte e maior consumo de energia elétrica, mesmo sendo um aço de elevada dureza.

### 4.3.3 Diâmetro e Avanço por Rotação

O diâmetro do aço 4140 em todas as amostras foi 22 mm e o avanço por rotação junto com potência de corte e energia elétrica é mostrado na Figura 4.23.

Figura 4.23 Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140



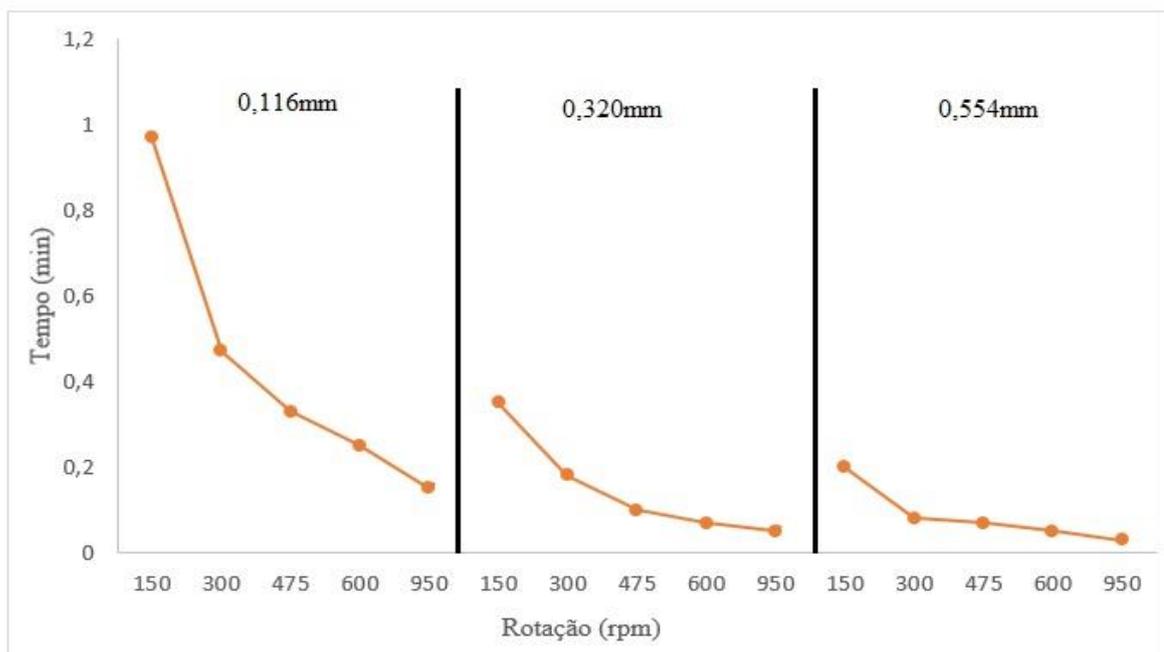
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Para o aço 4140, registrou-se valores elevados, já que é um aço de alta dureza e as variações de avanço por rotação foram bruscas. O maior valor foi registrado no avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Assim como avaliado no item 4.1.3, ao ser ter um avanço por rotação elevado, tem-se a potência de corte elevada e o consumo de energia elétrica baixo, contudo quando o avanço é de 0,116mm, tem-se que há maior variação de energia e menor variação do avanço por rotação, além do avanço por rotação decrescer junto com a energia elétrica.

#### 4.3.4 Tempo de Processo

Este tópico apresenta o tempo que durou o processo de cada amostra, conforme a Figura 4.24.

Figura 4.24 Tempo de Processo do Aço 4140



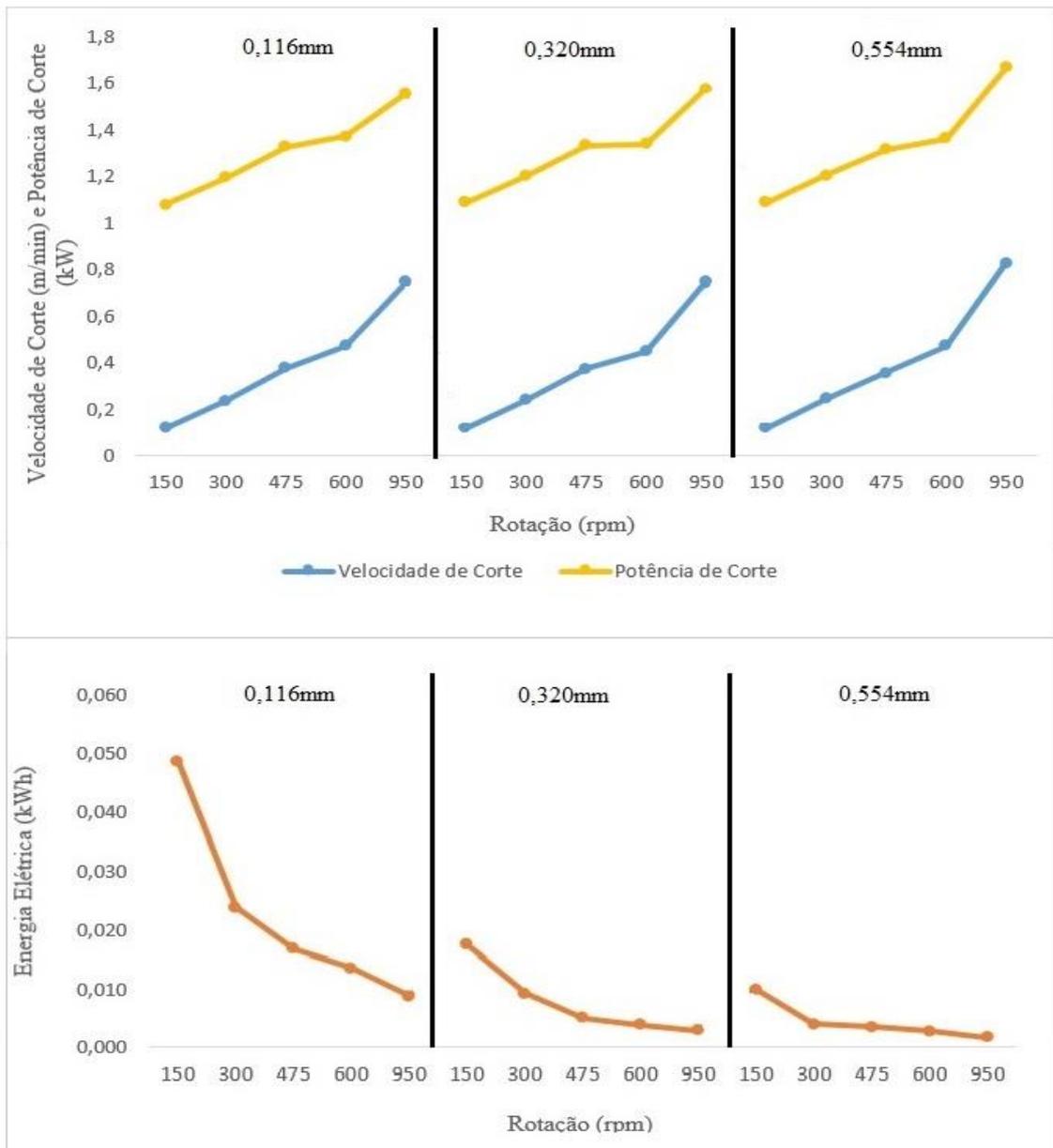
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Foi registrada a necessidade de maior demanda de tempo quando se tem rotações menores, assim, o ideal é trabalhar com rotações mais elevadas para que o processo não se estenda por bastante tempo, independente do avanço. Quando houve o aumento de 533,3% da rotação, a redução do tempo de processo foi maior com o avanço de 0,554mm e foi menor com o avanço de 0,320mm.

### 4.3.5 Velocidade de Corte

Este tópico explana a velocidade de corte de cada amostra para as devidas condições de teste, conforme a Equação 4. A Figura 4.25 apresenta a velocidade de corte junto com a potência de corte e energia elétrica. A velocidade de corte é dada em m/rot, mas o valor foi dividido por 100 para melhor visualização da curva.

Figura 4.25 Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do aço 4140



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A velocidade de corte é uma variável dependente do diâmetro inicial, do comprimento da amostra, do avanço por rotação e do tempo, segundo Groover (2010), no

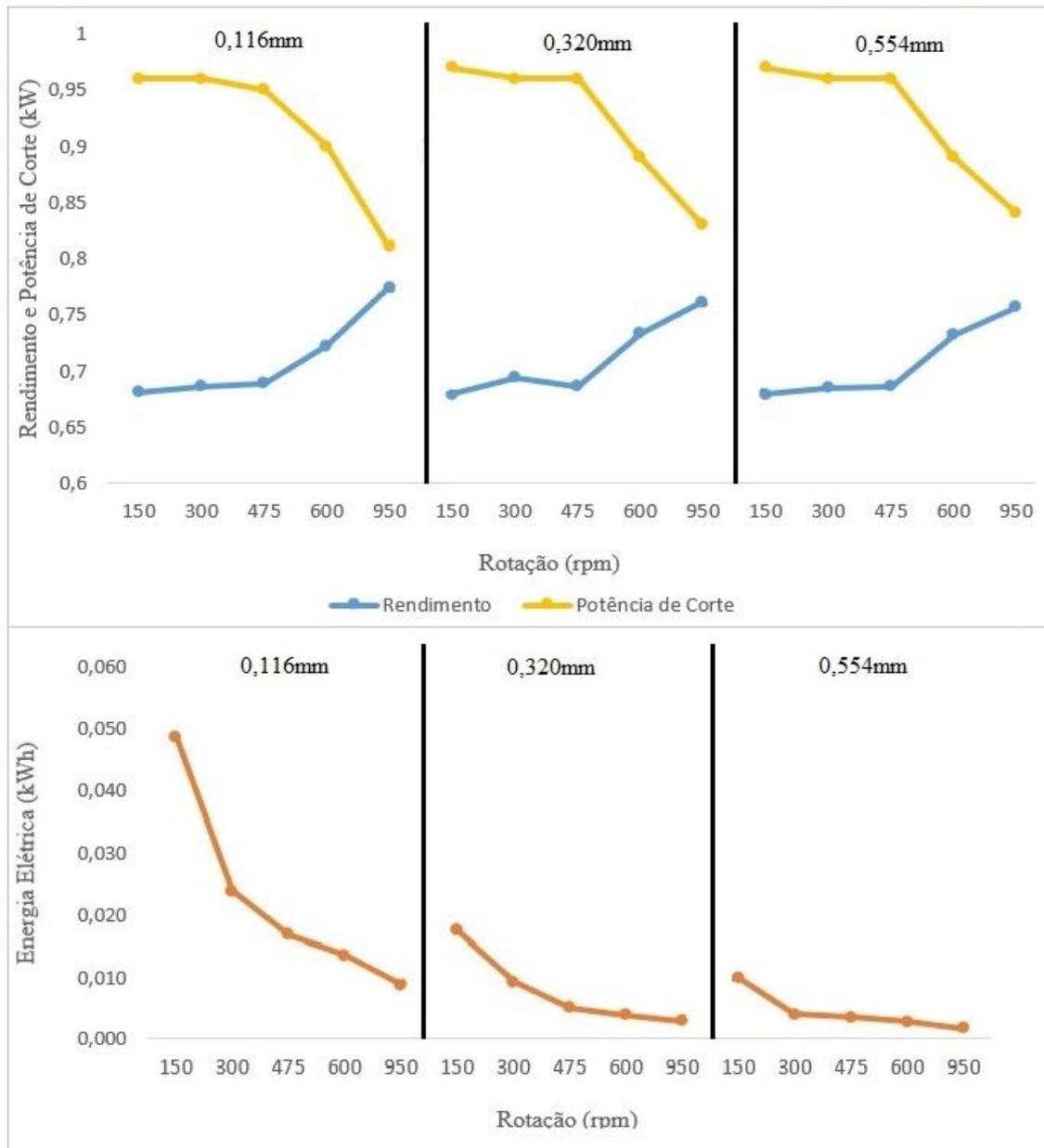
presente trabalho, o diâmetro inicial e o comprimento de todas as amostras são iguais, assim, a velocidade de corte está totalmente em função do tempo e são inversamente proporcionais. Para o aço 4140, houve a necessidade de maiores velocidades devido a sua elevada dureza. Também nota-se que houve aumento da velocidade de corte conforme foi aumentando o avanço.

Analisando a Figura acima, como no tópico 4.1.5, a potência de corte é elevada quando se tem altos valores de velocidade de corte e a curva seguem um padrão em todos os avanços. Quanto ao consumo de energia elétrica, para ter reduzido consumo, necessita-se de velocidade de corte elevada.

#### **4.3.6 *Rendimento***

De acordo com o tópico 3.2.3, o analisador de energia obteve o valor da corrente elétrica em cada teste e por intermédio da curva característica do motor, tem-se o rendimento do motor durante o torneamento de cada amostra, a Figura 4.26 apresenta o rendimento junto com a potência de corte e a energia elétrica.

Figura 4.26 Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A Figura apresenta que o valor do rendimento é maior quando se tem rotações elevadas, ou seja, o aumento da velocidade aumenta o carregamento do motor, o que provoca o aumento do rendimento da produção.

Quando houve aumento de 533,3% da rotação, para o avanço de 0,116mm, houve aumento de rendimento em 13,65%, para o avanço de 0,320mm, o rendimento aumentou 12,07% e para o avanço de 0,554mm, esse aumento foi de 11,50%, assim, nota-se que a porcentagem tem tendência a diminuir a medida que o avanço vai aumentando.

Como visto no tópico 4.1.6, era de se esperar, o rendimento é baixo para valores de potência de corte e consumo de energia elétrica elevados, pois com a elevação da potência ativa, têm-se mais perdas. Também nota-se diminuição do rendimento quando o avanço de foi 0,116mm para 0,320mm, no entanto esta variável aumentou novamente quando avanço foi para 0,554mm.

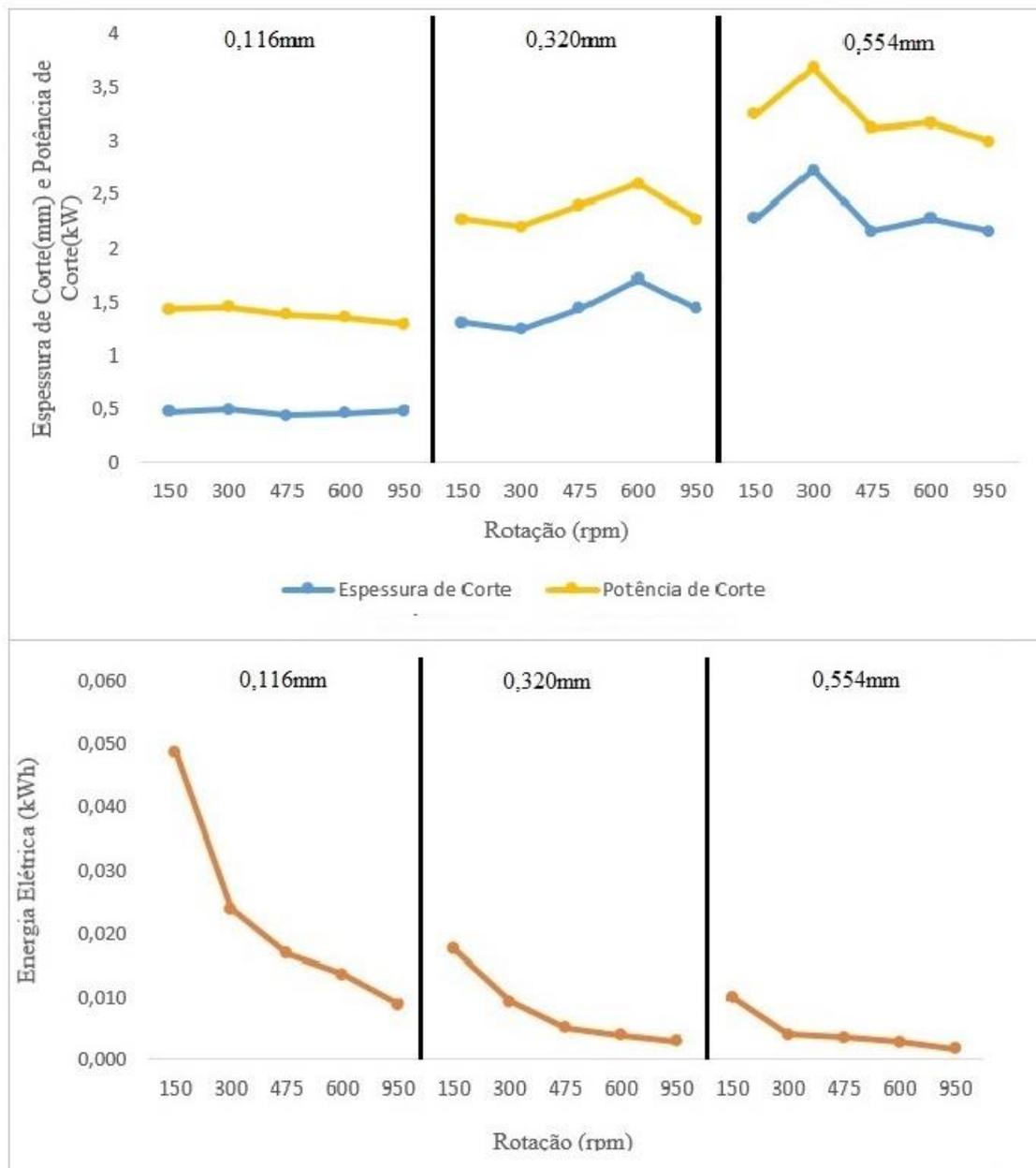
#### ***4.3.7 Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte***

Baseado nas Equações 14 e 15, pode-se calcular os valores da largura de corte e da profundidade de corte, respectivamente. A profundidade de corte, e consequentemente a largura de corte, são as mesmas em todas as amostras, o valor da profundidade de corte é 1,500mm e a largura de corte é igual a 1,761mm. O ângulo de direção do gume da ferramenta é 58,5° para o aço 4140.

#### ***4.3.8 Espessura de Corte***

Através da Equação 13, tem-se o cálculo da espessura de corte, a Figura 4.27 mostra a espessura de corte junto com a potência de corte e a energia elétrica de cada amostra.

Figura 4.27 Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140



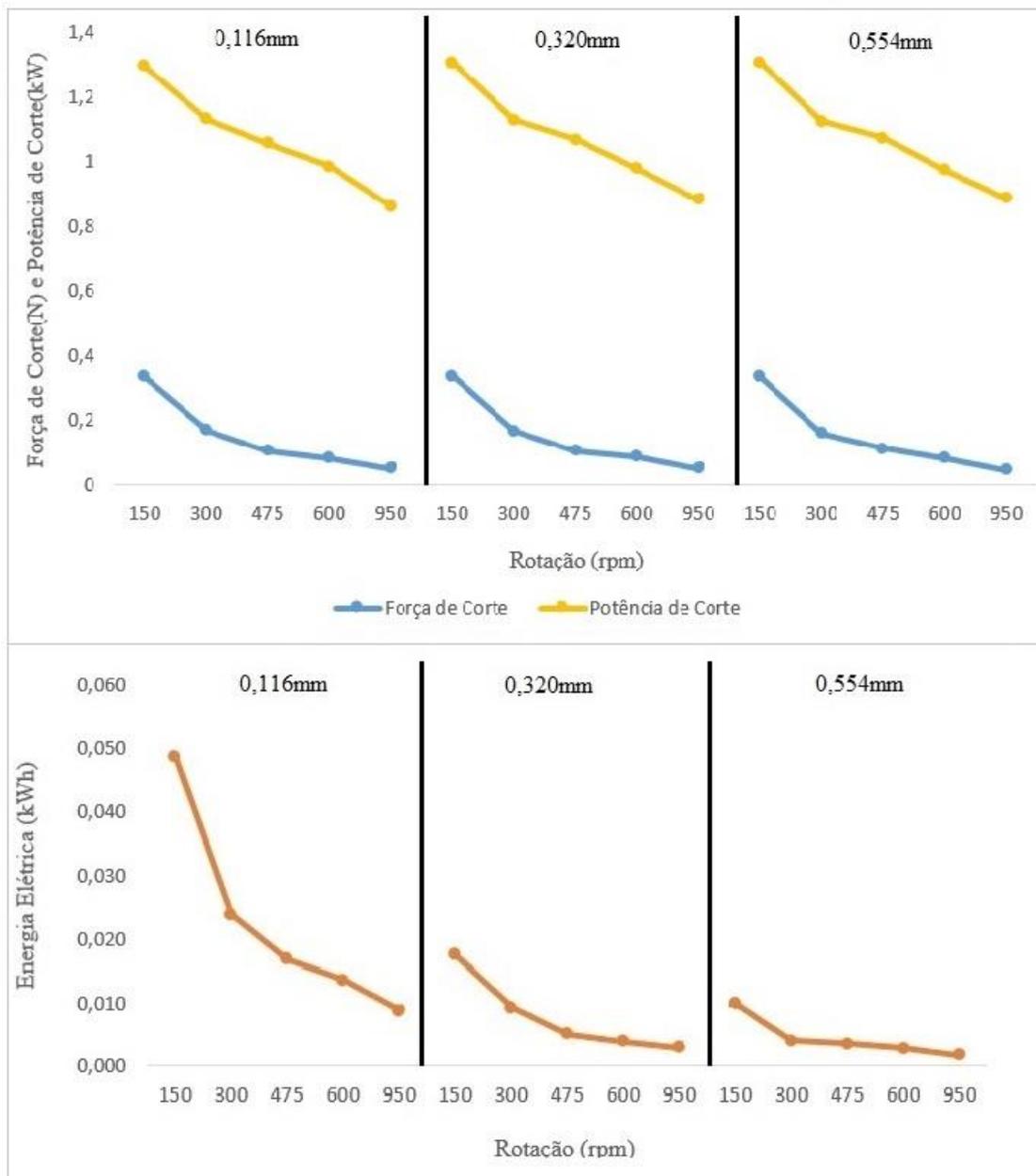
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A espessura de corte depende do avanço por rotação, discutido no tópico 4.3.3, de modo que houve um pico para o avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Sendo assim, como no avanço por rotação, a espessura de corte elevada causa uma potência de corte elevada e baixo consumo de energia elétrica, exceto para o avanço de 0,116mm, como foi visto no tópico 4.1.8.

### 4.3.9 Força de Corte

Conforme a Equação 3, citada anteriormente, tem-se o cálculo da força. Os resultados da força de corte junto com a potência de corte e energia elétrica podem ser vistos na Figura 4.28. A força de corte é dada em N, porém o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.28 Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Observou-se que não há mudanças bruscas nos resultados com a mudança de avanço, segue um padrão. Além disso, para o aço 4140, na maioria dos testes, obtiveram maior valores de força de corte devido a sua elevada dureza, de acordo com Callister (2008).

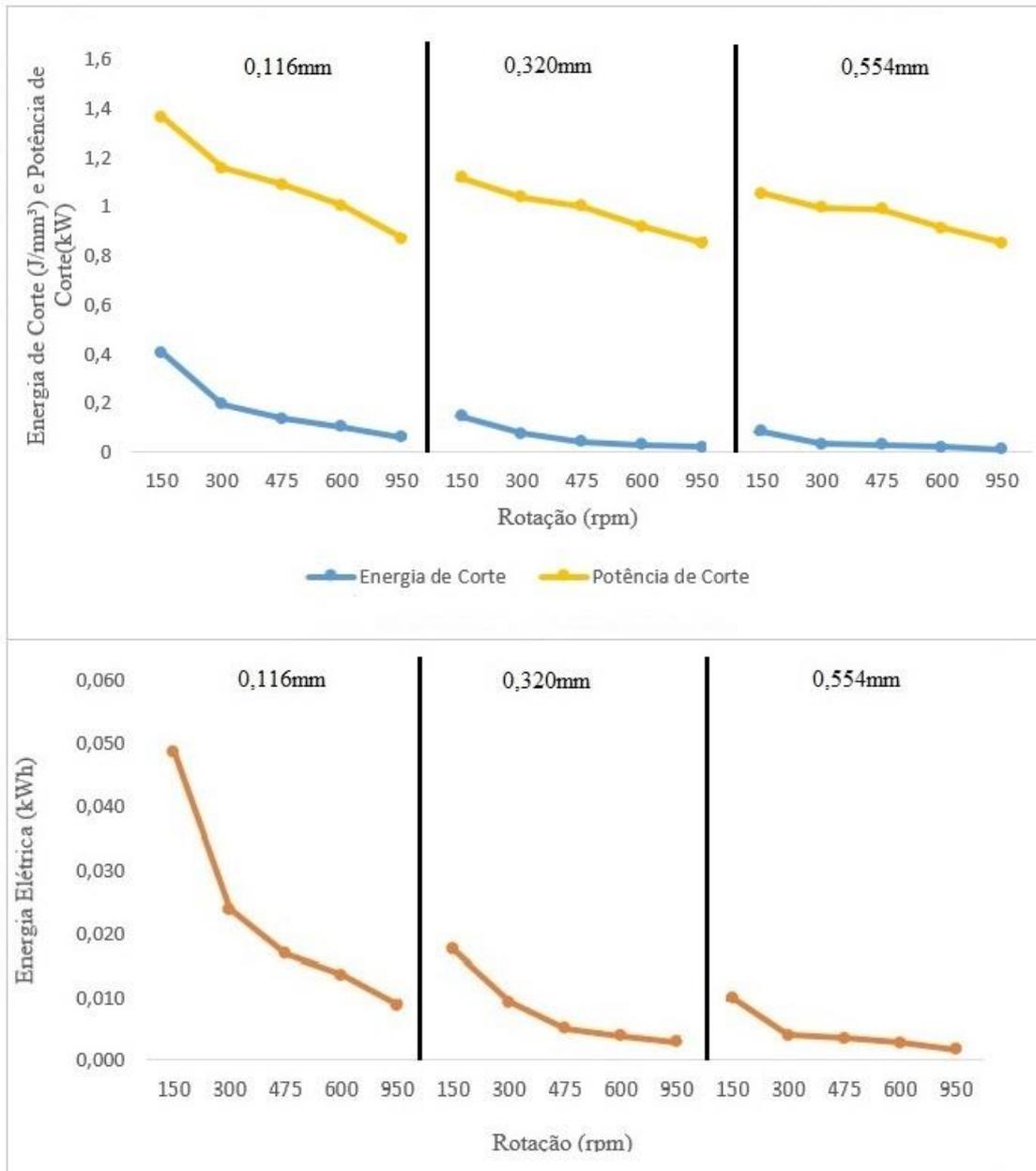
Quando houve aumento de 533,3% na rotação, a redução da força de corte foi de 84,91% para o avanço de 0,116mm, 84,84% para o avanço de 0,320mm e 86,17% para o avanço de 0,554mm, tais valores são próximos devido os valores da força de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço e no caso do aço 4140, nota-se que a porcentagem diminuiu quando o avanço aumentou de 0,116mm para 0,32mm, mas aumentou quando o avanço se tornou 0,554mm, registrando elevados valores de porcentagem de redução em todos os avanços.

Conforme discutido no tópico 4.1.9, a força de corte é proporcional a potência de corte, uma vez que é uma variável utilizada no cálculo da potência, no numerador, para elevados valores de força de corte, maior é o consumo energia elétrica, porque quanto mais esforço se necessita para realizar o corte, mais potência é consumida e mais tempo é gasto.

#### ***4.3.10 Energia de Corte***

Baseado na Equação 12 tem-se o cálculo da energia de corte, mostrado na Figura 4.29 junto com a potência de corte e a energia elétrica. A energia de corte é dada em  $J/mm^3$ , entretanto o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.29 Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4140



FONTES: ELABORADO PELO AUTOR

Houve redução da energia de corte com o aumento da rotação e do avanço, uma vez que a espessura de corte depende do avanço por rotação e é inversamente proporcional a energia de corte. A maior variação da energia de corte é quando a rotação aumenta de 150 rpm para 300 rpm com o avanço de 0,116mm.

Com o aumento da rotação em 533,3% da rotação, houve redução da energia de corte de 85,17% para o avanço de 0,116mm, 86,28% para o avanço de 0,320mm e 85,40% para o avanço de 0,554mm, assim como na força de corte, é possível ver que tem-se valores muito

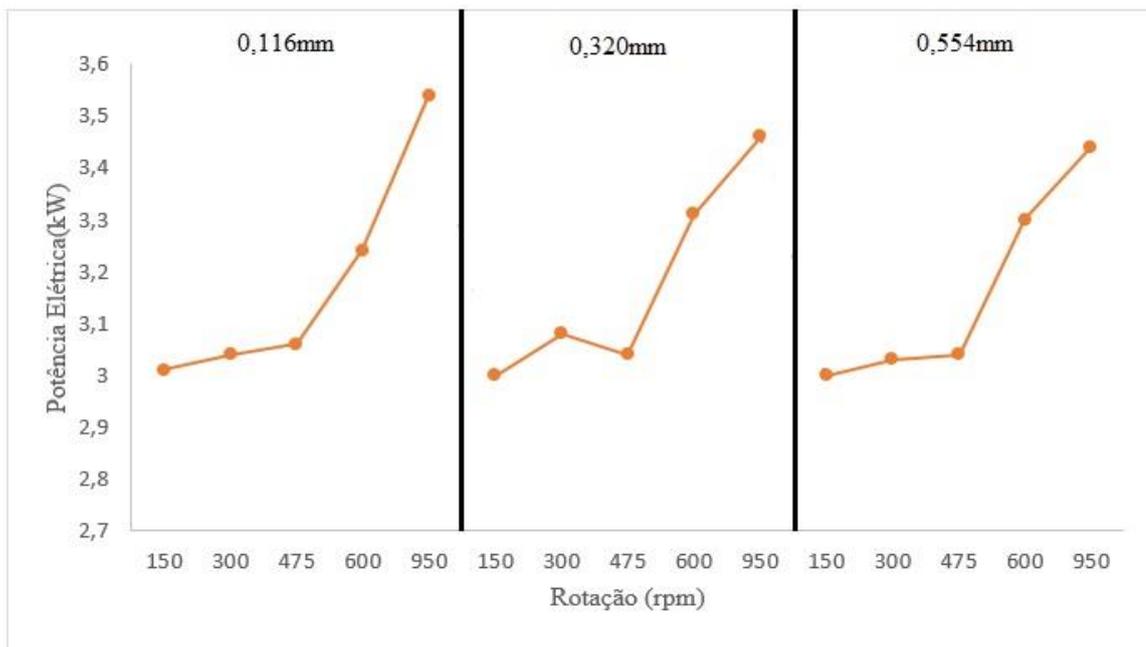
próximos devido aos valores de energia de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço.

Como analisado no tópico 4.1.10, as variações de energia e potência de corte não são tão bruscas com a mudança de rotação e avanço. Para elevados valores de potência de corte, tem-se elevados valores de energia de corte, pois ambas dependem da força de corte, discutida anteriormente.

#### 4.3.11 Potência Elétrica

Consoante os resultados obtidos a partir do uso do analisador de energia, tem-se a potência elétrica fornecidas em cada teste, mostrada na Figura 4.30.

Figura 4.30 Potência Elétrica do Aço 4140



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Nota-se variações bruscas da potência elétrica de acordo com a mudança de rotação e de avanço, uma vez que esta aumenta conforme há aumento da rotação, porém quanto ao avanço, houve aumento da potência quando foi de 0,116mm para 0,320mm e uma diminuição da potência quando foi de 0,320mm para 0,554mm.

Quando se tem um aumento de 533,3% da rotação, a potência elétrica registra um aumento de 17,60% para o avanço de 0,116mm, 15,33% para o avanço de 0,320mm e 14,66%

para o avanço de 0,554mm, havendo uma diminuição da porcentagem de aumento da potência elétrica com o aumento do avanço.

#### 4.4 4340

O presente tópico apresenta a fotomicrografia, a dureza Vickers, as rugosidades iniciais e finais, o diâmetro, o avanço por rotação, o tempo de processo, a velocidade de corte, o rendimento, a profundidade de corte, o ângulo de direção do gume da ferramenta, a espessura e largura de corte, a força de corte, a potência de corte, a energia de corte, a potência elétrica e a energia elétrica referentes aos experimentos realizados no aço 4340.

##### 4.4.1 Fotomicrografia e Dureza Vickers

A Figura 4. 31 representa a fotomicrografia da borda e do centro, no qual é possível ver o contorno de grão.

Figura 4.31 Fotomicrografia Borda e Centro do Aço 4340



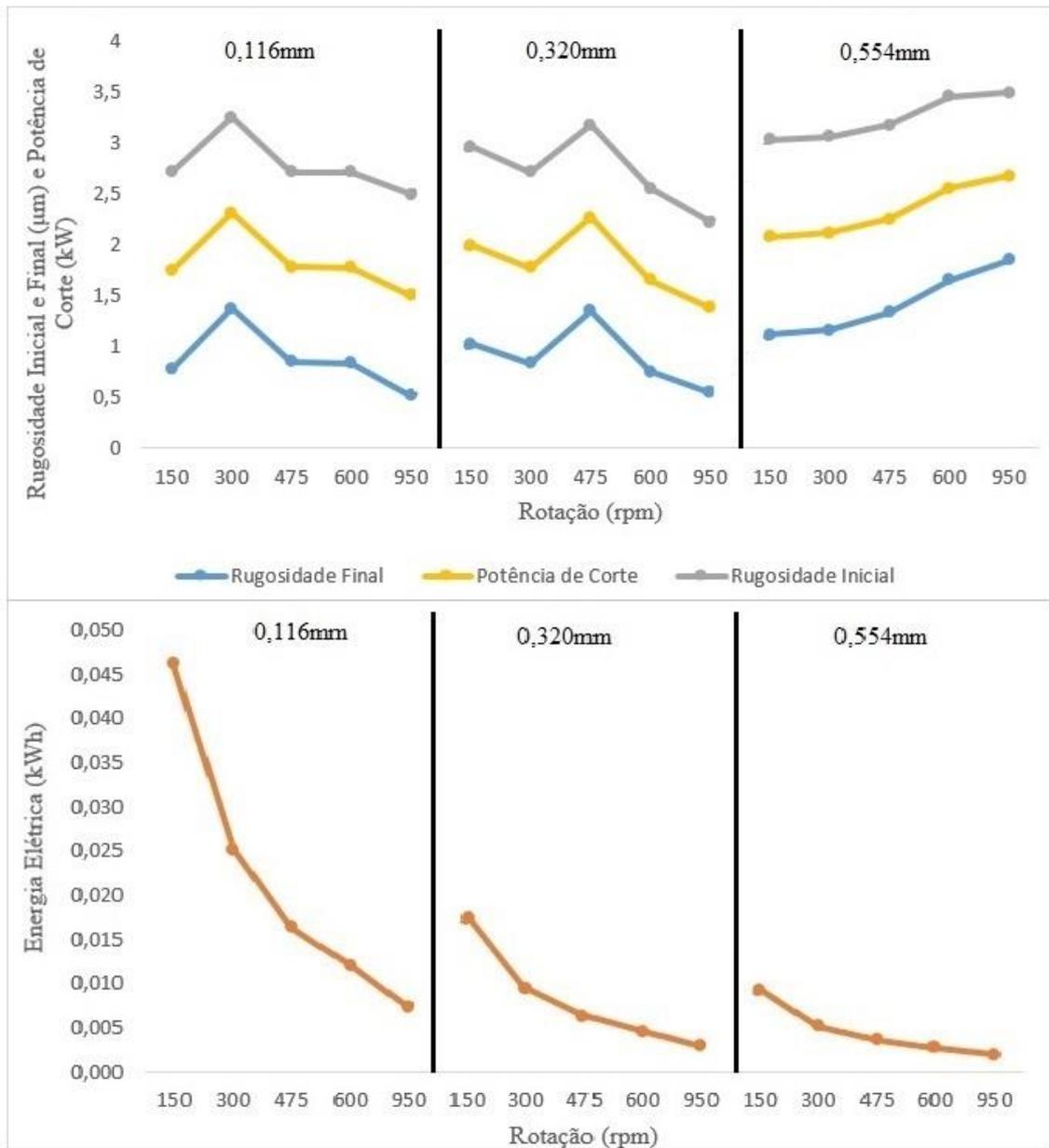
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

A dureza Vickers do aço 4340 é 291HV. Como resultado da metalografia, tem-se que este aço possui microestrutura constituída de martensita e ferrita, sendo predominante a martensita.

#### 4.4.2 Rugosidade

A rugosidade média também é considerada como um parâmetro de avaliação da facilidade de usinagem do material e no presente trabalho, aborda-se a rugosidade inicial, ou seja, medida quando as amostras foram adquiridas e a rugosidade após o torneamento junto com a potência de corte e a energia elétrica, como mostra a Figura 4.32.

Figura 4.32 Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

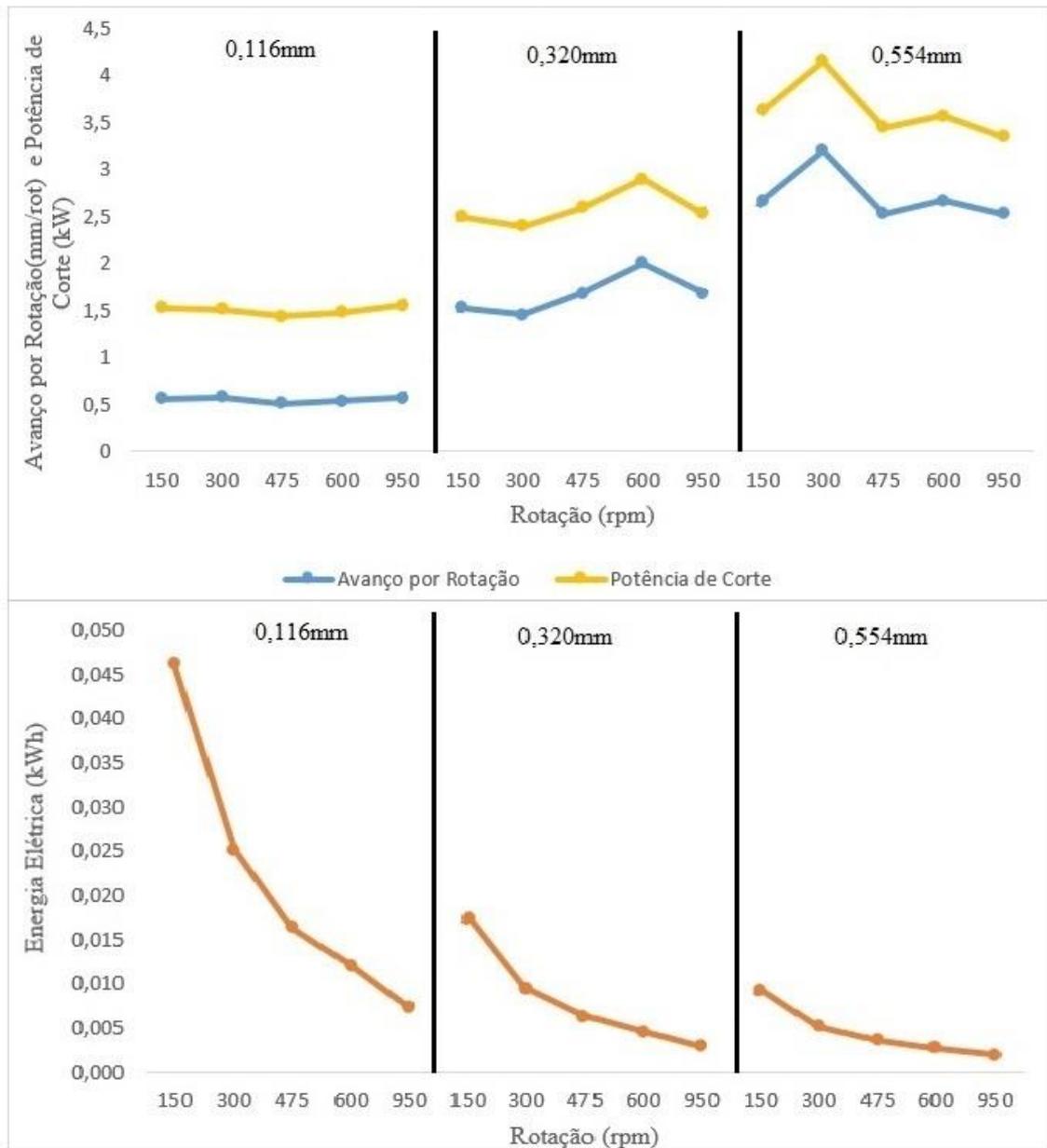
Através dos resultados, é possível perceber que houve redução da rugosidade em todas as condições de corte, de forma significativa, com ótimos acabamentos superficiais. Ao aumentar a rotação 533,3%, há uma melhora da rugosidade de 33,76% e 47,05% nos avanços de 0,116mm e 0,320mm, respectivamente, além disso, há uma redução da rugosidade em 38,32% para o avanço de 0,116mm, 10,17% para o avanço de 0,320mm e 25% para o avanço de 0,554mm após o torneamento.

Como discutido no tópico 4.1.2, a potência de corte e a rugosidade possuem baixo valor quando a rotação é elevada, com isso a potência de corte segue a mesma variação da rugosidade em relação à rotação. Por meio da Figura, tem-se que os melhores acabamentos necessitaram de menor potência de corte e neste caso, menor energia para os avanços de 0,116mm e 0,320mm, já para o avanço de 0,554mm, tem-se que a rugosidade foi inversamente proporcional a energia.

#### ***4.4.3 Diâmetro e Avanço por Rotação***

O diâmetro do aço 4340 em todas as amostras foi 22 mm e o avanço por rotação junto com potência de corte e energia elétrica é mostrado na Figura 4.33.

Figura 4.33 Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

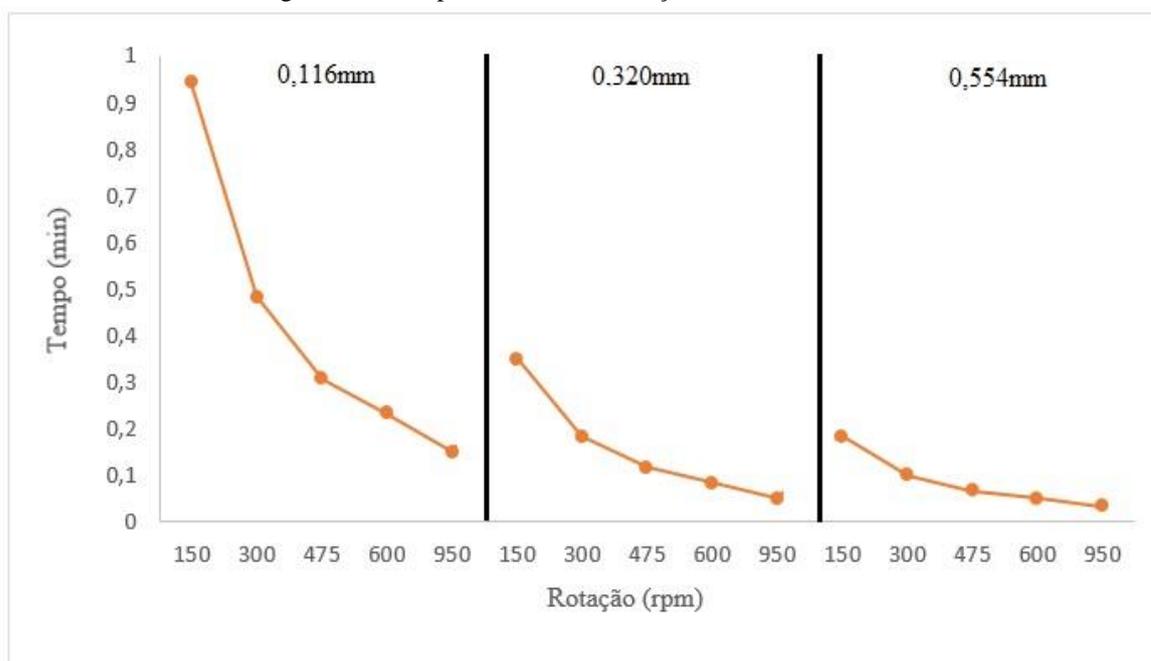
Para o aço 4340, os valores de avanço por rotação foram elevados, devido sua dureza ser uma das maiores entre os aços estudados. O maior valor foi registrado no avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Assim como avaliado no item 4.1.3, ao ser ter um avanço por rotação elevado, tem-se a potência de corte elevada e o consumo de energia elétrica baixo, contudo quando o avanço é de 0,116mm, tem-se que há maior variação de energia e menor variação do avanço por rotação, além do avanço por rotação decrescer junto com a energia elétrica.

Khan e Bhivsane (2018), ao analisarem os parâmetros que influenciam na usinagem do aço 4340, viram que o avanço por rotação não impactou de forma significativa na rugosidade, no entanto não foi o caso do presente trabalho, porque se verificou que ao aumentar o avanço por rotação, a diferença entre a rugosidade inicial e a rugosidade final é maior, exceto para o avanço de 0,320mm que essa relação é inversamente proporcional.

#### 4.4.4 Tempo de Processo

Este tópico apresenta o tempo que durou o processo de cada amostra, conforme a Figura 4.34.

Figura 4.34 Tempo de Processo do Aço 4340



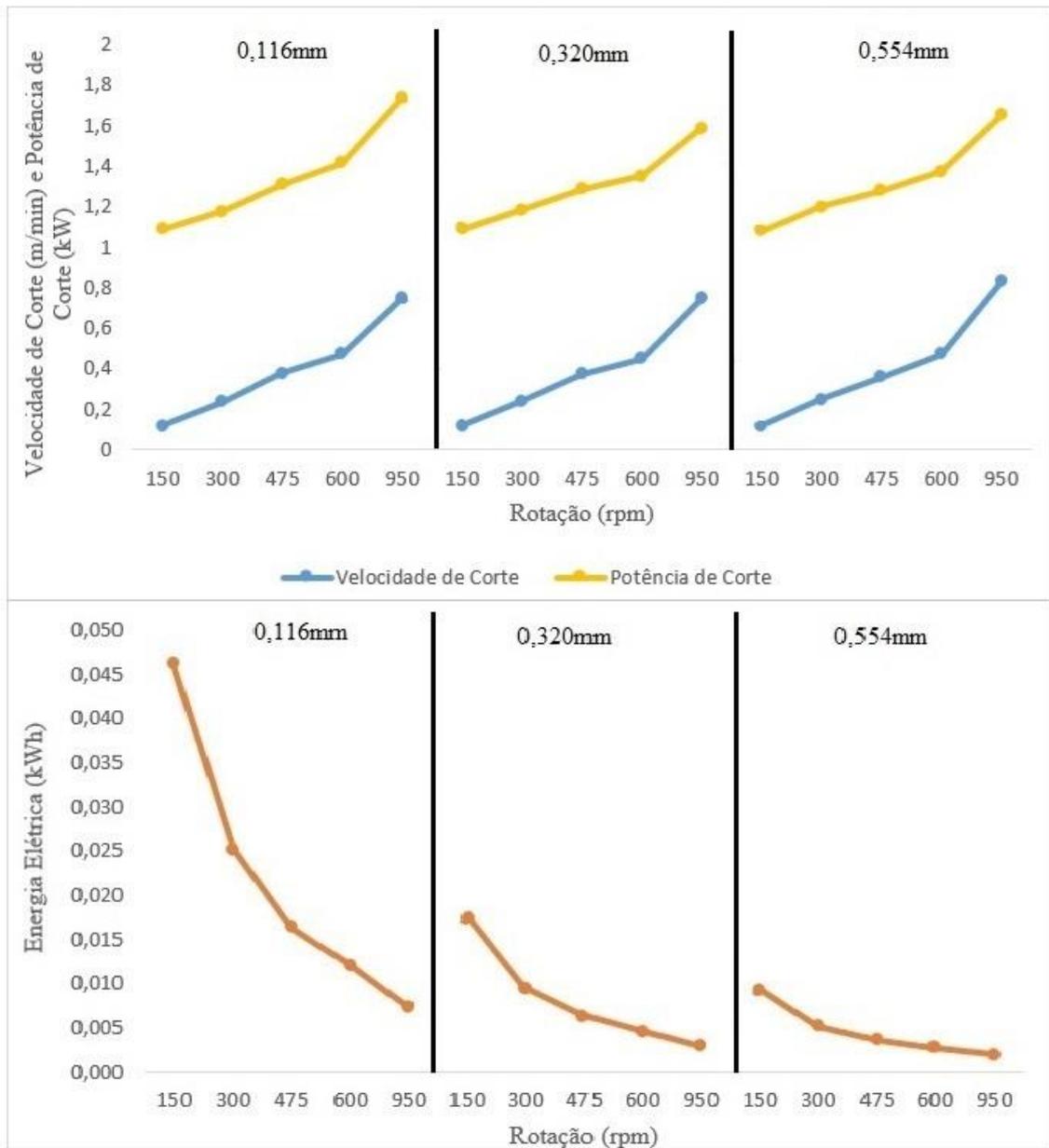
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Foi registrada a necessidade de maior demanda de tempo quando se tem rotações menores, assim, o ideal é trabalhar com rotações mais elevadas para que o processo não se estenda por bastante tempo, independente do avanço. Quando houve o aumento de 533,3% da rotação, a redução do tempo de processo foi maior com o avanço de 0,320mm e foi menor com o avanço de 0,554mm, tal porcentagem aumentou com a mudança de avanço de 0,116mm para 0,320mm e diminuiu quando o avanço foi de 0,320mm para 0,554mm.

#### 4.4.5 Velocidade de Corte

Este tópico explana a velocidade de corte de cada amostra para as devidas condições de teste, conforme a Equação 4. A Figura 4.35 apresenta a velocidade de corte junto com a potência de corte e energia elétrica. A velocidade de corte é dada em m/rot, todavia o valor foi dividido por 100 para melhor visualização da curva.

Figura 4.35 Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

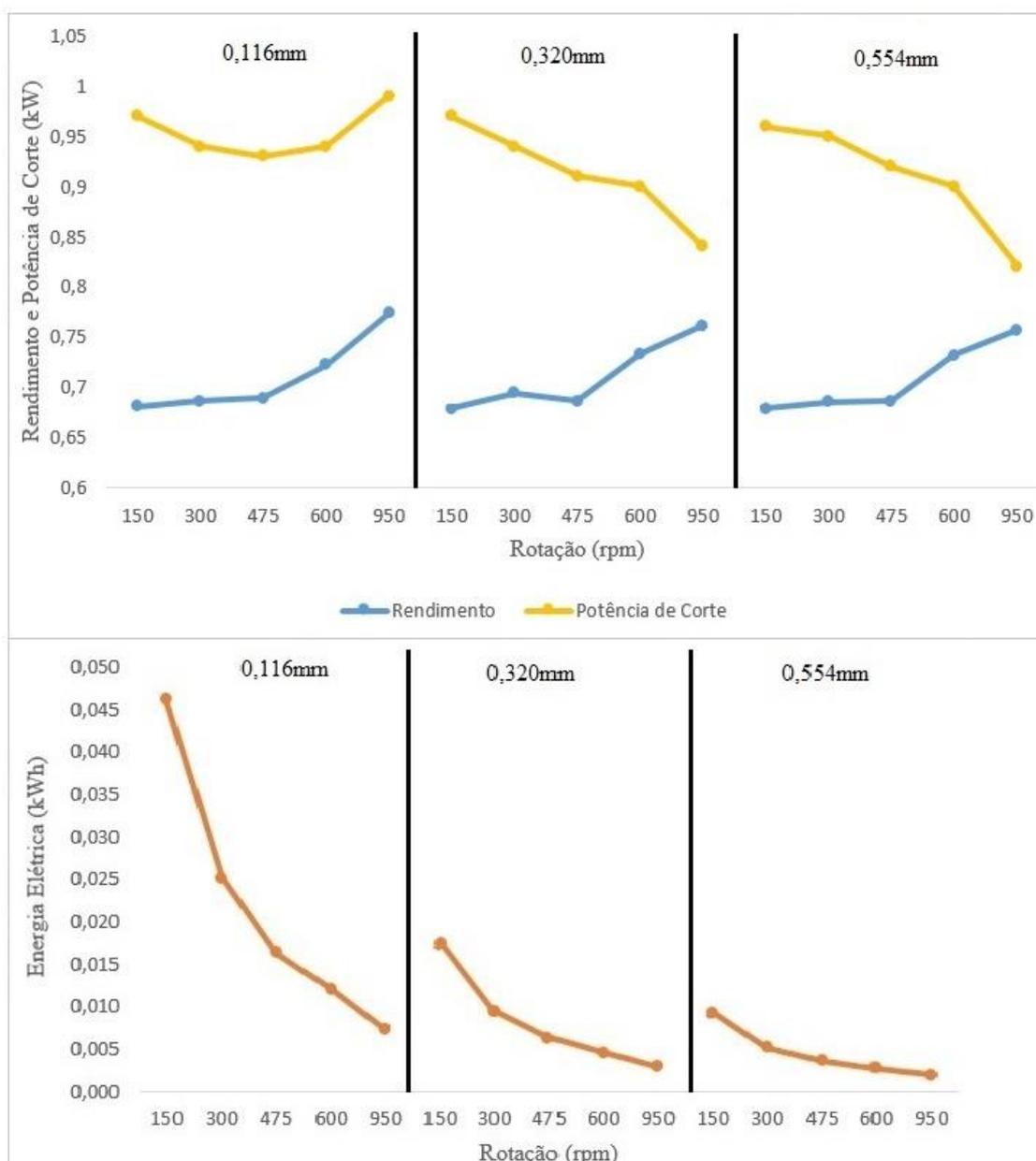
A velocidade de corte é uma variável dependente do diâmetro inicial, do comprimento da amostra, do avanço por rotação e do tempo, segundo Groover (2010). No presente trabalho, o diâmetro inicial e o comprimento de todas as amostras são iguais, assim, a velocidade de corte está totalmente em função do tempo e são inversamente proporcionais. O aço 4340, por ter elevada dureza, necessitou de maiores valores de velocidade de corte. Também nota-se que houve aumento da velocidade de corte conforme foi aumentando o avanço.

Analisando a Figura acima, como no tópico 4.1.5, a potência de corte é elevada quando se tem altos valores de velocidade de corte e a curva segue um padrão em todos os avanços. Quanto ao consumo de energia elétrica, para ter reduzido consumo, necessita-se de velocidade de corte elevada.

#### **4.4.6 *Rendimento***

De acordo com o tópico 3.2.3, o analisador de energia obteve o valor da corrente elétrica em cada teste e por intermédio da curva característica do motor, tem-se o rendimento do motor durante o torneamento de cada amostra, a Figura 4.36 apresenta o rendimento junto com a potência de corte e a energia elétrica.

Figura 4.36 Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A Figura apresenta que o valor do rendimento é maior quando se tem rotações elevadas, ou seja, o aumento da velocidade aumenta o carregamento do motor, o que provoca o aumento do rendimento da produção.

Quando houve aumento de 533,3% da rotação, para o avanço de 0,116mm, houve redução do rendimento em 1,94%, para o avanço de 0,320mm, o rendimento aumentou 12,10% e para o avanço de 0,554mm, esse aumento foi de 13,21%, assim, nota-se que a porcentagem aumentou com a elevação do avanço.

Como visto no tópico 4.1.6, era de se esperar, o rendimento é baixo para valores de potência de corte e consumo de energia elétrica elevados, pois com a elevação da potência ativa, têm-se mais perdas.

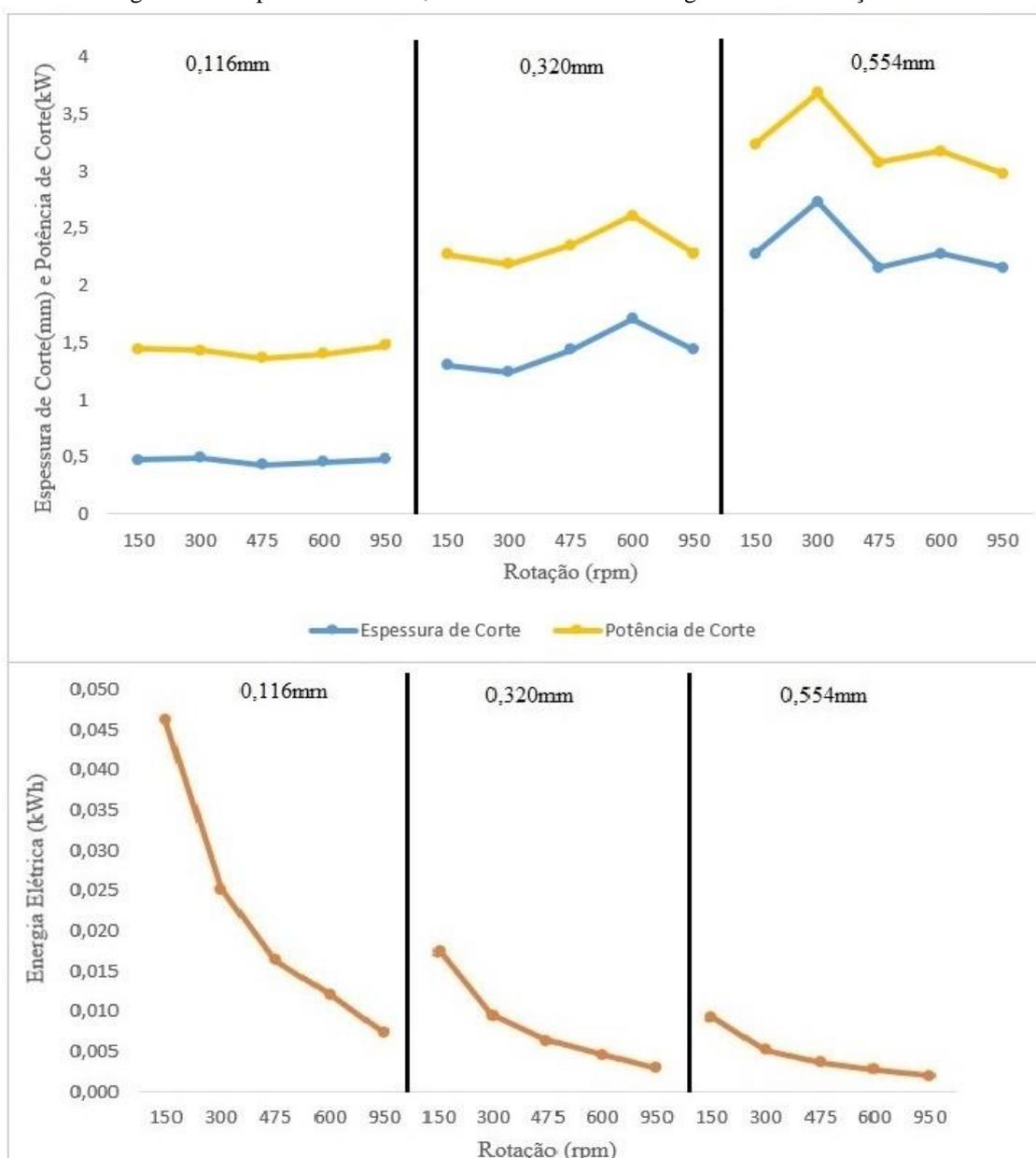
#### ***4.4.7 Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte***

Baseado nas Equações 14 e 15, pode-se calcular os valores da largura de corte e da profundidade de corte, respectivamente. A profundidade de corte, e conseqüentemente a largura de corte, são as mesmas em todas as amostras, o valor da profundidade de corte é 1,500mm e a largura de corte é igual a 1,767mm. O ângulo de direção do gume da ferramenta é 58,2 para o aço 4340.

#### ***4.4.8 Espessura de Corte***

Através da Equação 13, obtém-se o cálculo da espessura de corte, a Figura 4.37 mostra a espessura de corte junto com a potência de corte e a energia elétrica de cada amostra.

Figura 4.37 Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



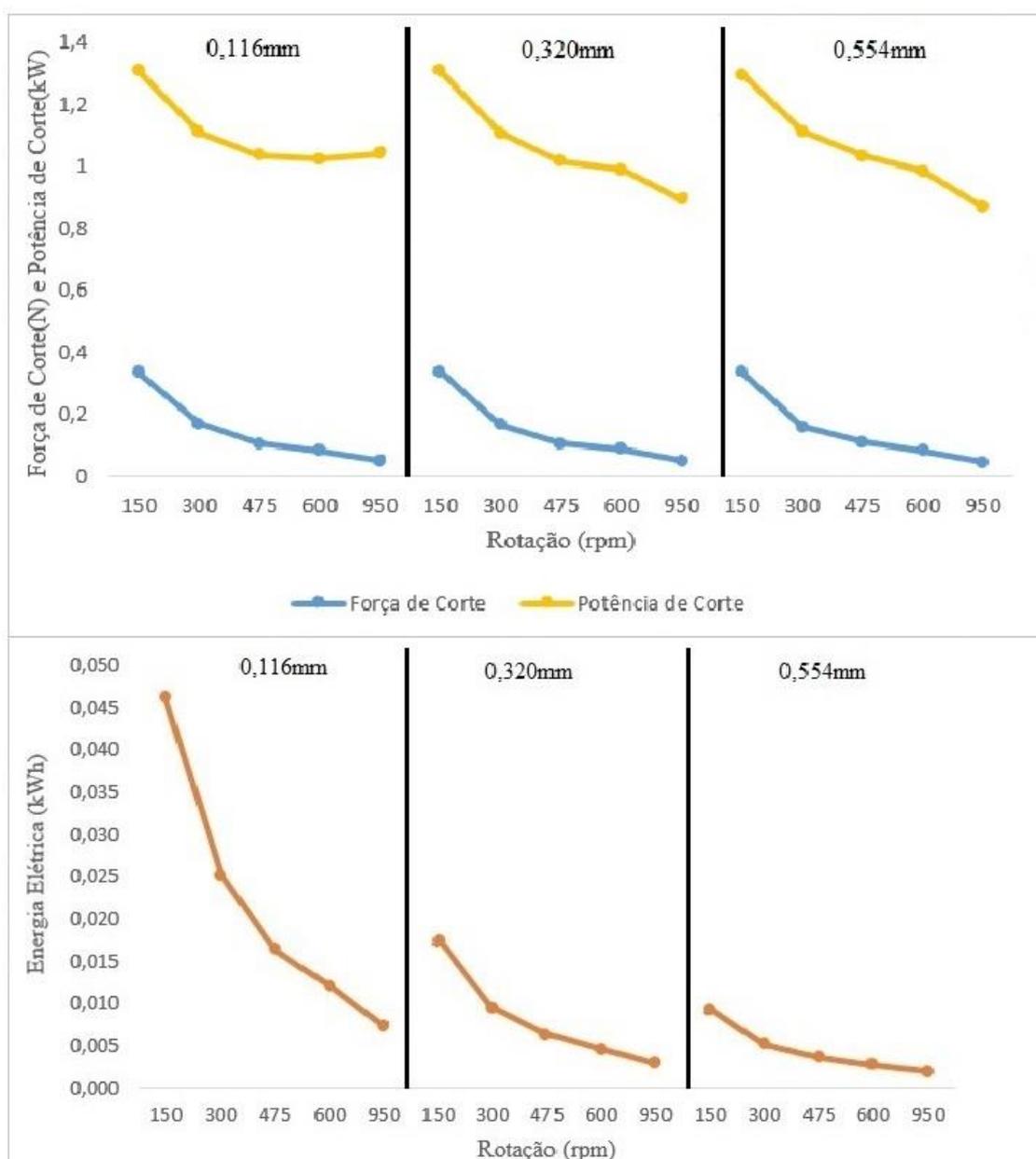
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A espessura de corte depende do avanço por rotação, discutido no tópico 4.4.3, de modo que houve um pico para o avanço de 0,554mm com a rotação de 300rpm. Sendo assim, como no avanço por rotação, a espessura de corte elevada causa uma potência de corte elevada e baixo consumo de energia elétrica, exceto para o avanço de 0,116mm, como foi visto no tópico 4.1.8.

#### 4.4.9 Força de Corte

Conforme a Equação 3, citada anteriormente, tem-se o cálculo da força. Os resultados da força de corte junto com a potência de corte e energia elétrica podem ser vistos na Figura 4.38. A força de corte é dada em N, contudo o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.38 Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Observou-se que não há mudanças bruscas nos resultados com a mudança de avanço, segue um padrão. Além disso, o aço 4340, na maioria dos testes, obtiveram maior valores de força de corte devido a sua elevada dureza, de acordo com Callister (2008), e ao fato de ser o penúltimo aço usinado.

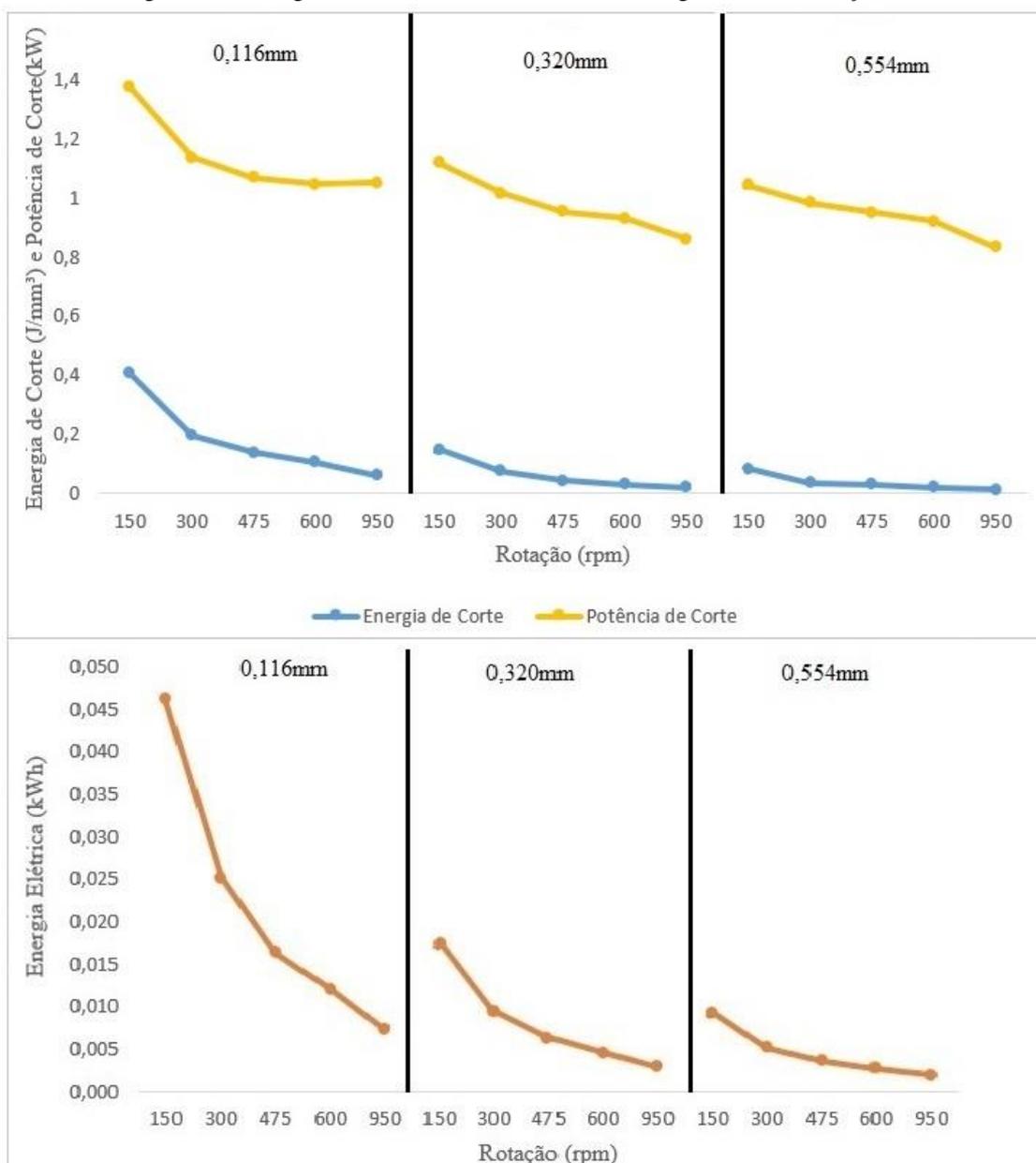
Quando houve aumento de 533,3% na rotação, a redução da força de corte foi de 84,28% para o avanço de 0,116mm, 84,64% para o avanço de 0,320mm e 84,88% para o avanço de 0,554mm, tais valores são próximos devido os valores da força de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço e no caso do aço 4340, nota-se que a porcentagem aumentou quando o avanço foi elevado.

Conforme discutido no tópico 4.1.9, a força de corte é proporcional a potência de corte, uma vez que é uma variável utilizada no cálculo da potência, no numerador, para elevados valores de força de corte, maior é o consumo energia elétrica, porque quanto mais esforço se necessita para realizar o corte, mais potência é consumida e mais tempo é gasto.

#### ***4.4.10 Energia de Corte***

Baseado na Equação 12 tem-se o cálculo da energia de corte, mostrado na Figura 4.39 junto com a potência de corte e a energia elétrica. A energia de corte é dada em  $J/mm^3$ , mas o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.39 Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Houve redução da energia de corte com o aumento da rotação e do avanço, uma vez que a espessura de corte depende do avanço por rotação e é inversamente proporcional a energia de corte. A maior variação da energia de corte é quando a rotação aumenta de 150 rpm para 300 rpm com o avanço de 0,116mm.

Com o aumento da rotação em 533,3% da rotação, houve redução da energia de corte de 84,14% para o avanço de 0,116mm, 86,11% para o avanço de 0,320mm e 82,60% para o avanço de 0,554mm, assim como na força de corte, é possível ver que tem-se valores muito

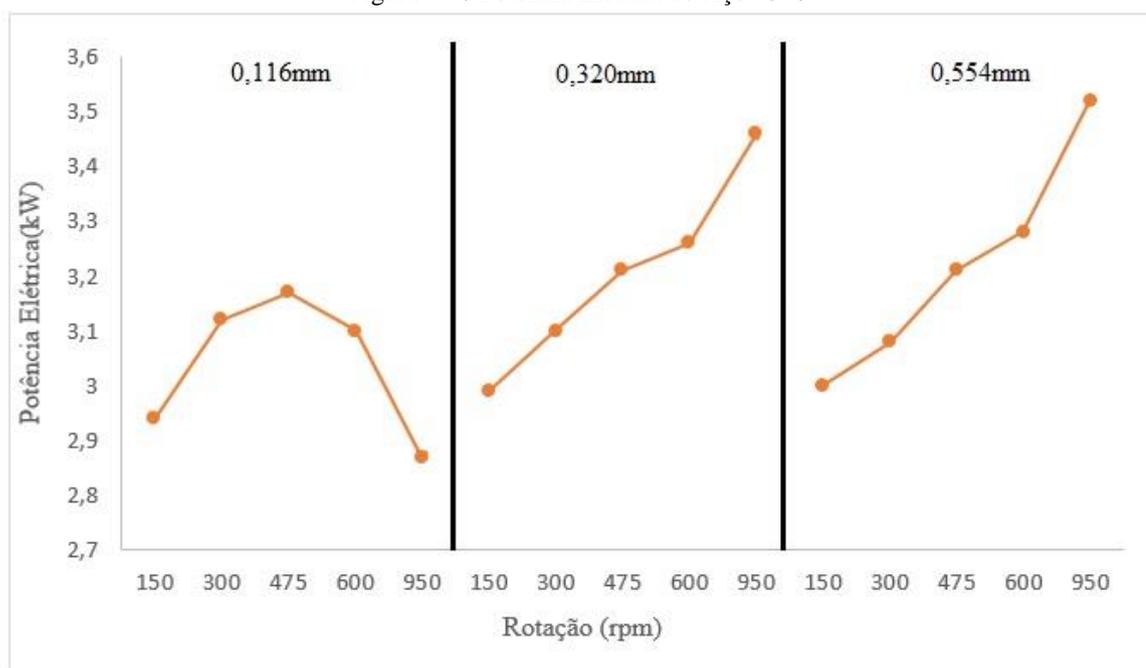
próximos devido aos valores de energia de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço.

Como analisado no tópico 4.1.10, as variações de energia e potência de corte não são tão bruscas com a mudança de rotação e avanço. Para elevados valores de potência de corte, tem-se elevados valores de energia de corte, pois ambas dependem da força de corte, discutida anteriormente.

#### 4.4.11 Potência Elétrica

Conforme os resultados obtidos a partir do uso do analisador de energia, tem-se a potência elétrica fornecidas em cada teste, mostrada na Figura 4.40.

Figura 4.40 Potência Elétrica do Aço 4340



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Nota-se variações bruscas da potência elétrica segundo a mudança de rotação e de avanço, uma vez que esta aumenta conforme há aumento da rotação, porém quanto ao avanço, houve aumento da potência quando foi de 0,116mm para 0,320mm e para 0,554mm.

Quando se tem um aumento de 533,3% da rotação, a potência elétrica registra uma diminuição de 2,38% para o avanço de 0,116mm, um aumento de 15,72% para o avanço de 0,320mm e aumento de 17,33% para o avanço de 0,554mm, assim havendo aumento dessa porcentagem conforme o avanço é colocado em um valor maior.

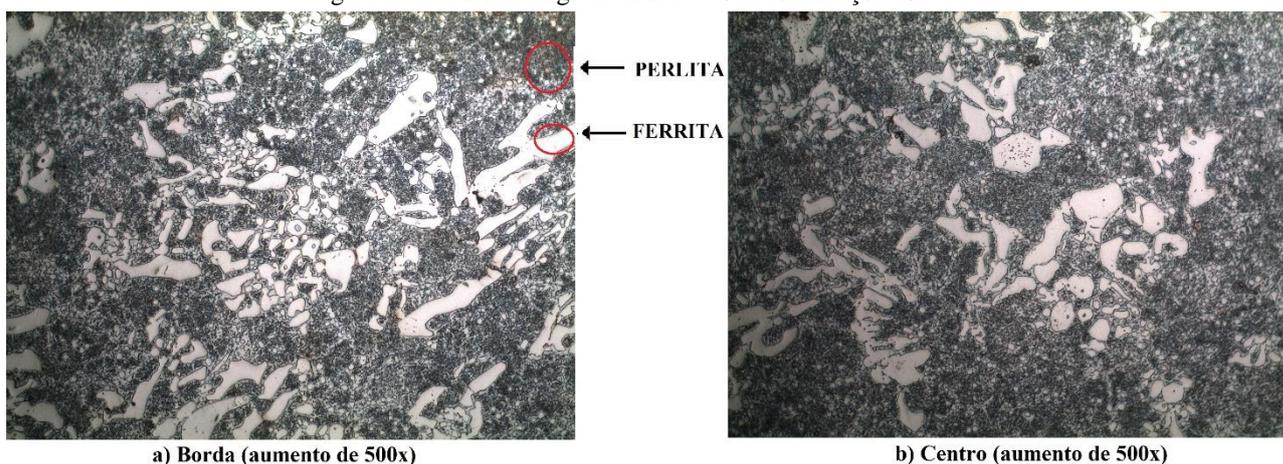
## 4.5 VC

O presente tópico apresenta a fotomicrografia, a dureza Vickers, as rugosidades iniciais e finais, o diâmetro, o avanço por rotação, o tempo de processo, a velocidade de corte, o rendimento, a profundidade de corte, o ângulo de direção do gume da ferramenta, a espessura e largura de corte, a força de corte, a potência de corte, a energia de corte, a potência elétrica e a energia elétrica referentes aos experimentos realizados no aço VC.

### 4.5.1 Fotomicrografia e Dureza Vickers

A Figura 4.41 representa a fotomicrografia da borda e do centro, no qual é possível ver o contorno de grão.

Figura 4.41 Fotomicrografia Borda e Centro do Aço VC



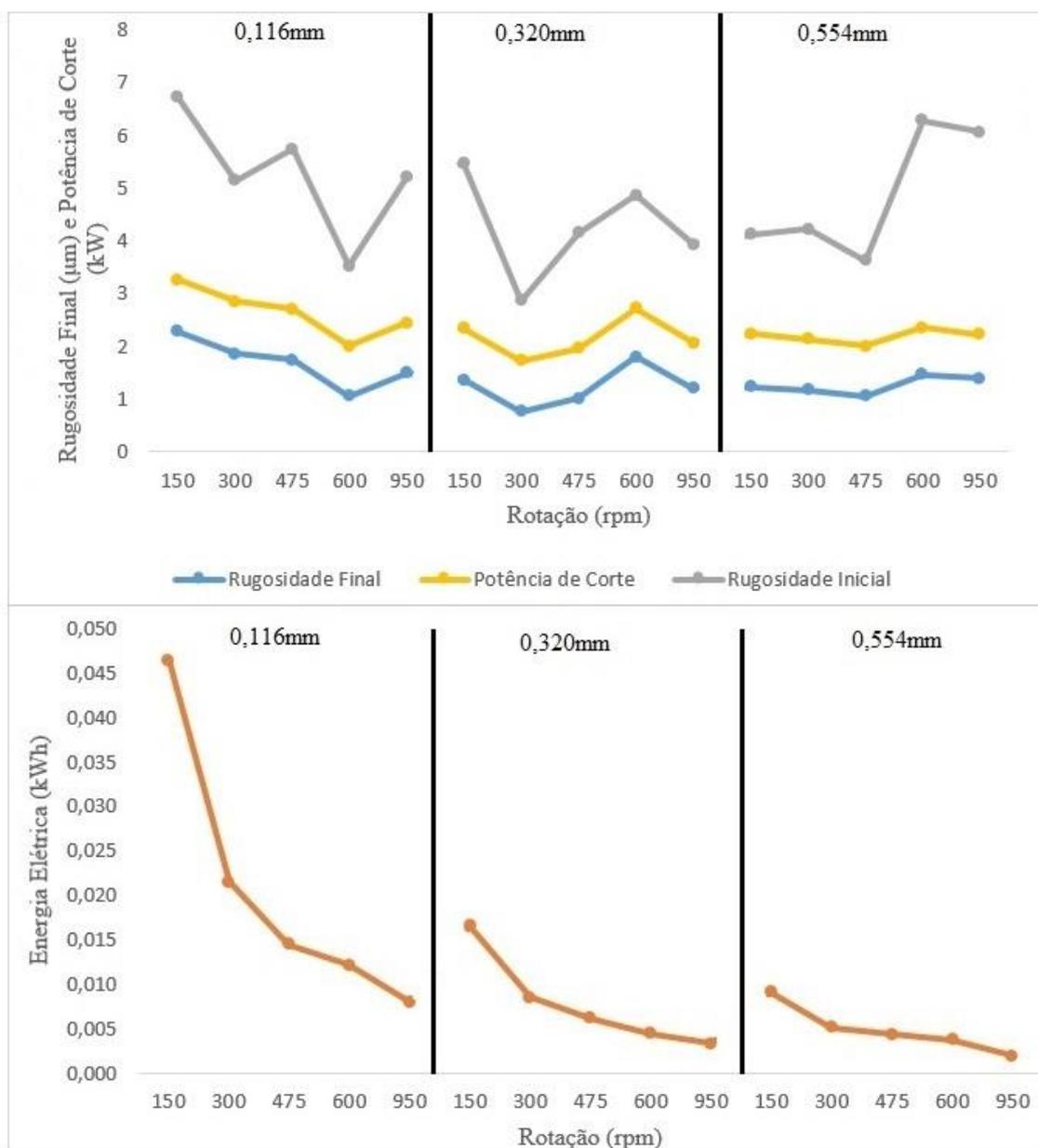
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

A dureza Vickers do aço VC é 263HV. Como resultado da metalografia, tem-se que este aço possui microestrutura constituída de ferrita e perlita, sendo predominante a perlita.

### 4.5.2 Rugosidade

A rugosidade média também é considerada como um parâmetro de avaliação da facilidade de usinagem do material e no presente trabalho, tem-se a rugosidade inicial, ou seja, medida quando as amostras foram adquiridas e a rugosidade após o torneamento junto com a potência de corte e a energia elétrica, como mostra a Figura 4.42.

Figura 4.42 Rugosidade Inicial e Final, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Através dos resultados, é possível ver que houve redução da rugosidade em todas as condições de corte, de forma significativa. Ao aumentar a rotação 533,3%, foi registrada uma melhora da rugosidade de 34,8 % no avanço de 0,116mm, além disso, há uma redução da rugosidade em 7% para o avanço de 0,116mm, 62,71% para o avanço de 0,320mm e 73,03% para o avanço de 0,554mm após o torneamento.

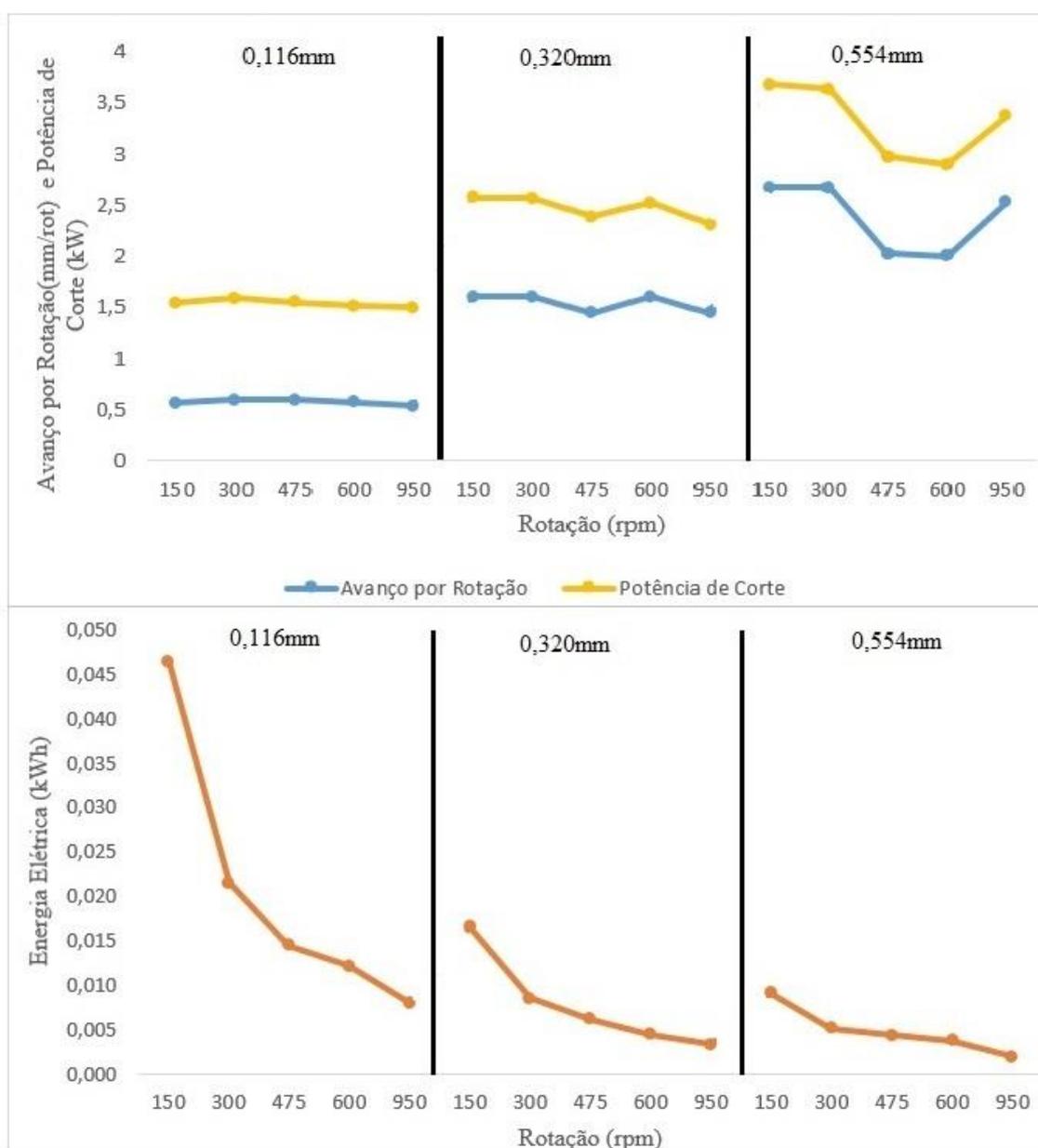
Como discutido no tópico 4.1.2, a potência de corte e a rugosidade possuem baixo valor quando a rotação é elevada, com isso a potência de corte segue a mesma variação da rugosidade em relação à rotação. Por meio da Figura, tem-se que os melhores acabamentos

necessitaram de menor potência de corte e maior consumo de energia elétrica, exceto para o avanço de 0,554mm que registrou menor valores de energia em rugosidades maiores.

#### 4.5.3 Diâmetro e Avanço por Rotação

O diâmetro do aço VC em todas as amostras foi 21 mm e o avanço por rotação junto com potência de corte e energia elétrica é mostrado na Figura 4.43.

Figura 4.43 Avanço por Rotação, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



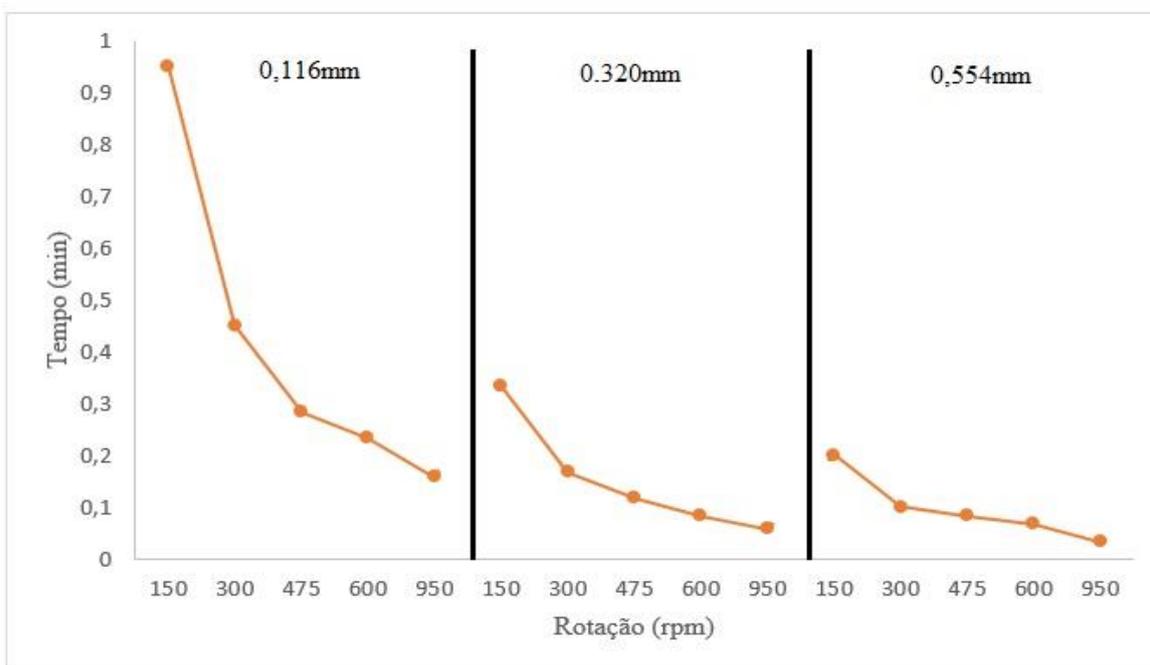
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Para o aço VC, houve maior retirada de material no final do processo. O maior valor foi registrado no avanço de 0,554mm com a rotação de 150rpm. Assim como avaliado no item 4.1.3, ao ser ter um avanço por rotação elevado, tem-se a potência de corte elevada e o consumo de energia elétrica baixo, contudo quando o avanço é de 0,116mm, tem-se que há maior variação de energia e menor variação do avanço por rotação, além do avanço por rotação decrescer junto com a energia elétrica.

#### 4.5.4 Tempo de Processo

Este tópico apresenta o tempo que durou o processo de cada amostra, conforme a Figura 4.44.

Figura 4.44 Tempo de Processo do Aço VC



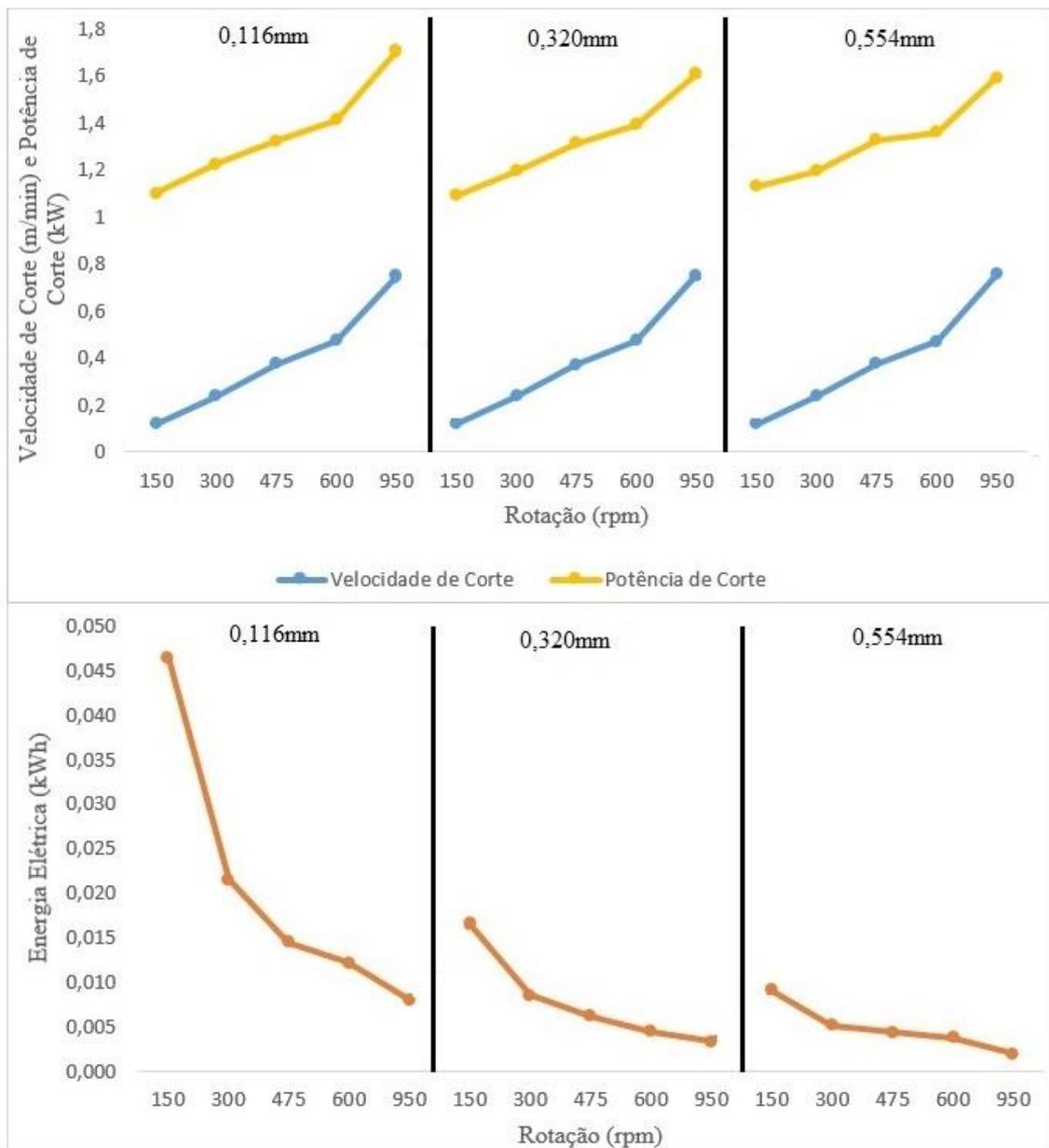
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Foi registrada a necessidade de maior demanda de tempo quando se tem rotações menores, assim, o ideal é trabalhar com rotações mais elevadas para que o processo não se estenda por bastante tempo, independente do avanço. Quando houve o aumento de 533,3% da rotação, a redução do tempo de processo foi maior com o avanço de 0,554mm e foi menor com o avanço de 0,320mm.

#### 4.5.5 Velocidade de Corte

Este tópico explica a velocidade de corte de cada amostra para as devidas condições de teste, conforme a Equação 4. A Figura 4.45 apresenta a velocidade de corte junto com a potência de corte e energia elétrica. A velocidade de corte é dada em m/rot, mas o valor foi dividido por 100 para melhor visualização da curva.

Figura 4.45 Velocidade de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

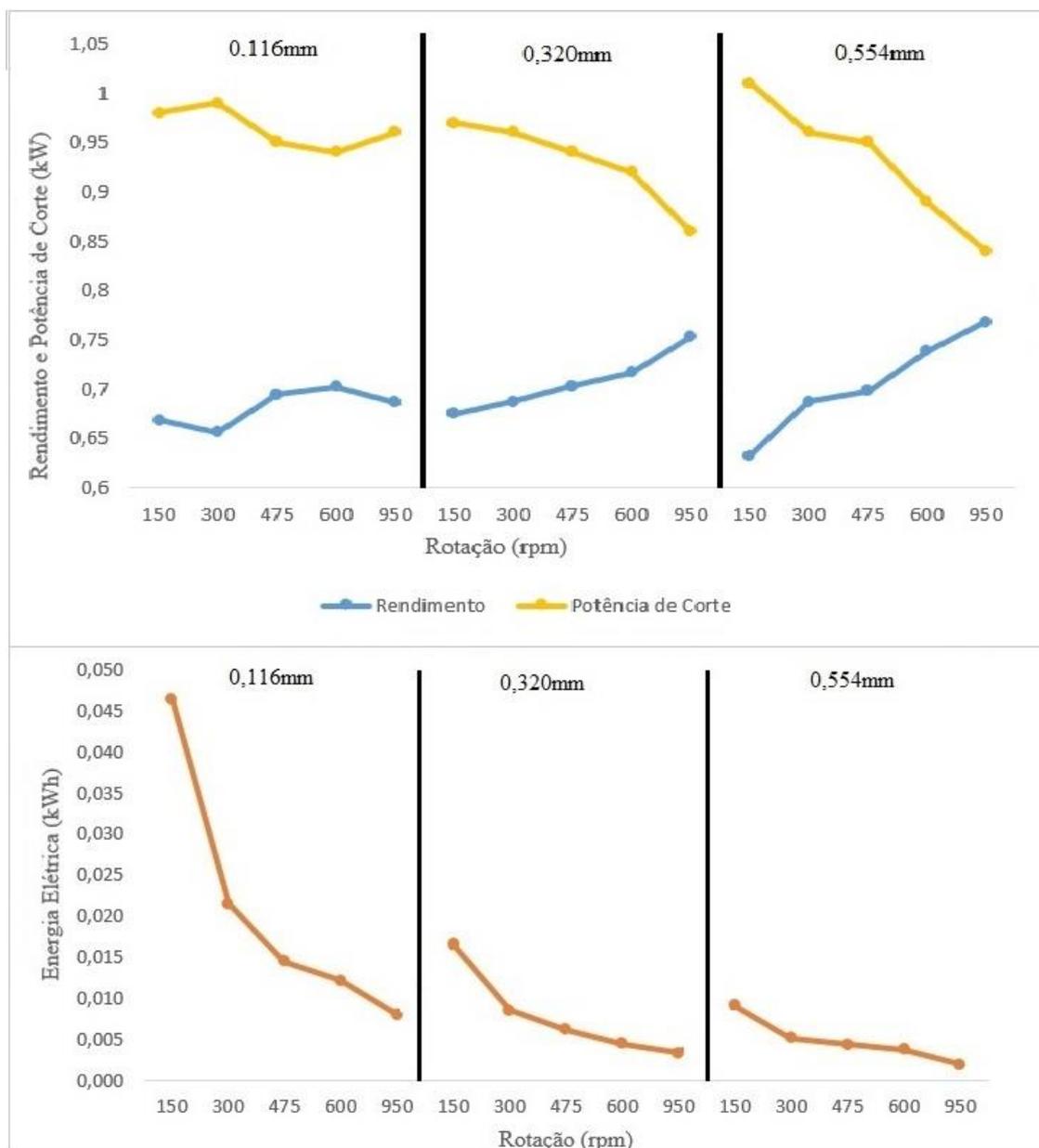
Por conseguinte, quando o aço VC necessita de maior tempo, sua velocidade de corte é menor. Também nota-se que houve aumento da velocidade de corte conforme foi aumentando o avanço.

Analisando a Figura acima, como no tópico 4.1.5, a potência de corte é elevada quando se tem altos valores de velocidade de corte e a curva seguem um padrão em todos os avanços. Quanto ao consumo de energia elétrica, para ter reduzido consumo, necessita-se de velocidade de corte elevada.

#### **4.5.6 *Rendimento***

De acordo com o tópico 3.2.3, o analisador de energia obteve o valor da corrente elétrica em cada teste e por intermédio da curva característica do motor, tem-se o rendimento do motor durante o torneamento de cada amostra, a Figura 4.46 apresenta o rendimento junto com a potência de corte e a energia elétrica.

Figura 4.46 Rendimento, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A Figura apresenta que o valor do rendimento é maior quando se tem rotações elevadas, ou seja, o aumento da velocidade aumenta o carregamento do motor, o que provoca o aumento do rendimento da produção.

Quando houve aumento de 533,3% da rotação, para o avanço de 0,116mm, houve aumento de rendimento em 5,10%, para o avanço de 0,320mm, o rendimento aumentou 11,55% e para o avanço de 0,554mm, esse aumento foi de 21,51%, assim, nota-se que a porcentagem aumentou quando o avanço foi elevado e este aço foi o que obteve maior aumento de rendimento, valor registrado com o avanço de 0,554mm.

Como visto no tópico 4.1.6, era de se esperar, o rendimento é baixo para valores de potência de corte e consumo de energia elétrica elevados, pois com a elevação da potência ativa, têm-se mais perdas. Também nota-se diminuição do rendimento quando o avanço de foi 0,116mm para 0,320mm, no entanto esta variável aumentou novamente quando avanço foi para 0,554mm.

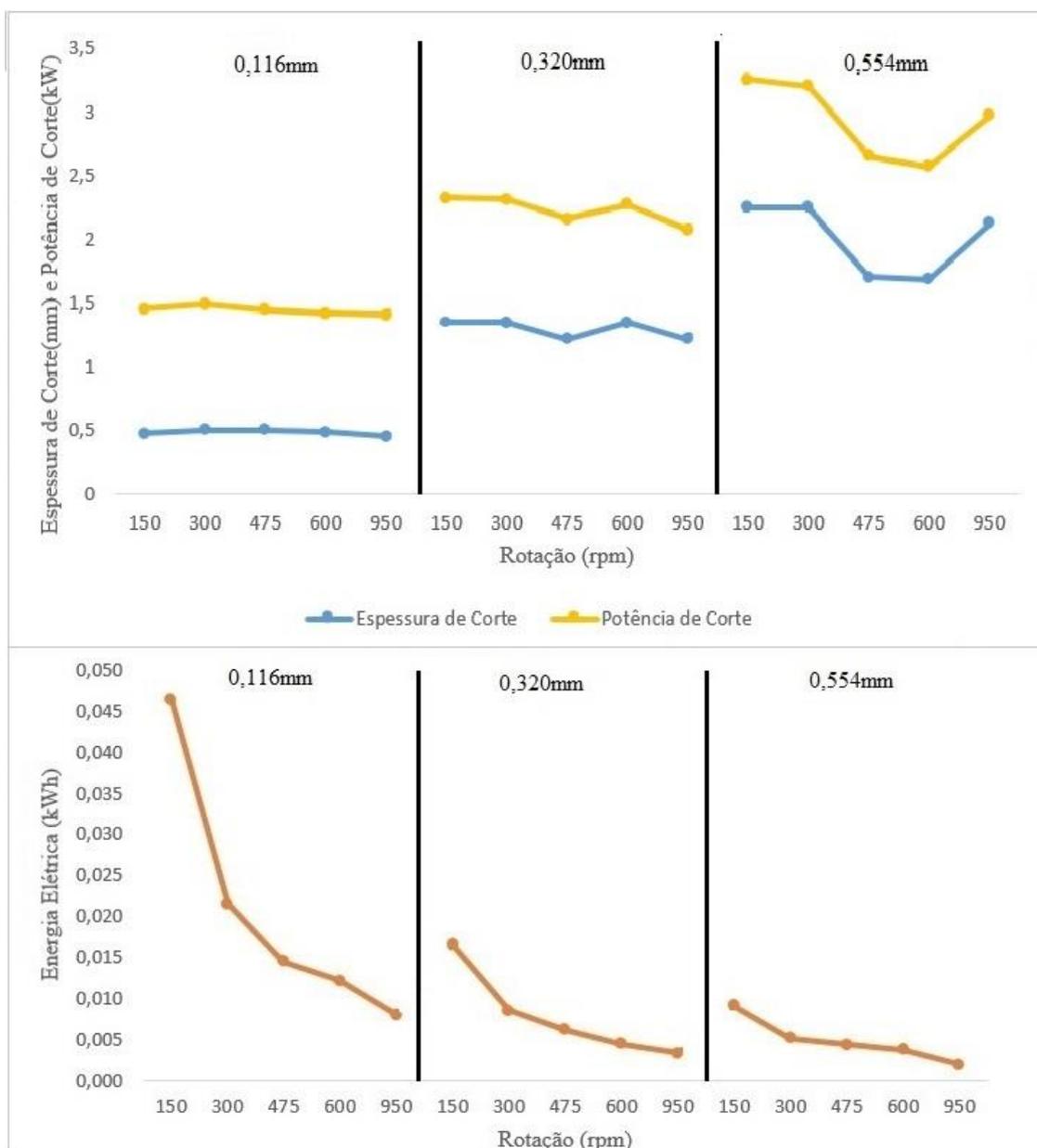
#### ***4.5.7 Profundidade de Corte, Ângulo de Direção do Gume e Largura de Corte***

Baseado nas Equações 14 e 15, pode-se calcular os valores da largura de corte e da profundidade de corte, respectivamente. A profundidade de corte, e consequentemente a largura de corte, são as mesmas em todas as amostras, o valor da profundidade de corte é 2,000mm e a largura de corte é igual a 2,372 mm. O ângulo de direção do gume da ferramenta é 57,5 para o aço VC.

#### ***4.5.8 Espessura de Corte***

Através da Equação 13, resulta o cálculo da espessura de corte, a Figura 4.47 mostra a espessura de corte junto com a potência de corte e a energia elétrica de cada amostra.

Figura 4.47 Espessura de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



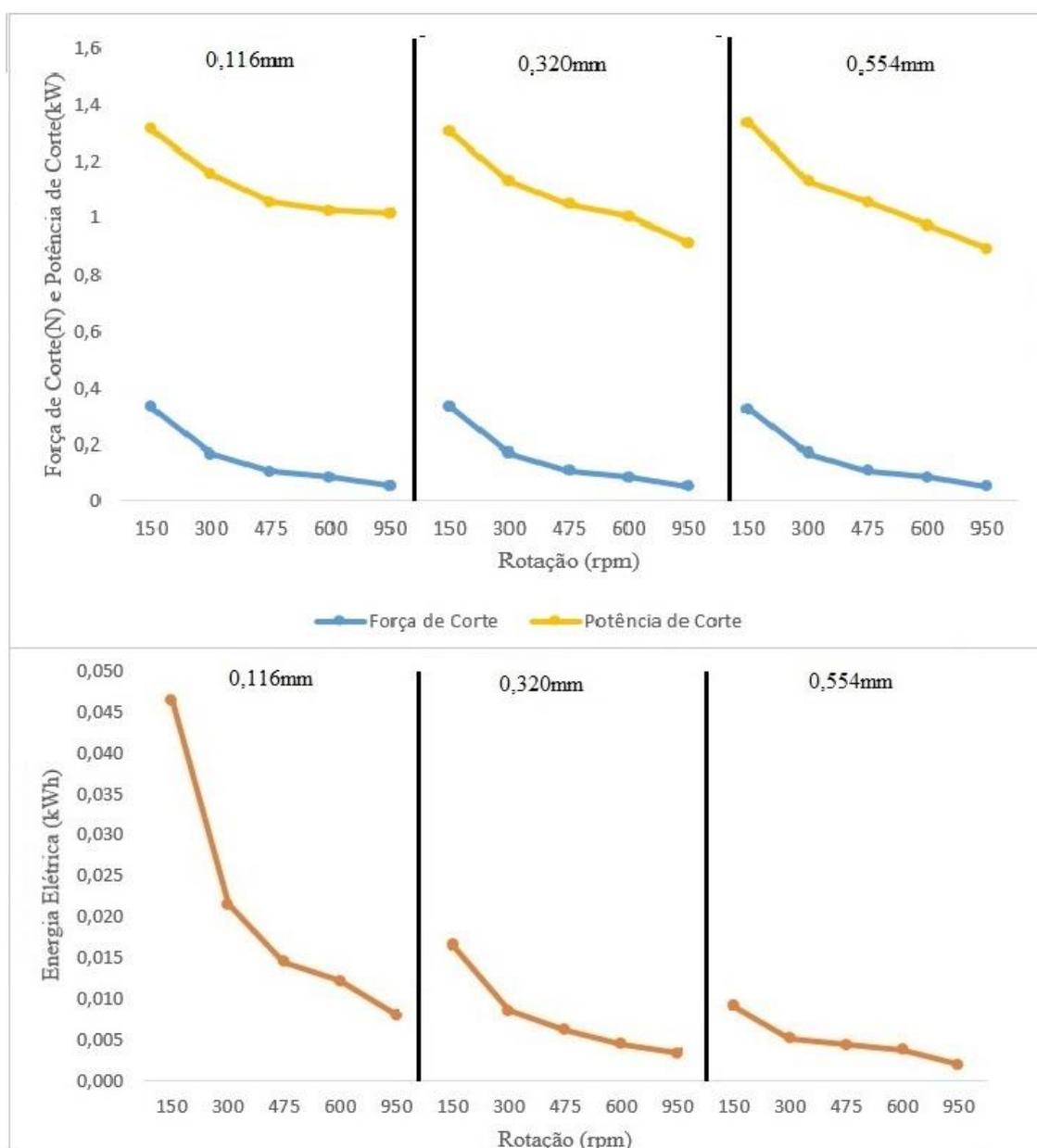
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A espessura de corte depende do avanço por rotação, discutido no tópico 4.5.3, de modo que houve um pico para o avanço de 0,554mm com a rotação de 150rpm. Sendo assim, como no avanço por rotação, a espessura de corte elevada causa uma potência de corte elevada e baixo consumo de energia elétrica, exceto para o avanço de 0,116mm, como foi visto no tópico 4.1.8.

### 4.5.9 Força de Corte

Conforme a Equação 3, citada anteriormente, tem-se o cálculo da força. Os resultados da força de corte junto com a potência de corte e energia elétrica podem ser vistos na Figura 4.48. A força de corte é dada em N, contudo o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.48 Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Observou-se que não há mudanças bruscas nos resultados com a mudança de avanço, segue um padrão. O aço VC, na maioria dos testes, obteve maior valores de força de corte devido a sua elevada dureza, de acordo com Callister (2008), e ao fato de ser o último aço usinado, uma vez que no caso do aço VC, a ferramenta estava mais desgastada, conseqüentemente, aumentando a força de corte, conforme afirmam Diniz *et al.* (2006). Em seu estudo, Polly(2019) explica que tal aumento da força de corte é devido ao fato de que se tem maior pressão específica de corte quando se tem maior deformação do cavaco e maior coeficiente de atrito apresentado pela ferramenta mais desgastada.

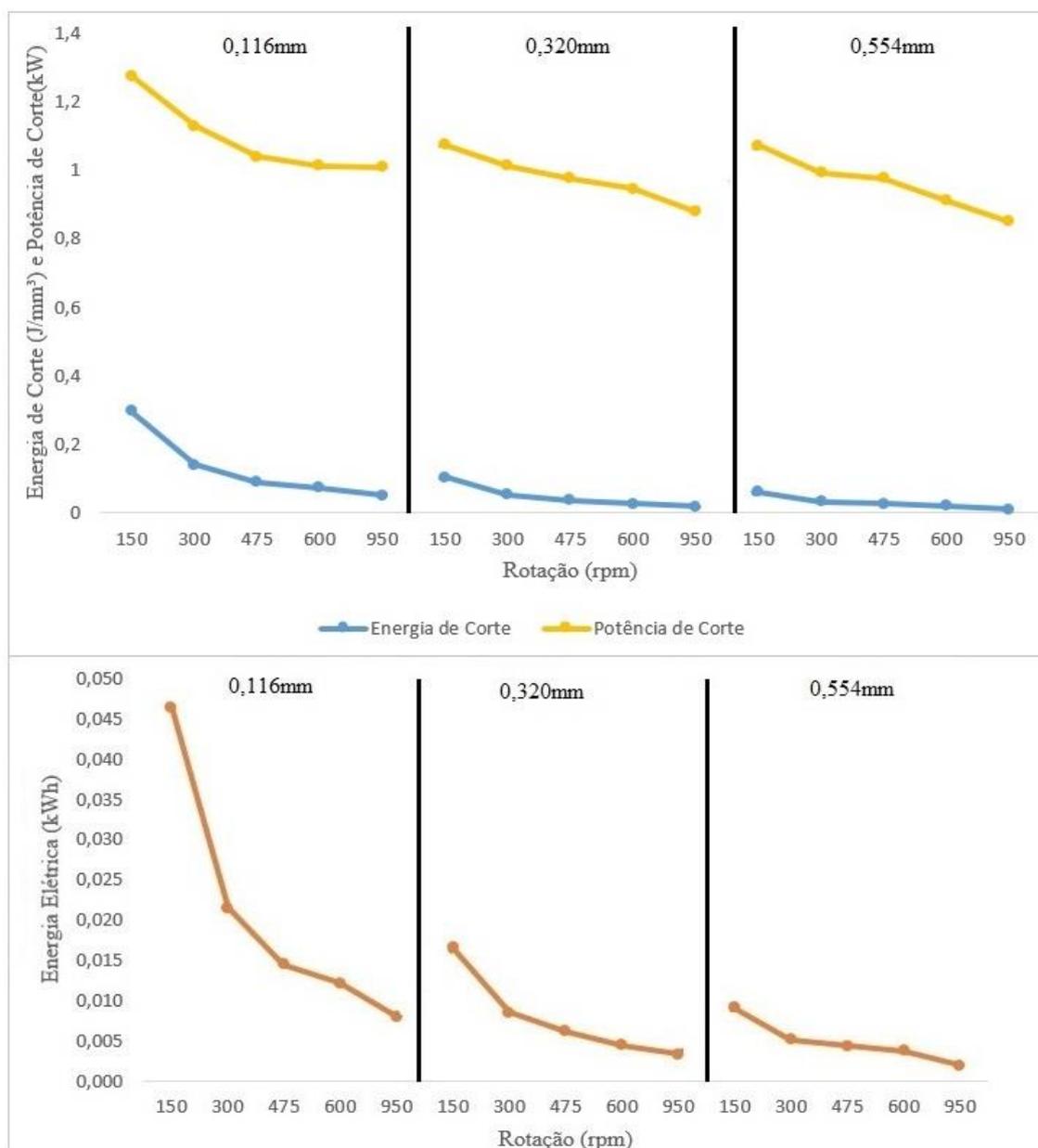
Quando houve aumento de 533,3% na rotação, a redução da força de corte foi de 84,10% para o avanço de 0,116mm, 84,45% para o avanço de 0,32mm e 84,23% para o avanço de 0,554mm, tais valores são próximos devido os valores da força de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço e no caso do aço VC, nota-se que a porcentagem aumentou quando o avanço aumentou de 0,116mm para 0,320mm, no entanto diminuiu quando o avanço se tornou 0,554mm.

Conforme discutido no tópico 4.1.9, a força de corte é proporcional a potência de corte, uma vez que é uma variável utilizada no cálculo da potência, no numerador, para elevados valores de força de corte, maior é o consumo energia elétrica, porque quanto mais esforço se necessita para realizar o corte, mais potência é consumida e mais tempo é gasto.

#### ***4.5.10 Energia de Corte***

Baseado na Equação 12 tem-se o cálculo da energia de corte, mostrado na Figura 4.49 junto com a potência de corte e a energia elétrica. A energia de corte é dada em  $J/mm^3$ , entretanto o valor foi dividido por 10000 para melhor visualização da curva.

Figura 4.49 Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica do Aço VC



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Houve redução da energia de corte com o aumento da rotação e do avanço, uma vez que a espessura de corte depende do avanço por rotação e é inversamente proporcional a energia de corte. A maior variação da energia de corte é quando a rotação aumenta de 150 rpm para 300 rpm com o avanço de 0,116mm.

Com o aumento da rotação em 533,3% da rotação, houve redução da energia de corte de 83,20% para o avanço de 0,116mm, 82,76% para o avanço de 0,320mm e 83,35% para o avanço de 0,554mm, assim como na força de corte, é possível ver que resulta em valores

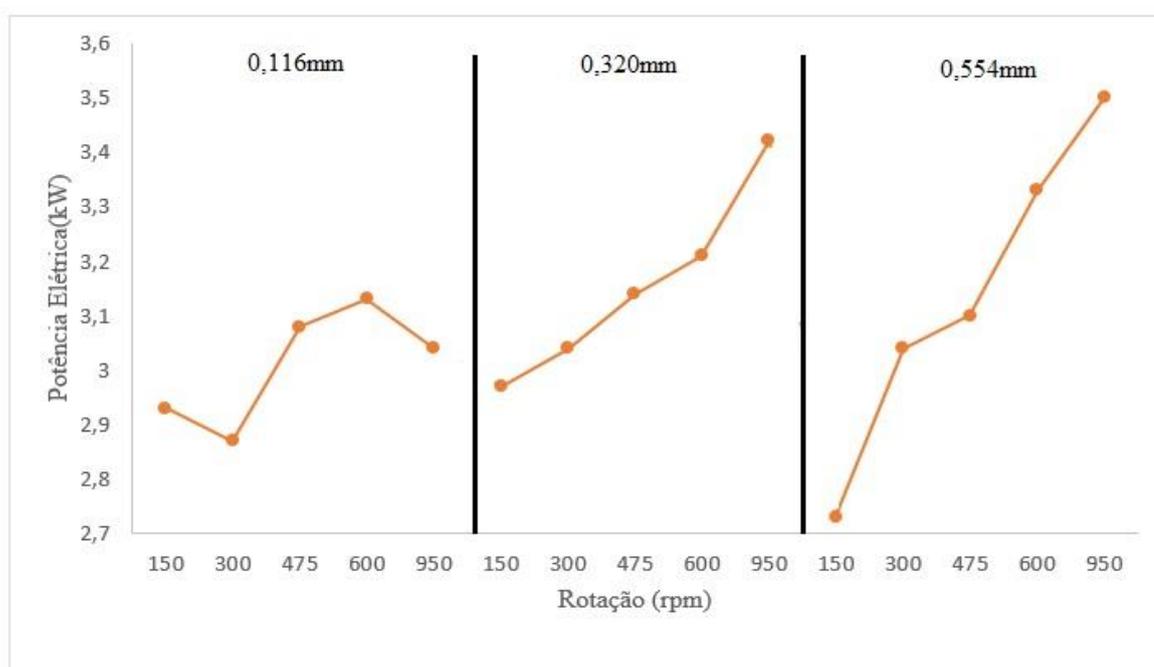
muito próximos devido aos valores de energia de corte serem quase os mesmos para a mesma rotação, havendo apenas pequena diferença na mudança de avanço.

Como analisado no tópico 4.1.10, as variações de energia e potência de corte não são tão bruscas com a mudança de rotação e avanço. Para elevados valores de potência de corte, tem-se elevados valores de energia de corte, pois ambas dependem da força de corte, discutida anteriormente.

#### 4.5.11 Potência Elétrica

Conforme os resultados obtidos a partir do uso do analisador de energia, tem-se a potência elétrica fornecidas em cada teste, mostrada na Figura 4.50.

Figura 4.50 Potência Elétrica do Aço VC



FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Nota-se variações bruscas da potência elétrica consoante a mudança de rotação e de avanço, uma vez que esta aumenta conforme há aumento da rotação, porém quanto ao avanço, houve aumento da potência quando foi de 0,116mm para 0,320mm e em seguida para 0,554mm.

Quando se tem um aumento de 533,3% da rotação, a potência elétrica registra um aumento de 3,75% para o avanço de 0,116mm, 15,15% para o avanço de 0,320mm e 28,20% para o avanço de 0,554mm, tal porcentagem aumentou proporcional ao avanço.

#### 4.6 Avaliação da Facilidade do Material em ser Usinado

De acordo com o que foi citado durante o trabalho, são bastantes os modos de avaliação da facilidade do material em ser usinado, mas na pesquisa em questão, tal melhora será analisada baseada na microestrutura e dureza dos materiais, velocidade de corte, rugosidade, desgaste da ferramenta, força e potência de corte, de acordo com Ferraresi (1970).

Nos aços 1045 e VC, a predominância de perlita na microestrutura provoca o aumento facilidade do material em ser usinado devido a diminuição do mecanismo de difusão do carbono da ferramenta para a peça. Porém, Aguiar (2001) afirma que no caso da presença de martensita na microestrutura, provoca o aumento da dureza, dificultando assim a usinagem dos aços 4140 e 4340, que também possuem elevados teores de molibdênio, manganês e cromo tornando-os duros e abrasivos, enquanto aços com teor de carbono entre 0,3 e 0,4% apresentam melhor facilidade do aço em ser usinado.

Segundo Baptista (2002), aços de baixas durezas possuem maior facilidade em ser usinados e nos tópicos anteriores, comprova-se que esses aços necessitam de menor velocidade, força de corte que os demais, que são os casos dos aços 1020, 1045 e VC.

Quanto ao quesito rugosidade, quanto maior a rotação, melhor é o acabamento da superfície, assim, facilitando a usinagem do material, de acordo com Palanisamy et al. (2018) e na pesquisa, os aços que se saíram melhores foram os aços 1020 e 4340.

A redução do ângulo de direção do gume da ferramenta de corte ( $X_r$ ) implica no desgaste da ferramenta e a presença de martensita provoca o aumento de tal degradação, tal qual asseguram Lalbondre et al. (2013), no estudo, foi registrado que após a usinagem dos aços 4140 e 4340, houve redução brusca no valor de  $X_r$  (ângulo de direção do gume da ferramenta de corte).

No caso dos aços 4140 e 4340, de acordo com Baptista (2002), para melhorar a capacidade de usinar destes aços seria necessário promover um tratamento térmico para que haja menor desgaste da ferramenta, assim, reduzindo a força de corte, de modo promover a modificação da estrutura cristalina do aço.

## 4.7 Discussão Geral

O tópico a seguir irá fazer uma discussão geral das variáveis analisadas, fazendo comparação entre os aços e a conclusão simplificada, de acordo com cada atributo.

Foi visto que os parâmetros tiveram bastante influência na rugosidade, uma vez que houver maiores reduções e rugosidade próxima de zero, após a usinagem, com rotações elevadas e os maiores valores de rugosidade final são registrados quando se tem o maior avanço, como afirmam Sanchez et. al (2017) em sua pesquisa, também é importante salientar que com o aumento do desgaste da ferramenta, a rugosidade é afetada de forma negativa.

De acordo com Nigro e Villa (2013), acabamentos mais rudimentares facilitam a corrosão e ocasionam uma concentração de tensão que facilita a formação de trincas, destarte, na pesquisa presente, os aços VC e 4140 estão mais propensos a corrosão e fadiga que os demais.

Rao et al. (2017) afirmam que a relação entre o avanço por rotação e a velocidade corte influenciam significativamente na rugosidade, porém no presente estudo não é possível estabelecer uma relação direta entre os parâmetros citados, pois cada aço se comporta de uma forma diferente e tem outros fatores relacionados ao resultado da rugosidade final, como desgaste da ferramenta.

Segundo Hanief et al. (2017), o avanço por rotação influencia na força de corte mais do que a profundidade de corte. Os aços de maior dureza necessitaram de menor demanda de tempo para concluir o processo, porque o tempo diminui com o aumento do avanço por rotação em concordância com Moreira et al. (2019) que enaltecem tal efeito significativo.

De acordo com Rodrigues (2005), a velocidade de corte é um importante variável para a energia de corte. Palanisamy et al. (2018) obteve melhor acabamento da superfície quando a velocidade de corte estava elevada e o avanço baixo, porém essa combinação não se aplica na pesquisa, uma vez que tal afirmativa se aplica apenas para 2 dos 5 aços e o melhor acabamento se obteve apenas com a velocidade de corte elevada.

O menor valor de rendimento corresponde a 62,10% e de acordo com o Gráfico 3.1, referente a curva característica do motor, tem-se que o carregamento é menor que 60% e segundo Mamede (2017), um motor é considerado eficiente quando possui carregamento maior que 60%, portanto, o motor do torno utilizado nesta pesquisa não opera de maneira eficiente.

É importante salientar que o ângulo de direção do gume diminui conforme a ferramenta vai sendo gasta, dessarte, a ordem de torneamento foi: aço 1020, aço 1045, aço 4140, aço 4340 e aço VC, tal ordem foi de maneira aleatória. Moreira et al. (2019) ressaltam que a

ferramenta de corte é um recurso limitado, pois dependendo do seu material, haverá a necessidade de reduzir velocidade de corte e avanço por rotação, conseqüentemente eles sugerem que para obter eficiência energética é importante o uso de ferramentas de cortes adequadas ao processo.

É observado que há redução da força e da potência de corte com o aumento da rotação devido ao aumento da temperatura da zona de corte, conforme Trent e Wright (2000).

Para Zhang et al. (2017), a velocidade de corte não foi significativa para o resultado da força de corte, mas na pesquisa, a força de corte diminuiu com o aumento da velocidade de corte, algo também observado por Amorim (2002).

Entre os aços, aqueles que possuem maior dureza necessitam de maior força nas rotações de 150,300 e 475 rpm, enquanto nas rotações de 600 e 950 rpm, necessitaram de menos força que os demais.

Outra observação é que em diversas pesquisas, como por exemplo, Hanief et al. (2017) e Harisha et al. (2018), a força de corte aumenta proporcionalmente ao aumento do avanço, porém, no presente estudo consta que ao mudar do avanço de 0,320 mm para 0,554mm a força de corte diminuiu.

Entre os aços, os maiores valores de energia de corte foram registrados nos aços 4140 e 4340 por ser mais resistentes, em concordância com Diniz et al.(2006), no entanto em rotações elevadas, o aço 1020 obteve resultados mais altos. Para Wang et al. (2016), a energia de corte aumenta com a redução da espessura de corte e foi o que houve na maioria dos casos desse estudo.

No trabalho de Wang et. al. (2019), ao analisar parâmetros de corte que afetam a energia de corte no processo de torneamento CNC, verificou que tal energia foi bastante impactada pelo ângulo de direção do gume da ferramenta, entretanto no presente trabalho, não houve tanta influência do ângulo de direção do gume da ferramenta na energia de corte como houve na força de corte, uma vez que a energia de corte engloba outras variáveis que obtiveram maior importância.

Como era esperado, os aços 4140 e 4340 possuem maiores valores de potência elétrica, já que são os mais duros, baseado em Wang et al. (2016) e em Unver e Kara (2019).

Quanto aos valores de energia elétrica, sabe-se que essa variável é dependente da potência elétrica e do tempo, em conformidade com Mamede (2017), foi visto que a energia diminuiu com o aumento da rotação e do avanço, enquanto isso, os aços 4140 e 4340 obtiveram os maiores valores. Houve uma variação brusca de 150rpm para 300 rpm com o avanço de 0,116mm.

Assim como Luoke et al. (2019), na pesquisa registrou-se valores menores de energia elétrica quando se tem redução do tempo de processo, porém Luoke et al. (2019) afirmam que essa não é a melhor alternativa para se obter diminuição da energia elétrica, pois pode gerar problemas mecânicos na máquina.

He et al. (2017), em sua pesquisa, concluíram que para haver otimização da energia elétrica é necessário trabalhar com valores altos de velocidade de corte e avanço por rotação, enquanto os valores de profundidade de corte e largura de corte devem ser reduzidos. No caso do presente estudo, tem-se que a profundidade e largura de corte são iguais para todas as amostras em cada aço e ao analisar esses resultados, obtém-se que o aço 1020 possui menores valores e economia de energia elétrica em relação aos demais. Os parâmetros de velocidade de corte e avanço por rotação foram discutidos anteriormente.

A Tabela 4.1 mostra a redução do consumo de energia elétrica, em porcentagem, com o aumento de 533,3% da rotação e de acordo com cada avanço.

Tabela 4.1 Redução do Consumo de Energia Elétrica com Aumento de 533,3% da Rotação

AVANÇO (mm)	REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA				
	1020	1045	4140	4340	VC
0,116	82,60%	78,74%	81,93%	84,38%	82,75%
0,320	85,26%	84,11%	84%	83,33%	80%
0,554	76,47%	82,70%	83%	79,34%	79,12%

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

De acordo com a Tabela 4.1, a porcentagem da redução da energia aumenta quando o avanço vai de 0,116mm para 0,320mm e reduz quando o avanço aumenta de 0,320mm para 0,554mm, exceto para os aços 4340 e VC que reduzem com o aumento do avanço. Também é perceptível a redução do consumo de energia de forma significativa ao aumentar a rotação.

Por meio de uma somatória dos valores de energia elétrica, resulta que o gasto total do processo é de 0,8445kWh.

Balogun et al. (2018) destacam a importância do operador para eficiência energética, pois ao reduzir o tempo de troca de rotação e ferramenta, obtém-se ganho no tempo total de processo. No presente trabalho, este quesito não foi observado, uma vez que não houve troca de operador.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs realizar o estudo da influência dos parâmetros de usinagem na eficiência energética das operações de usinagem na manufatura de componentes mecânicos, por meio da avaliação da energia elétrica utilizada durante o processo.

O primeiro objetivo a ser alcançado foi a realização da metalografia, no qual as fases identificadas nos aços são ferrita, perlita e martensita, sendo notória a influência das fases nos resultados, uma vez que aços com a presença de martensita provocou o aumento da velocidade, força e potência de corte. Já a presença de ferrita e perlita, tais variáveis são reduzidas.

Logo mais, obteve-se os valores da dureza Vickers de cada aço, no qual verificou-se que os aços mais resistentes são 4140 e 4340.

Em seguida, com a variação dos parâmetros de rotação e avanço foram perceptíveis suas influências nos resultados, nos quais os valores obtidos como decorrência dos experimentos sofreram variações consoante a mudança de rotação e avanço, resultados esses que são: rugosidade da superfície, velocidade, força, potência e energia de corte, rendimento, potência e energia elétrica.

Por meio da medição da rugosidade média inicial e final, é perceptível a diminuição da rugosidade após o processo de torneamento, em especial, para o aço 4340.

Ao analisar a força e potência de corte e medição da energia elétrica, foi visto que esses três parâmetros sofrem influência de forma significativa da velocidade de corte, rotação, dureza dos aços e espessura de corte. Além disso, pôde-se observar que para haver redução significativa da rugosidade da superfície, não há aumento da potência de corte. Baseado nos valores obtidos com a medição da energia elétrica, também foi possível concluir que o motor do equipamento utilizado, torno convencional, opera de maneira ineficiente.

Através da obtenção do consumo de energia elétrica do processo, observou-se que para ter um processo mais eficiente e de melhor acabamento superficial, necessita-se trabalhar com rotações elevadas, maiores avanços e altas velocidades de corte, uma vez que nessas condições resultam: redução do tempo de processo, maior rendimento da produção, menor força de corte, conseqüentemente, menor desgaste da ferramenta de corte, redução da energia de corte e elétrica e da potência elétrica.

Portanto, sabe-se que o último objetivo é a avaliação da facilidade do aço em ser usinado, com isso, baseado nos métodos de avaliação, é possível concluir que os aços 1020, 1045 e VC possuem maior facilidade em ser usinados, uma vez que apresentaram melhor

acabamento final, menor tempo de processamento, necessitaram de menor velocidade, força e potência de corte, além de possuírem menores valores de potência e energia elétrica. Quanto aos materiais mais duros, é necessária a melhora da capacidade do material em ser usinado por meio de tratamentos térmicos.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar a obtenção de força e potência de corte e medição de energia elétrica no processo de torneamento com uso de torno de controle numérico computadorizado (CNC) a fim de comparar os resultados com o deste trabalho. Além da possibilidade de variação de outros parâmetros, como velocidade de corte e uso de óleo refrigerante.

Realizar a obtenção de força e potência de corte e medição de energia elétrica no processo de torneamento utilizando outras operações de torneamento, como desbaste, rosqueamento, chanframento, entre outros.

Desenvolver um modelo matemático para a previsão do consumo de energia ao escolher os parâmetros de corte, tendo como base os resultados apresentados.

Estudar a influência do desgaste da ferramenta no consumo de energia elétrica nos processos de manufatura por usinagem.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Willys Machado. **SOLDAGEM DO AÇO ABNT 4140 SEM TRATAMENTO TÉRMICO POSTERIOR**. 2001. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

AHN, Jong Wook; WOO, Wan Sik; LEE, Choon Man. **A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining**. *Applied Thermal Engineering*, [s.l.], v. 94, p.748-753, fev. 2016. Elsevier BV.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e força de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - ABESCO. **O que é Eficiência Energética? (EE)**. 2015. Disponível em: <[http:// www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficienciaenergetica-ee/](http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficienciaenergetica-ee/)>. Acesso em: 02 jan. 2018.

BAPTISTA, André Luís de Brito. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços**. Rem: Revista Escola de Minas, [s.l.], v. 55, n. 2, p.103-109, abr. 2002. FapUNIFESP (SciELO).

BIASIBETTI, Guilherme Roberto dos Santos et al. **Análise da rugosidade superficial de barras de aço SAE 1045 após torneamento**. Matéria (Rio de Janeiro), [s.l.], v. 24, n. 1, 20 maio 2019. FapUNIFESP (SciELO).

BALOGUN, Vincent Aizebeoje et al. **Energy centric selection of machining conditions for minimum cost**. *Energy*, [s.l.], v. 164, p.655-663, dez. 2018. Elsevier BV.

CAI, Wei et al. **Development of dynamic energy benchmark for mass production in machining systems for energy management and energy-efficiency improvement**. *Applied Energy*, [s.l.], v.202, p.715-725, set. 2017. Elsevier BV.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais-Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

CARVALHO, Hugo Marcelo Bezerra de. **Metodologia de avaliação e aumento da eficiência energética em manufatura de elementos discretos: aplicação em usinagem**. 2015. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/68895.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2018.

CARVALHO, Hugo M.b. de; GOMES, Jefferson de Oliveira. **Energy Efficiency Evaluation for Machining Process in Flexible Manufacturing Systems – A Case Study**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 29, p.104-108, 2015. Elsevier BV.

CHETAN et al. **Specific cutting energy modeling for turning nickel-based Nimonic 90 alloy under MQL condition**. International Journal Of Mechanical Sciences, [s.l.], v. 146-147, p.25-38, out. 2018. Elsevier BV.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

DIETMAIR, A., VERL, A., EBERSPAECHER, P., **Predictive simulation for model based energy consumption optimization in manufacturing system and machine control**. Teesside, UK, 19th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), 2009.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N. L., “**Tecnologia da Usinagem dos Metais**”, Artliber, São Paulo, 2006.

DÖBBELER, Benjamin; KLOCKE, Fritz. **Process Oriented Choice of Lubricant Pressure and Volume Flow to Increase Machining Process Efficiency**. Procedia Manufacturing, [s.l.], v. 8, p.361-368, 2017. Elsevier BV.

DONG, H., LIU Y., WANG X., **Optimizing Machining Parameters of Compound Machining of Inconel718**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 42, p.51-56, 2016. Elsevier BV.

DUFLOU, Joost R. et al. **Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach**. Cirp Annals, [s.l.], v. 61, n. 2, p.587-609, 2012. Elsevier BV.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional. Julho de 2018**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf)>. Acesso em: 02 dez. 2018.

ERSOY, A.; ATICI, U. **Performance characteristics of circular diamond saws in cutting of different type of rocks**. Diamond and Telated Materials, Amsterdam, v. 13, n.1, p. 22-37, 2004.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1970.

GROOVER, Mikell P.. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**,. 4. ed. Bethlehem: Wiley, 2010.

HACKSTEINER, Matthias et al. **Automatic Assessment of Machine Tool Energy Efficiency and Productivity**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 62, p.317-322, 2017. Elsevier BV.

HANIEF, M.; WANI, M.f.; CHAROO, M.s.. **Modeling and prediction of cutting forces during the turning of red brass (C23000) using ANN and regression analysis**. Engineering Science And Technology, An International Journal, [s.l.], v. 20, n. 3, p.1220-1226, jun. 2017.

HARISHA, S.k. et al. **Statistical Investigation of Tool Geometry for Minimization of Cutting Force in Turning of Hardened Steel**. Materials Today: Proceedings, [s.l.], v. 5, n. 5, p.11277-11282, 2018.

HE, Keyan; TANG, Renzhong; JIN, Mingzhou. **Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time**. International Journal Of Production Economics, [s.l.], v. 185, p.113-127, mar. 2017. Elsevier BV.

KENDA, Jani; PUŁAVEC, Franci; KOPAC, Janez. **Modeling and Energy Efficiency of Abrasive Flow Machining on Tooling Industry Case Study**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 13, p.13-18, 2014. Elsevier BV.

KHAN, Pathan Layeequzzama; BHIVSANE, S.v.. **Experimental Analysis and Investigation of Machining Parameters in Finish Hard Turning of AISI 4340 Steel**. Procedia Manufacturing, [s.l.], v. 20, p.265-270, 2018. Elsevier BV.

KING, R. I; HAHN, R. S. **Principles of grinding**. Handbook of modern grinding technology. EUA: Ghapman and Hall, 1986.

KONDO, Marcel y et al. **Optimizing cutting parameters for cutting power and roughness in VAT 32® turning with an experimental Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO ceramic tool using Taguchi's method**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 77, p.610-613, 2018. Elsevier BV.

KREITLEIN, S.; SCHOLZ, M.; FRANKE, J.. **The Automated Evaluation of the Energy Efficiency for Machining Applications based on the Least Energy Demand**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 61, p.404-409, 2017. Elsevier BV.

LALBONDRE, Rajshekhar et al. **Studies of Low Alloy Steels by Face Turning Method: An Experimental Investigation**. Procedia Engineering, [s.l.], v. 64, p.632-641, 2013. Elsevier BV.

LALBONDRE, Rajshekhar; KRISHNA, Prasad; MOHANKUMAR, G.c.. **An Experimental Investigation on Machinability Studies of Steels by Face Turning**. Procedia Materials Science, [s.l.], v. 6, p.1386-1395, 2014. Elsevier BV.

LEE, Wonkyun et al. **Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction**. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 150, p.352-360, maio 2017. Elsevier BV.

LENZ, Juergen; KOTSCHENREUTHER, Jan; WESTKAEMPER, Engelbert. **Energy Efficiency in Machine Tool Operation by Online Energy Monitoring Capturing and Analysis**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 61, p.365-369, 2017. Elsevier BV.

LI, Wen; KARA, Sami. **Characterising Energy Efficiency of Electrical Discharge Machining (EDM) Processes**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 29, p.263-268, 2015. Elsevier BV.

LIU, Dawei; WANG, Wei; WANG, Lihui. **Energy-Efficient Cutting Parameters Determination for NC Machining with Specified Machining Accuracy**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 61, p.523-528, 2017.

LUOKE, Hu et al. **Optimisation of cutting parameters for improving energy efficiency in machining process**. Robotics And Computer-integrated Manufacturing, [s.l.], v. 59, p.406-416, abr. 2019. Elsevier BV.

MACHADO, A., da SILVA, M. B., “**Usinagem dos Metais**”, Apostila, DEEME –UFU, Uberlândia, 1999.

MAMEDE FILHO, J. “**Instalações Elétricas Industriais**”. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MINIPA. “**Manual de Instruções ET-5050**”. 1.ed. São Paulo,SP,2002,66p.

MITUTOYO. “**Manual de Instruções SJ-201**”. 1.ed. Suzano,SP,2002,70p.

MOREIRA, L.c. et al. **Energy-Efficient machining process analysis and optimisation based on BS EN24T alloy steel as case studies**. Robotics And Computer-integrated Manufacturing, [s.l.], v. 58, p.1-12, abr. 2019. Elsevier BV.

NIGRO, Bruno Juliani de; VILLA, Ricardo Medeiros. **ENSAIO DE USINABILIDADE EM LIGA INCONEL 625 POR TORNEAMENTO**. 2013. 87 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PALANISAMY, D. et al. **Machinability Studies on CNC Turning of PH Stainless Steel with Coated Inserts**. Materials Today: Proceedings, [s.l.], v. 5, n. 6, p.14520-14525, 2018. Elsevier BV.

PARIDA, Asit Kumar; MAITY, Kalipada. **Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation**. Engineering Science And Technology, An International Journal, [s.l.], v. 21, n. 3, p.364-370, jun. 2018. Elsevier BV.

POLLY, Matheus dos Santos. **ANÁLISE COMPARATIVA DE FERRAMENTAS DE METAL-DURO CLASSE S E CERÂMICA MISTA NO TORNEAMENTO A SECO E COM MQL DO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RAO, C.j.; RAO, D. Nageswara; SRIHARI, P.. **Influence of Cutting Parameters on Cutting Force and Surface Finish in Turning Operation**. Procedia Engineering, [s.l.], v. 64, p.1405-1415, 2017.

RIEF, Markus; KARPUSCHEWSKI, Bernhard; KALHÖFER, Eckehard. **Evaluation and modeling of the energy demand during machining**. Cirp Journal Of Manufacturing Science And Technology, [s.l.], v. 19, p.62-71, nov. 2017. Elsevier BV.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 2005. 227 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANCHEZ, Y. et al. **Indirect Monitoring Method of Tool Wear using the Analysis of Cutting Force during Dry Machining of Ti Alloys**. Procedia Manufacturing, [s.l.], v. 13, p.623-630, 2017. Elsevier BV.

SANGWAN, Kuldip Singh; KANT, Girish. **Optimization of Machining Parameters for Improving Energy Efficiency using Integrated Response Surface Methodology and Genetic Algorithm Approach**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 61, p.517-522, 2017. Elsevier BV.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Oxford Science Publications, 1984. 594 p.

TRENT M. C., “**Metal cutting principles**” 2ª edition, Butterworth-Heinemann, USA,1984.

TRENT, M. C., WRIGHT, P. K., “**Metal cutting principles**”, 4ª edition, Butterworth-Heinemann,USA, 2000.

UHLMANN, Eckart; REINKOBER, Sascha; HOLLERBACH, Tobias. **Energy Efficient Usage of Industrial Robots for Machining Processes**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 48, p.206-211, 2016. Elsevier BV.

UNVER, Umit; KARA, Ozlem. **Energy efficiency by determining the production process with the lowest energy consumption in a steel forging facility**. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 215, p.1362-1370, abr. 2019. Elsevier BV.

WANG, Bing et al. **Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy**. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 129, p.292-304, ago. 2016. Elsevier BV.

WANG, Lihui; WANG, Wei; LIU, Dawei. **Dynamic feature based adaptive process planning for energy-efficient NC machining**. Cirp Annals, [s.l.], v. 66, n. 1, p.441-444, 2017.

WANG, Lexiang et al. **Modeling and analysis of specific cutting energy of whirling milling process based on cutting parameters**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 80, p.56-61, 2019. Elsevier BV.

WEG. **Seleção de Motores Elétricos**. Disponível em: <[http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_sel\\_web.asp#](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp#)>. Acesso em: 1 dez. 2018.

ZHANG, Qing; ZHANG, Song; LI, Jianfeng. **Three Dimensional Finite Element Simulation of Cutting Forces and Cutting Temperature in Hard Milling of AISI H13 Steel**. Procedia Manufacturing, [s.l.], v. 10, p.37-47, 2017. Elsevier BV.