

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ. IFCE *CAMPUS* MARACANAÚ PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

JEAN CARLOS ALVES FERNANDES

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM DE AÇOS POR TORNEAMENTO CNC

MARACANAÚ, CE 2022

JEAN CARLOS ALVES FERNANDES

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM DE AÇOS POR TORNEAMENTO CNC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceara (IFCE) como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis.

Linha de Pesquisa: Mecânica Aplicada à Conservação do Meio Ambiente.

Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nélio Costa Freitas.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Instituto Federal do Ceará - IFCE Sistema de Bibliotecas - SIBI Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F363a

Fernandes, Jean Carlos Alves. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM DE AÇOS POR TORNEAMENTO CNC / Jean Carlos Alves Fernandes. - 2022. 124 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus Maracanaú, 2022. Orientação: Prof. Dr. Francisco Nélio Costa Freitas.

1. Eficiência Energética. 2. Usinagem. 3. Parâmetros de Corte. 4. Torneamento CNC. I. Titulo. CDD 620.91

JEAN CARLOS ALVES FERNANDES

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM DE AÇOS POR TORNEAMENTO CNC

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 15/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

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

Aos meus pais, Eliomar e Nilda, que me proporcionaram condições de estudo para que pudesse chegar até aqui. A minha esposa, Adriana, e filha Mariana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por todas as graças concedidas nesse período tão turbulento que a humanidade passa, na certeza de que tudo vai passar.

A minha família, pela compreensão e apoio nas dificuldades enfrentadas na concepção e desenvolvimento deste trabalho.

Ao empenho do professor Nélio Freitas, orientador desta pesquisa, pela confiança depositada em mim, pela paciência, contribuições, orientações e pelos ensinamentos ao longo dessa caminhada.

A todos os professores do PPGER, que sempre procuraram trabalhar em prol do crescimento e da formação a acadêmica de todos os seus discentes, em especial aos professores Rodrigo Freitas, Francisco Frederico, Auzuir Ripardo, Marcelo Parente e José Renato. Deixo aqui meu reconhecimento.

A todos do IFCE *campus* de Cedro, que contribuíram proporcionando todo o suporte, recursos, insumos e a infraestrutura para o desenvolvimento de parte deste trabalho, em especial aos professores Antony Gleydson, Alan Vinícius, Isaac Costa, Moisés de Lima e Marcos Silvano, pois sem essa "força" não teria conseguido.

A todos os colegas e amigos do PPGER, pelas discussões, contribuições, ensinamentos ao longo desta caminhada, em especial os discentes Roberto Sá, Adriano Gurgel, Roberto Oliveira, Daniel Alencar.

Ao SENAI Ceará, nas unidades de Maracanaú e Jacarecanga, pelo suporte em parte das etapas do desenvolvimento desta pesquisa, em especial aos professores César Meneses, Elon, Marcelo, como também ao prof. Elias Pedrosa, gerente do SENAI, por todo o auxílio e apoio nos trabalhos.

E a todos aqueles que proporcionaram contribuições, sejam diretas e indiretas, para desenvolvimento desta pesquisa.

"Vitória sem luta é triunfo sem glória." (Provérbio Chinês)

RESUMO

A geração de energia no mundo sofreu um aumento significativo devido às diversas necessidades populacionais, a globalização e a expansão industrial. As atividades industriais de manufatura são responsáveis por uma fatia expressiva do consumo de energia elétrica, onde destacam-se os processos de fabricação por usinagem. Pesquisas recentes relacionam o uso racional de energia (eficiência energética) com análise dos parâmetros de corte em diversos processos de usinagem através de modelos teóricos e práticos, no entanto os aspectos que relacionam esses parâmetros na usinagem de diferentes materiais considerando aspectos experimentais não são observados. Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de corte na usinagem de diferentes aços por torneamento CNC e sua relação no consumo de energia elétrica. Para isso, foi realizada a caracterização dos materiais a serem usinados por meio de metalografía e medição de dureza, em seguida foi determinado a variação dos parâmetros velocidade de corte e avanço no processo de torneamento CNC, através dos ciclos longitudinal de desbaste (G71) e de acabamento (G70), posteriormente foi feita a avaliação do consumo de energia elétrica através da correlação dos parâmetros de corte com a velocidade de avanço, tempo de usinagem, espessura de corte, força, potência e energia de corte e por fim, foi realizada a avaliação da usinabilidade dos materiais considerando a qualidade da superfície obtida segundo os parâmetros e classes de rugosidade do torneamento. Os resultados mostraram redução na força, potência e energia de corte em diferentes faixas de avanço e redução da energia elétrica consumida de 13,67% para aço 1020, 6,72% para o aço 1045, 9,17% para o aço 4140 e 10,34% para o aço 4340, com classes de rugosidade N7 e N8 para os aços ao carbono, e N5, N6 e N7 para os aços-liga.

Palavras-chave: Eficiência energética; Usinagem; Parâmetros de corte; Torneamento CNC.

ABSTRACT

Energy generation in the world has undergone a significant increase due to diverse population needs, globalization and industrial expansion. Industrial manufacturing activities are responsible for a significant share of electrical energy consumption, where machining manufacturing processes stand out. Recent researches relate the rational use of energy (energy efficiency) with the analysis of cutting parameters in several machining processes through theoretical and practical models, however the aspects that relate these parameters in the machining of different materials considering experimental aspects are not observed. Given the above, the present work aims to evaluate the influence of cutting parameters on the machining of different steels by CNC turning and its relationship in electrical energy consumption. For this, the characterization of the materials to be machined was carried out through metallography and hardness measurement, then the variation of the parameters cutting speed and feed in the CNC turning process was determined through the longitudinal roughing cycles (G71) and finishing (G70), the electric energy consumption was subsequently evaluated by correlating the cutting parameters with the feed rate, machining time, cutting thickness, force, power and cutting energy and finally, the evaluation of the machinability of the materials was carried out considering the quality of the surface obtained according to the parameters and roughness classes of turning. The results showed a reduction in force, power and cutting energy in different feedrates and a reduction in the electrical energy consumed from 13,67% for 1020 steel, 6,72% for 1045 steel, 9,17% for 4140 steel and 10,34% for 4340 steel with roughness classes N7 and N8 for carbon steels, and N5, N6 and N7 for alloy steels.

Keywords: Energy efficiency, Machining, Cutting parameters, CNC Turning

LISTA DE FIGURAS

| Figura 1: Matriz Energética Brasileira 2018 e 201919 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 2: Uso de energia por setor produtivo no Brasil19 |
| Figura 3: Perfil do consumo de energia em um processo de torneamento25 |
| Figura 4: Triângulo das potências26 |
| Figura 5: Componentes da força de usinagem no processo de torneamento |
| Figura 6: Fatores que influem na determinação da usinabilidade dos metais33 |
| Figura 7: Comprimento para avaliação da rugosidade34 |
| Figura 8: Características dimensionais do inserto de corte47 |
| Figura 9: Suporte com inserto47 |
| Figura 10: Torno CNC SINITRON BNC-184048 |
| Figura 11: Interface Homem Máquina (IHM) FANUC OI-TD49 |
| Figura 12: Cortadora metalográfica e embutidora50 |
| Figura 13: Lixadeira e politriz50 |
| Figura 14: Microscópio ótico a) Olympus b) IM100i51 |
| Figura 15: Microdurômetros a) SHIMADZU b) DIGIMESS52 |
| Figura 16: Método para medições de microdureza52 |
| Figura 17: Medição com Rugosímetro53 |
| Figura 18: Peça teste para torneamento53 |
| Figura 19: Parâmetros de rugosidade e Processos de fabricação55 |
| Figura 20: Metodologia de para medição do consumo de energia56 |
| Figura 21: Montagem de Analisador de Qualidade de Energia57 |
| Figura 22: Metodologia para aquisição de dados e medição do consumo de energia58 |
| Figura 23: Micrografia do aço ABNT/SAE 1020. Aumento: a) 200x. b) 500x59 |
| Figura 24: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço |
| ABNT/SAE 1020 |
| Figura 25: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE |
| 1020 |
| Figura 26: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica do Aço ABNT/SAE 102063 |
| Figura 27: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço ABNT/SAE |
| 1020 |
| Figura 28: Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 102067 |
| Figura 29: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço ABNT/SAE 102068 |
| Figura 30: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 102069 |
| |

| Figura 31: Micrografia do aço ABNT/SAE 1045. Aumento: a) 200x. b) 500x70 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 32: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço |
| ABNT/SAE 104571 |
| Figura 33: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE |
| 1045 |
| Figura 34: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 104574 |
| Figura 35: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço ABNT/SAE |
| 1045 |
| Figura 36: Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 104577 |
| Figura 37: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço ABNT/SAE 104578 |
| Figura 38: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 104579 |
| Figura 39: Micrografia do Aço SAE 4140. Aumento: a) 200x b) 400x80 |
| Figura 40: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE |
| 4140 |
| Figura 41: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 414083 |
| Figura 42: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica no Aço SAE 414084 |
| Figura 43: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE 414086 |
| Figura 44: Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 414088 |
| Figura 45: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço SAE 414089 |
| Figura 46: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 414090 |
| Figura 47: Micrografia do aço SAE 4340. Aumento: a) 200x b) 400x91 |
| Figura 48: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE |
| 4340 |
| Figura 49: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 434094 |
| Figura 50: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica no Aço SAE 434095 |
| Figura 51: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE 434097 |
| Figura 52: Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 434099 |
| Figura 53: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço SAE 4340100 |
| Figura 54: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4340101 |
| Figura 55: Análise descritiva e variações da microdurezaVickers102 |
| Figura 56: ANOVA aplicada nos resultados da Rugosidade Média considerando os parâmetros |
| variados108 |
| Figura 57: Estimativa Marginal Média para os valores Ra Final109 |

| Figura 58: ANOVA aplicada nos resultados da Energia Elétrica Consumida considerando os |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| parâmetros variados109 |
| Figura 59: Estimativa Marginal Média para os valores de Energia Elétrica Consumida110 |
| Figura 60: ANOVA aplicada nos resultados da Força de Corte considerando os parâmetros |
| variados110 |
| Figura 61: Estimativa Marginal Média para os valores da Força de Corte111 |
| Figura 62: ANOVA aplicada nos resultados da Energia de Corte considerando os parâmetros |
| variados111 |
| Figura 63: Estimativa Marginal Média para os valores da Energia de Corte112 |
| Figura 64: ANOVA aplicada nos resultados do Tempo de Usinagem e Potência Elétrica112 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 1: Artigos e Pesquisas Relevantes | 42 |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tabela 2: Composição química dos aços (% em massa) | 46 |
| Tabela 3: Parâmetros de corte variados e materiais empregados | 54 |
| Tabela 4: Redução do Consumo de Energia Elétrica em Valores Percentuais (Aumento d | la Vc |
| de 42,86%) | 106 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| Associação Brasileira de Normas Técnicas |
|----------------------------------------------------------------|
| Analytic Hierarchy Process |
| American Iron and Steel Institute |
| Comandos Numéricos Computadorizados |
| International Energy Agency |
| International Organization for Standardization |
| Norma Brasileira |
| Non-dominated Sorting Genetic Algorithm |
| Metodologia de Superfície de Resposta |
| Society of Automotive Engineers |
| Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution |
| |

| 1. INTRODUÇÃO | |
|------------------------------------------------------|----|
| 1.1 Justificativa | 20 |
| 1.2 Objetivos | 21 |
| 1.2.1 Geral | 21 |
| 1.2.2 Específicos | 22 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho | 22 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 24 |
| 2.1 Consumo de energia em máquinas ferramentas | 24 |
| 2.1.1 Medição de energia | 25 |
| 2.1.2 Potência elétrica | 25 |
| 2.1.3 Medição de energia em máquinas ferramentas | 27 |
| 2.2 PROCESSOS DE USINAGEM | 27 |
| 2.3 PARÂMETROS DE USINAGEM | 28 |
| 2.3.1 Força de Usinagem | |
| 2.3.2 Potência de Usinagem | 30 |
| 2.3.3 Energia Específica de Corte | 32 |
| 2.4 USINABILIDADE DE MATERIAIS | 32 |
| 2.4.1 Rugosidade Superficial | |
| 2.4.1.1 Avaliação da Rugosidade | |
| 2.5 ESTADO DA ARTE | |
| 2.6 PESQUISAS RELACIONADAS | 41 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 3.1 Aços Empregados | 46 |
| 3.2 Equipamento de Usinagem | 47 |
| 3.3 Métodos | 49 |
| 3.3.1 Caracterização de Materiais | 49 |
| 3.3.2 Metalografia | 49 |
| 3.3.3 Microdureza | 51 |
| 3.3.4 Medição da Rugosidade | |
| 3.3.5 Operação de usinagem no torneamento CNC | 53 |
| 3.3.6 Parâmetros de processo e materiais empregados | 54 |
| 3.3.7 Avaliação da usinabilidade do material usinado | 54 |
| 3.3.8 Medição do consumo de energia | 55 |

SUMÁRIO

| 3.4 Avaliação dos Resultados | 57 |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5 Fluxograma da Metodologia | 57 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 58 |
| 4.1. Aço ABNT/SAE 1020 | 58 |
| 4.1.1. Micrografia e Microdureza Vickers | 59 |
| 4.1.2. Medições de Rugosidade | 59 |
| 4.1.3. Velocidade de Avanço | 61 |
| 4.1.4. Tempo de Usinagem | 62 |
| 4.1.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte | 64 |
| 4.1.6. Espessura de Corte | 64 |
| 4.1.7. Força de Corte | 66 |
| 4.1.8. Potência Elétrica | 68 |
| 4.1.9. Energia de Corte | 68 |
| 4.2. Aço ABNT/SAE 1045 | 70 |
| 4.2.1. Micrografia e Microdureza Vickers | 70 |
| 4.2.2. Medições de Rugosidade | 71 |
| 4.2.3. Velocidade de Avanço | 72 |
| 4.2.4. Tempo de Usinagem | 73 |
| 4.2.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte | 74 |
| 4.2.6. Espessura de Corte | 75 |
| 4.2.7. Força de Corte | 76 |
| 4.2.8. Potência Elétrica | 78 |
| 4.2.9. Energia de Corte | 78 |
| 4.3. Aço SAE 4140 | 80 |
| 4.3.1. Micrografia e Microdureza Vickers | 80 |
| 4.3.2. Medições de Rugosidade | 81 |
| 4.3.3. Velocidade de Avanço | |
| 4.3.4. Tempo de Usinagem | |
| 4.3.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte | 84 |
| 4.3.6. Espessura de Corte | 85 |
| 4.3.7. Força de Corte | |
| 4.3.8. Potência Elétrica | |
| 4.3.9. Energia de Corte | |
| 4.4. Aço SAE 4340 | 91 |

| 91 |
|-----------|
| 91 |
| 93 |
| 94 |
| 95 |
| 96 |
| 98 |
| 100 |
| 100 |
| 102 |
| 104 |
| 114 |
| 116 |
| 117 |
| |
| INTERFACE |
| 123 |
| INTERFACE |
| 124 |
| |

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de fontes de energia em larga escala é algo que, historicamente, impulsionou o desenvolvimento tecnológico. A globalização, o crescimento da população e a expansão da indústria proporcionaram um aumento significativo na demanda de energia. O relatório *Key World Energy Statistics* de 2019 disponibilizado pela *International Energy Agency* mostra que, considerando o intervalo dos anos de 1973 a 2017, a geração de energia mundial passou de uma demanda 6.131 TWh para 25.606 TWh, um aumento de aproximadamente 318% em 44 anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

Toda essa necessidade por parte da sociedade fez com que surgissem novas pesquisas relacionadas as fontes e recursos energéticos, uma vez que o uso em grandes quantidades de combustíveis fósseis contribuíram com 29,3 gigatoneladas de emissões de carbono em 2008 e espera-se que aumente para 35,4 gigatoneladas em 2035 (CAMPATELLI *et al.*, 2015).

Dentre os maiores consumidores de energia e de grandes volumes de emissões de CO_2 , podemos destacar as indústrias de manufatura. Segundo o IEA (2007), as mesmas são responsáveis 1/3 da energia total consumida e 36% do total de emissões de CO_2 .

No Brasil, esse número quanto ao consumo de energia não são muito diferentes. Dos 259, 4 Mtep (Tonelada equivalente de petróleo) o setor industrial foi responsável por 30,4% do consumo de energia do país, perdendo apenas para o setor de transportes, com um consumo de 32,7%. Já nas emissões de CO₂, o setor foi responsável por 75,8 Milhões de toneladas de dióxido de carbono (Mt CO₂^{-eq}), correspondendo a 18,0 % das emissões totais (EPE, 2020). Comparado com o percentual das indústrias de manufatura do mundo, o Brasil apresenta esse valor pelo fato de possuir um volume significativo de fontes sustentáveis de energia na Indústria.

Por conta das condições territoriais brasileiras, a matriz energética nacional é considerada como uma das mais limpas do mundo, além de ser a mais renovável do mundo industrializado. No Balanço Energético Nacional do ano de 2018, as usinas hidrelétricas são responsáveis por 66,6% na eletricidade do Brasil conforme figura 1, porém esse número sofre uma queda quando comparamos com a geração de energia elétrica no mundo, passando para 15,9% (PELEGRINO, 2018).



Figura 1: Matriz Energética Brasileira 2018 e 2019

Fonte: Adaptado de EPE (2020)

O Balanço Energético Nacional de 2020 Ano Base 2019 aponta que no setor da Indústria, houve um recuo de 2,18 milhões de tep em valores absolutos, tendo destaque para a queda do setor de produção do aço bruto de 9,0%, causando impacto na utilização do carvão mineral na produção do Ferro Gusa e Aço. A indústria de Papel e Celulose: a queda na produção de celulose (-6,6%) fez com que a demanda energética deste segmento caísse - 4,3% em relação ao ano anterior. Mas ainda é o segundo setor que mais consome energia, com 30,4% do consumo total (EPE, 2020). A figura 2 mostra os valores percentuais do consumo de energia no Brasil por setor produtivo.



Figura 2: Uso de energia por setor produtivo no Brasil

Fonte: Adaptado de EPE (2020)

Dentre as indústrias de manufatura e transformação, temos aquelas que desenvolvem atividades relacionadas aos processos de usinagem. Os processos de usinagem são considerados na indústria metalmecânica como sendo os mais antigos e podem ser aplicados tanto em materiais metálicos, como em não metálicos (RIGATTI, 2010). Representam uma classe importante de processos de fabricação para inúmeros setores que exigem alta precisão e flexibilidade em processamento de diferentes tipos de materiais (APOSTOLOS *et al.*, 2013).

Atualmente as frentes relacionadas à manufatura buscam otimizar cada vez mais os seus processos, tendo em vista a sustentabilidade, redução de insumos, tornando-os mais eficientes.

Hoje, as empresas de fabricação modernas definem como meta a redução do consumo de energia de suas instalações, tendo em vista a economia e a sustentabilidade do ambiente (HU *et al.*, 2018).

Essas estratégias apresentaram melhoria na eficiência energética, redução dos impactos ambientais e que esses objetivos podem agregar trazendo negócios mais sustentáveis e fornecendo benefícios aos seus processos (SAEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2016).

Todo esse cenário quanto as demandas de energia no Brasil e no mundo, a necessidade de uso racional e sustentável de energia elétrica e os impactos causados pelo seu alto consumo em processos de manufatura por usinagem, possibilitam a abertura de um segmento extremamente atrativo e promissor para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas e aplicadas.

1.1 Justificativa

Atualmente as indústrias de manufatura buscam otimizar os seus processos, maximizando a produção e reduzindo os custos de fabricação. Contudo, trata-se de processos que consomem um percentual significativo de energia e geram resíduos por conta da dinâmica de cada operação, o que vai de encontro com aspectos de sustentabilidade.

Sihag *et al.* (2018) afirmam que o alto percentual dos impactos ambientais causados pelas máquinas-ferramentas ocorrem em decorrência de seu alto consumo de energia elétrica.

Em estudo publicado em 2018 pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy*, mostrou que o Brasil investe pouco em políticas de desempenho e eficiência no consumo de energia. Na pesquisa foram avaliados os esforços para um uso eficiente de energia dos 25 países que mais consomem energia, aonde o Brasil encontra-se em tal rol (ACEEE, 2018).

Na pesquisa foram avaliadas quatro categorias: Edificações, indústria, transporte e progresso geral da eficiência energética nacional por meio de 36 métricas de desempenho. Para cada uma dessas categorias foram alocados 25 pontos.

Hu *et al.* (2019) afirma que de acordo com a Agência Internacional de Energia os processos de manufatura são responsáveis pela emissão de 36% das emissões de dióxido de carbono, e aproximadamente 1/3 do consumo global de energia.

Levando-se em consideração os mecanismos que podem proporcionar falhas superficiais e por fadiga, Norton (2013) considera que, em eixos de transmissão um dos aspectos que podem estar associados a essas é a qualidade de seu acabamento superficial gerado pelo processo de fabricação.

Nos processos que envolvem usinagem, características como os parâmetros de corte estão aspectos associados diretamente à vida útil de um componente mecânico submetido a alguma usinagem (RAO C.J.; SRIHARI, 2013).

A literatura apresenta várias pesquisas que relacionam os parâmetros de corte e o consumo de energia elétrica em processos de usinagem, seja nas operações de fresamento (Lv *et al.* 2016; Zhang *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018), ou de torneamento, seja convencional (Dambhare *et al.*, 2015; Anand *et al.*, 2016), tendo como métricas a avaliação da energia específica de corte (Camposeco-Negrete, 2015; Warsi *et al.*, 2015; Zhong *et al.*, 2016; Zhao *et al.* 2016; Meng *et al.*, 2016; Bagaber e Yusoff, 2017; Xie *et al.*, 2018; Babager e Yusoff, 2018a), a rugosidade superficial (Bagaber e Yusoff, 2017; Cui e Guo, 2018; Ic *et al.*, 2018; Camposeco-Negrete e De Dios Calderón-Nájera, 2019), taxas de emissão de carbono (Anand *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019), tempos relacionados ao processo de usinagem (He *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019), custos (Zhang *et al.*, 2018; Bagaber e Yusoff, 2018b), ou ainda métricas combinadas para a avaliação da usinagem (Bilga *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2017).

Apesar da quantidade expressiva de trabalhos, observa-se poucos estudos avaliam a performance da usinagem relacionando-as com o consumo eficiente e racional de energia, considerando as variações dos parâmetros de corte, por meio de ensaios experimentais em materiais com diferentes propriedades mecânicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar estudo que visa avaliar o consumo de energia elétrica na usinagem de aços com diferentes propriedades na operação de torneamento externo em um equipamento CNC considerando os parâmetros de corte e a qualidade superficial.

1.2.2 Específicos

Para atingir o objetivo geral descrito anteriormente, o trabalho tem como objetivos específicos:

- Realizar caracterização dos materiais a serem usinados por meio de metalografia e medição de dureza;
- Determinar a variação dos parâmetros velocidade de corte e avanço por rotação no processo de torneamento CNC;
- Realizar os ensaios de usinagem na operação de torneamento externo através dos ciclos longitudinal de desbaste (G71) e acabamento (G70) para os diferentes aços;
- Avaliar o consumo de energia elétrica através da correlação dos parâmetros de corte com a velocidade de avanço, tempo de usinagem, espessura de corte, força, potência e energia de corte utilizados na operação de torneamento externo em diferentes aços em um equipamento CNC;
- Avaliar a usinabilidade dos materiais usinados considerando a qualidade da superfície obtida segundo os parâmetros e classes de rugosidade conforme o processo de fabricação por torneamento.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução, com uma breve explanação sobre a demanda de energia global, matriz energética, o uso da energia na Indústria brasileira, a utilização da energia elétrica no Brasil, a importância do uso racional de energia nas indústrias de manufatura e nos processos que envolvem usinagem, as contribuições da pesquisa no cenário, os objetivos geral e específicos, como também a estrutura deste subtópico.

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica e a revisão da literatura relacionada ao tema proposto, através de um condensado sobre as definições que envolvem o consumo e medição de energia em máquinas ferramentas, como também os artigos relevantes que giram em torno do consumo de energia elétrica, dos processos de usinagem, dos parâmetros de corte, da usinabilidade dos materiais e da avaliação da qualidade da usinagem.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

O capítulo 4 aborda os resultados obtidos no desenvolvimento experimental e a discussão relacionada ao tema.

No capítulo 5, é realizada a conclusão do trabalho segundo os resultados obtidos e relatados no capítulo anterior, seguido das contribuições da pesquisa.

E por fim, no último capítulo, o capítulo 6, têm-se as sugestões de trabalhos futuros, tendo como objetivo a continuidade da pesquisa proposta, ou ainda, trazer a luz novos projetos a partir do tema desenvolvido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão trabalhados os aspectos sobre o consumo de energia em máquinas-ferramentas, processos de usinagem, parâmetros característicos referentes ao corte, o consumo de energia em máquinas ferramentas, aspectos de qualidade superficial, junto a um estado da arte sobre os trabalhos que relacionam a eficiência energética em processos de usinagem por torneamento CNC.

2.1 Consumo de energia em máquinas ferramentas

As máquinas-ferramentas podem ser definidas como um conjunto de subsistemas, em que cada um executa uma função específica a partir de uma necessidade. A funcionalidade e a integração de cada um desses subsistemas permitem a execução de funções ainda mais complexas conforme demanda de cada processo (PELEGRINO, 2018)

Nas máquinas ferramentas a energia elétrica é transformada em energia mecânica. Os componentes elétricos nesses equipamentos são classificados em acionamentos elétricos, motorização do eixo árvore, servomotores dos eixos lineares, sistemas hidráulico e de arrefecimento e elementos auxiliares (LI *et. al.*, 2011).

Uma das deficiências encontradas quanto a demanda de energia em máquinas ferramentas é a especificação das informações de consumo pelo fabricante do equipamento. A figura 3 mostra que o consumo de energia está relacionado com o tempo em que os componentes estão em funcionamento, mostrando que a energia em um processo de usinagem corresponde a potência multiplicada pelo tempo de ciclo (LI *et al.*, 2011).





Fonte: Adaptado de Li et al. (2011)

Nas máquinas ferramentas, o consumo é dinâmico e possui uma parte constante e variável. A parte constante é relacionada aos periféricos da máquina relacionados à execução do processo, por exemplo, motores elétricos e acionamentos, sistemas hidráulicos, de arrefecimento, pneumático, dentre outros. A componente variável está relacionada com a usinagem propriamente dita e os componentes relacionados a sua execução, como o funcionamento das guias lineares e eixo árvore (PELEGRINO, 2018).

2.1.1 Medição De Energia

Para mudança de estados ou alterações de condições é necessário o fornecimento de energia. Isso implica que, para que haja mudança de estado implica na existência de fluxo de energia (WHITAKER, 2007).

2.1.2 Potência elétrica

Nas máquinas e equipamentos, a potência está relacionada com a capacidade de realizar trabalho nas transmissões de movimento, motores e outros elementos associados a determinadas funções. Considerando a eletricidade, a potência é o produto da tensão pela corrente, conforme mostrado na equação 1.

$$P = U(t) \times i(t) \quad [W] \tag{1}$$

Onde P é a potência instantânea, U(t) é a tensão medida no tempo e i(t) é a corrente elétrica medida no tempo.

Considerando que a corrente utilizada nas máquinas e equipamentos é alternada, a potência elétrica é representada por duas partes, uma ativa, aquele responsável por realizar trabalho, e a outra reativa, relacionada com a geração de campos magnéticos necessários para o funcionamento de equipamentos industriais como motores, transformadores. A figura 4 representa a composição dessas duas partes gerando uma potência aparente.

Figura 4: Triângulo das potências

Potência Ativa - P (kW) \vec{p}



Fonte: Adaptado de Whitaker (2007)

A partir da figura 4, podemos definir a equação 2, que relaciona as potências ativa reativa e aparente.

$$\vec{s} = \sqrt{\vec{p}^2 + \vec{Q}^2} [kVA]$$
⁽²⁾

Onde \vec{p} é a potência ativa em [kW], \vec{s} é a potência aparente em [kVA] e \vec{Q} e a potência reativa em [kVAr]

Analisando a figura 4, é possível verificar que quanto menor for a potência reativa menor será a parte da potência aparente requerida, considerando um valor constante de potência ativa. Já para uma igualdade de valores entre a potência ativa e aparente toda a potência será convertida em ativa (WHITAKER, 2007).

Um quarto elemento é mostrado na figura 4 e está relacionado com a potência ativa e aparente, que é o ângulo φ , associado ao fator de potência calculado pela equação 3.

$$\cos\varphi = \frac{\vec{p}}{\vec{s}} \tag{3}$$

Quanto mais próxima for a relação entre a parte aparente e a ativa, maior será a eficiência do equipamento, tendo em vista que uma maior potência será utilizada para realização de trabalho.

2.1.3 Medição de energia em máquinas ferramentas

Nas máquinas ferramentas, o consumo de energia é dinâmico. Para isso é necessário equipamentos com uma alta resolução de medição, tendo em vista os picos energia que podem ocorrer por conta de processos de aceleração e desaceleração de motores, por exemplo. Outra questão é que a comunicação deve estar relacionada com a resolução da amostragem, por conta volume de dados à serem captados em tempo real (PELEGRINO, 2018).

Li (2015) apresenta alguns cuidados na elaboração de modelos para medição de energia e monitoramento de máquinas ferramentas, que são a observação da resolução de saída do instrumento de medição, possibilidade de avaliação posterior de dados referentes às potências ativa, reativa, aparente e fator de potência, considerando que o equipamento possa armazenar dados, a resolução de amostragem dos dados deve apresentar compatibilidade com a interface de comunicação, capacidade de processamento de grande volume de dados e o sistema precisa ser portátil e de fácil instalação.

2.2 PROCESSOS DE USINAGEM

A usinagem consiste em um processo de alta complexidade e tem como objetivo a produção de peças e componentes por meio de remoção progressiva de material sob a forma de cavaco (MACHADO *et al.*, 2015). Esse excesso de material e formado através de forças cisalhantes exercidas por uma ferramenta no material da peça, após pelos mecanismos de deformação elástica e plástica (SHAW, 1984).

Chiaverini (1986) classifica as operações de usinagem em aplanainamento, furação, mandrilamento, fresamento, serramento, brochamento, roscamento, retificação e torneamento. Todos esses associados à remoção de material para conferir um perfil dimensional e geométrico.

No processo de usinagem por torneamento, temos um material em bruto fixado ao eixo rotativo da máquina que executa o trabalho relacionado à remoção de material, ao mesmo tempo em que uma ferramenta de corte retira perifericamente material, de modo a transformar em uma peça definida (CHIAVERINI, 1986).

Machado *et al.*(2015) afirma que o intuito é a obtenção de uma superfície conforme os padrões estabelecidos pelas funcionalidades de cada componente em um conjunto mecânico, e para isso é necessário o ajuste de grandezas capazes de conferir essas características, que são os parâmetros de usinagem.

2.3 PARÂMETROS DE USINAGEM

Os parâmetros de usinagem são aspectos que afetam as características de peças usinadas em máquinas de tornear fazendo uso de equipamentos convencionais ou CNC (BHUSHAN, 2013). A eficiência dos processos de usinagem está relacionada com a associação dos parâmetros de corte com os erros que a máquina de ferramenta confere aos componentes (LIU *et al.*, 2017).

Nas máquinas ferramentas, Bhushan (2013) define que os parâmetros de processo podem ser relacionados à ferramenta de corte (material da ferramenta, geometria da ferramenta, material de cobertura, classe e condição do inserto) e a usinagem propriamente dita (velocidade de corte e avanço, profundidade de corte e raio de ponta).

Essas grandezas são fundamentais para o estudo da usinagem, tendo em vista a interação desses parâmetros com a remoção de material, perfil de ferramenta e material a ser usinado, considerando aspectos microestruturais (FERRARESI, 1970).

2.3.1 Força de Usinagem

Nos processos de usinagem, para que a remoção de material possa acontecer é importante que haja o entendimento nas forças de corte empregadas no processo, pois isso possibilita estimar a potência necessária para a retirada de material, as cargas atuantes em cada elemento da máquina-ferramenta, ainda proporcionando um controle do desgaste das ferramentas de corte, causando impacto em questões econômicas do processo (MACHADO *et al.* 2015).

A força de usinagem se relaciona com as cargas em contato direto com cunha de corte. Esta componente (F_u), estão definidas por meio das componentes: Velocidade de corte (V_c), Velocidade efetiva de corte (V_e), Velocidade de avanço (V_a), Força de corte (F_c), Força de avanço (F_a), força passiva (F_p), força de apoio (F_{ap}) e força ativa (F_t) conforme mostrado na figura 5 (FERRARESI, 1970).

Figura 5: Componentes da força de usinagem no processo de torneamento



Fonte: Adaptado de Diniz et al. (2014)

Como parâmetro fundamental temos a velocidade de corte, que segundo MACHADO *et al.* (2015) se trata da velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, orientado pela direção e o sentido do corte. A velocidade de corte (Vc) é calculada através da equação 4:

$$V_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \ [m/min] \tag{4}$$

Onde: d é o diâmetro da peça (mm) em processos de torneamento e n é o número de rotações por minuto.

A velocidade de avanço (V_a) trata-se da velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, orientado pela direção e o sentido de avanço. É calculada conforme equação 5.

$$V_a = f \times n \ [mm/volta] \tag{5}$$

Onde: f é o avanço em mm/volta e n é o número de rotações por minuto.

A velocidade efetiva de corte (V_{ef}) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo de corte. É calculada pela soma vetorial da velocidade de corte e avanço conforme descrito na figura 1.

A força de corte, segundo Machado *et al.* (2015), trata-se de uma projeção dada pela velocidade de corte, na direção de corte, da força de usinagem sobre o plano de trabalho. É composta pela força principal de corte (F_c), pela força de avanço (F_a) e pela força passiva ou força de profundidade (F_p).

Utilizando o sistema de referência dos eixos e considerando que F_t e F_p estão perpendiculares, a força de corte pode ser definida conforme a equação 6.

$$F_{u} = \sqrt{F_{t}^{2} + F_{p}^{2}} \left[N \right]$$
(6)

Podemos ainda, considerar que a força ativa Ft pode ser dividida nas componentes F_c e F_a conforme equação 7.

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_a^2} [N] \tag{7}$$

Diante disso, podemos escrever a força de corte em função das suas três componentes conforme equação 8.

$$F_{u} = \sqrt{F_{c}^{2} + F_{a}^{2} + F_{p}^{2}} [N]$$
(8)

Existem ainda fatores que afetam diretamente a força de corte, que são: o material da peça e da ferramenta, área da seção de corte, velocidade de corte, condições de arrefecimento e desgaste da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015). O conhecimento e o entendimento de como essas variáveis afetam as forças de usinagem, fará com que se obtenha parâmetros necessários para uma melhor usinagem (AMORIM, 2002).

2.3.2 Potência de Usinagem

Ferraresi (1970) define que a potência de usinagem trata-se da carga necessária para proporcionar a segregação do material a uma dada velocidade. É estruturada pelas componentes Potencia de Corte, Potencia de Avanço, Potencia efetiva de corte.

A potência de corte P_c corresponde ao produto da força de corte P_c com a velocidade de corte V_c conforme descrito na equação 9.

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{60 \times 75} \quad [CV] \tag{9}$$

A potência de avanço P_a corresponde ao produto da força de avanço F_a com a velocidade de avanço V_a conforme descrito na equação 10.

$$P_a = \frac{F_a \times v_a}{1000 \times 60 \times 75} [CV] \tag{10}$$

A potência efetiva de corte P_e corresponde à soma das potências de corte e avanço conforme equação 11.

$$P_e = P_c + P_a \tag{11}$$

Considerando a força efetiva de corte F_e e a velocidade efetiva de corte V_e potência efetiva de corte P_e pode ser calculada conforme equação 12.

$$P_e = \frac{F_e \times v_e}{60 \times 75} \quad [CV] \tag{12}$$

Como a potência de corte P_c é dada em CV e a força de corte e dada em kgf, podemos reescrever a equação considerando a força de corte em Newton conforme equação 13.

$$P_c \simeq \frac{F_c \times v_c}{60 \times 75 \times 10} \quad [CV] \tag{13}$$

Podemos reestruturar a potência de corte P_c considerando o coeficiente de rendimento da máquina conforme mostrado na equação 14 .

$$P_{c} \simeq \frac{\left(\frac{F_{c} \times v_{c}}{60 \times 75 \times 10}\right)}{\eta} \quad [CV]$$
⁽¹⁴⁾

Passando a potência de cavalo-vapor para quilowatts e sabendo que η é o coeficiente de eficiência da máquina, tem-se a Equação 15:

$$P_{c} \simeq \frac{\left(\frac{F_{c} \times v_{c} \times 0,735}{60 \times 75 \times 10}\right)}{\eta} [kW]$$
⁽¹⁵⁾

Ajustando a equação 15 teremos a 16:

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{60 \times 10^3 \times \eta} [N]$$
⁽¹⁶⁾

Nos processos de torneamento, pode-se calcular a força de corte através da equação 17 (FERRARESI, 1970), que considera a um coeficiente de força específica de corte denominado k_c dado em MPa conforme tabelado de acordo com o material e o avanço, o avanço por volta f, e a profundidade de corte dada por a_p .

$$F_c = k_c \times f \times a_p \quad [N] \tag{17}$$

Partindo disso, podemos caracterizar a potência de corte por meio da equação 14, substituindo-a na equação e obtendo a equação 18.

$$P_{c} \simeq \frac{k_{c} \times f \times a_{p} \times v_{c}}{60 \times 10^{3} \times \eta} [kW]$$
⁽¹⁸⁾

A força de corte pode ser determinada indiretamente, através da medição da potência elétrica ou das grandezas elétricas que possibilitem a determinação dessa potência. Essa é uma forma de reduzir variabilidade dos resultados obtidos segundo Reis *et al.* (2019). A equação 19 mostra as grandezas envolvidas no cálculo da força de corte.

$$F_{c} = \frac{60 \times I \times V \sqrt{3} \times \cos(\varphi) \times \eta}{V_{c}} [N]$$
⁽¹⁹⁾

Onde, F_c é a força de corte, I é a corrente consumida, V é a tensão de alimentação do equipamento, $\cos(\varphi)$ é o fator de potência, η é a eficiência do equipamento e o V_c é a velocidade de corte.

Por fim, Ferraresi (1970) afirma que em máquinas que apresentam um único motor a potência desde pode ser definida conforme a equação 20, considerando η .o rendimento da máquina.

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} [kW]$$
⁽²⁰⁾

2.3.3 Energia Específica de Corte

A energia específica de corte é uma característica relacionada ao processo de avaliação do consumo eficiente de energia em máquinas-ferramentas.

A Energia Específica de Corte pode ser calculada conforme descrito na equação 21.

$$u = \frac{P_c}{h \times b \times V_c} = \frac{F_c \times V_c}{h \times b \times V_c} = \frac{F_c}{h \times b} \left[J/mm^3 \right]$$
(21)

Onde, u é a energia específica de corte, b é a largura de corte e h é a espessura de corte, ambos em mm. A energia específica de corte pode ser definida por uma razão que relaciona a potência específica de corte e a taxa de remoção de material.

A espessura e a largura de corte são calculadas por meio das equações 22 e 23.

$$h = f \times sen(\chi_r) \ [mm] \tag{22}$$

$$b = \frac{a_p}{sen(\chi_r)} \quad [mm] \tag{23}$$

Onde o χ_r é o ângulo de direção do gume da ferramenta e o a_p é a profundidade de corte em mm. No torneamento cilíndrico a profundidade de corte é calculada através da equação 24.

$$a_p = \frac{(d-D)}{2} \ [mm] \tag{24}$$

2.4 USINABILIDADE DE MATERIAIS

Segundo Amorim (2002) "usinabilidade" é um termo característico dos estudos que envolvem os processos de usinagem, e está relacionado com as variáveis relacionadas a

remoção de material, material da peça e da ferramenta, e se apresenta com uma complexidade significativa, tendo em vista a quantidade de literaturas que abordam a questão.

Ferraresi (1970) define usinabilidade como sendo uma "grandeza que relaciona um conjunto de propriedades de usinagem de um determinado material em relação a outro, que é utilizado como padrão".

Já Mills e Redford (1983) citado por Amorim (2002, p. 37) afirma que a usinabilidade de um material trata-se de uma propriedade que caracteriza a facilidade ou dificuldade quando submetido a um processo de corte. A figura 6 mostra os principais fatores que influenciam na usinabilidade dos metais.



Figura 6: Fatores que influem na determinação da usinabilidade dos metais

Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970)

Baptista (2002) afirma que para avaliação da usinabilidade, são utilizados, geralmente, quatro critérios, podendo ser utilizados de maneira isolada ou em conjunto, que são a vida da ferramenta, força de usinagem, formação de cavacos (morfologia e tamanho) e qualidade superficial da peça.

2.4.1 Rugosidade Superficial

De acordo com a ABNT NBR ISO 4287, a rugosidade são erros microgeométricos associados a um conjunto de irregularidades, caracterizadas como pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície (ABNT, 2002).

Silva Neto (2018) afirma que a importância da rugosidade no desempenho dos componentes mecânicos está associada à qualidade do deslizamento, resistência ao desgaste, possibilidade de ajuste para acoplamentos do tipo forçado, resistência oferecida pela

superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, qualidade na aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, resistência à corrosão e fadiga, vedação e aparência.

Fatores associados à deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais, e em algumas situações, reações químicas geram impacto na condição final de uma superfície usinada (MACHADO *et al.*, 2015).

2.4.1.1 Avaliação da Rugosidade

Para avaliar a rugosidade, o rugosímetro, que é o aparelho utilização para medição da rugosidade, utiliza critérios para tal procedimento. A norma ISO recomenda que os rugosímetros meçam cinco comprimentos de amostragem (l_m) , e indiquem o seu valor médio em que o comprimento de percurso de medição é o lm, o comprimento total de medição é o l_t , o comprimento total de medição, o comprimento para atingir a velocidade de medição é o l_v , e o comprimento para parado do apalpador é o ln. A figura 7 mostra um esquema para avaliação da rugosidade (SILVA NETO, 2018).





Fonte: Adaptado de Silva Neto (2018)

Para avaliação das rugosidades das superfícies, são utilizados parâmetros baseados na ABNT NBR 6405, sendo o mais utilizado na indústria o parâmetro de rugosidade média (R_a), pois pode ser utilizado tanto quando for necessário para o controle contínuo da rugosidade (ABNT, 1988).

2.5 ESTADO DA ARTE

Camposeco-Negrete (2015) apresentou um estudo que relaciona o consumo de energia com a otimização dos parâmetros de corte em uma liga de alumínio AISI 6061 T6, considerando o processo de desbaste. A parte experimental foi realizada em um torno SL 10 da HAAS. Com a otimização dos parâmetros, o consumo de energia reduziu em 14,41% e a rugosidade superficial 360,47%.

Um outro estudo desenvolvido por Warsi *et al.* (2015) também analisou o consumo de energia na usinagem, também em uma liga 6061T6 de alumínio, contudo foram utilizados valores mais altos dos parâmetros velocidade de corte e avanço por rotação. Os resultados foram refinados por meio de Análise de Variância (*ANOVA*) e através de gráficos de contorno (*Contour Plots*) foram observadas regiões de menor consumo de energia, aonde serviram de base para experimentos posteriores.

Dambhare *et al.* (2015) investigaram a relação entre sustentabilidade e o processo de usinagem por torneamento, através de parâmetros velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade de corte considerando a taxa de remoção de material, rugosidade superficial e energia consumida.

Foi realizada análise de variância *(ANOVA)*, metodologia de superfície de resposta (RSM) e método Taguchi para avaliar quais fatores impactam na resposta. Os experimentos foram realizados utilizando o Aço AISI 1040 com três tipos de ferramentas, cerâmicas soldadas, insertos com revestimento de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de alumínio-titânio (TiAIN).em torno CNC na operação de torneamento cilíndrico (DAMBHARE *et al.*, 2015).

Foi concluído que existe uma influência do arrefecimento e do tipo de ferramenta no acabamento superficial, e que a taxa de remoção de material sofre influência dos parâmetros de corte (Velocidade de corte, avanço e profundidade) e do tipo de ferramenta. Já a potência necessária para a usinagem depende do arrefecimento, do tipo de ferramenta e dos parâmetros velocidade e profundidade de corte (DAMBHARE *et al.*, 2015).

Em 2016 foi publicado um estudo sobre regras que podem auxiliar na escolha de parâmetros de corte que tem como objetivo minimizar o consumo de energia, no caso a energia específica de corte. Na pesquisa, são estruturadas sete regras que se possibilitaram a escolha dos parâmetros de corte ideais para um mínimo consumo de energia. Em seguida, os parâmetros obtidos foram aplicados no torneamento externo de aço ao carbono em dois equipamentos, um CK6153i e CK6136i, ambos de fabricantes da Chineses. O estudo conclui que as orientações quanto a decisão dos parâmetros de corte para um modelo de Energia Específica de Corte pode ser obtido por meio de manuais técnicos de usinagem (ZHONG *et al.*, 2016).

Camposeco-Negrete *et al.* (2016) apresentaram uma nova pesquisa experimental com o intuito de reduzir a quantidade de energia consumida por dois centros de torneamento, o SL10 e o CTX 410, modelos da HAAS e GILDEMEISTER respectivamente, durante o processo de remoção de material, considerando os parâmetros de corte no torneamento de um aço AISI com baixo teor de carbono, o 1018. Para otimização do consumo de energia, foi utilizado o método *Robust Design*, de Taguchi, para identificar os efeitos dos parâmetros de corte na energia consumida. A pesquisa mostrou que uma determinada combinação para os parâmetros velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte podem levar um consumo mínimo de energia (CAMPOSECO-NEGRETE *et al.*, 2016).

Também em 2016, Bilga *et al.* (2016) publicaram uma pesquisa relacionada ao consumo de energia com os parâmetros de corte em um processo de torneamento. Além dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, Bilga incorpora o raio de ponta no estudo como variável de entrada. O estudo visa avaliar a eficiência energética, energia ativa consumida pela máquina e o fator de potência. A análise experimental foi realizada em um torno Stallion 100 HS (HMT), considerando a operação de desbaste em um aço EN 353. O método Taguchi é utilizado para otimização e a *ANOVA* para verificação do impacto desses parâmetros na dinâmica do corte (BILGA *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos no estudo foram que a profundidade de corte é um parâmetro que determina o Fator de Potência e a Eficiência Energética e que com a otimização realizada foi alcançado uma melhora de 61,776%, 57,025% e 7,29% para a Eficiência Energética, Energia Ativa Consumida pela Máquina e o Fator de Potência respectivamente (BILGA *et al.*, 2016).

Lv *et al.* (2016) realizaram estudo experimental através da investigação de características do consumo de energia em máquinas de usinagem CNC, utilizando quatro tornos, duas fresadoras e um centro de usinagem para verificação do deslocamento em vazio, e remoção de material, utilizando aço 1045.

Os resultados mostram que o consumo de energia de movimentos em vazio e o fresamento variam de conforme as máquinas-ferramentas, enquanto o consumo de energia de torneamento não varia conforme ocorre a mudança das máquinas-ferramentas (LV *et al.*, 2016).

Zhao *et al.* (2016) apresentam um estudo que envolve as características em métodos de avaliação da energia de consumo em processos de usinagem por torneamento. Três modelos, um considerando a Energia Específica de Corte, o segundo a predição de parâmetros por meio de um modelo empírico e o terceiro utilizando redes neurais tipo Retro-Propagação (BP), são utilizados para determinação de parâmetros de corte, e por meio de um experimento empírico os resultados são comparados para validação dos resultados.

Os três métodos adotados apresentam valores superiores a 96% de precisão, quando comparados com o ensaio prático (ZHAO *et al.*, 2016).
Anand *et al.* (2016) elaboraram uma pesquisa relacionada ao consumo de energia envolvendo processos de usinagem, considerando também operações de torneamento e parâmetros de corte, de maneira à otimizá-los. Os experimentos foram realizados considerando três tipos de materiais: Aço com baixa resistência mecânica, alumínio e, posteriormente, latão. Os parâmetros analisados em software e otimizados mostraram uma redução do consumo de energia e, consequentemente, nas emissões de carbono.

Meng *et al.* (2016) desenvolveram um novo modelo baseado em dados empíricos para estimar o consumo de energia em processos de usinagem, comparando com modelos já existentes. Para os experimentos, são utilizados barras circulares de aço 1045, com diâmetro de 50 mm e 380 mm de comprimento em um torno CNC e ferramentas de metal duro. Para a medição do consumo de energia é utilizado um sensor de energia com uma interface RS 485, junto ao software LabVIEW.

Zhang *et al.* (2017) desenvolveram uma pesquisa envolvendo aços de baixo carbono nos processos de fabricação tendo como objetivo a redução do consumo de recursos e emissões de carbono através de um modelo de otimizado e integrado dos parâmetros de corte associado a cronogramas referentes aos tempos de conclusão dos processos de fabricação.

Contudo, devido à limitações e condições do experimento, não houve condições de realizar todas as medições que caracterizam a quantidade de carbono e outras experiências deverão ser realizadas para obtenção de melhores resultados (ZHANG *et al.*, 2017).

Kumar *et al.* (2017) desenvolveram uma pesquisa que utiliza técnicas de multicritério para tomada de decisões, com o intuito de melhorar o consumo de energia no torneamento. O estudo é centrado em verificar a influência dos parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta em respostas de consumo do equipamento (Eficiência do equipamento, de material, potência e energia ativa consumida pelo equipamento de usinagem e fator de potência) na rugosidade superficial e na taxa de remoção de material.

A parte experimental foi realizada em um torno CNC Stallion 100 HS (HMT) na operação desbaste. Por meio das técnicas de multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*), *Entropy Weight* e *TOPSIS* (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) e otimização realizada por meio do Método Taguchi e Análise de Variância (*ANOVA*) houve uma melhora expressiva nos parâmetros de corte em comparação com os que são utilizados comumente no torneamento (KUMAR *et al.* (2017).

No estudo de He *et al.* (2017) predomina uma articulação entre aspectos econômicos e ambientais na usinagem. Nele, são verificados a relação entre a velocidade de corte, avanço

por rotação, profundidade radial e axial de corte, e o consumo de energia, força de corte e tempo de usinagem. A parte experimental foi realizada em um torno CNC CK6153i e um centro de usinagem CNC XHK-714F em aço ao carbono C45E4. Através da otimização realizada por meio de algoritmos evolucionários, considerando as Fronteiras de Pareto ideais, pode-se chegar a combinações adequadas para os parâmetros de usinagem para um consumo eficiente de energia.

Sangwan e Kant (2017) trazem um estudo que relacionam os parâmetros avanço por rotação, profundidade axial e radial de corte com o consumo de energia no torneamento de um aço AISI 1045. A pesquisa utiliza a metodologia de superfície de resposta e Algoritmos Genéticos para predizer o consumo de energia.

Através do Método Taguchi e a validação por *ANOVA* pode-se observar que a profundidade de corte é o parâmetro que tem maior influência no consumo de energia, seguido pela velocidade de corte e o avanço (SANGWAN e KANT, 2017).

A pesquisa de Bagaber e Yussoff (2017) mostra a otimização dos parâmetros velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte para um menor consumo de energia por meio da metodologia de superfície de resposta e análise de parâmetros de desejáveis no torneamento de um aço inoxidável AISI 316. A parte experimental foi feita em um torno CNC modelo ROM 240 e foram avaliados a energia de corte, a rugosidade superfícial e o desgaste de ferramenta.

O artigo conclui que a metodologia utilizada se mostra efetiva para processo de usinagem, pois proporcionou um consumo mínimo de energia de 14,94%, a redução da rugosidade em 4,71% e o desgaste de ferramenta em 13,98% (BAGABER e YUSSOFF, 2017).

Liu *et al.* (2017) propõem um método para determinação de parâmetros de corte em equipamentos CNC, considerando precisão de usinagem. Utilizando testes volumétricos como métodos de controle de precisão de máquinas ferramentas, parâmetros de corte são definidos, e verificados em um estudo de caso de usinagem de um componente de aeronaves em uma liga de alumínio AL6061-T6 em um centro de usinagem.

Xiao *et al.*(2017) investigaram a relação dos parâmetros de corte por meio da potência de usinagem e da eficiência energética, também em processos de usinagem por torneamento CNC. É realizado uma comparação com dados práticos para verificar o impacto da SEC (*Specific Energy Consumed*) na energia consumida, considerando uma análise de superfície em recurso 3D.

Já Zhang *et al.* (2018) desenvolveram um estudo com objetivo de relacionar os fatores energia, ruido e custo em processos de torneamento através da otimização de parâmetros de corte. São considerados como parâmetros de entrada a velocidade de corte, o avanço por rotação e profundidade radial de corte. Inicialmente é realizado um experimento ortogonal através da metodologia de superfície de resposta, em seguida é feita uma análise de variância para determinar a influência dos parâmetros no nível de ruído e posteriormente, a otimização dos parâmetros é feita por NSGA-II.

Cui e Guo (2018) propõem a identificação dos parâmetros de corte ideais em um processo de torneamento intermitente em um aço AISI 1045, considerando a análise da energia específica de corte, o desgaste de ferramenta e a rugosidade superficial. Os resultados mostraram que a energia específica de corte aumenta a medida que ocorre o desgaste da ferramenta e que a faixa de 0,2 a 0,25 mm/volta para o avanço e 110 a 125 m/min para a velocidade de corte sinaliza uma vida útil significativa da ferramenta de corte e um baixo consumo de energia, mantendo a qualidade da rugosidade superficial.

Um estudo muito similar é o de Xie *et al.* (2018), que também busca por parâmetros de corte ideais para um menor consumo de energia. As diferenças estão na operação, que trata-se da de acabamento, nos parâmetros de entrada, que além da velocidade de corte e avanço por rotação, considera-se a profundidade radial de corte.

A pesquisa avalia a energia específica de corte, a rugosidade superficial, o desgaste de ferramenta e eficiência do equipamento através da construção de um modelo que verifica as melhores possibilidades, por meio de Algoritmos Genéticos (NSGA-III). Os resultados mostram uma redução da rugosidade, da energia de corte e melhoria da eficiência do equipamento (XIE *et al.*, 2018).

Em 2018, Bagaber e Yusoff publicaram dois novos estudos considerando a usinagem por torneamento no aço inoxidável AISI 316 em um equipamento ROMI. Nos dois estudos, são considerados como parâmetros de entrada a velocidade de corte, o avanço por rotação e profundidade radial de corte. A diferença consta nos parâmetros de avaliação.

No primeiro estudo são avaliados a energia de corte e a rugosidade superficial, e o método de otimização utilizado é a metodologia de superfície de resposta (BAGABER e YUSOFF, 2018a). No segundo, são avaliados a energia total e o custo da usinagem, e a otimização é feita através de Algoritmos Genéticos (NSGA-II) (BAGABER e YUSOFF, 2018b).

Warsi *et al.* publicaram duas novas pesquisas no ano de 2018. Nos dois estudos são desenvolvidos "mapas" de consumo de energia para determinação de um menor consumo na

operação de torneamento de uma liga de alumínio AISI 6061 T6. Nos dois estudos, são considerados como parâmetros de entrada a velocidade de corte, o avanço por rotação e profundidade radial de corte, e a parte experimental é realizada em um torno CNC ML-300 CNC, YIDA.

A diferença entre os dois estudos encontra-se na abordagem, pois uma considera apenas o consumo na máquina-ferramenta (WARSI *et al.*, 2018a) e a outra admite a interação entra e peça e a máquina-ferramenta (WARSI *et al.* 2018b).

Já Chen *et al.* (2018) propõem uma pesquisa também buscando a otimização de parâmetros de corte, tendo como objetivo maximizar a eficiência energética em usinagem em processos de fresamento. Inicialmente, é proposto um modelo de consumo de energia para as operações de fresamento, para posteriormente ser comparado com o modelo já existente.

Com a pesquisa, concluiu que os parâmetros de corte ideais do processo de fresamento variam com os limites de energia, considerando a energia dos materiais auxiliares ou não e que os esquemas ideais de parâmetros de corte para máxima eficiência de usinagem não garantem a máxima eficiência energética para todos os objetivos propostos (CHEN *et al.*, 2018).

Ic *et al.* (2018) apresentam uma pesquisa experimental com o objetivo de otimizar parâmetros de usinagem através de torneamento de ligas de alumínio, considerando a redução de emissão de carbono e a qualidade superficial considerando a metodologia de superfície de resposta (RSM).

As métricas da pesquisa estão relacionadas com parâmetros de corte, onde foram vistos a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, ferramentas de usinagem, e critérios de desempenho, como as taxas de emissão de carbono, energia consumida e rugosidade (IC *et al.*, 2018).

Como conclusão da pesquisa, a profundidade do corte entre outros parâmetros, tem o efeito mais significativo na rugosidade da superfície O material da peça de trabalho com menor a dureza resultou em melhor qualidade da superfície. No entanto, o aumento da profundidade de corte aumentou a emissão de carbono enquanto o aumento da velocidade de corte diminuiu a emissão de carbono. Por outro lado, o aumento do desgaste da ferramenta observado na análise microestrutural devido ao aumento da profundidade de corte levou a diminuir a qualidade da superfície (IC *et al.*,2018).

Hu *et al.* (2018) desenvolveram um modelo de consumo de energia em usinagem, considerando e integrando dois aspectos do consumo de energia: A energia consumida na rotação do eixo, e a energia consumida em vazio. A parte experimental é realizada com cinco

peças de aço com teor de carbono de 0,45%, com diferentes comprimentos em um torno CNC. Os resultados mostraram que existe uma relação no comprimento do modelo com a energia consumida pelo equipamento.

Zhou *et al.* (2019) propõem um método para otimização de parâmetros de corte, considerando as emissões de carbono geradas, o tempo e o custo de usinagem com o intuito de buscar um equilíbrio entre esses índices. Através de modelos multicritério NSGA-II e NG-NSGA-II são obtidos os parâmetros ideais e a parte experimental é realizada em um torno CNC FTC20 em um aço 38CrMoAl.

A pesquisa conclui que o modelo adotado para o balanceamento das emissões de carbono, tempo e custo de usinagem através dos parâmetros de usinagem proporciona resultados razoáveis e que a questão será abordada em seus estudos futuros.

Um estudo de caso apresentado por Camposeco-Negrete e De Dios Calderón-Nájera (2019) tem como objetivo a otimização de parâmetros de corte para um menor consumo de energia. Diferente dos estudos anteriores, este foi realizado considerando o aço AISI 1045 em um torno SL 10 da HAAS. Através da metodologia de superfície de resposta e análise de parâmetros desejáveis houve uma economia de energia de 4,13% do equipamento, para os valores de avanço por rotação de 0,18 mm/volta, profundidade de 2,22 mm e velocidade de corte de 366 m/min, houve também uma redução de 15,69% de energia específica de corte, diminuição de 26,36% da rugosidade e um aumento da taxa de remoção de material de 3,6%.

Os estudos relacionados mostram que os parâmetros de corte tem impacto significativo no desempenho da usinagem, como também na energia consumida nos processos de fabricação por corte. Além do desempenho, no quesito produtividade e qualidade outras métricas são verificadas, tais como taxa de remoção de material, energia específica de corte, grandezas elétricas associadas ao corte, tempos de processo de usinagem, níveis de ruído e taxas de emissão de carbono, sinalizando a busca por uma usinagem cada vez mais sustentável.

2.6 PESQUISAS RELACIONADAS

A tabela 1 mostra os artigos e trabalhos que estruturam o estado da arte, considerando as métricas estabelecidas para a comparação.

Tabela 1: Artigos e Pesquisas Relevantes

| Autor Artigos e Pesquisas | Equipamento | Operação | Material utilizado | Equip. (Mod./ Fabricante) | Parâmetros de Entrada | Avaliação | Método |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Camposeco -Negrete (2015) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | AISI 6061 T6 | SL 10, HAAS | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia específica de corte e rugosidade superficial. | Metodologia de Superfície de Resposta, <i>ANOVA</i> e experimental |
| Warsi <i>et al.</i> (2015) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Tubo de alumínio AISI 6061 T6 | Não informado | V _c [m/min], f[mm/volta], | Energia específica de corte. | ANOVA, gráficos de contorno (<i>Contour plots</i>) e experimental |
| Dambhare et al.(2015) | Torno convencional | Torneamento cilíndrico | Aço AISI 1040 e diferentes insertos | Não informado | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia consumida, rugosidade superficial. | Metodologia de Superfície de Resposta, <i>ANOVA</i> e experimental |
| Zhong <i>et</i> <i>al.</i> (2016) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço ao carbono | CK6153i e CK6136i, Jinan First Machine Tool Group CO. LTD | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia específica de corte. | Empírico |
| Camposeco -Negrete <i>et</i> <i>al.</i> (2016) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço AISI 1018 | - | $\begin{array}{l} V_{c} \ [m/min], \\ f[mm/volta], \\ a_{p} \ [mm] \ e \\ raio \ de \\ ponta \end{array}$ | Energia total. | Análise de efeitos, <i>Robust</i> <i>design</i> (Taguchi) e experimental. |
| Bilga <i>et al.</i> (2016) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | EN 353 | Stallion 100 HS (HMT) | V_c [m/min], f[mm/volta], a_p [mm]. e raio de ponta. | Eficiência energética, energia ativa consumida pelo equipamento e fator de potência | ANOVA, TAGUCHI e experimental |
| Lv <i>et al.</i> (2016) | Tornos e Centros de Usinagem | Torneamento cilíndrico e fresamento frontal | Aço 1045 | CK6153i, CK6136i, CAK6150 Di e CY-K500 (Tornos); JTVM6540 XK715B (Centros de Usinagem) XHK-714F (Centro de usinagem vertical) | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Taxa de remoção de material, energia de consumo | Empírico |
| Zhao <i>et al.</i> (2016) | Centro de torneamento | Torneamento externo (Semi- acabamento) | Aço #45 | NL2500M C/ 700 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia específica de corte; Precisão nos | Redes neurais e experimental |

| Autor Artigos e Pesquisas | Equipamento | Operação | Material utilizado | Equip. (Mod./ Fabricante) | Parâmetros de Entrada | Avaliação | Método |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | parâmetros de corte. | |
| Anand <i>et</i> <i>al.</i> (2016) | Torno convencional | Torneamento cilíndrico | Aço, alumínio e latão. | Não informado | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia de consumo e redução de carbono | RSM (<i>Design</i> <i>Expert</i>) e experimental |
| Meng <i>et al.</i> (2016) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço 1045 | HNC-21T | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia consumida | RSM (<i>Design</i> <i>Expert</i>) e experimental |
| Zhang <i>et al.</i> (2017) | Torno CNC e centro de usinagem | Torneamento cilíndrico com rasgos de chaveta | Aço 1045 | Não informado | $ \begin{array}{l} V_c \ [m/min], \\ f[mm/volta], \\ (torno), \\ V_a \ e \ n \\ (fresamento) \end{array} $ | Redução de insumos e emissões de carbono | Algoritmo multicritério |
| Kumar <i>et</i> <i>al.</i> (2017) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço-liga EN 353 | Stallion 100 HS (HMT) | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. e raio de ponta. | Rugosidade superficial, taxa de remoção de material, eficiência do equipamento, de material, potência e energia ativa consumida pelo equipamento de usinagem e fator de potência. | Simulação computacional (AHP, TOPSIS), TAGUCHI e experimental. |
| He <i>et al.</i> (2017) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço ao carbono C45 | - | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia total, tempo de usinagem e força de corte. | Algoritmos genéticos e Fronteiras de Pareto. |
| Sangwan e Kant (2017) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço AISI 1045 | Não informado | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Potencia de corte. | Metodologia de Superfície de Resposta, algoritmos genéticos e experimental. |
| Bagaber e Yusoff (2017) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço inoxidável AISI 316 | ROM 240 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia de corte, rugosidade superficial e desgaste de ferramenta. | Metodologia de Superfície de Resposta, Parâmetros desejáveis e experimental |
| Liu <i>et al.</i> (2017) | Centro de usinagem | Fresamento frontal | AL6061- T6 | Não informado | V _c [m/min], V _a [mm/min] a _p [mm]. | Energia de consumo | Metodologia de Superfície de Resposta e experimental |
| Xiao <i>et al.</i> (2017) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico (Simulação) | Simulação | .C2-360HK (Dados coletados) | $\begin{array}{l} V_c \ [m/min], \\ V_a[mm/min] \\ a_p \ [mm]. \\ (Simulação) \end{array}$ | Potência, energia de consumo e análise de | Regressão linear |

| Autor Artigos e Pesquisas | Equipamento | Operação | Material utilizado | Equip. Parâmetros (Mod./ de Entrada Fabricante) | | Avaliação | Método |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | , | superfície | | |
| Zhang <i>et al.</i> (2018) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Não se aplica | CAK6136 V/750, Shenyang. | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Ruído e custo. | Algoritmos Genéticos (NSGA-II) |
| Cui e Guo (2018) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço AISI 1045 | Não informado | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia consumida, rugosidade superficial e desgaste de ferramenta. | Elementos Finitos, experimental |
| Xie <i>et al.</i> (2018) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | C45E4 | CJK0640 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia específica de corte, rugosidade superficial, desgaste de ferramenta e eficiência do equipamento. | Algoritmos Genéticos (NSGA-III) e experimental |
| Babager e Yusoff (2018a) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço inoxidável AISI 316 | ROMI 240 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia de corte e rugosidade superficial. | Metodologia de Superfície de Resposta e experimental |
| Bagaber e Yusoff (2018b) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Aço inoxidável AISI 316 | ROMI C 420 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia total e custo de usinagem | Algoritmos Genéticos (NSGA-II) e experimental |
| Warsi <i>et al.</i> (2018a) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Al 6061- T6 | ML-300 CNC, YIDA | V_c [m/min], a_p [mm]. | Energia consumida. | Simulação (Mapeamento de energia) e experimental |
| Warsi <i>et al.</i> (2018b) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Al 6061- T6 | ML-300 CNC, YIDA | V _c [m/min], a _p [mm] (Axial). | Energia consumida. | Simulação (Mapeamento de energia) e experimental |
| Chen <i>et al.</i> (2018) | Fresadora CNC | Fresamento frontal | S45C | DAHE TH5656 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia de consumo | Análise Multicritério |
| Ic <i>et al</i> . (2018) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | Ligas de Alumínio (6061, 6082, e 7075) | Quantum lathe | V_c [m/min], f[mm/volta], a_p [mm]. | Emissões de carbono e rugosidade superficial | Metodologia de Superfície de Resposta, <i>ANOVA</i> e experimental |
| Hu <i>et al.</i> (2019) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico com peças de diferentes comprimento s | Aço #45 | CK6153i | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia de consumo (Energia cortante e não cortante) | Métodos Heurísticos (Simulated Annealing) |
| Zhou <i>et al.</i> (2019) | Torno CNC | Torneamento cilíndrico | 38CrMoAl | FTC20 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Emissões de carbono, tempo de corte e tempo de usinagem. | NG – NSGA-II e NSGA-II e experimental. |

| Autor Artigos e | Equipamento | Operação | Material utilizado | Equip. (Mod./ | Parâmetros de Entrada | Avaliação | Método | |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------|
| Pesquisas | | | | Fabricante) | | | | |
| Camposeco -Negrete e De Dios Calderón- Nájera (2019) | Torno CNC | Torneamento Cilíndrico | Aço AISI 1045 | HAAS SL10 | V _c [m/min], f[mm/volta], a _p [mm]. | Energia consumida e rugosidade superficial. | Metodologia Superfície Resposta experimental | de de e |

Fonte: O Autor

Através das informações do subtópico 2.5 e da síntese da tabela 1 é possível concluir que as pesquisas não são estruturadas para materiais com diferentes propriedades mecânicas, como na presente pesquisa. Já em relação as operações, não se observa uma análise que considere o consumo de energia elétrica em ciclos de usinagem para a operação de torneamento externo, como também a variação de parâmetros de corte para avaliar métricas além das relacionadas ao consumo de energia, tais como força de corte, potência de corte, energia de corte e a usinabilidade, através da rugosidade superficial, como no presente trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo abordará os procedimentos, os materiais utilizados, aços e ferramentas, além da metodologia empregada na pesquisa, detalhando a preparação metalográfica das amostras. Posteriormente, são apresentados os parâmetros a serem variados, a descrição do processo de torneamento e o método para coleta de dados referentes ao consumo de 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.

3.1 Aços Empregados

Para a realização da pesquisa foram utilizados aços ao carbono na especificação ABNT/SAE 1020 e 1045 e os aços-liga SAE 4140 e 4340 tendo em vista sua aplicabilidade em peças e componentes mecânicos. Todos os materiais possuem em mesma dimensão, com diâmetro e comprimento de 25 mm e 100 mm, respectivamente, sendo realizados 15 testes em cada material.

Os materiais utilizados foram trabalhados na condição de "Conforme Recebido" e sua composição química encontra-se descrita nos certificados de qualidade de número 6308483/2019 e 6242773/2019 e obedecem a as normas ISO 9001, 14001 e OHSAS 18001 segundo o fornecedor ArcelorMittal. Os valores estão mostrados na tabela 2.

| Aço | С | Mn | Si | Р | S | Cu | Cr | Ni | Sn | Мо |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| 1020 | 0,20 | 0,53 | 0,144 | 0,012 | 0,012 | 0,15 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,010 |
| 1045 | 0,44 | 0,65 | 0,185 | 0,015 | 0,005 | 0,17 | 0,07 | 0,04 | 0,01 | 0,014 |
| 4140 | 0,41 | 0,81 | 0,24 | 0,020 | 0,026 | 0,17 | 0,94 | 0,12 | - | 0,17 |
| 4340 | 0,41 | 0,71 | 0,27 | 0,011 | 0,005 | 0,14 | 0,75 | 1,65 | - | 0,21 |

Tabela 2: Composição química dos aços (% em massa)

Fonte: O Autor

Como ferramentas de corte, serão utilizados insertos de metal duro, tendo em vista sua utilização na indústria, como também sua resistência mecânica e o desgaste. O inserto utilizado é o TNMG 160408, com quebra-cavaco tipo MA e o suporte é o MTJNL 2020K16N, ambos do fabricante MITSUBISHI MATERIALS.

Figura 8: Características dimensionais do inserto de corte



Fonte: Adaptado de Mitsubishi Materials (2020)

O inserto é composto de metal duro, sentido de corte N, diâmetro do círculo inscrito (IC) de 9,525 mm, espessura (S) de 4,76 mm, diâmetro de montagem (D1) de 3,81 mm, ângulo de ponta (EPSR) de 60°, cobertura tipo PVD (*Process Vapor Deposition*) de TiAlN e raio de ponta (RE) de 0,8 mm conforme mostrado na figura 8.

O suporte possui ângulo de aresta de corte (direção do gume) de 93°, ângulo de ataque de -3°, balanço máximo de 52 mm e mínimo de 32 mm, adaptada para corte à esquerda, conforme mostrado na figura 9.

Figura 9: Suporte com inserto



Fonte: Adaptado de Mitsubishi Materials (2020)

3.2 Equipamento de Usinagem

Para os processos de usinagem, será utilizado torno CNC, da marca SINITRON, modelo BNC-1840, acionado por um motor elétrico trifásico com a tensão de alimentação de 220 V. A máquina tem a capacidade de variar a rotação de 100 a 4500 ciclos.min⁻¹ e o avanço rápido nos eixos X e Z de 15 m/min, cada um, torre hidráulica tipo traseira com 8 posições de ferramenta em disco do fabricante. A Figura 10 mostra o equipamento utilizado.

Figura 10: Torno CNC SINITRON BNC-1840



Fonte: O Autor

O equipamento utiliza um comando CNC tipo FANUC OI-TD, com monitor tipo LCD de 10,4" conforme mostrado na figura 11. O equipamento utilizado para o desenvolvimento experimental dos ensaios de usinagem compõem o Laboratório de Processos Fabricação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, do *campus* Cedro.



Figura 11: Interface Homem Máquina (IHM) FANUC OI-TD

Fonte: O Autor

3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização de Materiais

O presente subtópico apresenta os métodos utilizados para medição e coleta de imagens referentes à microestrutura, valores de microdureza e acabamento superficial (Rugosidade média, R_a).

3.3.2 Metalografia

Para obtenção das imagens características para cada um dos aços estudados, é necessário procedimentos quanto à preparação das amostras que serão estudadas. Inicialmente, é realizado o corte do material através de uma cortadora metalográfica, em seguida é realizado o embutimento à quente da amostra com baquelite, que permite uma maior firmeza e manuseio além de preservar as superfícies nos processos posteriores (COLPAERT, 2008). A figura 12 mostra exemplos da cortadora metalográfica e embutidora.



Figura 12: Cortadora metalográfica e embutidora



Posteriormente, é feito o lixamento da amostra através de equipamento motorizado seguindo uma sequência de papéis de lixa, com resfriamento e lubrificação com água. Em seguida, é realizado o polimento das amostras utilizando uma pasta de alumina em um equipamento com disco giratório com feltro na sua superfície (COLPAERT, 2008). A figura 13 mostra os equipamentos utilizados.

Figura 13: Lixadeira e politriz



Fonte: O Autor

Logo em seguida, é feito o ataque químico, que tem por objetivo mostrar a microestrutura do material ensaiado conforme a composição química do material e do reagente utilizado. Para o processo em questão, será utilizado uma solução de ácido nítrico e álcool etílico, composta de 98% de álcool etílico e 2% de ácido nítrico para o aço 1020 e 97% de álcool etílico e 3% de ácido nítrico para os aços 1045, 4140 e 4340. As amostras serão submersas nessas soluções por, aproximadamente 10 segundos, de modo que após o ataque seja possível a visualização da microestrutura e seus contornos de grão. Os resíduos do

reagente são retirados através de limpeza por meio de lavagem em água corrente, álcool e secagem com jato de ar quente (COLPAERT, 2008).

A observação e extração das imagens é realizada por meio de microscopia, utilizando os microscópios óticos a) Olympus GX 51 e b) IM100i, conforme mostrado na figura 14, com aumento de 200, 400, 500 e 1000 vezes.



Figura 14: Microscópio ótico a) Olympus b) IM100i

Fonte: O Autor

Os equipamentos utilizados para caracterização metalográfica compõem o Laboratório de Materiais (LMAT) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, do *campus* Maracanaú e o Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, do *campus* Cedro.

3.3.3 Microdureza

Segundo Callister Júnior (2016) quando se deseja considerar as propriedades mecânicas de um material é necessária a verificação da dureza, tendo em vista que se trata de uma medida de resistência mecânica de um material à deformação plástica. Por esse motivo serão realizados ensaios de microdureza nos aços submetidos a usinagem. Para realização de tais ensaios, serão utilizados os microdurômetros dos fabricantes SHIMADZU e DIGIMESS, modelos HMV-G21 e 400.310 respectivamente, que se apresentam na figura 15. Foi utilizada em ambos os instrumentos uma carga de 9,807 N e duração de 10 segundos por amostra, no qual são feitas 5 medidas a uma distância de 2 mm de uma medida para outra, para que, posteriormente, seja calculado o valor médio. Os equipamentos utilizados nos ensaios fazem parte do Laboratório de Materiais (LMAT), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* Maracanaú e do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* Cedro.



Figura 15: Microdurômetros a) SHIMADZU b) DIGIMESS



Para a caracterização inicial da microdureza dos aços foram realizadas medições do centro até borda do material conforme mostrado na figura 16.

Figura 16: Método para medições de microdureza



Fonte: O Autor.

3.3.4 Medição da Rugosidade

Para avaliação da rugosidade superficial, será realizada a medição das peças após a usinagem, utilizando o rugosímetro portátil do fabricante Digimess, modelo TR-210, utilizando um *cuttoff* de 0,8 mm, no padrão de medição de rugosidade média R_a , em μ m, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17: Medição com Rugosímetro



Fonte: O Autor

3.3.5 Operação de Usinagem no Torneamento CNC

Considerando os processos de usinagem por torneamento, serão realizados 15 testes para cada aço, utilizando as funções referentes aos ciclos longitudinal de desbaste (G71) e de acabamento (G70), para a usinagem de uma peça prova conforme figura 18.





Fonte: O Autor

A estrutura da peça prova foi definida considerando a utilização do método do comprimento usinado e a operação de torneamento cilíndrico externo e de acordo com o critério de avaliação da usinabilidade, o acabamento superficial, definido por Ferraresi (1970).

A programação referente a peça prova será realizada em comando FANUC OIT do equipamento supracitado, conforme apresentado no anexo A.1 e A.2.

3.3.6 Parâmetros de processo e materiais empregados

Os parâmetros de usinagem que serão variados são a velocidade de corte, o avanço, considerando uma faixa de valores máximos e mínimos, de acordo com o limite de facilidade de usinar do material conforme o inserto utilizado em aços 1020, 1045, 4140 e 4340. A combinação entre valores altos e baixos tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros na eficiência energética do processo de torneamento em diferentes materiais conforme mostrado na tabela 3. Por uma questão relacionada ao custo e insumos para o desenvolvimento da pesquisa, todas as usinagens realizadas utilizaram fluido de arrefecimento.

| Velocidade de corte (m/min) | Avanço de Acabamento (mm/volta) | Materiais empregados |
|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 105 | | |
| 120 | | |
| 130 | 0,12 | |
| 140 | | |
| 150 | | |
| 100 | | |
| 120 | | 1020 1045 |
| 130 | 0,20 | 4140 e 4340 |
| 140 | | |
| 150 | | |
| 105 | | |
| 120 | | |
| 130 | 0,40 | |
| 140 | | |
| 150 | | |

Tabela 3: Parâmetros de corte variados e materiais empregados

Fonte: O Autor

3.3.7 Avaliação da usinabilidade do material usinado

A usinabilidade dos materiais será avaliada de acordo com o critério baseado no acabamento superficial (FERRARESI, 1970) considerando a força de corte, a potência de corte obtida, com a velocidade de corte e com a rugosidade, sendo analisada o valor da rugosidade média das peças usinadas, correlacionado os valores das rugosidades das peças com as classes de rugosidades que podem ser obtidas segundo o processo de fabricação.

A figura 19 mostra a relação entre os valores de rugosidades obtidas segundo o processo de fabricação.



Figura 19: Parâmetros de rugosidade e Processos de fabricação

Fonte: Adaptado de Cunha e Cravenco (2007)

3.3.8 Medição do consumo de energia

Para realização da medição e coleta de dados referente as grandezas elétricas (Corrente, potência ativa e energia elétrica consumida) será utilizado um analisador de qualidade de energia conectado junto ao barramento de energização do equipamento para coleta e armazenamento dos valores obtidos conforme mostrado na figura 20.



Figura 20: Metodologia de para medição do consumo de energia

Fonte: Adaptado de Pelegrino (2018)

Para a medição do consumo de energia do equipamento na usinagem, foi utilizado um analisador de qualidade de energia, modelo VEGA78, do fabricante HT. Foram realizadas coletas referentes aos valores de potência Global e Energia durante a usinagem de cada modelo.

O equipamento realizou a coleta e armazenamento das medições dos dados considerando uma frequência de 0,5 Hz. Em seguida, os valores foram enviados ao *software TOPVIEW* para realização das análises. A figura 21 mostra analisador de qualidade pronto para realização das medições.



Figura 21: Montagem de Analisador de Qualidade de Energia

Fonte: O Autor

O equipamento utilizado para a medição, coleta e armazenamento de dados de consumo de energia utilizado nos ensaios de usinagem faz parte do instrumental que compõe o Laboratório de Eletrotécnica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* Cedro.

3.4 Avaliação dos Resultados

Os resultados serão avaliados através de gráficos que apresentam, separadamente, a relação dos parâmetros velocidade de corte e avanço por rotação com a rugosidade final obtida, tempo de usinagem, espessura de corte, força e energia de corte, comparando-as com a potência de corte e a energia elétrica consumida em cada um dos aços. Por meio destas curvas será possível analisar regiões que permitam a determinação de parâmetros de corte que garantam um consumo eficiente de energia elétrica considerando a qualidade da usinagem na operação de torneamento externo.

3.5 Fluxograma da Metodologia

A figura 22 mostra o fluxograma da metodologia de trabalho para o desenvolvimento da pesquisa.



Figura 22: Metodologia para aquisição de dados e medição do consumo de energia

Fonte: O Autor

4. **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

No presente capítulo serão vistos os resultados obtidos considerando os ensaios supracitados no capítulo anterior, as imagens obtidas por meio de ensaios metalográficos, comparação de rugosidade experimental, tempo de usinagem, profundidade de corte, espessura e largura de corte, velocidade de avanço, potência e energia elétrica consumida e potência e energia de corte em cada teste, tendo por base a análise do uso racional de energia considerando as métricas que relacionam a qualidade e parâmetros avaliados para o aço ABNT/SAE 1020 e 1045, e os aços SAE 4140 e 4340.

Todas as peças foram usinadas conforme o perfil da peça prova através dos ciclos de desbaste (G71) e acabamento (G70) conforme programação mostrada nos Anexos A.1 e A.2.

4.1. Aço ABNT/SAE 1020

No subtópico em questão apresenta-se a imagens obtidas por meio de metalografia, o valor da microdureza naVickers, e os gráficos referentes as medições de rugosidade superficial, velocidade de avanço, tempo de usinagem, a profundidade de corte, espessura e largura de corte, a potência elétrica e a energia de corte comparando com o consumo de energia elétrica, referentes aos experimentos realizados no aço 1020.

4.1.1. Micrografia e Microdureza Vickers

A figura 23 mostra as imagens obtidas por meio de preparação metalográfica tendo como objetivo caracterizar microestrutura do aço 1020.

a) b)

Figura 23: Micrografia do aço ABNT/SAE 1020. Aumento: a) 200x. b) 500x.

Fonte: O Autor

No aço ABNT 1020 é possível verificar uma matriz ferrítica que dispõe grãos do microconstituinte, a perlita (ferrita + cementita), que se apresenta de forma reticular e laminar, correspondendo a parte mais escura na imagem da figura 22. A microdureza Vickers obtida através das medições no aço foi de aproximadamente 167 HV.

4.1.2. Medições de Rugosidade

A rugosidade superficial é um parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da usinagem. Para o presente trabalho tem-se a rugosidade obtida por meio do processo de torneamento. O presente subtópico apresenta os gráficos referentes aos valores obtidos por meio da medição de rugosidade após processo de torneamento do aço ABNT/SAE 1020, combinadas com as curvas de potência de corte e energia elétrica consumida conforme a figura 24.



Figura 24: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço ABNT/SAE 1020 AÇO ABNT/SAE 1020



Os experimentos mostraram uma tendência de diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte nas faixas de avanço de 0,12 e 0,20, com variações e um aumento na faixa 0,40. O menor valor de rugosidade foi obtido na faixa de avanço de 0,20 na nos valores de 140 e 150 m/min.

Na faixa de avanço de 0,12 houve uma redução da rugosidade de 22,70%, para a de 0,20 uma redução de 39,72% e para a faixa 0,40 houve um aumento de 26,28%.

O valor de avanço de 0,40 foi um valor próximo ao que foi utilizada no trabalho de Camposeco-Negrete (2019), e nessa faixa foi obtido uma redução da rugosidade. Houve uma redução do consumo de energia no intervalo com o avanço/volta, relacionado a diminuição do tempo de usinagem, contudo esse intervalo apresentou maiores valores de rugosidade média, pois não houve variação do parâmetro profundidade de corte.

4.1.3. Velocidade de Avanço

A velocidade de avanço na usinagem do aço ABNT/SAE 1020, que foi determinada a partir da rotação do eixo árvore e do avanço por volta, apresentou um aumento significativo a medida que houve o aumento da velocidade de corte e, principalmente, do avanço. A faixa de valores da velocidade de corte com o avanço por volta de 0,40 apresentou o maior aumento da velocidade de avanço, de 16,42%.Os valores da velocidade de avanço foram expressas no gráfico em m/min para uma melhor visualização da curva conforme mostrado na figura 25.



Figura 25: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 1020 AÇO ABNT/SAE 1020

Observa-se um aumento da velocidade de avanço devido à redução do tempo de usinagem.

4.1.4. Tempo de Usinagem

O tempo de usinagem teve uma redução significativa em todas as faixas de valores atribuídos a velocidade de corte e ao avanço por volta.



Figura 26: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica do Aço ABNT/SAE 1020

Fonte: O Autor

Houve uma maior redução na faixa de valores com o aumento da velocidade de corte de 42,86% e do avanço por volta de 0,20, que foi de 77,37%.

A redução do tempo de usinagem ocorre devido o tempo ser uma razão inversa a velocidade de avanço no processo de torneamento e contribui para a redução do consumo de energia visto a redução do consumo.

4.1.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte

A profundidade de corte para todos os testes foi fixada no valor de 1 mm, por conta de questões relacionadas ao quantitativo de insertos para o desenvolvimento da pesquisa. Já o ângulo de direção do gume (χ_r) possui o valor fixo de 93° devido ao inserto e o suporte utilizado conforme a operação. Com a profundidade de corte e o ângulo de direção do gume definidos, a largura de corte foi calculada segundo a equação 23.

4.1.6. Espessura de Corte

A espessura de corte foi calculada através de equação 22 considerando o ângulo de direção do gume e a profundidade de corte, que por sua vez foi determinada a partir da equação 24. A figura 27 mostra os gráficos da espessura de corte, a potência de corte e da energia elétrica consumida no torneamento do aço 1020.



Figura 27: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço ABNT/SAE 1020

AÇO ABNT/SAE 1020

Fonte: O Autor

A espessura de corte do aço ABNT/SAE 1020 está associada a área de corte. Devido à profundidade de corte determinada ter sido constante, o aumento da espessura de corte ocorre conforme o aumento dos valores definidos para o parâmetro avanço e mantém-se contante para a velocidade de corte. Em valores percentuais e considerando o aumento das faixas de avanço, houve um aumento de 66,7% da faixa de 0,12 e 0,20, e de 100% da faixa de 0,20 e 0,40.

4.1.7. Força de Corte

A força de corte foi determinada indiretamente, através da equação 19 considerando valores das grandezas elétricas medidas com o analisador de qualidade de energia.

A força de corte está relacionada com os parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e com as características do material que está sendo usinado. A figura 28 mostra os valores da força de corte, da potência de corte e energia consumida. Por questões relacionadas a uma melhor visualização da curva a força de corte foi expressa em kN.



AÇO ABNT/SAE 1020

Fonte: O Autor

Considerando o aumento da velocidade de corte nas faixas de avanço, houve uma redução de 19,21% da força de corte na faixa com avanço por volta de 0,12, uma redução de 23,06% para a 0,20 para faixa de 0,20 e uma redução de 28,46% para a 0,40. Observa-se uma influência significativa da velocidade de corte na força de corte, visto que a velocidade de corte possui relação direta na rotação do eixo principal do equipamento.

4.1.8. Potência Elétrica

Os resultados da potência elétrica foram obtidos através das medições realizadas com o analisador de qualidade de energia. Os valores medidos são mostrados na figura 29.



Figura 29: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço ABNT/SAE 1020

A potência elétrica obtida por meio da medição apresentou variações conforme o aumento da velocidade de corte e do avanço. Considerando o intervalo dos avanços e o aumento de 42,86% da velocidade de corte, a potência elétrica obtida para os avanços por volta de 0,12, 0,20 e 0,40 tiveram aumento, nos valores percentuais de 7,26%, 9,89% e 2,21% respectivamente.

4.1.9. Energia de corte

A energia de corte das peças usinadas em aço 1020 foi calculada a partir da equação 21, através dos valores da força de corte, espessura e largura de corte. A figura 30 mostra as curvas obtidas, com a potência de corte.



Figura 30: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 1020

Fonte: O Autor

Considerando as faixas dos valores de avanço, observa-se uma redução da energia de corte. Com o aumento da velocidade de corte na faixa de 105 a 150 m/min, para o avanço de 0,12 mm/volta houve uma redução de 24,94%, com o avanço de 0,20 mm/volta a redução foi de 23,40% e para o avanço por volta de 0,40 foi de 28,36%.

O gráfico da energia de corte é apresentado na unidade de Joule por Milímetro Cúbico [J/mm³], contudo todos os valores foram divididos por 10000 para uma melhor visualização da curva.

A redução da energia de corte ocorreu devido ao aumento da velocidade de corte, que contribui diretamente com a redução da força de corte, e do avanço, que está relacionado com o aumento da espessura de corte, que por sua vez reduz a energia de corte.

4.2. Aço ABNT/SAE 1045

No presente subtópico apresenta-se a imagens obtidas por meio de metalografia, o valor da microdureza na escala Vickers, e os gráficos referentes as medições da rugosidade superficial, velocidade de avanço, tempo de usinagem, a profundidade de corte, espessura e largura de corte, a potência elétrica e a energia de corte, comparando com o consumo de energia elétrica, referentes aos experimentos realizados no aço 1045.

4.2.1. Micrografia e Microdureza Vickers

A figura 31 mostra as imagens obtidas por meio de preparação metalográfica tendo como objetivo caracterizar a microestrutura do aço 1045.



Figura 31: Micrografia do aço ABNT/SAE 1045. Aumento: a) 200x. b) 500x.

Fonte: O Autor

A fotomicrografia do aço ABNT/SAE 1045 revela uma microestrutura de perlita (ferrita + cementita) disposta em uma matriz ferrítica. A perlita, em maior quantidade, está relacionado ao percentual de carbono no material. A dureza obtida por meio dos ensaios no aço foi de 175 HV, valor este condizente com o material em questão.

20 um

A rugosidade superficial é um parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da usinagem. O presente subtópico apresenta os gráficos referentes aos valores obtidos por meio da medição de rugosidade após processo de torneamento do aço ABNT/SAE 1045, combinadas com as curvas de potência de corte e energia elétrica consumida conforme a figura 32.

Figura 32: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço ABNT/SAE 1045



AÇO ABNT/SAE 1045

Fonte: O Autor

Observa-se nos ensaios variações bruscas nos valores de rugosidade nas faixas de avanço de 0,12 e 0,20. Já na faixa com avanço de 0,40 houve um aumento dos valores de rugosidade. Houve um pico no valor de rugosidade na faixa com avanço de 0,12 no valor da velocidade de corte de 140 m/min. A questão pode estar relacionada com variáveis não mensuradas no experimento, tais como nível de vibração na usinagem ou resíduo gerado na usinagem.

Apesar do pico e considerando os valores de rugosidade inicial e final em cada faixa de avanço, na faixa de 0,12 houve uma redução da rugosidade de 25,51%, na de 0,20 uma redução de 53,60% e para a faixa com o valor de 0,40 houve um aumento de 4,78%. Houve uma redução do consumo de energia no intervalo com o avanço de 0,40, relacionado a diminuição do tempo de usinagem, contudo esse intervalo apresentou maiores valores de rugosidade média.

4.2.3. Velocidade de Avanço

Considerando a velocidade de avanço gerada na usinagem do aço ABNT/SAE 1045, a mesma foi determinada a partir da rotação do eixo árvore e do avanço por volta segundo a equação 5, os experimentos apresentaram um aumento da velocidade de avanço a medida que aumentam o avanço e a velocidade de corte.

Com um aumento de 42,86% nos valores da velocidade de corte, a velocidade de avanço apresenta um aumento de 9,46%, 13,44% e 13,58% para as faixas de avanço por volta de 0,12, 0,20 e 0,40 respectivamente, contudo a faixa com o maior avanço por volta apresenta os maiores valores de velocidade de avanço em valores absolutos.

Os valores da velocidade de avanço foram expressas no gráfico em m/min para uma melhor visualização da curva conforme mostrado na figura 33.


Figura 33: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 1045

AÇO ABNT/SAE 1045

4.2.4. Tempo de Usinagem

O tempo de usinagem teve uma redução em todas as faixas de valores atribuídos a velocidade de corte e ao avanço por volta. Houve uma maior redução na faixa de valores com o aumento da velocidade de corte de 42,86% e do avanço por volta de 0,20, que foi de 77,37%.



Figura 34: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica no Aço ABNT/SAE 1045

4.2.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte

A profundidade de corte para todos os testes no aço ABNT/SAE 1045 foi fixada no valor de 1 mm, por conta de questões relacionadas ao quantitativo de insertos e insumos para o desenvolvimento da pesquisa. Já o ângulo de direção do gume (χ_r) possui o valor de 93° devido ao inserto e ao suporte utilizado conforme a operação. Com a profundidade de corte e o ângulo de direção do gume definidos, a largura de corte foi calculada segundo a equação 23.

4.2.6. Espessura de Corte

A espessura de corte foi calculada através de equação 22 considerando o ângulo de direção do gume e a profundidade de corte, que pode ser calculada através da equação 24. A figura 35 mostra os gráficos da espessura de corte, da potência de corte e da energia elétrica consumida no torneamento do aço 1045.





Fonte: O Autor

A espessura de corte do aço ABNT/SAE 1045 está associada a área de corte. Devido à profundidade de corte determinada ter sido constante, o aumento da espessura de corte ocorre conforme o aumento dos valores definidos para o parâmetro avanço e mantém-se contante para a velocidade de corte. Em valores percentuais e considerando o aumento das faixas de avanço, houve um aumento de 66,7% da faixa de 0,12 e 0,20, e de 100% da faixa de 0,20 e 0,40.

4.2.7. Força de Corte

A força de corte foi determinada indiretamente, através da equação 19 considerando valores das grandezas elétricas medidas com o analisador de qualidade de energia.

A força de corte está relacionada com os parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e com as características do material que está sendo usinado. A figura 36 mostra a força de corte junto da potência de corte. Por questões relacionadas a uma melhor visualização das curvas a força de corte foi expressa em kN.

A força de corte calculada para o torneamento cilíndrico do aço 1045 está relacionada com a variação do avanço.



AÇO ABNT/SAE 1045

Considerando as faixas dos valores de avanço, observa-se uma redução da força de corte. Com o aumento da velocidade de corte na faixa de 105 a 150 m/min para o avanço de 0,12 mm/volta houve uma redução de 15,96%, com o avanço de 0,20 mm/volta a redução foi também de 16,07% e para o avanço por volta de 0,40 foi de 11,85%.Observa-se uma influência significativa da velocidade de corte na força de corte, visto que a velocidade de corte possui relação direta na rotação do eixo principal do equipamento.

4.2.8. Potência Elétrica

Os resultados da potência elétrica foram obtidos através das medições realizadas com o analisador de qualidade de energia. Os gráficos que relacionam as curvas da potência elétrica e da potência de corte encontram-se na figura 37.



Figura 37: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço ABNT/SAE 1045

Fonte: O Autor

A potência elétrica obtida por meio das medições apresenta variações conforme o aumento da velocidade de corte e do avanço. Considerando o intervalo dos avanços e o aumento de 42,86% para a velocidade de corte, a potência elétrica obtida para os avanços por volta de 0,12, 0,20 e 0,40 foram de aumento de 18%, 19,87% e 23,23% respectivamente.

4.2.9. Energia de Corte

A energia de corte nas peças usinadas no aço 1045 foi calculada a partir da equação 21, através dos valores da força de corte, espessura e largura de corte. A figura 38 mostram as curvas da energia de corte, potência de corte, combinado a energia elétrica consumida.







Considerando as faixas dos valores de avanço, observa-se uma redução da energia de corte. Com o aumento da velocidade de corte na faixa de 105 a 150 m/min, para o avanço de 0,12 mm/volta houve uma redução de 16%, com o avanço de 0,20 mm/volta a redução foi também de 16% e para o avanço por volta de 0,40 foi de 13,63%.

O gráfico da energia de corte é apresentado na unidade de Joule por Milímetro Cúbico [J/mm³], contudo todos os valores foram divididos por 10000 para uma melhor visualização da curva.

A redução da energia de corte ocorreu, principalmente, devido à variação da velocidade de corte, pois este contribui diretamente com a força de corte, que por sua vez influencia na energia de corte.

4.3. Aço SAE 4140

O subtópico em questão apresenta-se as imagens obtida por meio de metalografia, valores de microdureza na escala Vickers, a velocidade de avanço, tempo de usinagem profundidade de corte, espessura e largura de corte, velocidade de avanço, potência e energia elétrica consumida e potência e energia de corte referentes aos experimentos realizados no aço 4140.

4.3.1. Micrografia e Microdureza Vickers

A figura 39 mostra as imagens obtidas por meio de metalografia do aço 4140 em diferentes ampliações.



Figura 39: Micrografia do Aço SAE 4140. Aumento: a) 200x b) 400x

a)

Fonte: O Autor

b)

Nas imagens do aço 4140 observa-se uma microestrutura constituída de ferrita e martensita, sinalizando a condição de tratamento térmico no aço a presença de solução sólida supersaturada de carbono no ferro conforme Colpaert (2008). A microdureza Vickers média obtida através dos ensaios realizados é aproximadamente 295 HV.

4.3.2. Medições de Rugosidade

O presente subtópico apresenta as curvas referentes aos valores obtidos por meio da medição de rugosidade após processo de torneamento do aço SAE 4140, acompanhado das curvas da potência de corte e da energia elétrica consumida conforme a figura 40.

Figura 40: Rugosidade Final, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE 4140



AÇO SAE 4140

Fonte: O Autor

Nos ensaios realizados no aço 4140 observa-se uma diminuição dos valores de rugosidade, principalmente na faixa com o valor de avanço de 0,12 mm/volta.

Em valores percentuais e considerando o aumento da velocidade de corte de 42,86%, na faixa de valores em que foi utilizado o avanço de 0,12 houve uma diminuição da rugosidade 20,66%, contudo para o valor de 120 m/min da velocidade de corte a rugosidade apresentou o menor valor, de 0,376 µm, o que representa uma redução de 34,83% quando comparado ao valor de maior rugosidade.

Já na faixa com avanço/volta de 0,20 e considerando o mesmo aumento da velocidade de corte, houve uma redução menor, de 12,05% e na faixa com avanço/volta de 0,40 e considerando o mesmo aumento da velocidade de corte, houve uma redução pouco expressiva, de 1,08%.

Apesar dos valores de redução da rugosidade para cada uma das faixas de avanço, observa-se nas curvas que quando ocorre o aumento do avanço em valores de 233,33% os valores das rugosidades das peças aumentam em até 10 vezes considerando os valores de menor rugosidade em cada faixa.

Houve uma redução do consumo de energia nos seguintes percentuais: O intervalo com o avanço de 0,12 mm/rotação apresenta uma redução do consumo de energia de 9,17%, o de 0,20 mm/rotação apresenta uma redução do consumo de energia de 6,42% e o de 0,40 mm/rotação apresenta a menor redução do consumo de energia, com 1,02%.

4.3.3. Velocidade de Avanço

Considerando a velocidade de avanço gerada na usinagem do aço SAE 4140, a mesma foi determinada a partir da rotação do eixo árvore e do avanço por volta segundo a equação 5, os experimentos apresentam um aumento da velocidade de avanço a medida que aumentam o avanço e a velocidade de corte.

Com um aumento de 42,86% nos valores da velocidade de corte, a velocidade de avanço apresenta um aumento de 13,78%, 13,44% e 13,58% para as faixas de avanço por volta de 0,12, 0,20 e 0,40 respectivamente, contudo a faixa com o maior avanço por volta apresenta os maiores valores de velocidade de avanço em valores absolutos.

Os valores da velocidade de avanço encontram-se expressas no gráfico em m/min para uma melhor visualização da curva conforme mostrado na figura 41.



Figura 41: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4140

Fonte: O Autor

4.3.4. Tempo de Usinagem

No tempo de usinagem das peças em aço 4140, observa-se uma redução em todas as faixas de valores atribuídos a velocidade de corte e ao avanço por volta. Considerando o aumento de 42,86% da velocidade de corte e para as faixas de valores com o avanço de 0,12,

0,20 e 0,40 mm/rotação houve uma diminuição, em valores percentuais, de 22,05%, 21,98% e 20,36% respectivamente.



Figura 42: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica no Aço SAE 4140

Fonte: O Autor

4.3.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte

A profundidade de corte para todos os testes no aço SAE 4140 foi fixada no valor de 1 mm, por conta de questões relacionadas ao quantitativo de insertos para o desenvolvimento da pesquisa. Já o ângulo de direção do gume (χ_r) possui o valor de 93° devido ao inserto e o suporte utilizado conforme a operação. Com a profundidade de corte e o ângulo de direção do gume definidos, a largura de corte foi calculada segundo a equação 23.

4.3.6. Espessura de Corte

A espessura de corte foi calculada através de equação 22 considerando o ângulo de direção do gume e a profundidade de corte, que pode ser calculada através da equação 24. A figura 43 mostra a espessura de corte, a potência de corte e a energia consumida no torneamento do aço 4140.



Figura 43: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE 4140



A espessura de corte do aço SAE 4140 está associada a área de corte. Devido à profundidade de corte determinada ter sido constante, o aumento da espessura de corte ocorre conforme o aumento dos valores definidos para o parâmetro avanço e mantém-se contante para a velocidade de corte. Em valores percentuais e considerando o aumento das faixas de avanço, houve um aumento de 66,7% da faixa de 0,12 e 0,20, e de 100% da faixa de 0,20 e 0,40.

4.3.7. Força de Corte

A força de corte foi determinada indiretamente, através da equação 19 considerando valores das grandezas elétricas medidas com o analisador de qualidade de energia.

A força de corte está relacionada com os parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e com as características do material que está sendo usinado. A figura 44 mostra a força de corte, potência de corte e energia elétrica consumida. Por questões relacionadas a uma melhor visualização da curva a força de corte foi expressa em kN.



Figura 44: Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4140

Fonte: O Autor

A força de corte calculada para o torneamento cilíndrico do aço 4140 está relacionada com a variação do avanço.

Considerando o aumento da velocidade de corte nas faixas de avanço na usinagem do aço 4140, houve uma redução de 30,9% da força de corte na faixa de 0,12, uma redução de 34,64 % na de 0,20 e uma redução de 30,64% para a de 0,40. Observa-se uma influência significativa da velocidade de corte na força de corte, visto que a velocidade de corte possui

relação direta na rotação do eixo principal do equipamento corroborando o que foi evidenciado na pesquisa de Cui e Guo (2018).

4.3.8. Potência Elétrica

Os resultados da potência elétrica foram obtidos através das medições realizadas com o analisador de qualidade de energia. Os gráficos que relacionam as curvas da potência elétrica e da potência de corte encontram-se na figura 45.





A potência elétrica obtida por meio das medições apresenta variações conforme o aumento da velocidade de corte e do avanço. Considerando o intervalo dos avanços e o aumento de 42,86% para a velocidade de corte, a potência elétrica obtida para os avanços por rotação de 0,12, 0,20 e 0,40 foram de diminuição, com valores percentuais de 1,26%, 6,66% e 0,92% respectivamente.

Houve variações na faixa de valores com avanço de 0,12 mm/rotação, relacionadas ao processo lubrirefrigerante no ensaio realizado.

4.3.9. Energia de Corte

A energia de corte foi calculada a partir da equação 21, através dos valores da força de corte, espessura e largura de corte. A figura 46 mostram as curvas da energia de corte, potência de corte, com a energia elétrica consumida.



Figura 46: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4140

Fonte: O Autor

Considerando as faixas dos valores de avanço, observa-se uma redução da energia de corte. Com o aumento da velocidade de corte na faixa de 105 a 150 m/min para o avanço de 0,12 mm/volta houve uma redução de 30,92%, com o avanço de 0,20 mm/volta a redução foi e 34,71% e para o avanço por volta de 0,40 foi de 30,46%.

O gráfico da energia de corte é apresentado na unidade de Joule por Milímetro Cúbico [J/mm³], contudo todos os valores foram divididos por 10000 para uma melhor visualização da curva.

A redução da energia de corte ocorreu, devido ao aumento da velocidade de corte, que contribui diretamente com a redução da força de corte, e do avanço que está relacionado com o aumento da espessura de corte que por sua vez reduz a energia de corte.

4.4. Aço SAE 4340

No subtópico em questão apresenta-se a imagens obtidas por meio de metalografia, o valor da microdureza na escala Vickers, e os gráficos referentes as medições de rugosidade superficial, velocidade de avanço, tempo de usinagem, a profundidade de corte, espessura e largura de corte, a potência elétrica e a energia de corte comparando com o consumo de energia elétrica, referentes aos experimentos realizados no aço 4340.

4.4.1. Micrografia e Microdureza Vickers

A figura 47 mostra as imagens obtidas por meio de metalografia do aço 4140 em diferentes ampliações.



Figura 47: Micrografia do aço SAE 4340. Aumento: a) 200x b) 400x

Fonte: O Autor

A microdureza Vickers média obtida através dos ensaios realizados no aço 4340 é aproximadamente 326 HV. Nas imagens observa-se uma microestrutura constituída de ferrita e martensita, sinalizando a condição de tratamento térmico no aço e a presença de solução sólida supersaturada de carbono no ferro (COLPAERT, 2008).

4.4.2. Medições de Rugosidade

O presente subtópico apresenta as curvas referentes aos valores obtidos por meio da medição de rugosidade após processo de torneamento do aço SAE 4340, acompanhado das curvas da potência de corte e da energia elétrica consumida conforme a figura 48.



AÇO SAE 4340



Nos ensaios realizados com aço 4340 observa-se uma diminuição dos valores de rugosidade, principalmente na faixa com o valor de avanço de 0,12 mm/volta.

Em valores percentuais e considerando o aumento da velocidade de corte de 42,86%, na faixa de valores em que foi utilizado o avanço de 0,12 houve uma diminuição da rugosidade 25,78%, contudo para o valor de 120 m/min da velocidade de corte a rugosidade apresentou o menor valor, de 0,337 µm, o que representa uma redução de 31,95% quando comparado com o valor de maior rugosidade.

Nas faixas com avanço de 0,20 e 0,40 mm/rotação e considerando o mesmo aumento da velocidade de corte, houve reduções em menores valores percentuais, de 2,17% e aumento de 5,51% respectivamente.

Apesar dos valores de redução da rugosidade para cada uma das faixas de avanço, observa-se que quando ocorre o aumento do avanço por volta em valores de 233,33% os valores de rugosidade aumentam em até 10 vezes considerando os valores de menor rugosidade em cada faixa.

Houve uma redução do consumo de energia nos seguintes percentuais: O intervalo com o avanço de 0,12 mm/rotação apresenta uma redução do consumo de energia de 10,34%, o de 0,20 mm/rotação apresenta uma redução do consumo de energia de 2,91% e o de 0,40 mm/rotação apresenta a menor redução do consumo de energia, com 4,04%.

4.4.3. Velocidade de Avanço

Considerando a velocidade de avanço gerada na usinagem do aço SAE 4340, a mesma foi determinada a partir da rotação do eixo árvore e do avanço por volta segundo a equação 5, os experimentos apresentam um aumento da velocidade de avanço a medida que aumentam o avanço e a velocidade de corte.

Com o aumento de 42,86% nos valores da velocidade de corte, a velocidade de avanço apresenta um aumento de 13,78%, 13,44% e 13,58% para as faixas de avanço por volta de 0,12, 0,20 e 0,40 respectivamente, contudo a faixa com o maior avanço por volta apresenta os maiores valores de velocidade de avanço em valores absolutos.

Os valores da velocidade de avanço encontram-se expressas no gráfico em m/min para uma melhor visualização da curva conforme mostrado na figura 49.



Figura 49: Velocidade de Avanço, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4340

Fonte: O Autor

4.4.4. Tempo de Usinagem

No tempo de usinagem das peças em aço 4340, observa-se uma redução em todas as faixas de valores atribuídos a velocidade de corte e ao avanço por volta, com variações. Considerando o aumento de 42,86% da velocidade de corte e para as faixas de valores com o avanço de 0,12, 0,20 e 0,40 mm/rotação houve uma diminuição, em valores percentuais, de

15%, 16,20% e 15,03% respectivamente, contudo para os valores de 150 m/min um aumento associado a medição e captação dos tempos.



Figura 50: Tempo de Usinagem e Energia Elétrica no Aço SAE 4340



4.4.5. Profundidade de corte, ângulo de direção do gume e largura de corte

A profundidade de corte para todos os testes no aço SAE 4340 foi fixada no valor de 1 mm, por conta de questões relacionadas ao quantitativo de insertos para o desenvolvimento da pesquisa. Já o ângulo de direção do gume (χ_r) possui o valor de 93° devido ao inserto e o suporte utilizado conforme a operação. Com a profundidade de corte e o ângulo de direção do gume definidos, a largura de corte foi calculada segundo a equação 23.

4.4.6. Espessura de Corte

A espessura de corte foi calculada através de equação 22 considerando o ângulo de direção do gume e a profundidade de corte, que pode ser calculada através da equação 24. A figura 51 mostra o valor da espessura de corte, a potência de corte e energia elétrica consumida no torneamento do aço 4340.



Figura 51: Espessura, Potência de Corte e Energia Elétrica consumida no Aço SAE 4340

Fonte: O Autor

A espessura de corte do aço SAE 4340 está associada a área de corte. Devido à profundidade de corte determinada ter sido constante, o aumento da espessura de corte ocorre conforme o aumento dos valores definidos para o parâmetro avanço e mantém-se contante para a velocidade de corte. Em valores percentuais e considerando o aumento das faixas de avanço, houve um aumento de 66,7% da faixa de 0,12 e 0,20, e de 100% da faixa de 0,20 e 0,40.

4.4.7. Força de Corte

A força de corte foi determinada indiretamente, através da equação 19 considerando valores das grandezas elétricas medidas com o analisador de qualidade de energia.

A força de corte está relacionada com os parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e com as características do material que está sendo usinado. A figura 44 mostra a força de corte, potência de corte e energia elétrica consumida. Por questões relacionadas a uma melhor visualização da curva a força de corte foi expressa em kN.

A força de corte calculada para o torneamento cilíndrico do aço 4340 está relacionada com a variação do avanço.



Figura 52: Força de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4340



Considerando as faixas de velocidade de corte na usinagem do aço 4340, houve uma redução de 30,45% da força de corte na faixa com avanço por volta de 0,12, uma redução de 32,59% para a 0,20 e uma redução de 33,03% para a 0,40. Observa-se uma influência significativa da velocidade de corte na força de corte, visto que a velocidade de corte possui relação direta na rotação do eixo principal do equipamento.

4.4.8. Potência Elétrica

Os resultados da potência elétrica foram obtidos através da medição e coleta de dados com o analisador de qualidade de energia. Os gráficos que relacionam as curvas da potência elétrica e da potência de corte encontram-se na figura 53.



Figura 53: Potência Elétrica e Potência de Corte do Aço SAE 4340

Fonte: O Autor

A potência elétrica obtida apresenta variações conforme o aumento da velocidade de corte e do avanço. Considerando o intervalo dos avanços e o aumento de 42,86% para a velocidade de corte, a potência elétrica obtida para os avanços por rotação de 0,12, 0,20 e 0,40 foram de diminuição, com valores percentuais de 0,64%, 3,70% e 4,34% respectivamente.

4.4.9. Energia de Corte

A energia de corte foi calculada a partir da equação 21, através dos valores da força de corte, espessura e largura de corte. A figura 54 mostra as curvas da energia de corte, potência de corte, associado a energia elétrica consumida.



Figura 54: Energia de Corte, Potência de Corte e Energia Elétrica no Aço SAE 4340



Considerando as faixas dos valores de avanço, observa-se uma redução da energia de corte. Com o aumento da velocidade de corte na faixa de 105 a 150 m/min para o avanço de 0,12 houve uma redução de 30,43%, com o avanço de 0,20 a redução foi de 32,64% e para o avanço de 0,40 foi de 33,06%.

O gráfico da energia de corte é apresentado na unidade de Joule por Milímetro Cúbico [J/mm³], contudo todos os valores foram divididos por 10000 para uma melhor visualização da curva.

4.5. Avaliação da usinabilidade segundo as Classes de Rugosidade Superficial

Os métodos de avaliação da rugosidade estão relacionados as mais diversas condições de usinagem. Neste estudo, essa avaliação será baseada em propriedades mecânicas dos materiais ensaiados, parâmetros de velocidade de corte e avanço, força e potência de corte considerando as classes de acabamento.

Baptista (2002) considera que as propriedades mecânicas exercem influência na usinabilidade dos materiais, entre elas a dureza, que, em valores mais elevados proporcionam dificuldade na usinagem. Nos aços-liga a usinagem se torna mais difícil a medida que há aumento na composição de certos elementos de liga, que podem promover endurecimento e formação de partículas abrasivas. A figura 55 evidencia os valores mais elevados da microdureza aos aços 4140 e 4340, e as variações no perfil de dureza para os aços ensaiados.



Figura 55: Análise descritiva e variações da microdurezaVickers

Fonte: O Autor

Neste estudo, questões relacionadas ao desgaste de ferramenta não foram consideradas, pois os ensaios foram realizados com uma aresta de corte por peça usinada, fluido de arrefecimento e sem variações da espessura de corte, visto que a profundidade foi mesma em todos os experimentos.

Na questão rugosidade superficial, a velocidade de corte apresentou uma tendência de redução da rugosidade nos aços 1020, em todas as faixas de avanço, e no 1045 nas faixas

de avanço de 0,12 e 0,20. Já nos aços 4140 e 4340, houve tendência de redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte em todas as faixas.

O parâmetro avanço apresentou maior relevância nos ensaios quando considerada a rugosidade. Na usinagem do aço 1020, os valores mais altos de rugosidade se apresentaram na faixa de avanço de 0,40 mm/rotação, como também no aço 1045. Houve uma variação na rugosidade dos aços 1045 na primeira faixa de avanços por questões de fixação e irregularidade do material.

No 1020, para as faixas de 0,12, 0,20 e 0,40 mm/rotação obteve-se os valores de rugosidade nas classes N8, N7 e N8 respectivamente, para os maiores valores da velocidade de corte, sendo que os valores mais altos apresentaram-se na faixa de maior avanço.

No 1045, para as faixas de 0,12, 0,20 e 0,40 mm/rotação obteve-se valores de rugosidade nas classes N7, N7 e N9 respectivamente, para os maiores valores de velocidade de corte, sendo que os valores mais altos apresentaram-se também na faixa de maior avanço. Os valores mais altos de rugosidade na faixa de maiores avanços já era esperado, considerando que o aumento do avanço proporciona redução da qualidade superficial (FERRARESI, 1970).

No aço 4140, para as faixas de 0,12, 0,20 e 0,40 mm/rotação obteve-se valores de rugosidade nas classes N5, N7 e N9 respectivamente, para os maiores valores da velocidade de corte, sendo que os valores mais altos apresentaram-se na faixa de maior avanço.

Já no aço 4340, para as faixas de 0,12, 0,20 e 0,40 mm/rotação obteve-se valores de rugosidade nas classes N6, N7 e N9 respectivamente, para os maiores valores da velocidade de corte, sendo que os valores mais altos apresentaram-se também na faixa de maior avanço.

O resultado estético (brilho) das peças ensaiadas com aços-liga foram superiores aos dos aços ao carbono, visto os baixos valores de rugosidade obtidos nos aços 4140 e 4340.

Ressalta-se que os valores obtidos para as menores faixas de avanços são rugosidades obtidas com cuidados especiais, ou ainda em processos de geometria não definida segundo Cunha e Cravenco (2007).

4.6. Discussões Gerais e Análise das Variações de Parâmetros

O subtópico apresenta as discussões gerais, uma análise da correlação de parâmetros de corte variados e considerações acerca dos ensaios realizados.

Através dos experimentos constatou-se diferentes interações entre as variações dos parâmetros de corte e as métricas que foram estabelecidas para avaliação.

Segundo os resultados obtidos na usinagem dos aços, houve aumento da rugosidade média nas diferentes faixas de valores atribuídos ao avanço para cada um dos materiais ensaiados, contudo com resultados diferentes.

Dentre os parâmetros de corte avaliados, o avanço se mostrou relevante para a redução do consumo de energia no processo de torneamento, seguindo o que afirma a pesquisa realizada por Warsi *et al.*(2015). A pesquisa de Camposeco-Negrete *et al.* (2016) também afirma que o avanço é o parâmetro associado a redução do consumo de energia devido este garantir menores tempos de usinagem, circunstância essa que ocorreu em todos os ensaios, contudo essa diminuição proporcionou impactos negativos no acabamento superficial das peças, principalmente nos aços 1045, 4140 e 4340

Camposeco-Negrete (2015) e Zhao *et al.*(2016) estabelecem em seus estudos que os parâmetros que estão associados a um menor consumo de energia com redução da rugosidade superficial são o avanço e a profundidade de corte. Como nesta pesquisa a profundidade de corte foi fixada para todos os ensaios, o mesmo não foi avaliado nesse estudo, fazendo com que a contribuição para resultados de redução de energia ocorresse devido ao aumento do avanço.

Na pesquisa de Bilga *et al.*(2016) a performance na usinagem do aço EN 353 relacionou o valor do avanço de 0,3 como sendo o valor que agrega uma maior redução na energia consumida pelo equipamento na operação de desbaste. Neste estudo o valor de avanço de 0,4, valor mais próximo do mencionado, relacionou um menor consumo de energia nos aços 1045 e no 4340.

No estudo de Anand *et al.* (2016), além da métrica associada ao consumo de energia, é feita uma análise das forças resultantes de corte em um aço maleável, latão e alumínio, aonde foram observados que as forças resultantes são afetadas pelo avanço e velocidade de corte como neste trabalho.

Na presente pesquisa a força de corte foi determinada indiretamente, através das dos valores das medições das grandezas elétricas em cada ensaio.

Nos ensaios dos aços 1020 e 1045 a força de corte apresenta a maior redução percentual na faixa de avanços de 0,40 e 0,20 respectivamente. Apesar da redução, os valores mais elevados estão relacionados ao aço 1045 visto suas propriedades de resistência mecânica e dureza serem maiores.

Já nos aços 4140 e 4340, a maior redução percentual ocorre na faixa de avanços de 0,20 para ambos os aços e em todas as faixas há uma diminuição entre 30-34% para o aumento máximo estabelecido para a velocidade de corte, sinalizando que a ferramenta utilizada tem uma melhor performance na usinagem desses materiais.

Na análise da força de corte, observa-se uma influência da velocidade de corte, visto que esse é parâmetro relacionado a rotação do eixo principal do equipamento de usinagem e está associado ao desgaste de ferramentas de acordo com Bagaber e Yussoff (2017).

Na pesquisa de Zhou *et al.* (2019), para um torneamento ideal, segundo as condições metodológicas do seu equipamento, os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte que devem ser utilizados são 662,51 m/min, 0,466 mm/ volta e 4,5 mm respectivamente, visando a redução do tempo de processo, das emissões de carbono (CO₂) e do custo de usinagem. Observa-se que esses valores utilizados no avanço podem comprometer significativamente a qualidade da usinagem, principalmente nos aços-liga, conforme visto nesta pesquisa.

Na pesquisa de Sangwan e Kant (2017), os parâmetros que resultaram em um consumo mínimo de energia no torneamento do aço 1045 foram aqueles com a velocidade de corte de 119,05 m/min e avanço de 0,12 mm/rotação, parâmetros esses que proporcionaram uma rugosidade na classe adequada referente ao processo de torneamento, situação esta que se apresentou não apenas no aço 1045, mas no 4140 e 4340.

Através da comparação dos valores de redução do consumo de energia, para os aços 1020 e 1045 houve redução maior redução percentual quando utilizado o valor de 0,12 para o aço 1020 e 0,20 para o aço 1045. Para os aços-liga 4140 e 4340, as maiores reduções foram na faixa com o avanço de 0,12. Aspectos relacionados as propriedades como a dureza, resistência mecânica, densidade e microestrutura estão associadas a essas variações conforme Anand *et al.* (2016).

Na pesquisa de Cui e Guo (2018) a faixa de valores de 110 a 125 m/min para a velocidade de corte e o avanço de 0,20 a 0,25 mm/rotação na usinagem do aço 1045 sinalizaram um baixo consumo de energia e uma boa qualidade superficial, contudo neste trabalho observou-se um favorecimento dessa condição no aço 1020.

O estudo de Bagaber e Yousoff (2018a) sinalizou que a velocidade de corte e o avanço são os parâmetros que trazem os principais efeitos na energia consumida. Para o estudo, as condições ideais para a usinagem do aço inoxidável 316 foram aquelas com Vc de 110 m/min, um avanço de 0,159 mm/rotação e uma profundidade de corte de 1,33 mm. Esses parâmetros estão associados a um consumo de energia de 0,026 kWh e uma rugosidade de 0,62 μm.

Considerando cada um dos aços ensaiados, o valor mais baixo da rugosidade do aço 1020 foi obtida com o valor da velocidade de corte e avanço de 150 m/min e 0,20 mm/rotação respectivamente, que foi de 1,53 µm, com um consumo de energia de 0,101 kWh.

Para o aço 1045 o valor mais baixo foi obtido com o valor da velocidade de corte e avanço de 150 m/min e 0,20 mm/rotação respectivamente, que foi de 1,565 µm, com um consumo de energia de 0,103 kWh.

Já nos aços-liga, para o aço 4140 o valor mais baixo foi obtido com o valor da velocidade de corte e avanço de 120 m/min e 0,12 mm/rotação respectivamente, que foi de 0,376 μm, com um consumo de energia de 0,118 kWh.

No aço 4340 o valor mais baixo foi obtido com o valor da velocidade de corte e avanço de 120 m/min e 0,12 mm/rotação respectivamente, que foi de 0,377 μ m, com um consumo de energia de 0,115 kWh.

A tabela 4 mostra os valores percentuais referentes a redução do consumo de energia elétrica considerando o aumento da velocidade de corte de 42,86%.

| Redução do Consumo de Energia Elétrica | | | | | | | |
|----------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--|--|--|
| f (mm/r) | 1020 | 1045 | 4140 | 4340 | | | |
| 0,12 | 3,94% | 6,72% | 9,17% | 10,34% | | | |
| 0,20 | 13,67% | 5,50% | 6,42% | 2,91% | | | |
| 0,40 | 1,19% | 3,00% | 1,02% | 4,04% | | | |

Tabela 4: Redução do Consumo de Energia Elétrica em Valores Percentuais (Aumento da V_c de 42,86%)

Fonte: O Autor

Segundo os valores mostrados na tabela 4, os percentuais de redução de energia para o aço 1020 foi na faixa com o avanço de 0,20, para os aços 1045, 4140 e 4340 foi na faixa de 0,12.

Para o desenvolvimento dos ensaios de usinagem, o gasto total foi de 6,462 kWh para todos os processos.

Os menores valores obtidos quanto ao consumo de energia elétrica nos aços foram evidenciados no aumento da velocidade de corte e, principalmente, devido ao avanço por rotação, por possibilitar o aumento na velocidade de avanço reduzindo assim, o tempo de usinagem, assim como nas pesquisas Zhang *et al.* (2017), He *et al.* (2017), Ic *et al.*(2018) e Hu *et al.*(2019). Entretanto, foi observado que o aumento do parâmetro do avanço por volta aumenta a rugosidade superficial, principalmente nos aços 4140 e 4340 sendo necessário adequação da classe de rugosidade conforme a necessidade de aplicação do componente (peça) a ser usinado.

Observa-se o alto valor da velocidade de corte utilizado na pesquisa e pode-se relacionar esse parâmetro com o consumo de energia, considerando a redução do tempo de processo. As emissões de carbono e custo de usinagem não foram avaliadas no presente estudo.

O aumento da espessura de corte em todos os aços ensaiados está relacionado apenas aos valores empregados no avanço, pois a profundidade de corte e a posição do suporte do inserto da ferramenta, o que implica em um mesmo valor para o ângulo de direção do gume, são os mesmos em todos os ensaios. Com relação ao consumo de energia, a espessura de corte pode proporcionar uma redução ainda maior, por estar relacionada à área de corte e a redução do número de passes na usinagem caso sejam considerados os valores mais elevados para o avanço e a profundidade de corte conforme estudo de Camposeco-Negrete e De Dios Calderón-Nájera (2019), contudo, por questões de segurança, essas condições não foram implementadas nesse estudo.

Em comparação com esta pesquisa, os valores dos parâmetros de entrada que foram utilizados para o desenvolvimento do estudo estão muito acima, pois foi priorizado o desenvolvimento da parte experimental e os insumos que foram disponibilizados para execução do mesmo.

Entre os aços estudados, os valores mais altos da energia de corte se apresentaram nos aços 4140 e 4340, por questões relacionadas as suas propriedades mecânicas de acordo com Machado *et al.* (2015), com a velocidade de corte como sendo o parâmetro que mais contribui para o seu aumento e o avanço sendo o que proporciona uma redução menos expressiva.

A potência elétrica obtida nos ensaios dos aços apresentaram resultados diferentes para cada um dos aços ensaiados. O aumento da potência elétrica na usinagem dos aços 1020 e 1045 e redução nos aços 4140 e 4340 apresentou-se como efeito inverso ao comparado ao trabalho de Wang *et al.* (2016), contudo a condição de uma menor potência elétrica pode não estar associada a uma melhor performance da usinagem visto o acabamento obtido nas faixas de avanços mais elevados.

No estudo de Dantas (2019), o consumo de energia elétrica de todos os ensaios foi menor, devido aos sistemas periféricos e subsistemas que estruturam o equipamento CNC, como também a operação empregada nos ensaios de usinagem ser a de faceamento.

Apesar da redução percentual do consumo de energia nos aços ao carbono 1020 e 1045 atingirem valores em torno de 7% e 13% respectivamente, e dos aços-liga 4140 e 4340 em torno de 10%, pode-se considerar esses valores significativos, devido ao fato de que operações relacionadas a fabricação de componentes mecânicos em equipamentos CNC são direcionadas quando se tem como objetivo a fabricação de peças em larga escala.

Considerando uma análise estatística dos parâmetros variados nos aços ensaiados (Velocidade de corte e avanço) e as variáveis de resposta, uma Análise de Variância (*ANOVA*) foi realizada tendo como objetivo verificar a influência dos parâmetros de corte e a combinação destas variáveis sobre a energia elétrica consumida, rugosidade superficial, força, potência e energia de corte em um nível de significância de 5%.

Conforme evidenciado na figura 56, para a rugosidade superficial o avanço mostrou um nível significativo conforme o p-valor e a significância considerada. Na interação de segunda ordem e conforme o intervalo estabelecido, o mesmo revelou-se não significativo para a condição estudada, um ponto evidenciado nos trabalhos citados anteriormente. As figuras 56 e 57 apresentam a análise de variância aplicada a rugosidade média final, a evidência ao nível de significância estabelecido e a estimativa marginal média para os valores de rugosidade média final, respectivamente.

Figura 56: *ANOVA* aplicada nos resultados da Rugosidade Média considerando os parâmetros variados ANOVA - Ra Final [um]

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | р |
|-----------------------|----------------|----|-------------|--------|--------|
| f [mm/r] | 62.190 | 2 | 31.095 | 33.251 | < .001 |
| Vc [m/min] | 0.632 | 4 | 0.158 | 0.169 | 0.953 |
| f [mm/r] * Vc [m/min] | 2.655 | 8 | 0.332 | 0.355 | 0.939 |
| Residuals | 42.082 | 45 | 0.935 | | |

Fonte: O Autor


Figura 57: Estimativa Marginal Média para os valores Ra



Em relação à energia elétrica consumida e conforme os parâmetros variados, o avanço também mostrou um nível significativo segundo o p-valor e a significância considerada. Na interação de segunda ordem e conforme o intervalo estudado, revelou-se não significativo para a condição estudada, um ponto evidenciado nos trabalhos de Zhang *et al.* (2017), He *et al.* (2017), Ic *et al.*(2018) e Hu *et al.*(2019). As figuras 58 e 59 apresentam a análise de variância aplicada à energia elétrica consumida e a estimativa marginal média para os valores, respectivamente.

Figura 58: ANOVA aplicada nos resultados da Energia Elétrica Consumida considerando os parâmetros variados
ANOVA - Energia Elétrica Consumida [kWh]

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | р |
|-----------------------|----------------|----|-------------|---------|--------|
| Vc [m/min] | 3.11e-4 | 4 | 7.77e-5 | 0.5703 | 0.686 |
| f [mm/r] | 0.00809 | 2 | 0.00404 | 29.6950 | < .001 |
| Vc [m/min] * f [mm/r] | 5.73e-5 | 8 | 7.16e-6 | 0.0526 | 1.000 |
| Residuals | 0.00613 | 45 | 1.36e-4 | | |

Fonte: O Autor







Para a métrica força de corte e segundo os parâmetros variados, a velocidade de corte apresentou um p-valor < 0,05, o que mostra uma significância estatística de acordo com a análise considerada e evidenciando o resultado apresentado por Bagaber e Yussoff (2017). Já a interação de segunda ordem entre a velocidade de corte e o avanço revelou-se como sendo não significativa para a condição estudada. As figuras 60 e 61 apresentam a análise de variância aplicada à força de corte e a estimativa marginal média para os valores, respectivamente.

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | р |
|-----------------------|----------------|----|-------------|--------|--------|
| Vc [m/min] | 1.1849 | 4 | 0.29623 | 14.748 | < .001 |
| f [mm/r] | 0.0284 | 2 | 0.01422 | 0.708 | 0.498 |
| Vc [m/min] * f [mm/r] | 0.0181 | 8 | 0.00226 | 0.112 | 0.999 |
| Residuals | 0.9039 | 45 | 0.02009 | | |

Figura 60: *ANOVA* aplicada nos resultados da Força de Corte considerando os parâmetros variados **ANOVA - Fc [kN]**

Fonte: O Autor

Figura 61: Estimativa Marginal Média para os valores da Força de Corte





Para a energia de corte e segundo os parâmetros variados, na interação de primeira ordem a velocidade de corte e o avanço apresentaram um p-valor < 0,05, o que mostra uma significância estatística dos dois parâmetros para a métrica considerada. Já a interação de segunda ordem entre a velocidade de corte e avanço, revelou-se não significativa para a condição estudada. As figuras 62 e 63 apresentam a análise de variância aplicada à energia de corte e a estimativa marginal média para os valores, respectivamente

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | р |
|-----------------------|----------------|----|-------------|--------|--------|
| Vc [m/min] | 0.3217 | 4 | 0.08042 | 10.90 | < .001 |
| f [mm/r] | 6.6207 | 2 | 3.31036 | 448.76 | < .001 |
| Vc [m/min] * f [mm/r] | 0.0653 | 8 | 0.00816 | 1.11 | 0.377 |
| Residuals | 0.3320 | 45 | 0.00738 | | |

Figura 62: *ANOVA* aplicada nos resultados da Energia de Corte considerando os parâmetros variados ANOVA - Ec [J/mm³]

.Fonte: O Autor



Figura 63: Estimativa Marginal Média para os valores da Energia de Corte



A análise de variância para as métricas Tempo de Usinagem e Potência Elétrica evidenciam variações, contudo as interações não apresentam valores significativos segundo o p-valor mostrado na figura 64.

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | р |
|-----------------------|----------------|----|-------------|--------|-------|
| Vc [m/min] | 1.394 | 4 | 0.3485 | 1.8347 | 0.139 |
| f [mm/r] | 2.982 | 2 | 1.4911 | 7.8496 | 0.001 |
| Vc [m/min] * f [mm/r] | 0.107 | 8 | 0.0134 | 0.0705 | 1.000 |
| Residuals | 8.548 | 45 | 0.1900 | | |
| ANOVA - Pe [kW] | | | | | |
| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | р |
| Vc [m/min] | 0.467 | 4 | 0.1166 | 0.753 | 0.561 |
| f [mm/r] | 0.218 | 2 | 0.1091 | 0.704 | 0.500 |
| Vc [m/min] * f [mm/r] | 0.140 | 8 | 0.0175 | 0.113 | 0.999 |
| Residuals | 6.971 | 45 | 0.1549 | | |

Figura 64: ANOVA aplicada nos resultados do Tempo de Usinagem e Potência Elétrica.

ANOVA - Tempo de Usinagem [min]

Fonte: O Autor

Como não houve variação dos parâmetros velocidade de avanço e espessura de corte, não foi possível realizar a *ANOVA* com essas duas métricas. Ressalta-se que, a análise estatística foi realizada considerando a variação dos parâmetros de corte definidos, as métricas estabelecidas e os resultados obtidos nos ensaios de usinagem estipulados no desenvolvimento metodológico, como também a priorização do cumprimento da parte experimental, e que a mesma é um complemento para a avaliação qualitativa já realizada, que considera a eficiência no consumo de energia e performance individual de cada material na operação de usinagem por torneamento externo. As análises e a imagens dos gráficos foram realizadas através do *JAMOVI*.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho traz uma proposição de um estudo que trata da avaliação eficiência energética em processos de usinagem CNC através do processo de torneamento, correlacionando as variações de parâmetros de corte com o consumo de energia elétrica e usinabilidade.

Conclusão 1: A caracterização metalográfica dos aços ABNT/SAE 1020, 1045, 4140 e 4340 foi realizada, no qual foram identificadas as fases de perlita e ferrita para os aços ao carbono e martensita e ferrita para os aços-liga. Foram obtidos para os referidos aços a microdureza Vickers, sendo que as fotomicrografias e os valores de dureza se apresentam como correspondentes aos dos aços ensaiados.

Conclusão 2: Os parâmetros de velocidade de corte e avanço foram determinados a partir de informações disponibilizadas pelo fabricante quanto a performance da usinagem. Esses valores foram escolhidos devido à quantidade limitada de ferragens (aços) e insumos (insertos de corte, suporte e calços), considerando o cumprimento da parte experimental.

Conclusão 3: Foi realizada a montagem do analisador de qualidade de energia para realização das medições relacionadas aos ensaios de usinagem através dos ciclos de desbaste e acabamento. Para estes os ensaios, os parâmetros velocidade de corte e avanço por rotação foram variados para a avaliação e influência na rugosidade superficial, velocidade de avanço, força, potência, energia de corte e consumo de energia elétrica.

Conclusão 4: A rugosidade superficial aumentou expressivamente com o aumento do avanço, principalmente nos aços 4140 e 4340, contudo na faixa de valores com avanço de 0,12 mm/volta foram obtidos valores de rugosidade na classe N5.

A redução do consumo de energia e a relação dos parâmetros com a rugosidade deve ser considerada de acordo com o valor de rugosidade que se deseja obter conforme as características do componente mecânico a ser fabricado. Além da diminuição da rugosidade final, houve uma diminuição da energia corte em nos avanços mais altos.

O tempo de usinagem reduziu significativamente, principalmente nos valores mais altos de velocidade de corte, na faixa de avanços de 0,40.

Houve redução do consumo de energia elétrica, principalmente na faixa dos ensaios com avanço por volta de 0,40 mm/rotação, sendo esse consumo medido considerando a potência e energia ativa global do equipamento na usinagem.

Apesar do menor consumo de energia nas faixas de maior avanço, houve maiores reduções percentuais em faixas menores. Para o aço 1020 houve uma redução de 13,67% na

faixa de 0,20, para os aços 1045, 4140 e 4340 reduções de 6,72%, 9,17% e 10,34% respectivamente, todos na faixa de 0,12, implicando que a utilização de valores mais elevados da velocidade de corte podem proporcionar uma redução percentual ainda menor do consumo de energia elétrica, mantendo uma qualidade superficial adequada segundo as aplicações mecânicas e considerando as condições definidas quanto ao processo de usinagem.

Nos experimentos realizados houve uma redução da força de corte em todos os aços. Apesar dos valores iniciais terem sido registrados nos aços 1045, 4140 e 4340, no aço 1020 a medida que houve o aumento da velocidade de corte e avanço houve uma redução da força de corte. No aço 1045 a redução ficou em torno de 15% quando comparado com o aço 1020. Apesar da redução percentual os valores mais elevados da força de corte no aço 1045 já eram esperados visto o maior percentual de carbono.

Já nos os aços-liga, a redução da força de corte ficou entre 30 e 34% para cada uma das faixas, observando a contribuição efetiva da velocidade de corte e trazendo pouca relevância para a redução.

O aumento da potência de corte está relacionado ao aumento dos parâmetros velocidade de corte, do avanço e pelo aumento do coeficiente da força específica de corte. Os aços-liga apresentaram um aumento maior do que os aços ao carbono visto as propriedades de resistência mecânica e dureza serem maiores.

Na energia de corte houve uma redução, sendo que no aço 1020 a redução foi menor do que no aço 1045, e nos aços-liga as reduções foram maiores, sendo que nos aços 4140 e 4340 foram observadas reduções nos avanços de 0,20 e 0,40 respectivamente, o que representa uma tendência de maiores diminuições com maiores valores atribuídos à velocidade de corte.

Diante disso, é necessário buscar um equilíbrio entre os valores fornecidos pelos manuais quanto aos parâmetros adotados, pois apesar da diminuição dos tempos de usinagem, métricas quanto a qualidade podem ser comprometidas.

Conclusão 5: Apesar das métricas referentes a força de corte, potência de corte e energia de corte estarem relacionadas ao desgaste de ferramenta, no presente estudo essa verificação não foi realizada, contudo os dados obtidos podem auxiliar em estudos subsequentes.

No quesito usinabilidade, rugosidade e consumo de energia, apesar do menor consumo de energia nas faixas mais altas de avanço em todos os aços, os valores de rugosidade foram maiores, principalmente nos aços 1045, 4140 e 4340.

Como há uma tendência de redução do consumo de energia com o aumento da velocidade de corte e conforme já mencionado, para um processo de usinagem mais eficiente é interessante que se extrapole esses valores na faixa de avanço de 0,20 mm/rotação, ou nos valores de avanço que se adéque a aplicação, considerando um equilíbrio entre as classes de rugosidades e o consumo energético.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Estudos que relacionem a avaliação dos parâmetros de corte no processo de torneamento com o consumo de energia em outros ciclos de usinagem ou operações de usinagem (Torneamento externo intermitente, roscamento, canais);

Estudo comparativo de usinagem e uso racional de energia envolvendo parâmetros que extrapolem as faixas determinadas pelos fabricantes das ferramentas de usinagem, considerando diferentes materiais e com múltiplas repetições que possibilitem uma análise estatística multicritério;

O uso de ferramentas que visem a otimização dos parâmetros de corte e a comparação com os estudos já realizados;

Pesquisa que relacione o consumo de energia com métricas associadas a força de corte, desgaste de ferramenta, morfologia de cavaco em diferentes materiais;

Sistemas que possibilitem o monitoramento e a performance da usinagem, considerando a condição de eficiência da máquina;

Simulação com modelos computacionais para otimização de parâmetros de usinagem para eficiência energética e qualidade na usinagem;

Mecanismos relacionados ao arrefecimento e ao consumo racional de energia em diferentes materiais.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6405**. Rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro. 1988.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 4287**. Especificações geométricas do produto (GPS). Rugosidade: Método do perfil: Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ACEEE. The 2018 International Energy Efficiency Scorecard. Report I1801, American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC, 2018. Disponível em: https://www2.aceee.org/l/310911/2018-06-25/2v164b. Acesso em: 01.02.21

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.

ANAND, Y., GUPTA, A., ABROL, A., GUPTA, A., KUMAR, V., TYAGI, S. K., ANAND, S. Optimization of machining parameters for green manufacturing. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1153292, 2016.

APOSTOLOS, F., ALEXIOS, P., GEORGIOS, P., PANAGIOTIS, S., GEORGE, C., Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review. **Procedia CIRP**, v 7, p. 628-633, 2013

BAGABER, S.A., YUSOFF, A.R., 2017. Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316. Journal of Cleaner **Production**. Vol. 157, p. 30-46.

BAGABER, S.A., YUSOFF, A.R., Multi-responses optimization in dry turning of a stainless steel as a key factor in minimum energy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 96, p. 1109-1122, 2018a.

BAGABER, S. A., YUSOFF, A. R. Sustainable Optimization of Dry Turning of Stainless Steel based on Energy Consumption and Machining Cost. **Procedia CIRP** Vol. 77, p. 397-400, 2018b.

BAPTISTA, A. L. de B. 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). BHUSHAN, R. K. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 242-254, 2013.

BILGA, P. S., SINGH, S., KUMAR, R., 2016. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method.**Journal of Cleaner Production**, Vol. 137, p. 1406-1417, 2016.

CALLISTER JUNIOR, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMPATELLI, G., SCIPPA, A., LORENZINI, L., SATO, R.,. Optimal workpiece orientation to reduce the energy consumption of a milling process. Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol. Vol. 2, p. 5-13, 2015

CAMPOSECO-NEGRETE, C. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. **Journal of Cleaner Production**, Vol.91, p.109-117, 2015.

CAMPOSECO-NEGRETE, C., DE DIOS CALDERÓN-NÁJERA, J. Sustainable machining as a mean of reducing the environmental impacts related to the energy consumption of the machine tool: a case study of AISI 1045 steel machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 1-4, p. 27-41, 2019.

CAMPOSECO-NEGRETE, C., NÁJERA, J. D. D. C., Miranda-Valenzuela, J. C. Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol.83.5-8, p. 1341-1347, 2016.

CHEN, X., LI, C., JIN, Y., LI, L. Optimization of cutting parameters with a sustainable consideration of electrical energy and embodied energy of materials. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1-4, p. 775-788, 2018.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**: Processo de Fabricação e Tratamento. Vol II, 2^a Ed., McGraw-Hill, 1986.

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

CUI, X. E GUO, J. Identification of the optimum cutting parameters in intermittent hard turning with specific cutting energy, damage equivalent stress, and surface roughness considered. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 96, n. 9-12, p. 4281-4293, 2018.

CUNHA, L. S. CRAVENCO, M. P.. Manual Prático do Mecânico. São Paulo: Hemus, 2007.

DAMBHARE, S., DESHMUKH, S., BORADE, A., DIGALWAR, A., PHATE, M. Sustainability issues in turning process: A study in Indian machining Industry. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 379-384, 2015.

DANTAS, R. G. D. Influência Dos Parâmetros De Corte Na Eficiência Energética Em Processos De Usinagem Por Torneamento. 2019. 135f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *Campus* Maracanaú, 2019.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., Tecnologia da Usinagem dos Materiais, 9^a ED., ARTLIBER, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese/Ano Base 2020 Nacional.** 2021. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relat%C3%B3rio%20S %C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf> Acesso em: 08.06.21

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

HE, K., TANG, R., JIN, M. Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time. **Int. J. Prod. Econ**. Vol. 185, p.113-127, 2017.

HU, L., TANG, R., CAI, W., FENG, Y., MA, X. Optimisation of cutting parameters for improving energy efficiency in machining process. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 59, p. 406-416, 2019.

IC, Y. T., SARALOĞLU GÜLER, E., CABBAROĞLU, C., DILAN YÜKSEL, E., MAIDE SAĞLAM, H.. Optimisation of cutting parameters for minimizing carbon emission and maximising cutting quality in turning process. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 11, p. 4035-4055, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2007. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO² Emissions. 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Key world energy statistics. 2019.

Disponível em:

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2019.pdf Acesso em 31.10.20.

KUMAR, R., BILGA, P.S., SINGH, S., Multi objective optimization using different methods of assigning weights to energy consumption responses, surface roughness and material removal rate during rough turning operation. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 164, p. 45-57, 2017.

LI, W. Methodology for Characterizing Energy and Eco-efficiency of Manufacturing

Processes. Efficiency of Manufacturing Processes. p. 23-44. Springer, Cham, 2015.

LI, W., ZEIN, A., KARA, S., HERRMANN, C. An investigation into fixed energy consumption of machine tools. Glocalized solutions for sustainability in manufacturing. p. 268-273. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

LIU, D., WANG, W., WANG, L. Energy-efficient cutting parameters determination for NC machining with specified machining accuracy. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 523-528, 2017.

LV, J., TANG, R., JIA, S., LIU, Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3864-3874, 2016.

MACHADO, Á. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., & DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo, Edgard Blücher, 2015.

MENG, L., ZHOU, M., ZHANG, C., TIAN, G. A new model for predicting power consumption of machining processes: A turning case. **IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. IEEE, 2016. p. 1289-1294, 2016.

MILLS, B. REDFORD, A. H., Machinability of engineering materials. Springer Science Publishers, London, 1983.

MITSUBISHI MATERIALS. Cutting Tools 2020-2021. Disponível em http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4815/7657/0751/

catalog_c009b_full.pdf>. Acesso em 01.02.21.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**: Uma Abordagem Integrada. 4^a ed. São Paulo: Bookman, 2013.

PELEGRINO, D. H. Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas-ferramentas. 2018. 111f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

RAO C.J., N. R. D.; SRIHARI, P. Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 64, p. 1405–1415, 2013.

REIS, B. C. M., PEREIRA, N. F. S., SANTOS, A. J., CÂMARA, M. A., FARIA, P. E., RODRIGUES, P. C. D. M., RUBIO, J. C. C. Influência do material da ferramenta de corte

sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, 2019.

RIGATTI, A. M. Y. Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2010. 87f. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94480/rigatti_amy_me_ilha.pdf? sequence=1&isAllowed=y>.

SÁEZ-MARTÍNEZ, F. J., LEFEBVRE, G., HERNÁNDEZ, J. J., CLARK, J. H. Drivers of sustainable cleaner production and sustainable energy options. Journal of Cleaner **Production**, Vol.138, p.1-7, 2016.

SANGWAN, K.S. E KANT, G., Optimization of machining parameters for improving energy efficiency using integrated response surface methodology and genetic algorithm approach. **Procedia CIRP** Vol. 61, p. 517-522, 2017.

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

SIHAG, N.; SANGWAN, K. S.; PUNDIR, S. Development of a Structured Algorithm to Identify the Status of a Machine Tool to Improve Energy and Time Efficiencies. **Procedia CIRP**, The Author(s), v. 69, n. May, p. 294–299, 2018. ISSN 22128271. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.081>.

SILVA NETO, J. C. Da. Metrologia e controle dimensional: Conceitos, normas e aplicações. 2ª ed. Rio de Janeiro. Elsevier. 2018.

WANG, B., LIU, Z., SONG, Q., WAN, Y., SHI, Z. 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.

WARSI, S.S., JAFFERY, H.I., AHMAD, R., KHAN, M., AKRAM, S., Analysis of power and specific cutting energy consumption in orthogonal machining of Al 6061-T6 alloys at transitional cutting speeds. In: **Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection**, pp. 1-7, 2015.

WARSI, S.S., JAFFERY, S.H.I., AHMAD, R., KHAN, M., AGHA, M.H., ALI, L., Development and analysis of energy consumption map for high-speed machining of Al6061-T6 alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 96.1, p. 91 e 102, 2018a. WARSI, S.S., JAFFERY, S.H.I., AHMAD, R., KHAN, M., ALI, L., AGHA, M.H., AKRAM, S., Development of energy consumption map for orthogonal machining of Al6061-T6 alloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 232, p. 2510-2522, 2018b.

WHITAKER, J. C. Power Systems Handbook Third Edition.[s.l.] CRC Press 2006, 2007 XIAO, Q., LI, C., YI, Q., WANG, Q. An industrial data based investigation into effects of process parameters on cutting power and energy efficiency. In: 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2017. p. 1481-1486.

XIE, N.; ZHOU, J.; ZHENG, B. Selection of optimum turning parameters based on cooperative optimization of minimum energy consumption and high surface quality. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 1469-1474, 2018.

ZHANG, L., ZHANG, B., BAO, H., HUANG, H., Optimization of cutting parameters for minimizing environmental impact: considering energy efficiency, noise emission and economic dimension. **Int. J. Precis. Eng. Manuf**. Vol. 19, p. 613-624, 2018.

ZHANG, Y., LIU, Q., ZHOU, Y., YING, B. Integrated optimization of cutting parameters and scheduling for reducing carbon emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 886-895, 2017.

ZHAO, G., HOU, C., QIAO, J., CHENG, X. Energy consumption characteristics evaluation method in turning. Advances in Mechanical Engineering, v. 8, n. 11, p. 1687814016680737, 2016.

ZHONG, Q., TANG, R., PENG, T., Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 140, p.1819-1827, 2016.

ZHOU, G., LU, Q., XIAO, Z., ZHOU, C., TIAN, C. Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions. Journal of Cleaner Production, v. 208, p. 937-950, 2019.

. ANEXO A.1 - PROGRAMA NC PARA USINAGEM DE PEÇA PROVA NA INTERFACE DO TORNO BNC-1840

| FANUC Series O/-TD | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| PROGRAMA 02000 ; N05 G28 U0 W0 N10 G54 G21 G9 N30 T0101 ; N35 M08 ; N50 G96 S105 ; N60 G50 S2900 1 N70 G42 ; N80 G00 X25 Z2 | 02000 NG ; a G99 ; M04 ; ; | 00000 | $ \begin{array}{c} P \\ O \\ a \\ N \\ T \\ c \\ T \\ T$ |
| N90 G71 U1 R2 N100 G71 P110 A) HND **** *** PROG | ; 2160 U0.5 W1 F0.2 ; OS 90% T01 *** 16:47:56 CURRENT PROX (OPR | 100 100 + | |
| | | | |

. ANEXO A.2 - PROGRAMA NC PARA USINAGEM DE PEÇA PROVA NA INT<u>ERFACE DO TORNO BNC-1840</u>

| PROGRAMA | 02000 N00000 | PC |
|-----------------------------------------|----------------|----|
| 02000 | (EDIC FG) | 0. |
| N100 G71 P110 Q160 U0 N110 G00 X11 ; | . 5 WI F0. 2 ; | |
| N120 G01 Z0 ; | | 1 |
| N130 X15 Z-2 ; | | |
| N150 X23 Z-32 ; | | H, |
| N160 Z-60 ; | 10 . | |
| N170 G70 P110 Q160 F0 | . 12 , | |
| N190 G00 X100 Z200 ; | | |
| N200 M30 ; | | |
| A)_ | OS 90% TØ 100 | |
| EDIT **** *** *** | 16:48:25 | |
| PROG DIR | C. A. P (OPRT) | |
| | | PA |
| | | 1 |
| | | |