

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**MAIKEL DA SILVA
RAFAEL VALMORBIDA**

**USINABILIDADE DE FERRO FUNDIDO CINZENTO: ANÁLISE ENERGÉTICA,
TEMPERATURA E RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

**PATO BRANCO
2023**

**MAIKEL DA SILVA
RAFAEL VALMORBIDA**

**USINABILIDADE DE FERRO FUNDIDO CINZENTO: ANÁLISE ENERGÉTICA,
TEMPERATURA E RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

**Machinability of Gray Cast Iron: Energy Analysis, Temperature and Roughness
Integrity**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima.

Coorientador(a): Dr. Vitor Baldin.

**PATO BRANCO
2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MAIKEL DA SILVA
RAFAEL VALMORBIDA

**USINABILIDADE DE FERRO FUNDIDO CINZENTO: ANÁLISE ENERGÉTICA,
TEMPERATURA E RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/maio/2023

Prof. Dr. Roberto Nunes da Costa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cezar Adamczuk
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vitor Baldin
Doutorado
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Affonso de Oliveira Munhoz Machado
Bacharelado
TUPY SA

Fabio de Freitas Lima
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO
2023

Dedico este trabalho a minha esposa Heloísa e ao meu filho Heitor, meus irmãos Gislaine e Alexander, os grandes responsáveis pela conclusão desta fase em minha vida, pelo apoio incondicional durante a jornada acadêmica, por sempre terem acreditado em meu potencial, estimulado meu crescimento e por serem exemplos de amor, carinho, fé, luta e persistência.

A meu pai Sebastião (em memória) que sonhou com a minha vida e acreditou em mim, e à minha mãe Izabel por seu apoio, amor e persistência.

(Maikel da Silva)

Dedico este trabalho para minha mãe Loivani Valmorbida e minha tia Evelina Maria Valmorbida que ao longo de toda a trajetória da minha graduação me apoiaram e motivaram até a conclusão do curso. Amo vocês.
(Rafael Valmorbida)

AGRADECIMENTOS (MAIKEL DA SILVA)

Em especial expresso minha total gratidão a Deus que sempre me amou, cuidou, favoreceu, fortaleceu e jamais me deixou desistir, e me ajuda a sempre seguir em frente.

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima, ao coorientador Dr. Vitor Baldin e ao laboratorista MSc. Celio Antonio Degaraes, pelo apoio e dedicação na orientação do presente trabalho.

Um agradecimento especial a minha esposa Heloísa e ao meu filho Heitor, minha mãe Izabel, meus irmãos Gislaine e Alexander, os grandes responsáveis pela conclusão desta fase em minha vida, pelo apoio incondicional durante a jornada acadêmica, por sempre terem acreditado em meu potencial, estimulado meu crescimento e por serem exemplos de amor, carinho, fé, luta e persistência.

À Mirelia Flausino Vogel e à Janaína Castro Gomes, pelo apoio, suporte, carinho, orientação e amizade que me ajudaram a completar este ciclo acadêmico.

AGRADECIMENTOS (RAFAEL VALMORBIDA)

Agradeço imensamente à vida por poder me proporcionar uma chance para provar para mim mesmo que tudo que você quer, você pode conseguir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima, pela dedicação do seu tempo em me guiar pelo melhor caminho com todo seu conhecimento adquirido em sua longa jornada de experiência, dentro e fora da universidade.

Pois desde a criação do mundo os atributos
invisíveis de Deus, seu eterno poder e sua
natureza divina, têm sido vistos claramente,
sendo compreendidos por meio das coisas
criadas.
(Romanos 1:20)

RESUMO

Para as empresas do ramo de usinagem o mercado é altamente competitivo, requerendo processos otimizados que estruturam sua política de custos e de lucro, sem negligenciar o padrão de qualidade exigido pelo mercado. O estudo da usinabilidade focando nas propriedades do processo contribui fortemente para seu aperfeiçoamento, favorecendo a melhoria da relação custo hora na linha de usinagem. Assim, a proposta deste trabalho é, a partir das análises de ensaios com inserto quadrado e redondo, definir qual a melhor geometria da ferramenta de corte, determinando os melhores acabamentos, maior taxa de remoção de material e menor consumo energético para o processo de torneamento do ferro fundido cinzento (FC-300), determinando-se assim os melhores parâmetros de usinagem deste material a um custo mínimo. Os resultados alcançados levam à constatação de que a opção por determinado conjunto de parâmetros de entrada do processo de torneamento é definida pela aplicação do produto final desejável, uma vez que não se observou possível obter resultados ideais simultâneos para a totalidade de parâmetros/componentes resultantes do processo de usinagem. Observou-se, em diferentes momentos, a possível ocorrência de Aresta Postiça de Corte (APC), situação em que partículas do material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta, dificultando o cisalhamento. A presença da APC influencia diretamente sobre o produto final, alterando a geometria do inserto, com efeitos em todo o processo de torneamento (força, temperatura, desgaste das ferramentas e rugosidade superficial).

Palavras-chave: ferro fundido cinzento; análise energética; temperatura e integridade superficial; usinagem.

ABSTRACT

For companies in the machining industry, the market is highly competitive, requiring optimized processes that structure their cost and profit policy, without neglecting the quality standard demanded by the market. The study of machinability focusing on the properties of the process strongly contributes to its progress, favoring the improvement of the hour cost ratio in the machining line. Thus, the purpose of this work is, based on the analysis of tests with square and round inserts, to define the best geometry of the cutting tool, determining the best finishes, the highest material removal rate and the lowest energy consumption for the cutting process for gray cast iron turning (FC-300), thus determining the best machining parameters for this material at a minimum cost. The results achieved lead to the conclusion that the option for a certain set of input parameters of the turning process is defined by the application of the desirable final product, since it was not possible to obtain simultaneous ideal results for all parameters/components resulting from the process of machining. It was observed, at different times, the possible occurrence of Build Up Edge (BUE), a situation in which a particle of machined material that accumulates on the exit surface of the tool, making shearing difficult. The presence of BUE directly influences the final product, changing the geometry of the insert, with effects on the entire turning process (force, temperature, tool wear and surface roughness).

Keywords: gray cast iron; energy, temperature and surface integrity analysis; machining.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo geral.....	12
1.2	Objetivos específicos.....	12
1.3	Justificativa.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Usinagem	14
2.1.1	Torneamento	15
2.1	Ferros fundidos	16
2.2	Usinabilidade do ferro fundido cinzento	18
2.2.1	Grandezas Físicas no Processo de Corte	18
2.2.2	Movimentos	18
2.2.3	Percurso da ferramenta na peça:	19
2.2.4	Velocidades	19
2.3	Consumo energético, temperatura de corte e rugosidade superficial 20	
2.4	Geometria da ferramenta de corte	21
2.4.1	Definições.....	22
2.1.1	Insertos na usinagem	24
3	METODOLOGIA	27
3.1	Materiais	27
3.2	Metodologia	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5	CONCLUSÕES	46
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	ANEXO A – TABELA DE DADOS ORIGINAIS	52
	ANEXO B – DADOS TERMOGRÁFICOS COLETADOS ORIGINAIS (REFERÊNCIAS QUE ORIGINARAM A TABELA)	53

1. INTRODUÇÃO

Para as empresas do ramo de usinagem o mercado é altamente competitivo, obrigando as mesmas a adotarem o preço de venda de seus produtos/serviços por aquele estabelecido pelo mercado. Sendo assim, tais empresas buscam a sua sobrevivência otimizando seus processos, estruturando a sua política de custos e reduzindo a margem de lucro, sem esquecer do padrão de qualidade exigido pelo mercado. A otimização do processo de torneamento, até agora, tem utilizado apenas dos custos indiretos fixos mais o custo da ferramenta na determinação do custo total de fabricação e a receita unitária do processo.

O estudo da usinabilidade focando nas propriedades do material a ser usinado tem significado importantíssimo no quesito econômico para empresas que focam em baixar o custo hora do seu equipamento, tendo alta produtividade em toda a linha de usinagem, porém para tal efeito deve-se ter um investimento alto em tecnologias (GUESSER, 2019).

Asthakhov (2006) demonstrou a existência de um conjunto de parâmetros dependentes das propriedades da peça que permite otimizar a temperatura de corte e, conseqüentemente, garantir as menores forças de corte e de taxas de desgaste da ferramenta e a mais alta qualidade da superfície usinada, simultaneamente.

Reis (2017) estudou o efeito da variação dos parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço, material da ferramenta de corte e quebra-cavaco) sobre os parâmetros de saída (força de corte, rugosidade, forma do cavaco, temperatura de corte e desgaste da ferramenta) no torneamento do aço ABNT 4340, a partir de planejamento de experimentos fatorial. A autora concluiu que a força de corte foi fortemente afetada pelo material da ferramenta de corte e pelo avanço; a rugosidade mostrou-se sensível apenas ao avanço; cavacos mais curtos foram gerados ao nível mais elevado de avanço e suas formas sofreram influência do material da ferramenta; e as menores temperaturas de corte foram observadas com utilização de metal duro, quebra-cavaco LP e o menor nível de velocidade.

Rodrigues (2019) comparou os métodos de lubri-refrigeração convencional e otimizado, no processo de peças de ferro fundido cinzento FC200, a partir da análise do desgaste das duas ferramentas utilizadas para usinar o componente, e rugosidade superficial do material usinado, constando a melhor eficiência do bico proposto com

lubri-refrigerante otimizado, que obteve maior eficiência em ambos aspectos estudados.

Ferro fundido é muito usual e comumente empregado em peças de maquinário agrícola, montadoras de automóveis, fogões, navios e até mesmo em usos domésticos, motivo pelo qual vem se aprimorando os métodos para alcançar com exatidão um padrão de usinagem. O ferro fundido cinzento é composto por uma liga de ferro-carbono-silício (Fe-C-Si), o carbono quando adicionado em grandes quantidades excede o limite de solubilidade do ferro e precipita como partículas de grafite.

A partir do cenário exposto, a proposta deste trabalho é, a partir das análises dos ensaios, definir qual a melhor geometria da ferramenta de corte, determinando os melhores acabamentos, maior taxa de remoção de material e menor consumo energético para o processo de torneamento do ferro fundido cinzento (FC-300), determinando-se assim os melhores parâmetros de usinagem deste material a um custo mínimo.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em determinar a melhor geometria da ferramenta de corte e os parâmetros de corte mais adequados no processo de torneamento do ferro fundido cinzento FC-300 para obtenção de melhores resultados em acabamento, taxa de remoção de material e menor consumo energético, associados a um custo mínimo de operação.

1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Determinar qual a melhor geometria de inserto, entre quadrado e redondo;
- Verificar o consumo energético a partir da análise da qualidade de energia do processo;
- Analisar a temperatura de operação a partir de câmera térmica;
- Determinar o melhor acabamento da peça a partir da análise do rugosímetro.

1.3 Justificativa

Na indústria metal mecânica temos diversas aplicações para o ferro fundido cinzento, são fabricados blocos de motor, discos e tambor de freio, cabeçotes, entre diversas outras aplicações. Este trabalho tem por objetivo desenvolver métodos para reduzir custo de usinagem, otimizando as variáveis de corte para fabricação de peças em ferro fundido cinzento, aumentando a vida útil da ferramenta e buscando o melhor setup na usinagem para beneficiar nossa sociedade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve fundamentação teórica com o objetivo de embasar conceitualmente o conteúdo tratado ao longo deste trabalho.

2.1 Usinagem

Segundo Machado et al. (2009), usinagem pode ser definida de modo abrangente como a operação que, ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento, produz cavaco, que se delimita por uma porção de material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular.

Cerca de 10% da produção de metais é convertida em cavaco, resultante da usinagem, o processo de fabricação mais popular do mundo, e que emprega dezenas de milhões de pessoas. Apesar disso, é um processo que conta com considerável imprevisibilidade, devido à dificuldade de determinação das condições ideais de corte, ao mesmo tempo em que se expressa simples na formação correta do cavaco, sem necessidade de interferência do operador, uma vez que sejam determinadas as condições ideais de corte, que combinem peças dentro das especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (TRENT, 1985; Machado et al., 2009).

De acordo com Shaw (1997), apesar da improbabilidade de determinação das condições ideais de corte de metais devido ao grande número de variáveis envolvidas, pesquisas específicas acerca dos processos permitem a aproximação da previsão do comportamento da usinagem de peças.

De acordo com Black (1995), a usinagem é o único processo de deformação plástica que depende exclusivamente da ferramenta de corte, daí sua imprevisibilidade, além das altas deformações aliadas às altas taxas de deformação envolvidas. Segundo o autor, diante da complexidade e grande quantidade de parâmetros de entrada, existem apenas três modos de lidar com a situação: empiricamente, através de experiências proporcionadas por sucessivas tentativas e erros ao longo do tempo; por experimentação, cujo custo é elevado e a aplicação, restrita; e por intermédio de modelos teóricos. De modo geral, nenhuma das abordagens mostra-se capaz de apresentar resultados satisfatórios individualmente,

o que leva o autor a recomendar a combinação de duas ou mesmo das três abordagens.

Neste cenário, Deveras (2016), a partir da definição de usinagem como a retirada de material de uma peça para conferir-lhe forma, acabamento, fazer furos, reentrâncias; e considerando as imprevisibilidades do processo, orienta o controle dos parâmetros envolvidos para que seja possível operar nas condições ideais de corte. A autora salienta que a escolha correta dos parâmetros de usinagem possibilita a obtenção de um melhor produto final, otimizando as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial, tanto quanto na máquina-ferramenta, pois quando a mesma recebe menos esforços durante a operação reduz-se as forças de usinagem.

2.1.1 Torneamento

Ferraresi (1970) conceitua torneamento como o

Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1970, p. XXVI)

Trent e Wright (2000) apontam que o torneamento é configurado, em geral, por uma ferramenta fixada de maneira rígida em um porta-ferramenta, que se move em velocidade constante ao longo do eixo da peça, proporcionando a retirada de uma camada de material (denominada cavaco) para formar um cilindro ou uma superfície de perfil mais elaborado, cujo processo envolve operações complexas, influenciadas por diferentes variáveis. Para esses autores a velocidade de corte e o avanço são os dois principais parâmetros a serem ajustados para atingir as condições ótimas de corte. No entanto, Black (1989) apud Souza (2004) elenca outros parâmetros de equivalente influência sobre a qualidade do produto final: variáveis independentes de entrada (material, geometria, cristalografia, pureza, tratamento térmico e dureza da peça, material e geometria da ferramenta, parâmetros de corte como avanço, profundidade, velocidade e ambiente, e planejamento experimental); e variáveis dependentes de saída (tipo do cavaco, força e potência de usinagem, temperatura na região de corte, vibrações, falhas na ferramenta de corte e acabamento e dimensão da peça usinada).

Machado et al. (2015) destacam a possibilidade de subdivisão do torneamento em desbaste, que se concentra em garantir uma alta taxa de remoção de cavaco, cuja limitação dá-se pela potência da máquina-ferramenta; e acabamento, em que a prioridade é dedicada à qualidade final da peça.

Pereira (2009) ressalta a importância fundamental do setor de usinagem no desenvolvimento industrial, em que, na acirrada competitividade, o aperfeiçoamento dos elementos envolvidos culmina em resultados cada vez mais satisfatórios, com a redução de custos de fabricação. Assim, a análise do comportamento dos materiais e o conhecimento das variáveis influentes sobre o processo de torneamento são determinantes para o incremento da eficiência na produção fabril.

2.1 Ferros fundidos

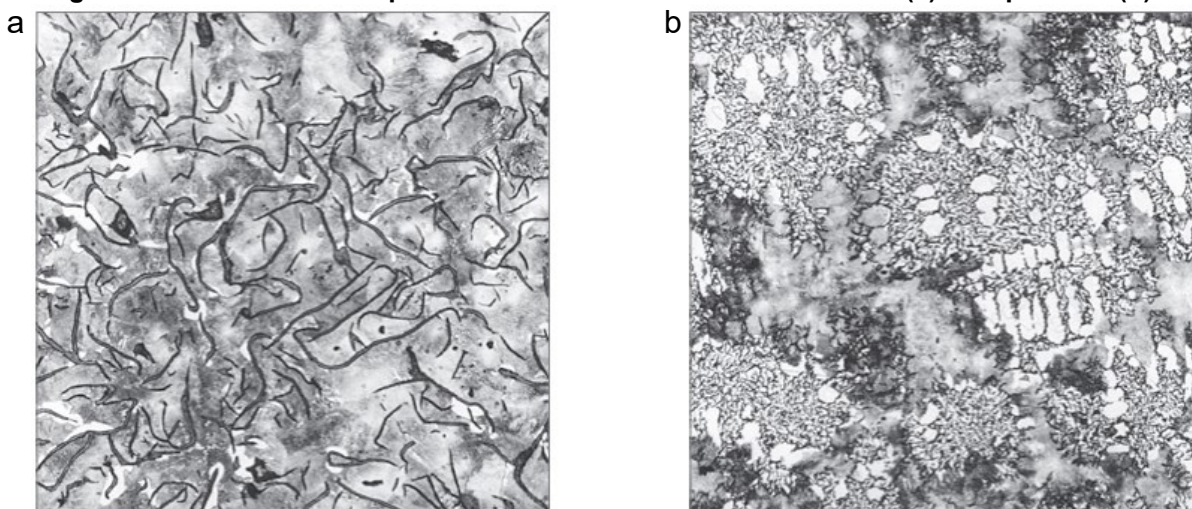
De forma genérica, Ferros Fundidos são uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,14%p; na prática, no entanto, a maioria dos ferros fundidos contém entre 3,0 e 4,5 %p C, além de outros elementos de liga. Um reexame do diagrama de fases ferro-carbono de ferro revela que as ligas nessa faixa de composição tornam-se completamente líquidas em temperaturas entre aproximadamente 1150°C e 1300°C (2100°F e 2350°F), o que é consideravelmente mais baixo do que para os aços. Assim, essas ligas são fundidas com facilidade, e são apropriadas para fundição. Além disso, alguns ferros fundidos são muito quebradiços para serem forjados, e a fundição é a técnica de fabricação mais conveniente (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2021)

As variações mais comuns de ferro fundido são cinzento, nodular, branco, maleável e vermicular (grafita compacta). Chiaverini (2005), aponta que dentre as diversas ligas de ferro fundido existentes, o cinzento é o mais utilizado em virtude de sua boa resistência mecânica, excelente usinabilidade e alta capacidade de amortecimento de energia vibracional. Além disso, sua alta fluidez na temperatura de fundição, possibilita a fundição de peças com formas complexas; a contração do fundido é baixa; e os ferros fundidos cinzentos estão entre os materiais metálicos mais baratos que existem, fatores que justificam sua predileção.

Callister Jr. e Rethwisch (2021) explicam que os teores de carbono nos ferros fundidos cinzentos variam entre 2,5 %p e 4,0 %p e de silício entre 1,0 %p e 3,0 %p e pode-se observar a presença de grafita na forma de flocos envolvidos por uma matriz de ferrita α ou de perlita, que conferem à superfície fraturada uma aparência acinzentada — da qual se originou sua denominação.

A Figura 1 ilustra a microestrutura típica do ferro cinzento FUCO® FC 300 é constituída de grafita lamelar, forma VII, tipo A, tamanho 3 - 6, conforme definição da norma ASTM A 247 (exemplo utilizado nos experimentos deste trabalho), em que a matriz é predominantemente perlítica, podendo ter até 10% de ferrita. A periferia é constituída de grafita tipo D, tamanho 6-8, em matriz ferrítica/perlítica, podendo ter aproximadamente 5% de carbonetos dispersos (TUPY, 2014).

Figura 1 – Microestrutura típica de ferro fundido cinzento no centro (a) e na periferia (b).



Fonte: TUPY (2014)

Ainda segundo Callister Jr. e Rethwisch (2021),

Mecanicamente, o ferro cinzento é comparativamente pouco resistente e frágil em tração, como consequência da sua microestrutura; as extremidades dos flocos de grafita são afiladas e pontiagudas, e podem servir como pontos de concentração de tensões quando uma tensão externa de tração é aplicada. A resistência e a ductilidade são muito maiores sob cargas de compressão.

O FUCO® FC 300, modelo de ferro fundido cinzento utilizado neste trabalho, possui uma estrutura essencialmente perlítica (que lhe proporciona elevadas propriedades mecânicas, bom acabamento superficial e boa temperabilidade) e boa estanqueidade (que possibilita sua utilização em peças para componentes hidráulicos sujeitos a altas pressões). Sua microestrutura é constituída de grafita lamelar, forma VII, tipo A, tamanho 3 - 6, conforme definição da norma ASTM A 247 (TUPY, 2014)

2.2 Usinabilidade do ferro fundido cinzento

O conceito de usinabilidade está diretamente ligado ao desgaste da ferramenta de corte, no que se refere a alta usinabilidade, portanto a ferramenta terá maior vida útil.

Os ferros fundidos são considerados por ser materiais de alta usinabilidade. A grafita presente no ferro fundido cinzento pode agir de forma benéfica auxiliando na lubrificação da ferramenta e na quebra do cavaco (GUESSER, 2019).

2.2.1 Grandezas Físicas no Processo de Corte

Os princípios para obtenção de uma superfície desejada utilizando uma máquina-ferramenta é a escolha certa do movimento de corte apropriado entre peça-ferramenta (MACHADO et al., 2015). A norma NBR 6162 – Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais: terminologia trata desses conceitos. Algumas definições serão apresentadas dessa norma.

2.2.2 Movimentos

Na usinagem temos diversos tipos de movimentos com ou sem retirada de cavaco, movimentos que se associa na retirada de cavacos (Figura 2):

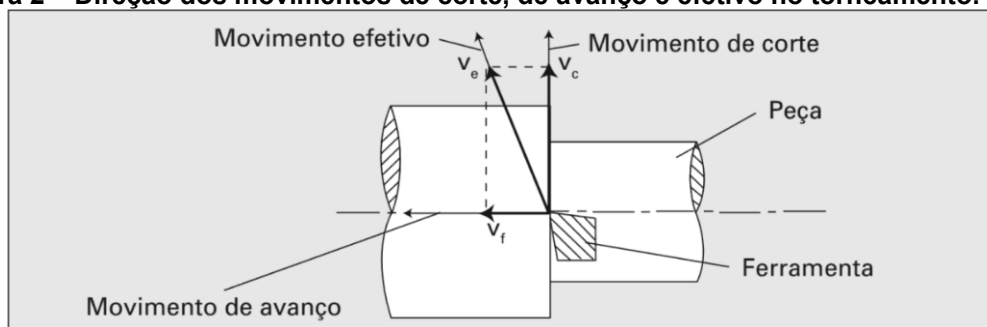
- Movimento de corte: aplica-se entre a peça e a aresta de corte, tal que se não estiver movimento de avanço, terá apenas uma única retirada de cavaco;
- Movimento de avanço: aplica-se entre a peça e a aresta de corte, tal que aliado ao movimento de corte resulta na retirada contínua do cavaco;
- Movimento efetivo: é a resultante dos movimentos de corte e avanço.

Movimentos que não resultam retirada de cavaco:

- Movimento de aproximação: aplica-se entre a peça e a aresta de corte, na qual ao chegar na eminência de encostar para ponto de referência e/ou ponto de início da peça;

- Movimento de correção: realizado para compensar o desgaste da ferramenta ou dilatação térmica da peça;
- Movimento de recuo: Aplica-se para retirar a ferramenta de corte no término da usinagem (MACHADO et al., 2015);
- Movimento de ajuste: aplica-se para determinar a espessura a ser retirada de material entre a peça e a aresta de corte (MACHADO et al., 2015).

Figura 2 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.



Fonte: MACHADO et al. (2015)

2.2.3 Percurso da ferramenta na peça:

- Percurso de corte (L_c): espaço percorrido a partir do ponto de referência da aresta de corte sobre a peça, seguindo a direção do corte;
- Percurso de avanço (L_f): espaço percorrido a partir do ponto de referenciada aresta de corte sobre a peça, seguindo a direção do avanço;
- Percurso efetivo (L_e): espaço percorrido a partir do ponto de referência da aresta de corte sobre a peça, seguindo a direção efetiva de corte (MACHADO et al., 2015).

2.2.4 Velocidades

A velocidade de corte (v_c), se refere a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta. Essa velocidade é calculada pela Equação 1:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} = [m/min] \quad (1)$$

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta em mm

n = número de rotações por min (rpm)

Velocidade de avanço (v_f) é dada a partir do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção do sentido de avanço que é dada pela Equação 2:

$$v_f = f \cdot n = [mm/min] \quad (2)$$

Onde:

f = avanço em mm/rot (milímetros por rotação)

A velocidade efetiva de corte (v_e) é a resultante da soma das velocidades de corte e a velocidade de avanço. É calculado somando vetorialmente conforme a Equação 3:

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f = [m/min] \quad (3)$$

Para cada operação de usinagem temos uma melhor combinação das variáveis de corte, por isso é qual importante determinar correto a velocidade de corte para tal operação (MACHADO et al., 2015).

2.3 Consumo energético, temperatura de corte e rugosidade superficial

A preocupação com o consumo energético tem ganhado destaque no cenário industrial, cujos processos e atividades de fabricação são responsáveis por 90% do consumo neste contexto, sendo os processos mecânicos os maiores responsáveis pelo consumo energético (SALAH e JAFARI, 2016; HE et al., 2017; JIA, et al., 2018).

Rigatti (2010) aponta que alto consumo de energia específica de corte na usinagem gera elevadas taxas de transferência de calor e grandes tensões residuais

na peça, enquanto os valores energéticos baixos resultam em menor dano à peça, favorecendo a eficiência da ferramenta de corte e a qualidade do produto final.

Matumoto (2016) comparou a eficiência energética entre tornos convencionais e os equipados com comando numérico (CNC), e concluiu que, embora os CNCs apresentem consumo de energia médio maior, seu consumo global e incremento da produtividade em relação aos convencionais proporciona, no resultado final, um consumo por peça menor para este tipo de torno.

Trent (1985) salienta que a maior parte da demanda de potência na usinagem é convertida em calor, o que torna relevante conhecer as variáveis influentes durante a geração de calor neste processo. Toenshoff e Denkena (2013) apontam que o calor gerado pelo trabalho da deformação plástica, do cisalhamento e do atrito são transferidos para a ferramenta, para o cavaco e para a peça, podendo afetar suas propriedades mecânicas e forças. Assim, observa-se que a temperatura de torneamento é um fator decisivo na otimização do processo de usinagem.

Guesser (2019) verificou, no processo de usinagem do ferro fundido cinzento, que a rugosidade é influenciada pelas marcas de avanço da ferramenta de corte e pelas deformações e microfraturas que ocorrem em altas taxas de deformação típicas do processo de formação do cavaco. Assim, além dos importantes efeitos dos parâmetros de corte, a integridade se torna dependente também dos parâmetros metalúrgicos, devido ao seu impacto na resistência mecânica e à fratura do material, que pode favorecer a propagação de trincas durante o processo de deformação plástica causada pela ferramenta de corte.

Dessa forma, observa-se a relevância e necessidade de se analisar as causas, comportamentos e efeitos do consumo energético, temperatura de corte e rugosidade superficial no processo de torneamento do ferro fundido cinzento,

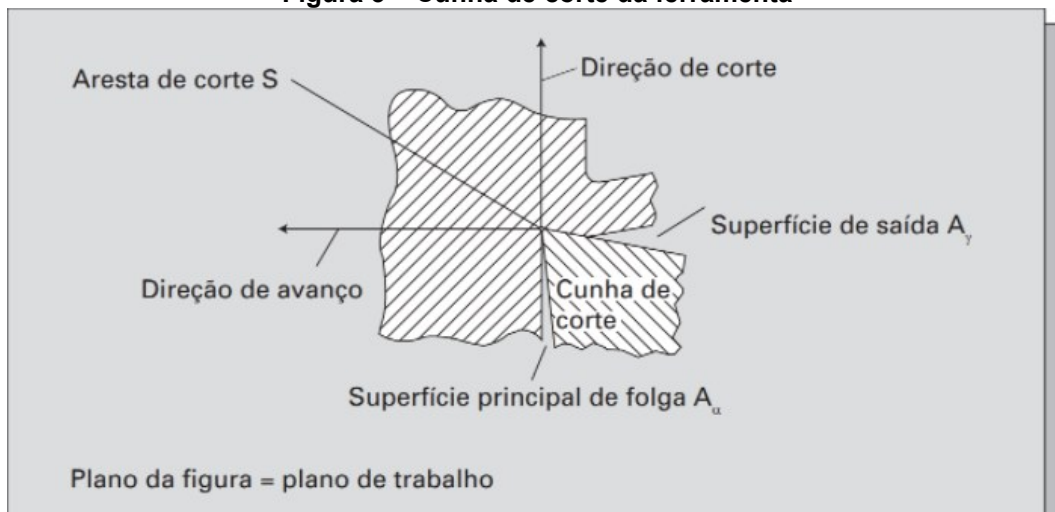
2.4 Geometria da ferramenta de corte

A geometria de corte é a principal influência na eficácia da usinagem. De nada adiante ter o melhor material se a geometria da ferramenta não estiver com os ângulos corretos. Devido a isso fez-se ter uma norma específica para determinar os ângulos da cunha cortante, chamada NBR 6163 (MACHADO et al., 2015).

2.4.1 Definições

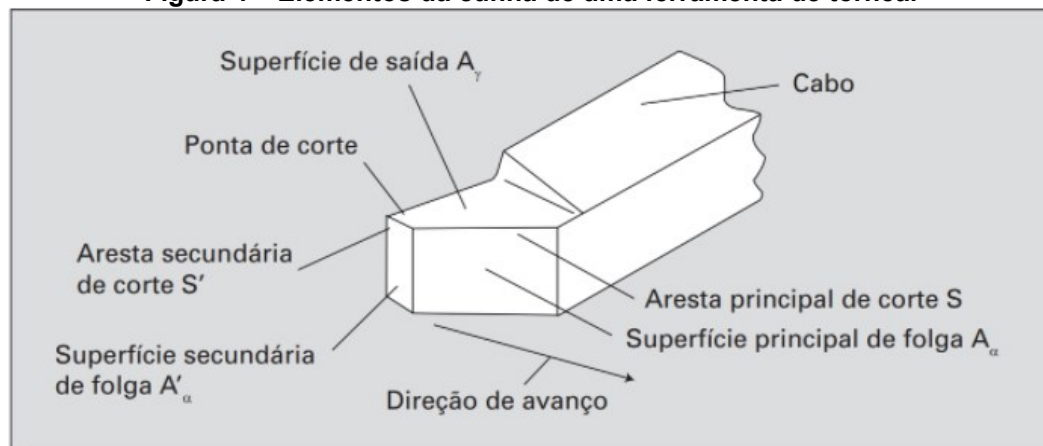
Em um modo geral podemos definir os elementos de uma cunha cortante conforme Figura 3. A Figura 4 mostra os elementos de corte de uma cunha para torneamento.

Figura 3 – Cunha de corte da ferramenta



Fonte: Machado et al. (2015)

Figura 4 – Elementos da cunha de uma ferramenta de tornear

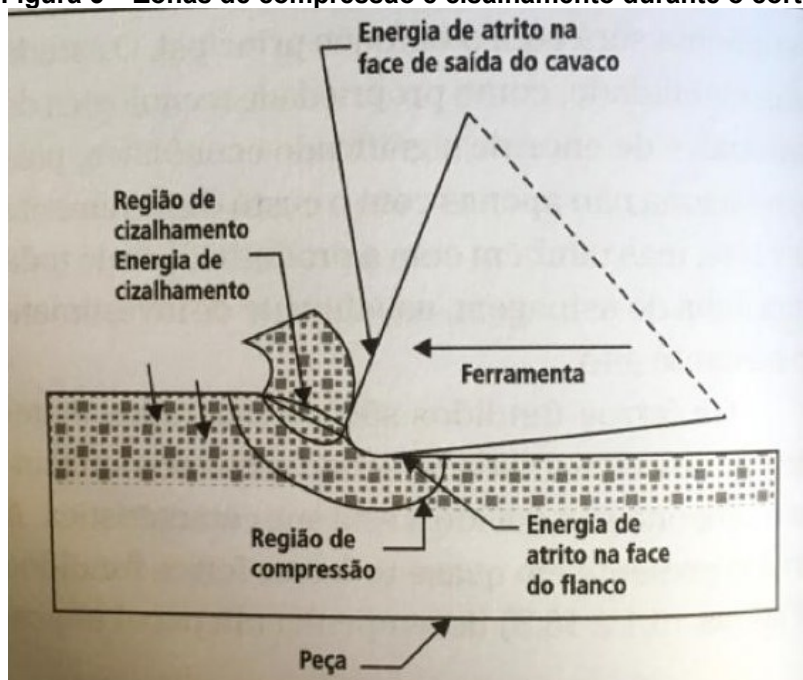


Fonte: Machado et al. (2015)

Existem quatro características que todas as ferramentas de corte compartilham, elas são: ângulo de posição, raio de ponta, ângulo de saída e ângulo de folga. Elas precisam estar bem ajustadas para que a usinagem saia de forma correta, conforme a especificação do material que vai ser usinado (MACHADO et al., 2015).

Ao operar uma máquina de torno para remoção de material, a ferramenta faz com que a região de vizinhança tenha deformações onde o cavaco é gerado conforme mostra a Figura 5, mostrando a formação da região de compressão à frente e abaixo da ferramenta, assim como onde ocorre a ruptura do cavaco.

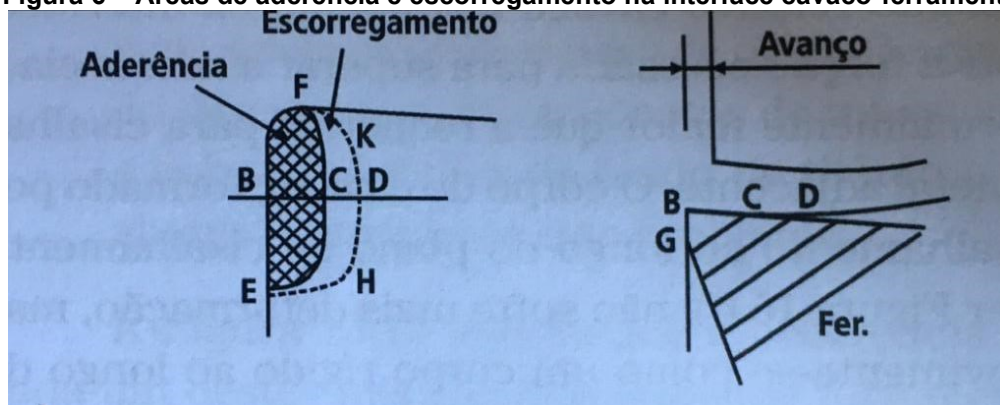
Figura 5 – Zonas de compressão e cisalhamento durante o corte.



Fonte: GUESSER (2019)

No processo de formação de cavaco é deformado plasticamente todo o material a ser removido, para que isso seja feito demanda uma quantidade grande de energia. No processo que remoção de cavado é formado uma nova superfície (Figura 6) tal que para essa nova superfície a energia gasta em comparação com a energia de retirada do cavaco é mínima (MACHADO et al., 2015).

Figura 6 – Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco-ferramenta



Fonte: GUESSER (2019)

2.1.1 Insertos na usinagem

Reis (2017) afirma que a ferramenta de corte no torneamento influencia sobre diversos parâmetros importantes de entrada e saída, devendo ser ajustados conforme a aplicação pretendida. Dentre eles, a autora cita a força de corte e potência, a qualidade da superfície usinada, a temperatura de corte e a vida e o desgaste da ferramenta de corte. Ainda considera que fatores como composição química da ferramenta de corte, parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço), geometria da ferramenta e tempo de corte são diretamente influentes sobre o comportamento da força de usinagem.

Durante a operação de corte, grande parte da potência consumida se transforma em energia térmica, que acaba se concentrando no gume da ferramenta, causando problemas de natureza técnica e econômica (TRENT; WRIGHT, 2000). Segundo Machado et al. (2011), o contato direto entre a ferramenta de corte e a peça usinada provoca uma elevação da temperatura na zona de corte, o que estimula o aparecimento de mecanismos de desgaste na ferramenta.

De acordo com Astakhov (2006), em um sistema atuante sob a temperatura de corte ótima, ocorre a menor taxa da tensão de ruptura, resultando em um valor mínimo de trabalho mínimo na remoção de cavaco. Ainda, variações no diâmetro da peça torneada alteram de forma significativa a velocidade de corte ótima (cujas taxas de desgaste da ferramenta é mínima), mas não interferem na temperatura de corte ótima.

Reis (2017) destaca que o desgaste da ferramenta de corte é inerente ao processo de usinagem, o que requer sua substituição em algum momento. Entretanto, investigações a respeito de seu comportamento, mecanismos e padrão de desgaste

possibilita otimizar sua vida útil e, conseqüentemente, aumentando a produtividade do processo ao reduzir o tempo de interrupção para troca de insertos e minimizando custos adicionais, ainda que monetariamente reduzidos.

Podem-se distinguir três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: *avaria*, *desgaste* e *deformação plástica* [...]. Esses três fenômenos causam a mudança na geometria da aresta de corte. Os dois primeiros, geralmente, promovem a perda de material, enquanto o último promove somente o seu deslocamento (MACHADO et al., 2015).

Para Astakhov (2006), além do tempo e percurso de corte, o desgaste da ferramenta é influenciado também por sua geometria, parâmetros de corte, propriedades da peça, presença e propriedades de fluidos de corte, entre outros fatores muitos outros parâmetros do sistema de usinagem.

Das et al. (2016) observaram que a geometria da pastilha tem um grande efeito nas forças de usinagem na operação de torneamento. Insertos quadrados oferecem maior força de corte em relação à forma rômica devido à sua maior robustez e tenacidade conferidas pelo ângulo de ponta de 90° em detrimento ao ângulo de ponta de 80° relativo ao inserto rômico, o que causa a produção de produz força de corte excessiva durante a usinagem e consome energia de corte adicional.

Stoeterau (2004) elucida que a geometria da peça a ser usinada, suas tolerâncias, seu material e qualidade superficial definem o formato do inserto a ser utilizado, cujas formas mais comuns são ordenadas pela resistência à tensão na Figura 7. Observa-se que a estreita relação da resistência da pastilha com seu ângulo de ponta, bem como com a combinação de ângulos de saída negativos e positivos, já que ângulos negativos garantem maiores ângulos de cunha e, conseqüentemente, maior resistência.



Fonte: Stoeterau (2007)

Com relação à geometria do inserto, Stoeterau (2004) aponta as principais características:

- Insertos com ângulo de saída negativo:

- dobro de superfície de corte e maior resistência;
- avanço e profundidade de corte maiores;
- gera um aumento nas forças de corte;
- exigem maior potência e rigidez do torno.
- Insertos com ângulo de saída positivo:
 - bons para trabalho em material mais dúctil, como aços de baixo carbono, ligas de alta temperatura e materiais que endurecem durante a usinagem.
- Insertos positivo-negativos:
 - combinam a ação de corte dos positivos com a resistência dos negativos;
 - possuem gumes realçados ou sulcos na face;
 - em insertos revestidos, são capazes de remover material a altas velocidades e avanços, com aumento do volume de cavacos;
 - há diversos modelos, de diferentes fabricantes, com diferentes formas de sulcos.

Assim, visando diagnosticar e analisar o comportamento da ferramenta de corte no processo de torneamento, avaliou-se o desempenho de duas geometrias de inserto – redondo e quadrado – sob a mensuração de variáveis indicativas de consumo energético, temperatura e rugosidade.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento deste trabalho.

1.1 Materiais

Para realização dos experimentos que originaram as conclusões deste trabalho, os seguintes materiais foram utilizados:

- Corpo de prova de ferro fundido cinzento FC-300 – 4 pol. (Figura 8).

Figura 8 – Peça de FC-300 utilizada para usinagem



Fonte: Autoria própria (2022)

- Inserto quadrado como ferramenta de corte (Figura 9).

O inserto quadrado utilizado foi da marca MITSUBISHI MATERIALS, modelo SNMG120404-MA, classe P, $f=0,28-0,14$ mm/rot; $V_c= 340-200$ m/min.

Figura 9 – Inserto quadrado



Fonte: Autoria própria (2022)

- Inserto redondo como ferramenta de corte (Figura 10).

O inserto redondo utilizado foi da marca SANDVIK, modelo RCKT1204 M0-PM 4030, classe P, $f_z = 0.24 \text{ mm}$ (0.10-0.28); $V_c = 215 \text{ m/min}$ (250-205).

Figura 10 – Inserto redondo



Fonte: Autoria própria (2022)

- Suporte para inserto quadrado (Figura 11).

O suporte de torneamento utilizado no inserto quadrado foi da marca Black Tools, modelo SRDCN 25x25 M12, possuindo as seguintes especificações:

Material: Aço SAE 4140

Tamanho: 20,0 x 20,0 x 125,0mm

Bitola: 20,0 x 20,0mm

Comprimento Total: 125,0mm

Sentido Do Corte: Direito

Inserto Compatível: SNMG 12

Tratamento Térmico: 40 HRC a 42 HRC

Figura 11 – Suporte para inserto quadrado



Fonte: Autoria própria (2022)

- Suporte para inserto redondo (Figura 12).

O suporte de torneamento utilizado no inserto redondo foi da marca Black Tools, modelo SRDCN 25x25 M12, possuindo as seguintes especificações:

Material: Aço SAE 4140

Tamanho: 25,0x25,0x150,0mm

Bitola: 25,0 X 25,0mm

Comprimento Total: 150,0mm

Peso Líquido: 0,80 kg

Sentido Do Corte: Neutro

Inserto Compatível: MT 12

Tratamento Térmico: 40 HRC a 42 HRC

Figura 12 – Suporte para inserto redondo



Fonte: Autoria própria (2022)

- Torno mecânico da marca Romi, modelo Tormax 20 (Figura 13), localizado no Laboratório de Usinagem H006 – Bloco H da UTFPR-PB.

Figura 13 – Torno utilizado para o processo de usinagem (torneamento) da peça FC-300



Fonte: Autoria própria (2022)

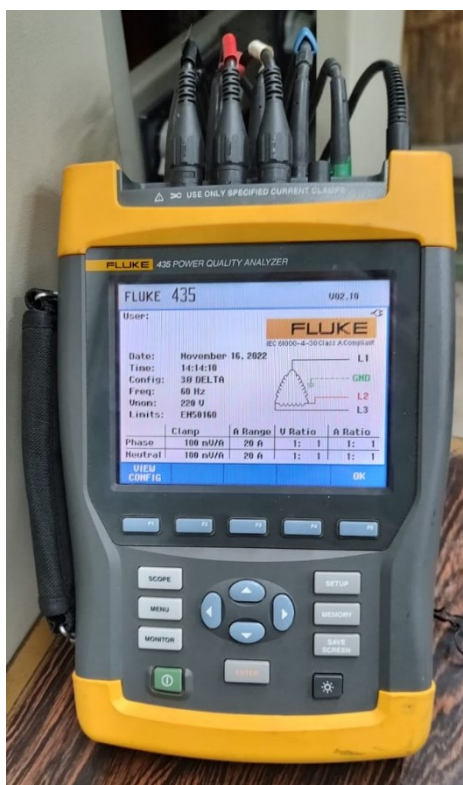
- Analisador da qualidade de energia (Modelo FLUKE 435) (Figura 14).

O equipamento utilizado para o monitoramento do consumo de energia foi o analisador de qualidade de energia Fluke435 - Número de entradas 4 (3 fases + neutro) CA, configuração Delta, frequência 60 Hz, Tensão nominal 220V. Voltagem máxima de entrada 1000 Vrms. Limite de voltagem nominal selecionável: 1 V a 1000 V de acordo com IEC61000-4-30. A frequência de coleta da amostragem foi de 0,2 Hz em cada canal simultaneamente. Amostragem RMS 5000 amostras em 10/12 ciclos

em conformidade com IEC 61000-4-30. Sincronização PLL 4096 amostras em 10/12 ciclos em conformidade com IEC 61000-4-7.

Os dados de leituras de tensão e corrente simultâneas, foram importados pelo software Power Log que realiza a contagem dos dados coletados. Os dados do consumo de energia foram coletados os através da medição de potência do equipamento ao desenvolver cada trajetória.

Figura 14 – Analisador energético Modelo FLUKE 435



Fonte: Autoria própria (2022)

- Câmera termográfica FLIR EX Series (Figura 15).

A câmera termográfica utilizada foi da marca FLIR, modelo E5-XT, possuindo as seguintes características:

Resolução de IV: 160 × 120 (19.200 pixels)

Sensibilidade térmica/NETD: <0,10 °C/<100 mK

Resolução espacial (IFOV): 5,2 mrad

Campo de visão: (FOV) 45° × 34°

Número F: 1,5

Frequência da imagem: 9 Hz

Faixa espectral: 7,5-13 μm

Faixa de temperatura de objetos: -20 °C a 400 °C em dois intervalos

Precisão: ± 2 °C ou $\pm 2\%$ da leitura para temperatura ambiente 10 °C a 35 °C e temperatura de objetos acima de 0 °C

Faixa de temperatura operacional: -15 °C a 50 °C

A câmera termográfica foi ajustada para a emissividade do ferro fundido, cujo valor é, $\epsilon=0.64$

Figura 15 – Câmera termográfica FLIR EX Series para mensuração da temperatura do processo de torneamento



Fonte: Autoria própria (2022)

- Rugosímetro Mitutoyo SJ-210. (Figura 16).

Para a avaliação quantitativa da rugosidade superficial utilizou-se um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201. Este equipamento possui resolução de 0,01 μm e agulha de diamante com raio de ponta 5 μm .

Figura 16 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 para análise da qualidade do acabamento da peça torneada



Fonte: Autoria própria (2022)

1.2 Metodologia

Para realização dos experimentos como forma de se obter dados para análise dos parâmetros ótimos de usinagem por torneamento, inicialmente fixou-se o corpo de prova e o inserto com suporte em seus respectivos compartimentos no torno. Posteriormente ajustou-se os parâmetros de controle (profundidade de corte, avanço, rotação e velocidade de corte) e deu-se a partida na máquina. Iniciou-se, então, o processo de torneamento, e, ao passo em que o cavaco ia sendo retirado da peça, foram registradas as temperaturas da sistema inserto-corpo de prova-cavaco em quatro posições – primeiro, segundo, terceiro e quarto quartis do corpo de prova durante o processo de usinagem. Finalizado o torneamento, realizou-se a mensuração da rugosidade utilizando o rugosímetro Mitutoyo SJ-210.

Durante todo o processo, desde o acionamento do torno até seu desligamento, foi realizada, para cada conjunto de parâmetros, a mensuração do

consumo energético utilizando o analisador da qualidade de energia modelo FLUKE 435.

Esta rotina foi realizada para 12 conjuntos de parâmetros para cada inserto – quadrado e redondo, conforme Tabela 1. Para cada geometria de inserto foram alternadas as profundidades de corte entre 0,25 e 0,50 mm; para cada profundidade de corte experimentou-se o parâmetro avanço de 0,1 e 0,2 mm/rot, e para cada avanço variou-se a velocidade de rotação do torno entre os valores 230, 630 e 1000 rpm. É relevante mencionar que, para cada bateria de parâmetros, foi utilizado um inserto novo a fim de evitar a influência do desgaste da ferramenta nos resultados.

Tabela 1 – Sessões de usinagem realizadas experimentalmente

Geometria do Inserto	Profundidade de Corte (mm)	Avanço [mm/rot]	rpm	Velocidade de corte [m/min]
Quadrado	0,25	0,1	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
		0,2	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
	0,5	0,1	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
		0,2	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
Redondo	0,25	0,1	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
		0,2	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
	0,5	0,1	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16
		0,2	250	78,54
			630	197,92
			1000	314,16

Fonte: Autoria própria (2023)

Após a realização de todo o experimento e registro dos parâmetros envolvidos, foram realizados o tratamento e análise dos dados, que serão detalhados no próximo capítulo.

Para fins de análise da eficiência do processo de usinagem e comparações com a literatura calculou-se, ainda, a Taxa de remoção de material (Equação 4), variável que estima a quantidade de material removido por unidade de tempo a partir do produto entre os parâmetros profundidade de corte, velocidade de corte e avanço para o processo de torneamento cilíndrico.

$$Q = V_c * a_p * f_n \quad (4)$$

Onde:

Q = Taxa de remoção de material [cm³/min]

V_c = Velocidade de corte [m/min]

a_p = Profundidade de corte [mm]

f_n = Avanço [mm/rot]

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. A atribuição de cores aos valores alcançados deu-se de forma a associar as cores mais frias (próximas ao verde) aos melhores dados e as cores mais quentes (próximas ao vermelho) aos desempenhos menos satisfatórios. Quanto mais intensa a saturação da cor verde, mais próxima do padrão ótimo o resultado se encontra, e quanto mais intensa a cor vermelha, mais distante do padrão ideal. Nesse sentido observa-se, por exemplo, que o melhor resultado para consumo energético (consequentemente menor consumo) de ambos os insertos redondo e quadrado foram obtidos com os parâmetros de profundidade de corte de 0,25 mm; avanço de 0,1 mm/rot e velocidade de rotação do torno de 250 rpm, enquanto o consumo menos satisfatório (maior consumo energético) foi observado para os parâmetros de profundidade de corte de 0,5 mm; avanço de 0,2 mm/rot e velocidade de rotação do torno de 1000 rpm.

Tabela 2 – Resultados obtidos a partir do experimento utilizando inserto quadrado

INSERTO QUADRADO								
Ensaio	Profundidade de Corte - ap [mm]	Avanço - f [mm/rot]	rpm	Velocidade de corte [m/min]	Temperatura média T [°C]	Rugosidade aparente média (Cut off - 0,8 µm)	Consumo energético [kWh]	Taxa de remoção Q [cm³/min]
Ensaio 1	0,25	0,1	250	78,54	68,5	2,6590	0,735	1,9635
	0,25	0,1	630	197,92	62,6	2,0810	1,167	4,94802
	0,25	0,1	1000	314,16	55,4	1,1500	1,557	7,854
Ensaio 2	0,25	0,2	250	78,54	72,9	5,0950	0,830	3,927
	0,25	0,2	630	197,92	82,7	3,8010	1,455	9,89604
	0,25	0,2	1000	314,16	88,2	2,6370	1,867	15,708
Ensaio 3	0,5	0,1	250	78,54	118,5	2,7135	0,739	3,927
	0,5	0,1	630	197,92	78,2	1,6250	1,272	9,89604
	0,5	0,1	1000	314,16	72,3	1,0210	1,766	15,708
Ensaio 4	0,5	0,2	250	78,54	115,0	4,3980	0,869	7,854
	0,5	0,2	630	197,92	87,6	3,7090	1,610	19,79208
	0,5	0,2	1000	314,16	118,3	3,6125	2,179	31,416

Fonte: Autoria própria (2022)

A decisão pela escolha dos parâmetros mais favoráveis condiciona-se à aplicação do produto final e dos requisitos do usuário. Assim, considerando um contexto em que se priorize a minimização da rugosidade superficial em detrimento

do consumo energético e se faça indispensável a utilização de inserto quadrado, os melhores resultados obtidos nesta circunstância referem-se aos parâmetros de profundidade de corte de 0,5 mm; avanço de 0,1 mm/rot e velocidade de rotação do torno de 1000 rpm. Entretanto, se a prioridade se dedicar à diminuição do consumo energético, a melhor solução reside nos parâmetros de profundidade de corte de 0,25 mm; avanço de 0,1 mm/rot e velocidade de rotação do torno de 250 rpm.

Tabela 3 – Resultados obtidos a partir do experimento utilizando inserto quadrado

INSERTO REDONDO								
Ensaio	Profundidade de Corte - ap [mm]	Avanço - f [mm/rot]	rpm	Velocidade de corte [m/min]	Temperatura média T [°C]	Rugosidade aparente média (Cut off - 0,8 µm)	Consumo energético [kWh]	Taxa de remoção Q [cm³/min]
Ensaio 1	0,25	0,1	250	78,54	95,4	1,6955	0,705	1,9635
	0,25	0,1	630	197,92	87,2	1,8825	1,08	4,94802
	0,25	0,1	1000	314,16	101,7	1,334	1,615	7,854
Ensaio 2	0,25	0,2	250	78,54	124,3	2,2685	0,775	3,927
	0,25	0,2	630	197,92	125,0	1,8955	1,428	9,89604
	0,25	0,2	1000	314,16	116,8	1,5745	2,047	15,708
Ensaio 3	0,5	0,1	250	78,54	128,5	1,9275	0,758	3,927
	0,5	0,1	630	197,92	138,8	1,8755	1,339	9,89604
	0,5	0,1	1000	314,16	166,8	1,19	1,989	15,708
Ensaio 4	0,5	0,2	250	78,54	141,0	1,9165	0,911	7,854
	0,5	0,2	630	197,92	191,5	1,7115	1,787	19,79208
	0,5	0,2	1000	314,16	203,0	1,585	2,577	31,416

Fonte: Autoria própria (2022)

Ainda, se permanecerem as exigências de prioridade, alterando-se o requisito de utilização do inserto redondo no lugar do quadrado, os parâmetros para obtenção de menor rugosidade ou menor consumo de energia permanecem os mesmos que os obtidos para o inserto quadrado.

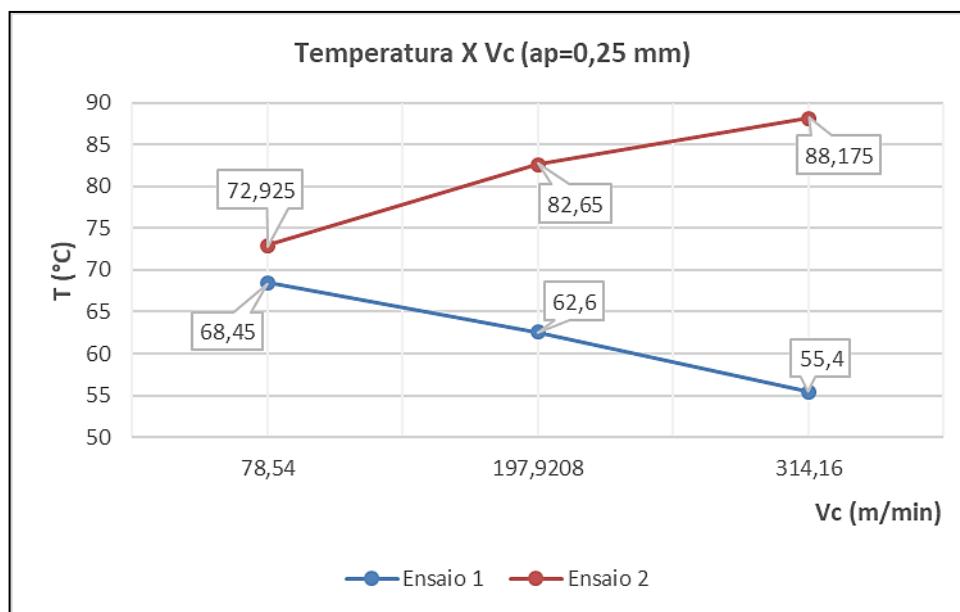
Por outro lado, sendo possível optar por qualquer um dos insertos analisados, de forma que se obtenha a menor rugosidade absoluta, desconsiderando-se todos os demais parâmetros, observa-se o melhor desempenho atribuído ao inserto quadrado (rugosidade de 1,02 µm), enquanto o inserto redondo alcança melhores resultados na priorização do consumo energético reduzido, e na análise conjunta dos parâmetros envolvidos.

Para os ensaios 2 e 3 de ambos os insertos, cuja taxa de remoção alcançou os maiores valores (3,93 a 15,71 cm³/min), observa-se uma redução do consumo

energético ao diminuir o avanço e aumentar a profundidade de corte. No inserto quadrado, a redução de consumo energético para estes parâmetros é relativamente significativa (redução média de 0,4 kWh), entretanto, no inserto redondo essa diferença mostra-se bastante discreta (redução média de 0,06 kWh), possivelmente em decorrência do raio de corte da ferramenta redonda, que tende ao infinito, o que faz com que o consumo energético sofra pouca variabilidade com a alteração dos parâmetros, proporcionando uma uniformidade no processo.

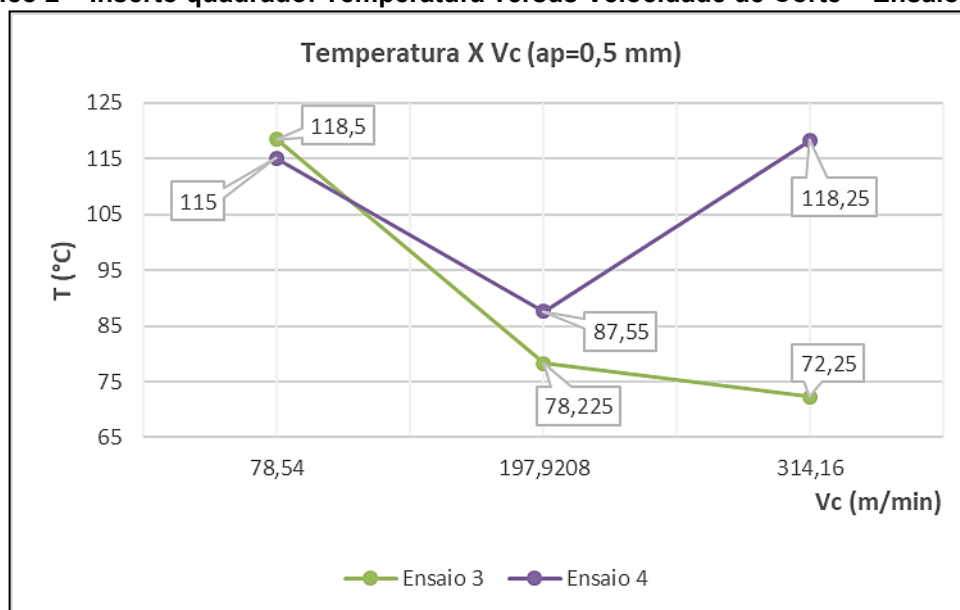
No cenário de utilização de 0,2 mm/rot para avanço e 0,5 mm de profundidade de corte, o inserto quadrado apresenta uma redução média de 11% do consumo energético em relação ao inserto redondo. No entanto, a rugosidade média obtida pelo inserto quadrado ao utilizar estes parâmetros apresentou-se 124,3% maior que o inserto redondo.

Os Gráficos 1 e 2, relativos ao Inserto quadrado, correlacionam temperatura e velocidade para profundidades de corte de 0,25 e 0,50 mm. Percebe-se no Gráfico 1 que, para o avanço de 0,1 mm/rot, a curva da temperatura comporta-se de forma ascendente com o aumento da velocidade de corte, enquanto para o avanço de 0,2 mm/rot a curva tem um comportamento descendente. Tal resultado aponta coerência, uma vez que, com o aumento do avanço, a incidência da ferramenta de corte sobre uma mesma região da peça usinada diminui, o que resulta em uma menor temperatura em relação ao avanço reduzido. No Gráfico 2, por sua vez, tratando-se de uma profundidade de corte maior, a magnitude da temperatura encontra-se elevada desde o primeiro momento. No segundo momento, a temperatura referente a ambos os avanços é reduzida, sugerindo o efeito lubrificante gerado pelo atrito entre o inserto e a grafita presente na composição de liga da peça sob as condições da referida profundidade de corte. A partir do segundo momento, observa-se o fenômeno ascendente/descendente relatado na análise do Gráfico 1.

Gráfico 1 – Inserto quadrado: Temperatura versus Velocidade de Corte – Ensaios 1 e 2

(Ensaio 1: ap=0,25 mm/ f=0,1 mm/rot; Ensaio 2: ap=0,25 mm/ f=0,2 mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 2 – Inserto quadrado: Temperatura versus Velocidade de Corte – Ensaios 3 e 4

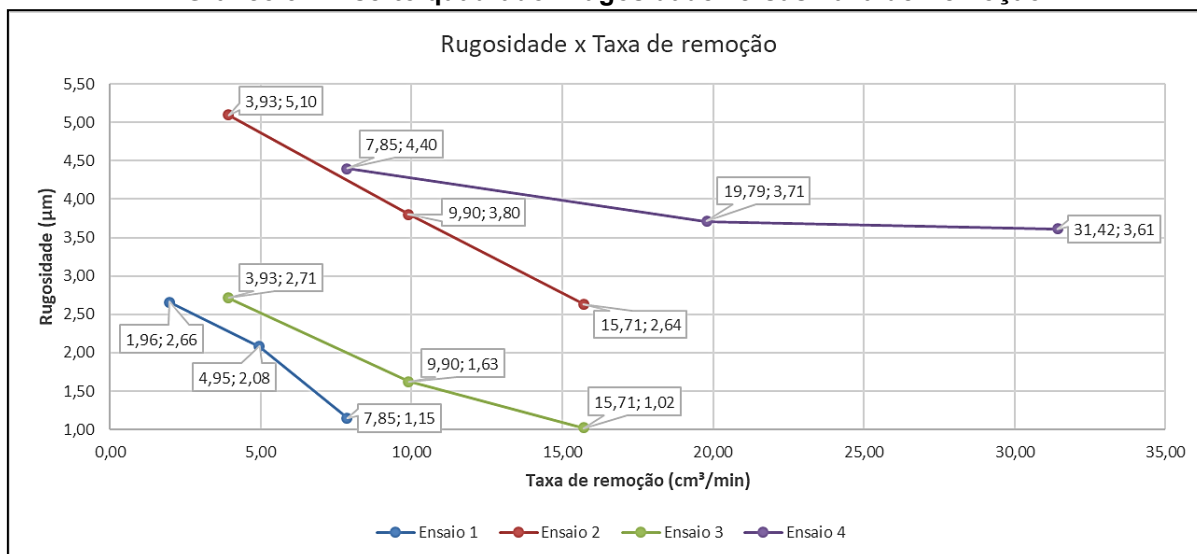
(Ensaio 3: ap=0,5 mm/ f=0,1 mm/rot; Ensaio 4: ap=0,5 mm/ f=0,2 mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 3 apresenta a correlação entre as variáveis rugosidade e taxa de remoção para os quatro ensaios analisados sobre a análise do Inserto quadrado. É possível observar o comportamento decrescente da rugosidade ao passo que a taxa de remoção aumenta. Este padrão reflete a influência da combinação dos parâmetros

– profundidade de corte, avanço e velocidade de corte – sobre o acabamento final da peça.

Gráfico 3 – Inserto quadrado: Rugosidade versus Taxa de Remoção



(Ensaio 1: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

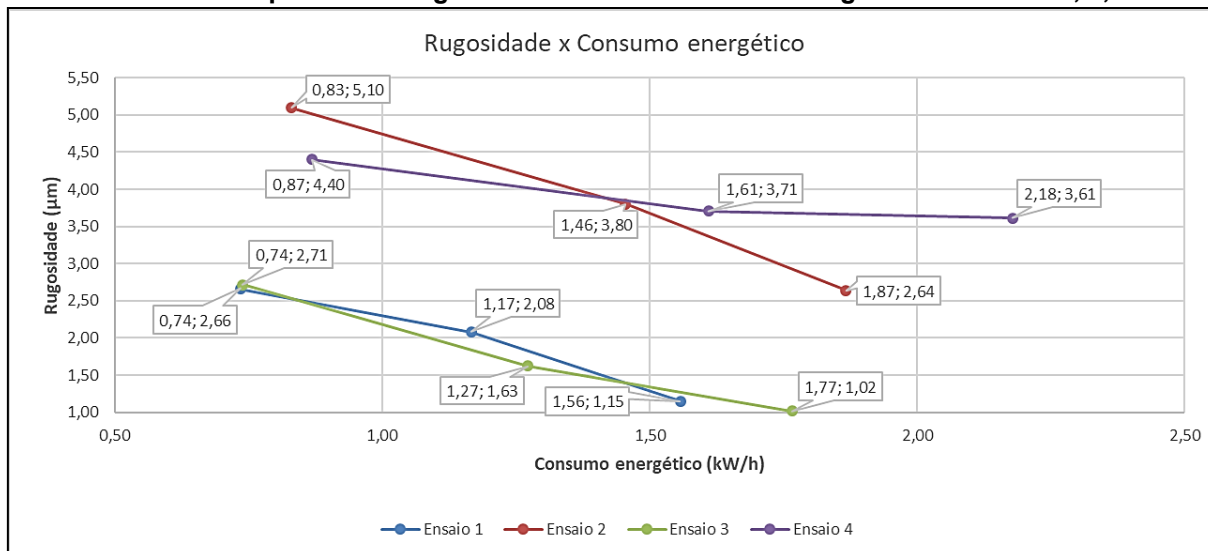
Observa-se que os Ensaios 2 e 3 apresentam a mesma taxa de remoção, porém, com resultados de rugosidade bastante discrepantes, o que sugere que uma profundidade de corte menor associada a um avanço maior produz um acabamento menos satisfatório, enquanto observa-se melhores resultados de rugosidade para profundidades de corte maiores associadas a uma menor taxa de avanço. Assim, compreende-se que a combinação inadequada de parâmetros produz resultados insatisfatórios.

Ainda tratando do Inserto quadrado, o Gráfico 4 confronta a rugosidade e o consumo energético para os ensaios 1 a 4, que mostra também decrescente, embora menos abrupta, a curva de acabamento da peça. Este resultado complementa as análises dos Gráficos 3 e 5, mostrando que o aumento da taxa de remoção pode proporcionar um melhor acabamento, e um consumo energético reduzido, o que proporciona o entendimento de que a relação entre a qualidade do acabamento e o consumo energético são diretamente proporcionais (ou seja, há uma relação de proporcionalidade inversa entre a rugosidade e o consumo de energia no processo de torneamento).

É importante ressaltar que o consumo energético se relaciona diretamente à temperatura do sistema, uma vez que, com uma maior dissipação da energia na

forma de calor, há a necessidade de maior consumo energético para realização do torneamento.

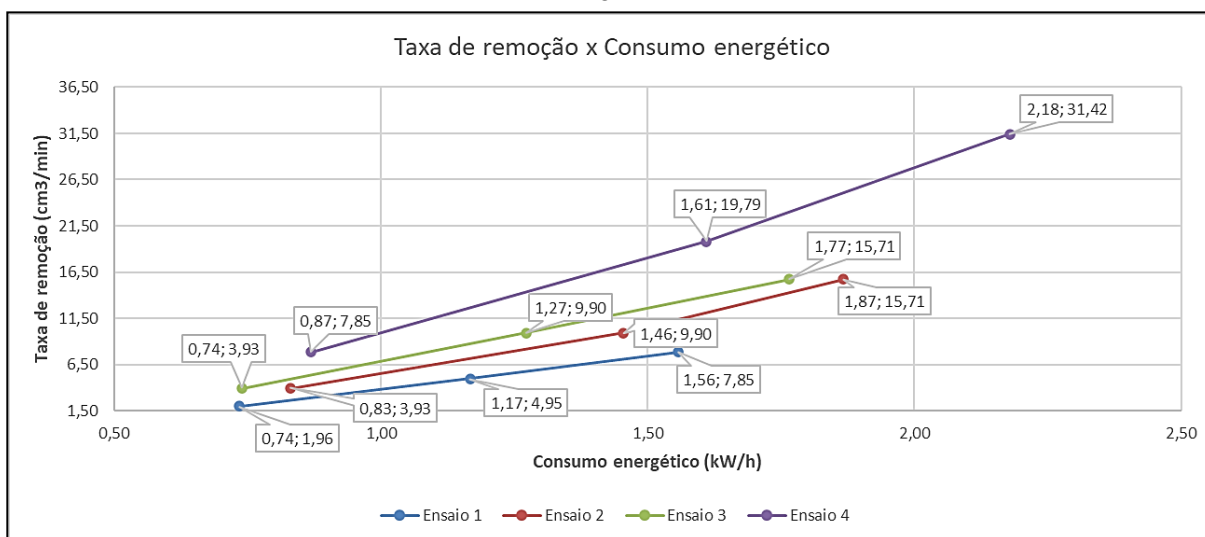
Gráfico 4 – Inserto quadrado: Rugosidade versus Consumo Energético – Ensaios 1, 2, 3 e 4



(Ensaio 1: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 5 – Inserto quadrado: Taxa de Remoção versus Consumo Energético – Ensaios 1, 2, 3 e 4



(Ensaio 1: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

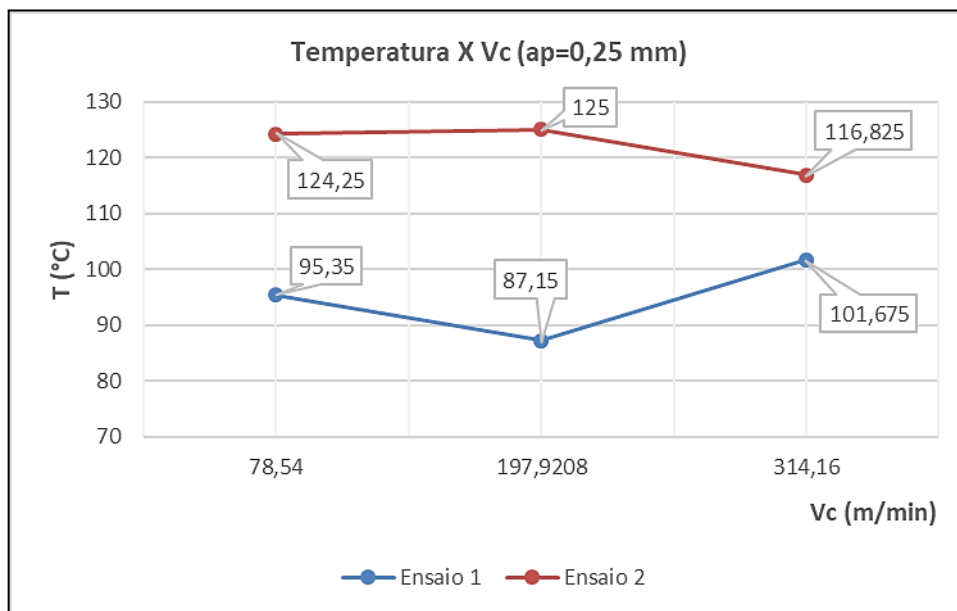
Fonte: Autoria própria (2022)

Com relação ao inserto redondo, a primeira observação relevante refere-se à temperatura elevada em relação ao inserto quadrado (Gráfico 6), já que, com uma superfície de contato maior entre a ferramenta de corte e a peça, há aumento do atrito,

resultando neste fenômeno. Observa-se que o comportamento oposto entre os ensaios 1 e 2, 3 e 4 mantém-se, como observou-se no experimento com a ferramenta de corte quadrada.

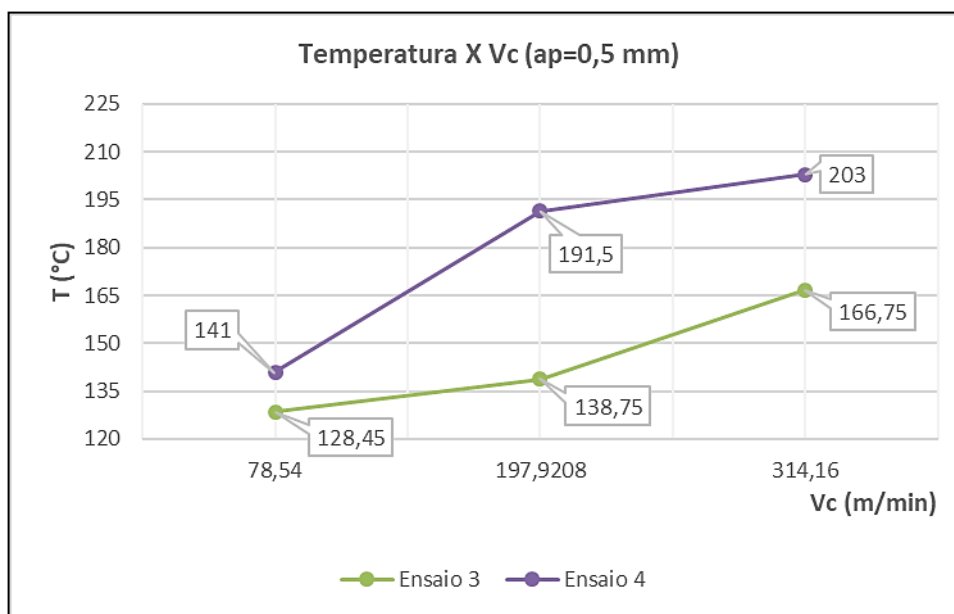
O comportamento das curvas de temperatura nos Gráficos 6 e 7, em que se observa uma queda seguida por aumento no Ensaio 1 e uma tendência linear e posterior decréscimo no Ensaio 2 pode, supostamente, ser explicado pelo fenômeno de Aresta Postiça de Corte (APC). Apesar da propriedade lubrificante da grafita presente no ferro fundido apontada por Silveira (2003), que reduziria a formação de aresta postiça de corte, não há indicativos da completa inibição deste fenômeno.

Gráfico 6 – Inserto redondo: Temperatura versus Velocidade de Corte – Ensaios 1 e 2



(Ensaio 1: $ap=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $ap=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

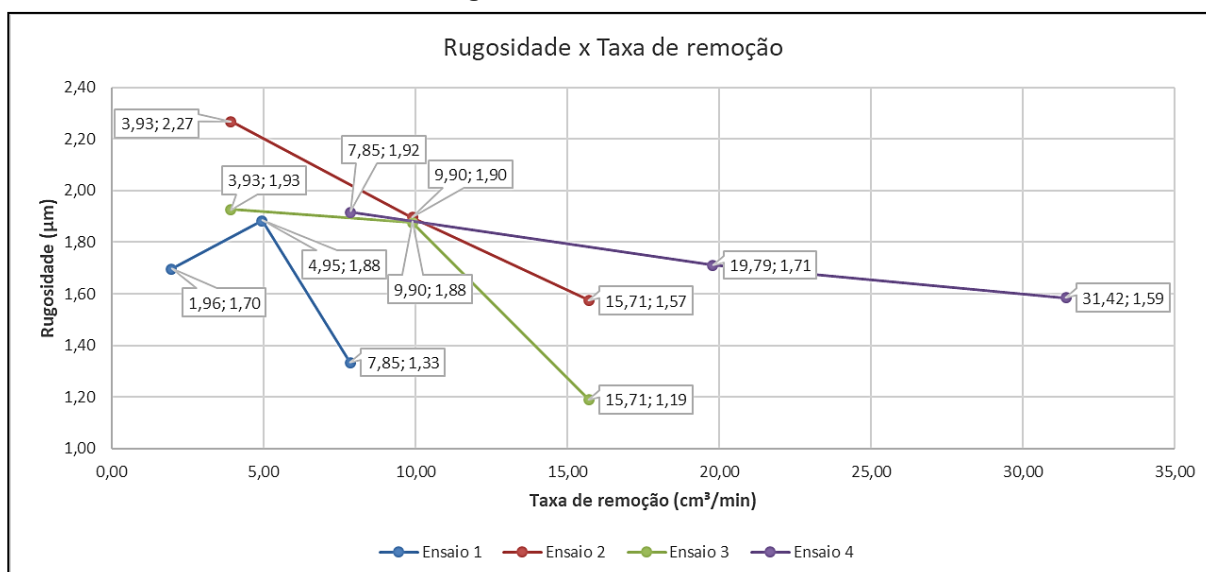
Gráfico 7 – Inserto redondo: Temperatura versus Velocidade de Corte – Ensaios 3 e 4

(Ensaio 1: $ap=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $ap=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $ap=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $ap=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com Ferraresi (1970) e Machado et al. (2011), no torneamento, a primeira camada de material da peça em atrito com o inserto é encruado, com tensão de cisalhamento insuficiente para romper a ligação da estrutura. Uma sucessão dessas camadas forma a APC, cujo tamanho aumenta até que a tensão de cisalhamento seja suficiente para mudar a zona de cisalhamento. Nesse ponto, partes de sua estrutura são cisalhadas e arrastadas entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta. O parâmetro mais influente sobre a APC é a Velocidade de corte (V_c), cujas baixas magnitudes favorecem a formação de APC, que aumenta até atingir um valor máximo, a partir do qual o aumento de V_c causa a redução da APC até seu desaparecimento, quando a velocidade atinge seu valor crítico.

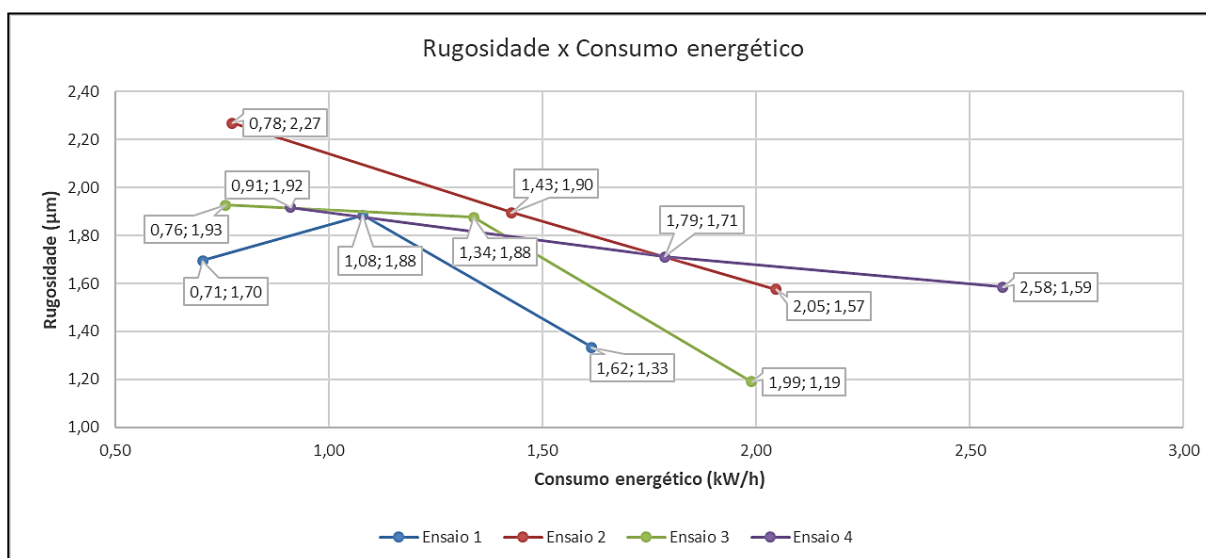
O Gráfico 8 apresenta a relação entre Rugosidade e Taxa de Remoção para o inserto redondo. Observa-se, prontamente, uma significativa redução da magnitude de rugosidade em comparação aos resultados obtidos com o inserto quadrado, o que se deve à geometria de corte, que tangencia a peça uniformemente em todo o processo, favorecendo o aumento da taxa de remoção e a redução da rugosidade. Assim como no inserto quadrado, a rugosidade mostra-se reduzida à medida que aumenta a taxa de remoção, de modo geral.

Gráfico 8 – Inseto redondo: Rugosidade versus Taxa de remoção – Ensaios 1, 2, 3 e 4

(Ensaio 1: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 9 compara os resultados de rugosidade e consumo energético para os ensaios 1 a 4, que mostra também decrescente, a curva de acabamento da peça.

Gráfico 9 – Inseto redondo: Rugosidade versus Consumo Energético – Ensaios 1, 2, 3 e 4

(Ensaio 1: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $a_p=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $a_p=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

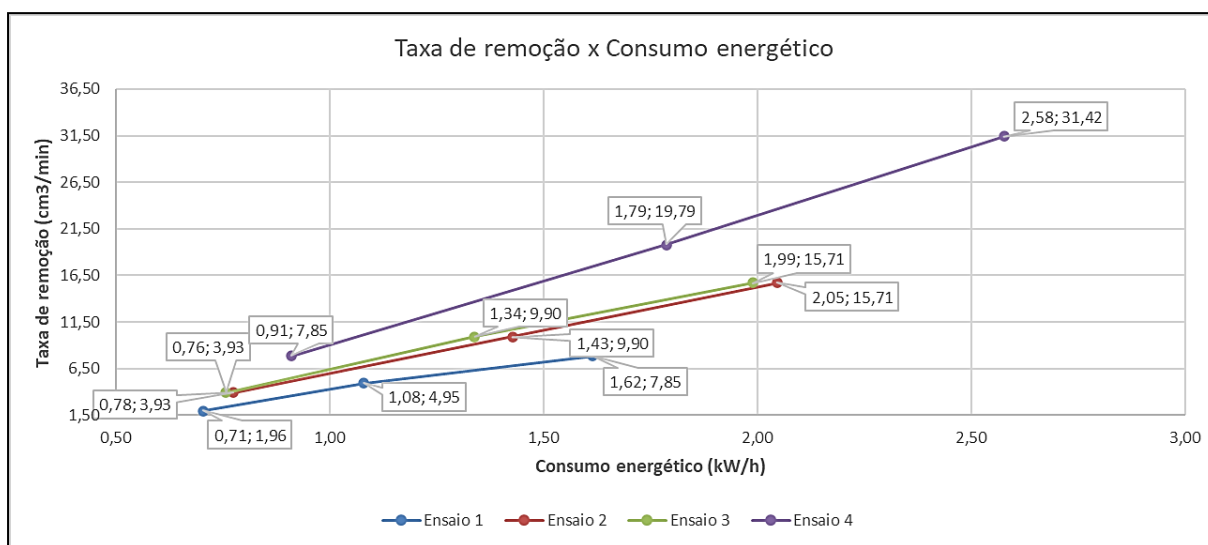
Fonte: Autoria própria (2022)

Em ambos os Gráficos 8 e 9 observa-se que o Ensaio 1, caracterizado pelos menores valores de profundidade de corte e avanço, apresenta um aumento na rugosidade no segundo momento de aferição do consumo energético e posterior

redução, no terceiro momento de aferição do consumo energético. Este aumento pode também ser decorrente da formação da APC.

Finalmente, o Gráfico 10 confronta os resultados de consumo energético e taxa de remoção para o Inserto redondo, demonstrando uma relação diretamente proporcional entre estes parâmetros, como resultado do aumento da velocidade de corte, da mesma forma como ocorre com o inserto quadrado.

Gráfico 10 – Inserto redondo: Taxa de remoção versus



(Ensaio 1: $ap=0,25$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 2: $ap=0,25$ mm/ $f=0,2$ mm/rot; Ensaio 3: $ap=0,5$ mm/ $f=0,1$ mm/rot; Ensaio 4: $ap=0,5$ mm/ $f=0,2$ mm/rot)

Fonte: Autoria própria (2022)

É importante mencionar que, durante a realização do experimento com o inserto quadrado, observou-se a ocorrência do fenômeno de vibração auto excitada conhecida como *chatter*.

Segundo Quintana e Ciurana (2011), o *chatter* pode ocasionar problemas como má qualidade no acabamento superficial, desgaste indevido ou dano ao inserto à peça usinada, decorrendo em desperdícios de matéria prima e altos custos de manutenção, além de retrabalho ou descartes excessivos de material. Pode ainda apresentar baixa repetibilidade, desperdício de energia e condições de trabalho insalubres, dado o risco de acidente e o ruído excessivo gerado, que originou a denominação do fenômeno.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu verificar os efeitos decorrentes da variação de parâmetros fundamentais no processo de usinagem por torneamento, como profundidade de corte; avanço e velocidade de rotação do torno sobre as variáveis rugosidade e temperatura, a qual influi diretamente sobre a variável consumo energético.

Os resultados alcançados levam à constatação de que a opção por determinado conjunto de parâmetros de entrada do processo de torneamento é definida pela aplicação do produto final desejável, uma vez que não se observou possível obter resultados ideais simultâneos para a totalidade de componentes resultantes do processo de usinagem. Assim, deve-se conhecer o contexto de aplicabilidade do processo para que se possa definir parâmetros adequados a cada circunstância de requisitos.

De maneira geral, o inserto quadrado apresentou melhores resultados de acabamento para a componente rugosidade enquanto o inserto redondo alcançou melhores resultados para a componente consumo energético.

Observou-se ainda que os melhores resultados de rugosidade para ambos os inserts foram atingidos com maior profundidade de corte, maior rotação e menor avanço. Para o inserto quadrado, os piores valores de rugosidade foram alcançados com maior avanço e menor rotação.

Os dados de rugosidade obtidos pelo Inserto redondo apresentam baixa variabilidade, independentemente do parâmetro avanço, apesar de não contemplarem o menor valor de rugosidade atingido. Por outro lado, o Inserto quadrado, apesar de alcançar o menor resultado para a componente rugosidade, este apresentou uma variabilidade de resultados bastante ampla, contemplando também, o valor menos satisfatório para esta componente. Para o Inserto quadrado observou-se que o incremento do parâmetro avanço ocasiona a irregularidade na remoção de material, prejudicando a componente rugosidade.

Quando as geometrias das ferramentas de corte são comparadas, pode-se afirmar que o Inserto redondo gera valores de temperatura mais altos associados a um maior consumo energético, porém com maiores taxas de remoção e melhor acabamento em relação ao Inserto quadrado.

O estudo da taxa de remoção, uma variável que estima a quantidade de material removido por unidade de tempo a partir do produto entre os parâmetros profundidade de corte, velocidade de corte e avanço, permitiu avaliar a relação e a influência dos fatores analisados sobre a eficiência do processo de torneamento e sobre a qualidade do produto final.

Foi possível observar a influência direta da combinação dos parâmetros analisados – profundidade de corte, avanço e velocidade de corte – sobre o acabamento final da peça. Uma profundidade de corte menor associada a um avanço maior produziu maior rugosidade, enquanto melhores resultados de acabamento foram percebidos para profundidades de corte maiores associadas a uma menor taxa de avanço. Assim, compreende-se que a combinação inadequada de parâmetros produz resultados insatisfatórios.

Observou-se, em diferentes momentos, a possível ocorrência de Aresta Postiça de Corte (APC), situação em que partículas do material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta, dificultando o cisalhamento. A presença da APC influencia diretamente sobre o produto final, alterando a geometria do inserto, com efeitos em todo o processo de torneamento (força, temperatura, desgaste das ferramentas e rugosidade superficial).

Por fim, é fundamental ressaltar que a complexidade dos estudos efetuados no desenvolvimento deste trabalho cumpre um papel essencial na formação acadêmica e profissional dos envolvidos, proporcionando bagagem de conhecimento de qualidade aos futuros engenheiros mecânicos autores deste projeto e contribuindo com a excelência de suas funções

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros, estudos que proporcionem a combinação ponderada dos parâmetros envolvidos no processo de forma a estabelecer uma correlação que proporcione uma maior produtividade, menor consumo energético e um produto com acabamento satisfatório.

Como segunda sugestão, recomenda-se estudos que abordem a utilização de fluidos de corte no processo de usinagem, de modo a avaliar sua eficácia e favorecer opções de uso ou não desses componentes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. D. Processos de Usinagem - Utilização e Aplicações das Principais Máquinas Operatrizes. Editora Saraiva, 2015. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520070/>. Acesso em: 09 Mai, 2021.
- ASTAKHOV, V. P. Tribology of Metal Cutting. 1.ed. Ed. Elsevier, Great Britain, 2006.
- BLACK, J. T. Introduction to machining processes. Metals handbook: machining. 9. ed. Nova York: ASM International, 1995.
- CALLISTER JR, W. D; RETHWISCH, D. G; Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares, Luiz Claudio de Queiroz Faria; revisão técnica Wagner Anacleto Pinheiro. - 10. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 2005.
- DAS, A.; MUKHOPADHYAY, A.; PATEL, S.K.; BISWAL, B. B. Comparative Assessment on Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide and Coated Cermet Inserts During Hard Turning. Arab J Sci Eng 41, 4531–4552, 2016.
- DEVERAS, A. M. Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadora e convencional. 2016. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.
- FERRARESI, D. Usinagem dos Metais. São Paulo: Blucher, 1970.
- GUESSER, W. L. Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos. [S. l.]: Editora Blucher, 2019.
- HE, K.; TANG, R.; JIN, M. Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time. International Journal of Production Economics, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016>.
- JIA, S.; YUAN, Q.; CAI, W.; LI, M.; LI, Z. Energy modeling method of machine-operator system for sustainable machining. Energy Conversion and Management, 172 (June), 265–276. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.030>
- MACHADO A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M.B. Teoria da usinagem dos materiais. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. [S. l.]: Editora Blucher, 2015.

MATUMOTO, B. H. Análise da Eficiência Energética em Processos de Usinagem – Comparação de Tempo e Potência entre Torno Convencional e CNC. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Paraná. 2016.

PEREIRA, J. A. Análise do Efeito da Sequência de Arestas e do Número de Interrupções para Medir Desgaste na Vida da Ferramenta no Torneamento. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 122 pp. 2009.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter In Machining Processes: A Review. International Journal Of Machine Tools And Manufacture, V. 51, N. 5, P. 363–376, 2011.

REIS, B. C. M. Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

RIGATTI, A. Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte. Aleph. 2010.

RODRIGUES, R. L. Estudo Comparativo da Lubri-Refrigeração Convencional e Otimizada no Processo de Torneamento do Ferro Fundido Cinzento FC200. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul, 2019.

SALAH, N.; JAFARI, M. A. Energy-Performance as a driver for optimal production planning. Applied Energy, 174, 88–100. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.085>

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. 1st ed. New York: Oxford University Press, 1997. 594 p

SILVEIRA, J. “Influência de fatores metalúrgicos na usinabilidade de ferros fundidos FE6002, FE4212, FC25”. 1983. Dissertação de Mestrado – UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

SOUZA, A.J.D. Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte no Torneamento. Tese (Doutorado em Engenharia). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

STOETERAU, R. L. Processos de Usinagem. Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoeterau/Aula-04-U-2007-1-materiais.pdf>. Acesso em: 10 Fev. 2023.

STOETERAU, R. L. Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica UFSC. Santa Catarina, 2004. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/2612654/apostila-processos-de-usinagem-ufsc>. Acesso em: 10 Fev. 2023.

TOENSHOFF, H. K.; DENKHA, B. Basics of Cutting and Abrasive Processes. Hannover: Springer, 2013. 399 p.

TRENT, E. M. Metal cutting. 2. ed. Londres: Butterworths & Co., 1985.

TRENT, E.; WRIGHT, P. Metal Cutting. 4. ed. Estados Unidos da América: Butterworth Heinemann, 2000.

TUPY. Catálogo Técnico - CT 0414. 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/67230477-Catalogo-tecnico-ct-0414-fuco-perfis-fundidos-abnt-6589-e-abnt-6916.html>. Acesso em: 10 Fev. 2023.

ANEXO A – Tabela de DADOS ORIGINAIS

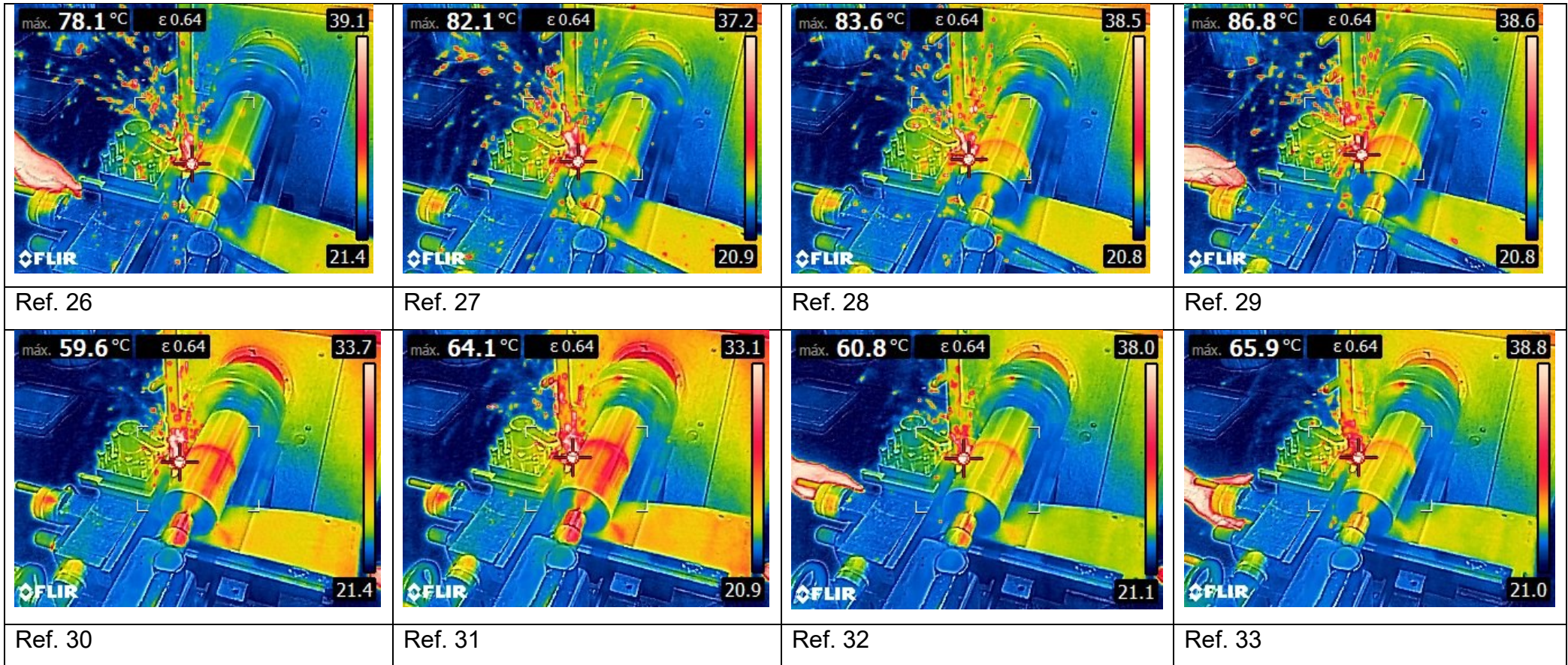
7.

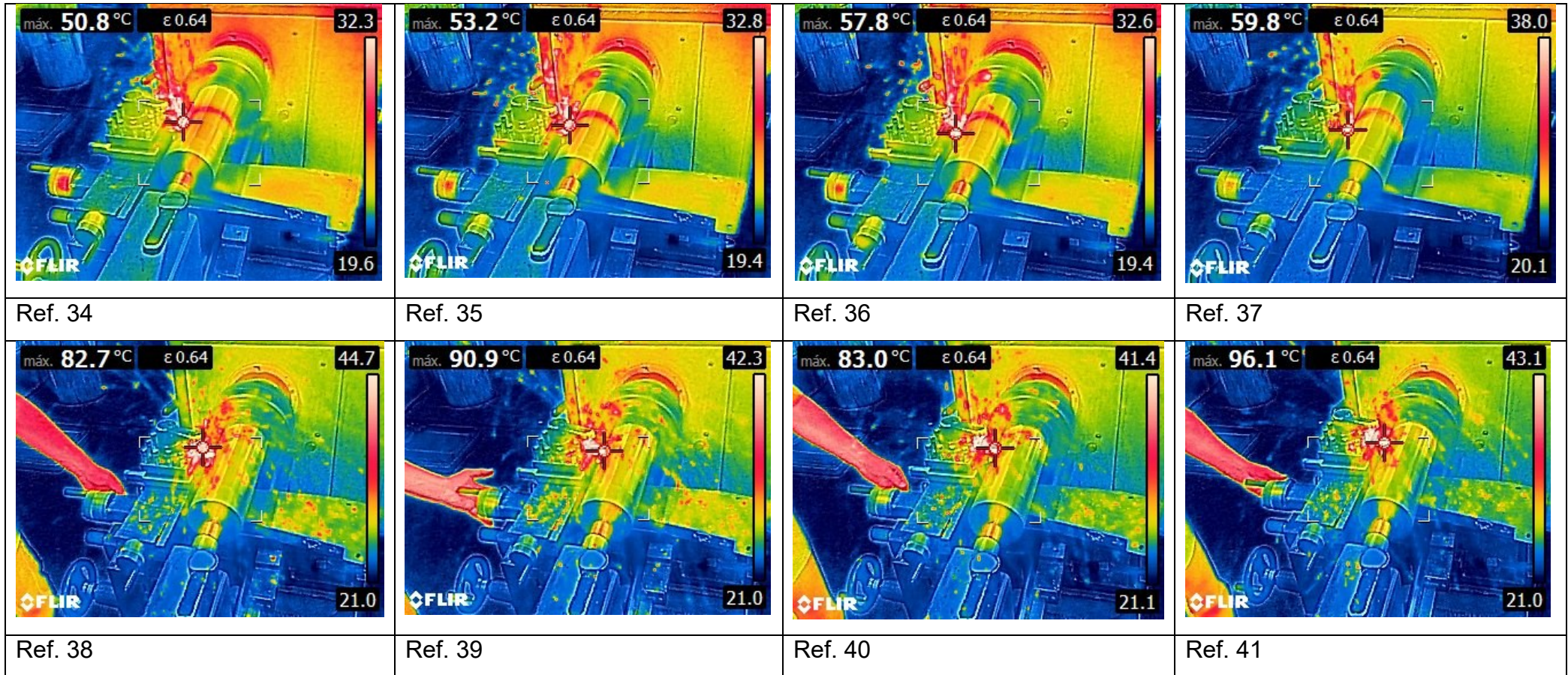
INSERTO QUADRADO																			
ap (Profundidade de Corte)	f (avanço) [mm/rot]	rpm	Vc [m/min]	Temperatura								Rugosidade (Cut off - 0,8mm)						Consumo energético	
				Ref.	Temp. [°C]	Ref.	Temp. [°C]	Ref.	Temp. [°C]	Ref.	Temp. [°C]	ra	rq		rz		Ref.	kW/h	
0,25	0,1	250	78,54	18	61,7	19	65,2	20	69,9	21	77,0		2,6590		3,3333		15,7650	data 1	0,735
0,25	0,1	630	197,92	30	59,6	31	64,1	32	60,8	33	65,9	2,0700	2,0920	2,5950	2,5580	13,1710	12,3350	data 7	1,167
0,25	0,1	1000	314,16	34	50,8	35	53,2	36	57,8	37	59,8	1,2570	1,0430	1,5540	1,9870	7,7830	5,9350	data 8	1,557
0,25	0,2	250	78,54	22	75,4	23	70,0	24	72,1	25	74,2	5,0060	5,1840	6,0190	6,3310	25,3670	28,3960	data 2	0,830
0,25		630	197,92	26	78,1	27	82,1	28	83,6	29	86,8	3,6700	3,9320	4,4180	4,6130	19,0090	17,9030	data 4	1,455
0,25		1000	314,16	38	82,7	39	90,9	40	83,0	41	96,1	2,6420	2,6320	3,0720	3,0280	11,9930	11,3340	data 9	1,867
0,5		250	78,54	42	107,0	43	116,0	44	111,0	45	140,0	2,7460	2,6810	3,4000	3,3770	16,4870	15,8490	data 10	0,739
0,5	0,1	630	197,92	54	74,6	55	74,5	56	84,8	57	79,0	1,6600	1,5900	2,0200	2,0090	9,6730	10,4410	data 13	1,272
0,5	0,1	1000	314,16	58	61,8	59	69,2	60	77,7	61	80,3	1,0610	0,9810	1,3470	1,1900	6,6510	5,4780	data 14	1,766
0,5	0,2	250	78,54	46	119,0	47	117,0	48	123,0	49	101,0	4,6870	4,1090	5,7400	5,0370	24,4700	22,1400	data 11	0,869
0,5	0,2	630	197,92	50	72,6	51	90,8	52	91,1	53	95,7	3,6790	3,7390	4,3710	4,5160	17,5800	18,5800	data 12	1,610
0,5	0,2	1000	314,16	62	115,0	63	117,0	64	118,0	65	123,0	3,6340	3,5910	4,2760	4,2090	15,3590	15,5630	data 15	2,179

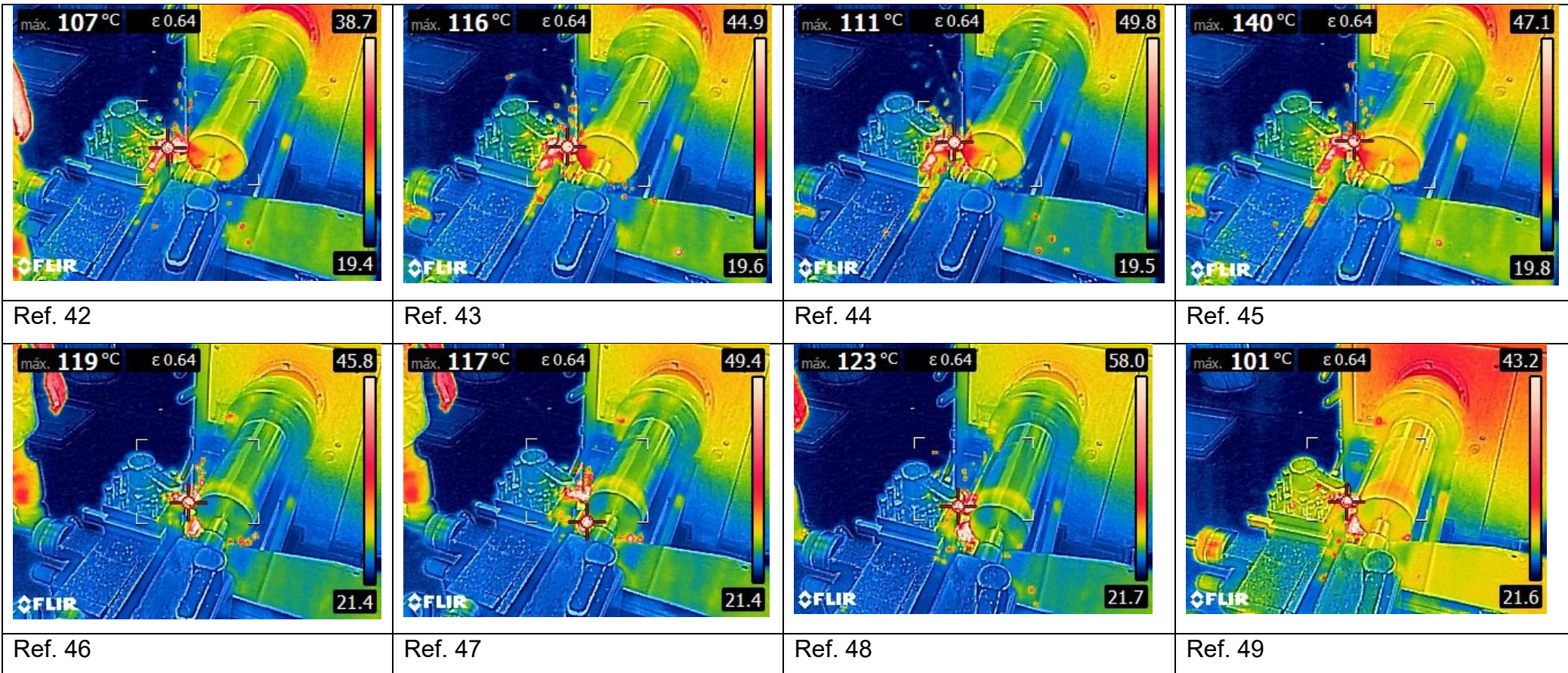
INSERTO REDONDO																			
ap (Profundidade de Corte)	f (avanço) [mm/rot]	rpm	Vc [m/min]	Temperatura								Rugosidade (Cut off - 0,8mm)						Consumo energético	
				Ref.	Temp. [°C]	Ref.	Temp. [°C]	Ref.	Temp. [°C]	Ref.	Temp. [°C]	ra	rq		rz		Ref.	kW/h	
0,25	0,1	250	78,54	66	96,7	67	90,2	68	102,0	69	92,5	1,727	1,664	2,129	2,067	10,033	10,087	data 16	0,705
0,25	0,1	630	197,92	78	77,1	79	87,7	80	87,1	81	96,7	1,996	1,769	2,396	2,12	11,081	11,078	data 19	1,08
0,25	0,1	1000	314,16	82	69,7	83	103,0	84	102,0	85	132,0	1,299	1,369	1,599	1,669	7,165	7,567	data 20	1,615
0,25	0,2	250	78,54	70	136,0	71	130,0	72	115,0	73	116,0	2,443	2,094	3,021	2,579	14,088	12,32	data 17	0,775
0,25	0,2	630	197,92	74	99,0	75	119,0	76	139,0	77	143,0	1,903	1,888	2,363	2,25	10,779	9,872	data 18	1,428
0,25	0,2	1000	314,16	86	117,0	87	123,0	88	136,0	89	91,3	1,646	1,503	1,976	1,805	8,576	8,226	data 21	2,047
0,5	0,1	250	78,54	90	94,8	91	167,0	92	121,0	93	131,0	1,991	1,864	2,445	2,311	11,293	11,069	data 22	0,758
0,5	0,1	630	197,92	102	117,0	103	152,0	104	131,0	105	155,0	1,877	1,874	2,327	2,299	10,796	10,889	data 25	1,339
0,5	0,1	1000	314,16	106	152,0	107	160,0	108	178,0	109	177,0	1,154	1,226	1,414	1,503	7,071	6,986	data 26	1,989
0,5	0,2	250	78,54	94	134,0	95	136,0	96	168,0	97	126,0	1,942	1,891	2,389	2,96	11,186	11,017	data 23	0,911
0,5	0,2	630	197,92	98	184,0	99	177,0	100	193,0	101	212,0	1,729	1,694	2,178	2,113	11,124	10,187	data 24	1,787
0,5	0,2	1000	314,16	110	182,0	111	197,0	112	218,0	113	215,0	1,53	1,64	1,898	2,052	9,892	9,839	data 27	2,577

**ANEXO B – DADOS TERMOGRÁFICOS COLETADOS ORIGINAIS
(REFERÊNCIAS QUE ORIGINARAM A TABELA)**

 Thermal image Ref. 18 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 61.7 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.	 Thermal image Ref. 19 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 65.2 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.	 Thermal image Ref. 20 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 69.9 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.	 Thermal image Ref. 21 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 77.0 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.
Ref. 18	Ref. 19	Ref. 20	Ref. 21
 Thermal image Ref. 22 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 75.4 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.	 Thermal image Ref. 23 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 70.0 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.	 Thermal image Ref. 24 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 72.1 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.	 Thermal image Ref. 25 showing a mechanical assembly. The maximum temperature is 74.2 °C. The image includes a color scale bar on the right and the FLIR logo in the bottom left corner.
Ref. 22	Ref. 23	Ref. 24	Ref. 25









Ref. 50



Ref. 51



Ref. 52



Ref. 53



Ref. 54



Ref. 55



Ref. 56



Ref. 57

