

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
COORDENAÇÃO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALAN ALVES DIAS
GABRIEL BRAZ MORAIS DA SILVA

ESTUDO DE CASO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE UM
ACOPLAMENTO AGRÍCOLA DE AÇO SAE 1020

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II
GOIÂNIA
2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Bouôma _____, 11/10/23.
Local Data

Alan Alves Dias
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia
Local

09/07/2023
Data

Gabriel Brz Morris da Silva

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ALAN ALVES DIAS
GABRIEL BRAZ MORAIS DA SILVA

Estudo de Caso de Torneamento de um Acoplamento Agrícola de aço
SAE 1020
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, área de Usinagem, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG - Campus Goiânia), como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Paulo Rosa da Mota
Co-Orientador: Me. Paulo Vinícius da Silva Resende

Goiânia
2023

D541e Dias, Alan Alves.
Estudo de caso do processo de torneamento de um acoplamento agrícola de aço SAE 1020 /Alan Alves Dias; Gabriel Braz Morais da Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2023.
88 f.: il.

Orientador: Dr. Paulo Rosa da Mota.
Coorientador: Me. Paulo Vinícius da Silva Resende.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Coordenação de Mecânica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Usinagem. 2. Torneamento. I. Silva, Gabriel Braz Morais da. II. Mota, Paulo Rosa da (orientador). III. Resende, Paulo Vinícius da Silva (coorientador). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. V. Título.

CDD 690

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



ATA Nº 09/2023-1 – Disciplina TCC 2

SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 22 de dezembro de 2022, às 8:30 horas, foi realizada a sessão pública de apresentação e DEFESA do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: “ESTUDO DE CASO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE UM ACOPLAMENTO AGRÍCOLA DE AÇO SAE 1020” de autoria dos acadêmicos:

ALAN ALVES DIAS

GABRIEL BRAZ MORAIS DA SILVA

do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica, reconhecido pela Portaria/SRSES/MEC/Nº 309, de 28/04/2015, D.O.U. de 29/04/2015, Seção 1, p.33 como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, sendo a banca composta pelos seguintes membros:

Professor(a) Dr(a). PAULO ROSA DA MOTA Orientador

Me(a). PAULO VINÍCIUS DA SILVA RESENDE Co-orientador(a)

Professor(a) Me(a). FUDIO MATSUURA

Professor(a) Me(a). THAMISE SAMPAIO VASCONCELOS VILELA

Após a apresentação, os autores foram arguidos pela banca examinadora, cujo parecer final foi:

Nota: (8)

(X) Aprovado em TCC2 () Reprovado em TCC 2

A presente ata foi lavrada após encerrar-se a sessão, sendo assinada pela banca examinadora.

COMENTÁRIOS DA BANCA:

Banca:

PAULO ROSA DA MOTA

PAULO VINÍCIUS DA SILVA RESENDE

FUDIO MATSUURA

THAMISE SAMPAIO VASCONCELOS VILELA

Goiânia, 20 de junho de 2023

COMENTÁRIOS DA COORDENAÇÃO:

Coordenação de Engenharia Mecânica

Documento assinado eletronicamente por:

- Fudio Matsuura, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/07/2023 11:13:30.
- Paulo Vinicius da Silva Resende, TECNICO EM MECANICA, em 07/07/2023 16:10:24.
- Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - GYN-CCBEM, em 07/07/2023 15:08:30.
- Paulo Rosa da Mota, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/07/2023 15:58:33.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/07/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 427848
Código de Autenticação: c77251bef9



AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, por nos conceber saúde e oportunidade para trilhar o âmbito acadêmico.

Às nossas famílias, pelos valores nos ensinados e apoio, e por independente de nossos resultados sempre acreditarem em nossas capacidades.

Ao Instituto Federal de Goiás e o corpo docente de professores.

Ao Me. Paulo Vinícius da Silva Resende, técnico de laboratório, pelo acompanhamento e orientação na utilização do Laboratório de Usinagem do IFG. Ao Prof. Dr. Ildeu Lúcio Siqueira pela orientação na utilização dos softwares de programação. E aos (às) professores(as) Dra. Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela e Me. Fudio Matsuura pela participação como banca avaliadora do presente trabalho.

Em especial ao orientador Professor Dr. Paulo Rosa da Mota pela disponibilidade, assiduidade e compromisso para com o projeto.

À empresa 3R USINAGEM por disponibilizar as peças necessárias, ferramentas, maquinários, e aos seus funcionários por nos instruir sobre os seus processos de fabricação.

Aos amigos e companheiros de graduação.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A usinagem é um processo de fabricação que consiste basicamente em retirar material de uma peça bruta (matéria prima), de forma a definir o formato da mesma de acordo com projetos pré-concebidos, através de ferramentas cortantes. Esse processo é amplamente usado e, para que seja viável seu uso em escala industrial, é necessário que sejam feitas análises principalmente através dos desgastes da ferramenta de corte, acabamento da peça em cada processo (visto que em diversas ocasiões usa-se mais de um processo para a fabricação de uma peça) e a velocidade de produção da mesma, considerando a ordem de diferentes processos de usinagem e o tempo que é investido em cada parcela da produção. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da variação dos parâmetros de corte de velocidade e avanço na usinagem de cubos de rodas mecânicas produzidos em aço SAE 1020. Para isso, foram avaliados os tempos de usinagem e a vida útil das ferramentas de corte utilizadas, comparando o processo de fabricação com a utilização de máquina CNC versus a fabricação utilizando somente torno convencional. Desta comparação observou-se uma redução considerável no tempo de usinagem com a inclusão do torno CNC no processo, uma vez que a máquina executa movimentos complexos de forma automatizada, e é capaz de manter a velocidade de corte constante, alterando somente a rotação do eixo árvore durante o faceamento da peça. Além disso, foram realizados testes em laboratório, com intuito de verificar visualmente o comportamento da corrente elétrica da máquina no processo de faceamento de um disco metálico (Aço ABNT 1020). Os testes se deram variando os parâmetros de rotação e avanço de corte, o que permitiu verificar o comportamento decrescente da corrente drenada pela máquina conforme a retirada de material. Foi possível inferir também que a rotação, em detrimento da velocidade de corte, foi o parâmetro responsável no aumento do valor da corrente drenada, consequentemente na potência de corte exigida pela máquina.

PALAVRAS-CHAVE: USINAGEM, TORNEAMENTO, PARÂMETROS DE CORTE, DESGASTE, FERRAMENTA, CORRENTE EFETIVA DE CORTE.

ABSTRACT

Machining is a manufacturing process that basically consists of removing material from a raw part (raw material), in order to define its shape according to pre-conceived projects, using cutting tools. This process is widely used and, for its use on an industrial scale to be viable, it is necessary to analyze mainly the wear of the cutting tool, the finishing of the piece in each process (since on several occasions more than one process for manufacturing a part) and its production speed, considering the order of different machining processes and the time invested in each part of the production. The objective of this work was to evaluate the effect of varying the cutting speed and feed parameters in the machining of mechanical wheel hubs produced in SAE 1020 steel. comparing the manufacturing process using a CNC machine versus manufacturing using only a conventional lathe. From this comparison, a considerable reduction in machining time was observed with the inclusion of the CNC lathe in the process, since the machine performs complex movements in an automated way, and is able to maintain a constant cutting speed, changing only the rotation of the axis tree during face milling of the part. In addition, tests were carried out in the laboratory, with the aim of visually verifying the behavior of the electric current of the machine in the process of facing a metallic disk (steel ABNT 1020). The tests were carried out by varying the parameters of rotation and cutting feedrate, which made it possible to verify the decreasing behavior of the current drained by the machine according to the removal of material. It was also possible to infer that the rotation, to the detriment of the cutting speed, was the parameter responsible for the increase in the value of the drained current, consequently in the cutting power required by the machine.

KEYWORDS: MACHINING, TURNING, MANUFACTURING, TOOL, EFFECTIVE CUTTING CURRENT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Corpos de provas empregados na produção dos acoplamentos mecânicos. Fonte: Autoria própria.	14
Figura 3.1 - Curva de desgaste. Fonte: COELHO et al, 2009.....	23
Figura 3.2 - Principais regiões de desgaste de uma ferramenta de corte. Fonte: SANDVIK, 1994.	24
Figura 3.3 - Desgaste em função da temperatura de corte. Fonte: VIBREGGE, 1970, apud KONIG & KLOCKE, 1997, adaptada.....	25
Figura 3.4 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte. Fonte: Dearnley e Trent e Wright, 1982.	29
Figura 3.5 - Principais tipos de cavaco encontrados na usinagem. Fonte: On-Convoyeurs, 2022.	32
Figura 3.6 - Forças de usinagem no corte ortogonal.	34
Figura 3.7 - Componentes das forças de usinagem no processo de torneamento.	34
Figura 3.8 – Corte interrompido em peça cilíndrica contendo rasgo de chaveta. Fonte: Sanchez, 2019.....	41
Figura 4.1 - Ferramenta de metal duro brasada - testes iniciais. Fonte: Autoria própria.....	43
Figura 4.2 - Ferramenta de corte de metal duro WNMG 060408, com revestimento TiN. Fonte: Autoria própria.....	43
Figura 4.3 - Torno CA6240A da Shenyang Machine Tool Group Ltd. Fonte: Autoria própria.....	45
Figura 4.4 - Ferramentas utilizadas eliminação das arestas pontiagudas da chapa. Fonte: Autoria própria.....	46
Figura 4.5 - Representação das medidas do acoplamento após a operação de desbaste. Fonte: Autoria própria.	47
Figura 4.6 - Sistema de fixação com um suporte especial no contra ponto: a) contra ponto; b) contra ponto fixado no torno. Fonte: Autoria própria.	48
Figura 4.7 - Relógio comparador utilizado para centralização das peças. Fonte: Autoria própria.....	49

Figura 4.8 - Fluxograma metodológico adotado para realização dos ensaios. Fonte: Autoria própria.	50
Figura 4.9 - Inserto WNMG 080408 Pc 9030. Fonte: World Tools.....	51
Figura 4.10 - Corpo de prova cilíndrico em aço SAE 1020 utilizado nos ensaios. Fonte: Autoria própria.	51
Figura 4.11 - Torno CM 460V, utilizado nos testes em laboratório. Fonte: Autoria própria.....	52
Figura 4.12 - Posicionamento das engrenagens. Fonte: Autoria própria.	53
Figura 4.13 - Sensores de corrente modelo SCT-013 conectados na máquina. Fonte: Autoria própria.	54
Figura 4.14 - Representação esquemática do sistema de aquisição. Fonte: Autoria própria.....	55
Figura 5.1 - Riscos na extremidade superior dos acoplamentos devido ao corte com plasma. a) e b). Fonte: Autoria Própria.....	56
Figura 5.2 - Defeito na face da chapa de 3” de espessura (empenamento). Fonte: Autoria Própria.	57
Figura 5.3 - Comparação realizada entre tempos de usinagem. Fonte: Autoria própria.....	60
Figura 5.4 - Ferramenta de corte de metal duro WNMG 060408, com avarias. Fonte: Autoria própria.	62
Figura 5.5 - Inserto WNMG 080408 Pc 9030, com lascamento. Fonte: Autoria própria.....	63
Figura 5.6 - Inserto WNMG 080408 Pc 9030, desgastado. Fonte: Autoria própria.	64
Figura 5.7 - Micrografia representativa do inserto WNMG 080408 Pc 9030. Fonte: Autoria própria.....	65
Figura 5.8 - Cavacos longos durante o processo de usinagem. Fonte: Autoria própria.....	66
Figura 5.9 - Volume de cavacos extraídos em aço ABNT 1020. Fonte: Autoria própria.....	67
Figura 5.10 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 1. Fonte: Autoria própria.....	68

Figura 5.11 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 2. Fonte: Autoria própria.....	68
Figura 5.12 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 3. Fonte: Autoria própria.....	69
Figura 5.13 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 4. Fonte: Autoria própria.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Aplicação e classificação de materiais duros de corte. Fonte: Adaptado da ISO 513, 2004. Fonte:.....	18
Tabela 3.2 - Composição química do aço carbono SAE 1020. Fonte: ABNT.....	19
Tabela 4.1 - Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante das ferramentas de metal duro WNMG 060408.....	44
Tabela 4.2 - Parâmetros de corte torno SMTCL desbaste inicial.....	44
Tabela 4.3 - Parâmetros de corte torno SMTCL.....	45
Tabela 4.4 - Características do torno mecânico.....	52
Tabela 4.5 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.....	53
Tabela 5.1 - Tempos de usinagem em torno convencional.....	58
Tabela 5.2 - Tempo de usinagem no CNC.....	59
Tabela 5.3 - Valor da corrente elétrica obtida em cada ensaio.....	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. JUSTIFICATIVA	13
2.1. Objetivos Gerais	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Usinagem	16
3.1.1. Torneamento	16
3.2. Metal Duro	16
3.3. Aço SAE 1020	19
3.4. Fluidos de Corte	20
3.5. Variáveis da Usinagem	21
3.5.1. Desgastes e Avarias na Ferramenta	22
3.5.2. Análise do Cavaco	31
3.5.3. Forças de Usinagem	33
3.5.4. Potência de Usinagem	37
3.5.5. Tempo de Usinagem	39
3.5.6. Torneamento com corte interrompido	40
3.6. Sistemas de aquisição e placa microcontroladora em Arduino	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. Histórico da usinagem dos acoplamentos mecânicos	42
4.1.1. Torno CNC	47
4.2. Experimento no Laboratório de Usinagem	50
4.2.1. Ferramenta de corte	50
4.2.2. Peça a ser usinada	51
4.2.3. Ferramentas e equipamentos	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1. Visita Técnica	56
5.1.1. Comparação dos processos	58
5.1.2. Desgastes	61
5.1.3. Cavacos	65
5.2. Ensaios realizados no Laboratório de Usinagem	67
6. CONCLUSÃO	73
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	74

1. INTRODUÇÃO

Nas áreas de fabricação, busca-se extrair o máximo de produtividade, uma vez que os custos relativos ao processo têm impactos substanciais nos valores totais das peças fabricadas.

No contexto industrial atual, a usinagem se destaca como um dos principais processos de fabricação utilizados, no que se diz a respeito à obtenção de forma e dimensão desejadas de materiais metálicos através da remoção de material, por meio do contato físico da ferramenta de corte com a peça e do cavaco com a ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).

Atualmente é possível encontrar no mercado diversas ferramentas de corte, com distintas geometrias e revestimentos, as quais necessitam de investigações ou de pesquisas para servir como referência para os responsáveis pelas linhas de produção ou manutenção das empresas dessa área (DA MOTA, 2006; SHAW, 1984). Embora pareça simples, é muito complexa sua otimização para se obter bons resultados de trabalho devido à quantidade de variáveis envolvidas.

Assim, fica evidente a importância do relacionamento entre as áreas técnicas das indústrias e os fabricantes das ferramentas de corte, pois essa interação contribui para a melhoria da qualidade da produtividade e performance do processo de usinagem. Dentro das linhas de produção do cenário atual, observa-se a necessidade do constante avanço das tecnologias e ferramentas, a fim de se obterem melhores resultados de produtividade alinhados à redução de perdas e custos fabris.

Dentro da gama de ferramentas de corte utilizadas no processo de torneamento, as ferramentas de metal duro se destacam. São muito utilizadas tanto na linha de produção de peças metálicas, como também na área de manutenção, devido à sua combinação de resistência ao desgaste e resistência mecânica.

Na produção de peças em série faz-se necessário aplicações de técnicas de aprimoramento periódicas. Dessa forma, encontra-se sempre a melhor combinação entre ferramentas e parâmetros de corte, revestimentos e geometrias das ferramentas e materiais específicos. Podendo então obter os resultados esperados, como: bons acabamentos superficiais, ausência de

vibrações, menores tempos de usinagem, bem como, menores custos de fabricação.

2. JUSTIFICATIVA

O tempo de fabricação na produção de uma peça por meio de métodos convencionais de usinagem como fresamento, furação, rosqueamento, aplainamento e torneamento, varia conforme complexidade da peça, ambiente de trabalho, características das ferramentas de corte empregadas, fluido de corte utilizado, tipo de cavacos formados, dentre outras variáveis.

Diante do exposto, a proposta global deste trabalho refere-se ao acompanhamento de alguns desses processos de fabricação, em peças que serão utilizadas na área da agricultura brasileira. Esse TCC foi realizado em parceria com a empresa 3R Usinagem, a qual permitiu as coletas de dados, bem como forneceu as ferramentas de corte, os corpos de provas e a mão de obra para a realização dos testes. O estudo de caso possibilitou a obtenção de novos conhecimentos na área de usinagem, tanto para o mercado, como para o meio acadêmico, proporcionando a disseminação de conteúdo, melhorias na qualidade de produção e redução de custos.

A origem desse TCC está relacionada à fabricação de cubos de rodas, doravante denominados de acoplamentos mecânicos. Os mesmos serão fabricados a partir de aço SAE 1020. Sendo que, a fabricação será realizada em três etapas: corte com plasma, torneamento e fresamento em um centro de usinagem. Contudo, os estudos realizados serão somente em relação ao processo de torneamento.

A Figura 2.1 apresenta o corpo de prova empregado no processo de usinagem dos acoplamentos mecânicos, objeto desse Estudo de Caso. São discos de 76,2 mm de espessura, cortadas pelo processo plasma, cujos diâmetros externo e interno, são de 440 mm e 215 mm, respectivamente. A empresa responsável pela fabricação dos flanges ou acoplamentos mecânicos (3R Usinagem), situada na região metropolitana de Goiânia, concordou com essa parceria com o Instituto Federal de Goiás (IFG), com o intuito de validar quais são os melhores parâmetros de corte a serem empregados no processo de torneamento dessas peças. Além disso, os tempos de usinagem, o desempenho das ferramentas e qualidade das peças produzidas deverão proporcionar uma relação que seja favorável à produtividade, com preços competitivos.



Figura 2.1 - Corpos de provas empregados na produção dos acoplamentos mecânicos. Fonte: Autoria própria.

2.1. Objetivos Gerais

- Realizar um estudo de caso acerca da fabricação de flanges dos acoplamentos agrícolas em aço SAE 1020.

2.2. Objetivos Específicos

- Estudar os processos de usinagem utilizados na fabricação dos flanges dos acoplamentos mecânicos de máquinas agrícolas.
- Avaliar os tempos de usinagem gastos nos processos de fabricação.
- Avaliar a vida útil das ferramentas de corte utilizadas no processo de fabricação, bem como os tipos de desgaste encontrados nas mesmas.
- Estudar a influência da potência de corte no desgaste dos inserts.

- Utilizar o microcontrolador *Esp32* bem como o software *Serialplot* para aquisição dos valores de corrente elétrica instantânea da máquina no decorrer do processo de faceamento;
- Produzir os gráficos da corrente em função do tempo por meio do software *Scilab*;
- Avaliar o comportamento da corrente em função do tempo obtida no laboratório;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Usinagem

Segundo Ferraresi (1969), a usinagem trata-se de um processo de fabricação cujo objetivo é dar forma a uma peça por meio de máquinas ou ferramentas, as quais retiram material da matéria-prima em forma de cavaco.

A usinagem pode ser dividida em duas categorias: a convencional e a não convencional. O uso de uma ferramenta de corte a qual promove uma força que remove o material por cisalhamento, caracteriza a chamada Usinagem Convencional (ou tradicional). Como principais exemplos de processos tradicionais de usinagem têm-se o torneamento, fresamento e a furação (SANTOS *et al.*, 2007). Os processos não convencionais utilizam formas alternativas para a remoção de matéria da peça a ser usinada. Alguns exemplos de processos não convencionais de usinagem são: ultrassom, laser, etc (SANTOS *et al.*, 2007).

3.1.1. Torneamento

De acordo com o Manual Técnico de Treinamento – Tecnologia em usinagem (Sandvik Coromant), o torneamento é um processo que apresenta normalmente corte contínuo e combina dois movimentos simultâneos: a rotação da peça e o movimento de avanço da ferramenta. O movimento de avanço da ferramenta pode ser axial, ou seja, paralelo ao eixo de rotação da peça, de forma que o raio da peça diminui ao ser torneada. Radial, o que significa que o movimento segue perpendicular ao eixo de rotação da peça, de forma que a peça ao ser torneada, diminua o seu comprimento. Ou ainda uma combinação de ambas (radial e axial), resultando, por exemplo, em superfícies cônicas.

3.2. Metal Duro

O metal duro ainda é hoje um dos materiais mais utilizados na indústria moderna devido sua combinação de dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Usualmente conhecido como carboneto de tungstênio (WC), em sua composição apresenta uma combinação

de elementos os quais contribuem para um material com boa resistência mecânica, dureza e tenacidade adequada para o emprego em ferramentas de corte (FERRARESI, 1969).

Segundo Diniz *et. al.*, 2008, este material é um produto da metalurgia do pó, feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de materiais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo resistente à compressão. As partículas duras acabam por ser o carboneto de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos como o carboneto de titânio, tântalo e nióbio, que conferem a dureza à temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas. O tamanho dessas partículas varia entre 1 a 10 μm e ocupam de 60% até 95% do volume do material.

Com sua origem na Alemanha por volta da década de 20, sua utilização aumentou a velocidade de corte em mais de nove vezes com relação ao material mais utilizado na época como ferramenta de corte no âmbito da indústria, o aço rápido. Schroter conseguiu produzir o carboneto de tungstênio em pó em laboratório por volta de 1920, vindo este a ser utilizado no mercado em somente oito anos depois. Seu processo de fabricação compreende-se pela mistura dos pós, compressão destes em pastilhas ou briquetes, sua sinterização e por fim o controle físico final do material sinterizado.

O metal duro é formado basicamente por dois constituintes: um carboneto de tungstênio só ou associado com outros carbonetos; e um elemento aglomerante/ligador (geralmente o cobalto), com a função de armazenar as partículas duras dos carbonetos, sendo portanto, o responsável pela tenacidade do material (FERRARESI, 1969).

Segundo a classificação da norma ISO 513 (2004), os diversos tipos de metais duros são classificados de acordo com as letras P, M e K. O primeiro grupo corresponde aos metais com alto teor de TiC , TaC ou NbC , conferindo ao material dureza elevada a quente e resistência ao desgaste. O grupo K engloba metais que possuem TiC , TaC ou NbC em menores quantidades com relação ao grupo P. O grupo K é voltado para usinagem de materiais frágeis que não atritam muito com a superfície de saída da ferramenta. Conhecido como a “classe dos metais não ferrosos”, os carbonetos do grupo K possuem menos afinidade

química com os metais não ferrosos do que os carbonetos adicionados aos grupos P e M (DA SILVA *et. al.*, 2009).

No ano de 2004 foi feita uma revisão na norma na qual adicionou-se as letras N, S e H incluindo novos grupo de materiais, os mesmos constituídos de cerâmicas e metais ultraduros, alterando, portanto, a classificação dos grupos. O grupo N engloba metais e ligas não ferrosos como Cu e o Al, o grupo S para ligas ou superligas que possuem maior resistência ao calor como Fe, Ti, Ni e Co. Já o grupo H inclui aços endurecidos (aço fundido e ferro fundido temperado). A Tabela 3.1 a seguir apresenta esta classificação, não mais utilizando de base a composição química e sim nas possíveis utilidades do material. Na mesma tabela observa-se uma subdivisão, na qual a letra indica a classificação do material, e o número que a acompanha a tenacidade e a resistência ao desgaste, sendo esta relação inversamente proporcional, onde quanto maior o número maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste, e vice-versa.

Tabela 3.1: Aplicação e classificação de materiais duros de corte.

Principais grupos			Grupos de aplicação			
Letra de Identificação	Cor de Identificação	Materiais a serem usinados	Materiais de corte		-	
P	Azul	Aços: todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	A ↑	B ↓
M	Amarelo	Aço inoxidável: aço inoxidável austenítico, aço duplex e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	A ↑	B ↓
K	Vermelho	Ferro Fundido: ferro fundido cinzento, com grafita esferoidal e maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	A ↑	B ↓
N	Verde	Materiais não ferrosos: alumínio e outros metais não ferrosos, materiais metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	A ↑	B ↓
S	Marrom	Superligas e Titânio: ligas resistentes ao calor à base de	S01 S10	S05 S15	A ↑	B ↓

		ferro, níquel e cobalto, titânio e suas ligas	S20 S30	S25		
H	Cinza	Materiais Duros: aços endurecidos, ferrosos fundidos endurecidos, ferros fundido resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	A ↑	B ↓
A: Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.						
B: Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta						

Fonte: Adaptado da ISO 513, 2004.

3.3. Aço SAE 1020

O aço 1020 é uma liga de ferro ao carbono com um baixo teor de carbono de 0,20% de acordo com a ABNT, e possui composição química conforme a tabela 3.2.

Tabela 3.2: Composição química do aço carbono SAE 1020.

DESIGNAÇÃO ABNT	COMPOSIÇÃO QUÍMICA - FAIXAS E LIMITES EM %			
	C	Mn	P máx.	S máx.
1020	0,18 / 0,23	0,30 / 0,60	0,040	0,050

Fonte: ABNT.

Este aço pode ser usado na fabricação de parafusos, engrenagens, eixos, tubos, disco de rodas, virabrequins, e outros os quais envolvem principalmente sistemas mecânicos que estão submetidos constantemente a esforços. Possui uma alta tenacidade em detrimento de uma baixa temperabilidade, excelentes conformabilidade e soldabilidade. Devido ao seu baixo teor de carbono, o aço 1020 apresenta também uma boa usinabilidade, o que possibilita o uso de ferramentas de aço rápido ou metal duro na fabricação de peças.

3.4. Fluidos de Corte

Nas operações de usinagem, toda ideia que visa o aumento da lucratividade e redução de custos deve ser levada em consideração.

O fluido de corte aparece como um importante fator para o processo industrial, no qual se escolhido apropriadamente proporciona diretamente na interface ferramenta e peça, tanto lubrificação a baixas velocidades de corte, refrigeração a altas velocidades de corte, como auxilia também na retirada de cavaco da zona de corte, protegendo a máquina, ferramenta e peça, proporcionando tanto economia quanto redução de gastos para a empresa (SANTOS, S.C. *et. al.*, 2002). À baixas velocidades de corte, a lubrificação pelo fluido de corte se dá pela redução do atrito em condições severas de tensões extremamente altas, tendo a refrigeração relativamente uma menor importância. À altas velocidades de corte, as condições para a penetração do fluido de corte na interface entre ferramenta e peça para que exerça a lubrificação não são favoráveis, uma vez que o sentido da penetração do fluido é contrário à saída do cavaco da peça, tendo a refrigeração um peso maior nestas condições (MACHADO, A.R.; SILVA, M.B., 2004).

Como nos processos de usinagem há uma grande taxa de atrito e adesão entre ferramenta e peça, quando não se tem a presença de um fluido de corte, uma carga térmica maior é liberada devido a perdas de energia, podendo resultar em um maior nível de desgaste da ferramenta de corte, assim como o comprometimento da integridade superficial da peça, resultando em uma menor qualidade final com a presença de fissuras, distorções ou não conformidades dimensionais. Este controle de geração de calor e lubrificação da interface de contato são realizados em grande parte das empresas do setor metalúrgico através de despejos de emulsões de óleo e água, onde se tem uma baixa pressão e alta velocidade de remoção de material. O fluido de corte passa então a ter a função de redução da área de contato entre cavaco-ferramenta atuando como lubrificante e refrigerante, reduzindo temperaturas elevadas na região de contato.

A grande demanda e produtividade no setor da Indústria Metalúrgica impulsionou o estudo e desenvolvimento de variados tipos de fluidos de corte não somente ao longo dos anos, mas principalmente nas últimas décadas, uma vez que existem fluidos de corte adequados para cada tipo de processo de

usinagem (SILVA, M.B. *et. al.*, 2004). De forma não equidistante, um fator de extrema importância que atua na escolha do fluido de corte é o ambiental, onde há uma grande pressão exercida por Agências de Proteção Ambiental e Agências de Saúde, uma vez que quando manejados inadequadamente, podem atingir o ar, o solo, a fauna, a flora e os recursos hídricos, e assim contaminando-os (SANTOS, 1999; SALES, 1999). Tais Órgãos exigem que os produtos sejam comercializados e utilizados com uma maior segurança. Como consequência, o desenvolvimento de iniciativas e tecnologias ambientalmente corretas que inibem a poluição e conscientizam o consumidor na utilização/consumo de produtos ecologicamente corretos se dá cada vez mais presente, pressionando as empresas a minimizar o uso de fluidos de corte.

3.5. Variáveis da Usinagem

São diversas as variáveis a serem levadas em conta em um processo de usinagem, as quais podem ser divididas conforme a relação entre elas.

Conforme descrito por Machado *et al.*, 2022, 1989, existem as variáveis independentes de entrada, as quais se pode controlar ao se fazer um planejamento pré-usinagem; e existem também as variáveis dependentes de saída, as quais dependem da configuração utilizada ao se fazer a usinagem, sendo diretamente influenciada pelas variáveis de entrada, como: parâmetros de corte, materiais da ferramenta e peça, dentre outros fatores.

Os parâmetros de saída são considerados formas de se avaliar o desempenho de um processo. Através deles pode-se obter diagnósticos de problemas. E ao se estudar estes parâmetros pode-se obter um processo com desempenho aprimorado, adaptando os parâmetros de entrada a fim de melhorar os resultados da usinagem. Determinando-se as condições ideais é possível a obtenção de um melhor aproveitamento das ferramentas de corte e uma taxa de remoção de material superior.

Os cavacos, mecanismos de desgaste da ferramenta, vibrações e rugosidade são alguns dos parâmetros do processo considerados variáveis dependentes de saída, por depender diretamente dos parâmetros independentes de entrada utilizados durante a usinagem.

3.5.1. Desgastes e Avarias na Ferramenta

A diminuição dos desgastes e avarias nas ferramentas de corte são um dos maiores desafios nos processos de usinagem. Essas ferramentas são sujeitas a altas temperaturas e esforços durante o processo, e tais solicitações levam a ferramenta ao desgaste e avarias.

“Desgaste é a perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre a superfície e o material da ferramenta com a qual entra em contato” (BLAU, 1999). “Estão relacionados com interações entre as superfícies e, mais especificamente, a remoção e a deformação do material sobre uma superfície como resultado da ação mecânica da superfície oposta” (RABINOWICZ, 1995).

O fato de uma ferramenta de corte, como as usadas na usinagem, serem feitas para passar por um processo que causa grande atrito e variação de temperaturas, principalmente nas superfícies de saída e de folga, faz com que tenham que haver trocas periódicas da mesma, sob pena de se colocar todo um processo em risco através de uma quebra ou desgaste acentuado.

O tempo em que uma aresta de corte trabalha efetivamente antes de ser reafiada ou substituída é denominado "vida da ferramenta de corte" (T). Um critério deve ser então adotado para determinar o fim da vida da ferramenta a fim de manter o processo produtivo dentro de condições econômicas adequadas. Em usinagem, normalmente, as arestas de corte se desgastam seguindo uma curva padrão (COELHO *et al.*, 2009).

A Figura 3.1 abaixo representa a curva de desgaste de uma ferramenta até o momento de descarte:

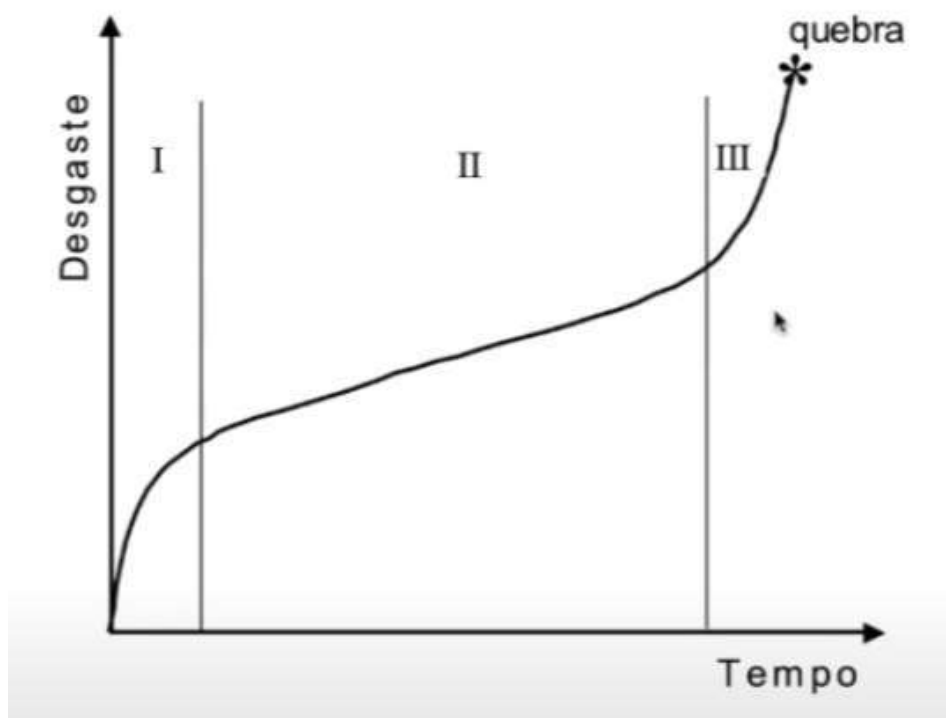


Figura 3.1 - Curva de desgaste. Fonte: COELHO et al, 2009.

O desgaste de uma ferramenta de metal duro é o resultado da ação de fenômenos distintos, denominados componentes do desgaste (FERRARESI, 1995).

Ao se analisar os mecanismos de desgaste de ferramentas na usinagem, percebe-se que vários fenômenos ocorrem simultaneamente, sendo impossível determinar numericamente a influência de cada um. Porém, é possível relacionar alguns fenômenos às variantes de entrada, como, por exemplo, a velocidade de corte (VIBREGGE, 1970, KANIG & KLOCKE, 1997; COELHO *et al*, 2009).

Assim, em velocidades de corte baixas, o desgaste das ferramentas de metal duro é relativamente elevado por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte. Em velocidades de corte maiores, os desgastes são causados principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte, tais como a abrasão mecânica, a difusão intermetálica e a oxidação (FERRARESI, 1995).

3.5.1.1 Mecanismos de Desgaste

A Figura 3.2 representa os mecanismos de desgaste mais recorrentes:

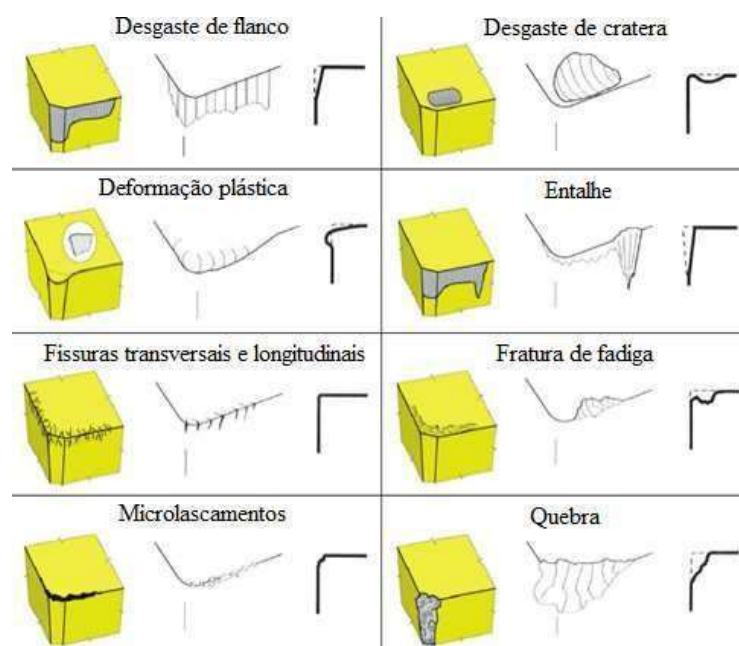


Figura 3.2 - Principais regiões de desgaste de uma ferramenta de corte. Fonte: SANDVIK, 1994.

Na usinagem, a ferramenta de corte sofre solicitações mecânicas e térmicas. As diferentes composições dos materiais da ferramenta e da peça, além de sua heterogeneidade, podem ocasionar os mais diferentes mecanismos de desgastes e avarias. Para evitar que ocorra o colapso total da ferramenta é fundamental que sejam estudados e monitorados os desgastes e possíveis avarias que venham a ocorrer durante o processo.

Geralmente, em condições normais de corte, todas as formas de desgaste estarão presentes, embora uma delas deva prevalecer (COELHO et al, 2009). A figura 3.3 representa os mecanismos de desgaste em função da temperatura:

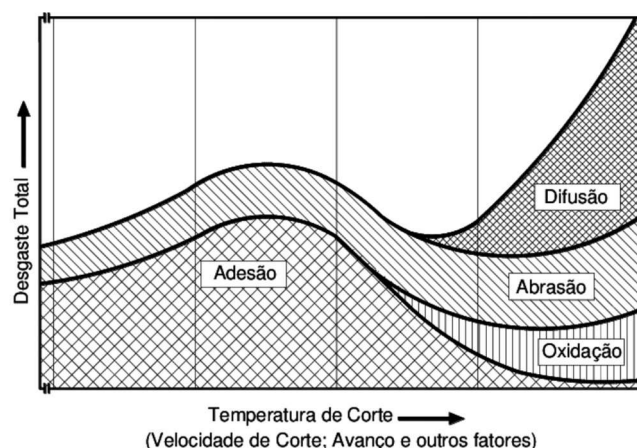


Figura 3.3 - Desgaste em função da temperatura de corte. Fonte: VIBREGGE, 1970, apud KONIG & KLOCKE, 1997, adaptada.

Os mecanismos de desgaste em função da temperatura podem variar dependendo do material a ser usinado, das condições de operação e do tipo de desgaste.

A temperatura, bem como os fatores e/ou parâmetros de corte que a influencie (principalmente a velocidade de corte) tem grande influência na taxa e no tipo de desgaste que ocorre em ferramentas de corte.

É importante ressaltar que há diversos fatores que influenciam na mudança de temperatura durante um processo, como material a ser usinado, velocidade de corte, lubrificação, velocidade de avanço, profundidade de corte, entre outros. Compreender esses mecanismos e adotar estratégias adequadas de controle de temperatura e lubrificação são essenciais para minimizar o desgaste e prolongar a vida útil dos componentes e ferramentas.

Todos esses mecanismos de desgaste a serem mencionados nos próximos tópicos resultam em perda ou deslocamento gradual de material, que ocorre ao longo de um determinado período de tempo. No entanto, quando se trata de avaria de uma ferramenta, a perda ou deslocamento de massa ocorre de forma repentina e inesperada, caracterizada por fratura ou lascamento de origem mecânica, ou pela fadiga térmica causada por flutuações de temperatura (MELO; SILVA; MACHADO, 2005; MACHADO et al., 2009).

3.5.1.1.1 Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas

A deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas ocorre em usinagem de metais com alto ponto de fusão com ferramentas de aço

rápido. As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são suficientes para causar deformação plástica superficial. Devido às altas temperaturas ali desenvolvidas, a tensão de escoamento do material da ferramenta, próximo à interface, é reduzida. Como consequência, o material é arrancado da superfície da ferramenta, formando-se assim uma cratera (TRENT, E.M. *et al.*, 2000).

As ferramentas na usinagem estão sujeitas a altas temperaturas, que acabam por diminuir a resistência ao escoamento do material, e tensões, essas que provocam uma tensão de cisalhamento na cunha cortante, causando uma deformação da aresta de corte, e por consequência, mudando as propriedades da geometria original da ferramenta (COELHO *et al.*, 2009).

3.5.1.1.2 Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão

Ocorre com mais frequência em ferramentas de aço rápido, podendo ocorrer também em ferramentas de metal duro, porém não é possível que ocorra esse tipo de falha em ferramentas cerâmicas, devido às suas baixas tenacidades. Nesse caso, se o limite de resistência for atingido, ela entra em ruptura imediatamente sem ocorrer deformação plástica. Essa deformação plástica da aresta ocorre principalmente na usinagem dos materiais de elevada dureza. As tensões compressivas são máximas na extremidade da aresta e decrescem exponencialmente até zero no ponto em que o cavaco perde contato com a superfície de saída. Portanto, quanto mais resistente for o material da peça, e quanto menos resistente for o material da ferramenta de corte, mais fácil será que a deformação plástica ocorra (FERRARESI, 1995).

Ocorre normalmente a altas velocidades de corte e de avanço, onde as altas temperaturas aliadas às altas tensões de compressão podem causar deformações na aresta de corte.

3.5.1.1.3 Difusão

O desgaste por difusão trata-se da transferência de material, a um nível atômico, entre a ferramenta e o cavaco.

É um mecanismo de desgaste que depende da temperatura, da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de cisalhamento secundária e da duração de contato. Pelo fato de as velocidades relativas entre ferramenta e

cavaco serem altas, os tempos de contatos entre as superfícies são curtos, o que faz com que a zona de fluxo seja a principal causadora desse tipo de desgaste (COELHO *et al*, 2009).

Este mecanismo de desgaste é o principal responsável pelo desgaste de cratera. A velocidade de corte e o avanço são diretamente responsáveis pela taxa de aumento de desgaste, o qual pode ocorrer tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga. Tendo a superfície de saída as melhores condições para que esse tipo de desgaste ocorra (COELHO *et al*, 2009).

3.5.1.1.4 Aderência e arrastamento

A aderência ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. No caso do desgaste por aderência, há a soldagem entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, modificando o comportamento em relação à força de corte, desgaste da ferramenta e acabamento superficial da peça. Esse material do cavaco soldado à ferramenta é periodicamente arrancado, carregando consigo pequenas quantidades do material da ferramenta. Sendo assim, fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta são arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface (AMORIM, 2002).

3.5.1.1.5 Abrasão

Ocorre quando, a temperaturas elevadas, micropartículas de dureza elevada são arrastadas pelas superfícies da ferramenta e da peça, causando microcortes. Quanto maior a dureza da ferramenta a quente, maior a resistência a esse tipo de desgaste.

Influenciado principalmente pela velocidade de corte. Por mudar a geometria da ferramenta de corte, causa uma piora no acabamento da peça, podendo também levar a erros nas dimensões da peça, devido a diferenças na aresta de corte original.

Este mecanismo de desgaste é muito importante na usinagem com pastilhas revestidas, cerâmicas puras e mistas. Nem sempre ferramentas menos resistentes estarão mais suscetíveis a esse tipo de desgaste. Por exemplo, o aço rápido, apesar da menor resistência desse tipo de material para o desenvolvimento do microsulcamento, do microcorte ou do microlascamento,

pode haver carência da fonte de partículas duras e abrasivas para o processo (SANTOS *et al.*, 2007; FERRARESI, 1995).

3.5.1.1.6 Oxidação

Depende do material com o qual é formada a ferramenta de corte. Com altas temperaturas aliadas ao contato com o ar ambiente e/ou fluido de corte, são formados óxidos porosos na superfície da ferramenta, próxima a aresta cortante. Em ferramentas compostas por tungstênio e o cobalto, são formadas camadas de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito, porém, alguns óxidos como o óxido de alumínio, são mais duros e resistentes. Assim, alguns materiais de ferramenta, que não contém óxido de alumínio, por exemplo, desgastam-se mais facilmente por oxidação (TRENT, WRIGHT, 2000).

3.5.1.1.7 Aresta postiça de corte

A aresta postiça de corte trata-se da formação de uma nova aresta de corte formada pelo material da peça a qual está sendo usinada. Essa formação altera as propriedades da geometria da ferramenta, causando efeitos indesejados em todo o processo, como uma relativa piora no acabamento superficial da peça.

A velocidade de corte é considerada o fator mais influente na formação da aresta postiça. Conforme a velocidade de corte se eleva, ocorre uma redução nas dimensões e na estabilidade da aresta postiça. Além disso, existe uma velocidade específica em que a aresta postiça deixa de existir, conhecida como velocidade crítica.

3.5.1.2 Tipos De Desgaste

A Figura 3.4 abaixo representa os tipos de desgaste mais comuns:

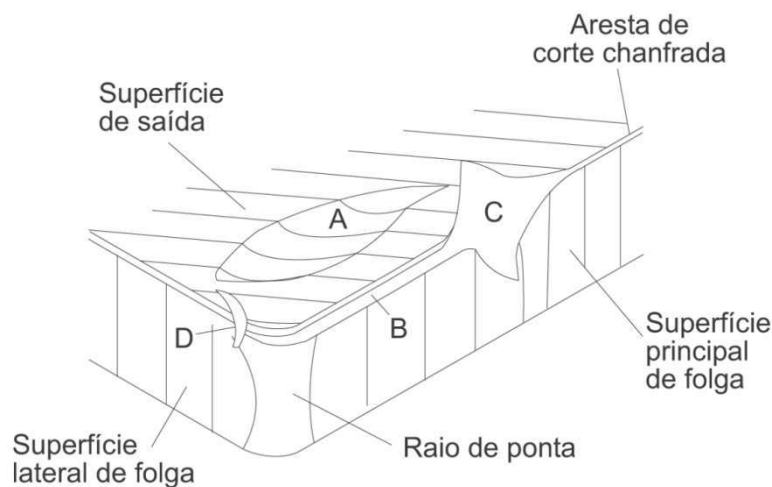


Figura 3.4 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte. Fonte: Dearnley e Trent e Wright, 1982.

São três os principais tipos de desgaste:

3.5.1.2.1 Desgaste de cratera (área A):

Segundo Aspinwail (1998), este tipo de desgaste geralmente está associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta. O desgaste de cratera ocorre em razão da combinação dos mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão, na superfície de saída da ferramenta durante o deslizamento do cavaco. A profundidade e a largura da cratera, formada na superfície de saída da ferramenta, estão relacionadas à velocidade e ao avanço utilizados no processo (FERRARESI, 1995). O crescimento do desgaste de cratera pode acarretar na quebra da ferramenta quando se encontra com o desgaste frontal (DINIZ *et al.*, 2008).

3.5.1.2.2 Desgaste de flanco (área B):

Aumenta o atrito entre a ferramenta e o material da peça devido à perda do ângulo original de folga da ferramenta, que torna maior a área de contato ferramenta-peça. Geralmente, é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Todo processo de usinagem causa desgaste de flanco, provocando uma piora no acabamento superficial e a perda das características dimensionais

da peça. Este tipo de degradação é influenciado pelo aumento da velocidade de corte (SANTOS *et al.*, 2007; FERRARESI, 1995).

3.5.1.2.3 Desgaste de entalhe (áreas C e D):

É resultado da ação das rebarbas produzidas nas bordas do cavaco, as quais apresentam uma taxa de encruamento mais elevada. Na região de formação de entalhe a ferramenta de corte, devido às altas temperaturas, também é submetida à ação oxidante da atmosfera, comprometendo sua durabilidade (KRATOCHVIL, 2004).

3.5.1.3 Tipos de Avarias

As avarias na ferramenta de corte durante a usinagem são problemas, danos ou falhas que podem ocorrer e afetar a qualidade do processo. Essas avarias podem resultar em peças defeituosas, danos à máquina ou à própria ferramenta.

Estudos como o de Diniz *et al.* (2008) afirmam que avarias na ferramenta de corte têm um impacto significativo nas características finais da usinagem. O desgaste excessivo da ferramenta, por exemplo, pode acarretar erros dimensionais, acabamento superficial inadequado e redução da vida útil da ferramenta.

Além disso, a quebra da ferramenta durante a usinagem pode resultar em paralisação da produção e custos adicionais de reparo ou substituição da ferramenta. De acordo com Ferraresi (1969), a quebra da ferramenta é um dos principais problemas enfrentados na indústria da usinagem.

3.5.1.3.1 Quebra

Segundo Ferraresi (1969), ocorre principalmente em ferramentas fabricadas de materiais cerâmicos ou de carbonetos de elevada dureza. Ferramentas tenazes, como as de metal duro são menos suscetíveis à quebra, e em contrapartida, tem o seu tempo de vida reduzido, sendo também mais sensíveis a deformações por compressão.

A ruptura da ponta ou da aresta cortante da ferramenta é originada pela ação de grandes forças de usinagem nos seguintes casos:

- Ângulo da ponta ou ângulo de cunha pequeno;
- Material de corte quebradiço;
- Corte interrompido;
- Parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça.

3.5.2. Análise do Cavaco

Diversos problemas podem ocorrer em função do tipo de cavaco produzido no processo de usinagem. Cavacos considerados de qualidade “ruim” podem resultar em perda de produtividade e acabamento superficial de baixa qualidade, além de prejudicar máquinas e peças e comprometer a segurança dos trabalhadores presentes. Através deles também é possível realizar análises que ajudarão a produção como um todo, pois o mesmo é diretamente impactado pelas variáveis independentes de entrada (SANTOS *et al.*, 2007; FERRARESI, 1995).

Em geral, a formação do cavaco pode ser descrita através dos seguintes passos:

- a) Deformação elástica ou recalque: A partir da penetração da ferramenta, uma porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta;
- b) Deformação plástica: Tal porção sofre deformação plástica, a qual aumenta até atingir um valor de tensão de cisalhamento grande suficientemente para dar início a um deslizamento entre o material recalcado e a peça. Este deslizamento ocorre segundo as direções dos planos de cisalhamento dos cristais da porção recalcada;
- c) Ruptura: Ao se continuar o processo de penetração na peça, haverá então ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento
- d) Movimento do cavaco sobre a superfície da ferramenta: Em seguida, devido ao movimento relativo entre ferramenta e peça, inicia-se um escorregamento da porção do material cisalhado sobre a superfície da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção do material está se formando e cisalhando (SANTOS *et al.*, 2007; FERRARESI, 1995).

Segundo Ferraresi (1995), os cavacos ainda podem ser classificados em tipos:

- a) Cavaco contínuo: O cavaco é formado continuamente, devido à ductilidade do material e à alta velocidade de corte. A força de corte permanece estável, o que acarreta um acabamento superficial satisfatório.
- b) Cavaco de cisalhamento: geralmente se forma devido a fatores como vibrações externas, heterogeneidade da estrutura metalográfica ou aumento da deformação. Também se forma quando são usados grandes avanços, velocidades de corte inferiores a 100m/min e ângulo de saída pequeno.
- c) Cavaco de ruptura: fragmentos arrancados da peça usinada. Os agrupamentos de material de cavaco permanecem separados. Ocorre a partir de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea.

E em formas:

- a) Cavaco em fita;
- b) Cavaco helicoidal;
- c) Cavaco em espiral;
- d) Cavaco em lascas ou pedaços.

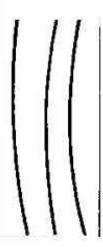
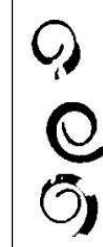
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
									
desfavorável			médio		favorável			médio	

Figura 3.5 - Principais tipos de cavaco encontrados na usinagem. Fonte: On-Convoyeurs, 2022.

Alguns formatos de cavaco são considerados desfavoráveis, e podem dificultar a operação das máquinas, causando avarias na peça, desgaste

premature das ferramentas de corte e/ou comprometendo a segurança dos trabalhadores. (FERRARESI, 1995).

3.5.3. Forças de Usinagem

No processo de usinagem convencional o conhecimento acerca das forças atuantes na cunha cortante se faz de extrema importância, uma vez que estas são fatores limitantes da potência requerida para executar o corte e influenciam diretamente na temperatura de corte e desgastes da ferramenta, determinando a viabilidade econômica do processo (MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. 2004). Machado *et. al.* (2004) define três componentes de forças básicas, as quais são:

- 1) *Força de corte (F_c)*: força sobre o plano de trabalho dada pela velocidade de corte, atuante na direção de corte;
- 2) *Força de avanço (F_f)*: força sobre o plano de trabalho dada pela velocidade de avanço, atuante na direção do avanço;
- 3) *Força de profundidade (F_p)*: projeção da força perpendicular ao plano de trabalho.

Apesar de somente as forças de corte (F_c) e de avanço (F_f) atuantes no elemento de máquina contribuírem para a potência de usinagem, a força de profundidade (F_p) se faz de grande importância já que é a responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta no corte, traduzindo em uma dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas (DINIZ *et. al.* 2008). As figuras 3.6 e 3.7 a seguir apresentam melhor a visualização destas forças:

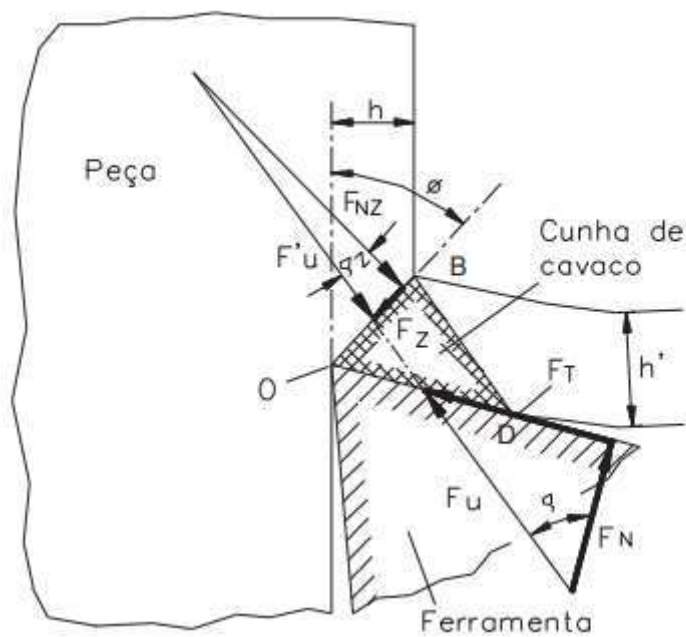


Figura 3.6 - Forças de usinagem no corte ortogonal.

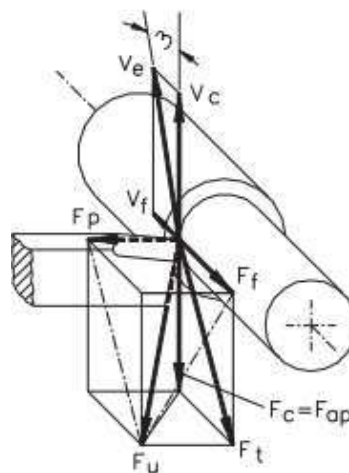


Figura 3.7 - Componentes das forças de usinagem no processo de torneamento.

Neste caso, há duas componentes de forças resultantes as quais são F_u e F_u' , onde F_u representa a resultante das forças provenientes da ação da ferramenta sobre a superfície inferior da cunha do cavaco, e F_u' a resultante das forças provenientes da ação da peça sobre o plano de cisalhamento primário. Não obstante, a componente resultante F_u pode então ser expressa pela soma vetorial da força de corte (F_c), a qual é responsável pelo trabalho total realizado

no corte, da força de avanço (F_f) e da força de profundidade (F_p), perpendicular ao plano de trabalho.

Como a força de usinagem depende principalmente das áreas das zonas tensão de cisalhamento primária e secundária, bem como da resistência ao cisalhamento do material da peça nesses planos (TRENT; WIRGHT 2000), faz-se imprescindível a análise de qualquer elemento de usinagem com base em seus efeitos sobre estes fatores.

3.5.3.1 Avanço e profundidade de corte

O avanço (f) é o percurso de avanço da ferramenta de corte sobre a superfície da peça medida a cada volta completa ($mm/volta$) ou em cada curso da ferramenta ($mm/golpe$).

Com o aumento dos parâmetros de avanço e profundidade de corte, a área das zonas de cisalhamento primária e secundária se tornam maiores, o que reflete em uma maior força de usinagem que, segundo a literatura de Machado (2004), obedece a uma proporção quase que linear.

3.5.3.2 Velocidade de corte

A utilização de uma velocidade de corte baixa na usinagem de materiais resulta em menor taxa de produção, o que por sua vez aumenta o tempo e custo de fabricação. Esse fator está relacionado às propriedades do material da ferramenta utilizada, e por esta razão é recomendado seguir os valores de velocidade de corte pré-definidos pelo fabricante.

De maneira que o caso estudado envolve processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte (V_c) é resultado do deslocamento da ferramenta sobre a superfície da peça e depende diretamente do diâmetro da peça e do número de rotações por minuto, calculada pela equação 3.1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot \phi \cdot N}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (3.1)$$

Onde,

$\varnothing$ = diâmetro da peça em mm;

n = número de rotações por minuto.

Assim como Diniz *et. al.*, 2008 definem que os desgastes em ferramentas são ocasionados principalmente pelos valores definidos de velocidade de corte, a velocidade de avanço da ferramenta de corte tem também influência direta, porém de menor intensidade. Aumentar os valores de velocidade de corte no torneamento ocasionará em maiores desgastes do que aumentar o valor da velocidade de avanço em uma mesma proporção.

3.5.3.3 Velocidade de avanço

No torneamento, a velocidade de avanço (Vf) é o produto do avanço (f) pela rotação da ferramenta. Calculada pela equação 3.2.

$$Vf = f * n \quad [\text{mm/min}] \quad (3.2)$$

onde,

f = avanço (mm/volta);

n = número de rotações por minuto.

Com relação a força de corte, quanto menor os valores de velocidade, menor será a força de corte. Conforme já discorrido por Ferraresi (1995), o aumento da velocidade de corte implica em uma maior força de corte, devido a redução da resistência ao cisalhamento das zonas de tensão. Como resultado obtém-se que a força de corte tende a se estabilizar a elevados valores de velocidade de corte.

3.5.3.4 Material da peça

Experimentalmente, estudos realizados por CHILDS (1989) e KATO (1972) comprovaram que a distribuição de tensão na zona de aderência durante a usinagem varia de acordo com o material da peça. Essa distribuição é influenciada pelo coeficiente de atrito entre a superfície da ferramenta e o cavaco, bem como pela capacidade de deformação do material.

A força de usinagem está diretamente relacionada às propriedades de resistência do material da peça e à sua capacidade de deformação plástica. Essa força é proporcional à resistência ao cisalhamento do material, ou seja, quanto maior a resistência ao cisalhamento, maiores serão as forças resultantes.

Além disso, a dureza do material também exerce influência na força de corte, geralmente apresentando uma relação direta. Isso significa que, à medida que a dureza do material aumenta, espera-se um aumento correspondente na força de corte. Contudo, a adição certos elementos como o carbono, afim de garantir maiores durezas, deve ser feita com cautela, pois acabam por gerar planos de alta resistência ao cisalhamento. Isto acaba por dificultar a quebra do cavaco, e aumentam a tensão de cisalhamento no plano secundário.

3.5.4. Potência de Usinagem

A aquisição de dados referentes à potência de usinagem trata-se da medição e análise da potência consumida durante o processo de usinagem de uma peça. É uma técnica que pode ser utilizada para otimizar os parâmetros de corte, avaliar a eficiência e o desempenho da máquina de usinagem e identificar problemas de processo. Estando também ligada à vida útil da ferramenta de corte.

Através do cálculo das forças de usinagem, é possível evitar situações inesperadas ou indesejadas durante o processo. Essa abordagem ajuda a identificar e prever problemas potenciais, como excesso de carga na máquina ou desgaste prematuro da ferramenta. Assim como definido por Machado e da Silva (2004), as potências necessárias para a usinagem derivam de suas componentes de força de usinagem e respectivas velocidades, sendo elas a potência de corte (N_c) e de avanço (N_f).

a) Potência de corte (N_c):

$$N_c = \frac{F_c * V_c}{60 * 75} \quad [\text{CV}] \quad (3.3)$$

Sendo,

F_c = Força de corte (Kgf);

V_c = Velocidade de corte (m/min).

b) Potência de avanço (N_f):

$$N_f = \frac{F_f * V_f}{1000 * 60 * 75} \quad [\text{CV}] \quad (3.4)$$

Sendo,

F_f = Força de avanço (Kgf);

V_f = Velocidade de avanço (mm/min).

Os valores de potência referentes aos motores responsáveis pelo movimento de avanço são consideravelmente menores que as potências obtidas pelos motores da direção do corte, podendo ser grande parte das vezes, desprezada para cálculos de força e potência de corte. (MACHADO et al).

Existem diferentes métodos para adquirir a potência de usinagem, e a escolha depende do tipo de máquina, do processo de usinagem e dos requisitos específicos de medição. Alguns dos métodos comumente usados são:

a) Medição direta da potência: sensores de força e torque são instalados na máquina ou na ferramenta para medir tais grandezas durante o processo de usinagem. Esses dados são então usados para calcular a potência de corte através das equações já mencionadas acima (equação 3.3 e 3.4).

b) Medição indireta da potência: através deste método, são medidas as grandezas elétricas como corrente e tensão elétricas e correlacionados com a potência de usinagem. Esses parâmetros apesar de mais simples de medir podem gerar imprecisão na aquisição de resultados, uma vez que não leva em conta as perdas e ineficiências do sistema elétrico e mecânico da máquina.

Para estimar a potência de corte através da corrente elétrica é importante ter acesso aos parâmetros elétricos da máquina de usinagem, como a tensão de alimentação (V) e o fator de potência ($\cos \phi$). Essas informações podem ser obtidas nas especificações técnicas da máquina ou através de medições prévias.

Quanto à corrente elétrica, é necessário o uso de um medidor de corrente para medir a corrente elétrica consumida pelo motor da máquina de usinagem durante o processo de corte.

A potência de corte (P_c) pode ser estimada utilizando a seguinte fórmula aproximada:

$$P_c = V * I * \cos \varphi \quad (3.5)$$

Onde V é a tensão de alimentação em Volts, I é a corrente elétrica medida em Ampère e $\cos \varphi$ é o fator de potência.

Além dos métodos citados acima, há também uma forma de simulação computacional, através de softwares de simulação, onde é possível estimar a potência de usinagem com base nos parâmetros de corte, geometria da ferramenta, materiais envolvidos e outras variáveis. Apesar de não ser de fato um tipo de medição, pode ser útil na previsão e otimização do processo de usinagem.

3.5.5. Tempo de Usinagem

O tempo ativo e o tempo passivo são dois conceitos relacionados ao tempo de usinagem.

O tempo ativo de usinagem refere-se ao tempo efetivo em que a máquina está realizando a operação de corte ou usinagem. Tempo em que a ferramenta está em contato direto com a peça, removendo o material.

Por outro lado, o tempo passivo de usinagem refere-se ao tempo em que a máquina está inativa, ou seja, não está realizando a operação de corte. Isso pode incluir momentos como a troca de ferramenta, movimentação da máquina entre posições, pausas para ajustes, inspeção da peça, entre outros. O tempo passivo não contribui diretamente para a remoção de material ou a operação de usinagem em si, mas ainda é um fator importante a ser considerado ao calcular o tempo total de usinagem.

Adicionalmente, o tempo ativo de usinagem pode ser calculado considerando diversos fatores, como a velocidade de corte, o avanço, o número de passes de corte, o comprimento da peça e outros parâmetros específicos do processo de usinagem.

No entanto, de forma geral, você pode calcular o tempo de usinagem aproximado utilizando a seguinte fórmula:

$$T = (C / (Vc * N * f)) * 60 \quad (3.6)$$

Onde:

T é o Tempo de usinagem em minutos;

C é o comprimento total da área a ser usinada em milímetros;

Vc é a velocidade da ferramenta de corte em mm/min;

N é a quantidade de passes necessários para completar a usinagem da peça;

f é o avanço da ferramenta de corte em mm/dente;

Sendo essa fórmula uma estimativa geral e pode variar dependendo das condições específicas da usinagem.

Considerando que o tempo passivo depende diretamente do tempo produtivo do torno, podemos ainda estimá-lo em cerca de um terço do tempo ativo, sendo essa estimativa deveras conservadora.

3.5.6. Torneamento com corte interrompido

Na indústria, é bastante comum operações de torneamento com corte interrompido, operação a qual se faz presente na usinagem de materiais cuja geometria é diferente da cilíndrica, como barras de seção retangulares, peças com presença de rasgos de chavetas (como ilustra a Figura 3.8) ou qualquer outra descontinuidade em sua geometria devido a outros fatores. No estudo de caso realizado, as peças são retiradas de um material maciço maior por meio do corte por plasma, operação a qual propicia irregularidades superficiais na peça, principalmente em casos cujo diâmetro da peça retirada é relativamente grande. Três pontos são levados em consideração quando o processo de corte acontece de forma interrompida: a entrada da ferramenta na peça, a saída da ferramenta quando se inicia a interrupção do corte, e os ciclos térmicos e mecânicos (Pekelharing, 1980).

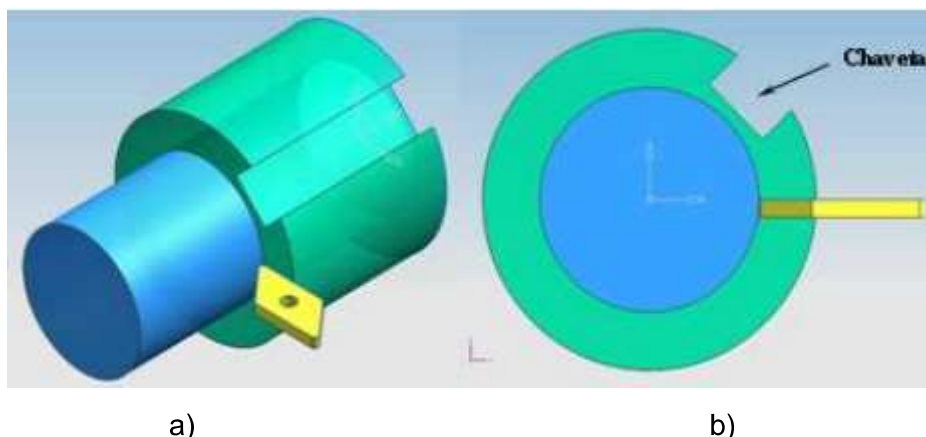


Figura 3.8 – Corte interrompido em peça cilíndrica contendo rasgo de chaveia. Fonte: Sanchez, 2019.

A interrupção do corte nesses casos ocorre de maneira abrupta, ocasionando um choque mecânico considerável. A entrada e a saída da ferramenta de corte podem ocasionar trincas tanto de natureza mecânica como térmica (MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. 2004), as quais costumam ocorrer em baixas velocidades e paralelas à aresta de corte, e assim condenando a vida útil da pastilha.

3.6. Sistemas de aquisição e placa microcontroladora em Arduino

O microcontrolador em Arduino consiste em um sistema eletrônico proveniente de uma plataforma aberta de prototipagem, com base em uma placa simples de entrada e saída entre um dispositivo e equipamentos externos conectados a ele (McRoberts, 2011). Trata-se basicamente de um pequeno computador que permite a comunicação entre dispositivos automatizados como controle de automóveis, eletrodomésticos entre outros. É um artifício eletrônico para o monitoramento de circuitos extremamente viável, devido ao seu baixo custo e arquitetura de programação relativamente simples.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas diversas ferramentas de corte, todas de metal duro, brasadas e principalmente afixadas nos suportes por parafusos, conforme serão descritas no decorrer deste capítulo e discutidas no capítulo 5. Essas ferramentas, na maioria, possuem revestimento e TiN, dentre outras coberturas.

As chapas tiveram sua fabricação divididas em 3 partes: a retirada da camada exterior (carepa)/padronização, etapa na qual a peça é padronizada com 430 mm de diâmetro externo e 220 mm de diâmetro interno; o desbaste, etapa na qual as especificações da peça se aproximam das almejadas; e por fim o acabamento e a produção de raios e chanfros. É importante destacar que os parâmetros de corte usados para realizar a remoção da camada externa das peças eram diferentes das outras etapas:

4.1. Histórico da usinagem dos acoplamentos mecânicos

Inicialmente, foi utilizado apenas o centro de usinagem para a fabricação das peças. Ao se mostrar um método ineficiente, e demandar muito tempo, os engenheiros e operadores da empresa 3R optaram pela fabricação por combinação de máquinas, realizando o torneamento em um torno convencional (Nardine, 650) e posteriormente, realizando as furações e fresamentos (que não foram analisados neste trabalho) no centro de usinagem.

Testes preliminares foram realizados para diferentes ferramentas de corte, bem como diferentes valores de avanço, profundidade de corte e rotação, afim de conhecer definir melhor o processo e as melhores condições de trabalho. O tempo de usinagem total gasto para uma peça padrão finalizada foi de cinco horas aproximadamente, de acordo com relatos dos funcionários da empresa.

A Figura 4.1 apresenta uma ferramenta de metal duro, brasada e sem revestimento, utilizada nos testes preliminares.



Figura 4.1 - Ferramenta de metal duro brasada - testes iniciais. Fonte: Autoria própria.

Como essas ferramentas brasadas apresentaram desgastes prematuros, optou-se por buscar no mercado outras ferramentas de corte com diferentes características, conforme pode-se verificar através da Figura 4.4, abaixo.



Figura 4.2 - Ferramenta de corte de metal duro WNMG 060408, com revestimento TiN. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.1 fornece os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante para a usinagem de aço ao carbono. Ela serve como um guia prático e confiável para os operadores de máquinas e engenheiros envolvidos no

processo de usinagem. Os parâmetros de corte listados na tabela incluem velocidade, taxa de avanço e profundidade de corte.

Tabela 4.1 - Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante das ferramentas de metal duro WNMG 060408.

V_c [m/min]	120 - 250
f [mm/rot]	0,2 - 0,5
ap [mm]	0,5 - 6,0

Fonte: Swiss Blue fabricante.

Entretanto, durante o processo inicial de remoção da camada de óxido de ferro, os parâmetros de corte utilizados foram diferentes dos recomendados. De acordo com a Tabela 4.2 subsequente, a velocidade de corte e o avanço foram menores do que os valores indicados, porém a profundidade de corte foi maior.

Tabela 4.2 - Parâmetros de corte torno SMTCL desbaste inicial.

Rotação (n) [rpm]	75
Profundidade de corte (ap) [mm]	1,0
Avanço (f) [mm/rot]	0,23

Fonte: Autoria própria.

As peças passaram a ser trabalhadas no torno mecânico modelo CA6240A da SMTCL (*Shenyang Machine Tool Group, Ltd*), identificado na Figura 4.3, em detrimento do torno Nardine 650. Essa alteração ocorreu devido a mudanças na estrutura da empresa, a qual adquiriu essa máquina em 2022. Por possuir uma robustez maior do que a máquina anterior, com características operacionais diferentes dos tornos convencionais fabricados no ocidente, essa máquina foi adotada como a principal operadora dessas peças. A máquina possui como características distância entre pontas de 1000 mm e balanço máximo sobre barramento de 400 mm, peso de 2230 kg, fabricada em setembro de 2009.

No torno SMTCL a velocidade de rotação da placa é alterada através do posicionamento de um conjunto de engrenagens, realizado através de alavancas. Nesse caso a rotação do motor permanece constante, sendo alterada somente a rotação do eixo-árvore.



Figura 4.3 - Torno CA6240A da Shenyang Machine Tool Group Ltd. Fonte: Autoria própria.

Nesta máquina, foram definidos os parâmetros de corte de forma otimizada, diminuindo o tempo de torneamento para aproximadamente quatro horas e meia, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros de corte torno SMTCL.

Rotação [RPM]	190
Fz [mm/rot]	0,23
Ap [mm]	0,5

Fonte: Autoria própria.

Para o torneamento dessas peças foram determinadas diferentes ferramentas para diferentes processos. Ao se desbastar as peças, eram usadas ferramentas apenas para esse propósito. Para fazer o acabamento era feita a troca da ferramenta por uma de mesmo modelo, porém com grau de desgaste inferior, possibilitando um melhor acabamento e uma menor rugosidade superficial. Além disso, haviam ferramentas específicas de metal duro, que eram usadas para fazer raios, cujo propósito era aliviar a concentração de tensão, e chanfrar as quinas, de forma a garantir a segurança dos operadores, evitando acidentes. A Figura 4.4 apresenta as ferramentas de metal duro utilizadas para chanfrar e fazer os raios de arredondamentos, internos e externos, respectivamente.

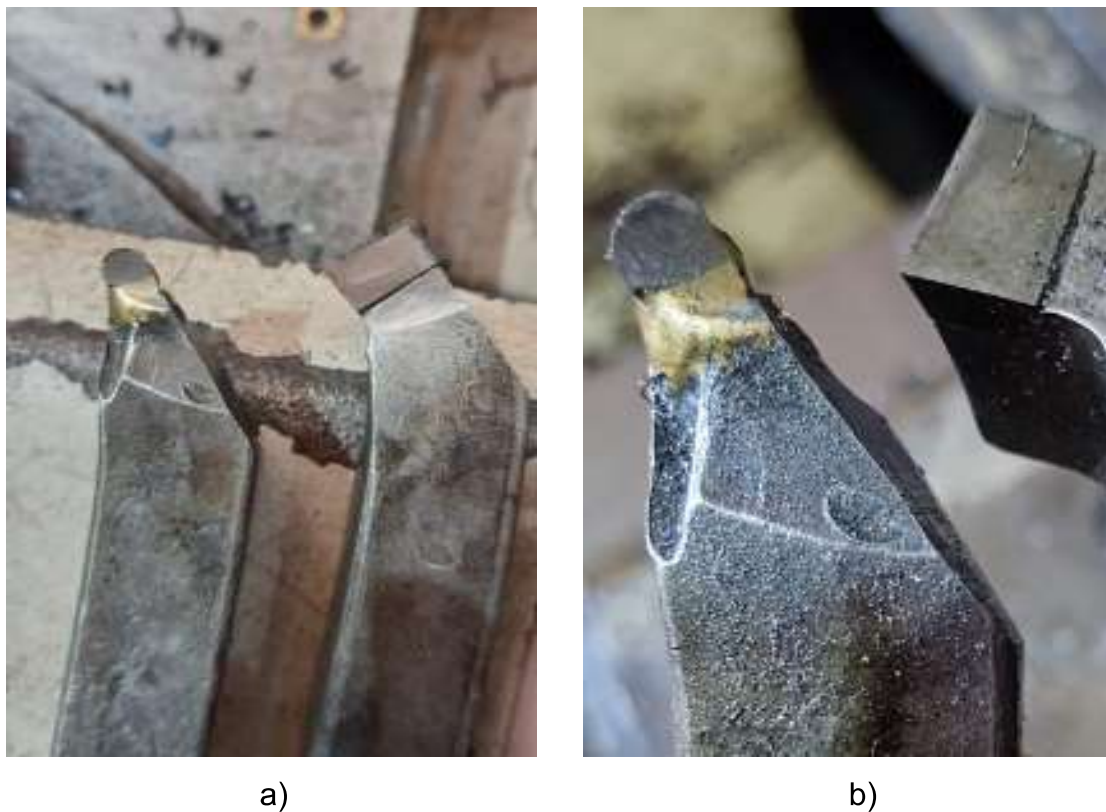
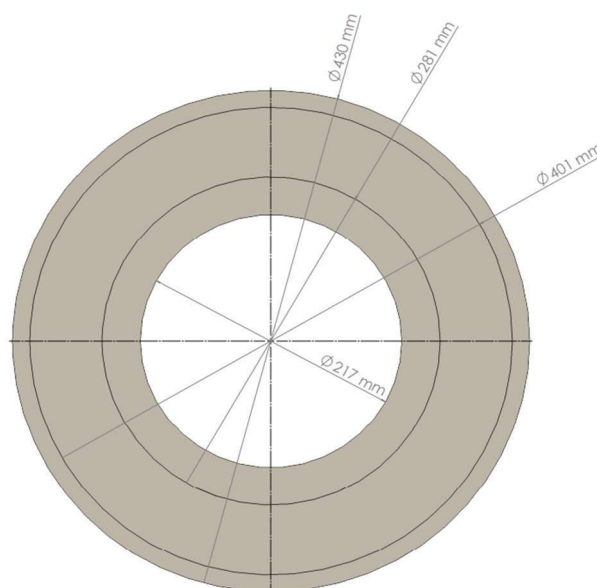


Figura 4.4 - Ferramentas utilizadas eliminação das arestas pontiagudas da chapa.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.5 abaixo representa as medidas da peça após o desbaste, ainda com 1 milímetro de sobremetal, para que seja realizado o processo de acabamento.



a) Vista Superior.

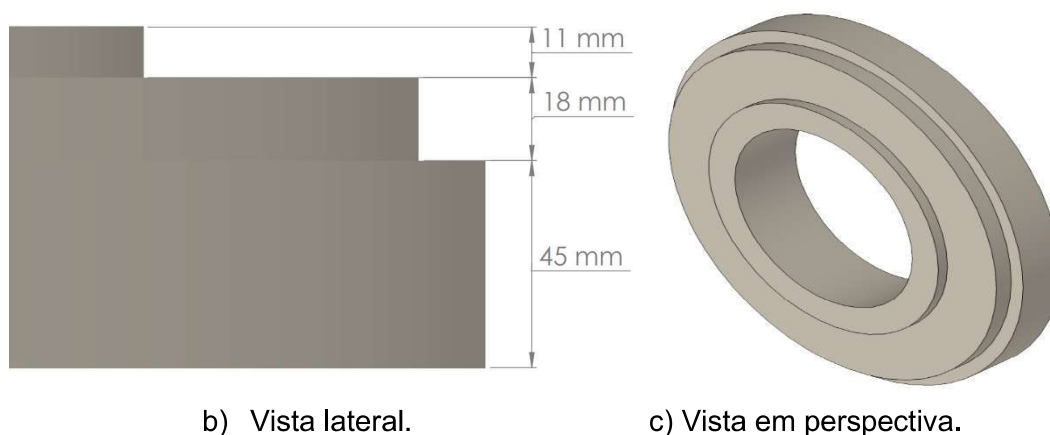


Figura 4.5 - Representação das medidas do acoplamento após a operação de desbaste. Fonte: Autoria própria.

Dados os parâmetros de corte e as dimensões da peça, pode-se estimar através da Equação (3.6) o tempo de usinagem necessário para a produção de cada peça.

4.1.1. Torno CNC

Após alguns questionamentos da equipe desse trabalho, junto ao pessoal responsável pela produção da empresa 3R usinagem, foi decidido que algumas operações de fabricação dessas peças seriam fabricadas num torno CNC, ou seja: inclusão de máquina CNC em algumas operações no processo de fabricação dos acoplamentos mecânicos. Dessa forma, a segunda etapa (desbaste) de fabricação passou a ser trabalhada no Torno CNC *NARDINI/LOGIC 195II*, de diâmetro admissível sobre barramento de 440 mm e distância entre pontas de 1000 mm.

O desbaste realizado no torno Nardini (máquina com Comando Numérico Computadorizado - CNC) foi realizado de modo a deixar 1 milímetro de sobremetal, para que o acabamento pudesse ser realizado novamente pelo torno convencional CA6240A. O retorno para uma máquina convencional ao invés de concluir as peças no torno CNC, deve-se ao fato de a fabricação da peça estar numa fase de transição, sendo assim, o sistema de fixação no torno convencional já estava preparado para tais operações, além de todo o ferramental necessário já estar preparado para tais operações de usinagem.

Deve-se ressaltar que de início, a principal dificuldade nessa parte do processo foi referente ao encaixe da peça no torno CNC, visto que as castanhas

(parte do torno que segura a peça pelo diâmetro interno) não eram as apropriadas para as dimensões necessárias. Sendo assim, foram adaptadas novas castanhas e adicionado um contraponto, o qual era encaixado na peça pelo diâmetro interno na face oposta às castanhas, e no cabeçote móvel, como ilustrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 - Sistema de fixação com um suporte especial no contra ponto: a) contra ponto; b) contra ponto fixado no torno. Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio de um relógio comparador, Figura 4.7, as peças foram acopladas nas castanhas do torno e controladas com pequenas marteladas, realizadas em sua face contra a castanha. O erro verificado pelo relógio comparador é de aproximadamente 5 centésimos de milímetro, o que não influencia no processo de fabricação dessas peças.

Os parâmetros de corte utilizados são os mesmos da segunda etapa (desbaste) realizada no torno convencional SMTCL.



Figura 4.7 - Relógio comparador utilizado para centralização das peças. Fonte: Autoria própria.

Por fim, as peças foram redirecionadas para o torno convencional SMTCL, para execução do acabamento, com intuito de melhorar a precisão dimensional, e a qualidade superficial da mesma.

Uma vez finalizada as operações de acabamento, como sugestão para investigar a influência das condições de corte trabalhadas sobre o nível de energia consumida das máquinas, o grupo de trabalho achou pertinente utilizar o Laboratório de Usinagem do IFG, para realização de testes sob condições de corte semelhantes aos trabalhados na Empresa 3R. Dessa forma, foram realizadas medições do nível de energia drenada pela máquina, ponderando sobre parâmetros de corte ideais para usinagem das peças. A sugestão se justificava mediante a grande quantidade de pastilhas de metal duro danificadas e descartadas na usinagem das chapas de aço, até encontrar condições mais ideais de corte.

Era conveniente a utilização do laboratório, uma vez que no local havia disponibilidade dos equipamentos necessários para medição das grandezas elétricas de interesse, bem como auxílio da equipe técnica do instituto na preparação e acompanhamento dos testes.

4.2. Experimento no Laboratório de Usinagem

Nesta seção, é apresentado o procedimento experimental adotado para realização dos ensaios de faceamento longitudinal, a fim de investigar o comportamento da corrente elétrica durante a usinagem de material em aço SAE 1020, bem como avaliar o desgaste resultante na pastilha de metal duro utilizada como ferramenta de corte. Dessa forma, os achados deste estudo poderão contribuir para o aprimoramento das técnicas de usinagem de peças em aço SAE 1020 e para a escolha de ferramentas de corte mais eficientes.

O procedimento adotado para realização dos ensaios ocorreu conforme o fluxograma representativo (Figura 4.8) a seguir:



Figura 4.8 - Fluxograma metodológico adotado para realização dos ensaios. Fonte: Autoria própria.

A princípio, foi executada a preparação da máquina, bem como a montagem de equipamentos de aquisição da corrente para realização do monitoramento do processo de faceamento.

Na sequência, iniciou-se o processo de faceamento na peça, realizando a aquisição dos valores de corrente. Por fim, foram realizadas a análise e discussões a respeito dos resultados obtidos.

4.2.1. Ferramenta de corte

A ferramenta de corte utilizada foi a pastilha de metal duro modelo WNMG 080408 Pc 9030. Apresentada pela Figura 4.9.



Figura 4.9 - Inserto WNMG 080408 Pc 9030. Fonte: World Tools.

4.2.2. Peça a ser usinada

A peça utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa 3R Usinagem e consistiu em um cilindro de aço SAE 1020, de 3" de espessura e diâmetro externo de aproximadamente 208 mm. Esses corpos de provas são provenientes das sobras das chapas cortadas com plasma para a obtenção dos discos circulares, os quais darão origem aos acoplamentos mecânicos, como ilustrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 - Corpo de prova cilíndrico em aço SAE 1020 utilizado nos ensaios. Fonte: Autoria própria.

4.2.3. Ferramentas e equipamentos

Os ensaios foram realizados a seco no Torno Mecânico Paralelo Universal CM 460V, do fabricante *Clark*, representado na Figura 4.11:



Figura 4.11 - Torno CM 460V, utilizado nos testes em laboratório. Fonte: Autoria própria.

Suas características estão descritas na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Características do torno mecânico.

Fabricante	CLARK
Modelo	CM460VX500
Potência instalada	7,5 cv – 380 V/ 60 Hz/ 3F
Controle de velocidades	Até 2400 rpm
Distância admissível sobre o barramento	460 mm
Distância entre pontas	500 mm

Fonte: Autoria própria.

O corpo de prova foi fixado externamente pelas castanhas do torno mecânico, sem a necessidade da utilização de um contra ponta, tendo em vista sua largura reduzida. A ferramenta de corte foi disposta no suporte, angulada 95°. Com o objetivo de investigar o comportamento da corrente e potência

elétrica no torno, foram realizados quatro ensaios, variando os parâmetros de avanço e rotação do eixo-árvore, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Ensaio	Rotação (n) [rpm]	Avanço (f) [mm/volta]	Profundidade de corte (ap) [mm]
1	190	0,196	0,5
2	190	0,392	0,5
3	380	0,196	0,5
4	380	0,392	0,5

Fonte: Autoria própria.

A alteração foi realizada manualmente através dos braços de alavanca. As Configurações estabelecidas no torno foram de CFT 10 e CET 10, assim como ilustrado na Figura 4.12, conforme o manual de sincronismo das engrenagens disposta na máquina obtendo os parâmetros desejados. É importante salientar que nesse torno a velocidade de rotação é controlada através de um inversor de frequência, o qual altera a rotação diretamente do motor, por meio da variação da frequência elétrica.



Figura 4.12 - Posicionamento das engrenagens. Fonte: Autoria própria.

Para medição e monitoramento da corrente elétrica instantânea da máquina, utilizou-se do sistema desenvolvido por ARAÚJO e CHAVES (2022).

Nesse sistema de aquisição, os sensores de corrente elétrica do modelo SCT-013 com faixa de medição de até 50 A, enviam os dados da leitura para a placa de aquisição ESP32 à taxa de 1000 amostras por segundo através da comunicação USB. Depois dos dados coletados e armazenados no computador, realizou-se o pós-processamento, onde os dados foram compilados no software Scilab e selecionado o intervalo referente ao tempo ativo de usinagem. A Figura 4.13 apresenta os sensores de corrente conectados às três fases de alimentação da máquina.

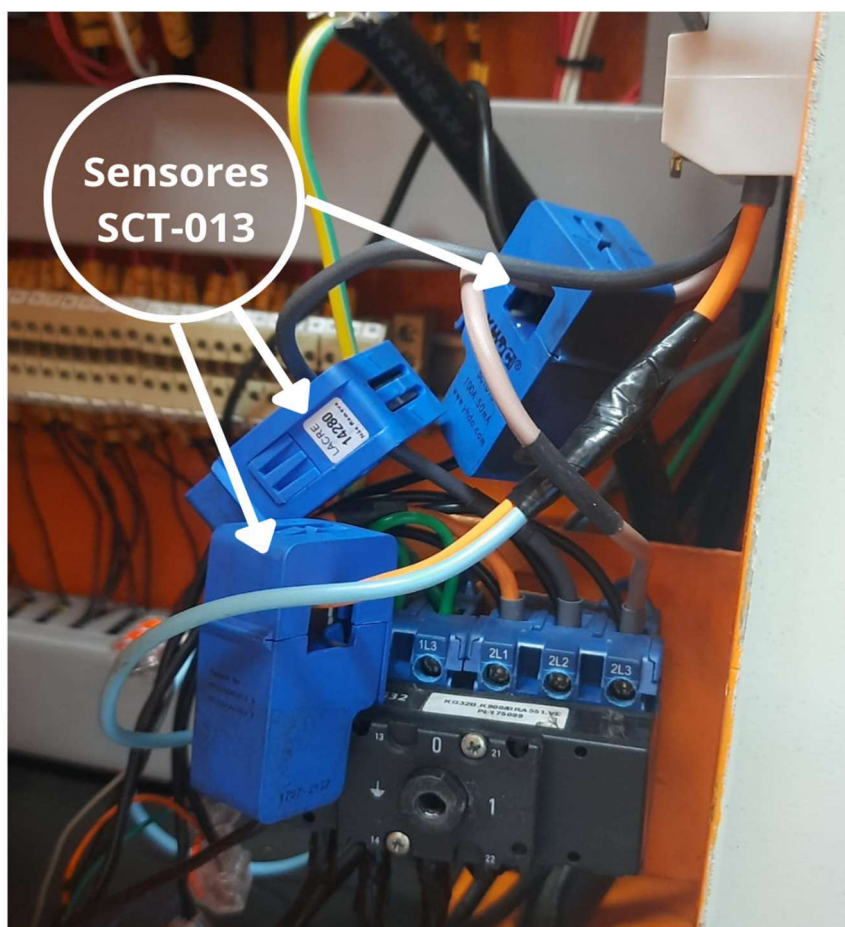


Figura 4.13 - Sensores de corrente modelo SCT-013 conectados na máquina. Fonte: Autoria própria.

O microcontrolador *ESP32* tem a função de realizar a leitura dos valores de corrente recebidos pelos sensores, e transformá-los em sinais. Estes sinais são então processados pelo software *Serialplot*, conforme metodologia proposta por Lima Junior (2021). Uma rotina de programação é trabalhada no *Scilab* com o objetivo de definir a potência de corte do processo, bem como a plotagem dos gráficos do comportamento da corrente elétrica em função do tempo, e a

determinação dos valores finais de corrente efetiva. O fluxograma da Figura 4.14 representa esquematicamente o processo de monitoramento passo a passo:

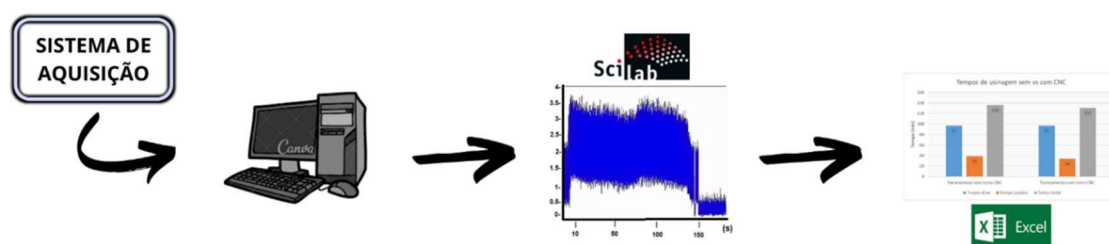


Figura 4.14 - Representação esquemática do sistema de aquisição. Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos de corrente elétrica, é possível estimar o comportamento da potência de corte, uma vez que a tensão de alimentação aplicada é praticamente constante (220 V). A potência é o produto da corrente elétrica pela tensão aplicada. Portanto, se a tensão é mantida constante, as variações na corrente elétrica são responsáveis pelas mudanças na potência ao longo do tempo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão discutidos os estudos realizados na empresa 3R Usinagem e no Laboratório de Usinagem do IFG, Câmpus Goiânia.

5.1. Visita Técnica

As visitas técnicas realizadas na empresa 3R proporcionaram a obtenção de informações valiosas sobre o histórico da usinagem dos acoplamentos. Diversas melhorias foram implementadas no processo de usinagem das peças desde o início da produção das mesmas.

Os discos de aço ABNT 1020 chegaram à 3R Usinagem com aproximadamente 440 mm de diâmetro externo, 215 mm internos e espessura de 3" (76,2 mm). Apesar do tamanho padrão, elas apresentavam pequenas variações em suas dimensões de diâmetro e espessura, uma vez que foram retiradas de uma chapa de aço retangular por meio do corte à plasma. Embora este tipo de corte possua uma boa qualidade, às vezes foi possível encontrar alguns defeitos, como riscos profundos na extremidade exterior das peças. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram bem esses transtornos, os quais causaram problemas para as peças, bem como para as ferramentas de corte.



Figura 5.1 - Riscos na extremidade superior dos acoplamentos devido ao corte com plasma. a) e b). Fonte: Autoria Própria.

Por outro lado, algumas peças chegaram com as faces empenadas, provavelmente devido à defeitos no transporte, no armazenamento ou na fabricação das chapas. A Figura 5.2 permite observar esse problema. A peça apresentava uma superfície de má qualidade para o torneamento devido à grande dureza da carepa formada, e características de empenamento.



Figura 5.2 - Defeito na face da chapa de 3" de espessura (empenamento). Fonte: Autoria Própria.

Uma das melhorias mais significativas foi a inclusão do torno CNC (Comando Numérico Computadorizado) na produção das peças. A introdução dessa tecnologia permitiu a automação e a precisão na usinagem das peças agrícolas, diminuindo a dependência de operações manuais e reduzindo consideravelmente o tempo de produção. Abriu-se uma discussão na empresa sobre a usinagem feita nas máquinas convencionais em comparação máquinas à CNC. As máquinas convencionais dependem muito do operador, ou seja, do torneiro mecânico. Já as máquinas à CNC proporcionam uma melhor padronização das peças, bem como a garantia da qualidade superficial e geométrica das peças usinadas. A dependência operacional dessas máquinas é inferior às máquinas convencionais, porém, necessitam de um bom programador de CNC, de bom ferramental e máquinas novas ou com pouco desgastes nas

partes mecânicas, elétricas e eletrônicas. No caso específico da empresa 3R usinagem, a usinagem ainda era realizada nas máquinas convencionais devido ao acúmulo de serviços que existiam no torno CNC. Dessa forma, optaram por realizarem a usinagem em algumas peças nas máquinas convencionais, para garantir a permanência de torneiros mecânicos com alta qualidade técnica nas dependências da empresa. Essas peças possuem valores agregados, os quais permitem a manutenção de operadores de máquinas com alto nível de conhecimento em usinagem.

5.1.1. Comparação dos processos

A principal diferença entre os dois métodos de fabricação é relativa à etapa de desbaste, a qual passou a ser realizada no torno CNC. Esta escolha de se realizar somente o segundo passo no torno CNC se deve ao fato de as peças virem com muitas irregularidades em seu estado bruto. Essas irregularidades (carepas, rachaduras ou empenamentos nas faces) podem ocasionar impactos que, por sua vez, podem levar a ferramenta a sofrer algum tipo de falha, como quebras por corte interrompido. Não obstante, essa máquina possui alguns problemas no barramento, o qual dificulta um bom acabamento e não produz confiança nas medidas finais.

Ao se realizar o torneamento de uma peça mais irregular, o torno convencional é tido como uma opção mais segura, pois o controle das variáveis de processo é maior, apesar do processo ser consideravelmente mais lento.

Para a avaliação dos processos, foram registrados os tempos de usinagem, através de um cronômetro simples. Os tempos foram divididos em períodos ativos, passivos e o total, conforme apresentado na Tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5.1 - Tempos de usinagem em torno convencional.

Etapa	Tempo ativo	Tempo passivo	Tempo total
Preparação dos flanges	44 [min]	13 [min]	57 [min]
Desbaste	133 [min]	40 [min]	173 [min]
Acabamento	30 [min]	18 [min]	48 [min]
Raios e chanfros	3 [min]	2 [min]	5 [min]
Total	3 h 30 [min]	1 h 13 [min]	4 h 43 [min]

Fonte: Autoria própria.

O processo de desbaste teve uma redução significativa no tempo de execução, tendo a segunda etapa uma duração de aproximadamente 20 (vinte) minutos, deixando essa terceira combinação de fatores com as características mostradas na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Tempo de usinagem no CNC.

Etapa	Tempo ativo	Tempo passivo	Tempo Total
Preparação dos flanges	44 [min]	13 [min]	57 [min]
Desbaste	20 [min]	1 [min]	21 [min]
Acabamento	30 [min]	18 [min]	48 [min]
Raios e chanfros	3 [min]	2 [min]	5 [min]
Tempo total	1 h 37 [min]	34 [min]	2 h 11 [min]

Fonte: Autoria própria.

Ao observar as Tabela 5.1 e 5.2 dos tempos de usinagem, e considerando que a diferença do tempo total entre a fabricação dos acoplamentos deve-se apenas à alteração do maquinário na fase de desbaste, pode-se inferir que o torno CNC foi o responsável pela diminuição significativa do tempo de processamento da peça.

No torno convencional, o tempo necessário para realizar o desbaste foi de 173 minutos, enquanto no torno CNC esse tempo foi reduzido para apenas 21 minutos.

O fluido de corte também teve uma função importante na diminuição desse tempo de usinagem. Além de proporcionar a lubrificação e o resfriamento do conjunto ferramenta-peça, auxilia na remoção de cavacos e permite que os parâmetros de corte sejam melhorados, de forma a possibilitar uma redução ainda maior no tempo total de usinagem. Dessa forma, faz-se necessária apenas a realização de testes para que essas modificações possam ser realizadas de forma a não influenciar negativamente na qualidade geral da peça, na segurança dos operadores da máquina e/ou no funcionamento da máquina em si.

A partir da figura 5.3 a seguir pode-se observar melhor a diferença entre os tempos ativos, passivos e totais do processo com torneamento em torno convencional e no torno Computadorizado.

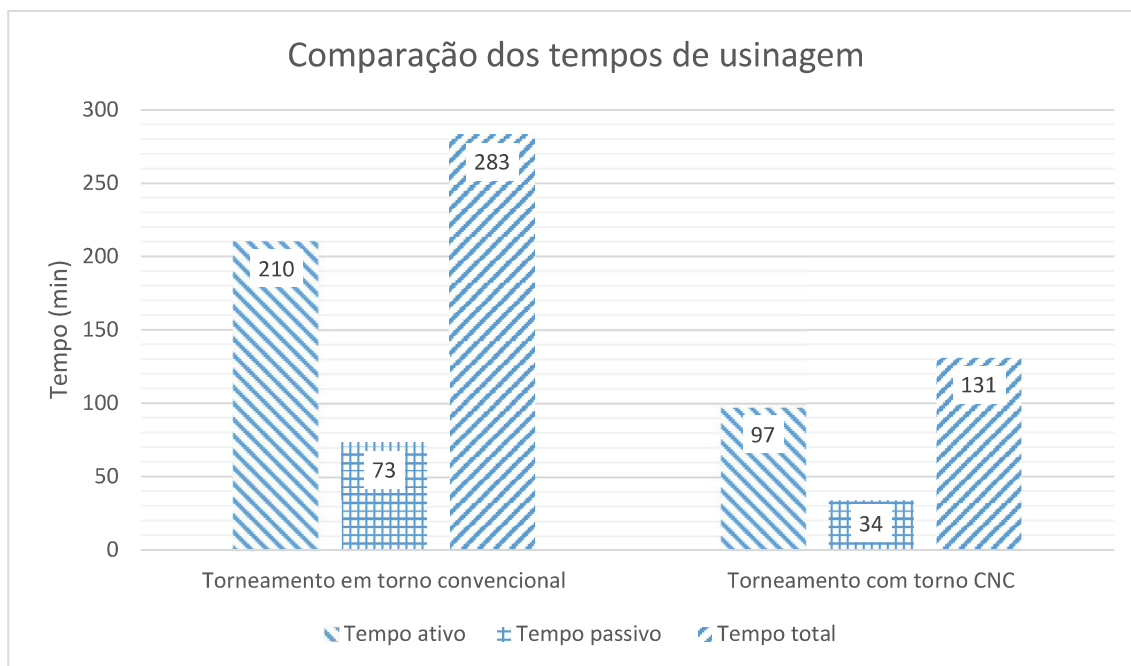


Figura 5.3 - Comparação realizada entre tempos de usinagem. Fonte: Autoria própria.

Essa melhora no tempo de usinagem se deve principalmente ao fato de a máquina CNC ser capaz de executar movimentos complexos de forma automatizada, diminuindo a intervenção dos operadores e consequentemente, aumentando a velocidade de produção. Além disso, como o desbaste foi realizado através principalmente de operações de faceamento, o torno computadorizado era capaz de manter uma velocidade de corte constante alterando a rotação, visto que em um torno convencional, a velocidade de corte varia, devido à variação de diâmetros decorrente do faceamento adicionalmente à rotação fixa.

É importante ressaltar que a adaptação de processos e a combinação de máquinas diferentes são abordagens comuns em situações em que a usinagem de uma peça é complexa ou requer características específicas. Nesse caso, a empresa 3R utilizou o melhor de cada máquina disponível para alcançar o resultado desejado.

Em conclusão, a empresa 3R enfrentou o desafio de usar acoplamentos para esteiras de máquinas agrícolas sem referências anteriores. Com a utilização de um torno convencional e uma máquina CNC, os mecânicos conseguiram desenvolver uma estratégia eficiente. Embora o CNC tenha proporcionado uma redução significativa no tempo de usinagem, algumas etapas

ainda foram realizadas no torno convencional devido à dureza das carepas no material bruto e à necessidade de maior precisão no acabamento.

5.1.2. Desgastes

Ao iniciar a fabricação das peças na empresa 3R, foram utilizados diversos insertos até que os parâmetros de corte otimizados fossem determinados. Essa etapa foi fundamental para alcançar a eficiência desejada no processo de usinagem.

No entanto, no decorrer desse período, houveram algumas dificuldades. Um dos problemas enfrentados foi a quebra de diversos insertos, principalmente devido ao impacto excessivo durante a usinagem, visto que as peças não estavam bem padronizadas, apresentando um formato ovalado e/ou empenado.

A padronização adequada das peças se tornou a primeira etapa da fabricação, visando minimizar esses impactos e garantir uma usinagem mais estável.

Além disso, havia a presença de carepa (camada de óxido de ferro), e riscos profundos no diâmetro externo das peças, que tinha uma dureza maior do que a do aço SAE 1020, material utilizado nas peças do acoplamento. Esses fatores dificultavam o processo de usinagem, favorecendo as avarias das ferramentas de corte.

A empresa de usinagem 3R cedeu, para análise de desgastes e avarias, alguns insertos já utilizados anteriormente para o torneamento das peças. As ferramentas de corte foram utilizadas até que alcançassem o nível de degradação com o qual seriam descartadas.

A Figura 5.4 representa uma das ferramentas utilizadas no início do processo de fabricação dos acoplamentos, no período em que a empresa procurava formas de aumentar a produtividade e reduzir os custos, otimizando os parâmetros de corte para diminuir o tempo de usinagem.

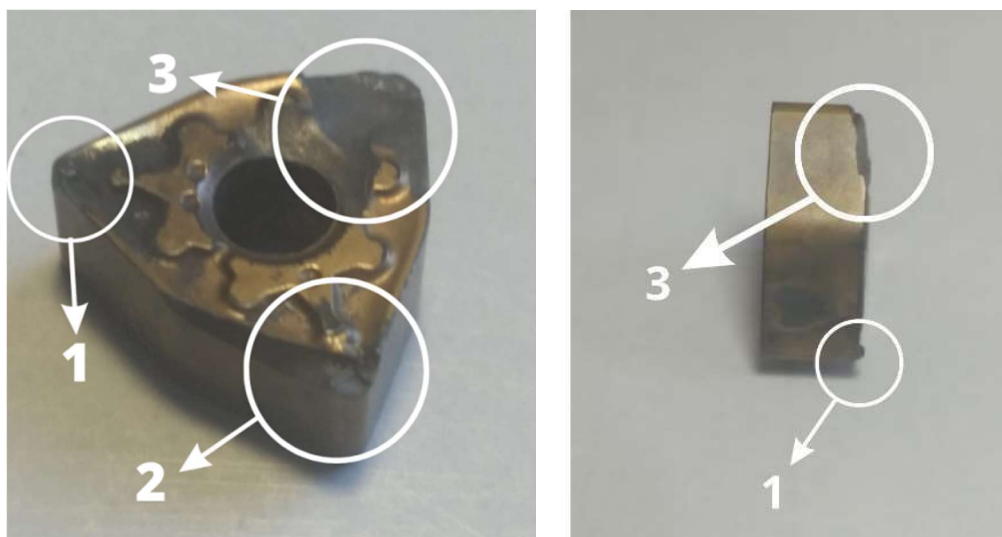


Figura 5.4 - Ferramenta de corte de metal duro WNMG 060408, com avarias. Fonte: Autoria própria.

As avarias evidenciadas pelos números 1, 2 e 3 são um exemplo de defeitos causados por parâmetros de corte muito divergentes dos ideais. Estas avarias foram ocasionadas durante a fase de adaptação da empresa à fabricação das peças em escala.

O desgaste identificado pelo número 1 aparenta a falha pelo processo de aderência. Neste caso, esse tipo de degradação da ferramenta pode ter sido favorecido pela baixa velocidade de corte (conforme a Tabela 4.2), aliada à usinagem do aço SAE 1020, que apresenta baixo teor de carbono.

Os defeitos representados pelos algarismos 2 e 3, evidenciam a quebra da ferramenta, o que torna as respectivas arestas de corte inutilizáveis após o ocorrido.

A quebra nesse caso, deve ter sido ocasionada pelo impacto da ferramenta contra a peça, devido à própria geometria na qual a peça se encontrada (oval). O torneamento de peças com essa geometria apresenta diversos cortes interrompidos, a provável causa dos impactos.

As camadas de óxido de ferro formadas durante o processo de oxicorte também pode ter sido um dos motivos para o lascamento das ferramentas. Visto que tal camada apresenta elevada dureza em comparação ao aço SAE 1020.

Outra possibilidade dessas avarias nas arestas de corte pode estar relacionada às tentativas de alterações das velocidades de corte e/ou avanços de corte durante os testes de usinagem. Também houve alterações significativas na profundidade de corte, às quais promoveram mudanças nas velocidades de

corte, chegando em algumas situações à parada do eixo árvore. Dessa forma, a ferramenta de corte deve ter sofrido uma carga mecânica muito grande. As forças de corte ao sofrerem alterações bruscas podem causar lascamentos, trincas ou a quebra total dos insertos.

A figura 5.5 representa um exemplo de lascamento ocorrido durante a usinagem das peças:



a)



b)

Figura 5.5 - Inserto WNMG 080408 Pc 9030, com lascamento. Fonte: Autoria própria.

A ferramenta da figura 5.6 representa o desgaste mais recorrente no histórico de usinagem da peça.

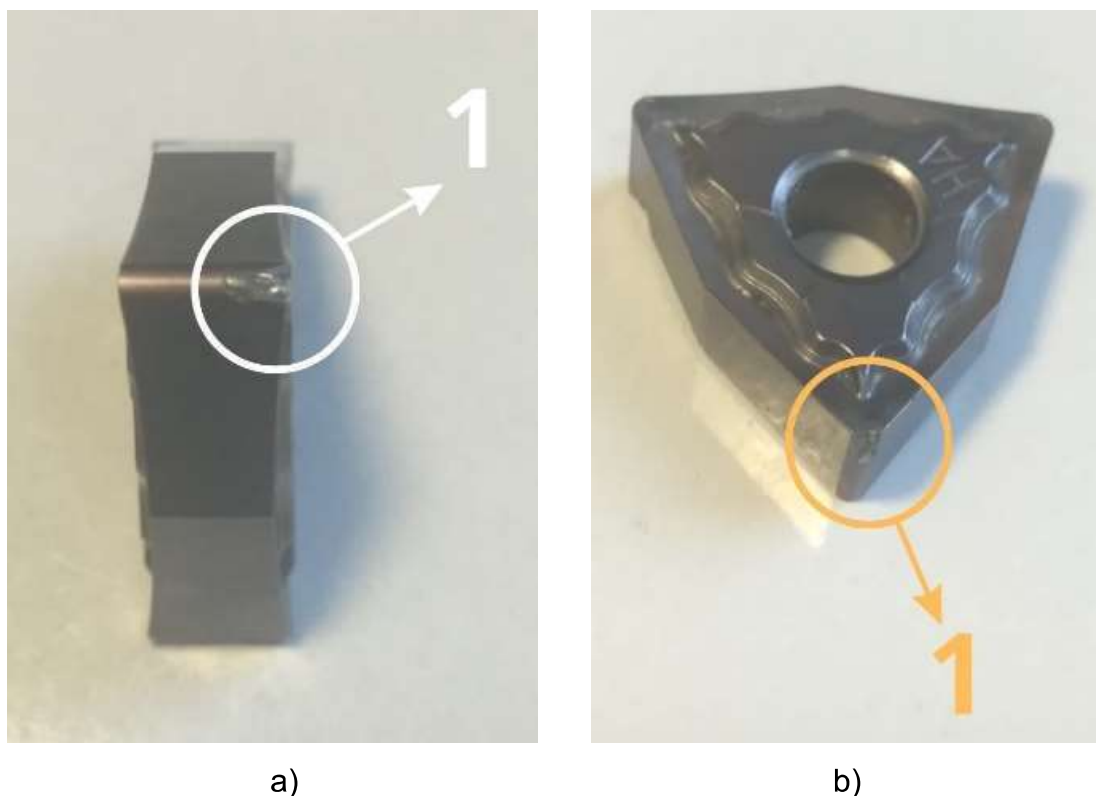


Figura 5.6 - Inserto WNMG 080408 Pc 9030, desgastado. Fonte: Autoria própria.

O desgaste mais observado na fabricação das peças é o de flanco, destacado na imagem e representado pelo número 1. Esse tipo de dano ocorre principalmente na região de contato entre a ferramenta de corte e a peça e pode ter sido ocasionado pela elevada velocidade de corte ou de avanço, sendo também influenciado pela lubrificação utilizada no decorrer da operação. Esse desgaste ocorre naturalmente devido à abrasão dos materiais metálicos, em função do tempo de usinagem. As temperaturas de corte foram relativamente altas, principalmente devido à falta de refrigeração durante os processos de usinagem nas máquinas convencionais. Daí, não é possível descartar outros dois mecanismos de desgaste que geralmente ocorrem nessas situações, quais sejam: a difusão e a oxidação.

Para a realização dos testes em laboratório a empresa 3R cedeu a pastilha de metal duro, ilustrada pela Figura 4.13. Neste inserto foram realizadas análises do nível de desgaste da ferramenta de corte, utilizada na fabricação das peças previamente. Para isso, utilizou-se dispositivo de medição por imagem, composto por um suporte de ajuste de altura e um Microscópio Digital do fabricante Dermazoom, modelo Micrometer, 1600x de zoom e câmera USB, à disposição do Laboratório de Usinagem do IFG. A Figura 5.7 apresenta a

micrografia da pastilha de metal duro triangular com as dimensões e os tipos de desgaste observados.

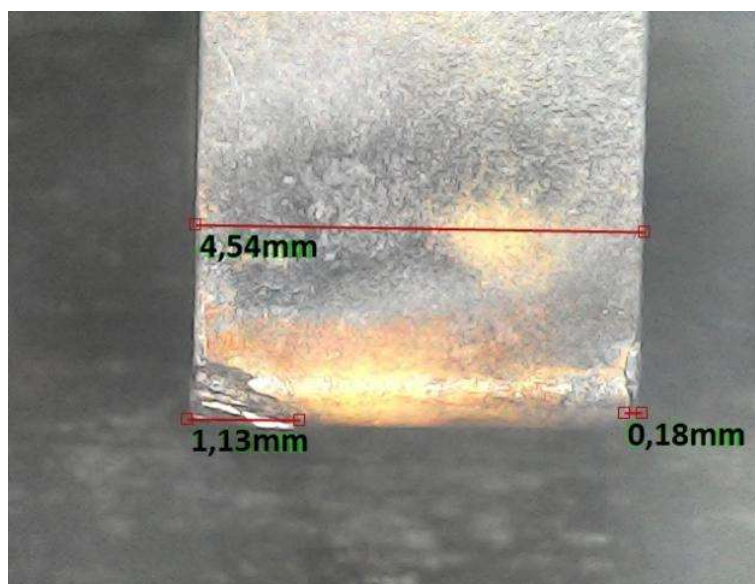


Figura 5.7 - Micrografia representativa do inserto WNMG 080408 Pc 9030. Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Figura 5.7, após a utilização da pastilha para a fabricação de algumas peças, houve a deterioração do acabamento superficial, caracterizando o desgaste do tipo de flanco.

A degradação resultou na alteração da geometria da aresta de corte. Esta alteração foi percebida na prática através do aumento da força de corte e de uma piora no acabamento superficial da peça. Além disso, ao se observar a pastilha, o desgaste é evidenciado, apresentando um comprimento de 1,13 mm.

É importante destacar que a peça ilustrada na figura foi usinada após a determinação dos parâmetros de corte para a produção em série. Portanto, o processo de usinagem já estava otimizado nesse estágio.

5.1.3. Cavacos

Os maiores desafios relacionados à usinagem dessas peças foram em relação aos cavacos. A potência do torno limitava a profundidade de corte (ap) de forma a não permitir medidas maiores que $ap = 3,5$ mm, o que resulta em dificuldade de quebra do cavaco, aliada à velocidade de rotação e ao avanço. Isso ocorria devido à embreagem do torno estar com defeito. Ao ligarem a máquina no sentido inverso (eixo árvore acionado no sentido anti-horário) e

utilizando ferramentas esquerdas, percebeu-se que as velocidades de corte e força ou torque da máquina eram normais.

A Figura 5.8 retrata uma situação complicada para o operador de torno convencional, pois além de desgastar as ferramentas de corte, perde-se muito tempo retirando os cavacos. Além disso, essas operações são muito perigosas, uma vez que o material possa atingir pessoas próximas à máquina, principalmente o torneiro mecânico.



Figura 5.8 - Cavacos longos durante o processo de usinagem. Fonte: Autoria própria.

Entretanto, os cavacos eram em sua maioria helicoidais, o que em si não seria um problema, porém o somatório de todos os cavacos, longos, médios e curtos, deram um volume razoável na empresa, sendo necessário o armazenamento e posteriormente o descarte em depósito apropriado para tais situações. A Figura 5.9 ilustra bem tal situação.



Figura 5.9 - Volume de cavacos extraídos em aço ABNT 1020. Fonte: Autoria própria.

5.2. Ensaio realizado no Laboratório de Usinagem

Através dos experimentos realizados no laboratório do Instituto, foram plotados gráficos correspondentes às medições de corrente em função do tempo, para que seja possível observar o comportamento da potência de usinagem. E como parte da rotina do programa, nos próprios gráficos são selecionados os intervalos os quais serão feitas as médias para a aquisição de valores palpáveis para análise.

Os diagramas dos experimentos 1, 2, 3 e 4, apresentados pelas figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, respectivamente, demonstram o comportamento da corrente em função do tempo, obtidos pelo *Scilab*:

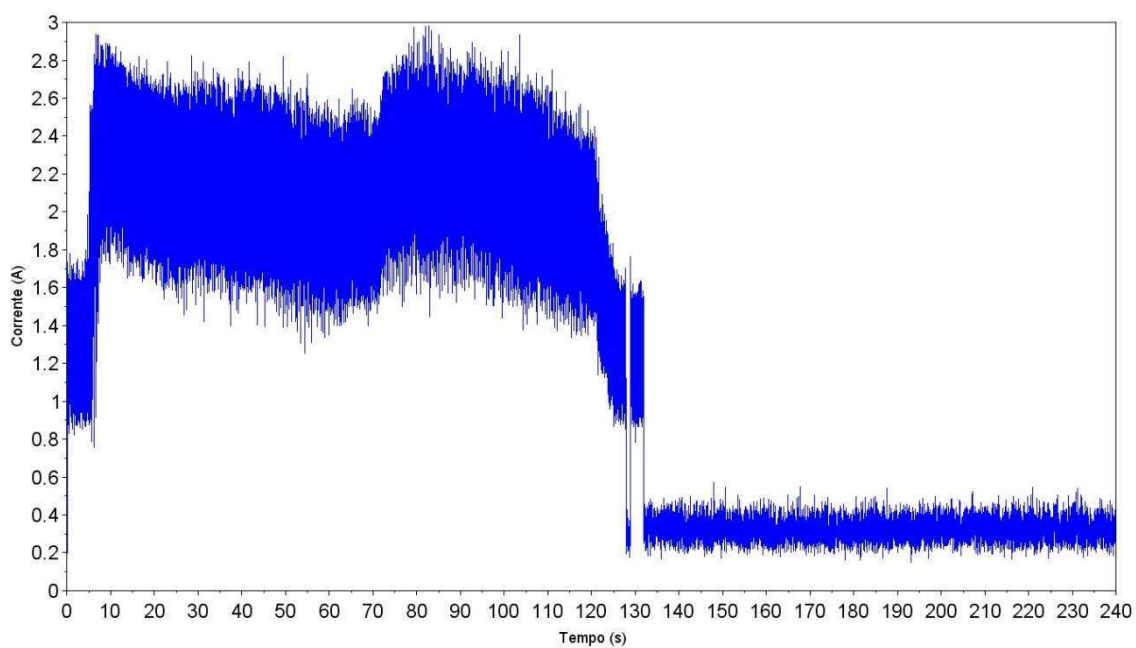


Figura 5.10 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 1. Fonte: Autoria própria.

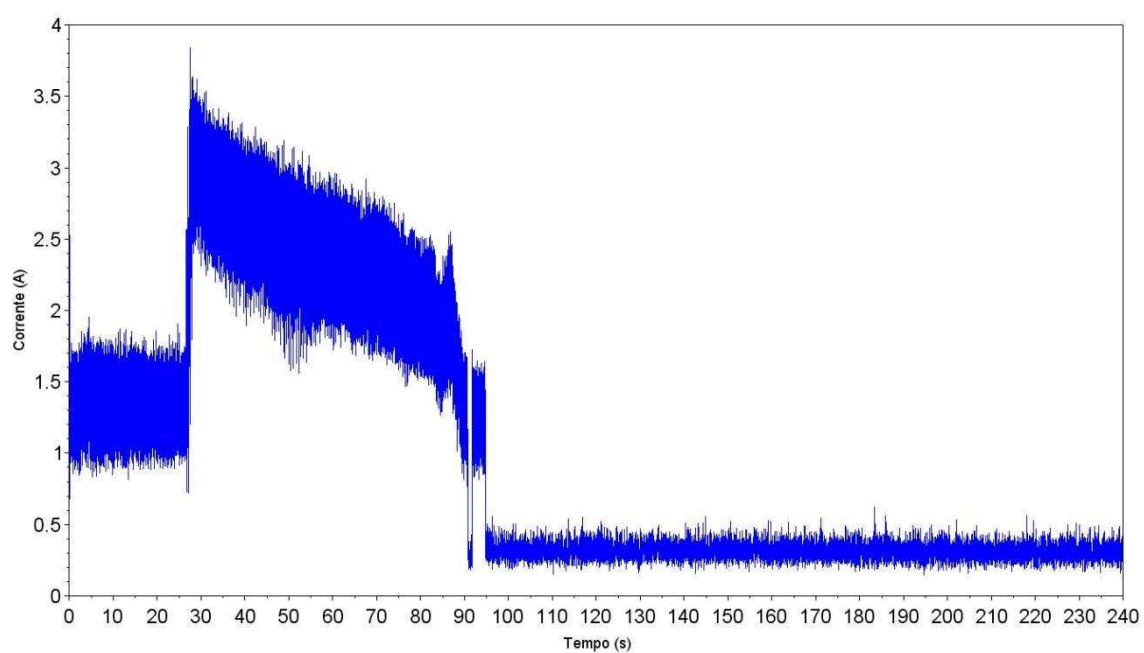


Figura 5.11 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 2. Fonte: Autoria própria.

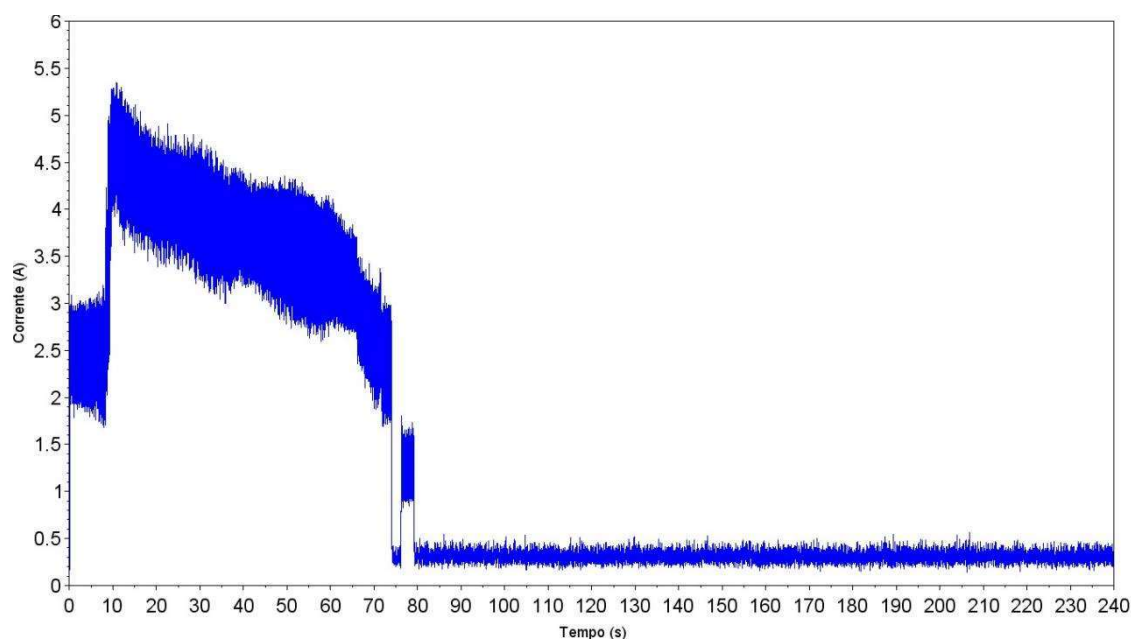


Figura 5.12 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 3. Fonte: Autoria própria.

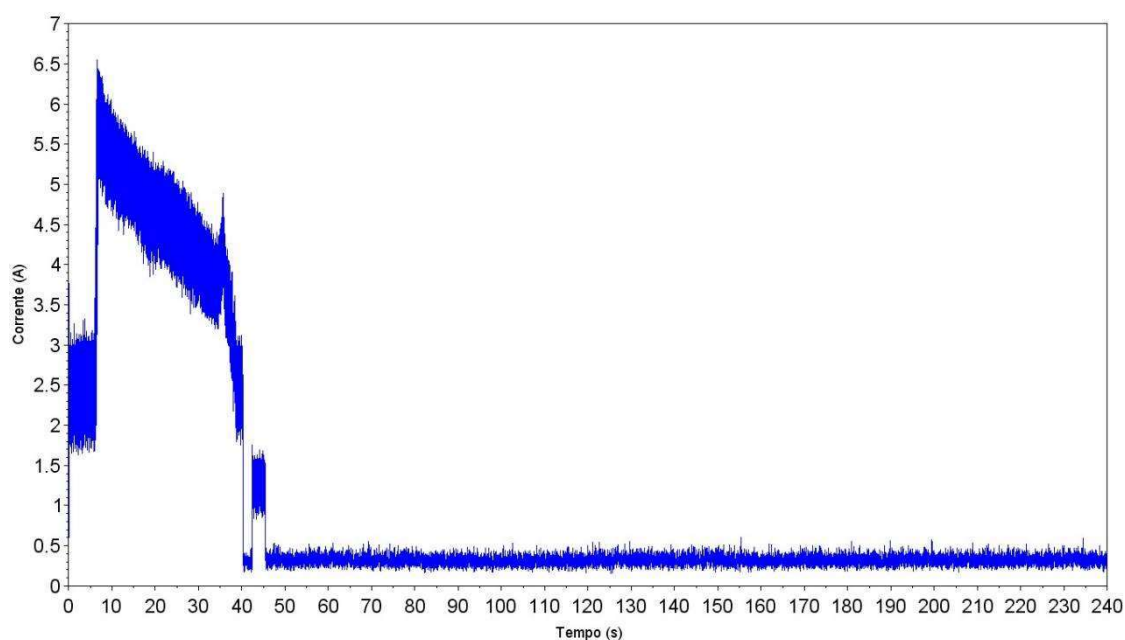


Figura 5.13 - Resultados do comportamento da corrente (A) em função do tempo (s): Ensaio 4. Fonte: Autoria própria.

Há de se observar como um padrão nos gráficos que nos primeiros segundos, é disposta uma corrente elétrica a qual representa o funcionamento da máquina em vazio (antes de iniciar de fato o corte da peça). A subida abrupta logo após, representa o momento no qual a pastilha entra efetivamente em contato com a peça, iniciando o processo de remoção do material.

Em sequência, os gráficos mostram que os valores de corrente decrescem até o momento em que ocorre a perda de contato da ferramenta com a peça. Os valores decrescentes indicam que a potência de corte diminui gradualmente à medida que a ferramenta se desloca na peça. Esse comportamento é esperado, pois a velocidade de corte tende a diminuir à medida que a ferramenta se movimenta em direção ao centro da peça, devido à rotação constante e a uma diminuição no diâmetro.

Após a operação de faceamento, o valor da corrente voltou a se estabilizar com um valor menor do que o verificado com a máquina funcionando em vazio, devido ao fato de agora a rotação do eixo-árvore ter sido interrompida.

Após obtenção dos gráficos, com a rotina de programação estabelecida no *Scilab*, foi gerada uma planilha em *Excel* onde são impressos os valores de corrente de cada fase adquiridos pelos sensores de corrente e o microcontrolador, bem como a corrente efetiva resultante. A Tabela 5.3 exibe os valores adquiridos dos ensaios.

Tabela 5.3 - Valor da corrente elétrica obtida em cada ensaio.

Profundidade de corte utilizada (ap) = 0,5 [mm]							
Ensaio	Rotação (n) [rpm]	Avanço (f) [mm/volta]	Profundidade de corte [mm]	I _{ef} [A]	I _{a1} [A]	I _{b1} [A]	I _{c1} [A]
1	190	0,196	0,5	3,4	3,9	3,1	3,1
2	190	0,392	0,5	3,8	4,3	3,6	3,5
3	380	0,196	0,5	5,8	6,4	5,5	5,5
4	380	0,392	0,5	6,9	7,6	6,6	6,5

Fonte: Autoria própria.

Os termos I_{a1}, I_{b1} e I_{c1} representam os valores de corrente das três fases obtidas. A profundidade de corte (ap) permaneceu constante durante os quatro experimentos, variando apenas os parâmetros de rotação (n) e avanço (f).

A partir desses valores, observa-se a seguinte relação obtida:

- Para uma rotação de 190 rpm, o valor da corrente efetiva (I_{ef}) aumenta de 3,4 A para 3,8 A quando o avanço (f) foi aumentado de 0,196 mm/volta para 0,392 mm/volta.
- Para uma rotação constante de 380 rpm, o valor da corrente efetiva (I_{ef}) aumenta de 5,8 A para 6,9 A quando o avanço (f) foi aumentado de 0,196 mm/volta para 0,392 mm/volta.

O valor máximo da corrente efetiva (I_{ef}) foi atingido durante a realização do Ensaio 4, atingindo o valor de 6,9 amperes, um aumento de aproximadamente 100% se comparado com a corrente do Ensaio 1.

Ao comparar o tempo efetivo de corte das etapas, constatou-se que o menor tempo ocorreu também durante o experimento 4, com aproximadamente 30 segundos de duração. A duração do quarto ensaio se deu cerca de 4 vezes menor que o tempo de usinagem do Ensaio 1. Isso deve-se ao fato de que os parâmetros de rotação (n) e velocidade de avanço (f) foram duas vezes maiores que no ensaio inicial, o que levou a máquina a realizar um trabalho maior, consequentemente dispondo de um valor de corrente maior para realizar o faceamento, uma vez que a tensão permaneceu constante.

As partes selecionadas no gráfico são referentes apenas ao tempo ativo de corte, em que a ferramenta está de fato em uso, desconsiderando as partes em que a placa do torno gira em vazio (tanto antes quanto após o período em que o corte está sendo realizado).

Existe uma relação direta entre a potência de corte e a força de corte, como descrito pelas equações 3.3 e 3.4, apresentadas no tópico 3.5.4. Além disso, é importante destacar que a força de corte exerce uma influência significativa no desgaste das ferramentas de corte. À medida que a força de corte aumenta, o desgaste das ferramentas também aumenta devido ao atrito e ao estresse mecânico gerados durante o processo de usinagem.

A partir dos experimentos realizados, podemos inferir que a rotação seria a principal responsável pelo aumento da potência de corte, sendo que a velocidade de avanço também influencia nesse aspecto, porém em menor intensidade. Esse resultado já era previsto por Machado (2004) e Diniz et al (2008), autores os quais mostraram que a velocidade de corte seria o principal fator a aumentar a força de corte, bem como os respectivos desgastes da ferramenta de corte.

Sendo assim, para equilibrar as forças de corte e o desgaste das ferramentas, é necessário selecionar parâmetros de corte adequados, como principalmente a rotação, velocidade de avanço e profundidade de corte.

É importante ressaltar também que o torno utilizado nos experimentos mostrou-se capaz de suportar todos os testes sem demonstrar falta de potência.

Isso é fundamental, pois a potência do torno está diretamente relacionada à sua capacidade de realizar operações de usinagem de maneira eficiente.

O monitoramento da corrente elétrica só foi possível porque o torno utilizado tinha sua velocidade de rotação controlada por inversor de frequência. Dito isso, os resultados obtidos através da variação de corrente elétrica nos ensaios, não seriam possíveis caso os testes fossem realizados no torno convencional da empresa 3R. Isso se deve ao fato de o controle de rotação do mesmo se dar através de transmissão mecânica (engrenamento), sendo que o motor permanece em rotação constante.

Por fim, é interessante considerar que o uso de um CNC no processo de faceamento poderia resultar em diferenças no comportamento da potência, uma vez que o CNC oferece controle preciso dos movimentos da ferramenta, possibilitando uma velocidade de corte constante e, portanto, uma abordagem otimizada na usinagem.

6. CONCLUSÃO

Os resultados desse trabalho permitem concluir que:

- ✓ A máquina CNC implicou na redução em 53,7% do tempo de usinagem em comparação com o torno convencional. Isto já era esperado, uma vez que a máquina CNC é capaz de manter uma velocidade de corte constante alterando apenas rotação do eixo-árvore, e necessita de intervenção mínima dos operadores durante o processo de retirada de material.
- ✓ Foi importante a execução de uma pré-usinagem dos flanges para retirada da camada de óxido de ferro (carepa), originada da operação de corte por plasma. A realização desta etapa de forma isolada, permitiu a escolha de uma ferramenta apropriada (maior ductibilidade) para lidar com os impactos sofridos.
- ✓ O principal tipo de desgaste observado no decorrer da fabricação dos acoplamentos mecânicos foi o de flanco. Já o desgaste por aderência também evidenciou-se, porém em menor quantidade.
- ✓ A potência de corte exerce influência significativa no desgaste das ferramentas de corte. Quanto maior a força de corte, e consequentemente a potência, maior será o desgaste das ferramentas, devido ao atrito e ao estresse mecânico gerados.
- ✓ Por meio do sistema de sensoriamento foi realizada a aquisição dos valores de corrente drenados pela máquina no decorrer do processo de faceamento realizados no laboratório de usinagem. Onde o microcontrolador *ESP32* realizou a leitura dos valores de corrente instantânea recebidos pelos sensores, transformando-os em sinais que posteriormente foram processados pelo software *SerialPlot*.
- ✓ Observou-se que no processo de faceamento a corrente elétrica não permanece constante. À medida que a ferramenta se aproxima do centro da peça, a corrente tende a diminuir.
- ✓ O maior valor de corrente elétrica alcançado durante os testes realizados no laboratório foi obtida pelo experimento 4, o qual possuía a maior rotação e velocidade de avanço em comparação com os outros ensaios.
- ✓ A velocidade de corte evidenciou-se como o principal fator responsável pelo aumento da potência de corte, em detrimento da velocidade de avanço, compactuando com os estudos realizados por Machado e Diniz.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para a continuidade dos trabalhos nesta área de estudo, temos:

- ✓ A comparação das potências de usinagem utilizando ferramentas de corte com diferentes estágios de desgaste. Pode-se também variar a geometria das ferramentas de corte e avaliar as alterações observadas nas medições de potência.
- ✓ O estudo da influência das carepas e da geometria oval da peça na potência de corte, variando-se também os parâmetros de corte, para a obtenção de uma usinagem otimizada.
- ✓ Análise de custos, referente aos tempos de usinagem em detrimento das correntes e quantidades de ferramentas utilizadas na fabricação de em dado número de peças.
- ✓ Pesquisa para avaliar os parâmetros de corte com os quais seriam possíveis realizar a fabricação do maior número de peças, evidenciando os desgastes e associando os mesmos às potências utilizadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, João Vitor Souza; CHAVES, Júlio César Teixeira. Construção de um Dispositivo Microcontrolado para Indicação Visual da Corrente Elétrica em Tornos Convencionais por Meio da Análise de Curvas de Rendimento. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento IV, Coordenação de Mecânica, Instituto Federal de Goiás, Câmpus Goiânia, Goiânia, Goiás, 107 p.

BLAU, P. J.; Budinski, K.G. Budinski. Development and Use of ASTM Standards for Wear Testing. Wear Vol. 225-229, 1999. p. 1159 - 1170.

CHILDS, T.H.C.; MAHDI, M.I. “On the Stress Distribution Between the Chip and Tool During Metal Turning”, Annals of the CIRP, vol. 38(1), 1989.

CONHEÇA UM POUCO SOBRE A HISTÓRIA DOS IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. **Colorado-AS**, 2021. Disponível em: <https://www.colorado-sa.com.br/conheca-um-pouco-sobre-a-historia-dos-implementos-agricolas/>. Acesso em: 23 jun 2022.

Como é a produção de máquinas agrícolas no Brasil? **Jacto**, 2022. Disponível em: <https://blog.jacto.com.br/producao-de-maquinas-agricolas-no-brasil/#:~:text=Os%20anos%201950%20foram%20marcantes,importa%C3%A7%C3%A3o%20de%20m%C3%A1quinas%20e%20equipamentos>. Acesso em: 23 jun 2022.

COPPINI, N. L.; MARCONDES, F.C.; DINIZ, A. E. **Tecnologia de Usinagem dos materiais**. 7º Edição, Ed. Artliber, 2008.

DA MOTA, P. R. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. “Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools”, Metal Technology, vol., 9, feb., 1982.

DE AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

DEWES, R.C., ASPINWALL, D.K. and THIELEMANN, G., 1998, "Tool Life and Workpiece Surface Roughness When High Speed Machining Hardened Tool.

Faixas Vs Rodas. SOUCY-TRACK, 2022. Disponível em: <https://info.soucy-track.com/en/blog/tracks-vs-wheels>. Acesso em: 23 jun 2022.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 1ª ed., Edgard Blucher Ltda, São Carlos, SP, 1969.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 3 ed. v.1, S.P: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995.

FOLLE, S.M.; FRANZ, C. A. B. Trator agrícola – Características e fundamentos para sua seleção. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), 1990.

GRAZIANO, J.S; KAGEYAMA, A.A. Produtividade e emprego na agricultura brasileira. In: Desenvolvimento capitalista no Brasil. São Paulo, Brasiliense, 1983. n. 2.

Histórico da mecanização da agricultura, do carro de boi aos dias de hoje. Farmfor, 2019. Disponível em: <https://www.farmfor.com.br/posts/historico-da-mecanizacao-da-agricultura-do-carro-de-boi-aos-dias-de-hoje/>. Acesso em: 23 jun 2022.

ISO, 2004. Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application. ISO 513.

KATO, S.; YAMAGUSHI, K.; YAMADA, M. "Stress Distribution at the Interface Between Tool and Chip in Machining", Trans ASME, J.Eng. Industry, vol. 94, may, 1972.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren 5. Auflage. Aachen, 1997.

KRATOCHVIL, R. **Fresamento De Acabamento Em Altas Velocidades De Corte Para Eletrodos De Grafita Industrial**. Universidade Federal De Santa Catarina, 2004.

LIMA JUNIOR. **Desenvolvimento de uma Placa de Monitoramento de Potência de Corte com Microcontrolador ESP32**. Laboratório de Usinagem, Departamento IV, Coordenação de Mecânica, Instituto Federal de Goiás, IFG – Câmpus Goiânia, Goiás, 2021.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Apostila de Usinagem dos Metais**. 8. ed. Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2009.

MÁQUINAS AGRÍCOLAS: A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO. **Agroslim**, 2022. Disponível em: <https://www.agroslim.com.br/2020/09/15/maquinas-agricolas-a-importancia-da-manutencao/>. Acesso em: 23 jun 2022.

MCROBERTS, Michael. Arduino Básico. [Tradução: Joice Elias Costa]. São Paulo: Novatec Editora, 2011. 22 - 24 p.

NETO, J. A. **A indústria de máquinas agrícolas no Brasil: origens e evolução**. **Scielo**, 1985. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rae/a/w6cmxVRdNvfdRZFjchxJkMf/?lang=pt>. Acesso em: 23 jun 2022.

Pekelharing, A. J. Cutting tool damage in interrupted cutting. Wear 62,1980.

RABINOWICZ, E. Friction and Wear of Materials. Second ed., John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1995. p. 112.

RAO, S. Vibrações mecânicas. 4ed. **Pearson** Ltd, 2008.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria da aresta de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. Universidade de São Paulo (USP), 2005.

SALES, W. F. **Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte**, 1999. 176 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SANCHES, Henrique Augusto Belizário. Avaliação do processo de usinagem com corte interrompido utilizando a análise de esforços e frequências. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting** – A Practical Handbook, Suécia, 1 edition, 1994.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem**. Elanders, Suécia, 2010.

SANTOS, S. C. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**, 1999. 122 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

SANTOS, S. C. **Estudo da influência de revestimentos e da aplicação de fluido de corte no desempenho de brocas de aço-rápido e de metal duro integral na usinagem de ferro fundido cinzento**, 2002. 199 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. Artliber, 2007.

SERRA, J. Ciclos e mudanças estruturais na economia brasileira do após guerra. Revista de Economia Política, n. 6, abr./jun 1982.

SHAW, M.C., Metal Cutting Principles. 3 ed. Cambridge: Oxford University Press, 1984.

SILVA, Thaynara Fernanda da. Seleção de ferramenta para o corte interrompido do aço AISI 8620 tratado termicamente. 2017.

SOUZA, R. S., Conheça as diferenças entre tratores de esteira ou de pneus. **AECWEB**, 2022. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/conheca-as-diferencas-entre-tratores-de-esteira-ou-de-pneus/22642>. Acesso em: 23 jun 2022.

Steel Using Dry Cutting, Spray Mist and Flood Coolant, 4th Int. Conf. On Behavior of Mat. In Machining: Opportunities and Prospects for Improved Operations, **ISBN 1-86125-086-X**.

STOETERAU, R. L. Apostila de Tribologia da UFSC, 2000.

Transportadores Industriais. **On-Convoyeurs**, 2022. Disponível em: <https://www.on-conveyors.com.br/transportadores-industriais/>. Acesso em: 03 jun 2022.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths – Heinemann, 2000, 446 p.

Usinagem de peças agrícolas. **Colibri Usinagem**, 2022. Disponível em: <https://www.colibriusinagem.com.br/usinagem-pecas-agricolas>. Acesso em: 23 jun 2022.

Usinagem de peças: máquinas agrícolas se destacam. **Vertex**, 2020. Disponível em: <https://vertexusinagem.ind.br/noticia/usinagem-de-pecas-maquinas-agricolas-se-destacam/>. Acesso em: 23 jun 2022.

ANEXO

Programação utilizada no *scilab*:

```
// Determinacao de grandezas eletricas (Potencia Eletrica)
// provenientes dos sinais de tensao e corrente eletrica
// Ensaio realizado no Laboratorio de Usinagem do IFG - Campus Goiania
// Sistema de Aquisicao Esp32 desenvolvido pelo Prof. Me. Sebastiao
// Autores:
// 1) prof. Dr. ILDEU L. Siqueira (IFG - Campus Goiania)
// 2) prof. Me. Sebastiao Goncalves L. Junior (IFG - Campus Goiania)
// 3) Eng. Mec. Leonardo Rodrigues Carvalho Cambuim (Eng. Mecanico)
// 4) Me. Eng. Mec. Paulo Vinicius da S. Resende (tec. IFG - Campus Goiania)
// data:
// versao 1 - 15 ago. 2017 - primeiros ensaios e avaliacao de potencia
// versao 2 - 22 fev. 2019 - 4 faixas de selecao/ensaio - p/ avaliar
//          diferenca em vazio para carga de trabalho(corte)
// versao 3 - 06 maio 2019 - 2 faixas de selecao por ensaio - potencia[VA]
// versao 4 - 07 ago. 2019 - Aquisicao no Arduino (TCC - Wesley)
// versao 5.0 - 28 nov. 2020 - Aquisição de correntes e tensões elétricas em 3 fases
//          cálculos de defasagem, potencias elétricas ativa e aparente
// versao 5.1.1 - 28 set. 2021 - Corrente Instantânea, Harmônicos e Variância
// versao 5.2.0 - 20 abr. 2022 - Levantamento de Rendimento em Tornos
// Convencionais
// versao 5.2.1 - 30 abr. 2022 - Ensaio da Disciplina Fund. de Usinagem
//
// Inicializacao do sistema
//
clear; xdel; clc;
tAmost = 800; // taxa de amostragem em amostras por segundo
resolAD = 2^12; // Resolucao do A/D, em que: 2^12 = 4.096
tensaoMcont = 3.3; // Tensao do microcontrolador
tensaoPicoPico = 996; // Pico a pico da rede eletrica
//-----Constante do sensor de tensao-----
cteT2Ard = ((tensaoMcont/resolAD)*tensaoPicoPico); //cte = (3.3/4096)*996
//-----Constante do sensor de corrente -----
// Constantes Corrente para converter valor de aquisicao no ESP32
// No sensor corrente 100A = 50mA. Resistencia carga = 22ohms
// V= R*i >> V = 22 * 0,050A >> V = 1,1V
// Cte corrente = 100A/1,1V >> Cte corrente ~= 90.9090
cteC2Ard = ((tensaoMcont/resolAD)*90.9090);
// Carregar funcoes
exec('valorRMS.sci', -1); exec('defasagem.sci', -1); exec('movemean.sci', -1);
exec('fRMS.sci', -1); exec('harmonics.sci', -1);
// Selecao de arquivos para determinacao da Potencia
filePath = uigetfile("*.txt*", pwd(), "Escolha o(s) arquivo(s)", %t);

// iteracao
iter = 1;
numeroArqs = size(filePath, 2);
```

```

// Cria uma matriz para armazenar os dados de potencia eletrica
// matPot[nome do arquivo, Potencia Etetrica, outras informacoes]
matPot = [];
Vnome_arq = [];
//
// Calcular a Potencia Eletrica
while(iter <= numeroArqs)
    arq = filesPath(iter); //nomes arquivos
    nome_arq = part(arq, length(pwd())+2:length(arq)-4);
    mD = fscanfMat(arq);
    Va = mD(:, 2); Va = (Va - mean(Va))*cteT2Ard;
    Vb = mD(:, 3); Vb = (Vb - mean(Vb))*cteT2Ard;
    Vc = mD(:, 4); Vc = (Vc - mean(Vc))*cteT2Ard;
    Ia = mD(:, 5); Ia = (Ia - mean(Ia))*cteC2Ard; //Ia = Ia.*-1;
    Ib = mD(:, 6); Ib = (Ib - mean(Ib))*cteC2Ard; //Ib = Ib.*-1;
    Ic = mD(:, 7); Ic = (Ic - mean(Ic))*cteC2Ard; //Ic = Ic.*-1;
    //vetor tempo criado em funcao do numero de amostras
    t = (linspace(0,(size(Va, 1) -1)/tAmost,size(Va, 1)))';

// apresenta graficamente a potencia instantânea f(t)
Pota = (sqrt (Va.^2)).*(sqrt(Ia.^2));
Potb = (sqrt (Vb.^2)).*(sqrt(Ib.^2));
Potc = (sqrt (Vc.^2)).*(sqrt(Ic.^2));
Pot = Pota + Potb + Potc; //sem filtro
Pinst = movemean((sqrt(Ia.^2)), 25); // sinal em bruto instantaneo filtrado, serve
apenas para visualizar
//Iainst = movemean(Ia, 40); // sinal Ia em bruto instantaneo filtrado
f1 = figure(0);
f1.background = color("white"); //muda a cor de fundo do grafico
// plot(t, Pot, 'g'); // cor grafico 'g' verde
plot(t, Pinst, 'b'); // cor grafico 'b' azul
xlabel ('Tempo (s)', 'fontsize', 4);
ylabel ('Corrente (A)', 'fontsize', 4)
xset('font size', 5); // estilo de fonte
// Encontrar o valor máximo em y*****
max_value = max(Pinst);
// SELECIONAR o Sinal util (intervalo para analise)
// Esse intervalo dever ser definido pelo usuario
// os valores podem ser vizualizados no sinal em bruto (Figura 0)

printf("Aguardando por 2 (dois) clicks no grafico...")
t1 = xclick();
t1 = t1(2); // tempo inicial [s]
plot(t1*ones(t), linspace(min(Pinst), max(Pinst), length(Pinst))', "red");

t2 = xclick();
t2 = t2(2); // tempo inicial [s]
plot(t2*ones(t), linspace(min(Pinst), max(Pinst), length(Pinst))', "red");

```

```

// pausa para visualizar ultimo click efetuado no grafico
tic; sleep(1000); toc;
//salva grafico
// xs2png(gcf(), nome_arq + "_sinalbruto" + ".png")

clc;
xdel(winsid()); // fechar todas as janelas de figuras abertas

amostragem = (t($) - t(1))/(size(t,1)); //<---periodo de amostragem
// coordenadas do ponto inicial e final
c1 = round(t1 / amostragem);
c2 = round(t2 / amostragem);

f2 = figure(2); //grafico contendo a parte em vazio e total
f2.background = color("white"); //muda a cor do grafico

//grandezas da faixa selecionada - subvetores
tx = (t(c1:c2));
Vax = (Va(c1:c2));
Vbx = (Vb(c1:c2));
Vcx = (Vc(c1:c2));
Iax = (Ia(c1:c2));
Ibx = (Ib(c1:c2));
Icx = (Ic(c1:c2));
//aparente primeira faixa
Va1 = valorRMS(Vax); //valor RMS da tensao Va
Vb1 = valorRMS(Vbx);
Vc1 = valorRMS(Vcx);
Ia1 = valorRMS(Iax);
Ib1 = valorRMS(Ibx);
Ic1 = valorRMS(Icx);
//corrente efetiva trifasica calculada conforme IEE 1459
Ief = sqrt(((Ia1^2) + (Ib1^2) + (Ic1^2))/3);
St = Va1*Ia1 + Vb1*Ib1 + Vc1*Ic1; //metodo convencional
//Potencia Ativa da faixa selecionada (P [W])
n1 = length(tx); //numero de pontos da 1a. faixa
Ppa = 3*((sum((Vax).*(Iax)))./n1); // potencia ativa total calculada apenas pela
fase A
Ppb = 3*((sum((Vbx).*(Ibx)))./n1); // potencia ativa total calculada apenas pela
fase B
Ppc = 3*((sum((Vcx).*(Icx)))./n1); // potencia ativa total calculada apenas pela
fase C
Pa = sum((Vax).*(Iax));
Pb = sum((Vbx).*(Ibx));
Pc = sum((Vcx).*(Icx));
Pt = (Pa + Pb + Pc)./n1;
// Defasagem em graus [°] para verificar a coerencia
def_Vc_Va = defasagem(Vcx, Vax, tx); //def Vc com Va
def_Vb_Va = defasagem(Vbx, Vax, tx); //def Vb com Va
def_Ia_Va = abs(defasagem(Iax, Vax, tx));

```

```

def_Ib_Vb = abs(defasagem(Ibx, Vbx, tx));
def_Ic_Vc = abs(defasagem(Icx, Vcx, tx));
//fator de potência
Fi = acosd (Pt/St);
xdel(winsid()); // fechar todas as janelas de figuras abertas
//St (potencia aparente); Pt (potencia ativa); Fi (angulo defasagem);
//sequencia de salvamento, aqui podem ser inseridas outras grandezas calculadas
acima
matPot($+1, :) = [string(nome_arq) + " " + string(Ief) + " " + string(Ia1) + " " +
string(Ib1) + " " + string(Ic1)];
//matPot($+1, :) = [string(nome_arq) + " " + string(Ief) + " " + string(tx)];
Vnome_arq($+1, :) = nome_arq;
iter = iter + 1;
end // finaliza while
//
// Salvando arquivos
Vnome_arq = Vnome_arq(2:$, :);
matPot = matPot(2:$, :);
// no directorio eh salvo um arquivo denominado "dados_obtidos" com extensao .csv
// com as grandezas inseridas no vetor "matPot"
cabecalho = ["Ief[A]"+"Ia1[A]"+"Ib1[A]"+"Ic1[A]", "t[s]"];
csvWrite(matPot, "dados_obtidos.csv", " ", ",", [], cabecalho);
disp("Arquivos Analisados com sucesso: " + string(iter - 1));
disp(Vnome_arq);

```