

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

YUJI DE ARAÚJO TAKAHASHI

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE SINTÉTICO UTILIZANDO
MÉTODO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO NO FRESAMENTO
DO AÇO STRENX® 700**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

GUARAPUAVA

2021

YUJI DE ARAÚJO TAKAHASHI

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE SINTÉTICO
UTILIZANDO MÉTODO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE
FLUIDO NO FRESAMENTO DO AÇO STRENX® 700**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título Bacharel em
Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Sílvia do
Nascimento Rosa

GUARAPUAVA

2021



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

Influência do fluido de corte sintético utilizando o método de mínima quantidade de fluido no fresamento do aço STRENX® 700

por

YUJI DE ARAÚJO TAKAHASHI

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado no dia 26 de março de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Sílvia do Nascimento Rosa
Profª. Orientadora

Aldo Przybysz
Membro titular

Viviane Teleginski Mazur
Membro titular

- O termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Primeiro gostaria de agradecer a Deus que me forneceu saúde e determinação durante a caminhada no meu curso.

Quero agradecer a instituição UTFPR por ter garantido uma ótima estrutura e excelentes professores que forneceram o conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho

A Prof. Dra. Sílvia do Nascimento Rosa por ter me instruído e auxiliado no desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso, aos técnicos Lucas Franco Wrege e Adriana e Silva da Costa, sem a ajuda e conhecimento destes seria muito mais árduo vários dos experimentos feitos neste trabalho.

Agradecer também ao professor Ivanir da UTFPR de Ponta Grossa e aos membros da 4Print da UTFPR de Guarapuava por terem auxiliado neste TCC.

Gostaria de mencionar também meus amigos Gabriel do Santos Rodrigues, Pedro Igor Fernandes Boa sorte e Alexandre Piscioneri Octaviano pela sua ajuda nas várias etapas deste trabalho.

Por último um agradecimento especial aos meus pais Edna de Fátima Araújo Takahashi e Sergio Norio Takahashi que mesmo diante de várias adversidades continuaram confiando em mim e me fornecendo todo o apoio necessário para a continuar em frente e prosseguir para finalização do meu curso. A eles meu amor incondicional e gratidão eterna.

RESUMO

TAKAHASHI, Yuji de Araújo. **Influência do fluido de corte sintético utilizando método de mínima quantidade de fluido no fresamento do aço Strenx® 700**. 2021. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

O estudo de novos materiais é algo importante para o desenvolvimento humano, pois com esses materiais é possível combinar propriedades que garantem produtos e processos mais eficazes, econômicos e mais ecologicamente corretos. Inevitavelmente, novos materiais serão utilizados em nichos menores se comparados com os materiais já conhecidos, que terão ampla aplicabilidade. Porém, quando os materiais conhecidos são substituídos por materiais novos, o processo produtivo precisa se adaptar às novas condições desses materiais. Nos processos de fabricação os parâmetros de processo altera significativamente. Por exemplo, nos processos de usinagem a alteração do material da peça pode alterar o material e o formato da ferramenta, o tipo e aplicação do fluido de corte e conseqüentemente os parâmetros de corte. Considerando essas alterações, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar se pastilhas comerciais de metal duro oferecem boas condições de corte quando utilizadas no fresamento do aço comercial Strenx® 700, que é um material de alta resistência e baixa liga, aplicados em setores específicos, como em caminhões e equipamentos da agricultura. A avaliação teve como respostas a rugosidade e o desgaste da ferramenta. Dessa forma foi utilizado um centro de usinagem com as seguintes condições de corte: profundidade de corte de 0,5 mm, avanço por dente 0,10 mm/rot, velocidade de corte 230 m/min e condições com e sem fluido de corte. Na condição com fluido de corte foi utilizado um sistema de mínima quantidade de fluido. Ao utilizar os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante da pastilha, o estudo mostrou que o aço Strenx® 700 é possível de ser usinado com pastilha de metal duro revestida e na condição com fluido de corte, utilizando a técnica de mínima quantidade de fluido, tanto o desgaste quanto a rugosidade média tiveram valores menores.

Palavras-chave: Fresamento, Mínima Quantidade de Fluido, Desgaste, Rugosidade, Strenx® 700.

ABSTRACT

TAKAHASHI, Yuji de Araújo. **Influence of synthetic cutting fluid using minimum quantity of cutting fluid method in milling Strenx® 700**. 2021. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

The study of new materials is something important for human development, because with these materials it is possible to combine properties that guarantee more efficient, economical and more ecologically correct products and processes. Inevitably, new materials will be used in smaller niches compared to the materials already known, which will have wide applicability. However, when known materials are replaced with new materials, the production process needs to adapt to the new conditions of these materials. In manufacturing processes, the process parameters change significantly. For example, in machining processes, changing the material of the part can change the material and shape of the tool, the type and application of the cutting fluid and consequently the cutting parameters. Considering these changes, the present work aimed to evaluate whether commercial carbide inserts offer good cutting conditions when used in milling commercial Strenx® 700 steel, which is a high-strength, low-alloy material, applied in specific sectors, as in trucks and agricultural equipment. The evaluation had as answers the roughness and the wear of the tool. In this way, a machining center was used with the following cutting conditions: cutting depth of 0.5 mm, feed per tooth 0.10 mm/rot, cutting speed 230 m/min and conditions with and without cutting fluid. In the cutting fluid condition, a system with a minimum amount of fluid was used. By using the cutting parameters recommended by the insert manufacturer, the study showed that Strenx® 700 steel is possible to be machined with coated carbide insert and in the condition with cutting fluid, using the technique of minimum amount of fluid, both wear and medium roughness had lower values.

Keywords: Milling, Minimum Quantity of Cutting Fluid, Wear, Roughness, Strenx® 700.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Ilustração de uma (a) fresa cilíndrica tangencial, b) fresa cilíndrico-frontal e (c) fresa de topo com haste cilíndrica..... | 10 |
| Figura 2 - Tipos de máquina-ferramenta, (a) fresadora horizontal e (b) fresadora vertical..... | 11 |
| Figura 3 - Fresamento tangencial (a) e frontal (b)..... | 12 |
| Figura 4 – Fresamento tangencial concordante(a) e discordante(b)..... | 12 |
| Figura 5 – Profundidade de corte (a_p) e espessura de penetração (a_e)..... | 13 |
| Figura 6 – Avanço por dente (f_z) e avanço por volta (f)..... | 14 |
| Figura 7 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte..... | 16 |
| Figura 8 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte. | 17 |
| Figura 9 – Representação esquemática das fases ativa e inativa da aresta de corte num processo de fresamento frontal..... | 17 |
| Figura 10 – Distribuição de temperatura e de tensões em pastilhas de metal duro, no corte interrompido..... | 18 |
| Figura 11 - As quatro direções possíveis de aplicação do fluido de corte..... | 20 |
| Figura 12 – Aplicação por jorro do fluido de corte semissintético com vazão total de 1230 litros por hora..... | 21 |
| Figura 13 - Comprimentos de análise para cálculo da rugosidade..... | 22 |
| Figura 14 - Princípio básico de funcionamento dos instrumentos de medição de textura superficial..... | 23 |
| Figura 15 - Definição dos parâmetros a) R_a , b) R_p , R_v e $R_{máx}$ | 24 |
| Figura 16 - Organograma das atividades propostas no trabalho..... | 26 |
| Figura 17 - Corpo de prova para ensaio..... | 27 |
| Figura 18 - Centro de usinagem Romi D600..... | 28 |
| Figura 19 - Sistema para aplicação no método MQL, tanque de armazenamento (a) e saída do fluido (b)..... | 29 |
| Figura 20 - Dispositivo de fixação das pastilhas..... | 30 |
| Figura 21 - Micrografia do aço Strenx 700..... | 31 |
| Figura 22 - Rugosidade média (R_a) das superfícies usinadas com fluido e sem fluido de corte..... | 32 |
| Figura 23 - Gráficos rugosidade R_v e R_p | 33 |
| Figura 24 - Gráfico de Rugosidade R_t | 33 |
| Figura 25 - Superfície das amostras fresada com fluido a) e sem fluido b)..... | 34 |
| Figura 26 - Superfície das amostras fresada com fluido a) e sem fluido b)..... | 34 |
| Figura 27 - Gráfico de desgaste aresta principal..... | 35 |
| Figura 28 - Gráfico de desgaste aresta secundária de corte..... | 35 |
| Figura 29 - Desgaste na aresta principal a) e secundaria de corte b)..... | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Rugosidade média esperada em processos de usinagem..... | 25 |
| Tabela 2 - Composição química e propriedades mecânicas do aço Strenx® 700..... | 27 |
| Tabela 3 - Composição química da amostra de aço Strenx 700..... | 31 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Alguns parâmetros de rugosidade..... | 23 |
|---|----|

LISTA DE SIGLAS

Letras maiúsculas

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| Ra | Desvio aritmético médio da rugosidade |
| Rq | Desvio médio quadrático da rugosidade |
| Rt | Altura total do perfil |
| Rz | Altura máxima do perfil |
| R _{sk} | Fator de assimetria do perfil |
| R _{ku} | Fator de achatamento do perfil |
| KT | Desgaste de cratera |
| V _b | Desgaste de flanco médio |
| V _b _{max} | Desgaste de flanco máximo |
| Vb | Desgaste de entalhe |
| V | Vanádio |
| Mo | Molibdênio |
| Nb | Nióbio |

Letras minúsculas

| | | |
|----------------|--------|------------------------------|
| vc | m/min | Velocidade de corte |
| vf | mm/min | Velocidade de avanço |
| f | mm | Avanço |
| a _p | mm | Profundidade de corte radial |
| a _e | mm | Profundidade de corte axial |
| n | rpm | Rotação por minuto |
| fz | mm | Avanço por dente |
| z | - | Número de dentes |
| lv | μm | Comprimento de ajuste |
| ln | μm | Comprimento de ajuste |
| lm | μm | Comprimento de medição |
| le | μm | Comprimento de amostragem |
| lt | μm | Comprimento total |

Abreviaturas

| | |
|------|-------------------------------|
| APC | Aresta postiça de corte |
| EP | Extrema pressão |
| MQF | Mínima quantidade de fluido |
| HSLA | High Strength Low Alloy Steel |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 6 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 7 |
| 2 OBJETIVOS..... | 8 |
| 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 8 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 9 |
| 3.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA..... | 9 |
| 3.2 FRESAMENTO..... | 10 |
| 3.3 DESGASTE DE FERRAMENTAS..... | 15 |
| 3.5 FLUIDO DE CORTE..... | 18 |
| 3.6 RUGOSIDADE..... | 22 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 26 |
| 4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA..... | 26 |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO..... | 27 |
| 4.3 PROCESSO DE FRESAMENTO E SUAS ANÁLISES..... | 28 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 31 |
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO..... | 31 |
| 5.2 RUGOSIDADE..... | 32 |
| 5.3 DESGASTE DA FERRAMENTA..... | 35 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 37 |
| 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 37 |
| REFERÊNCIAS..... | 38 |
| ANEXO A..... | 43 |

1 INTRODUÇÃO

A fabricação dos componentes de veículos ferroviários e rodoviários, de automóveis de passageiros, maquinários de construção, equipamentos industriais, estruturas *offshore*, gasodutos e pontes, por exemplo, requerem a utilização de materiais com propriedades específicas, tais como resistência mecânica, tenacidade, soldabilidade, conformabilidade e resistência à corrosão. Na classe dos aços, para garantir essas propriedades, pode-se utilizar os aços de alta resistência e baixa liga.

Devido às essas características, os aços de alta resistência e baixa liga, do inglês HSLA – *High Steel Low Alloy*, têm despertado interesse em várias pesquisas (BRANCO e BERTO, 2018; ORTEGA *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; HOSSEINI *et al.*, 2019). Essas pesquisas contemplam várias áreas de conhecimento, pois dependendo da composição química do aço, aquelas propriedades citadas anteriormente são alteradas, e o aço se destina a uma aplicação específica. Nessas pesquisas o comportamento do material no processo de soldagem, análise de fadiga e utilização deste material em gasodutos e oleodutos, foram alguns dos pontos abordados.

A variação dos elementos químicos na composição dos aços HSLA, apesar de trazer vantagens para o produto, pode gerar desvantagens para os processos de fabricação que este produto poderá passar. A exemplo pode-se citar o processo de usinagem. Certos elementos de liga (por exemplo, os formadores de carbonetos), prejudicam a usinabilidade do material, quando se refere à vida útil da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2009). Porém, para amenizar essa e outras desvantagens que um determinado material pode trazer para o processo de usinagem, experimentos são realizados com o intuito de verificar possibilidades de uso de tipos de ferramentas, estratégias, fluidos de corte, sistemas de fixação, entre outros. Com esses experimentos pretende-se apontar a situação mais adequada para ter maior vida útil da ferramenta, menor vibração, melhor acabamento superficial, menor distorção na peça etc.

Tendo em vistas estes aspectos, o presente trabalho visa realizar um estudo em um aço HSLA, utilizando o processo de fresamento, a fim de conhecer as propriedades do material, a influência do uso de fluido de corte no acabamento superficial e no desgaste de ferramentas, e por fim relatar os resultados destas combinações.

1.1 JUSTIFICATIVA

Uma classe de aço estrutural de alta resistência, denominado no mercado de Strenx® 700, tem sido utilizado em chassis de caminhões basculantes e reboques, guindastes, equipamentos para construção e agricultura, especialmente em estruturas de carga que têm alta demanda por menor peso. A aplicação destes aços nestes elementos estruturais tem tido sucesso, como é mostrado nos relatos dos clientes, conforme citado pelo fabricante (SAAB, 2019). Boa parte desses relatos é devido à utilização do aço em chassis e equipamentos para agricultura.

Assim a decisão de utilizar o aço da classe Strenx no estudo, primeiro se deve ao reduzido número de publicação na área de usinagem deste aço e posteriormente, em relação aos serviços de usinagem da região. Como boa parte das oficinas na cidade de Guarapuava prestam serviços de manutenção para o setor agrícola ou de papel, possivelmente essas oficinas usarão esse material.

Por isso, o trabalho visa realizar experimentos com pastilhas de fresamento disponíveis em sites de ferramentas de usinagem e fluido de corte comercial (aplicado com um sistema de mínima quantidade de fluido, construído na UFTPR de Guarapuava), a fim de verificar a influência na rugosidade e no desgaste da ferramenta.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é verificar como a superfície do aço Strenx 700 se apresenta no processo de fresamento, quando se utiliza fluido de corte sintético no sistema MQL e sem a utilização de fluido de corte.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral será necessário:

- Caracterizar o aço Strenx através de dureza, metalografia e composição química.
- Comparar a rugosidade sem a utilização de fluido e com o uso de fluido sintético no sistema MQL, e verificar se as pastilhas comerciais conseguem atingir rugosidade dentro dos padrões esperados.
- Comparar o desgaste da ferramenta sem fluido e com o uso de fluido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Aços de alta resistência e baixa liga (*High-strength low-alloy* ou HSLA) são projetados para ter melhores propriedades mecânicas que os aços carbono convencionais. Suas propriedades melhoradas podem ser a resistência, tenacidade, conformabilidade, soldabilidade e resistência à corrosão atmosférica (ASM, 2001).

Por ser um material mais resistente, ele permite redução do peso da peça produzida com o referido material. Outra característica é quanto vida útil da peça, que pode ser aumentada já que uma das propriedades deste material é oferecer maior resistência à corrosão. Devido à essas características, podem ser usados em oleodutos e gasodutos, veículos pesados, equipamentos industriais, tanques de armazenamento e como aço estrutural para a construção civil (ASM, 2001).

Uma das diversas formas de melhorar estas características do aço pode ser pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga como o molibdênio (Mo), vanádio (V), nióbio (Nb) e etc. (VERVYNCKT, 2012). A adição destes elementos de liga promove o endurecimento do material através do refinamento dos grãos ou por precipitação. Outra forma de melhorar as propriedades do material é por meio da diminuição ou da forma das inclusões (PICKERING, 1978). Com as alterações das propriedades, o limite de escoamento pode variar de 300 a 900 MPa, e é por meio deste limite que os HSLA são classificados (SAE, 1999).

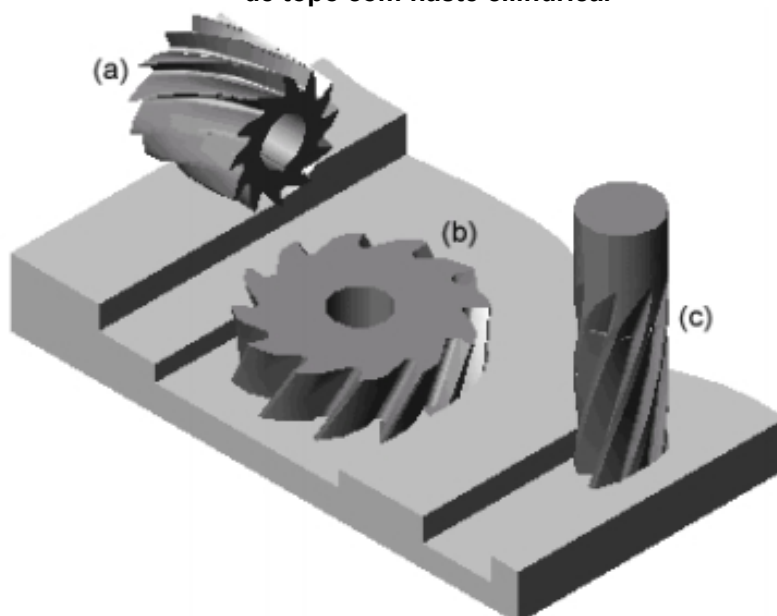
Quanto aos elementos de liga, pode-se citar a influência de dois elementos, o nióbio e o vanádio. O nióbio no aço de alta resistência e baixa liga, em concentrações de 0,020% a 0,10%, aumenta a resistência ao escoamento e resistência a ruptura. O vanádio possui alta solubilidade na austenita promovendo o endurecimento do material por precipitação interfásica, sendo estes precipitados os carbonetos e nitretos de vanádio. O vanádio também é responsável pelo refinamento dos grãos de ferrita promovendo um aumento da resistência mecânica (ASM HANDBOOK, 1993; CHIAVERINI, 1986). Além dos elementos de liga, estes aços também podem ter suas propriedades melhoradas por laminação controlada, resfriamento controlado e controle de forma de inclusões (GORNI *et al.*, 2006).

3.2 FRESAMENTO

Na usinagem existem os mais variados processos de remoção de material, agrupados em duas famílias, denominadas usinagem convencional e usinagem não convencional. Na primeira família, que utiliza ferramenta afiada, há três processos principais: torneamento, furação e fresamento (GROOVER, 2014).

O fresamento é uma das operações mais versáteis e mais utilizadas, pois permite a geração de grandes variedades de forma. Neste processo, a ferramenta, que geralmente possui o número de dentes ou arestas maior ou igual a dois, remove o material da peça de modo descontínuo (STEMMER, 2007). A ferramenta é chamada fresa, e suas arestas cortantes geralmente estão dispostas simetricamente em torno de um eixo (DINIZ *et al.*, 2014), como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração de uma a) fresa cilíndrica tangencial, b) fresa cilíndrico-frontal e (c) fresa de topo com haste cilíndrica.

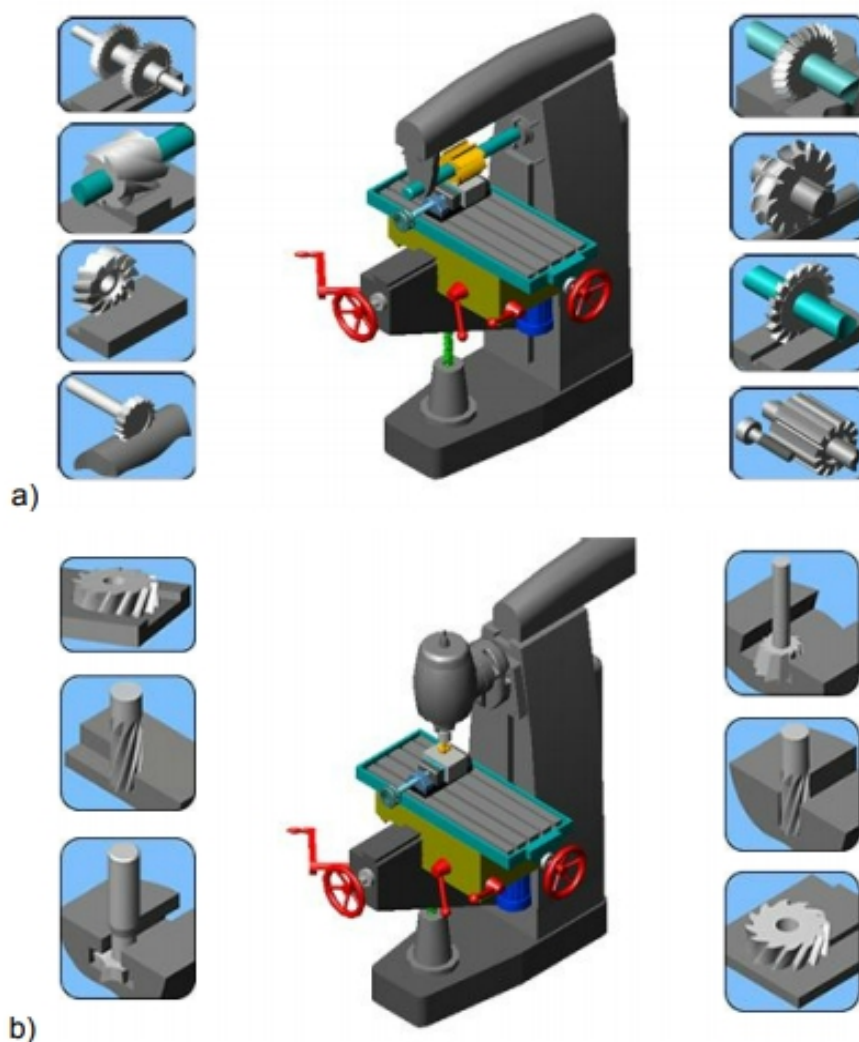


Fonte: CIMM, (2007)

O movimento de corte acontece quando a fresa gira em torno do seu eixo, e na maioria dos casos, a própria peça faz o movimento de avanço. Nesta situação, a peça que está fixada na mesa da máquina se movimenta em relação a fresa dando-lhe as dimensões desejadas (DINIZ *et al.*, 2014). A máquina-ferramenta que fornece rotação necessária para a ferramenta e a mesa que permite a fixação, posicionamento e avanço da peça, é chamada fresadora. Existem vários projetos de máquinas que permitem a usinagem das mais variadas formas de peça, podendo ser semiautomática ou de comando numérico (GROOVER, 2014). Dentro dessas

modalidades as fresadoras podem ser classificadas quanto ao eixo de rotação: horizontal ou vertical. Na Figura 2 ilustra esses dois tipos de fresadoras e algumas operações realizadas nestas máquinas

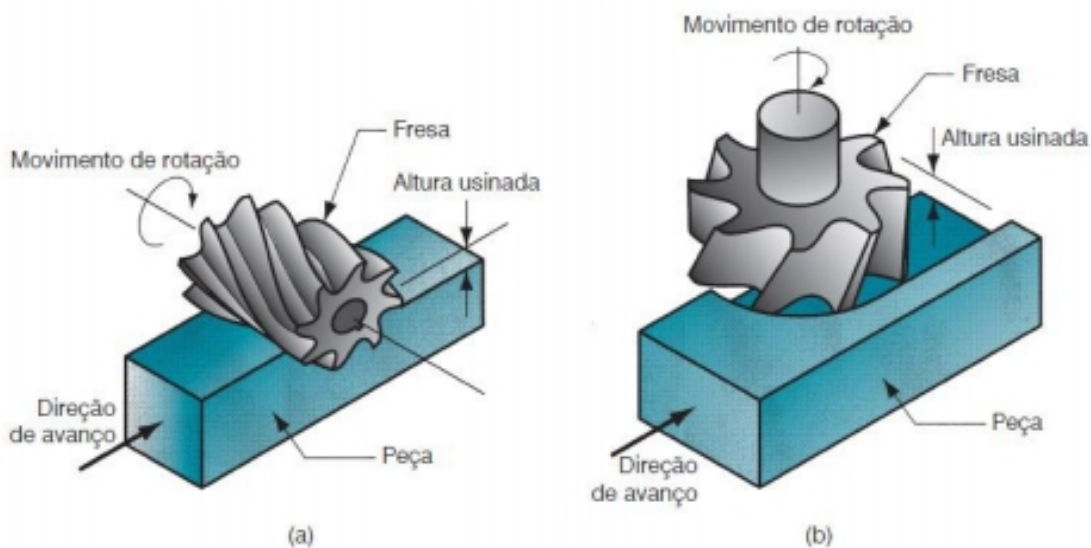
Figura 2 - Tipos de máquina-ferramenta, (a) fresadora horizontal e (b) fresadora vertical.



Fonte: CIMM, 2019.

Existem vários tipos de classificação dos processos de fresamento, mas os mais comuns são o tangencial e o frontal, como ilustrado na Figura 3. A diferença entre os dois tipos está em função dos dentes (arestas) ativos, que no primeiro está localizado na superfície cilíndrica da ferramenta e no outro na superfície frontal da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014).

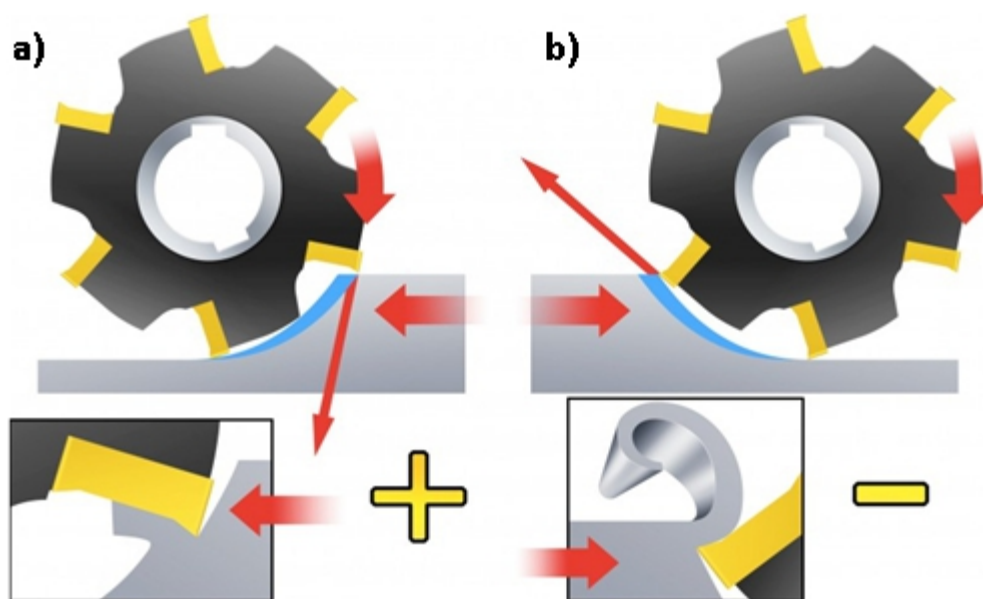
Figura 3 - Fresamento tangencial (a) e frontal (b).



Fonte: Groover (2014).

Há ainda uma segunda classificação que depende da direção de corte e de avanço, denominada concordante e discordante. Quando os movimentos de corte e de avanço possuem a mesma direção, pode-se dizer que o fresamento é concordante. Quando o oposto acontece diz-se que o fresamento é discordante. No caso do concordante, a ferramenta começa a remover o cavaco com uma espessura máxima indo até o mínimo e no discordante acontece o contrário (STEMMER, 1995), como está ilustrado na Figura 4.

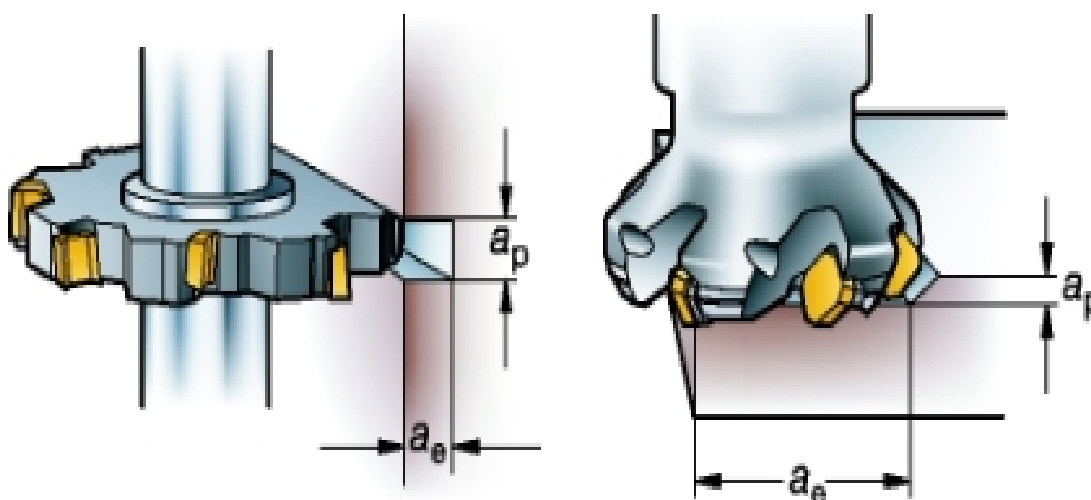
Figura 4 – Fresamento tangencial concordante(a) e discordante(b).



Fonte: Sandvik (2019)

Como já dito na classificação do fresamento, a execução de uma operação depende do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. O movimento de avanço em conjunto com o movimento de corte permite que seja retirado material de forma contínua (FERRARESI, 2013). Esses movimentos são realizados por uma determinada velocidade de corte (vc) e pelo avanço (f), que é o percurso mais lento que a ferramenta percorre a peça. A continuidade da retirada de material ainda se dá pelo movimento de ajuste da ferramenta, que no caso do fresamento, é a profundidade de corte (a_p) e espessura de penetração (a_e), ilustradas na Figura 5. Assim, a velocidade de corte, o avanço e as profundidades são chamados de condições de corte e formam as dimensões do processo de fresamento (GROOVER, 2014).

Figura 5 – Profundidade de corte (a_p) e espessura de penetração (a_e).



Fonte: Sandvik (2019)

Na preparação da fresadora são requeridas as informações de velocidade de corte e de avanço. Porém a informação da velocidade de corte é inserida como rotação. A conversão da velocidade de corte em rotação (n) da fresa é realizada utilizando a Equação 1.

$$n = \frac{vc \cdot 1000}{\pi \cdot d} \quad \text{Eq. 1}$$

vc = velocidade de corte [m/mim]

d = diâmetro da fresa [mm]

Já a velocidade da mesa da máquina é calculada através da rotação e o avanço da fresa, utilizando a Equação 2.

$$vf = fz \cdot z \cdot n \quad \text{Eq. 2}$$

vf = velocidade de avanço [mm/mim]

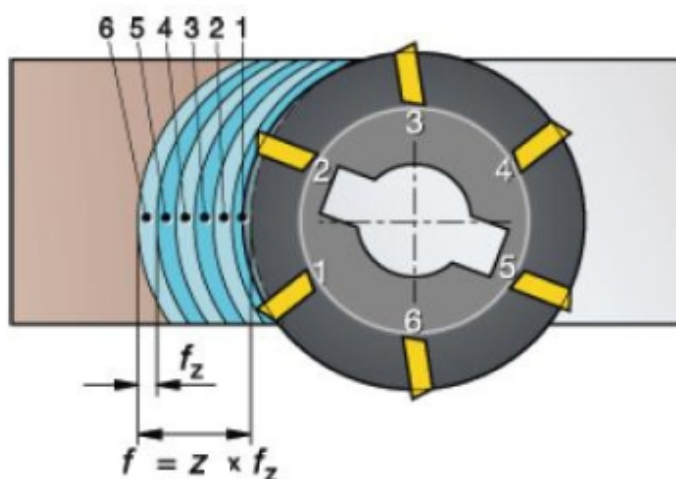
fz = avanço por dente [mm]

z = números de arestas (dentes) da fresa

n = rotação [min^{-1}]

A Figura 6 ilustra o percurso das arestas de corte na peça e o percurso por volta da fresa, ou seja, o avanço por dente (fz) e o avanço por volta (f).

Figura 6 – Avanço por dente (fz) e avanço por volta (f).



Fonte: Sandvik, (2019)

Utilizando as condições de corte é possível calcular a taxa de remoção de material (Q) no fresamento, dada pela Equação 3.

$$Q = ap \cdot ae \cdot vf \quad \text{Eq. 3}$$

Q = taxa de remoção de material [mm^3/mim]

ap = profundidade de corte [mm]

ae = espessura de penetração [mm]

vf = velocidade de avanço [mm/min]

Além destas velocidades, existem as velocidades passivas, que são aquelas que não fazem a remoção de material. O movimento de aproximação e afastamento ou o movimento para troca de ferramenta, são movimentos que utilizam velocidade passiva. Essas são de suma importância em máquinas comandadas numericamente, visto que, valores maiores de velocidades passivas contribuem para uma diminuição total do tempo de fabricação da peça.

A escolha correta das condições de corte depende de vários fatores, como o tipo de operação e o material a ser usinado (MACHADO *et al.*, 2009). Alguns fabricantes de ferramentas disponibilizam informações de condições de corte para vários materiais e tipo de operação (acabamento, usinagem média e acabamento), e isso oferece uma ótima contribuição para o aperfeiçoamento de um processo.

3.3 DESGASTE DE FERRAMENTAS

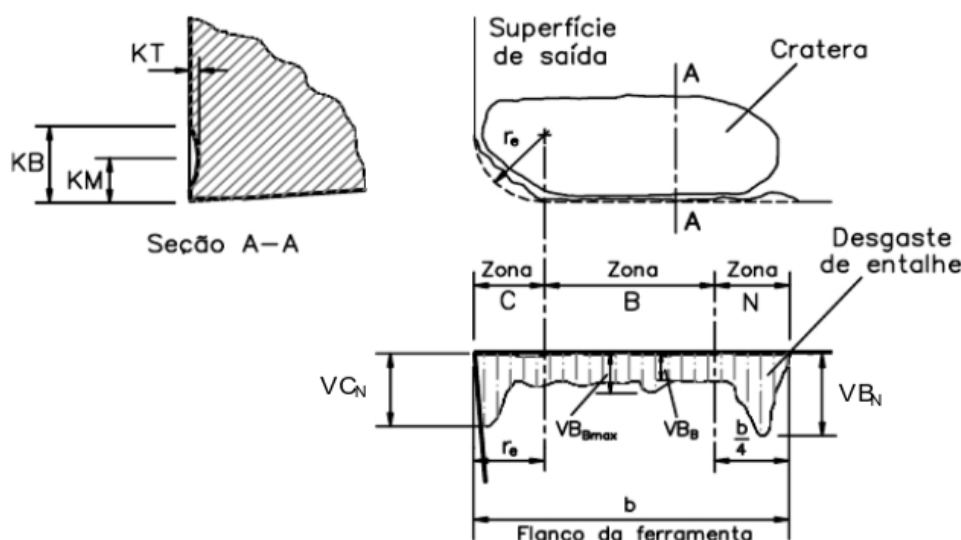
Com o avanço da tecnologia novos materiais vêm sendo empregados para confecções de novas ferramentas de corte. Por mais que estas ferramentas tenham boas propriedades, como elevada tenacidade, estabilidade química ou dureza a quente, elas não estão livres dos mecanismos de desgaste, que ocorrem geralmente na superfície de saída e de folga da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

O desgaste da ferramenta, que pode ser por perda de material ou sua deformação, causa uma série de problemas como o aumento da rugosidade superficial, aumento da dificuldade para conseguir chegar às medidas finais da peça, aumento da vibração etc. (DEVILLEZ, 2004). O motivo deste desgaste está relacionado aos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, que geralmente é a abrasão, adesão ou difusão (NOUARI, 2000).

O mecanismo de abrasão acontece quando partículas duras (oriundas da peça ou da ferramenta de corte) atiram com a superfície da ferramenta, e essas partículas por serem de maior dureza que a ferramenta, ocasiona a perda de material (KHRUSCHOV, 1974). Já o mecanismo de adesão ocorre quando partes do material da peça ou da ferramenta se desprendem e se aderem um ao outro. Quando é recíproco a taxa de desgaste é maior (DWIVEDI, 2010). O mecanismo de difusão consiste na transferência de átomos de um material para o outro. Para que ocorra é necessário elevado fluxo de material, altas temperaturas e ocorre tanto na superfície de folga quanto de saída da ferramenta (TRENT, 2000).

Dependendo da superfície da ferramenta onde o mecanismo é ativado, o desgaste recebe uma nomenclatura. O mecanismo de difusão gera um desgaste chamado de cratera, que acontece na superfície de saída da ferramenta, como mostrado na Figura 7. Este desgaste é ativado pelo aumento de temperatura e devido ao contato abrasivo do cavaco com a superfície de saída da ferramenta. Materiais que produzem cavacos curtos diminuem a progressão desse tipo de desgaste, como por exemplo, ferro fundido. (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 7 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.



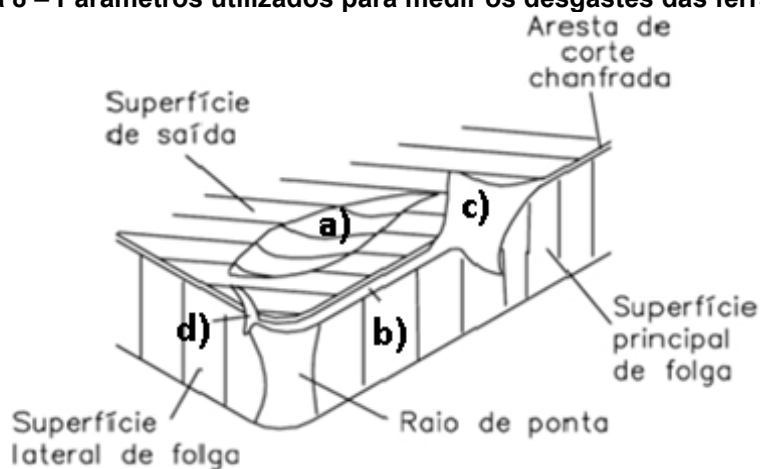
Fonte: Modificado Dearnley e Trent, (1983).

O mecanismo que muda a forma original da aresta de corte, dificultando a obtenção das características finais da peça usinada, gera um desgaste denominado desgaste de flanco. O atrito da ferramenta com a peça na superfície de folga e maiores velocidades de corte aceleram este desgaste (DINIZ *et al.*, 2014).

No desgaste de entalhe ocorre a formação de entalhes na aresta primária e secundária de corte, geralmente em formas de “V”, ocorrendo principalmente durante a usinagem de materiais de elevada dureza e a altas temperaturas (TRENT, 1983).

Para que se possa quantificar o desgaste da ferramenta, a norma ISO 3685 (1997) definiu alguns parâmetros denominados KT (para avaliar o desgaste de cratera), VB_B (desgaste de flanco médio), VB_{Bmax} (desgaste de flanco máximo) e VB_N (desgaste de entalhe). A Figura 8 ilustra a forma de medição destes parâmetros.

Figura 8 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.

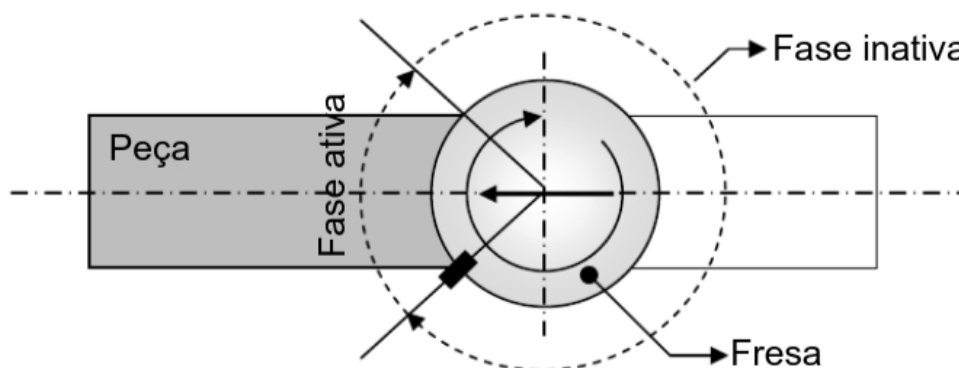


a - Desgaste de cratera **b** - Desgaste de flanco **c, d** - Desgaste de entalhe

Fonte: ISSO 3685, (1997).

Para cortes interrompidos, como é o caso do fresamento, além de ocorrer os desgastes mencionados, a ferramenta pode apresentar trincas, lascamento ou quebras. As trincas ou lascas, que poderão levar à quebra, ocorrem devido à fadiga térmica e mecânica, durante as fases ativas e inativas da ferramenta, ilustradas na Figura 9. A ferramenta na fase ativa se expande com o ganho de temperatura provocando tensões de tração e ao resfriar, na fase inativa, se comprime gerando tensões de compressão (MACHADO *et al.*, 2009). A ferramenta só falhará por desgaste uniforme neste tipo de usinagem se a ferramenta possuir tenacidade o suficiente para resistir aos impactos e variações de temperatura presentes no processo.

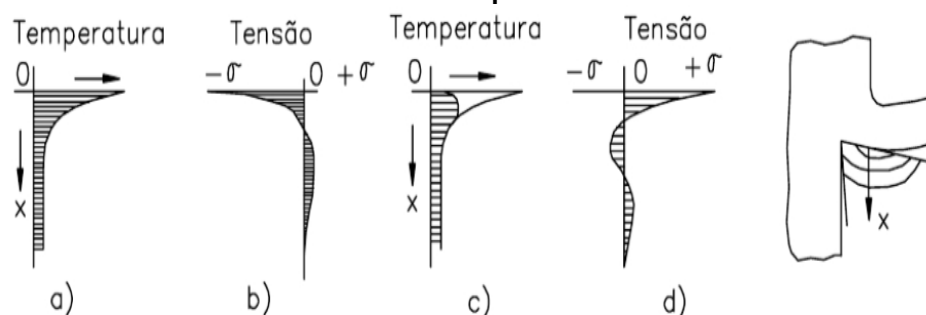
Figura 9 – Representação esquemática das fases ativa e inativa da aresta de corte num processo de fresamento frontal.



Fonte: Melo *et al.*, (2004).

Essas flutuações de temperatura explicam as variações de tensões encontradas na ferramenta. As camadas que estão perto da aresta de corte possuem temperatura muito maior do que nas regiões mais distantes, ou seja, estas camadas têm a capacidade de dilatar mais. As camadas inferiores que estão mais frias impedem que as camadas superiores se dilatam mais. Essa diferença de dilatação faz com que sejam geradas tensões de compressão nas camadas superiores e nas camadas mais inferiores tensões de tração, como ilustrado na Figura 10a e 10b (FERRARESI, 1977).

Figura 10 – Distribuição de temperatura e de tensões em pastilhas de metal duro, no corte interrompido.



Fonte: Ferraresi, (1997).

No tempo inativo da aresta de corte, as superfícies superiores perdem temperatura causando assim o mecanismo inverso. A Figura 10 (c e d) corresponde ao tempo ativo da aresta de corte e ao tempo inativo.

3.4 FLUIDO DE CORTE

Um dos problemas principais quando está se usinando uma peça é o calor gerado no processo. Um dos meios para dissipar este calor é a utilização de um fluido de corte. O fluido de corte ajuda a controlar a temperatura na zona de cisalhamento e na zona de atrito, não permitindo que a ferramenta atinja uma temperatura elevada, e promove a diminuição do atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-superfície usinada (GROOVER, 2014). Com o uso de fluidos de corte, benefícios como o aumento da produtividade e redução de custos, podem ser alcançados. Se usado corretamente pode aumentar o tempo de vida da ferramenta, reduzir as forças de corte e melhorar o acabamento superficial (MACHADO *et al.*, 2009).

O benefício do uso do fluido de corte se faz tanto em altas velocidades (maior geração de calor) como em baixas velocidades. Na usinagem em baixas velocidades de corte pode ocorrer formação da aresta postiça de corte (APC), fenômeno que ocorre quando o cavaco adere na superfície de saída da ferramenta, posteriormente encrua e permanece um tempo aderido. Porém, usando um fluido com efeito lubrificante pode-se reduzir o atrito e evitar a ocorrência da APC. Já em altas velocidades, a ferramenta sobreaquece, sendo necessário o uso de fluidos com propriedades refrigerantes. Além disso, os fluidos de corte podem ajudar na remoção de cavaco da zona de corte e ainda proteger a máquina-ferramenta e a peça contra oxidação (MACHADO *et al.*, 2009).

Para conseguir o que foi dito anteriormente, o fluido de corte é usado de forma sólida (bissulfeto de molibdênio, por exemplo), líquida (óleos ou aquosos) ou gasosa (por exemplo, ar comprimido, nitrogênio). O ar comprimido usado como fluido de corte tem a função de remover cavaco, além de ajudar na refrigeração. Geralmente usa-se esse tipo de fluido em materiais mais duros, que tendem a formar cavacos em lascas ou pó. Os fluidos de corte a base de óleo têm a função de lubrificação e é usado quando o calor gerado foi derivado do atrito (DINIZ *et al.*, 2014). Já as emulsões consistem na mistura de óleo e água, mais um agente emulsificador que mantenha o óleo disperso na água de forma uniforme, possuindo ótimo poder refrigerante (STEMMER, 1993).

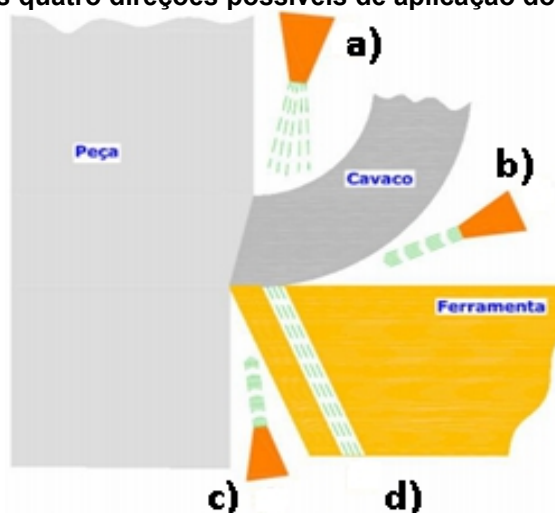
Muitas vezes usam-se aditivos para melhorar propriedades específicas dos fluidos de corte como antiespumantes, anticorrosivos, detergentes, emulgadores (responsáveis pela formação de óleo na água), biocidas e aditivos de extrema pressão (EP). O uso do EP é necessário quando as condições de usinagem exigem que o fluido de corte continue com sua característica lubrificante em altas temperaturas e elevadas pressões (MACHADO *et al.*, 2009).

A escolha do fluido de corte apropriado para a operação de usinagem tem como base o material da peça, o material da ferramenta e o processo de usinagem. Os ferros fundidos, os maleáveis e as ligas de magnésio, por exemplo, geralmente são usinados sem fluido. As ligas de magnésio não podem ser usinadas com emulsões devido ao risco de ignição, já que a água reage com o cavaco causando a liberação de hidrogênio. Os aços podem ser usinados com quase todos os tipos de fluidos de corte existentes. Já os materiais para ferramenta, que são mais duros,

conseguem suportar maiores temperaturas e o uso de um fluido refrigerante nesta situação pode aumentar o tempo de vida útil da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Para que o fluido de corte seja bem aproveitado ele deve ser aplicado diretamente nas áreas onde o atrito e a geração de calor são altos. Para acessar essas áreas os fluidos basicamente são aplicados em três direções, como mostrado na Figura 11. A direção a) é conhecida como sobre cabeça, a direção b) é na saída do cavaco, a direção c) através da superfície de folga e a direção d) interna à ferramenta de corte.6

Figura 11 - As quatro direções possíveis de aplicação do fluido de corte.



Fonte: Almeida et al., (2007).

Porém, trabalhando somente com as direções ainda não é possível aproveitar todos os benefícios dos fluidos. Para isso, deve-se ainda escolher o tipo de aplicação, que pode ser feita por jorro de fluido a baixa pressão (mostrado na Figura 12, que é um dos métodos mais utilizados devido a sua simplicidade), por pulverização (que possui um maior poder de penetração e velocidade) e pelo sistema de alta pressão (MACHADO, 1990).

Por mais que a utilização dos fluidos de corte resulte em benefícios para máquina, ferramenta e peça, existem certas características prejudiciais ao ser humano e ao meio ambiente. O contato longo do operador com os fluidos de corte pode causar problemas na pele e o vapor gerado pode causar doenças pulmonares e inclusive câncer (GONÇALVES, 2010; SOUZA, 2011). Visto estes malefícios, tem desenvolvido outras composições e outros métodos para a aplicação do fluido de corte, como usinagem sem fluido, o uso da mínima quantidade de fluido (MQF), uso de fluidos criogênicos etc. (LIEW, 2017).

Figura 12 – Aplicação por jorro do fluido de corte semissintético com vazão total de 1230 litros por hora.



Fonte: Gonçalves, (2010).

O método de usinagem sem fluido remove os custos relativos à aquisição, armazenamento e desgaste do fluido. Este método geralmente é aplicado em ferramentas que possuem elevada dureza a quente como metal duro revestido, cerâmica e nitreto de boro cúbico. Quando se usina utilizando fluido nas mesmas condições que sem fluido as temperaturas geralmente são menores, e devido a isso o tempo de vida útil da ferramenta aumenta e a obtenção das medidas desejadas para a peça se tornam mais fáceis (LIEW, 2017; GOINDI, 2017).

Quando não é possível a remoção completa do uso de fluido de corte utiliza-se o método de MQF que consiste em usar a menor quantidade de fluido possível, geralmente em torno de 10 a 100 mililitros por hora. Neste caso, deve-se levar em conta características secundárias do fluido de corte como biodegradabilidade, estabilidade de oxidação e estabilidade química em longo prazo, devido ao baixo consumo (SUDA, 2002; FURNESS, 2006).

A técnica por criogenia possibilita várias vantagens como aumento de produtividade, aumento da vida da ferramenta, aumento da velocidade de corte e melhor acabamento superficial. Uns dos fluidos criogênicos mais utilizados é o nitrogênio que possui o ponto de ebulição de $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Além das vantagens já citadas, este tipo de fluido não prejudica o meio ambiente, não é inflamável e não possui efeito corrosivo (LIEW, 2017; UMBRELLO, 2012).

3.6 RUGOSIDADE

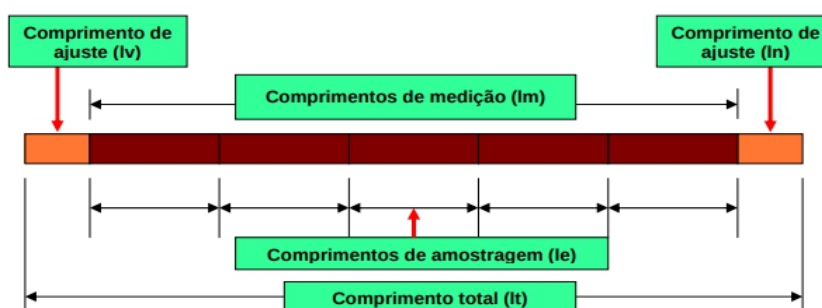
A rugosidade pode ser vista como as irregularidades de uma superfície, e estas definem o acabamento superficial da peça e consiste em pequenas saliências e reentrâncias. Tais irregularidades são marcas resultantes do processo de corte chamadas de marcas de avanço (MACHADO *et al.*, 2009). A medição destas irregularidades é feita em pequenos comprimentos chamados de “cut-off” (comprimento de amostragem) e quando essas irregularidades possuem espaçamento maior que 1 mm são chamadas de ondulações (MACHADO e DA SILVA, 2004).

A rugosidade pode ser classificada quanto à direção de movimento de corte e de avanço da ferramenta. Quando a rugosidade está no mesmo sentido que o avanço a rugosidade pode ser chamada de transversal e na direção do movimento de corte rugosidade longitudinal (FERRARESI, 2006).

Os parâmetros para quantificação da rugosidade podem ser de acordo com a amplitude, espaço e a combinação dos dois. O parâmetro de amplitude consiste na medição da altura dos picos e vales, e o parâmetro de espaço no espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície (MACHADO *et al.*, 2009).

Para o processo de medição, o sistema de medição trabalha com um comprimento de medição dividido de três a cinco comprimentos de amostragens. Duas partes do percurso total são para ajuste, no caso l_v e l_n , e servem para amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas do sistema e a centralização do perfil. Assim, os comprimentos l_e e l_m são os trechos utilizados para determinação da rugosidade superficial (NUNES, 2011), como ilustrado na Figura 13.

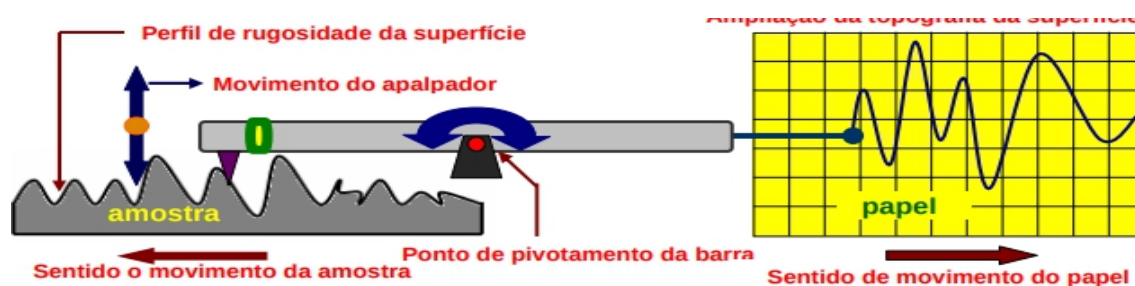
Figura 13 - Comprimentos de análise para cálculo da rugosidade.



Fonte: Santos, (2007).

Os instrumentos mais utilizados para fazer a medição dessas irregularidades se baseiam em um sensor que se desloca pela superfície a uma determinada velocidade e distância (NUNES, 2011). Na Figura 14 mostra o princípio básico de funcionamento destes instrumentos.

Figura 14 - Princípio básico de funcionamento dos instrumentos de medição de textura superficial.



Fonte: Santos, (2007).

Dentre os vários parâmetros que são utilizados para quantificar a rugosidade de acordo com a Norma ABNT NBR 4287 (2002), o **Quadro 1** mostra alguns deles.

Quadro 1 – Alguns parâmetros de rugosidade.

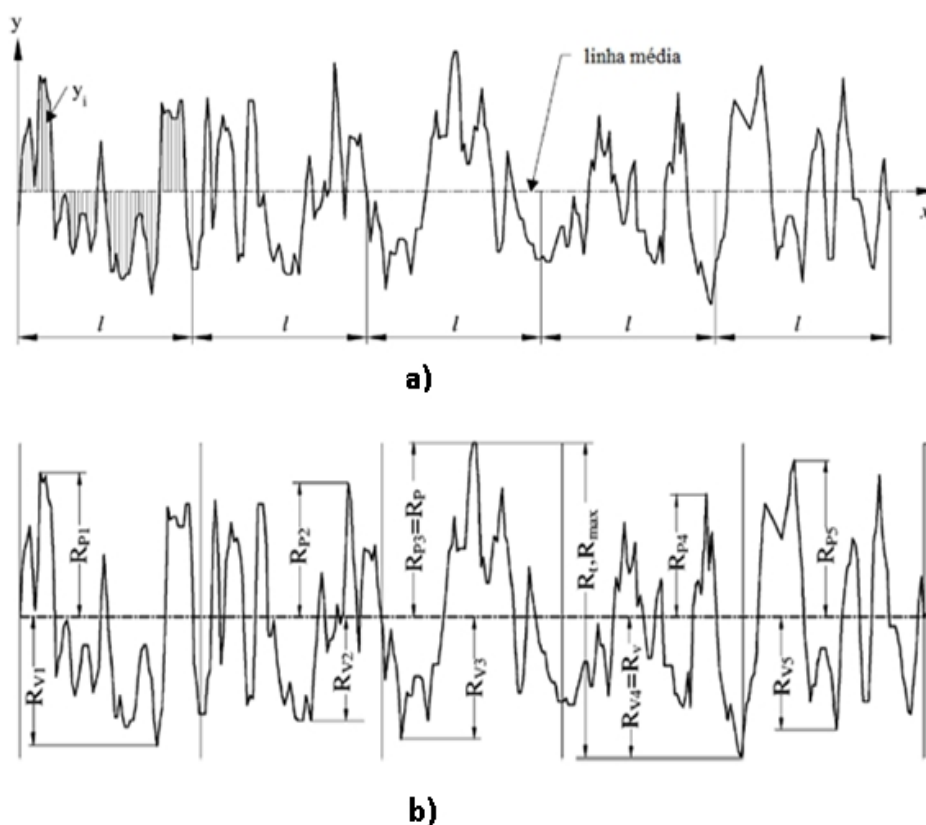
| Símbolo | Nome | Definição |
|---------|-------------------------|---|
| Ra | Desvio Aritmético Médio | Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. |
| Rq | Desvio Médio Quadrático | Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento da amostragem. |
| Rt | Altura Total do perfil | Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação. |
| Rz | Altura máxima do perfil | Soma da altura máxima dos picos e a maior profundidade dos vales no comprimento de amostragem. |

| | | |
|----------|--------------------------------|--|
| R_{sk} | Fator de assimetria do perfil | Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem. |
| R_{ku} | Fator de achatamento do perfil | Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e ao valor de Rq à quarta potência no comprimento da amostragem. |

Fonte: Machado *et al.* 2009, p. 281.

Um dos parâmetros mais utilizados na indústria é o parâmetro R_a e sua variação pode indicar que o processo sofreu alguma alteração. É um valor que permanece bastante estável já que se trata de uma média. O valor Rq serve para evidenciar defeitos superficiais em superfícies bem-acabadas e representa o desvio padrão da distribuição das alturas (MACHADO *et al.*, 2009). A definição dos parâmetros R_a , R_v , R_p e R_t , pode ser realizada de forma gráfica, como ilustrada na Figura 15.

Figura 15 - Definição dos parâmetros a) R_a , b) R_p , R_v e $R_{máx}$.



Fonte: Gadelmawla *et al.*, 2002

A escolha dos parâmetros que melhor caracteriza a superfície desejada é em função das propriedades requeridas desta superfície durante o trabalho. Os processos de usinagem geram valores de rugosidades específicos, e quando o projeto requer que um parâmetro de rugosidade seja alcançado, este já indica quais processos a peça deve ser submetida. A Tabela 1 indica a rugosidade média esperada para alguns processos de usinagem.

Tabela 1 - Rugosidade média esperada em processos de usinagem.

| Processo de usinagem | Acabamento Típico | Rugosidade (um) |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------|
| Furação | Médio | 1,5 - 6 |
| Fresamento | Bom | 1 - 6 |
| Alargamento | Bom | 1 - 3 |
| Torneamento | Médio | 0,5 - 6 |
| Retificação | Muito bom | 0,1 - 2 |
| Eletroquímico | Bom | 0,2 - 2 |
| Descarga elétrica | Médio | 1,5 - 15 |

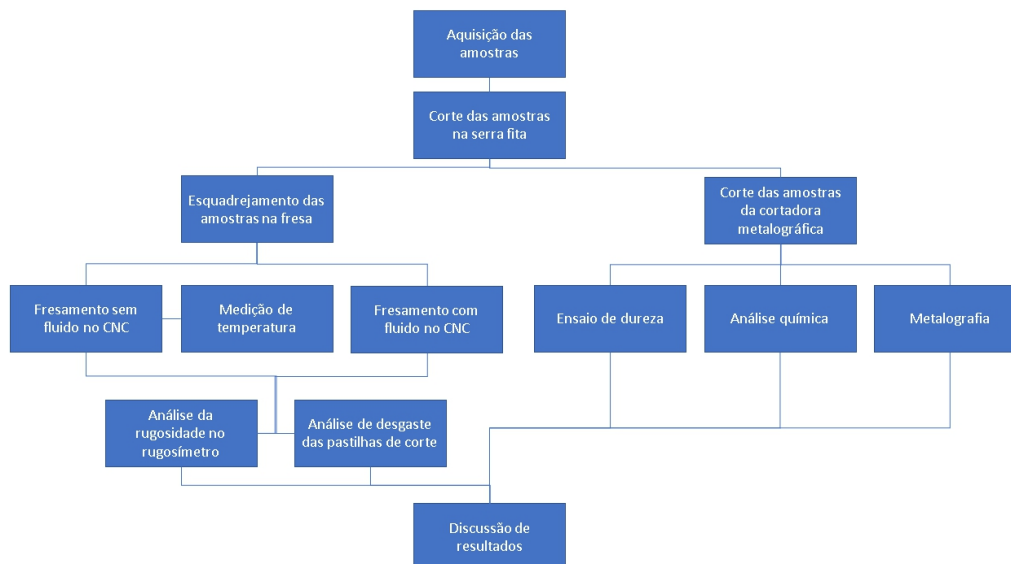
Fonte: Adaptado de Groover, 2014.

Como é possível observar na tabela um mesmo processo de usinagem pode gerar rugosidade diferente, e ao mesmo tempo, processos diferentes de usinagem podem gerar o mesmo intervalo de rugosidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais que foram adotados para alcançar os objetivos específicos propostos neste trabalho, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Organograma das atividades propostas no trabalho.



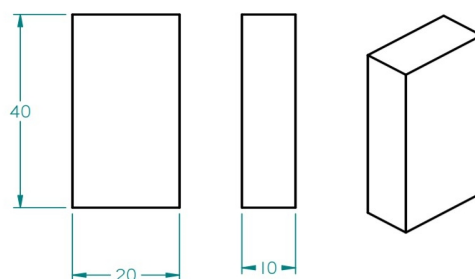
Fonte: Autoria Própria (2019)

O trabalho iniciou com a preparação de corpos de prova, análise do material, posteriormente no fresamento da superfície e por fim análise da usinagem.

4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O material utilizado para o experimento foi adquirido na distribuidora de aço, Ferro Extra Comércio de Ferro e Aço, na cidade Ponta Grossa, no estado do Paraná. As chapas do aço Strenx® 700 foram fornecidas nas dimensões 40 x 2 x 1 polegadas, ilustrado na Figura 17. Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada a serra fita, da marca SRamos 260, do Laboratório de Usinagem.

Após o corte na serra fita foi realizado o esquadrejamento das amostras para que todas tivessem a mesma medida, utilizando fresadora convencional da marca Diplomat, também do laboratório de Usinagem.

Figura 17 - Corpo de prova para ensaio.

Fonte: Autoria própria (2019).

A composição química do aço e suas propriedades mecânicas são mostradas na Tabela 2 de acordo com informações do fabricante.

Tabela 2 - Composição química e propriedades mecânicas do aço Strenx® 700.

| Composição Química (Max%) | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|-----|----------------------------|------|-----|-----|--------------------|-----|-------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Ni | Mo | B |
| 0,2 | 0,6 | 1,6 | 0,02 | 0,01 | 0,7 | 0,3 | 2 | 0,7 | 0,005 |
| Propriedades Mecânicas | | | | | | | | | |
| Modulo de Young (MPa) | | | Resistência a tração (MPa) | | | | Alongamento (min%) | | |
| 700 | | | 780-930 | | | | 14 | | |

Fonte: SSAB (2020).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

A caracterização do aço consistiu nos testes de dureza, metalografia e composição química. Para o ensaio de dureza foi utilizado o durômetro de bancada da Digimess do Laboratório de Ensaio Mecânicos. Dez medições foram realizadas utilizando uma pré-carga de 100 kgf, ponta de diamante e leitura na escala D.

A preparação da amostra para revelar a microestrutura do aço consistiu em lixar, polir e atacar, utilizando os equipamentos do Laboratório de Materiais. Primeiro uma pequena parte do material foi embutida à quente, numa temperatura de 175°C e em uma pressão de 100 kgf/cm², utilizando baquelite preta. Depois a amostra passou pelo processo de lixamento, empregando sequencialmente as lixas 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. A amostra foi lavada em banho ultrassônico e em seguida realizou-se o ataque com Nital 3%, deixando a amostra imersa no ácido por 30 segundos. Após o ataque a superfície foi lavada em água corrente, limpa com

álcool isopropílico e seca com ar quente. Por fim foi feito a análise do material em um microscópio, da marca Olympus BX Series.

A composição química do aço foi obtida por um espectrômetro de emissão ótica da SHIMADZU, modelo PDA-7000.

4.3 PROCESSO DE FRESAMENTO E SUAS ANÁLISES

O processo de usinagem do material foi realizado no Laboratório de Usinagem utilizando o centro de usinagem ROMI D600 mostrado na Figura 18 e a programação das operações foi feita com o software Fusion 360 da Autodesk (Anexo A).

Figura 18 - Centro de usinagem Romi D600.



Fonte: Autoria própria (2019)

As pastilhas utilizadas foram do fabricante de ferramentas Lamina Technologies, e o código da pastilha é TPKN 1603PDSR 8230. A pastilha possui uma fina cobertura nano estruturada com alto conteúdo de Al, aplicada pelo método de deposição física a vapor (PVD). Segundo o fabricante, os dados de corte recomendados podem ser: avanço por dente mínimo de 0,20 mm/rot e máximo 0,25 mm/rot, profundidade de corte mínima de 1,0 mm e máxima 16,0 mm e velocidade de corte de 280 m/min. Ainda segundo o fabricante, a pastilha pode usinar aço, aço inoxidável, ferro fundido, metais não ferrosos, aços a base de ferro, cobre e níquel e aços de alta resistência e baixa liga (Lamina, 2021). O cone utilizado foi o ISO 40, acoplado a uma fresa de passo largo com três pastilhas.

Os parâmetros de corte utilizados para o experimento foram profundidade de corte de (a_p) de 0,5 mm, penetração de trabalho (a_e) de 25 mm, rotação (n) de 1494 rpm e velocidade de avanço (v_f) 464 mm/min. Para cada condição de ensaio foi realizada tréplica, totalizando 6 ensaios e o tempo de corte da operação de fresamento em cada corpo de prova foi de 5,43 minutos. Vale lembrar que, para cada ensaio uma aresta nova foi utilizada.

O fluido lubrificante sintético utilizado foi o CORT-SOL da empresa BRASMINER. Para utilizar a técnica MQL foi utilizado o dispositivo construído no Laboratório de Usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, conforme mostrado na Figura 19. A vazão média do fluido e as condições da técnica foi baseada no trabalho de Toledo (2019).

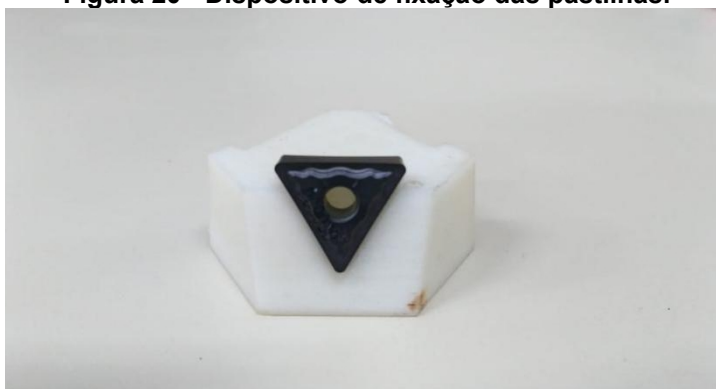
Figura 19 - Sistema para aplicação no método MQL, tanque de armazenamento (a) e saída do fluido (b).



Fonte: Autoria própria (2019)

O monitoramento de desgaste da pastilha foi realizado no microscópio óptico. O desgaste da ferramenta foi medido em todos os insertos (para cada ensaio a aresta de corte era trocada) e para cada corpo de prova usinado. Para a análise os insertos, estes foram lavados em uma lavadora ultrassônica da marca SANDERS MEDICAL, modelo SoniClean 2 com a programação do aparelho feita em 15 minutos de lavagem. Após a limpeza os insertos foram enxaguados em água corrente e secados. Para que as três superfícies fossem analisadas foi utilizado um suporte fabricado por manufatura aditiva para alojar os insertos durante a medição dos desgastes. A Figura 20 mostra o dispositivo de fixação da pastilha para a medição do desgaste.

Figura 20 - Dispositivo de fixação das pastilhas.



Fonte: Autoria própria (2019)

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da Mitutoyo, modelo SurfTest SJ-400. Os parâmetros de rugosidade foram obtidos em três regiões das amostras utilizando comprimento de amostragem de 0,8 mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

O resultado da composição química do aço obtido através espectrômetro de emissão ótica é mostrado na Tabela 3. O material apresenta o teor de carbono e manganês típico para os materiais considerados de baixa liga e alta resistência que seria de 0,03 a 0,28% de carbono e 0,6 a 1,7% de manganês. Todos os elementos de liga respeitaram as quantidades estabelecidas pelo fabricante, conforme mostra a Tabela 1.

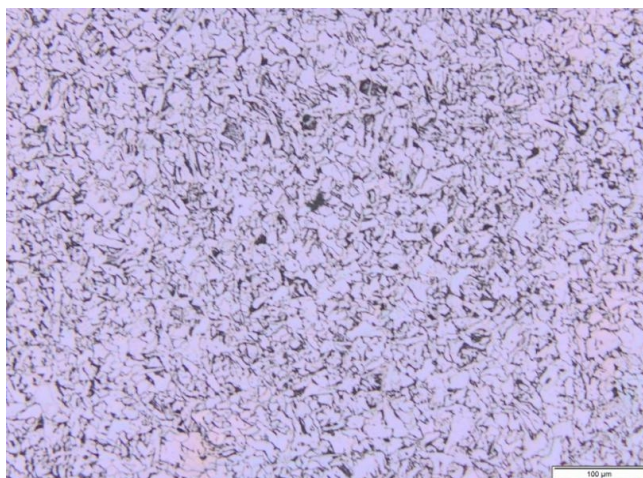
Tabela 3 - Composição química da amostra de aço Strenx 700.

| Composição Química (Max%) | | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|---------|---------|-------|-------|---------|-------|---------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Ni | Mo | B |
| 0,13 | 0,31 | 1,13 | 0,00646 | 0,00272 | 0,239 | 0,095 | 0,09261 | 0,111 | 0,00114 |

Fonte: Autoria própria (2019)

A dureza média do material na escala D de dureza Rockwell foi de $39,70 \pm 1,56$ HRD ou aproximadamente 236 HBW. De acordo com o fabricante a dureza esperada para o material é de aproximadamente 260 HBW ou 44,6 HRD, sendo 10,16% maior que o obtido para o aço do estudo. A micrografia do material Strenx[®] 700 é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Micrografia do aço Strenx 700.



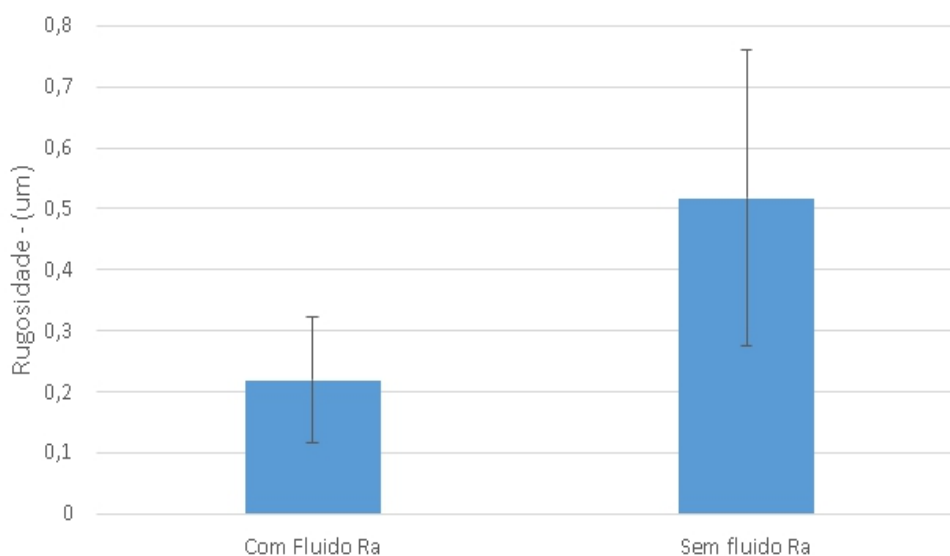
Fonte: Autoria própria (2020)

Na figura é possível observar que a maior parte é formada pela ferrita com a dispersão de perlita pela estrutura e com um maior refinamento do grão. Essas características são uma das responsáveis pela grande resistência destes materiais.

5.2 RUGOSIDADE

Através do rugosímetro foi possível mensurar a rugosidade na superfície das amostras quando estas foram fresadas com e sem fluido de corte. Quando se utilizou o método MQL a rugosidade média (Ra) foi de 0,2 μm e no fresamento sem fluido de corte o resultado foi de 0,5 μm , um aumento de 150%, como mostrado na Figura 22.

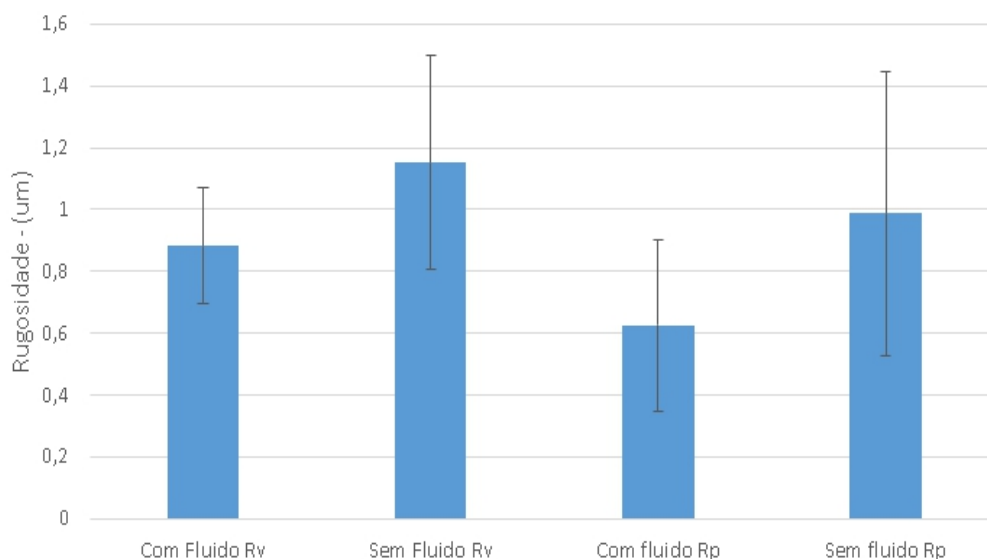
Figura 22 - Rugosidade média (Ra) das superfícies usinadas com fluido e sem fluido de corte.



Fonte: Autoria própria (2020)

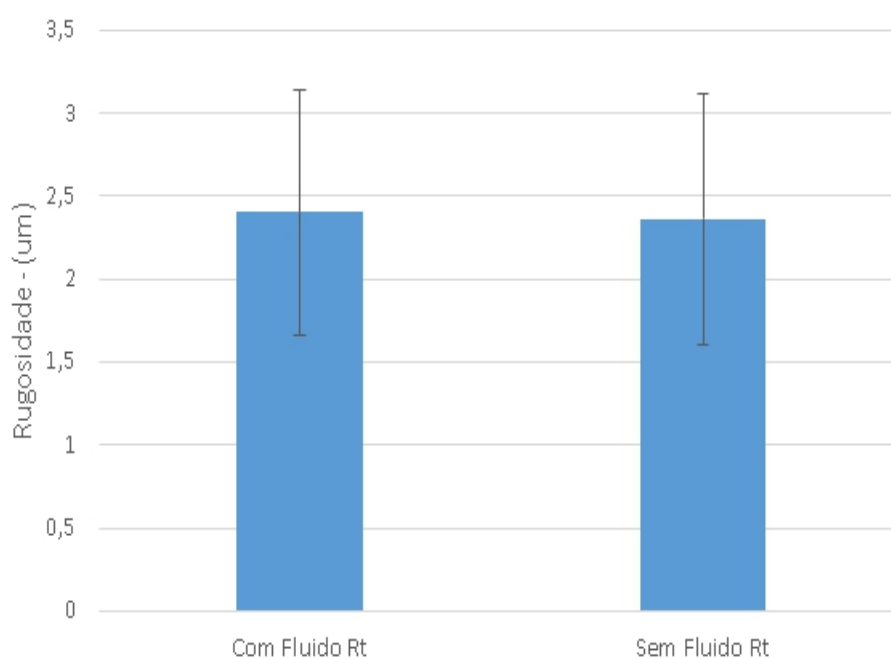
Se for analisada a literatura, ambas as condições atingiram valores abaixo da faixa esperada do parâmetro de rugosidade (Ra) para o processo de fresamento. A faixa esperada de Ra é entre 1 a 6 μm (GROOVER, 2014, p. 91).

No parâmetro Rp, que representa a altura máxima do pico acima da linha média e Rv, que representa a maior profundidade de vale, os valores de rugosidade para as amostras fresadas sem fluido permaneceram maiores em relação a amostra com fluido, sendo 57,6% maior no parâmetro Rp e 30,4% maior para Rv como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Gráficos rugosidade Rv e Rp.

Fonte: Autoria própria (2020)

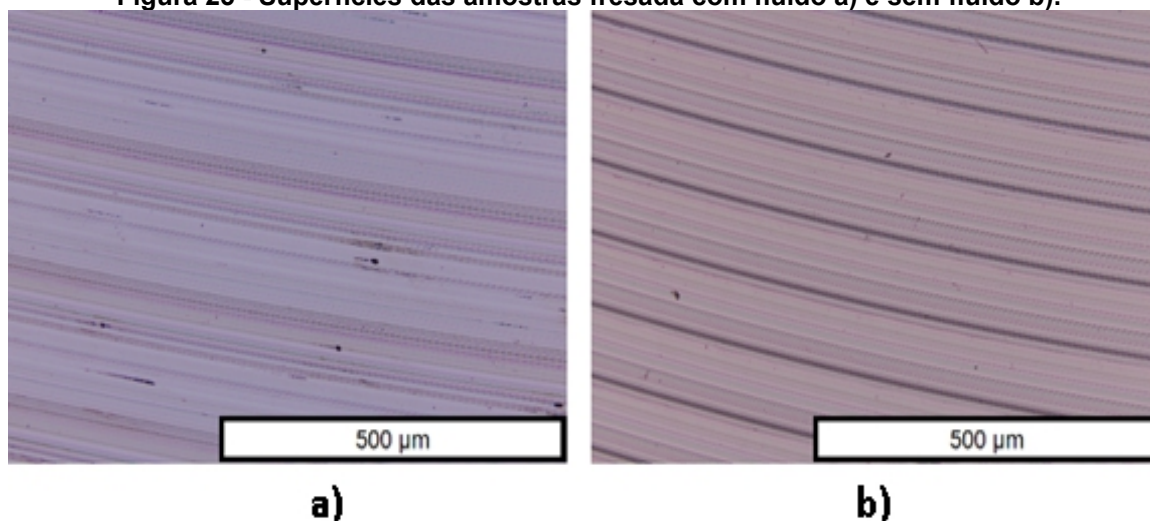
No parâmetro Rt, que representa a soma da altura máxima de pico com a profundidade máxima de vale, as amostras não obtiveram grande variação, sendo que a amostra com fluido foi de $(2,401 \pm 0,73) \mu\text{m}$ e sem fluido $(2,362 \pm 0,75) \mu\text{m}$ como pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Gráfico de Rugosidade Rt.

Fonte: Autoria própria (2020)

Na imagem abaixo, obtida através do microscópio com escala de ampliação de 500 μm , é possível notar semelhança entre as superfícies das amostras, que obtiveram valores semelhantes de rugosidade como pode ser visto na Figura 25.

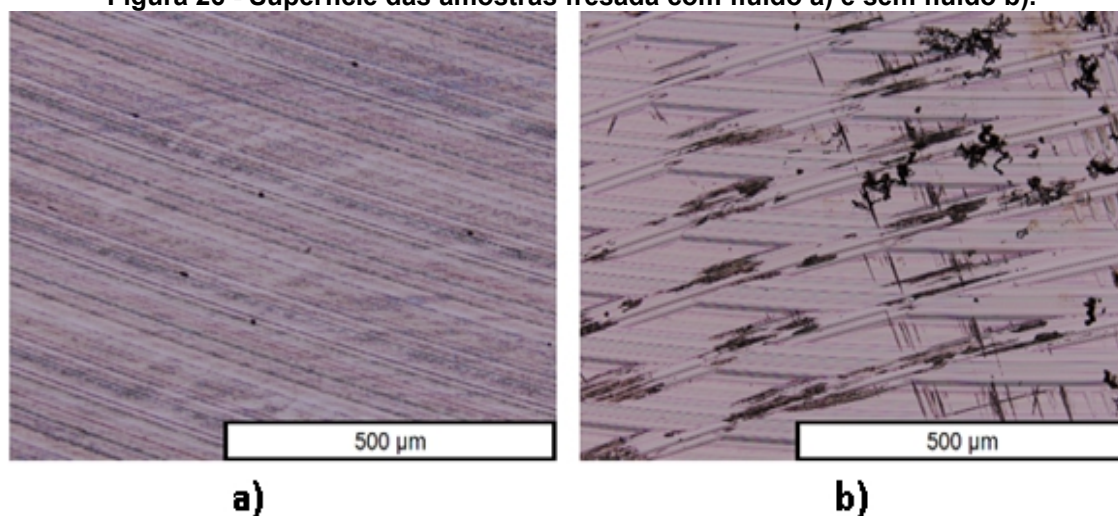
Figura 25 - Superfícies das amostras fresada com fluido a) e sem fluido b).



Fonte: Autoria própria (2020)

No caso quando houve uma grande diferença na rugosidade é possível perceber diferença entre as superfícies fresadas como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Superfície das amostras fresada com fluido a) e sem fluido b).

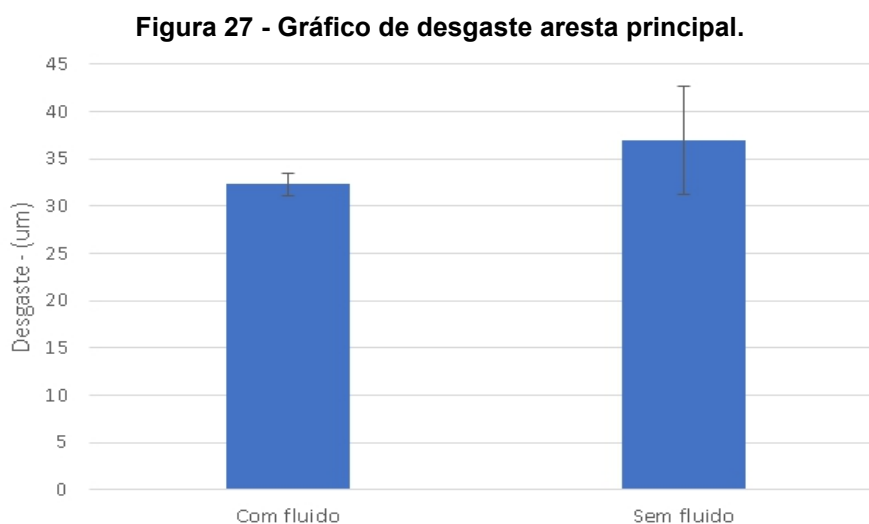


Fonte: Autoria própria (2020).

Essa diferença pode ser explicada pela saída do cavaco. A pressão utilizada no MQL para jogar o fluido na peça ajuda a remover o cavaco, evitando que este possa de alguma forma interferir no acabamento superficial da peça promovendo assim um melhor acabamento superficial para as amostras que foram utilizadas fluido de corte.

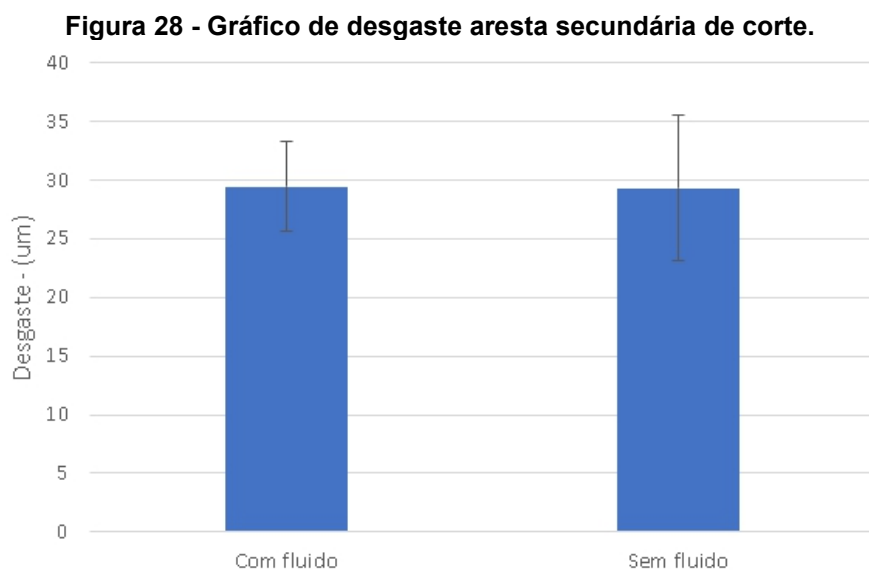
5.3 DESGASTE DA FERRAMENTA

Com auxílio do microscópio óptico foi possível mensurar o desgaste nas arestas principais e secundárias de corte. O desgaste na aresta principal de corte foi menor quando se utilizou fluido de corte assim como também os desvios dos valores foram menores, se comparado com o processo sem fluido como pode ser observado na Figura 27.



Fonte: Autoria própria (2019)

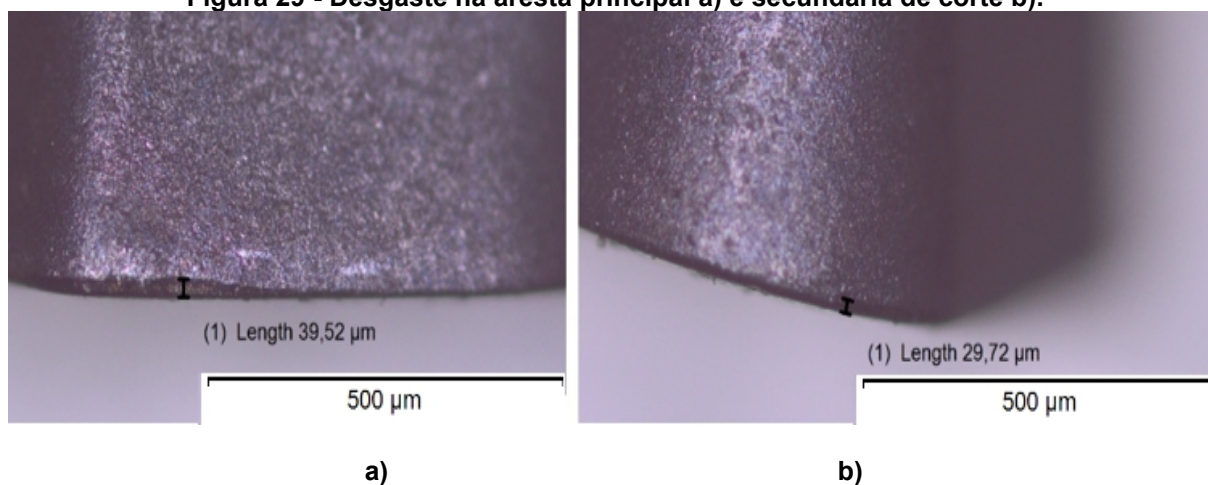
Já na aresta secundária de corte ambas obtiveram valores semelhantes de desgaste, mas com fluido houve uma menor dispersão nos valores como mostrado na Figura 28.



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 29 é possível observar os desgastes nas arestas principal e secundária de corte, em uma das arestas.

Figura 29 - Desgaste na aresta principal a) e secundária de corte b).



Fonte: Autoria própria (2020)

Com o dispositivo utilizado para fixar a pastilha, os desgastes na região de folga e saída da ferramenta foram possíveis de serem medidos. Porém, somente na região de folga que houve desgastes significativos, que como foi observado, não ultrapassaram 45 μm.

6 CONCLUSÃO

Os objetivos gerais e específicos do trabalho foram alcançados e permitiram avaliar a técnica de mínima quantidade de fluido no fresamento de um aço de alta resistência e baixa liga. Portanto, foi possível concluir que, nas condições de ensaio deste trabalho:

- a rugosidade média para a condição de ensaio com mínima quantidade de fluido de corte, foi a menor (em média $0,2 \mu\text{m}$ e sem fluido em média $0,5 \mu\text{m}$);
- os parâmetros de rugosidade R_p e R_v medidos na superfície com fluido de corte também obteve valor menor (em média, $R_p = 0,6 \mu\text{m}$ e $R_v = 0,8 \mu\text{m}$) se comparada com a condição sem fluido de corte (em média, $R_p = 1,0 \mu\text{m}$ e $R_v = 1,2 \mu\text{m}$);
- a rugosidade total para as duas condições foi em média de $2,5 \mu\text{m}$;
- o desgaste para as duas condições foi próximo, de $32 \mu\text{m}$ para a condição com fluido e de $36 \mu\text{m}$ para sem fluido;
- com a técnica de mínima quantidade de fluido foi possível diminuir a rugosidade da superfície;
- o aço de alta resistência e baixa liga utilizado é possível de ser usinado com pastilhas comerciais e a rugosidade média atingida está de acordo com a literatura.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a contribuir com novas pesquisas, e dar continuidade a esse trabalho, duas sugestões para trabalho futuro ficam em aberto:

- medição de temperatura utilizando dois sistemas de medição (câmara termográfica e termopar). O último sistema de medição poderia ser inserido na peça e trabalhar com operação de desbaste e acabamento;
- medir a usinabilidade do aço, quanto à vida da ferramenta, e comparar com um aço comum.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. **Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta**. Grupo de integração da Manufatura. 2007. Disponível em: <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/toc.html> Acesso em: 5 de janeiro de 2021.

FAR, A.R. HOSSEINI; ANIJAN, S.H. MOUSAVI; ABBASI, S.M. The effect of increasing Cu and Ni on a significant enhancement of mechanical properties of high strength low alloy, low carbon steels of HSLA-100 type, **Materials Science and Engineering: A**, Volume 746, 2019, Pages 384-393, ISSN 0921-5093, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.025>. Acesso em: 25 de janeiro de 2019.

ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Iron, Steels and High Performed Alloys**. Vol. 1, 1993.

ASM INTERNATIONAL. **Alloying: Understanding the Basics - HSLA (High Strength Low Alloy)**. EUA, pp. 193-200, 2001.

BORELLI, J.E.; BRANGHINI JR., A.; COELHO, R.T.; GONZAGA, A. Diagnóstico do Estado da Ferramenta nos Processos de Usinagem de Alto Desempenho com o Uso de Lógica Fuzzy e Imagens de Infravermelho. Congresso de Usinagem 2000. **Revista Máquinas e Metais**, Editora Aranda, Teatro de convenções do Anhembi. São Paulo, SP.

BRANCO, R.; BERTO, F. Mechanical Behavior of High-Strength, Low-Alloy Steels. **Metals**, v. 8, n. 8, p. 610, 2018. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/met8080610>. Acesso em: 12 de abril de 2021.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de metais, 1986.

CIMM. **Fresas: para realizar rebaixos em superfícies**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/5234-fresas-para-realizar-rebaixos-em-superficies#.XN6DI4DPxuQ>. Acesso em: 17 de maio de 2019.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools. **Metals Technology**. Vol. 9, February, pp. 60-75. 1983.

DEVILLEZ, A.; LESKO, S.; MOZER, W. Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry. **Wear**. 256 (1-2), 56–65. 2004. Disponível em: <[doi:10.1016/s0043-1648\(03\)00384-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(03)00384-3)>. Acesso em: 3 de junho de 2019.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Art Liber, 270 p., 2014.

DWIVEDI, D. K. Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloys: Overview. **Materials & Design**. (1980-2015), 31(5), 2517–2531. 2010. Disponível em: <[doi:10.1016/j.matdes.2009.11.038](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.038)>. Acesso em: 15 de junho de 2019.

GADELMAWLA, E.S., KOURA, M.M., MAKSOUD, T.M.A., ELEWA, I.M., SOLIMAN, H.H. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 123, Pages 133-145. 2002, ISSN 0924-0136. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)>. Acesso em: 4 de abril de 2019.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 12^a ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 751p.

FURNESS, R.; STOLL, A.; NORDSTROM, G.; MARTINI, G.; JOHNSON, J.; LOCH, T.; KLOSINSKI, R. Minimum Quantity Lubrication (MQL) Machining for Complex Powertrain Components. **ASME Conference Proceedings**. USA. pp. 965–973, 2006.

GOINDI, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, 165, 1557–1571. 2017. Disponível em: <[doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.235](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.235)>. Acesso em: 8 de agosto de 2019.

GONÇALVES, B. B.; YAGINUMA, G. F.; YAMAMOTO, M. K. **Óleos de usinagem: tipos, classificação e desempenho**. Universidade Estadual Paulista, 2010, 13p. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_18.pdf> Acesso em: 10 de maio de 2019.

GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D.; REIS, J. S. S. Um Panorama do Desenvolvimento Recente de Chapas Grossas e suas Aplicações. **Corte e Conformação de Metais**, 2:19, pp.78-93, 2006.

GROOVER, M.P. **Fundamentos da manufatura moderna**. 5. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 3685: Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**. 1997.

KHRUSCHOV, M. M. Principles of abrasive wear. **Wear**, 28(1), 69–88, 1974. Disponível em: <doi:10.1016/0043-1648(74)90102-1> Acesso em: 15 de julho de 2019.

LAMINA. **Lamina Technologies: Milling Inserts Shoulder**. Disponível em: <<https://online.lamina-tech.ch/catalog?id=Milling-Inserts-Shoulder>>. Acessado em: 10 de maio de 2021.

LIEW, P. J.; SHAARONI, A.; SIDIKI, N. A. C.; YAN, J. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 114, 380–394. 2017. Disponível em: <doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077>. Acesso em: 23 de outubro de 2019.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M.B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2.ed. São Paulo: Ediotra Blucher, 2011.

MACHADO, A. R; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 8. Abril de 2004. 262 p.

MACHADO, A.R. **Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System**, PhD Thesis, University of Warwick, England, 1990.

NOUARI, M. **Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage grande vitesse**. Thèse de doctorat de l'Université de Metz, 2000.

NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MNSIVS5**. 2011. 143 páginas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PICKERING, G. B. **Physical metallurgy and design of steels**. Applied Science Publisher Ltd, London, 1978,

SAE. **Surface vehicle recommended practice**. Warrendale: SAE J2340, out.1999.

SANDVIK CORMANT. **Manual técnico**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>>. Acesso em: 05 mai. 2019.

SANTOS, S. C.; SALES W. F.; **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos materiais**, 1ª ed. São Paulo; Editora Arliber Ltda, 2007.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem – Parte 1**, GPFAI-DEMEC-UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 89p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte 1**. 3. ed., Florianópolis: Ed. UFSC, 1993.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, p. 141-216, 1995.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 7. ed., Florianópolis: Ed.UFSC, 2007

STRENX. **HIGH-PERFORMANCE STRUCTURAL STEEL**. Disponível em: <<https://www.ssab.com/products/brands/strenx>>. Acesso em: 8 de junho de 2019.

SUDA, S.; YOKOTA, H.; INASAKI, I.; WAKABAYASHI, T. A Synthetic Ester as an Optimal Cutting Fluid for Minimal Quantity Lubrication Machining. **CIRP Annals**, 51(1), 95–98. 2002. Disponível em: <doi:10.1016/s0007-8506(07)61474-7>. Acesso em: 11 de julho de 2019.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 2000. 4th Edition, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-7069-X, 446 p.

TOLEDO, S.M. **Análise da técnica de mínima quantidade de fluido no fresamento do aço 1020**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

UMBRELLO, D.; MICARI, F.; JAWAHIR, I.S. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining. **CIRP Annals**, 61(1), 103–106. 2012. Disponível em: <doi:10.1016/j.cirp.2012.03.052> Acesso em: 11 de setembro de 2019.

VERVYNCKT, S.; VERBEKEN, K.; LOPEZ, B.; JONAS, J.J. Modern HSLA Steels and role of non-recrystallisation temperature. **International Material Reviews**. 57(4). p.187–207. 2012. Disponível em: < DOI:[10.1179/1743280411y.0000000013](https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000013)>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

WANG, Q.; ZHANG, S.; ZHANG, C.H.; WANG, J.Q.; SHAHZAD, M.B.; CHEN H.T.; CHEN, J., A high strength low alloy steel fabricated by direct laser deposition, **Vacuum**. 2019. Disponível em: <doi:<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.12.030>> Acesso em: 17 de novembro de 2019.

ANEXO A - PROGRAMA GERADO PELO SOFTWARE FUSION 360 NA LINGUAGEM FANUC.

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| % | N1195 G01 Y45. |
| O1001 (TCC YUJI) | N1200 Y0. F493. |
| (T1 D=49. CR=0. - ZMIN=-10.9 - FACE | N1205 G02 Y-4.9 Z-0.5 K4.9 F464. |
| MILL) | N1210 G00 Z5. |
| N10 G90 G94 G17 G49 G40 G80 | N1215 X74.949 Y76.85 |
| N15 G21 | N1220 G01 Z-1. F464. |
| N20 G28 G91 Z0. | N1225 G02 Y71.95 Z-5.9 J-4.9 |
| N25 G90 | N1230 G01 Y45. |
| | N1235 Y0. F493. |
| (FACEAMENTO) | N1240 G02 Y-4.9 Z-1. K4.9 F464. |
| N30 T1 | N1245 G00 Z5. |
| N33 M06 | N1250 X49.302 Y76.85 |
| N35 S1494 M03 | N1255 G01 Z-1. F464. |
| N40 G54 | N1260 G02 Y71.95 Z-5.9 J-4.9 |
| N45 M08 | N1265 G01 Y45. |
| N50 G00 X74.949 Y76.85 | N1270 Y0. F493. |
| N55 G43 Z15. H01 | N1275 G02 Y-4.9 Z-1. K4.9 F464. |
| N60 G00 Z5. | N1280 G00 Z5. |
| N65 G01 Z4.5 F464. | N1285 X23.655 Y76.85 |
| N70 G19 G02 Y71.95 Z-0.4 J-4.9 | N1290 G01 Z-1. F464. |
| N75 G01 Y45. | N1295 G02 Y71.95 Z-5.9 J-4.9 |
| N80 Y0. F493. | N1300 G01 Y45. |
| N85 G02 Y-4.9 Z4.5 K4.9 F464. | N1305 Y0. F493. |
| N90 G00 Z5. | N1310 G02 Y-4.9 Z-1. K4.9 F464. |
| N95 X49.302 Y76.85 | N1315 G00 Z5. |
| N100 G01 Z4.5 F464. | N1320 X74.949 Y76.85 |

N105 G02 Y71.95 Z-0.4 J-4.9
N110 G01 Y45.
N115 Y0. F493.
N120 G02 Y-4.9 Z4.5 K4.9 F464.
N125 G00 Z5.
N130 X23.655 Y76.85
N135 G01 Z4.5 F464.
N140 G02 Y71.95 Z-0.4 J-4.9
N145 G01 Y45.
N150 Y0. F493.
N155 G02 Y-4.9 Z4.5 K4.9 F464.
N160 G00 Z5.
N165 X74.949 Y76.85
N170 G01 Z4. F464.
N175 G02 Y71.95 Z-0.9 J-4.9
N180 G01 Y45.
N185 Y0. F493.
N190 G02 Y-4.9 Z4. K4.9 F464.
N195 G00 Z5.
N200 X49.302 Y76.85
N205 G01 Z4. F464.
N210 G02 Y71.95 Z-0.9 J-4.9
N215 G01 Y45.
N220 Y0. F493.
N225 G02 Y-4.9 Z4. K4.9 F464.
N230 G00 Z5.
N235 X23.655 Y76.85
N240 G01 Z4. F464.
N245 G02 Y71.95 Z-0.9 J-4.9
N1325 G01 Z-1.5 F464.
N1330 G02 Y71.95 Z-6.4 J-4.9
N1335 G01 Y45.
N1340 Y0. F493.
N1345 G02 Y-4.9 Z-1.5 K4.9 F464.
N1350 G00 Z5.
N1355 X49.302 Y76.85
N1360 G01 Z-1.5 F464.
N1365 G02 Y71.95 Z-6.4 J-4.9
N1370 G01 Y45.
N1375 Y0. F493.
N1380 G02 Y-4.9 Z-1.5 K4.9 F464.
N1385 G00 Z5.
N1390 X23.655 Y76.85
N1395 G01 Z-1.5 F464.
N1400 G02 Y71.95 Z-6.4 J-4.9
N1405 G01 Y45.
N1410 Y0. F493.
N1415 G02 Y-4.9 Z-1.5 K4.9 F464.
N1420 G00 Z5.
N1425 X74.949 Y76.85
N1430 G01 Z-2. F464.
N1435 G02 Y71.95 Z-6.9 J-4.9
N1440 G01 Y45.
N1445 Y0. F493.
N1450 G02 Y-4.9 Z-2. K4.9 F464.
N1455 G00 Z5.
N1460 X49.302 Y76.85
N1465 G01 Z-2. F464.

N250 G01 Y45.
N255 Y0. F493.
N260 G02 Y-4.9 Z4. K4.9 F464.
N265 G00 Z5.
N270 X74.949 Y76.85
N275 G01 Z3.5 F464.
N280 G02 Y71.95 Z-1.4 J-4.9
N285 G01 Y45.
N290 Y0. F493.
N295 G02 Y-4.9 Z3.5 K4.9 F464.
N300 G00 Z5.
N305 X49.302 Y76.85
N310 G01 Z3.5 F464.
N315 G02 Y71.95 Z-1.4 J-4.9
N320 G01 Y45.
N325 Y0. F493.
N330 G02 Y-4.9 Z3.5 K4.9 F464.
N335 G00 Z5.
N340 X23.655 Y76.85
N345 G01 Z3.5 F464.
N350 G02 Y71.95 Z-1.4 J-4.9
N355 G01 Y45.
N360 Y0. F493.
N365 G02 Y-4.9 Z3.5 K4.9 F464.
N370 G00 Z5.
N375 X74.949 Y76.85
N380 G01 Z3. F464.
N385 G02 Y71.95 Z-1.9 J-4.9
N390 G01 Y45.
N1470 G02 Y71.95 Z-6.9 J-4.9
N1475 G01 Y45.
N1480 Y0. F493.
N1485 G02 Y-4.9 Z-2. K4.9 F464.
N1490 G00 Z5.
N1495 X23.655 Y76.85
N1500 G01 Z-2. F464.
N1505 G02 Y71.95 Z-6.9 J-4.9
N1510 G01 Y45.
N1515 Y0. F493.
N1520 G02 Y-4.9 Z-2. K4.9 F464.
N1525 G00 Z5.
N1530 X74.949 Y76.85
N1535 G01 Z-2.5 F464.
N1540 G02 Y71.95 Z-7.4 J-4.9
N1545 G01 Y45.
N1550 Y0. F493.
N1555 G02 Y-4.9 Z-2.5 K4.9 F464.
N1560 G00 Z5.
N1565 X49.302 Y76.85
N1570 G01 Z-2.5 F464.
N1575 G02 Y71.95 Z-7.4 J-4.9
N1580 G01 Y45.
N1585 Y0. F493.
N1590 G02 Y-4.9 Z-2.5 K4.9 F464.
N1595 G00 Z5.
N1600 X23.655 Y76.85
N1605 G01 Z-2.5 F464.
N1610 G02 Y71.95 Z-7.4 J-4.9

N395 Y0. F493.
N400 G02 Y-4.9 Z3. K4.9 F464.
N405 G00 Z5.
N410 X49.302 Y76.85
N415 G01 Z3. F464.
N420 G02 Y71.95 Z-1.9 J-4.9
N425 G01 Y45.
N430 Y0. F493.
N435 G02 Y-4.9 Z3. K4.9 F464.
N440 G00 Z5.
N445 X23.655 Y76.85
N450 G01 Z3. F464.
N455 G02 Y71.95 Z-1.9 J-4.9
N460 G01 Y45.
N465 Y0. F493.
N470 G02 Y-4.9 Z3. K4.9 F464.
N475 G00 Z5.
N480 X74.949 Y76.85
N485 G01 Z2.5 F464.
N490 G02 Y71.95 Z-2.4 J-4.9
N495 G01 Y45.
N500 Y0. F493.
N505 G02 Y-4.9 Z2.5 K4.9 F464.
N510 G00 Z5.
N515 X49.302 Y76.85
N520 G01 Z2.5 F464.
N525 G02 Y71.95 Z-2.4 J-4.9
N530 G01 Y45.
N535 Y0. F493.
N1615 G01 Y45.
N1620 Y0. F493.
N1625 G02 Y-4.9 Z-2.5 K4.9 F464.
N1630 G00 Z5.
N1635 X74.949 Y76.85
N1640 G01 Z-3. F464.
N1645 G02 Y71.95 Z-7.9 J-4.9
N1650 G01 Y45.
N1655 Y0. F493.
N1660 G02 Y-4.9 Z-3. K4.9 F464.
N1665 G00 Z5.
N1670 X49.302 Y76.85
N1675 G01 Z-3. F464.
N1680 G02 Y71.95 Z-7.9 J-4.9
N1685 G01 Y45.
N1690 Y0. F493.
N1695 G02 Y-4.9 Z-3. K4.9 F464.
N1700 G00 Z5.
N1705 X23.655 Y76.85
N1710 G01 Z-3. F464.
N1715 G02 Y71.95 Z-7.9 J-4.9
N1720 G01 Y45.
N1725 Y0. F493.
N1730 G02 Y-4.9 Z-3. K4.9 F464.
N1735 G00 Z5.
N1740 X74.949 Y76.85
N1745 G01 Z-3.5 F464.
N1750 G02 Y71.95 Z-8.4 J-4.9
N1755 G01 Y45.

N540 G02 Y-4.9 Z2.5 K4.9 F464.
N545 G00 Z5.
N550 X23.655 Y76.85
N555 G01 Z2.5 F464.
N560 G02 Y71.95 Z-2.4 J-4.9
N565 G01 Y45.
N570 Y0. F493.
N575 G02 Y-4.9 Z2.5 K4.9 F464.
N580 G00 Z5.
N585 X74.949 Y76.85
N590 G01 Z2. F464.
N595 G02 Y71.95 Z-2.9 J-4.9
N600 G01 Y45.
N605 Y0. F493.
N610 G02 Y-4.9 Z2. K4.9 F464.
N615 G00 Z5.
N620 X49.302 Y76.85
N625 G01 Z2. F464.
N630 G02 Y71.95 Z-2.9 J-4.9
N635 G01 Y45.
N640 Y0. F493.
N645 G02 Y-4.9 Z2. K4.9 F464.
N650 G00 Z5.
N655 X23.655 Y76.85
N660 G01 Z2. F464.
N665 G02 Y71.95 Z-2.9 J-4.9
N670 G01 Y45.
N675 Y0. F493.
N680 G02 Y-4.9 Z2. K4.9 F464.
N1760 Y0. F493.
N1765 G02 Y-4.9 Z-3.5 K4.9 F464.
N1770 G00 Z5.
N1775 X49.302 Y76.85
N1780 G01 Z-3.5 F464.
N1785 G02 Y71.95 Z-8.4 J-4.9
N1790 G01 Y45.
N1795 Y0. F493.
N1800 G02 Y-4.9 Z-3.5 K4.9 F464.
N1805 G00 Z5.
N1810 X23.655 Y76.85
N1815 G01 Z-3.5 F464.
N1820 G02 Y71.95 Z-8.4 J-4.9
N1825 G01 Y45.
N1830 Y0. F493.
N1835 G02 Y-4.9 Z-3.5 K4.9 F464.
N1840 G00 Z5.
N1845 X74.949 Y76.85
N1850 G01 Z-4. F464.
N1855 G02 Y71.95 Z-8.9 J-4.9
N1860 G01 Y45.
N1865 Y0. F493.
N1870 G02 Y-4.9 Z-4. K4.9 F464.
N1875 G00 Z5.
N1880 X49.302 Y76.85
N1885 G01 Z-4. F464.
N1890 G02 Y71.95 Z-8.9 J-4.9
N1895 G01 Y45.
N1900 Y0. F493.

N685 G00 Z5.
N690 X74.949 Y76.85
N695 G01 Z1.5 F464.
N700 G02 Y71.95 Z-3.4 J-4.9
N705 G01 Y45.
N710 Y0. F493.
N715 G02 Y-4.9 Z1.5 K4.9 F464.
N720 G00 Z5.
N725 X49.302 Y76.85
N730 G01 Z1.5 F464.
N735 G02 Y71.95 Z-3.4 J-4.9
N740 G01 Y45.
N745 Y0. F493.
N750 G02 Y-4.9 Z1.5 K4.9 F464.
N755 G00 Z5.
N760 X23.655 Y76.85
N765 G01 Z1.5 F464.
N770 G02 Y71.95 Z-3.4 J-4.9
N775 G01 Y45.
N780 Y0. F493.
N785 G02 Y-4.9 Z1.5 K4.9 F464.
N790 G00 Z5.
N795 X74.949 Y76.85
N800 G01 Z1. F464.
N805 G02 Y71.95 Z-3.9 J-4.9
N810 G01 Y45.
N815 Y0. F493.
N820 G02 Y-4.9 Z1. K4.9 F464.
N825 G00 Z5.
N1905 G02 Y-4.9 Z-4. K4.9 F464.
N1910 G00 Z5.
N1915 X23.655 Y76.85
N1920 G01 Z-4. F464.
N1925 G02 Y71.95 Z-8.9 J-4.9
N1930 G01 Y45.
N1935 Y0. F493.
N1940 G02 Y-4.9 Z-4. K4.9 F464.
N1945 G00 Z5.
N1950 X74.949 Y76.85
N1955 G01 Z-4.5 F464.
N1960 G02 Y71.95 Z-9.4 J-4.9
N1965 G01 Y45.
N1970 Y0. F493.
N1975 G02 Y-4.9 Z-4.5 K4.9 F464.
N1980 G00 Z5.
N1985 X49.302 Y76.85
N1990 G01 Z-4.5 F464.
N1995 G02 Y71.95 Z-9.4 J-4.9
N2000 G01 Y45.
N2005 Y0. F493.
N2010 G02 Y-4.9 Z-4.5 K4.9 F464.
N2015 G00 Z5.
N2020 X23.655 Y76.85
N2025 G01 Z-4.5 F464.
N2030 G02 Y71.95 Z-9.4 J-4.9
N2035 G01 Y45.
N2040 Y0. F493.
N2045 G02 Y-4.9 Z-4.5 K4.9 F464.

N830 X49.302 Y76.85
N835 G01 Z1. F464.
N840 G02 Y71.95 Z-3.9 J-4.9
N845 G01 Y45.
N850 Y0. F493.
N855 G02 Y-4.9 Z1. K4.9 F464.
N860 G00 Z5.
N865 X23.655 Y76.85
N870 G01 Z1. F464.
N875 G02 Y71.95 Z-3.9 J-4.9
N880 G01 Y45.
N885 Y0. F493.
N890 G02 Y-4.9 Z1. K4.9 F464.
N895 G00 Z5.
N900 X74.949 Y76.85
N905 G01 Z0.5 F464.
N910 G02 Y71.95 Z-4.4 J-4.9
N915 G01 Y45.
N920 Y0. F493.
N925 G02 Y-4.9 Z0.5 K4.9 F464.
N930 G00 Z5.
N935 X49.302 Y76.85
N940 G01 Z0.5 F464.
N945 G02 Y71.95 Z-4.4 J-4.9
N950 G01 Y45.
N955 Y0. F493.
N960 G02 Y-4.9 Z0.5 K4.9 F464.
N965 G00 Z5.
N970 X23.655 Y76.85
N2050 G00 Z5.
N2055 X74.949 Y76.85
N2060 G01 Z-5. F464.
N2065 G02 Y71.95 Z-9.9 J-4.9
N2070 G01 Y45.
N2075 Y0. F493.
N2080 G02 Y-4.9 Z-5. K4.9 F464.
N2085 G00 Z5.
N2090 X49.302 Y76.85
N2095 G01 Z-5. F464.
N2100 G02 Y71.95 Z-9.9 J-4.9
N2105 G01 Y45.
N2110 Y0. F493.
N2115 G02 Y-4.9 Z-5. K4.9 F464.
N2120 G00 Z5.
N2125 X23.655 Y76.85
N2130 G01 Z-5. F464.
N2135 G02 Y71.95 Z-9.9 J-4.9
N2140 G01 Y45.
N2145 Y0. F493.
N2150 G02 Y-4.9 Z-5. K4.9 F464.
N2155 G00 Z5.
N2160 X74.949 Y76.85
N2165 G01 Z-5.5 F464.
N2170 G02 Y71.95 Z-10.4 J-4.9
N2175 G01 Y45.
N2180 Y0. F493.
N2185 G02 Y-4.9 Z-5.5 K4.9 F464.
N2190 G00 Z5.

N975 G01 Z0.5 F464.
N980 G02 Y71.95 Z-4.4 J-4.9
N985 G01 Y45.
N990 Y0. F493.
N995 G02 Y-4.9 Z0.5 K4.9 F464.
N1000 G00 Z5.
N1005 X74.949 Y76.85
N1010 G01 Z0. F464.
N1015 G02 Y71.95 Z-4.9 J-4.9
N1020 G01 Y45.
N1025 Y0. F493.
N1030 G02 Y-4.9 Z0. K4.9 F464.
N1035 G00 Z5.
N1040 X49.302 Y76.85
N1045 G01 Z0. F464.
N1050 G02 Y71.95 Z-4.9 J-4.9
N1055 G01 Y45.
N1060 Y0. F493.
N1065 G02 Y-4.9 Z0. K4.9 F464.
N1070 G00 Z5.
N1075 X23.655 Y76.85
N1080 G01 Z0. F464.
N1085 G02 Y71.95 Z-4.9 J-4.9
N1090 G01 Y45.
N1095 Y0. F493.
N1100 G02 Y-4.9 Z0. K4.9 F464.
N1105 G00 Z5.
N1110 X74.949 Y76.85
N1115 G01 Z-0.5 F464.
N2195 X49.302 Y76.85
N2200 G01 Z-5.5 F464.
N2205 G02 Y71.95 Z-10.4 J-4.9
N2210 G01 Y45.
N2215 Y0. F493.
N2220 G02 Y-4.9 Z-5.5 K4.9 F464.
N2225 G00 Z5.
N2230 X23.655 Y76.85
N2235 G01 Z-5.5 F464.
N2240 G02 Y71.95 Z-10.4 J-4.9
N2245 G01 Y45.
N2250 Y0. F493.
N2255 G02 Y-4.9 Z-5.5 K4.9 F464.
N2260 G00 Z5.
N2265 X74.949 Y76.85
N2270 G01 Z-6. F464.
N2275 G02 Y71.95 Z-10.9 J-4.9
N2280 G01 Y45.
N2285 Y0. F493.
N2290 G02 Y-4.9 Z-6. K4.9 F464.
N2295 G00 Z5.
N2300 X49.302 Y76.85
N2305 G01 Z-6. F464.
N2310 G02 Y71.95 Z-10.9 J-4.9
N2315 G01 Y45.
N2320 Y0. F493.
N2325 G02 Y-4.9 Z-6. K4.9 F464.
N2330 G00 Z5.
N2335 X23.655 Y76.85

| | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| N1120 G02 Y71.95 Z-5.4 J-4.9 | N2340 G01 Z-6. F464. |
| N1125 G01 Y45. | N2345 G02 Y71.95 Z-10.9 J-4.9 |
| N1130 Y0. F493. | N2350 G01 Y45. |
| N1135 G02 Y-4.9 Z-0.5 K4.9 F464. | N2355 Y0. F493. |
| N1140 G00 Z5. | N2360 G02 Y-4.9 Z-6. K4.9 F464. |
| N1145 X49.302 Y76.85 | N2365 G00 Z15. |
| N1150 G01 Z-0.5 F464. | N2370 G17 |
| N1155 G02 Y71.95 Z-5.4 J-4.9 | N2375 M09 |
| N1160 G01 Y45. | N2380 G28 G91 Z0. |
| N1165 Y0. F493. | N2385 G90 |
| N1170 G02 Y-4.9 Z-0.5 K4.9 F464. | N2390 G49 |
| N1175 G00 Z5. | N2395 G28 G91 X0. Y0. |
| N1180 X23.655 Y76.85 | N2400 G90 |
| N1185 G01 Z-0.5 F464. | N2405 M30 |
| N1190 G02 Y71.95 Z-5.4 J-4.9 | % |