

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**VICTOR ANTÔNIO DE MATTOS BELLÉ**

**PROPOSTA METODOLOGICA PARA O ESTUDO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO  
SAE 8640 NO TORNEAMENTO COM INSERTO QUADRADO DE METAL DURO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2021**

VICTOR ANTÔNIO DE MATTOS BELLÉ

**PROPOSTA METODOLOGICA PARA O ESTUDO DA INTEGRIDADE  
SUPERFICIAL DO AÇO SAE 8640 NO TORNEAMENTO COM INSERTO  
QUADRADO DE METAL DURO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima

Coorientador: Prof. Gabriel Athayde Stockler

PATO BRANCO

2021

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Proposta Metodológica Para o Estudo Da Integridade Superficial Do Aço SAE 8640 No Torneamento Com Inseto Quadrado De Metal Duro

Victor Antônio de Mattos Bellé

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 17/08/2021 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Gabriel Athayde Stockler  
(UTFPR – Membro externo)  
Coorientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima  
(UTFPR - Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Sara Jane de Mattos Bellé e Vilson José Bellé que estiveram comigo em todos os momentos e possibilitaram que toda minha jornada fosse possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Sara Jane de Mattos Bellé e Vilson José Bellé por todo o apoio e amor.

Agradeço também a minha irmã Gabriella Bellé por todo o companheirismo e acolhimento. Aos meus tios e padrinhos Janaína de Mattos Almeida e Marcelo Camargo de Almeida por todo suporte, bons momentos e carinho em todos esses anos. A todos meus familiares que sempre me apoiaram e estiveram presentes.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima a todos os ensinamentos e oportunidades que me propiciou. Ao coorientador Prof. Gabriel Athayde Stockler pelo apoio e conselhos. A todos os professores da UTFPR de Pato Branco que participaram da minha trajetória acadêmica e somaram para a construção do meu conhecimento.

A meus irmãos de vida com quem dividi o crescimento de anos, Gabriela Daltoé Geittones e Alan Ricardo Brandt. Aos meus amigos, a todos que passaram pela minha vida e deixaram coisas boas e momentos.

## EPÍGRAFE

May you not lack strength to fight and reasons to smile  
Faith to believe and love to share. (BRAZZA, Fabio).

Que não te falte forças pra lutar e motivos pra sorrir  
Fé pra acreditar e amor pra dividir. (BRAZZA, Fabio).

## RESUMO

BELLÉ, Victor. Proposta metodológica para o estudo da integridade superficial do aço SAE 8640 no torneamento com inserto quadrado de metal duro. 2021. 51 f. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco 2021.

A usinagem de materiais é um processo amplamente utilizado na fabricação de componentes. No processo, o entendimento sobre as variáveis presentes determina o resultado final quanto a velocidade, recursos dispendidos e qualidade final da operação. O estudo da usinagem, seus parâmetros e variáveis envolvidas vem da necessidade por alternativas que permitam uma maior versatilidade de ferramentas, um menor custo de processo e uma maior produtividade aliada a maior qualidade. O presente trabalho reuniu uma sólida literatura bibliográfica que permitiu propor um ensaio experimental prático que avaliará o impacto de diferentes estratégias de usinagem utilizando o inserto quadrado de metal duro na integridade superficial do aço SAE 8640 com e sem lubri-refrigeração.

**Palavras-chave:** Usinagem. Acabamento superficial. Rugosidade. Inserto Quadrado.

## **ABSTRACT**

BELLÉ, Victor. Methodological proposal for the study of the surface integrity of SAE 8640 steel in turning with square carbide insert. 2021. 51 f. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco 2021.

Material machining is a process widely used in component manufacturing. In the process, the understanding of the variables present determines the final result in terms of speed, resources spent and the final quality of the operation. The study of machining, its parameters and variables involved comes from the need for alternatives that allow greater tool versatility, lower process cost and greater productivity combined with higher quality. The present work gathered a solid bibliographical literature that allowed to propose a practical experimental test that will evaluate the impact of different machining strategies using the square carbide insert on the surface finish of SAE 8640 steel with and without lubrication and cooling.

**Keywords:** Machining. Surface. Roughness. Square Insert.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação Fonte:</b> .....	18
<b>Figura 2 - Tipos de operação de torneamento.</b> .....	18
<b>Figura 3 - Sistema de designação ABNT AISI/SAE.</b> .....	21
<b>Figura 4 - Composição química aço SAE 8640.</b> .....	22
<b>Figura 5 - Diversas geometrias de ferramentas de corte para torneamento.</b> .....	24
<b>Figura 6 - Classificação de metais duros norma ISO 513 2004.</b> .....	25
<b>Figura 7 - Formato de insertos para torneamento.</b> .....	26
<b>Figura 8 - Raio de ponta</b> .....	27
<b>Figura 9 - Inseto durante a usinagem. <math>A_p</math> é a profundidade de corte, <math>L_c</math> significa o comprimento de corte e <math>\phi</math> é o ângulo de ataque da ferramenta.</b> .....	27
<b>Figura 10 - Mecanismo de formação do cavaco.</b> .....	29
<b>Figura 11 - Aplicação de fluido de corte por jorro no processo de torneamento.</b> .....	34
<b>Figura 12 - Classificação da integridade superficial.</b> .....	35
<b>Figura 13 - Classificação dos acabamentos superficiais.</b> .....	36
<b>Figura 14 - Representação Gráfica da rugosidade média.</b> .....	37
<b>Figura 15 - Torno convencional ROMI Tornomax 20.</b> .....	41
<b>Figura 16 - Insetos propostos para utilização no estudo.</b> .....	42
<b>Figura 17 - Inseto SNMG431MA Mitsubishi Materials.</b> .....	42
<b>Figura 18 - Inseto SNMG433RP Kennametal.</b> .....	43
<b>Figura 19 - Suporte de ferramenta PSBNR 2020 K12.</b> .....	43
<b>Figura 20 - Suporte de ferramenta PSBNR 2020 K12.</b> .....	44
<b>Figura 21 - Suporte de ferramenta PSSNR 2020 K12.</b> .....	44
<b>Figura 22 – Características do suporte PSSNR 2020 K12.</b> .....	45
<b>Figura 23 - Rugosímetro TR220.</b> .....	46
<b>Figura 24 - Dispositivo de fornecimento de fluido de corte.</b> .....	47
<b>Figura 25 - Exemplo de disposição do corpo de prova de usinagem.</b> .....	48



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Comparativo entre fluidos de corte e suas aplicações. ....</b>	<b>33</b>
--	-----------

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo Principal .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 JUSTIFICATIVA .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 USINAGEM .....	17
2.2 OPERAÇÕES DE USINAGEM.....	18
2.2.1 MOVIMENTOS, DIREÇÕES E VELOCIDADES NO PROCESSO DE CORTE	19
2.3 AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA .....	21
2.3.1 AÇO SAE 8640 .....	22
2.3.2 ELEMENTOS DE LIGA .....	22
2.4 FERRAMENTAS DE CORTE.....	23
2.4.1 METAL DURO .....	24
2.4.2 INSERTO .....	25
2.4.3 RAIOS DE PONTA (Re) .....	26
2.4.4 PORTA FERRAMENTAS .....	27
2.5 FORMAÇÃO DE CAVACOS .....	28
2.5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS .....	29
2.6 FLUIDOS DE CORTE .....	30
2.6.1 UTILIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE.....	31
2.6.2 APLICAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE .....	33
2.7 INTEGRIDADE SUPERFICIAL .....	34
2.7.1 RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	35
2.7.2 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE.....	38
2.8 ENSAIOS DE USINABILIDADE .....	38

<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	40
3.2 MATERIAIS .....	40
3.2.1 TORNO CONVENCIONAL.....	40
3.2.2 MATERIAL USINADO .....	41
3.2.3 FERRAMENTAS DE CORTE.....	41
3.2.4 PORTA FERRAMENTAS .....	43
3.2.5 RUGOSÍMETRO .....	45
3.2.6 APLICADOR DE FLUIDO.....	46
3.3 MÉTODOS .....	47
3.3.1 USINAGEM DE AMOSTRAS .....	47
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde que os metais foram descobertos na Idade do Metal, o ser humano busca o aprimoramento das técnicas de trabalho que visam transformar esses materiais tão versáteis em ferramentas. Na revolução Industrial no século XVIII com o aparecimento de novos materiais metálicos mais resistentes e modernos assim como os motores a vapor, começou a ser possível um desenvolvimento mais abrangente de ferramentas e equipamentos para usinagem de metais. A partir disso a necessidade por novos processos que tornassem possível a fabricação de peças, sistemas e equipamentos complexos era evidente.

Com essa demanda em mãos, os estudos de engenharia metalúrgica e de materiais estava a todo vapor. Logo percebeu-se a complexidade e a vasta gama de propriedades que poderiam ser obtidas ou não, mudando alguns elementos da composição do metal ou seu processamento. Com o avanço tecnológico da indústria metalmeccânica o homem foi tendo domínio de mais variáveis do processamento dos metais. O estudo dos materiais possibilitou um crescimento exponencial do conhecimento sobre usinagem.

"Como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões, ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Definimos cavaco, a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular." (FERRARESI, 1970).

Dentre os tipos de usinagem, o mais comum e utilizado amplamente é o torneamento, onde: "A peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal." (MACHADO et al., 2009).

Na operação de torneamento vários parâmetros são importantes para atender a necessidade de cada projeto. Conhece-los é fundamental para conseguir chegar nas propriedades mecânicas requeridas com o menor custo e no menor tempo possível. O acabamento superficial é uma exigência não só estética.

"Durante operações de usinagem, pequenos riscos e sulcos são invariavelmente introduzidos na superfície da peça de trabalho pela ação da ferramenta de corte. Essas marcas de superfície podem limitar a vida em fadiga. Observou-se que a melhoria do acabamento superficial mediante um polimento irá

aumentar significativamente a vida em fadiga." (CALLISTER, 2002). Esse fato põe em foco a necessidade real do estudo sobre a integridade superficial no torneamento.

Para o processo de torneamento existem diversos tipos de ferramentas de corte, cada uma propicia um resultado final. A interação entre a ferramenta de corte, o material, fluído de corte e os parâmetros gerais de usinagem são determinantes para o acabamento superficial da peça, para o gasto energético da operação, para o desgaste da ferramenta utilizada e para a velocidade de operação. Todos, pontos fundamentais para o mapeamento e diminuição dos custos operacionais.

Este estudo consiste na formulação de uma proposta de usinagem de um corpo de prova fabricado em aço de construção mecânica baixa liga SAE 8640. Com suas características catalogadas pela Favorit Aços Especiais como " Aço de alta resistência mecânica, boa usinabilidade, alta tenacidade, elevada temperabilidade e baixa soldabilidade." (FAVORIT, 2020).

"Ao selecionar-se aços para determinada aplicação, raramente todas as propriedades terão a mesma importância. O problema consiste em determinar quais propriedades são importantes e em seguida, selecionar o material que tenha tais propriedades a menor custo. Para determinação das propriedades necessárias usam-se os cálculos, baseados na resistência dos materiais, as experiências anteriores com peças semelhantes e aos testes práticos conjuntos" (SILVA, 2006).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

O principal objetivo desse trabalho é formular um modelo de experimento que permita a avaliação de diferentes estratégias e conjuntos de parâmetros de usinagem e de lubrificação com fluido de corte sintético para o torneamento do aço SAE 8640 com incerto quadrado de metal duro visando o melhor acabamento superficial possível.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja atingido os seguintes tópicos serão elencados como objetivos específicos:

- Obter uma vasta pesquisa bibliográfica a fim de dispor do maior número de informação técnicas a respeito do processo avaliado, do material utilizado, do fluido de corte escolhido e dos parâmetros utilizados na usinagem.
- Formular uma proposta de estudo para avaliação da influência dos parâmetros de corte na integridade superficial no corpo de prova desenvolvido. Aferindo por meio de rugosímetro e visando atingir o acabamento superficial com menor rugosidade possível.
- Junto a proposta será possível avaliar também, a influência dos fluidos de lubrificação sintéticos no acabamento superficial do corpo de prova proposto.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Conhecer os melhores parâmetros de usinagem ou os parâmetros ideais permitem uma maior qualidade final das peças feitas. Mapeando as variáveis é possível otimiza-las deixando o processo mais eficiente, sendo possível assim ajustá-lo ao melhor custo benefício e maior produção. Em indústrias ou oficinas de pequeno porte, onde o acesso a ferramentas é limitado tanto por logística quanto por custos,

conseguir um conjunto de parâmetros que possibilite unir em uma só ferramenta uma gama de aplicações com qualidade, barateia o processo e melhora o resultado final.

A proposta de estudo justifica-se na necessidade da busca por soluções para um processo cientificamente e tecnicamente mais rigoroso e com melhor qualidade superficial final na usinagem de desbaste do material avaliado e um processo produtivo mais eficiente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

"A usinagem é o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10 por cento de toda a produção de metais e empregando milhões de pessoas". (TRENT, 2000).

A usinagem compreende todos os processos que envolvam retirada de metal para conferir forma a algo. Torneamento, fresamento, furação, desbaste são exemplos de operações de usinagem. Na indústria moderna são processos vitais para a fabricação de produtos, máquinas e peças. Dessa forma, conhecer a influência que cada parte exerce no material a ser usinado ou no processo, significa conseguir extrair o máximo otimizando as etapas, as ferramentas, os materiais. Gerando no fim um menor custo e maior qualidade.

### 2.1 USINAGEM

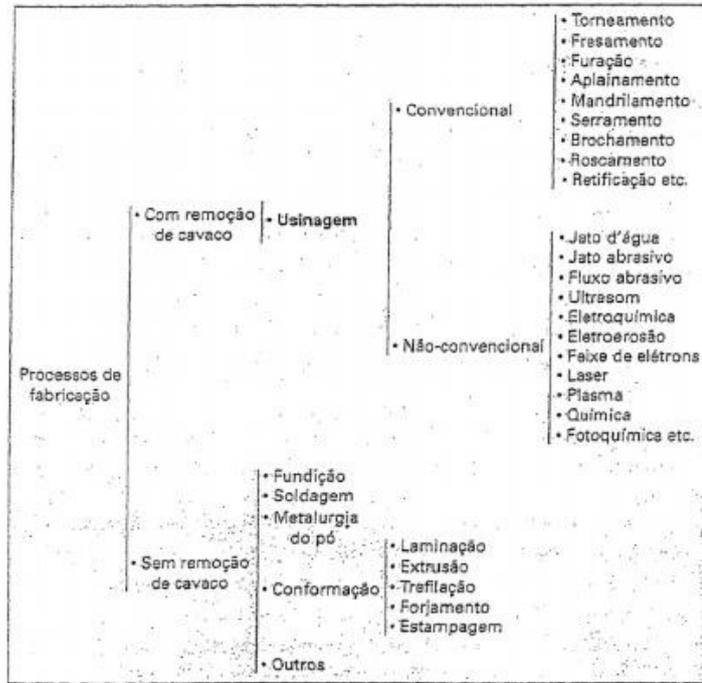
Machado define usinagem como: "Operação que ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento, produz cavaco. E por cavaco entende-se: porção de material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular."

A usinagem apesar de ser um processo simples é ao mesmo tempo imprevisível, pois leva em consideração a deformação plástica do material em que a única limitação é concedida pela ferramenta de corte, além de estabelecer elevadas taxas de deformação durante o procedimento (BLACK, 1995).

Em 1994 Shaw escreveu que "É praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. Entretanto, isso não significa que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor. Cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e interpretado de maneira adequada contribui para o entendimento do processo, o procedimento mais próximo da capacidade de prever seu comportamento."

A figura 1 apresenta a classificação dos processos de fabricação.

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação Fonte:



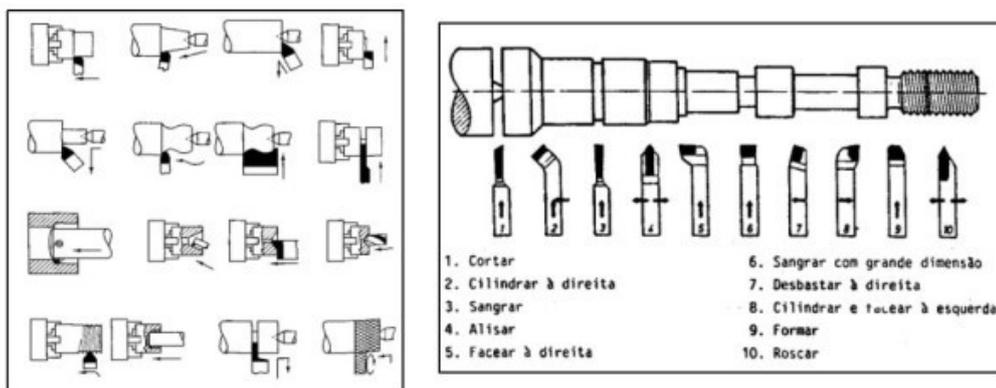
Fonte: Ferraresi, 1977.

## 2.2 OPERAÇÕES DE USINAGEM

"Torneamento: Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas mono cortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente seguindo uma trajetória coplanar com o referido eixo." (FERRARESI, 1970).

A figura 02 mostra os tipos de operações de usinagem.

Figura 2 - Tipos de operação de torneamento.



Fonte: CADguru. 2020.

Cada tipo de operação de torneamento destina-se a um fim específico, desbastar, cortar, alisar, roscar são exemplos. Cada operação tem suas especificidades e parâmetros de processo. Cada ferramenta e incerto utilizado também atendem a fins específicos, mesmo que algumas ferramentas sejam bem versáteis e possam ser utilizadas em várias operações.

Para a fabricante mundial de ferramentas de corte Sandvik Coromant. torneamento é combinação de dois movimentos: rotação da peça e movimento do avanço da ferramenta. O movimento de avanço da ferramenta pode ser ao longo do eixo da peça, o que significa que o diâmetro da peça será torneado para um tamanho menor. Alternativamente, a ferramenta pode avançar em direção ao centro, o que significa que essa peça será faceada.

Machado et al. Define que no torneamento as operações básicas na remoção de material são subdivididas em desbaste e acabamento. Para o desbaste, a maior preocupação é a taxa de remoção de material, que é limitada pela potência da máquina-ferramenta. No acabamento, quando é removido o sobremetal que foi deixado pela operação de desbaste, a qualidade final do componente possui característica prioritária.

No desbaste o objetivo final é uma estratégia que permita unir a máxima remoção de material com os parâmetros que permitam o melhor custo benefício do processo, sendo indiferente o acabamento superficial resultante. Já no processo de Acabamento, a estratégia de usinagem visa o melhor acabamento possível, ficando como secundário nesse momento, a velocidade de usinagem e a taxa de remoção de material.

### 2.2.1 MOVIMENTOS, DIREÇÕES E VELOCIDADES NO PROCESSO DE CORTE

"Os movimentos no processo de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante. Estes movimentos são referidos a peça, considerada como parada. Devem-se distinguir duas espécies de movimentos: os que causam diretamente a saída do cavaco e aqueles que não tomam parte direta na formação do cavaco. Origina diretamente a saída de cavaco o movimento efetivo de corte, o qual na maioria das vezes é o resultante do movimento de corte e do movimento de avanço" (FERRARESI, 1977).

Os movimentos do processo de corte que tomam parte na formação do cavaco são: Movimento de corte, Movimento de avanço e Movimento efetivo de corte.

Ferraresi escreve sobre esses movimentos:

- "O Movimento de corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única remoção de cavaco, durante uma volta ou um curso.
- O Movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, que juntamente com o movimento de corte, origina um levantamento repetido ou contínuo de cavaco, durante várias revoluções ou cursos.
- E o Movimento efetivo de corte é o resultante dos movimentos de corte e de avanço, realizados ao mesmo tempo."

Os movimentos do processo de corte que tomam parte na formação do cavaco são: Movimento de corte, Movimento de avanço e Movimento efetivo de corte.

Sobre as direções no processo de usinagem, Machado et al. escreve:

- Direção de corte: instantânea do movimento de corte.
- Direção de avanço: instantânea do movimento de avanço.
- Direção efetiva: instantânea do movimento efetivo de corte.

A respeito da velocidade presente na usinagem, destaca-se a Velocidade de Corte.

"A Velocidade de corte  $V_c$  é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte." (MACHADO et al, 2009).

Velocidade essa que é dada em m/min (metros por minuto) e pode ser encontrado pela equação 1:

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (1)$$

Onde  $d$  equivale ao diâmetro da peça usinada em mm e  $n$  significa o número de rotações por minuto.

"Velocidade de avanço  $V_f$  é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço." (MACHADO et al, 2009).

Essa velocidade é expressa em mm/min (milímetros por minuto) e pode ser encontrada pela equação 2:

$$V_f = f * n \quad (2)$$

Onde  $f$  significa o avanço em mm/rev (milímetros por revolução) e  $n$  significa o número de rotações por minuto.

### 2.3 AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA

Aços para construção mecânica são os tipos de aço empregados na fabricação de peças, componentes e diversos outros produtos. Silva comenta sobre suas diferenças em relação aos aços estruturais " Enquanto aços estruturais são normalmente fornecidos para atender a requisitos mecânicos, aços para construção mecânica são usualmente fornecidos para atender faixas de composição química."

A figura 3 mostra a composição do aço 8640 pela classificação da ABNT.

**Figura 3 - Sistema de designação ABNT AISI/SAE.**

Lista parcial da denominação normativa ABNT, AISI/SAE		
Tipo de aço		Chave numérica
Aço carbono		10xx
ressulfurado		11xx
ressulfurado e refosforizado		12xx
Aço manganês	Mn 1.75%	13xx
Aço níquel	Ni 3.50%	23xx
	Ni 5.00%	25xx
Aço níquel cromo	Ni 1.25% ; Cr 0.65 e 0.80%	31xx
	Ni 1.75% ; Cr 1.07%	32xx
	Ni 3.50% ; Cr 1.50% e 1.57%	33xx
	Ni 3.00% ; Cr 0.77%	34xx
Aço molibdênio	Mo 0.20 e 0.25%	40xx
	Mo 0.40 e 0.52%	44xx
Aço cromo molibdênio	Cr 0.50 , 0.80 e 0.95% ; Mo 0.12 , 0.20 , 0.25 e 0.30%	41xx
Aço níquel cromo molibdênio	Ni 1.82% ; Cr 0.50 e 0.80% ; Mo 0.25%	43xx
	Ni 1.05% ; Cr 0.45% ; Mo 0.20 e 0.35%	47xx
	Ni 0.30% ; Cr 0.40% ; Mo 0.12%	81xx
	Ni 0.55% ; Cr 0.50% ; Mo 0.20%	86xx
	Ni 0.55% ; Cr 0.50% ; Mo 0.25%	87xx
	Ni 0.55% ; Cr 0.50% ; Mo 0.35%	88xx
	Ni 3.25% ; Cr 1.20% ; Mo 0.12%	93xx
	Ni 0.45% ; Cr 0.40% ; Mo 0.12%	94xx
	Ni 0.55% ; Cr 0.20% ; Mo 0.20%	97xx
	Ni 1.00% ; Cr 0.80% ; Mo 0.25%	98xx

Fonte: Caruso, 2001.

### 2.3.1 AÇO SAE 8640

O distribuidor mundial de aço GGD Metals caracteriza o aço SAE 8640 como um dos aços de médio carbono e baixa liga mais utilizados. Sendo um aço para beneficiamento com temperabilidade média, é aproveitado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, combinando elevada resistência mecânica e resistência à fratura. Pode ser nitretado para elevar a resistência ao desgaste.

"O aço GGD SAE 8640 é utilizado em componentes para sistemas mecânicos de uso geral, onde o uso do aço GGD SAE 1045 não se aplica, pois apresenta melhor capacidade de endurecimento em seções transversais, resistência à fadiga e à fratura." (GGD METALS, 2020).

"Em virtude de suas propriedades mecânicas o aço SAE 8640 é muito utilizado na fabricação de parafusos, porcas, engrenagens, pinos, eixos, componentes de máquinas e motores como virabrequins e pistões." (YURGEL, 2007).

Sua composição química pode ser encontrada na figura 4.

**Figura 4 - Composição química aço SAE 8640.**

SAE	C	Cr	Mn	Mo	Si	Ni
8640	0,38 - 0,43	0,4 - 0,6	0,75 - 1,0	0,15 - 0,25	0,15 - 0,3	0,4 - 0,7

**Fonte: Pasifer Aços Especiais, 2020.**

### 2.3.2 ELEMENTOS DE LIGA

Na composição química do aço SAE 8640 além do carbono, outros elementos se destacam e são essenciais para o desempenho esperado deste aço de construção mecânica. Níquel - Ni, Cromo - Cr e Molibdênio - Mo são elementos de liga presentes no aço SAE 8640 e suas faixas de composição são a base de designação desse tipo de aços. O 86xx presente na nomenclatura do aço já citado significa pela Lista parcial da denominação normativa da ABNT AISI/SAE - Figura 3 - que este aço contém respectivamente 0,50%, 0,50% e 0,20% níquel, de cromo e de

molibdênio. O restante do número da nomenclatura xx40 diz respeito ao percentual de carbono multiplicado por 100 vezes. Então xx40 equivale a 0,04% de carbono.

"A adição de elementos de liga justifica-se pois muitas vezes pequenos acréscimos de determinados componentes causam melhora nas propriedades dos aços." (CARUSO, 2001).

O catálogo online da empresa Iguaferr Aços, acessado em setembro de 2020 relata a influência particular dos elementos Ni, Cr e Mo no aço:

“Elementos de liga:

**Níquel:**

- Quando ligado com Cromo, aumenta a tenacidade do aço beneficiado.
- Em grandes teores, junto com o Cromo, torna o aço resistente à corrosão e ao calor.
- Não é elemento formador de carbonetos.

**Cromo:**

- Aumenta a dureza, a temperabilidade e o limite de resistência à tração do aço.
- Em grandes quantidades, aumenta a resistência à corrosão, mas diminui um pouco a tenacidade e diminui bastante a soldabilidade.
- Em média, o limite de resistência à tração aumenta de 8 a 10 kg/mm<sup>2</sup> com a adição de cada 1% de Cromo.
- O Cromo é elemento formador de carbonetos.

**Molibdênio:**

- Aumenta a resistência a quente e quando em presença de Níquel e de Cromo.
- Aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento.
- Em aço rápido, quando substitui o Tungstênio, aumenta a tenacidade, mantendo as propriedades de dureza a quente e retenção de corte.
- É elemento formador de carbonetos.”

## 2.4 FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte são peça chave em uma boa usinagem. A escolha delas deve ser meticulosa e levar em conta todos os aspectos e objetivos da usinagem desejada.

"Dependendo da geometria da aresta de corte, menos energia pode ser gasta para a remoção do material. Com isso, a vida útil da ferramenta pode ser maximizada, a integridade superficial pode ser mais preservada e muitas outras vantagens podem ser obtidas." (RODRIGUES, 2005).

"O desempenho da usinagem está diretamente ligado a geometria da ferramenta de corte. Se a geometria da ferramenta escolhida para executar um determinado trabalho não for escolhida corretamente, não haverá êxito na operação (MACHADO et al. 2009).

As ferramentas de corte podem ser fabricadas em diversos materiais e em diversas geometrias, cada um possibilitando a usinagem de um tipo de material, de uma determinada dureza ou objetivando uma específica geometria usinada.

**Figura 5 - Diversas geometrias de ferramentas de corte para torneamento.**



**Fonte: Fermec Ferramentas de corte, 2021.**

#### 2.4.1 METAL DURO

"A descoberta da sintetização do carboneto de tungstênio WC, foi responsável por um gigante salto na qualidade e possibilidades de usinagem. O metal duro é resultado da mistura do carboneto de tungstênio em pó com cobalto. A mistura desses compostos e utilizando a metalurgia do pó para resultar em um material com excelentes propriedades de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade." (COELHO, 2018).

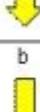
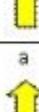
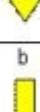
A primeira entidade que regulamentou um padrão para as ferramentas de metal duro foi a ISO. A primeira normal previa uma simbologia de letras e cores para classificar as ferramentas de acordo com o material a ser usinado e pelas

características da ferramenta. Essa norma foi substituída pela ISO 513 de 2004, ela expande a simbologia de letras e cores também para materiais cerâmicos e ultraduros.

Coelho também comenta que: A letra de designação dos metais duros é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior o número, que normalmente varia entre 01 e 50, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste.

A figura 6 mostra a classificação da norma ISO 513:

**Figura 6 - Classificação de metais duros norma ISO 513 2004.**

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros		a	b
P	Azul	<b>Aços:</b> Todos os tipos de aços e aços fundidos, excetos aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45		
M	Amarelo	<b>Aço Inoxidável:</b> aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35		
K	Vermelho	<b>Ferro Fundido:</b> Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35		
N	Verde	<b>Metais não-ferrosos:</b> Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25		
S	Marron	<b>Superligas e titânio:</b> Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25		
H	Cinza	<b>Materiais duros:</b> Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25		

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: Coelho, 2018.

## 2.4.2 INSERTO

Os insertos de corte, também conhecidos como pastilhas de corte, são fabricados com diversas geometrias. Eles podem ser quadrados, romboidais, redondos, losangulares. Em cada inserto também é selecionado previamente o

tamanho do raio da ponta, a geometria do quebra-cavaco, tipo de fixação no porta-ferramenta, ângulo de saída entre outros parâmetros. Cada um atende a uma necessidade e produz um resultado característico. A figura 7 mostra os tipos de insertos encontrados no mercado quanto a sua geometria:

**Figura 7 - Formato de insertos para torneamento.**



**Fonte: Sandvik Coromant. 2020.**

A geometria do inserto, do raio da ponta, da forma como é o quebra cavaco da ferramenta, aliados aos parâmetros de usinagem alteram o resultado final do produto, tanto em velocidades de corte quanto em acabamento final.

#### 2.4.3 RAIOS DE PONTA (Re)

"O raio de ponta é um fator importante em muitas operações de torneamento e precisa ser levado em consideração, já que a escolha certa afeta a robustez da aresta de corte e o acabamento superficial da peça. No torneamento por desbaste, pode ser escolhido o maior raio de ponta possível, para permitir maior robustez, sem causar aumento nas tendências a vibração. O valor do avanço da ferramenta pode ser afetado pelo raio da ponta.

Um maior raio de ponta permite uma aresta mais robusta, capaz de suportar altos avanços para uma área de contato apropriada para a aresta de corte. Um menor raio de ponta significa uma ponta mais fraca, porém capaz de corte com maiores exigências. Em operações de torneamento, o acabamento superficial gerado será diretamente influenciado pela combinação de raio de ponta e faixa de avanço." (SANDVICK COROMANT).

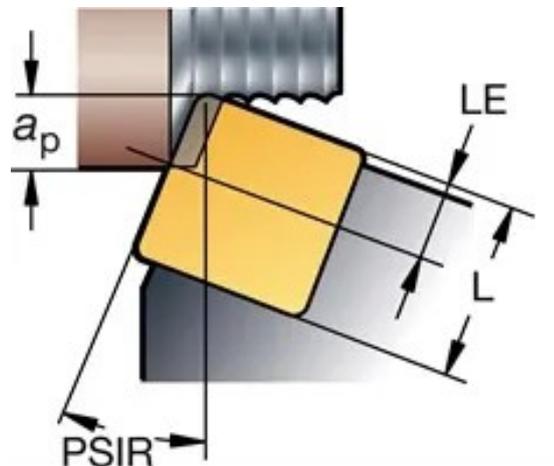
A figura 8 mostra o raio de ponta  $R_e$  em um inserto de usinagem. Na figura 9 é possível ver as ondulações deixadas pelo raio da ferramenta durante o corte.

**Figura 8 - Raio de ponta**



Fonte: Sandvick Coromant, 2021.

**Figura 9 - Inserto durante a usinagem.  $a_p$  é a profundidade de corte,  $L_e$  significa o comprimento de corte e  $PSIR$  é o ângulo de ataque da ferramenta.**



Fonte: Sandvick Coromant, 2021.

#### 2.4.4 PORTA FERRAMENTAS

Cada inserto necessita de um tipo de suporte para que possa ser fixado ao torno e para que a usinagem seja possível. Cada suporte é específico para uma geometria de inserto.

"As principais qualidades de um sistema de fixação de aresta, como parte de um porta-ferramentas, devem ser o de fornecer estabilidade satisfatória para a pastilha durante a usinagem, facilitar o fluxo homogêneo de cavacos, acessibilidade

da ferramenta, versatilidade operacional, boa vida útil da ferramenta e manutenção simples.

A Sandvick Coromant diz que: Os tipos de porta-ferramentas são definidos pelo ângulo de posição, pelo formato e pelo tamanho das pastilhas utilizadas. Para garantir estabilidade durante a usinagem, deve ser escolhido o maior tamanho possível de porta-ferramenta apropriado para a aplicação. Isso permite a proporção ferramenta-balanço mais vantajosa e a base mais rígida para a pastilha.

## 2.5 FORMAÇÃO DE CAVACOS

"O estudo do processo de formação do cavaco permite uma explicação científica das diferentes grandezas relacionadas com a usinagem dos metais, tais como desgaste da ferramenta e suas causas, força de corte, aresta postiça de corte." (FERRARESI, 1977).

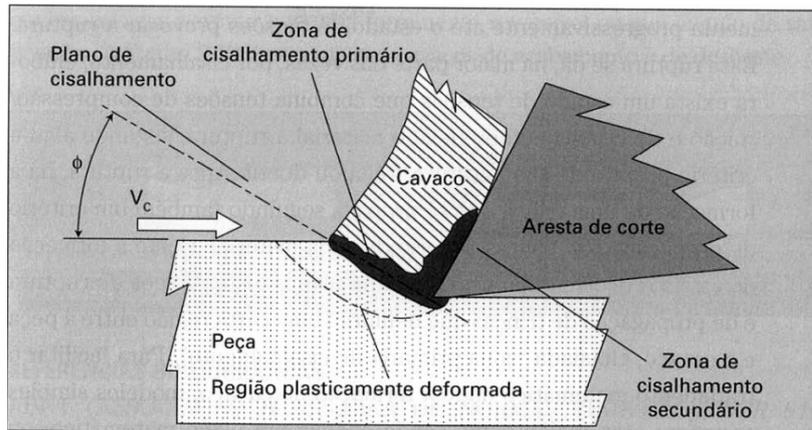
Machado et al. Sobre a formação de cavacos: Sabe-se que o cavaco é formado em altíssimas velocidades de deformação, seguidas de ruptura do material da peça. Para um estudo mais detalhado, divide-se o processo em quatro eventos:

- Recalque inicial: devido à penetração da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção deste (ainda unido à peça) é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- Deformação e ruptura: o material pressionado sofre, de início, uma deformação elástica, e, em seguida, uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até o estado de tensões provocar a ruptura.
- Deslizamento das lamelas: continuando a penetração da ferramenta na peça, haverá uma ruptura parcial, ou completa, na região de cisalhamento, dependendo da extensão da propagação da trinca. As propriedades do material e as condições de avanço e de velocidade de corte irão determinar quanto o segmento de material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, dando origem a cavacos contínuos ou descontínuos, conforme a extensão e a resistência da união entre as lamelas de material rompido.
- Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e rompida - o cavaco - sobre

a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal evento ocorre, uma nova lamela de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e passando pelos mesmos processos. Essa nova porção de material também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo mais uma vez o fenômeno.

A figura 10 mostra o mecanismo de formação do cavaco durante a usinagem.

**Figura 10 - Mecanismo de formação do cavaco.**



**Fonte: Machado et al. 2009.**

### 2.5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS

Segundo Ferraresi, os cavacos podem ser divididos em três tipos:

- Cavaco contínuo: Apresenta-se constituídos de lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço, não havendo interferência devido a vibrações externas ou a variação das condições de atrito na superfície de saída da ferramenta.
- Cavaco de cisalhamento: Apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos. Estes elementos de cavaco foram cisalhados na região de cisalhamento e parcialmente soldados em seguida. Este tipo de cavaco se forma empregando-se grandes avanços, velocidades de corte geralmente inferiores a 100 m/min e ângulo de saída pequeno.
- Cavaco de ruptura: Apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares que permanecem

separados. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão.

## 2.6 FLUIDOS DE CORTE

"Na usinagem, o uso de fluidos de corte, quando escolhidos e aplicados apropriadamente, traz benefícios. A seleção adequada de um fluido de corte deve recair sobre aquele que possuir composição química e propriedades corretas para lidar com as adversidades de um processo de corte específico. Ele deve ser aplicado usando-se um método que permita sua chegada o mais próximo possível da aresta de corte dentro da interface ferramenta/cavaco, a fim de assegurar que suas funções sejam exercidas adequadamente." (MACHADO et al, 2009).

"Os fluidos de corte foram introduzidos em 1890 pelo F.W. Taylor, que inicialmente utilizou água para resfriar a ferramenta, porém a água tem suas peculiaridades, causa oxidação e baixo poder de lubrificação"... "Os óleos possuem um poder de lubrificação muito maior que a água, sendo assim, reduzindo o atrito ferramenta-peça, reduzindo conseqüentemente a temperatura e melhorando o acabamento superficial a peça." (DINIZ; MARCONDES; COPPINI; 2014).

Os fluidos de corte vêm sendo desenvolvidos, e cada tipo de fluido serve para uma atividade específica de usinagem. Alguns são melhores para trocar calor com boas propriedades refrigerantes, outros tem uma melhor capacidade lubrificante, por isso atualmente existem tanta variedade de fluidos de corte presentes no mercado. A maior dificuldade em selecionar um fluido de corte está presente na sensibilidade do processo de usinagem, em que uma pequena variação de parâmetro, pode provocar grandes alterações na usinagem. (SALES et al. 2016).

O fluido de corte pode atuar em duas frentes principais: Como refrigerante da operação de usinagem e como lubrificante da interface de contato ferramenta-material.

No estudo desses métodos, Machado et al comenta:

Agindo como lubrificante, o fluido de corte contribui para reduzir o atrito e a área de contato ferramenta/cavaco, e sua eficiência vai depender da habilidade de penetrar na interface ferramenta/cavaco no curto período de tempo disponível e de

formar um filme com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da peça.

"Como refrigerante, o fluido de corte favorece a transferência de calor da região de corte, reduzindo assim a temperatura da ferramenta e da peça, ainda que a temperatura na interface ferramenta/cavaco não seja significativamente alterada. Além disso, mesmo que a concentração de óleo seja mínima, haverá redução do coeficiente de atrito e, portanto, da temperatura.

Portanto, é fundamental o estudo de fluidos de corte, possibilitando uma maior qualidade no processo de usinagem. Tanto pela refrigeração do material usinado e a ferramenta utilizada, quando pela lubrificação a aresta de corte que realiza a usinagem.

### 2.6.1 UTILIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte podem ser classificados em 3 grupos principais: Emulsões, Soluções e Óleos.

Sobre as emulsões, soluções e óleos minerais Ferraresi e Machado et al. definem como:

Emulsões – São compostos bifásicos, o emulsionante geralmente é composto de água e óleo. Tem-se assim uma combinação das excelentes propriedades refrigerante da água com propriedades lubrificantes e antioxidantes dos aditivos. O resultado é uma emulsão estável. Os agentes que proporcionam a emulsão agem dividindo o óleo em partículas minúsculas, que ficam dispersas na água durante um período longo de tempo. Faz-se uso dessas emulsões nas operações de usinagem, nos casos em que se necessita de poder refrigerante e poder lubrificante, como em casos de velocidades de corte alta e baixas pressões específicas de corte.

As soluções são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente na água. Nesse caso não há necessidade de adição de agentes emulsificantes, pois os compostos reagem quimicamente, formando fases únicas. Também chamadas "fluidos sintéticos", caracterizam-se por ser isentas de óleo mineral. Apresentam vida mais longa, uma vez que são menos atacáveis por bactérias e reduzem o número de trocas da máquina. Os fluidos sintéticos mais comuns

oferecem boa proteção anticorrosiva e refrigerante. Os mais complexos são de uso geral, com boas propriedades lubrificantes e refrigerantes.

Os óleos podem ser divididos em Óleos de origem vegetal e Óleos minerais.

Os Óleos de origem vegetal foram os primeiros lubrificantes empregados como óleos integrais na usinagem dos metais. Sua utilização se tornou inviável devido ao alto custo e à rápida deterioração, porém, são empregados como aditivos, nos fluidos minerais, com o objetivo de melhorar suas propriedades lubrificantes. Embora sejam eficientes na redução do atrito, sua baixa condutividade térmica e seu baixo calor específico os tomam ineficazes na condução do calor para fora da região de corte.

Os óleos minerais são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo. A base dos óleos minerais pode ser parafínica, naftênica ou aromática, entretanto, os últimos não são empregados na fabricação de fluidos de corte. Os fluidos de base parafínica derivam do refino do petróleo com alto teor de parafinas (ceras), o que resulta em excelentes fluidos lubrificantes. Como esses óleos são encontrados em maior abundância, apresentam um custo menor. Além disso, possuem elevada resistência à oxidação e mantêm sua viscosidade constante em uma ampla faixa de temperaturas. São menos prejudiciais à pele e ainda menos agressivos à borracha e ao plástico. Já os óleos de base naftênica são derivados do retino do petróleo naftênico, O uso desses óleos como bases para fluidos de corte tem diminuindo em função dos problemas causados à saúde humana, entretanto, são mais estáveis que os óleos parafínicos e suportam cargas mais elevadas.

As principais funções dos fluidos de corte são segundo Ferraresi são:

- Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco.
- Expulsão do cavaco da região de corte.
- Refrigeração da ferramenta.
- Refrigeração da peça em usinagem.
- Melhor acabamento superficial da peça em usinagem.
- Refrigeração máquina-ferramenta.
- Redução do consumo de energia de corte.
- Redução do custo da ferramenta na operação.
- Impedimento da corrosão da peça em usinagem."

A tabela 01 mostra a relação entre o tipo de fluido de corte utilizado e sua qualidade para cada parâmetro.

**Tabela 1 - Comparativo entre fluidos de corte e suas aplicações.**

<b>Comparação entre as propriedades dos fluidos de corte integrais e solúveis.</b>			
<b>Propriedades dos fluidos de corte</b>	<b>Soluções</b>	<b>Emulsões</b>	<b>Óleos</b>
<b>Poder lubrificante</b>	Baixo	Intermediário	Alto
<b>Poder refrigerante</b>	alto	Intermediário	Baixo
<b>Velocidade de corte (Vc)</b>	Alto	Alta	Baixa
<b>Admite aditivo EP</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Sucetível a infecção bacteriana</b>	Não	Sim	Sim
<b>Propriedades anticorrosivas</b>	Fracas	Fracas	Boas

Fonte: Adaptado - CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. 2021.

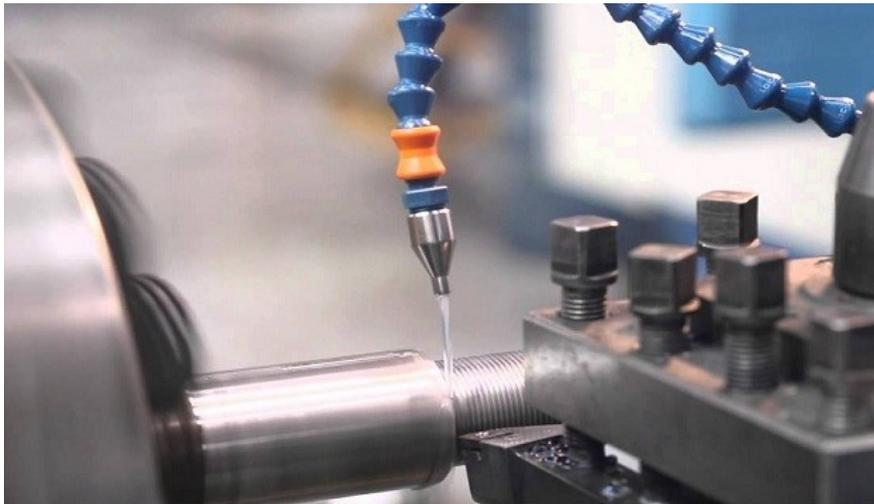
No torneamento, Ferraresi comenta a forma de seleção do fluido de corte pelo material a ser usinado: " Aço: óleos emulsionáveis: do tipo comum ou do tipo extrema pressão; óleos minerais sulfurados; óleos graxos-minerais."

## 2.6.2 APLICAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE

"Os fluidos de corte da classe líquidos são aplicados diretamente sobre a região de corte, de tal maneira que o jato envolva as partes ativas da ferramenta e parte da peça em usinagem. A ação do fluido fica melhorada com a adição de um bocal dirigindo seu jato na superfície de incidência da ferramenta de barra." (FERRARESI, 1977).

A figura 11 exemplifica a aplicação de fluido de corte no processo de torneamento.

**Figura 11 - Aplicação de fluido de corte por jorro no processo de torneamento.**



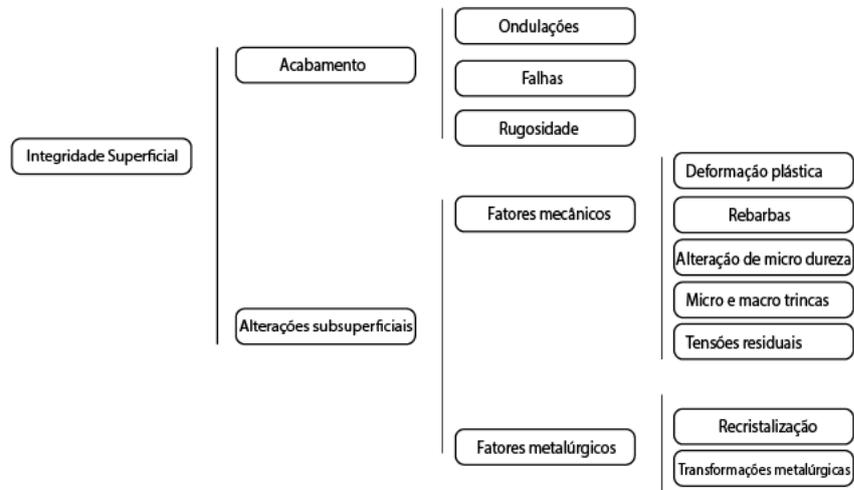
**Fonte: Cadium - Óleos Lubrificantes Industriais, 2021.**

## 2.7 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

"A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas. O conceito de integridade superficial não pode ser definido apenas em uma dimensão e não abrange somente a textura da superfície ou a sua forma geométrica. Esse termo engloba também outras características da superfície em serviço e de camadas abaixo desta. Tais superfícies podem ser classificadas em alterações na superfície (acabamento) e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperficiais)." (MACHADO et al. 2009).

Na figura 12 é mostrado a classificação de integridade superficial das superfícies.

**Figura 12 - Classificação da integridade superficial.**



**Fonte: Adaptado - Machado et al. 2009.**

No processo de usinagem a finalidade do componente usinado requererá determinada integridade superficial e deverá ser informada em seu projeto. Junto a isso, Kalpakjian (1995) determina outros parâmetros importantes na determinação da integridade superficial do componente usinado.

- Grau de acoplamento entre componentes, como selos de mancais, elementos de vedação e moldes para injeção.
- Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação.
- Resistência à fadiga e à corrosão.
- Resistividade elétrica e térmica de contato.
- Processamento posterior, como pintura.
- Aparência.
- Custo.

### 2.7.1 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Machado et al. comenta que:

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte. Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo

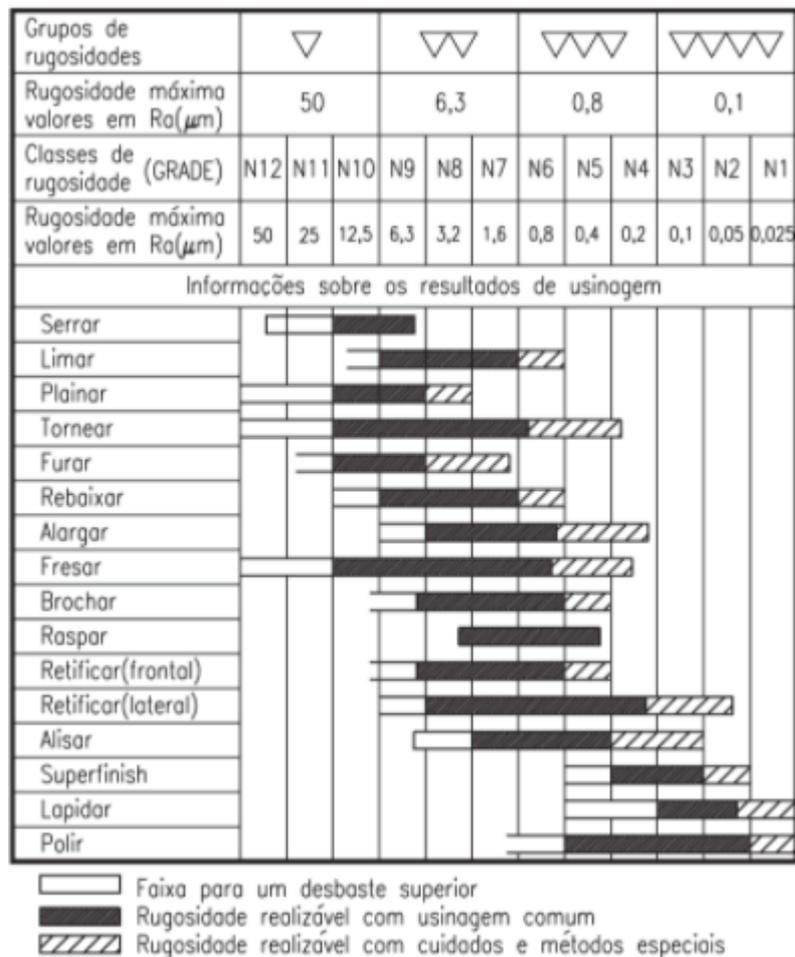
de usinagem. A rugosidade, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada.

A rugosidade sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta (NAKAYAMA et al., 1966; SHOUCKRY, 1982).

Na avaliação da rugosidade superficial do componente usinado, deve ser considerado a necessidade de projeto prevista para a peça. De forma que o processo seja pensado para atender a especificação.

A figura 13 mostra uma classificação de acabamentos superficiais de cada processo, dividido em 12 grupos e organizado de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção. É possível também observar a relação aproximada entre as classes e valores de Ra (mm) e a notação de simbologia de triângulos.

**Figura 13 - Classificação dos acabamentos superficiais.**



Fonte: Telecurso 2000.

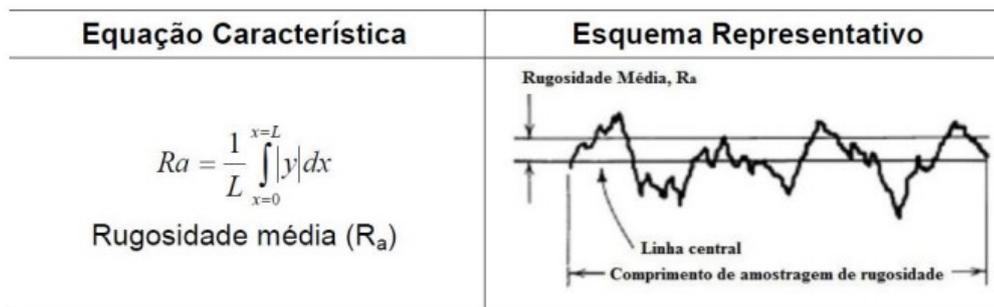
Na classificação da rugosidade algumas variáveis são consideradas. Entre eles a Rugosidade Média - Ra, que corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas P(x) no comprimento da amostra avaliada.

"Entre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o Ra. Amplamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta (MUMMERY, 1992).

"Trata-se de um parâmetro muito utilizado pela indústria e que está disponível nos instrumentos mais simples. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais." (MACHADO et al, 2009).

A figura 14 mostra a representação gráfica da rugosidade superficial.

**Figura 14 - Representação Gráfica da rugosidade média.**



**Fonte: Alessandro Rodrigues, Fabricação mecânica por usinagem.**

O parâmetro da Rugosidade média pode ser encontrado teoricamente. Ele expressa um valor estimado, visto que existem diversos outros fatores para encontrar o valor real exato, como vibração da ferramenta e desgaste das arestas de corte.

Machado et al, destaca que: No processo de torneamento, se o avanço  $f$  é menor que o raio de ponta  $R_e$  da ferramenta, o valor de  $Ra$  é calculado, aproximadamente, por:

$$Ra = \frac{f^2}{18 * \sqrt{3} * r_g} \quad (3)$$

## 2.7.2 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

"O aparelho empregado na medição da rugosidade é chamado rugosímetro. A medição pode ser feita com ou sem contato entre um apalpador e a peça. O equipamento consiste de um apalpador de diamante que percorre, em linha reta, uma distância previamente definida (comprimento de avaliação). O deslocamento vertical do apalpador é convertido em sinal elétrico e então amplificado. O resultado pode ser apresentado, na forma numérica, pelo gráfico do perfil que representa a superfície analisada e há, ainda, a possibilidade de utilizar filtros para eliminar a influência das ondulações." (MACHADO et al. 2009).

## 2.8 ENSAIOS DE USINABILIDADE

Ferraresi define a Usinabilidade de um metal como: "Uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão." o autor também destaca que as propriedades de usinagem de um metal são àquelas que: "Expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como a vida da ferramenta, a força de usinagem, o acabamento superficial da peça."

Conforme a norma ABNT NBR ISO 4288:2008 que define as Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, a Rugosidade média  $Ra$  é o parâmetro que será utilizado para avaliar a superfície usinada.



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Nesta seção é explicitado o procedimento experimental proposto, bem como os materiais e métodos necessários para a realização. O ensaio consiste na operação de usinagem de um tarugo de aço SAE 8640, previamente usinado na forma de um corpo de prova, afim de se obter um bloco padrão isento de parcialidades vindas da manufatura do mesmo. A variação de parâmetros como rotação da máquina, avanço de corte e profundidade de corte resultarão em diversas amostras de superfícies usinadas com diferentes estratégias. Quando aferidas gerarão diversas medidas de rugosidade superficial do corpo de prova. Dentre essas medidas, objetiva-se encontrar o conjunto que propicie o melhor acabamento superficial possível.

#### **3.2 MATERIAIS**

##### **3.2.1 TORNO CONVENCIONAL**

Para a realização de todas as operações de usinagem do ensaio deverá ser utilizado uma máquina de torneamento convencional. Como sugestão, poderá ser utilizado o torno mecânico convencional da marca Romi do modelo Tormax 20 presente no Laboratório de Usinagem H006 no bloco H da UTFPR campus Pato Branco. Na figura 15 é possível visualizar o modelo de torno.

**Figura 15 - Torno convencional ROMI Tornomax 20.**



**Fonte: Solo Stocks 2020.**

### 3.2.2 MATERIAL USINADO

O objeto principal de estudo do ensaio será um tarugo de aço SAE 8640. Material esse que, quando adquirido deverá ter a devida certificação de qualidade atestando a composição e procedência do material.

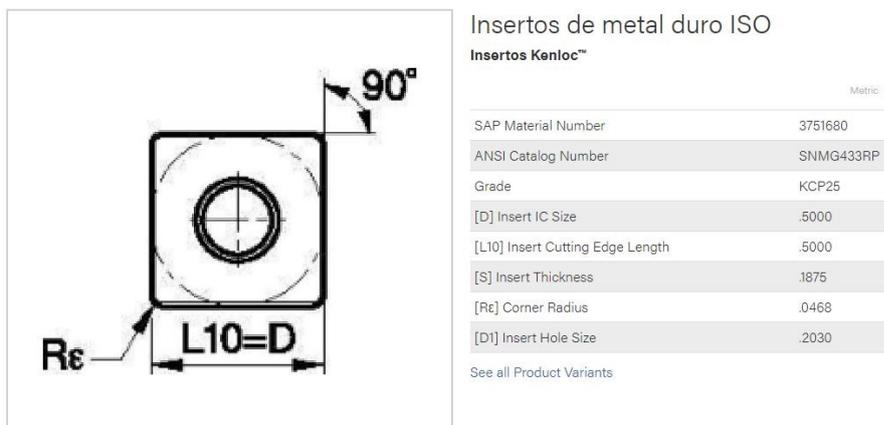
### 3.2.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Tendo escolhido o material a ser ensaiado, outro objeto primordial no estudo é a ferramenta de corte. É proposto a utilização do inserto de geometria quadrada e fabricado em metal duro.

Como sugestão, a figura 16 mostra dois tipos de insertos que poderão ser utilizados. Ambos com a mesma geometria quadrada, mesma classe (P, indicada para usinagem de aços), com ângulo de folga de  $0^\circ$ , com tolerância de classe M ( $\pm 0,08$ - $\pm 0,18$  mm), com fixação no suporte por parafuso, quebra cavaco bifacial, seus tamanhos e espessuras também são iguais, 12,7 mm e 4,76 mm respectivamente. São fabricados do mesmo material. A diferença entre eles é seu fabricante, o raio de



**Figura 18 - Inseto SNMG433RP Kennametal.**



**Fonte: Kennametal, 2020.**

### 3.2.4 PORTA FERRAMENTAS

Para a utilização dos insertos citados é necessário um porta-ferramenta adequado. No suporte dos insertos sugeridos dois tipos diferentes de porta-ferramentas serão necessários. Na figura 19 e 20 é possível ver as características do suporte 01 e nas figuras 21 e 22 o suporte e características do suporte 2. Para a ferramenta de corte 01, da Mitsubishi Materials, o porta-ferramenta adequado é o PSBNR 2020 K12. Já para a ferramenta 02, da Kennametal, o porta-ferramenta adequado é o PSSNR 2020 K1. Ambos os suportes são fabricados em aço, tem tamanho de haste de 20 mm e comprimento útil de 125 mm.

**Figura 19 - Suporte de ferramenta PSBNR 2020 K12.**



**Fonte: Autoria própria, 2020.**

Figura 20 - Suporte de ferramenta PSBNR 2020 K12.

**FERRAMENTAS PARA TORNEAMENTO EXTERNO**  
**SUPORTES PARA INSERTOS SN**

**PSBN** Torneamento externo **Tipo LL**

Figura mostra suporte à direita.

Referência para Pedido	Estoque		Referência do Inserto	Dimensões (mm)						Calço	Pino do Calço	Mola da Alavanca	Alavanca	Parafuso	Chave
	R	L		H1	B	L1	L2	H2	F1						
<b>PSBNR/L1212F09</b>	●	●	0903	12	12	80	20	12	13	—	—	HLS2	LLCL13S	LLCS105	HKY23P
1616H09	●	●	SNMA 0903	16	16	100	22	16	13	LLSSN33	LLP23	—	LLCL13	LLCS106	HKY25P
<b>2020K12</b>	●	●	SNMG 1204	20	20	125	28	20	17	LLSSN42	LLP14	—	LLCL14	LLCS108	HKY30P
2525M12	●	●	SNMM 1204	25	25	150	25	25	22	LLSSN42	LLP14	—	LLCL14	LLCS108	HKY30P
2525M15	●	●	SNGA 1506	25	25	150	33	25	22	LLSSN53	LLP15	—	LLCL25	LLCS508	HKY30P
3232P19	●	●	SNGG 1906	32	32	170	40	32	27	LLSSN63	LLP16	—	LLCL16	LLCS310	HKY40P

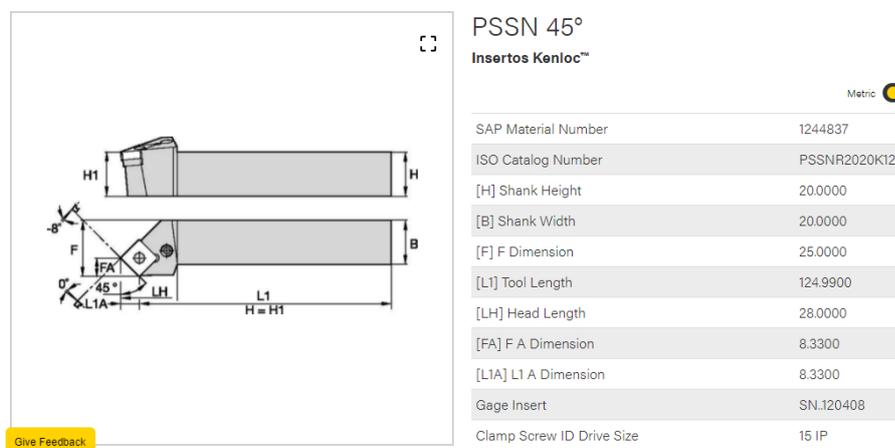
Fonte: Mitsubishi Materials, 2021.

Figura 21 - Suporte de ferramenta PSSNR 2020 K12.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

**Figura 22 – Características do suporte PSSNR 2020 K12.**



Fonte: Kennametal, 2021.

### 3.2.5 RUGOSÍMETRO

Para aferir o acabamento superficial deixado pela ferramenta de corte e obter parâmetros numéricos de rugosidade média aritmética para comparativo, é proposta a utilização de um aparelho aferidor de rugosidade média, o rugosímetro. Este aparelho é de fácil manejo e de grande praticidade. O laboratório de metrologia da UTFPR, campus Pato Branco dispõe de um aparelho, modelo TR220 da marca Time Group Inc. Verificando a rugosidade superficial posterior ao torneamento, será possível inferir sobre a influência de cada parâmetro do processo no resultado final. Na figura 23 é mostrado um aparelho Rugosímetro, modelo este presente na instituição UTFPR. A visualização da medição depois de aferida, é mostrada no visor do instrumento.

**Figura 23 - Rugosímetro TR220.**

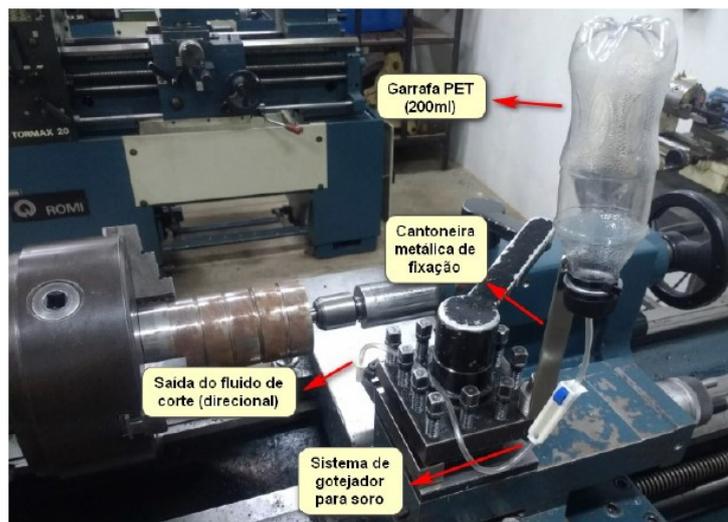
**Fonte: Gabriel Stockler, 2018.**

### 3.2.6 APLICADOR DE FLUIDO

Parte do ensaio é a avaliação da integridade superficial do corpo de prova usinado com a utilização de fluido de corte. Para isso é necessário um dispositivo que possibilite a incidência direta e controlada do fluxo de fluido na aresta de corte. Uma válvula controladora de vazão acoplada a um reservatório de fluido de corte e em um bocal direcionador de fluido possibilitará a realização do ensaio de maneira ideal, controlando a quantidade de fluido gotejado ou jorrado na aresta de corte e a direção do de incidência.

Uma sugestão de fácil acesso encontrada na bibliografia utilizada, é um dosador de soro hospitalar acoplado a uma pequena garrafa plástica fornecendo o fluxo controlado. Junto a isso um dispositivo de fixação do reservatório e válvula ao porta-ferramentas do torno utilizado, possibilitando o direcionamento da mangueira de fornecimento do fluido de corte. A figura 24 ilustra o modelo de dispositivo de fácil acesso.

**Figura 24 - Dispositivo de fornecimento de fluido de corte.**



**Fonte: Gabriel Stockler, 2018**

Para a avaliação e comparativo do uso dos fluidos de corte é interessante também utilizar e testar diferentes tipos de fluidos sintéticos, para diferentes aplicações e se possível variando as marcas disponíveis no mercado.

Três consagrados tipos de fluidos presentes no mercado são propostos como alternativas na comparação utilizando fluidos de corte, são: QUIMATIC 1 - Para a usinagem de todos os metais ferrosos e suas ligas, aço inox e metais amarelos. QUIMATIC 3 SUPER FLUIDO - Ideal para usinagem pesada e para metais de elevada dureza. QUIMATIC 11 - Fluido de corte integral sintético para todos os metais.

A bibliografia mostra que a utilização dos fluidos pode ser muito promissora na melhora do acabamento superficial, então o comparativo entre as formulações de mercado serão grandes complementos as estratégias propostas.

### 3.3 MÉTODOS

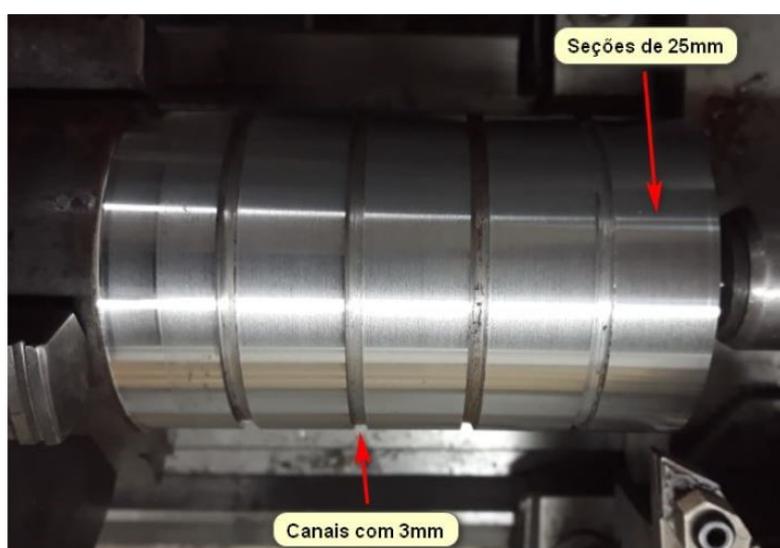
#### 3.3.1 USINAGEM DE AMOSTRAS

O tarugo disponibilizado para este estudo precisará inicialmente ser desbastado com comprimento útil maior que 150 mm e faceado de modo a normalizar suas medidas. Deve-se também fazer uso do dispositivo de contraponto do torno para evitar interferência de eventuais vibrações. Posterior a isso deve ser dividido em 5

sessões de 25 mm separadas entre si por canais com 3 mm de espessura. Essa forma de divisão visa criar um corpo de prova padronizado para realizar a usinagem com diferentes parâmetros. A faixa de medição escolhida, de 25 mm possibilita uma boa leitura posterior com o rugosímetro. O canal usinado tem tamanho suficiente a permitir uma comparação visual entre as diferentes amostras usinadas e as separa de forma que uma não interfere no resultado da outra.

A figura 25 mostra um exemplo de corpo de prova de usinagem utilizado em estudos anteriores para maior entendimento.

**Figura 25 - Exemplo de disposição do corpo de prova de usinagem.**



**Fonte: Gabriel Stockler, 2018.**

Na usinagem das amostras ensaiadas, deverá ser elencado diversos conjuntos dos parâmetros de: Profundidade de corte  $A_p$  em mm; Avanço  $f$  em mm/rot e a frequência de operação dada em rotações por minuto. O conjunto de estratégias serão montadas sob os parâmetros possíveis no equipamento utilizado.

Quanto maior for a quantidade de amostras coletadas seguindo a mesma metodologia, maior será a qualidade dos dados interpretados.

O experimento deverá ser feito em parte sem a utilização de fluidos de corte, a seco, e também utilizando os fluidos. Possibilitando o comparativo posterior dos resultados.

Após a realização da usinagem da amostra, é feita aferição da rugosidade média com o rugosímetro calibrado para uma taxa de amostragem *cutoff* de 0,8 mm. Essa medida deve ser realizada longitudinalmente no mínimo três vezes, variando a

posição radial em  $120^\circ$  em cada medição, o resultado válido será a média aritmética dos três valores encontrados.

Antes da próxima bateria de amostras, o corpo de prova deve ser usinado novamente, com um passe de desbaste retirando a mínima porção de material possível, preparando o corpo de prova para os próximos conjuntos de parâmetros.

## 4 CONCLUSÕES

A escolha ideal de um fluido de corte aliada a uma boa estratégia de usinagem pode ajudar muito a reduzir custos, aumentar a velocidade de produção e melhorar o acabamento final do produto fabricado. A busca por um lubrificante ou refrigerante que se adéque ao processo, material e objetivo final é indispensável no processo de usinagem.

A literatura mostra que os resultados obtidos na usinagem sem a utilização de fluido de corte, quanto a acabamento superficial e produtividade, dificilmente são superiores as operações onde é utilizado algum tipo de fluido para refrigeração e lubrificação.

A busca por novos conhecimentos e pesquisas sobre o processo de usinagem representa produtividade, custo e margem de lucro. Produtividade que poderia estar sendo otimizada, custos que poderiam estar sendo reduzidos e a margem de ganho que poderia ser aumentada.

A proposta de experimento caracterizado neste estudo alcançou os objetivos propostos. Formulou-se um ensaio de usinabilidade; reuniu-se a pesquisa bibliográfica pertinente e fomentou a busca constante por conhecimento técnico e metodológico sobre o processo de fabricação por usinagem.



## REFERÊNCIAS

BAYER. **Ciência dos Materiais**, 2020. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Ciencia-dos-Materiais/Classificação\%20dos\%20aços.pdf>>. Acessado em: 30 de setembro de 2020.

BLACK, T. J. **Introduction to machining processes**. Metals handbook machining. 9. ed. New York, ASM International, 1995.

CAD.CURSOSGURU. **Operações de torneamento**. Disponível em: <<https://cad.cursosguru.com.br/tipos-de-operacao-de-torneamento>>. Acessado em: 25 de setembro de 2020.

CARUSO, **Informações gerais sobre os aços**. Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo - CEFET/SP. São Paulo, 2001.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

COELHO; DA SILVA. **Materiais para ferramenta de corte em usinagem**. Universidade de São Paulo - USP, 2018

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

FERRARESI. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970

GGD METALS. **Aços construção mecânica**. Catálogo Técnico. São Paulo. 2018.

IGUAFER. **Influências dos elementos químicos nos aços**. Disponível em: <<http://www.iguafer.com.br/influencias.php#:~:text=NIQUEL\&text=O\%20Níquel\%20C\%20quando\%20ligado\%20com,é\%20elemento\%20formador\%20de\%20carbonetos>>. Acessado em: 25 de setembro de 2020.

MUMMERY, L. **Surface texture analysis - The handbook**. Hommelwerke GmbH, 1992.

NAKAYAMA, K. et al. **Relationship between cutting forces, temperature, builtup edge and surface finish**. Annals of CIRP, v. 14, 1966.

KENNAMETAL. **Inserto SNMG433RP.** Disponível em: <<https://www.kennametal.com/pt/pt/products/p.3751680.html>>. Acessado em: 02 de outubro de 2020.

MACHADO et al. **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2009.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting.** 4. ed. Butterworth Heinemann, 2000.

TELES, J.M.; FERREIRA, J.R. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro.** Itajubá, 105 p. 2007

PASIFER. **Aços de construção mecânica 8640.** Disponível em: <<https://www.pasifer.com.br/noticias/acos-construcao-mecanica-aco-ligado--sae-8640.>> Acessado em: 25 de setembro de 2020.

RODRIGUES, Alessandro Roger. **Estudo da Geometria de Arestas de Corte com Altas Velocidades de Corte.** 2005. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SALES, W. F.; GUIMARÃES, G.; MACHADO, A. R. **Avaliação do desempenho dos fluidos emulsionável e integral no torneamento do aço ABNT 8640.** Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Minas Gerais, 2016.

SANDVIK COROMANT; **Manual Técnico de Usinagem.** Manual impresso por: SANDVIK COROMANT. 2010.

SOLOSTOCKS. **Torno Romi Tornomax 20.** Disponível em: <<https://www.solostocks.com.br/venda-produtos/outra-maquinarria/torno-universal-tornomax-20-20a-321476.>> Acessado em: 02 de outubro de 2020.

YURGEL, C. C; **Substituição do processo de usinagem pelo processo de forjamento a quente na fabricação da pré-forma de brocas de furação de rochas.** Dissertação de mestrado. PPGEM - UFRGS, 2007.



