

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

ANDRESSA MAYARA DEVERAS

**ESTUDO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO DO AÇO
AISI 8640 COM FERRAMENTAS ALISADORA E CONVENCIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

ANDRESSA MAYARA DEVERAS

**ESTUDO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO
TORNEAMENTO DO AÇO AISI 8640 COM FERRAMENTAS
ALISADORA E CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira.

Orientador: Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima

PATO BRANCO

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 8640 COM FERRAMENTAS ALISADORA E CONVENCIONAL

Andressa Mayara Deveras

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 30/11/2016 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. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. MsC. Cicero Gallina Aguiar
(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

DEDICATÓRIA

À memória da minha avó Milania Deveras, pelo incentivo e capacidade de acreditar e investir em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós Milania e Arthur, meu pai Antonio, irmãos Nicolas e Anthony e minha madrasta Sueli, que fizeram todos os esforços possíveis para que eu pudesse concluir esta caminhada, pois, sem vocês nada disso seria possível. Agradeço também a minha companheira Natalia, por toda a sua paciência e incentivo durante esse processo.

Meus profundos agradecimentos ao professor Fabio Lima, que me deu suporte e apoio para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

*Living is easy with eyes closed
Misunderstanding all you see
It's getting hard to be someone
But it all works out*

It doesn't matter much to me. (Strawberry Fields Forever, John Lennon, 1967).

Viver é fácil com os olhos fechados
Sem entender tudo o que você vê
Está ficando difícil ser alguém
Mas tudo funciona bem

Isso não me importa muito. (Strawberry Fields Forever, John Lennon, 1967).

RESUMO

DEVERAS, Andressa Mayara. Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadora e convencional. 2016. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Os processos atuais de usinagem visam associar os melhores parâmetros de usinagem com a ferramenta mais adequada, mantendo o controle sobre o estado da superfície usinada. Esta pesquisa apresenta um estudo comparativo entre as ferramentas de corte convencional (standard) e alisadora (wiper) no torneamento do aço AISI 8640. Foram utilizados diferentes parâmetros de corte para avaliar a qualidade da superfície gerada, de forma que se determine a melhor combinação dos parâmetros de usinagem, com o objetivo de otimizar processos de fabricação e minimizar as rugosidades geradas na superfície das peças. Os resultados experimentais comprovam a eficiência da ferramenta wiper em relação a ferramenta standard em gerar ótimos acabamentos superficiais, mostrando que sua utilização pode aumentar de forma significativa a produção, sem que seja perdida a qualidade superficial em operações com taxas de avanço elevadas.

Palavras-chave: Torneamento. Aço AISI 8640. Rugosidade. Acabamento superficial. Ferramenta alisadora.

ABSTRACT

DEVERAS, Andressa Mayara. Study of the surface roughness in turning AISI 8640 steel with wiper and standard tools. 2016. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Current machining processes wish to associate the best machining parameters with the most appropriate tool, maintaining control over the state of the machined surface. This research presents a comparative study between standard and wiper tools in AISI 8640 steel turning. Different cutting parameters were used to evaluate the quality of the surface generated, in order to determine the best combination of machining parameters, with the objective of optimizing the roughness generated on the surface of the parts. The experimental results confirm the efficiency of the wiper tool in relation to the conventional tool in generating excellent finished surface, showing that its use can significantly increase production without losing surface quality in operations with high feed rates.

Keywords: Turning. AISI 8640 Steel. Roughness. Surface finish. Wiper.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 USINAGEM DOS MATERIAIS	14
2.2 OPERAÇÕES DE USINAGEM.....	15
2.3 GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE CORTE	16
2.3.1 Movimentos	16
2.3.2 Velocidades	16
2.3.3 Grandezas de corte	18
2.4 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	18
2.4.1 Sistemas de referência	20
2.4.1.1 Planos do sistema de referência da ferramenta	20
2.4.1.2 Ângulos do sistema de referência da ferramenta	21
2.4.2 Funções e influência dos principais ângulos da cunha cortante	22
2.5 FORMAÇÃO DE CAVACOS	23
2.5.1 Classificação dos cavacos	25
2.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL	25
2.7 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA	27
2.7.1 Sistemas de medição de rugosidade e de ondulação	31
2.8 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO.....	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	35
3.2 MATERIAIS	35
3.2.1 Equipamentos Utilizados	35
3.2.2 Insertos	37
3.2.3 Suportes	38

3.3 MÉTODOS	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O metal vem sendo utilizado desde o início dos tempos por conta de sua capacidade de se transformar em diversos objetos que atendam às necessidades do ser humano. A metalurgia se iniciou quando o homem, com o fogo, fundiu os minérios para extrair metal. Começou então a aquecê-los e derretê-los com o objetivo de dar-lhes um novo formato. A partir disso, começaram a ser observadas as diferenças nas propriedades dos metais durante a sua solidificação, podendo assim gerar uma gama quase que infinita de combinações de materiais e métodos distintos de solidificação para obtenção de materiais com propriedades mecânicas diferentes.

Com o passar do tempo e com as novas tecnologias surgindo, o homem iniciou vários estudos, para que fosse possível criar novas alternativas para conseguir formatos de peças e equipamentos que atendessem suas necessidades. Objetos feitos de metal se tornaram cada vez mais comuns e com isso surge a necessidade de novas técnicas de processamento. Dentro dos campos da indústria metal mecânica destacam-se os processos de deformação plástica, soldagem, fundição e usinagem.

A indústria metal mecânica ou indústria metalúrgica atua na transformação de metais em produtos para a indústria em geral, produção de bens, sendo estas máquinas, equipamentos, peças para veículos, materiais de transporte, entre muitos outros. Por sua grande importância, a qualidade das peças produzidas deve atender a requisitos mínimos de qualidade e segurança, o que, através de pesquisa e testes específicos, pode ser garantida.

Durante o processamento de metais, mais especificamente na usinagem, surgem vários problemas que podem afetar drasticamente a qualidade, vida útil e segurança das peças produzidas. Para garantir que um determinado componente exerça sua função da melhor maneira possível, todas as suas especificações técnicas de produção devem ser seguidas a rigor (GEIER, MELLO e SOUZA, 2011).

Durante os processos de usinagem, busca-se que as peças tenham características dimensionais e geométricas necessárias à sua aplicação, tal como a rugosidade superficial, que tem grande influência sobre a qualidade final da peça. O tipo de material e os parâmetros de usinagem, estão direta ou indiretamente ligados com a qualidade final da superfície usinada. Quando os parâmetros são escolhidos equivocadamente, falhas como desgaste prematuro ou quebra da ferramenta podem

ocorrer, além das perdas econômicas (tempo de troca de ferramenta), peças não conformes ou redução na qualidade da superfície (THOMAS, 1999).

A qualidade superficial é de extrema importância para algumas aplicações específicas, sendo assim, a mesma deve ser garantida pelo processo de usinagem. Porém, devido a utilização de parâmetros incorretos, surgem alguns problemas relacionados ao acabamento. Por exemplo, as irregularidades que possam surgir na superfície usinada podem ser consideradas concentradoras de tensões, que favorecem o surgimento e propagação de trincas, que podem levar a ruptura do material. Desta forma, uma superfície com baixa rugosidade limita o risco de inicialização e propagação das trincas, o que contribui para um aumento da vida útil da peça (DAVIM, 2008).

A qualidade do acabamento superficial de uma peça não implica somente na aplicação mecânica em que esta estará inserida, mas também no desgaste de ferramentas, formação de rebarbas, alteração da microdureza, micro ou macro trincas e tensões residuais. Quando o acabamento superficial não atende as especificações do projeto, algumas propriedades mecânicas e fatores da construção do equipamento podem ficar prejudicadas, tais como acoplamento entre componentes, elementos de vedação, coeficiente de atrito, aparência, custo, entre outros (THOMAS, 1999).

A medida da rugosidade da superfície acabada da peça nada mais é do que um parâmetro de controle de processo de usinagem, pois a mesma depende de parâmetros como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e operação de usinagem. Sabendo a medida da rugosidade então é possível que se tenha um processo mais controlado, evitando assim erros de fabricação (MACHADO *et al.*, 2009).

A taxa de desgaste de ferramentas de corte pode ser um fator negativo no processo de produção. Quando essa taxa é estudada e controlada corretamente, a produção tende a aumentar. Por mais que o valor das ferramentas de corte seja relativamente baixo e influencie pouco no custo total de produção de uma peça, pois desta forma haverá menos paradas de máquina para troca de ferramenta e com isso obtém-se uma produção mais efetiva (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Com os avanços tecnológicos que priorizam a maximização da produtividade e ao mesmo tempo atender as especificações dos produtos usinados, pode-se destacar o desenvolvimento e a aplicação das ferramentas de corte alisadoras (*wiper*). Quando comparadas com as ferramentas convencionais

(*standard*), a utilização das ferramentas alisadoras apresentam maior produtividade, melhor acabamento usinado e uma maior vida da ferramenta (SANDVIK, 2005).

Dependendo da disponibilidade de ferramentas e materiais, os parâmetros de corte podem ser grandes ou pequenos, isso, levando-se em consideração a taxa de remoção de material e o acabamento da superfície usinada.

Desta maneira, pode-se dividir as operações de corte em desbaste e acabamento. Em operações de desbaste não existem grandes preocupações quanto ao acabamento superficial, pois aqui o objetivo é que a taxa de remoção de material seja elevada durante uma dada vida da ferramenta. Já nas operações de acabamento, objetiva-se melhores qualidades superficiais, dimensionais e geométricas da peça. Como uma regra geral para acabamentos, faz-se uma combinação de um avanço que seja o menor possível e que a profundidade de corte seja pequena, com uma alta velocidade de corte, fazendo com que se tenha a geração de uma quantidade razoável de cavaco na unidade de tempo, sem que haja influência da vibração na remoção do sobrematerial da peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Com os recentes avanços que priorizam a maximização da produtividade, que atendam as especificações do produto usinado, é possível citar o desenvolvimento e aplicação das ferramentas de corte alisadoras (*wiper*), que, quando comparadas a ferramentas de ponta convencional (*standard*), apresentam-se muito mais vantajosas e isso se dá por conta da produtividade, melhor acabamento usinado e maior vida da ferramenta (GEIER, MELLO e SOUZA, 2011).

Nesse trabalho, através da variação de ferramentas de corte, velocidade de corte, profundidade de corte e rotação, é pretendido encontrar a forma mais eficiente de fazer o acabamento superficial de peças de aço 8640, utilizadas para produção de maquinário de serraria. As peças são parte de um equipamento produzido pela empresa Vantec, localizada em Xanxerê – SC e vem sofrendo problemas de acabamento superficial.

Em virtude da carência de estudos de usinagem do aço AISI 8640, tanto como a comparação entre o desempenho das ferramentas alisadoras (*wiper*) e convencionais (*standard*), o presente estudo tem como principal objetivo fazer avaliações comparativas das rugosidades geradas por estas ferramentas para o aço AISI 8640.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é fazer um comparativo entre as ferramentas de corte de metal duro com as geometrias *wiper* (alisadora) e *standard* (convencional) no processo de torneamento e acabamento do aço AISI 8640, além dos parâmetros de processo como avanço, profundidade de corte e a influência da destes nas rugosidades geradas durante usinagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A usinagem, que é o foco deste trabalho, consiste na retirada de material de uma peça para conferir-lhe forma, acabamento, fazer furos, reentrâncias. Por ser um processo que apresenta situações imprevisíveis certos parâmetros devem ser controlados para que seja possível operar nas condições ideais de corte. Através da escolha correta dos parâmetros de usinagem é possível a obtenção de um melhor produto final, melhorando as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial, tanto quanto na máquina-ferramenta, pois quando a mesma recebe menos esforços durante a operação reduz-se as forças de usinagem.

O aço AISI 8640 é um aço de construção mecânica que possui alta resistência mecânica, alta tenacidade (impacto necessário para levar um material a ruptura), boa usinabilidade, baixa soldabilidade e alta temperabilidade. Com tratamento térmico as propriedades desse aço podem ser melhoradas. Por ser um aço de médio carbono e baixa liga, ele possui características mecânicas e metalúrgicas que outros aços de baixa liga não possuem. É utilizado na fabricação de componentes mecânicos combinando elevada resistência mecânica e resistência a fratura.

2.1 USINAGEM DOS MATERIAIS

Segundo Machado *et al.* (2009) a usinagem é a operação que confere à peça forma, dimensões, acabamento e produz cavaco. O cavaco pode ser entendido como a porção de material que é retirada da peça pela ferramenta, possuindo como característica principal a forma geométrica irregular.

A usinagem é o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando milhões de pessoas (TRENT, 1985).

O processo de usinagem é fundamentalmente prático e possui um grande número de variáveis. Segundo Shaw (1984) seria praticamente impossível prever o desempenho durante a usinagem de metais. Porém, os estudos baseados nos processos de usinagem possuem grande importância, pois, cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e interpretado de maneira correta contribui de forma positiva para o entendimento do processo.

Conforme Black (1995), por ser o único processo de deformação plástica cuja restrição é oferecida pela ferramenta de corte e, além disso, envolve altas deformações combinadas com altas taxas de deformação, a variedade de opções para os parâmetros de entrada do processo resulta em infinitas combinações, sendo que existem apenas três maneiras de resolver tal complexidade: pela experiência adquirida, por sucessivas tentativas e erros ao longo do tempo ou por intermédio de modelos teóricos. Usualmente, nenhuma dessas maneiras é capaz de, sozinha, encontrar resultados satisfatórios. Sendo assim, é recomendado que se use a combinação de uma, duas ou até mesmo das três abordagens.

2.2 OPERAÇÕES DE USINAGEM

Dependendo da geometria da ferramenta de corte escolhida, pode-se executar tarefas distintas no torneamento. As operações apresentadas 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 (MACHADO *et al.*, 2009).

O desbaste, operação em que a peça é presa no torno e possui um movimento de rotação, enquanto que a ferramenta de corte é aproximada da peça com uma taxa constante ao longo do eixo da barra, cortando uma camada de metal, formando assim um cilindro ou superfície de perfil mais complexo (TRENT, 2004).

Segundo Trent (2004) a velocidade de corte é um dos parâmetros mais importantes que podem ser ajustados pelo operador, de modo a atingir as condições mais otimizadas de corte. A profundidade de corte é fixada dependendo do tamanho da barra e o tamanho final da peça a ser produzida.

O faceamento, também efetuado em um torno mecânico, gera uma superfície plana, perpendicular ao eixo de rotação, a partir da superfície para o centro ou do centro para fora. A profundidade de corte é medida na direção paralela ao eixo e sua alimentação na direção radial. Uma característica dessa operação é a velocidade de corte variando de forma contínua, onde a mesma se aproxima de zero quando em direção ao centro da barra.

2.3 GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE CORTE

2.3.1 Movimentos

Na usinagem para que se obtenha a superfície desejada é necessário que exista um movimento pertinente entre a peça e a ferramenta de corte. Esse movimento entre a peça e a aresta cortante é relativo e a peça é considerada estacionária. Os movimentos podem ser distintos entre os que causam a retirada de cavacos (movimento de corte, movimento de avanço e o movimento efetivo) e os que não causam a retirada de cavacos (movimento de aproximação, movimento de ajuste, movimento de correção e o movimento de recuo) (MACHADO *et al.*, 2009). Cada movimento será explicado a seguir conforme Ferraresi (1977).

- a) Movimento de corte: ocorre entre a peça e a ferramenta, sendo que sem o movimento de avanço origina-se somente uma remoção de material durante uma volta ou um curso.
- b) Movimento de avanço: ocorre entre a peça e a ferramenta, que juntamente com o movimento de corte, origina uma retirada repetida ou contínua de cavaco, durante várias revoluções.
- c) Movimento efetivo de corte: é resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados em conjunto.
- d) Movimento de aproximação: é o movimento entre a peça e a ferramenta, com o qual a ferramenta, antes da usinagem, é aproximada da peça.
- e) Movimento de ajuste: é realizado entre a peça e a aresta de corte para que seja determinada a espessura do material que deve ser retirado.
- f) Movimento de correção: é o movimento que faz a correção entre a peça e a ferramenta, no qual compensa-se o desgaste da ferramenta.
- g) Movimento de recuo: é realizado entre a peça e a aresta de corte, no qual a ferramenta se afasta da peça após ser feita a usinagem.

2.3.2 Velocidades

Segundo Machado *et al.* (2009) existem também velocidades envolvidas no processo de usinagem, sendo elas a velocidade de corte, a velocidade de avanço (v_f) e a velocidade efetiva de avanço (v_e).

Machado *et al.* (2009) define a velocidade de corte (v_c) como a velocidade imediata na aresta cortante da ferramenta, levando-se em consideração a direção e o sentido de corte. Para processos com movimentos de rotação, pode ser calculada pela Equação 1.

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

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta em milímetros (mm)

n = número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de avanço (v_f) é definida por Machado *et al.* (2009) como sendo a velocidade imediata na aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço. Pode ser calculada pela Equação 2.

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

Onde:

f = avanço em milímetros por revolução (mm/rev)

n = número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de corte (v_e), conforme Machado *et al.* (2009), é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido efetivo de corte. É calculada vetorialmente conforme mostra a Equação 3.

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad (3)$$

Machado *et al.* (2009) explica que para que seja feita a seleção das velocidades de corte e de avanço (e como resultado da velocidade efetiva) mais adequadas deve-se levar em consideração a operação de usinagem e o material da ferramenta e da peça. Também é necessário observar e acertar as velocidades de aproximação, de ajuste, de correção e de recuo. Mesmo que esses movimentos não façam retirada de cavaco, se tornam importantes em máquinas comandadas numericamente, visto que quando esses valores são elevados contribuem para a redução do tempo total de fabricação da peça.

2.3.3 Grandezas de corte

Ferraresi (1977) caracteriza as grandezas de corte como ajustes feitos na máquina que contribuem direta ou indiretamente para a retirada de cavaco. O avanço (f) é o percurso de avanço em cada volta (mm/rev) ou em cada curso ($mm/golpe$). A penetração de trabalho (a_p) é representada pela penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço.

2.4 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

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).

Segundo Coppini, Diniz e Marcondes (2003) as ferramentas de usinagem apresentam algumas partes construtivas, sendo elas: parte de corte, cunha de corte, superfície de saída ($A\gamma$), superfície principal de folga ($A\alpha$). Sendo a mais importante delas a cunha de corte, que é a parte da ferramenta onde origina-se o cavaco, isso por conta do movimento relativo entre a peça e a ferramenta (FERRARESI, 1977).

Machado *et al.* (2009) define as partes construtivas da ferramenta de corte da seguinte maneira: a superfície de saída ($A\gamma$) é a superfície da cunha de corte onde o cavaco se move, sendo a superfície de folga a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem. Podem ser diferenciadas as superfícies principal de folga ($A\alpha$) e a superfície secundária de folga ($A\alpha'$). O cavaco se forma então pelo movimento relativo entre a peça e a ferramenta, pela ação da cunha de corte, composta pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta.

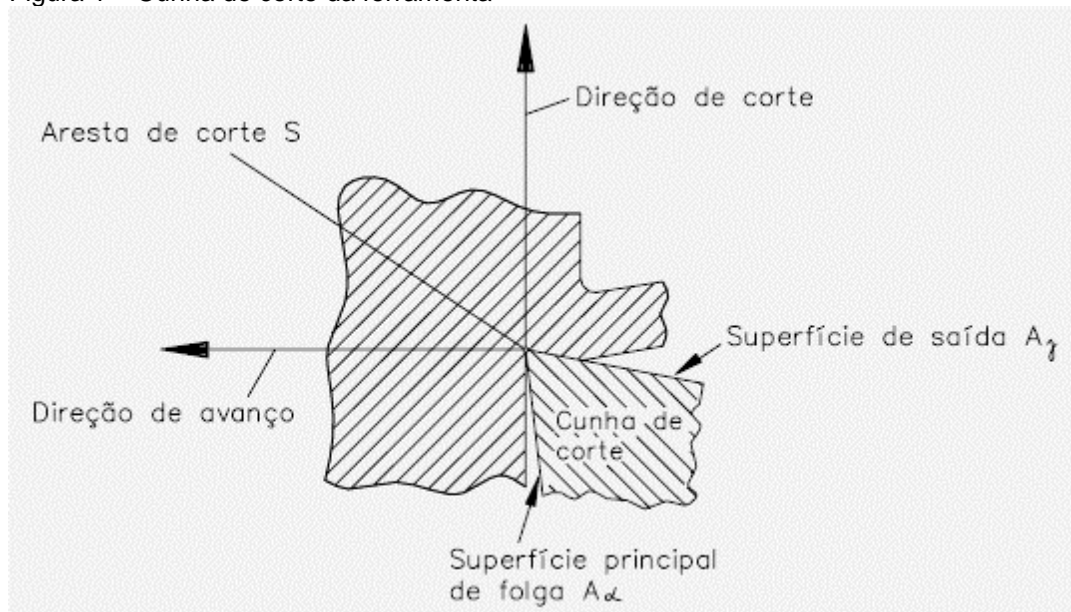
As arestas de corte são definidas por Machado *et al.* (2009) como a intersecção entre as superfícies de saída e de folga. É necessário que se faça uma distinção entre a aresta principal de corte (S) da aresta secundária de corte (S'). A aresta principal de corte (S) é aquela em que a cunha de corte, quando observada do plano de trabalho, com um ângulo da direção de avanço (φ) igual a 90° , indica a direção de avanço. A aresta secundária de corte (S') é aquela cuja cunha de corte,

observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço (φ) igual a 90° , indica a direção contrária à direção de avanço.

A ponta de corte é onde ocorre a intersecção das arestas principal e secundária de corte, de forma que o ponto de corte escolhido serve de referência para que as superfícies e ângulos da cunha de corte sejam determinados, ou seja, as definições referem-se a um ponto arbitrário da ferramenta, que pode ser denominado como o “ponto de corte escolhido” ou “ponto de referência” (MACHADO *et al.*, 2009).

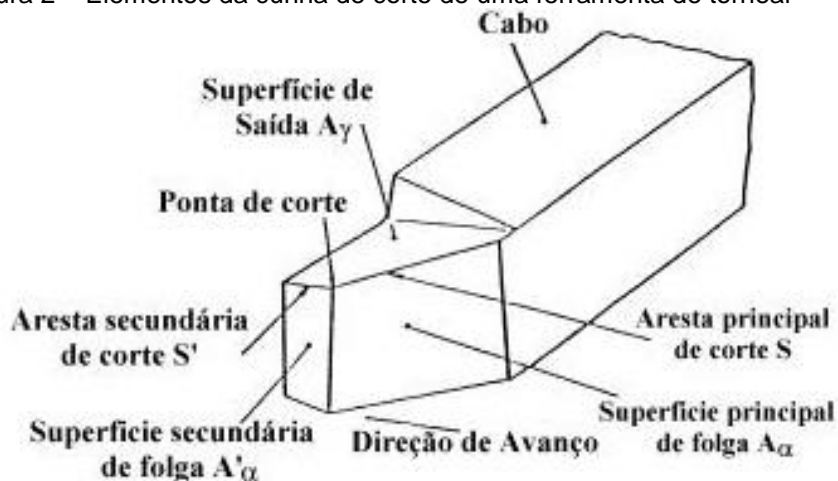
A Figura 1 representa os elementos da cunha cortante de uma ferramenta de corte qualquer, enquanto que a Figura 2 mostra uma ferramenta de tornear.

Figura 1 – Cunha de corte da ferramenta



Fonte: Machado *et al.* (2009)

Figura 2 – Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de tornear



Fonte: Machado *et al.* (2009)

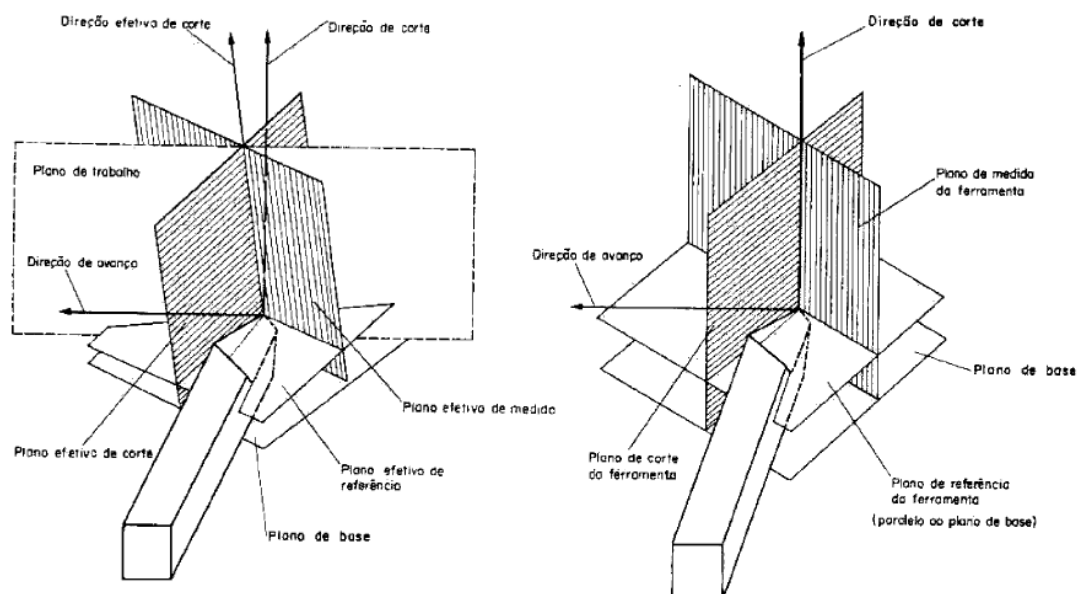
2.4.1 Sistemas de referência

Para que seja feita a determinação dos ângulos na cunha de corte é necessário que seja empregado um sistema de referência. Geralmente são empregados dois sistemas para o estudo dos ângulos da ferramenta e dos ângulos efetivos de trabalho, que são o sistema de referência da ferramenta e o sistema efetivo de referência. O sistema de referência da ferramenta é utilizado para a determinação da geometria da cunha de corte durante as etapas de projeto, execução e controle da ferramenta. Já o sistema efetivo é necessário para que se possa determinar a cunha de corte da ferramenta durante o processo de usinagem. Além desses também pode utilizar-se de outro sistema de referência para o posicionamento da ferramenta em relação à máquina (MACHADO *et al.*, 2009).

2.4.1.1 Planos do sistema de referência da ferramenta

A seguir são apresentados os principais planos existentes no sistema de referência da ferramenta e que são essenciais para determinar os ângulos da cunha de corte. É importante recordar que o “ponto de referência”, que é o ponto arbitrário escolhido mencionado anteriormente. A Figura 3 mostra duas vistas em perspectiva dos planos localizados no sistema de referência da ferramenta.

Figura 3 – Sistema efetivo de referência de uma ferramenta de torno e sistema de referência da ferramenta de torno



Fonte: Ferraresi, 1977

Ferraresi (1977) define os planos de referência da seguinte maneira: o plano efetivo de referência é um plano perpendicular à direção efetiva de corte, passando pelo ponto de referência (Figura 3); o plano de referência da ferramenta é um plano que passa pelo ponto de referência e é perpendicular à direção de corte, mas é orientado segundo um plano, eixo ou aresta da ferramenta.

Para Machado *et al.* (2009) existem dois planos de corte: o principal e o secundário. O plano de corte principal da ferramenta é tangente à aresta de corte e perpendicular ao plano de referência da ferramenta. O plano de corte secundário da ferramenta é tangente à aresta secundária de corte e perpendicular ao plano de referência, sendo que ambos passam pelo ponto de referência.

Ferraresi (1977) define o plano de medida como sendo um plano perpendicular ao plano de corte e perpendicular ao plano efetivo de referência ou plano de referência da ferramenta.

O plano de trabalho é perpendicular ao plano de referência e paralelo à direção admitida de avanço. É escolhido para que fique o mais paralelo ou perpendicular possível a uma superfície ou eixo da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

2.4.1.2 Ângulos do sistema de referência da ferramenta

Machado *et al.* (2009) afirma que os ângulos da cunha cortante são destinados à determinação e da forma da cunha da ferramenta. Os mesmos se agrupam de acordo com o plano em que estão localizados, em ângulos medidos no plano de referência, no plano de corte e no plano ortogonal.

Ferraresi (1977) divide os ângulos de referência de acordo com os planos, como mostrado a seguir:

- a) Ângulos medidos no plano de referência: O ângulo de posição X_r é o ângulo entre o plano de corte e o plano de trabalho, medido no plano de referência, sempre é positivo e situa-se fora da cunha de corte, de forma que seu vértice marca a ponta de corte. Quando não há nenhuma ponta de corte o lugar do ângulo é fixado em particular. O ângulo de ponta ε_r é o ângulo entre os planos de corte (planos principal e lateral de corte), medido no plano de referência.

- b) Ângulos medidos no plano de corte: O ângulo de inclinação λ é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência, sendo este medido no plano de corte. O vértice do ângulo de inclinação indica a ponta de corte.
- c) Ângulos medidos no plano de medida da cunha cortante: O ângulo de folga α que também é chamado de ângulo de incidência, é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte, medido no plano de medida da cunha cortante. O ângulo de cunha β é o ângulo entre a superfície de folga e a superfície de saída, medido no plano de medida da cunha cortante. O ângulo de saída γ é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de medida da cunha cortante.

2.4.2 Funções e influência dos principais ângulos da cunha cortante

Segundo Machado *et al.* (2009) cada um dos ângulos que foi descrito anteriormente possui uma função durante o corte e, desta forma, seu valor deve ser cuidadosamente determinado. A influência de cada um desses ângulos é descrita a seguir.

O ângulo de posição (X_r): varia de 45° a 95° e tem as funções de distribuir as tensões de corte de forma favorável no início e fim do corte e influenciar na direção e saída do cavaco. Também induz uma força passiva na ferramenta e, por consequência, na máquina-ferramenta. É o principal causador da flexão em peças muito esbeltas na operação de torneamento cilíndrico externo.

O ângulo de ponta (ϵ_r) fica sendo definido dependendo da forma da ferramenta de corte, podendo assumir, por exemplo, 90° em insertos quadrados e 60° em insertos triangulares. Sua principal função é garantir a resistência da ponta da ferramenta e sua capacidade de dissipar calor.

O ângulo de inclinação (λ) normalmente varia de -11° a 11° e tem as funções de controlar a direção de saída do cavaco, proteger a aresta de corte da ferramenta contra impactos e diminuir vibrações (quando for positivo).

O ângulo de folga (α) normalmente varia de 5° a 20° e sua principal função é evitar que o atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Se seu valor for muito baixo, a cunha não irá conseguir penetrar de forma adequada na peça, fazendo a ferramenta perder a sua afiação rapidamente, por conta da grande geração

de calor. O acabamento superficial também pode ser prejudicado. No entanto, se o ângulo de folga for muito elevado, a cunha da ferramenta pode perder a resistência, podendo soltar pequenas lascas ou até mesmo quebrar. O valor desse ângulo possui grande dependência da resistência mecânica do material da ferramenta e da peça, quanto maior for a resistência mecânica, menor será o ângulo.

O ângulo de saída (γ) varia de -8° a 20° e influencia decisivamente na força e na potência necessária para o corte, sendo que o ângulo de saída menor será o trabalho de dobramento e o encruamento do material do cavaco. Com isso o acabamento da peça e temperatura de corte serão afetados. O valor do ângulo de saída irá depender da resistência mecânica do material da ferramenta e da peça, bem como a quantidade de calor gerado pelo corte e da ferramenta de avanço.

2.5 FORMAÇÃO DE CAVACOS

Um estudo minucioso do processo de formação do cavaco permite uma explicação científica de diferentes grandezas ligadas a usinagem dos metais, tais como, o desgaste da ferramenta, força de corte, aresta postiça de corte, entre outros (FERRARESI, 1977).

Para Machado *et al.* (2009) o estudo científico da formação de cavacos é a melhor base para o entendimento das variáveis envolvidas em todos os processos de usinagem, proporcionando, desta maneira, avanços significativos nos processos de usinagem, aperfeiçoamento das arestas de corte e materiais para ferramenta mais eficazes, permitindo a usinagem de vários tipos de materiais. O cavaco é formado em velocidades de deformação muito altas, com posterior ruptura do material da peça. De forma a obter-se um estudo mais detalhado, o processo é dividido em quatro eventos, sendo estes: recalque inicial, deformação e ruptura, deslizamento das lamelas e a saída do cavaco. As mesmas são comentadas a seguir, conforme Machado *et al.* (2009).

Recalque inicial: devido à penetração da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção do material é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.

Deformação e ruptura: o material pressiona de início, causando uma deformação elástica e, em seguida, uma deformação plástica, que aumenta até que

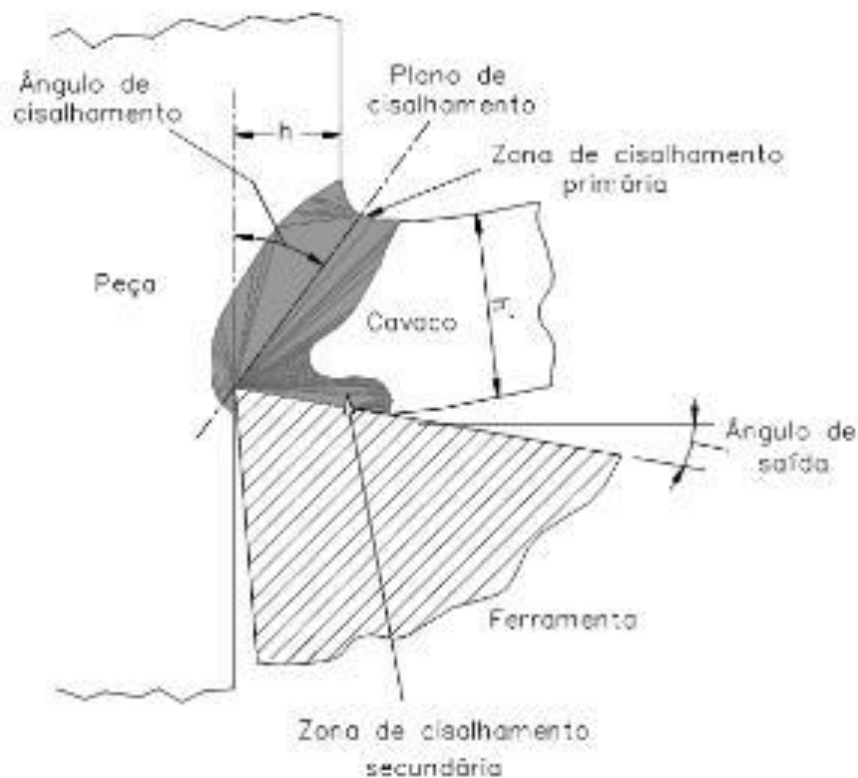
as tensões provoquem a ruptura. Essa ruptura se dá na grande maioria, por conta do cisalhamento.

Deslizamento das lamelas: com a penetração da ferramenta na peça continuando, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da extensão da propagação da trinca. Propriedades do material e condições de avanço e de velocidade de corte irão determinar o quanto o segmento de material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, dando origem a cavacos contínuos e descontínuos, dependendo da extensão e resistência da união entre as lamelas de material rompido.

Saída do cavaco: acontece devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, pois inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e rompida (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso ocorre, uma nova lamela de material está se formando e passando pelos mesmos processos, que também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo mais uma vez o fenômeno.

A Figura 4 mostra o processo de formação de cavaco.

Figura 4 – Mecanismo de formação de cavaco



Fonte: Machado *et al.* (2009)

2.5.1 Classificação dos cavacos

Como produto dos processos de usinagem, a parcela de material retirada da peça é feita em forma de cavacos. O formato destes pode oferecer riscos à peça, à máquina-ferramenta e ao operador (SANTOS, 2007).

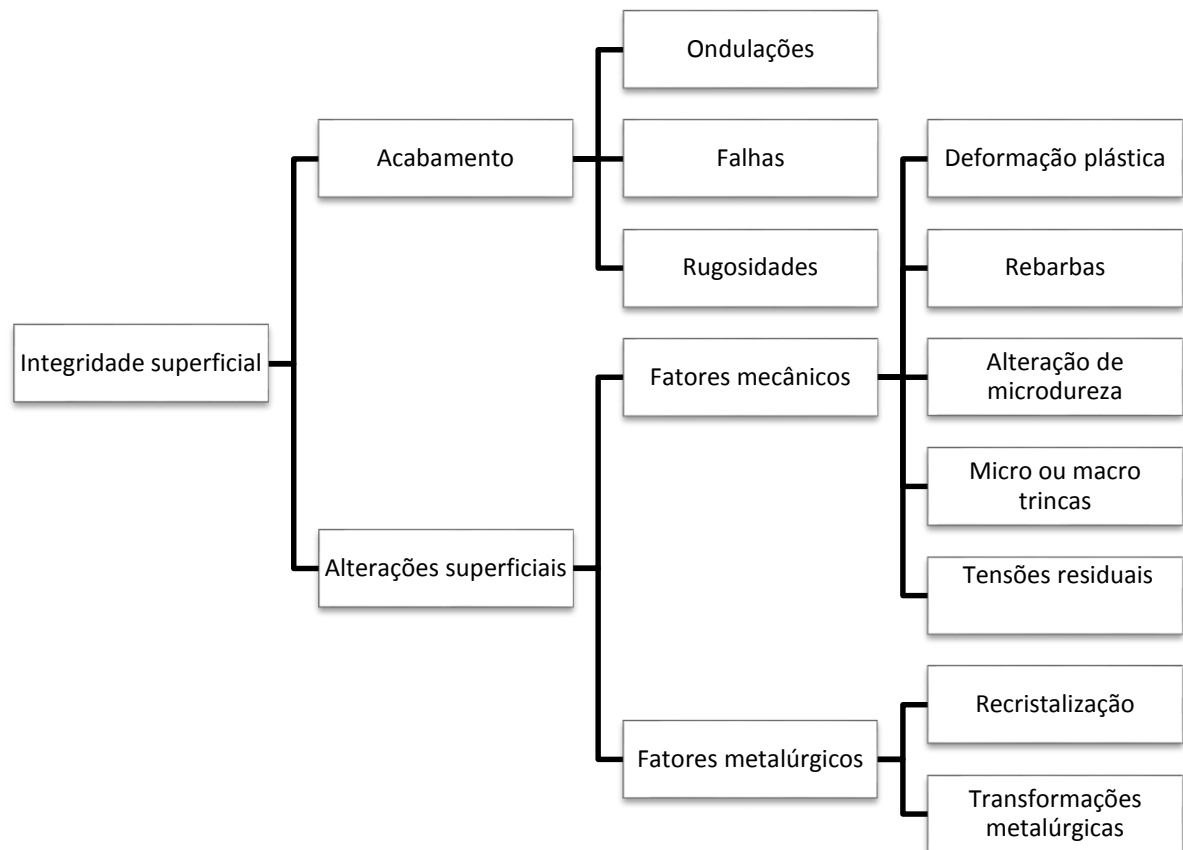
Machado *et al.* (2009) define os cavacos por sua morfologia, podendo estes serem contínuos, descontínuos e segmentados. Os cavacos contínuos geralmente são resultado da usinagem de materiais dúcteis, enquanto que os cavacos descontínuos surgem quando da usinagem de materiais frágeis.

2.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Machado *et al.* (2009) afirma que a condição final da superfície que foi usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais, ou até reações químicas. Dessa maneira, o termo integridade superficial é empregado para descrever a qualidade de uma superfície, incluindo um número grande de alterações sofridas por ela. Ou seja, o conceito de integridade superficial não pode ser definido apenas em uma dimensão e não compreende somente a textura da superfície ou a sua forma geométrica. O termo engloba também outras características da superfície e de camadas abaixo desta. A Figura 5 mostra alterações que podem acontecer em superfícies usinadas e suas classificações.

As superfícies podem ser classificadas em alterações na superfície (acabamento) e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperficiais) (MACHADO *et al.*, 2009).

Figura 5 – Classificação da integridade superficial



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2009)

O acabamento da superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas (SHAW, 1984). A exigência de acabamento de um determinado componente deve estar prevista em projeto, para que o mesmo possa executar as funções desejadas. Kalpakjian (2010) detalha alguns fatores que devem ser considerados na determinação do acabamento superficial, sendo elas:

- a) Grau de acoplamento entre componentes, como selos de mancais, elementos de vedação e moldes para injeção.
- b) Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação.
- c) Resistência à fadiga e à corrosão.
- d) Resistividade elétrica e térmica de contato.
- e) Processamento posterior (por exemplo, pintura).
- f) Aparência.
- g) Custo.

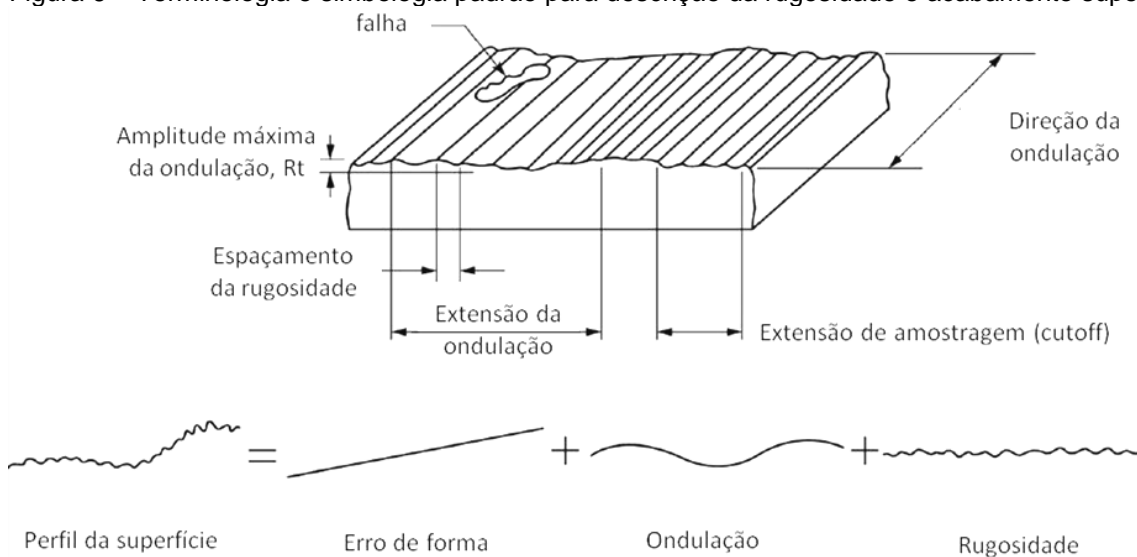
2.7 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

A rugosidade ou textura primária é formada por marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça, encontrando-se superposta ao perfil de ondulação. Essas marcas aparecem quando a máquina ferramenta está usinando um material com uma ferramenta de corte. Ainda é possível afirmar que a ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude, surgida por imprecisões de movimentos nos equipamentos. Essas ondulações podem ser caracterizadas por vibrações vindas da máquina ferramenta durante a usinagem. Os sulcos deixados pela ferramenta podem ser mensurados por diferentes parâmetros de rugosidade (NOVALSKI, 1994).

Segundo Bralla (1988), a habilidade das operações de usinagem para que se produza um acabamento específico dependem diretamente da ferramenta de corte, das características da peça, dos processos de usinagem, dos parâmetros de corte e do fluido de corte.

Segundo Kalpakjian e Schmid (2010), a textura obtida está relacionada com as irregularidades presentes na superfície de materiais sólidos e com as particularidades dos instrumentos de medição. A superfície é definida em termos de: rugosidade, ondulação, marcas e falhas, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Terminologia e simbologia padrão para descrição da rugosidade e acabamento superficial



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010).

Mesquita (1992) define o acabamento como um termo largamente utilizado para que seja designada a qualidade geral de uma superfície que foi usinada. O objetivo da usinagem é obter uma superfície técnica que apresente fatores superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) apropriados, afim de garantir segurança, confiabilidade e vida longa ao componente fabricado.

A rugosidade é gerada pelo processo de usinagem e não somente pela máquina. Conforme Machado *et al.* (2009), os fatores que contribuem com a geração de rugosidade são:

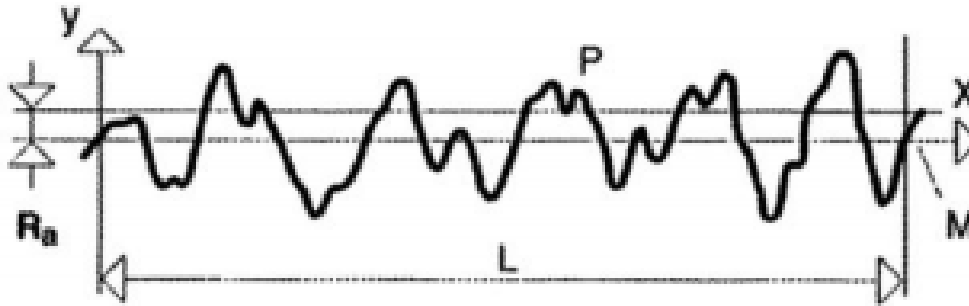
- a) Marcas da ponta da ferramenta ou de fragmentos da mesma, podendo apresentar natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros;
- b) Geração de rebarba do material durante a operação de usinagem;
- c) Restos de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície;
- d) Forma do quebra-cavaco na ponta da ferramenta.

De acordo com Geier, Mello e Souza (2011), a ondulação pode ser atribuída a características da máquina, tais como desbalanceamento do eixo, irregularidades do mecanismo de avanço, baixa rigidez, etc. Os erros de forma geralmente são causados por:

- a) Formato do quebra cavaco na ponta da ferramenta;
- b) Rigidez insuficiente no sistema de posicionamento e fixação (deformação do material de trabalho em função das forças de corte);
- c) Irregularidade no barramento utilizado para guiar a peça;
- d) Resíduos restantes no material, decorrentes de outros processos de fabricação anteriores, tais como tratamentos térmicos, conformação mecânica, fundição, soldagem, entre outros.

A rugosidade média R_a é o parâmetro que será utilizado para avaliar a textura da superfície usinada, que conforme a Norma ISO 4287 (2002), é o parâmetro utilizado internacionalmente para determinação da rugosidade. Segundo a norma, R_a corresponde a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $P(x)$ no comprimento da amostragem, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Rugosidade média R_a em perfil de superfície P em uma amostra de comprimento L .



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010).

Machado *et al.* (2009) define o parâmetro R_a como sendo a área entre o perfil de rugosidade e sua linha central, ou matematicamente à integral do valor absoluto da altura do perfil de rugosidade ao longo do comprimento (L) da amostra (Eq. 4). Já o parâmetro R_t (do inglês *Total Roughness*, que significa rugosidade total) é a altura total do perfil, que seria a soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale no comprimento avaliado (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010).

Para Geier, Mello e Souza (2001) quando se trata de insertos convencionais (*standard*), existem grandezas que afetam a rugosidade média obtida no torneamento, sendo elas: o avanço f (*mm/volta*) e o raio de quina r_ϵ (*mm*) da ferramenta de corte. A Equação 4 mostra uma relação entre estas grandezas:

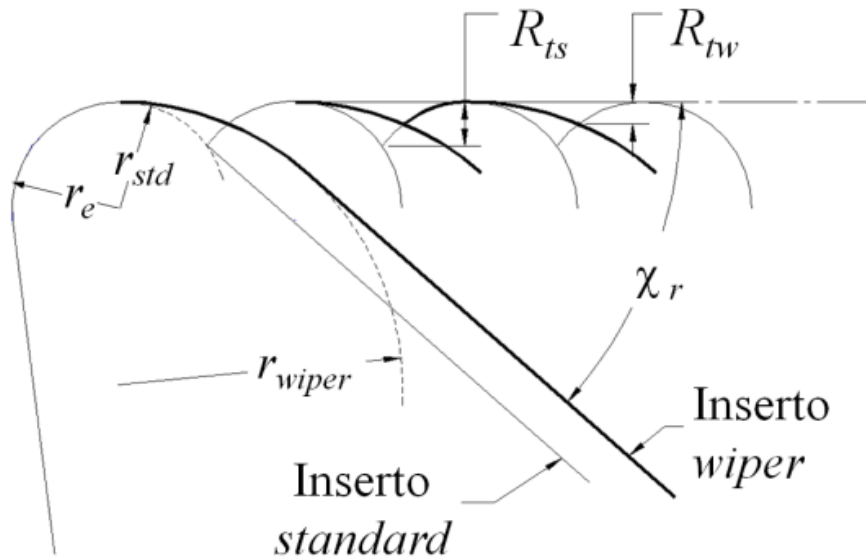
$$R_a = \frac{1000f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} = 32,075 \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (4)$$

Onde:

R_a = rugosidade média (μm).

Já as ferramentas com geometria alisadora (*wiper*), possuem melhor acabamento. Isso se deve ao fato de que as mesmas possuem arestas alisadoras em seus raios de quina, que ficam tangentes a superfície, proporcionando melhor acabamento durante a rotação da peça. Na figura a seguir é feita uma comparação da rugosidade gerada pelos insertos com geometria alisadora e convencional.

Figura 8 – Rugosidade teórica, em termos da rugosidade total, para insertos de geometria alisadora (*standard*) e convencional (*wiper*)



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010)

Na Figura 8, os parâmetros R_{ts} e R_{tw} representam respectivamente as rugosidades teóricas obtidas com insertos de geometria convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*). A maior extensão do parâmetro R_{ts} entre pico e vale depende do raio de quina do inserto $r_\epsilon = r_{std}$, do ângulo de posição χ_r e do avanço f da ferramenta. Para a ferramenta alisadora (*wiper*), a maior extensão de R_{tw} entre pico e vale será também dependente do raio de quina modificado r_{wiper} , sendo assim $R_{tw} < R_{ts}$.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |P(x)| dx \quad (5)$$

A rugosidade de uma peça manufaturada sofre influência de diversos fatores, desde o processo de fabricação até a geometria da ferramenta de corte utilizada, incluindo os parâmetros de corte. Diniz (2008), cita entre os parâmetros de corte, o avanço (f) e o raio de ponta da ferramenta (r_e), como os principais responsáveis pela qualidade do acabamento superficial, oferecendo, desta maneira, uma contribuição geométrica à rugosidade superficial da peça.

Segundo Machado *et al.* (2009) os parâmetros R_a e R_t podem ser calculados de forma teórica, sendo esses valores apenas indicativos, já que os valores reais são acrescidos de diversos fatores, como vibração, desgaste das arestas de corte, entre outros. No processo de torneamento, se o avanço (f) é menor que o raio

de ponta (r_e) da ferramenta, os valores de R_a e R_t são calculados, de forma aproximada pelas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$R_{a_{teórica}} = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_e} = \frac{f^2}{31,2r_e} \quad (6)$$

$$R_{t_{teórica}} = \frac{f^2}{8r_e} \quad (7)$$

Segundo Diniz (2008), quando o raio de ponta da ferramenta é aumentado a ponta da ferramenta torna-se mais resistente, porém, conseqüentemente, há um acréscimo da vibração da ferramenta devido ao aumento do atrito, que é causada pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça, afetando de forma negativa a rugosidade.

Para valores baixos da velocidade de corte (v_c), existe uma forte relação com a rugosidade média, devido à formação da aresta postiça de corte. Para velocidades de corte superiores a 100m/min a rugosidade média se torna praticamente estável em relação à velocidade de corte (FERRARESI, 1977).

Quando as condições de corte são mantidas constantes, na medida do possível, para cada operação específica (passe), a textura de uma superfície usinada pode ser considerada a mesma dentro de uma região relativamente grande. Assim, se o perfil da rugosidade for analisado em dois locais paralelos da superfície observado, somente pequenas diferenças serão observadas entre esses locais. Isso permite o controle e aprimoramento dos processos de usinagem objetivando uma textura superficial especificada através da medição de propriedades específicas da superfície usinada (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010).

2.7.1 Sistemas de medição de rugosidade e de ondulação

Para que seja feita a escolha do instrumento de medição para texturas superficiais, pode-se basear em informações técnicas presentes em normas técnicas. A ASME B46.1:2002 divide basicamente em três grupos de instrumentos de medição de textura superficial, que são: instrumentos com perfil completo, instrumentos com capacidade limitada de parâmetros e de perfil e instrumentos somente com parâmetros. Neste trabalho o instrumento utilizado é de perfil completo.

Os instrumentos que geram perfis completos podem ser diferenciados entre si pelo tipo de sensor de medição, que podem ser apalpadores, feixe de luz ou de elétrons. O instrumento utilizado para realização do trabalho possui apalpadores.

A maior parte dos instrumentos de medição de textura superficial baseia-se no princípio da identificação das irregularidades através do deslocamento do apalpador sobre a superfície em uma determinada velocidade e distância de análise. Um sinal elétrico é obtido e amplificado para produzir uma caracterização da textura superficial (DAGNALL, 1998).

Existem aspectos que podem provocar alterações no perfil filtrado, sendo que o comprimento de amostragem, normalmente chamado de *cut-off* é o mais importante deles. O termo *cut-off* é utilizado para especificar numericamente o comprimento da frequência de onda acima ou abaixo do qual uma das componentes da superfície (rugosidade ou ondulação) é eliminada. O *cut-off* também pode ser utilizado para caracterizar os filtros de perfil e fazer a determinação dos componentes de superfície (WHITEHOUSE, 2002).

Levando em consideração o fato de que o *cut-off* é capaz de filtrar os componentes de um perfil medido, sua escolha tem grande influência na obtenção adequada do perfil modificado, pois tem a finalidade de separar a rugosidade da ondulação. O *cut-off* deve ser selecionado com prudência para não misturar essas duas características (rugosidade da ondulação), pois caso isso ocorra, os resultados obtidos na medição podem ser distorcidos.

Para evitar a distorção dos resultados, utilizou-se como referência o procedimento estabelecido pela norma ISO 4288:1996, a qual descreve que deve ser feita uma medição preliminar na superfície, selecionando os parâmetros R_a , R_z e RS_m . Este procedimento determina se o perfil é periódico ou aperiódico e as condições de medição do perfil. Para a seleção do comprimento de amostragem deve ser levado em consideração o tipo de perfil e um parâmetro de rugosidade, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Comprimento da amostragem (*cut-off*) conforme normas técnicas

Perfis Periódicos	Perfis Aperiódicos		Comprimento de amostragem	Comprimento de Medição Unitário / total
Distância entre picos – S_m (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	l_e/l_m (mm)
>0,01 até 0,04	Até 0,01	Até 0,02	0,08	0,08/0,4
>0,04 até 0,13	>0,1 até 0,5	>0,02 até 0,1	0,25	0,25/1,25
>0,13 até 0,4	>0,5 até 10	>0,1 até 2	0,8	0,8/4
>0,4 até 1,3	>10 até 50	>2 até 10	2,5	2,5/12,5
>1,3 até 4	>50	>10	8	8/40

Fonte: ISO 4288:1996

Conforme a Tabela 1, o perfil apresentou-se como aperiódico, sendo que o parâmetro R_z encontra-se na faixa de 0,5 até 10 μm e R_a na faixa de 0,1 até 2 μm . Portanto o *cut-off* a ser utilizado para as medições de rugosidade é de 0,08mm.

2.8 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO

O aço AISI 8640 é um aço de médio carbono e baixa liga mais utilizado para fabricação de componentes mecânicos. Possui alta resistência mecânica, boa usinabilidade, alta tenacidade, elevada temperabilidade e baixa soldabilidade. Possui uma dureza superficial que varia entre 52 e 57 HRc. Com a nitretação suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas. Ele possui características próprias, não apresentadas por outros aços de baixa liga, pois o mesmo tem seus processos de fabricação controlados, garantindo o tamanho de grão austenítico, níveis de gases dissolvidos, grau de pureza, entre outros.

O aço AISI 8640 tem sua caracterização feita como um aço de baixa-liga, sendo que o mesmo contém Ni – Cr – Mo (níquel, cromo e molibdênio). Ele possui ótima temperabilidade e com pouca adição de elementos de liga consegue propriedades mecânicas muito boas. A composição química do aço AISI 8640 é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do aço AISI 8640

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
%	0,38-0,43	0,75-1	0,04	0,04	0,15-0,3	0,4-0,7	0,4-0,6	0,15-0,25

Fonte: Catálogo GGD Metals – Aços construção mecânica

O aço AISI 8640 é utilizado em componentes de sistemas mecânicos onde o aço AISI 1045 não pode ser utilizado por conta da sua capacidade de endurecimento, resistência à fadiga e à fratura. Pode ser utilizado na fabricação de rolamentos, buchas, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos, eixos furados, entre outros.

O aço AISI 8640 também é passível de tratamento térmico, sendo eles: recozimento, normalização e têmpera. O recozimento deve ser feito na temperatura próxima de 830°C por pelo menos uma hora para cada 25mm de material. O resfriamento deve ser feito no forno até 300°C e em seguida ao ar. A normalização deve ser feita na temperatura de aproximadamente 860°C por pelo menos uma hora para cada 25mm de material. O resfriamento deve ser feito naturalmente (ar) e em alguns casos pode-se utilizar resfriamento forçado. A têmpera deve ser feita levando o material até a temperatura de austenitização (840 a 860°C) por uma hora para cada 25mm de espessura. O resfriamento deve ser feito em óleo ou em polímero de têmpera.

3 METODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Aqui os procedimentos utilizados na realização do trabalho serão descritos, com o detalhamento de cada processo, materiais e equipamentos utilizados para desenvolver a pesquisa.

Algumas variáveis foram consideradas, sendo estas: a geometria da ferramenta de corte, a velocidade de corte e a influência da rugosidade gerada no acabamento superficial da peça usinada. Com a variação dos parâmetros de corte foi possível identificar o método mais eficiente para se alcançar os melhores resultados em relação ao acabamento superficial da peça final.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Equipamentos Utilizados

Os ensaios de torneamento foram realizados em um Torno Universal Romi Tormax 20A (Figura 9). Algumas de suas características são listadas a seguir.

O barramento do Torno Universal Romi Tormax 20A é de estrutura robusta, apresentando alta rigidez devido a sua construção de paredes duplas, internamente nervurado, possuindo suas guias dureza de aproximadamente 450 Brinell.

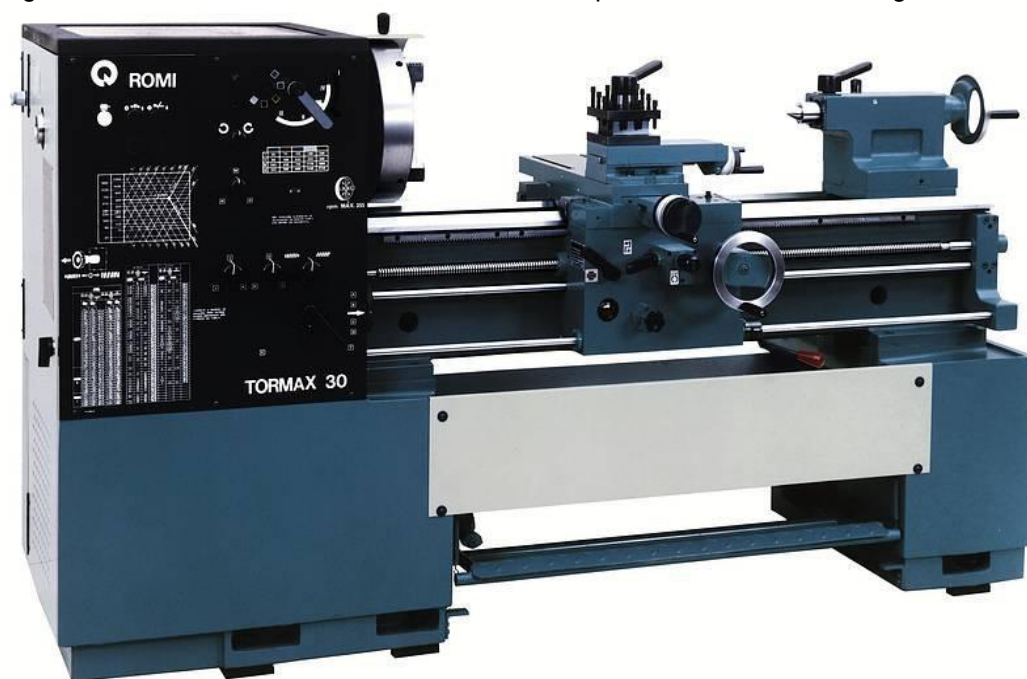
O carro transversal do Torno Universal Romi Tormax 20A cobre as guias da mesa em todo o comprimento. Possui sistema para eliminação de eventual folga no conjunto porca e fuso transversal. O porta-ferramentas com base giratória pode ser posicionado em qualquer ângulo para a execução de torneamentos cônicos. Com engrenagens de aço, não requer troca de engrenagens para passar de roscas métricas para polegadas, ou de Módulo para *Diametral Pitch*. Troca de engrenagens apenas na passagem de roscas Métrica e Polegada para roscas Módulo e *Diametral Pitch*.

O conjunto de freio do Torno Universal Romi Tormax 20A é composto por disco e pinças de tipo automobilístico, acionado hidraulicamente através de um pedal horizontal, interrompendo automaticamente a corrente elétrica do motor.

O Torno Universal Romi Tormax 20A possui cabeçote fixo com engrenagens e eixos temperados, retificados e balanceados dinamicamente, trabalhando em banho de óleo. Possui carcaça rígida aliada a um ótimo sistema de transmissão, proporcionando alta performance e longa durabilidade.

O Torno Universal Romi Tormax 20A também possui caixa de roscas e avanços que permitem diversas combinações para avanços e passos de roscas. Suas engrenagens e eixos são temperados e trabalham em banho de óleo, com lubrificação direcionada aos rolamentos. Seu avental é construído com engrenagens e eixos temperados trabalhando em banho de óleo. Apresenta suavidade para acionamento da alavanca dos avanços longitudinais e transversais. A porca utilizada nas operações de corte de roscas, quando acionada, recebe fluxo adicional de lubrificante.

Figura 9 – Torno convencional horizontal utilizado para os ensaios de usinagem



Fonte: Catálogo do fabricante Romi, linha Tormax

O rugosímetro utilizado é o TIME TR220. É um rugosímetro portátil para medição de rugosidade superficial, com ótima precisão. O mesmo é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Rugosímetro utilizado para medição da rugosidade nos ensaios de usinagem



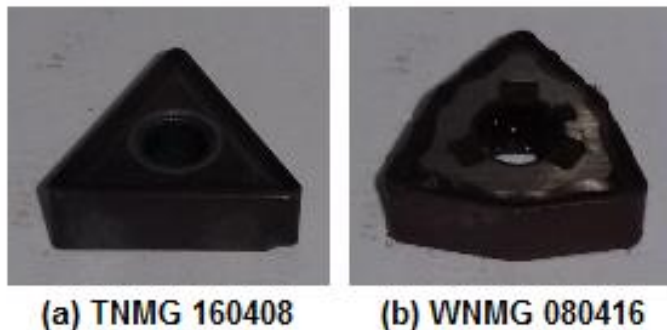
Fonte: Autoria própria

Para a medição da rugosidade ser feita, o sensor do rugosímetro TIME TR220 deve ser colocado sobre uma parte da superfície, onde se traça um percurso em uma taxa constante. Por meio do apalpador que fica na ponta do sensor, o mesmo mede a rugosidade da superfície, sendo que esta causa um deslocamento no sensor, resultando em uma mudança do valor indutivo nas bobinas internas do mesmo, que por sua vez gera um sinal analógico proporcional a variação da rugosidade superficial medida.

3.2.2 Insertos

Nos experimentos foram utilizadas pastilhas com formato triangular básico negativo (T-Max P). Uma sendo a ISO TNMG 160408, com raio de ponta $r_e = 0,8$ mm. A outra é a ISO WNMG 080416, com raio de ponta $r_e = 1,6$ mm, conforme a Figura 11.

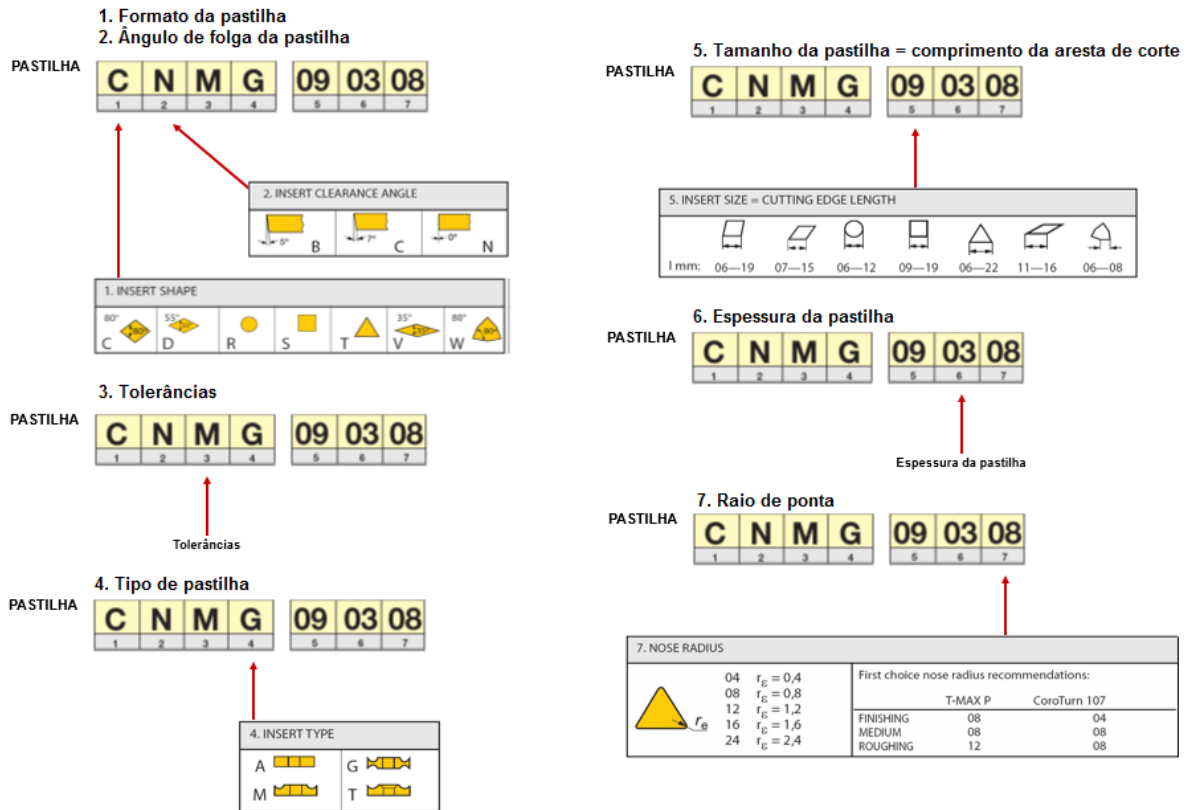
Figura 11 – Pastilhas utilizadas: Geometrias convencional (a) e alisadora (b)



Fonte: Autoria própria

O código das pastilhas de corte é utilizado para identificação das suas características. A Figura 12 mostra o significado de cada um deles.

Figura 12 – Chave de códigos para pastilhas de corte

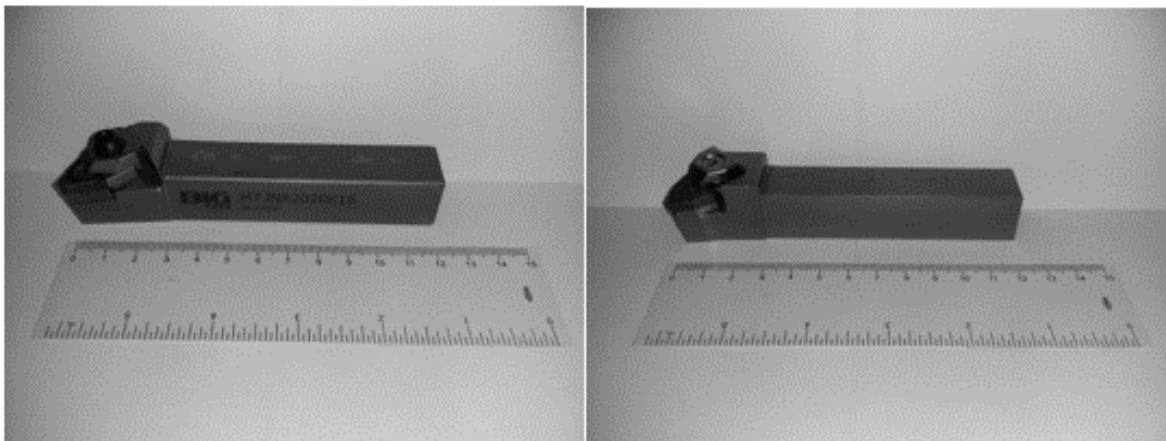


Fonte: Sandvik (2005)

3.2.3 Suportes

O sistema de fixação da pastilha no suporte é do tipo aresta-grampo para minimizar as vibrações. O porta-ferramentas é o suporte externo intercambiável para torno MTJNR 2020 K16 e o MWJNR 2020 K08, conforme Figura 13.

Figura 13 – Suportes utilizados



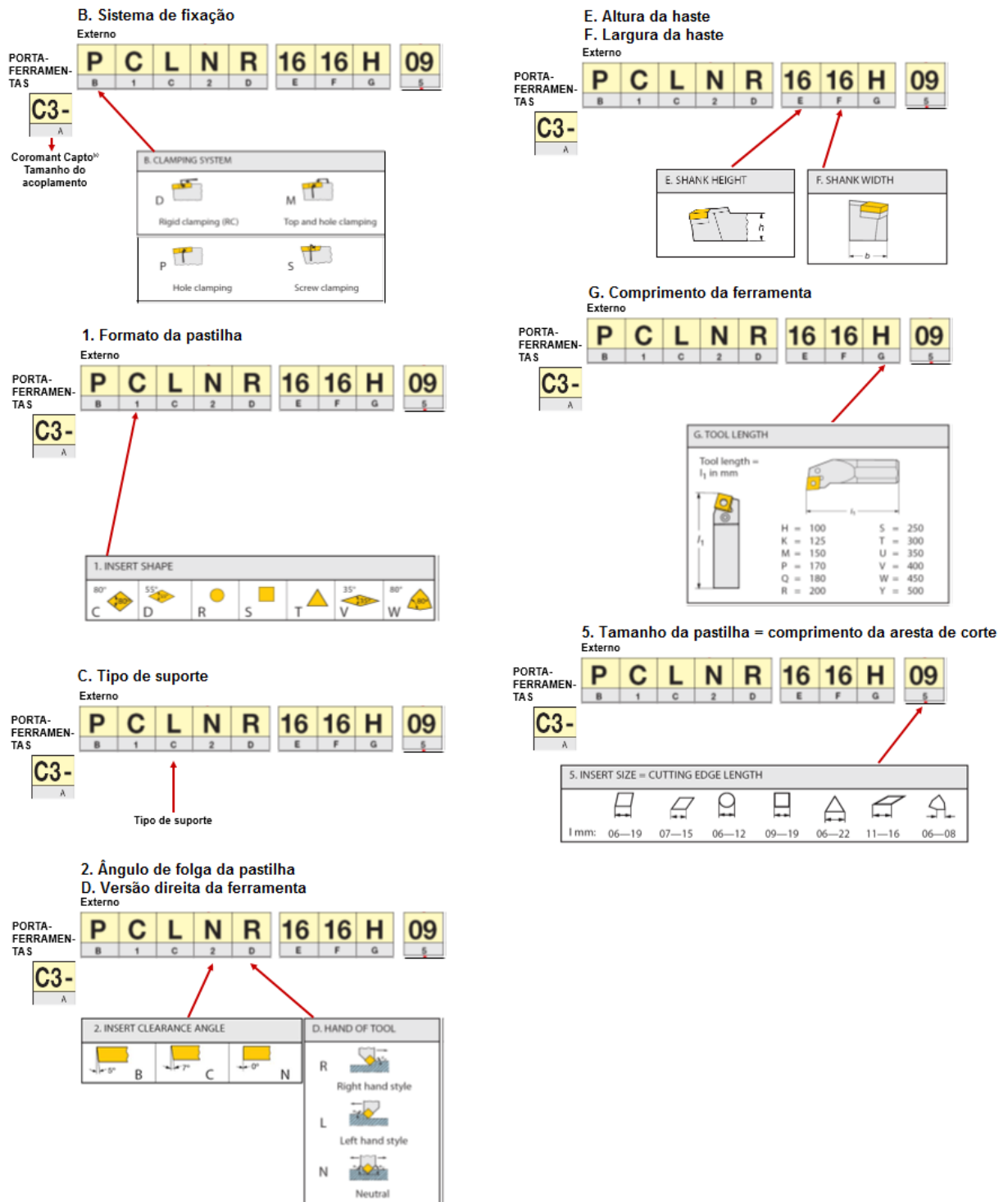
(a) ISO MWJNR 2020 K08

(b) ISO MTJNR 2020 K16

Fonte: Autoria própria

Da mesma maneira que as pastilhas de corte, os suportes para as ferramentas seguem uma nomenclatura, de modo descrever cada uma de suas características. A definição de cada um deles é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Chave de códigos para suportes de pastilhas de corte



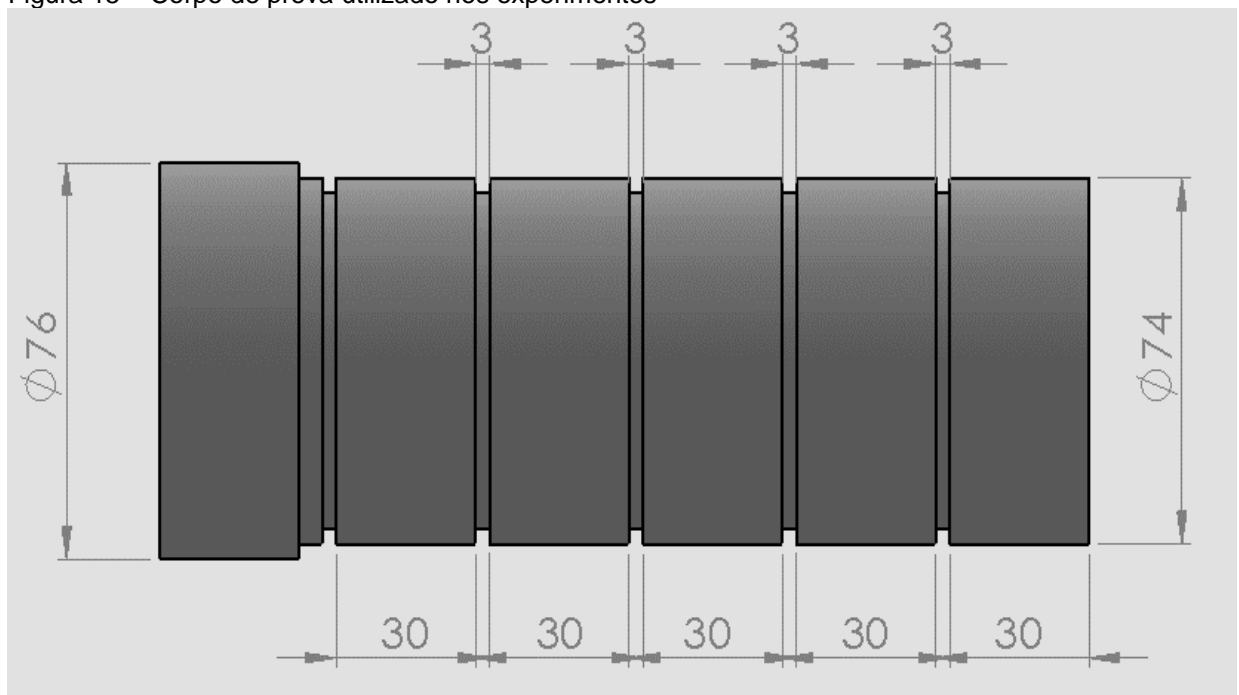
Fonte: Sandvik (2005)

3.3 MÉTODOS

O material utilizado nos ensaios foi o aço carbono AISI 8640 em formato de barra cilíndrica com diâmetro de 76 mm. A mesma foi fornecida pela empresa parceira no qual o trabalho está sendo desenvolvido.

Foram preparados dois corpos de prova, sendo cada um deles separado com rasgos de 3 mm, a cada 30 mm no comprimento da barra, conforme mostrado pela Figura 15. A utilização de 4 amostras em cada corpo de prova é justificada pelo fato de permitir uma maior facilidade na combinação dos diferentes parâmetros de usinagem utilizados. A Figura 16 mostra os detalhes da fixação da barra ao torno.

Figura 15 – Corpo de prova utilizado nos experimentos



Fonte: Autoria própria

Figura 16 – Barra de aço AISI 8640 acoplada ao torno



Fonte: Autoria própria

No desenvolvimento do trabalho, foi observado e estudado o comportamento das quatro amostras ao serem realizados os torneamentos longitudinais externos com as combinações mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação de parâmetros e amostras correspondentes

A seco		
Amostra	a_p (profundidade de corte) (mm)	f (avanço) (mm/rot)
1	0,8	0,104
2	0,4	0,229
3	0,8	0,229
4	0,4	0,104

Fonte: Autoria própria

Conforme mostrado na Tabela 3, os ensaios foram realizados todos a seco. Existe uma tendência mundial na atualidade da redução da utilização dos fluidos de corte, isso porque segundo Gainer (1993), o manuseio de forma incorreta, pode gerar

resultados desagradáveis, que vão desde problemas no processo, geração de problemas de saúde dos operadores e também poluição ao meio ambiente.

A velocidade de corte foi mantida constante em $v_c = 148,44$ m/min. Esse valor foi utilizado por conta dos ajustes de rotação presentes no torno, sendo então utilizado o valor de 630 rpm. Os parâmetros utilizados foram estabelecidos conforme dados recomendados pelo fabricante.

Na medição da rugosidade, foram feitas medidas em três pontos distintos do corpo de prova, no sentido longitudinal da barra, para cada amostra. Esse processo foi realizado para os dois corpos de prova usinados com as ferramentas *wiper* e *standard*.

O comprimento de amostragem (*cut-off*) foi utilizado igual a 0,8mm, conforme explicado no item 2.7.1 e seguindo a norma ISO 4288:1996.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da Equação 6 e 7, fazendo os cálculos para as rugosidades teóricas, utilizando a combinação dos diferentes valores de avanço (f) utilizados, para os diferentes valores dos raios de ponta dos insertos (r_e), obteve-se os valores da Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de rugosidade teórica para os diferentes parâmetros de avanço (f) e raios de ponta (r_e) das ferramentas

f (mm/rot)	r_e (mm)	$R_{t_{teórica}}$ (μm)	$R_{a_{teórica}}$ (μm)
0,104	0,8	1,69	0,43
0,229	1,6	4,1	1,05
0,104	1,6	0,84	0,22
0,229	0,8	8,19	2,10

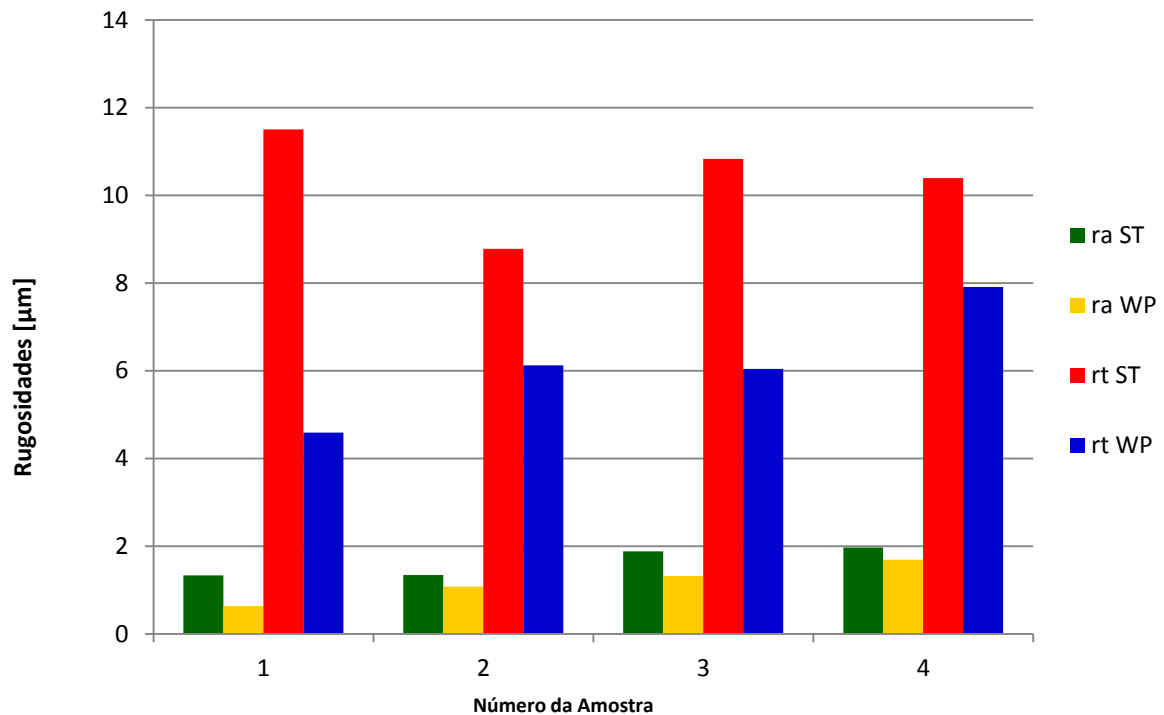
Fonte: Autoria própria

Após serem feitos os ensaios, conforme os parâmetros de usinagem pré-estabelecidos, foram obtidos os dados da Tabela 5, referentes à rugosidade superficial dos corpos de prova para os diferentes avanços (f) e profundidades de corte (a_p). As rugosidades média (R_a) e total (R_t) foram medidas em três pontos distintos, em cada amostra, para os dois corpos de prova. O Gráfico 1 mostra a média das três medições.

Tabela 5 – Valores medidos de R_a e R_t na usinagem do aço AISI 8640 para as ferramentas *standard* (st) e *wiper* (wp)

Vc (m/min)	a_p (mm)	f (mm/rot)	R_a ST (μm)	R_a WP (μm)	R_t ST (μm)	R_t WP (μm)
148,44	0,4	0,104	1,33	0,629	11,5	4,589
		0,229	1,34	1,078	8,779	6,123
	0,8	0,104	1,882	1,317	10,83	6,044
		0,229	1,966	1,692	10,39	7,91

Fonte: Autoria própria

Gráfico 1 – Rugosidades média (R_a) e total (R_t) para as ferramentas *standard* (st) e *wiper* (wp)

Fonte: Autoria própria

Os valores das rugosidades teórica e das rugosidades medidas mostram-se bastante discrepantes, isso se dá por conta principalmente da grande quantidade de vibração ocorrida durante os testes.

A melhor situação obtida para a ferramenta convencional (*standard*) foi a da amostra 1 ($R_a=1,33\mu\text{m}$) e amostra 2 ($R_t=8,779\mu\text{m}$) e as melhores para a ferramenta alisadora (*wiper*) foram da amostra 1 ($R_a=0,629\mu\text{m}$ e $R_t=4,589\mu\text{m}$).

Observou-se que a ferramenta *wiper* se mostrou mais eficiente quanto a redução da rugosidade superficial nos corpos de prova, pois em todas as ocasiões a mesma apresentou valores de rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t) menores quando comparadas à ferramenta *standard*, sendo estes até 150% menores (R_t amostra 1).

A ferramenta *standard* possui uma interação ferramenta/peça diferente da interação da ferramenta *wiper*. O melhor comportamento de rugosidade da ferramenta *wiper* se deve ao fato de que suas arestas proporcionam uma menor altura do perfil na aresta de corte na superfície gerada. Os raios existentes na ferramenta *wiper* e sua parte alisadora impedem a formação de grandes abaulamentos e elevações (vales e picos) resultantes do aumento da velocidade de corte.

É interessante destacar o efeito da ferramenta *wiper* nas rugosidades da amostra 1 (para os avanços de $f=0,104$ e $f=0,229$), pois elas apresentaram os melhores resultados dentro das 8 amostras testadas. As superfícies apresentadas pelo torneamento com a ferramenta *wiper* são mais qualificadas do que as geradas pela ferramenta *standard*.

Com os dados obtidos foi possível analisar os valores da rugosidade R_a correspondentes à maior taxa de remoção de material e os valores de R_a para a menor taxa de remoção de material. Essas situações foram as que melhor demonstraram as diferenças de comportamento entre as duas ferramentas de corte utilizadas.

Tabela 6 – Valores de rugosidade para taxa de remoção de material

R_a (standard) (μm)	R_a (wiper) (μm)	Taxa de remoção de material (cm^3/min)
1,33	0,629	6,175
1,34	1,078	13,597
1,882	1,317	12,350
1,966	1,692	27,194

Fonte: Autoria própria

A Tabela 6 mostra os valores de rugosidade média R_a (μm) obtidos para cada amostra usinada. Analisando-se as rugosidades médias obtidas para a maior taxa de remoção de material (27,194 cm^3/min), é possível observar uma diminuição de cerca de 20% da rugosidade gerada pela ferramenta *wiper* em relação a ferramenta *standard*.

Já para o menor valor de rugosidade, a taxa de remoção de material também foi a menor, sendo esta 6,175 cm^3/min . Observa-se que a rugosidade média obtida com o inserto *wiper* ficou aproximadamente 110% menor que a rugosidade obtida com o inserto *standard*, o que propiciou melhor acabamento da superfície usinada.

Também é possível perceber que com o aumento da profundidade de corte e do avanço, que as rugosidades tiveram a tendência de aumentarem seus valores. No entanto, a ferramenta *wiper* apresentou valores menores de rugosidade em todas as situações, sendo a melhor delas para a profundidade de corte de 0,4mm combinada ao avanço de 0,104mm/rot.

O raio de ponta (r_ϵ) da aresta de corte possui grande influência na rugosidade, o mesmo deve ser pelo menos o dobro do valor do avanço, para que as marcas de avanço sejam minimizadas, resultando numa melhoria na rugosidade.

Conforme Machado *et al.* (2009), o avanço (f) é o parâmetro influente sobre a rugosidade, seguido pelo raio de ponta da ferramenta. De fato houve um aumento da rugosidade com o aumento do avanço, no entanto este mostrou-se menor do que o gerado pelo aumento da profundidade de corte (a_p).

O aumento da profundidade de corte (a_p) provocou, de uma maneira geral, um aumento de R_a e R_t . Isso acontece porque com o aumento da profundidade de corte também são aumentadas as forças, e, a possibilidade de flexões. As alturas das ondulações também tendem a aumentar com a profundidade de corte.

Segundo Machado *et al.* (2009) além da influência das condições de corte e da geometria da ferramenta, devem ser considerados outros efeitos, dentre eles a rigidez do suporte da ferramenta, que possua seção transversal suficiente para que as flexões sejam minimizadas. A máquina-ferramenta deve ser rígida, não possuir erros de alinhamento e ter seus movimentos precisos para que não se prejudique o acabamento.

No que diz respeito ao aço AISI 8640, pode-se afirmar que o mesmo possui boa usinabilidade, por se tratar de um aço baixa liga e médio carbono, sendo então um aço com boa ductilidade. Os cavacos gerados foram em sua maioria cavacos contínuos, apenas confirmando essa afirmação.

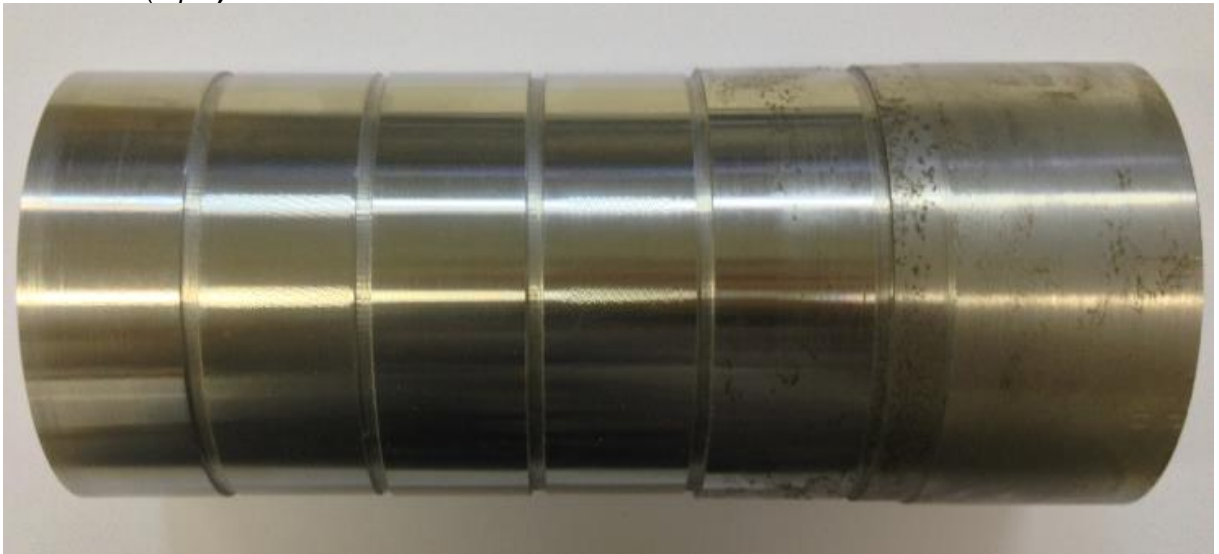
As peças usinadas com os parâmetros da Tabela 2, com as ferramentas *standard* e *wiper* são mostradas nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Figura 17 – Corpo de prova utilizado nos experimentos após usinagem com a ferramenta convencional (*standard*)



Fonte: Aatoria própria

Figura 18 – Corpo de prova utilizado nos experimentos após usinagem com a ferramenta alisadora (*wiper*)



Fonte: Aatoria própria

5 CONCLUSÕES

Durante o processamento dos metais, mais precisamente falando-se na usinagem, surge um grande número de variáveis que implicam na qualidade do produto final. Em determinadas aplicações, é necessário que a qualidade superficial das peças produzidas seja garantida pelo processo de usinagem. Para que isso ocorra, os parâmetros corretos de corte devem ser utilizados, permitindo que se produzam peças com melhor qualidade e menor preço possível.

Nesse estudo, foi feita a usinagem do aço AISI 8640 para que fossem encontradas as melhores condições de corte, com diferentes combinações, para fazer a análise da rugosidade superficial obtida pelas peças usinadas com as ferramentas convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*).

Em todos os casos, quando houve aumento da profundidade de corte (a_p) e do avanço (f), houve também aumento da rugosidade superficial, sendo que na ferramenta *standard* esse aumento foi mais significativo. Como já era esperado, a ferramenta *wiper* apresentou os melhores valores de rugosidade superficial, sendo estes até 150% menores que os gerados pela ferramenta *standard*.

Isso ocorre por conta do maior número de arestas de corte presente na ferramenta *wiper* (alisadora), produzindo um melhor acabamento superficial e redução da rugosidade. Como economicamente não há diferença de custo entre as ferramentas, escolhe-se a ferramenta *wiper*, que permite trabalhar em uma maior faixa de parâmetros de entrada

O estudo apresentou limitações, sendo estas devido a máquina ferramenta, pois foi utilizado um torno convencional para usinagem dos corpos de prova, sendo que um torno CNC poderia apresentar resultados mais precisos. Outro fator que pode ter reduzido a precisão dos resultados foi a vibração gerada durante o processo, que em avanços de corte maiores foi elevada, o que pode ter gerado maior rugosidade superficial do que o esperado. Porém, mesmo com as limitações, o estudo revelou resultados consistentes.

Considerando os objetivos propostos pelo trabalho, nota-se que a questão de pesquisa levantada foi respondida. A escolha do referencial teórico permitiu a compreensão das variáveis envolvidas nos processos de usinagem de metais, e os resultados permitirão que a empresa otimize seu processo e condições de corte para usinagem do aço AISI 8640.

Ciente de que este estudo não considerou a análise dos cavacos gerados, das forças de corte e o desgaste da ferramenta para decidir pelo melhor método, deixa-se como sugestão para trabalhos futuros a expansão da análise para avaliar os esforços de corte e o comportamento da rugosidade superficial ao longo do tempo de vida das ferramentas estudadas.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgar Blücher, 295 p., São Paulo, 1990.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B46.1:2002. **Surface texture** (Surface Roughness, Waviness, and Lay). New York, 2002.
- BIGTOOLS. **Ferramentas para torneamento**. Joinville: catálogo, 30 p.
- BLACK, T. J. **Introduction to machining processes**. Metals handbook machining. 9. ed. New York, ASM International, 1995.
- BRALLA, J. G. **Handbook of product design for manufacturing: a practical guide to low-cost production**. 2. ed. New York, McGraw- Hill, 1988.
- DAGNALL, H. **Exploring surface texture**. 3. ed. England, Taylor Hobson Limited, 1998.
- DAVIM, J. P. **Machining: Fundamentals and recent advances**. Springer-Verlag, London, 2008.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo, Artliber, 2008.
- FAVORIT. **Aços especiais: Catálogo Técnico Favorit**. 12. ed., 2013.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Edgar Blücher, 800p., São Paulo, 1977.
- GANIER, M. **Reciclar, eliminar e valorizar fluidos de corte**. Tradução: Noberto P. Lima. Revista Máquinas e Metais. Editora Aranda. São Paulo, 1993.
- GEIER, M.; MELLO, M. S.; SOUZA, A. J. **Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços baixo carbono e baixa liga**. 2011. 10 f. Artigo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- GGD METALS. **Aços construção mecânica**. São Paulo: catálogo, 24 p.
- GÖKKAYA, H., NALBANT, M. **The effects of cutting tool coating on the surface roughness of AISI 1015 steel depending on cutting parameters**. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Vol. 30.
- INTERMÁQUINAS. **Manual de instruções – Rugosímetro digital portátil modelo TR220**. São Paulo, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4288:1996. **Geometrical product specification – Surface texture: profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture**. Switzerland, ISO, 1996.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6 ed. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p., 2010.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo, Blucher, 2009.

MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação**. Florianópolis, Tese (Doutorado) – POSMEC, UFSC, 1992.

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

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo, Edgard Blucher, 1994.

ROSA, G. C.; SOUZA, A. J. **Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C**. 2014. 10 f. Artigo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ROMI TORNOS UNIVERSAIS. **Linha Tormax e Linha ES 40**. Catálogo, Santa Bárbara D'oeste, 8 p.

SANDVIK. **Manual técnico de usinagem**. Sandvik Coromant, São Paulo, 2005.

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

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. Oxford Science Publication, New York, 1984.

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

THOMAS, T. R. **Rough Surfaces**. 2 ed. Imperial College Press, London, 1999.

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

WIDIA. **Avanços 2014: torneamento, fresas de topo inteiriças, fresamento intercambiável, e sistemas de ferramentas**. Catálogo, 2014, 422 p.

WRUBLAK, O.; PILATTI, L. A.; PEDROSO, B. **Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto**. 2008. 9 f. Artigo – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2008.