

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

JOSÉ RENATO MONTEIRO NASCIMENTO DE ALMEIDA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DELINEAMENTO DE
EXPERIMENTOS PARA CRIAÇÃO DE UM PADRÃO PARA
AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE PASTILHAS DE CORTE
UTILIZADAS EM PROCESSOS DE USINAGEM**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2017

JOSÉ RENATO MONTEIRO NASCIMENTO DE ALMEIDA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DELINEAMENTO DE
EXPERIMENTOS PARA CRIAÇÃO DE UM PADRÃO PARA
AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE PASTILHAS DE CORTE
UTILIZADAS EM PROCESSOS DE USINAGEM**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Especialista em
Engenharia da Confiabilidade, do
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Shimura

CURITIBA

2017

.

Dedico este trabalho à minha família, minha esposa Carla, meus filhos, Breno e Gabriel, pelos momentos de ausência.

.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão. Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Emerson Rigoni, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Ao meu co-orientador Sérgio Shimura.

Ao Operador de usinagem Ivo Fernandes da Silva Neto pela disponibilidade para executar os testes do experimento.

Ao colega Yordan Madureira, doutorando na área de Usinagem pela UNICAMP, que gentilmente me apoiou no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de sala.

À Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes. (NEWTON, Isaac)

RESUMO

ALMEIDA, José. **Aplicação da técnica de delineamento de experimentos para criação de um padrão para avaliação da vida útil de pastilhas utilizadas em processos de usinagem.** 2017. 72 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O presente trabalho teve como objetivo definir um padrão interno de desempenho de pastilhas (ferramentas de corte) de usinagem com parâmetros específicos de testes e critérios mínimos de aceitação para fornecedores. A avaliação foi realizada em operações de usinagem de torneamento utilizando diferentes velocidades de corte. Foram considerados fatores críticos de influência direta na vida útil das ferramentas de corte, como quantidade consumida, volume de peças usinadas e custos de fabricação. Avaliou-se de forma prática através da técnica de delineamento de experimentos, utilizando como único fator a velocidade de corte.

Palavras-chave: Curvas de vida. Operações de usinagem. Ferramentas de corte. Padrões de desempenho.

ABSTRACT

ALMEIDA, José. **Aplicação da técnica de delineamento de experimentos para criação de um padrão para avaliação da vida útil de pastilhas utilizadas em processos de usinagem.** 2017. 72 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The present project had as objective define an internal performance standard for machining inserts (cutting tools) with specific test parameters and minimum acceptance criteria for suppliers. The evaluation was performed in turning machining operations using different cutting speeds. Critical factors of direct influence on the inserts lifetime, such as quantity consumed, volume of machined parts and manufacturing costs were considered. It was evaluated in a practical way through the design of experiment technique using as a single factor the cutting speed. In this way, the project allowed the development of internal performance standards for machining metal insert, defining specific test parameters among different manufacturers, establishing minimum acceptance criteria.

Keywords: Machining metal insert. Cutting speed. Performance standards.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Processos de usinagem	22
Figura 3.2 - Principais fatores que influenciam na usinabilidade de um material.....	23
Figura 3.3 - Classificação dos ensaios de usinabilidade	25
Figura 3.4 - Variação de desgaste em função do tempo de usinagem com pastilhas de metal duro.....	26
Figura 3.5 - Evolução do desgaste de uma ferramenta de corte.....	27
Figura 3.6 - Desgaste da ferramenta de corte em função da velocidade de corte (V_c), avanço (f ou f_n) e profundidade de corte (a_p).....	31
Figura 3.7 - Desgaste de flanco.....	33
Figura 3.8 - Desgaste de cratera.....	34
Figura 3.9 - Desgaste de entalhe.....	35
Figura 3.10 - Critérios para o fim da vida em operações de desbaste.....	36
Figura 3.11 - Critérios para o fim da vida em operações de desbaste.....	37
Figura 3.12 - Fontes causadoras de variabilidade.....	39
Figura 3.13 - Fluxograma do método experimental Taguchi.....	40
Figura 5.1 - Máquina-ferramenta utilizada.....	50
Figura 5.2 - Desenho de um rolo utilizado no experimento.....	50
Figura 5.3 - Rolo típico utilizado no experimento.....	51
Figura 5.4 - Torre típica de lingotamento contínuo.....	52
Figura 5.5 - Conjunto de rolos (amostras) que serão usinados.....	52
Figura 5.6 - Lupa utilizada no experimento.....	53
Figura 5.7 - Consumo das pastilhas mais utilizadas.....	54
Figura 5.8 - Medição de Tempo de Usinagem 1.....	57
Figura 5.9 - Medição de Tempo de Usinagem 2.....	57
Figura 5.10 - Ilustração de um torneamento cilíndrico com todos os parâmetros de corte.....	58
Figura 6.1 - Pastilha com desgaste de flanco.....	60
Figura 6.2 - Pastilha com desgaste de cratera.....	61
Figura 6.3 - Superfície desbastada usinada parcialmente.....	61
Figura 6.4 - Superfície desbastada totalmente usinada	62
Figura 6.5 - Preparação dos tempos de usinagem no software DOE++.....	63
Figura 6.6 - Tabela ANOVA.....	63
Figura 6.7 - Distribuição F de Fischer.....	64
Figura 6.8 - Resumo dos dados.....	65
Figura 6.9 - Resposta dos 3 níveis ensaiados: presunção de normalidade.....	65
Figura 6.10 - Comparação das médias.....	66
Figura 6.11- Resultados do teste 1.....	66
Figura 6.12 - Resultados do teste 2.....	67
Figura 6.13 - Resultados do teste 3.....	67
Figura 6.14 - Constantes da equação de Taylor.....	67
Figura 6.15 - Valores do expoente γ , segundo Kienzle.....	68
Figura 6.16 - Valores do expoente γ , segundo Tool Engineers Handbook.....	68
Figura 6.17 - Dados simulados de vida segundo a equação de Taylor.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Velocidade corte x Tempo de produção por peça (em minutos).....	44
Gráfico 4.1 - Volume de itens fabricados.....	46
Gráfico 4.2 - Consumo médio de ferramentas de corte em 2016	47
Gráfico 4.3 - Gastos médios com ferramentas de corte em 2016.....	47
Gráfico 6.1 - Vida útil x velocidade de corte.....	69
Gráfico 6.2 - Percurso de corte x velocidade de corte.....	70
Gráfico 6.3 - Produção por aresta x velocidade de corte.....	70
Gráfico 6.4 - Custo por aresta x velocidade de corte.....	70
Gráfico 6.5 - Comparação benchmark x concorrente.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Percentual de execução de operações de usinagens	49
Tabela 5.2 - Parâmetros de testes do experimento.....	55
Tabela 5.3 - Configuração dos experimentos: número de replicações.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de Variância
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	Design of Experiments
MSR	Método da Superfície de Resposta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DA PESQUISA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2	APRESENTAÇÃO DO TEMA / OBJETO DA PESQUISA.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1	PROCESSOS DE USINAGEM.....	21
3.2	USINABILIDADE.....	23
3.3	ENSAIOS DE USINABILIDADE.....	24
3.4	FERRAMENTAS DE CORTE.....	28
3.5	VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	30
3.6	TIPOS DE DESGASTES EM FERRAMENTAS DE CORTE.....	32
3.7	CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA, SEGUNDO A NORMA ISO 3685/1993.....	35
3.8	PROJETOS DE EXPERIMENTOS (DOE).....	38
3.8.1	Método de Taguchi.....	39
3.8.2	Método da Superfície de Resposta (MSR).....	41
3.9	CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM.....	42
3.10	CICLOS E TEMPOS DE USINAGEM.....	43
3.11	CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	45
4	SITUAÇÃO ECONÔMICA DO AMBIENTE DE FABRICAÇÃO.....	46
4.1	VOLUME DE PEÇAS FABRICADAS.....	46
4.2	DEMANDA E CUSTO DE RESPOSIÇÃO ATUAL.....	47
4.3	OTIMIZAÇÃO DA VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE.....	48
4.4	CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	48
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
5.1	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS.....	49
5.1.1	Máquina-ferramenta utilizada.....	49
5.1.2	Materiais utilizados.....	50
5.1.3	Equipamentos auxiliares para caracterização.....	53
5.1.4	Crítérios para definição de fim de vida de ferramentas de corte.....	53
5.1.5	Parâmetros de corte utilizados.....	54
5.1.6	Ferramenta de corte utilizada.....	54
5.1.7	Parâmetros de teste.....	55

5.2	DELINEAMENTO COM UM FATOR (ONE-WAY ANOVA).....	56
5.2.1	Replicações nos experimentos.....	56
5.3	CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	59
6	RESULTADOS.....	60
6.1	RESULTADOS ONE-WAY (ANOVA).....	63
6.2	TABELA ANOVA.....	63
6.3	RESUMO DOS DADOS.....	65
6.4	COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS.....	66
6.5	CÁLCULO DAS CONSTANTES K E X (EQUAÇÃO DE TAYLOR).....	66
6.6	PROPOSTA DE PADRÃO DE DESEMPENHO TÉCNICO.....	71
6.7	CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	72
7	CONCLUSÃO.....	74
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Até meados do século XVIII, o principal material utilizado para peças, em engenharia, era a madeira, salvo raras exceções, a qual era usinada com ferramentas de aço-carbono. Com a Revolução Industrial, novos e mais resistentes materiais apareceram, impulsionando o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte. Mais tarde, a utilização da água e do vapor como fontes de energia impulsionaram a indústria metal-mecânica, já no final do século XVIII e início do século XIX, propiciando assim o aparecimento de máquinas-ferramentas responsáveis pela fabricação de outras variedades de máquinas e instrumentos em substituição ao trabalho humano em diversas atividades. Já no século XX surgiram produtos feitos de materiais mais duráveis e, conseqüentemente, mais difíceis de serem usinados. O advento das ferramentas de aço rápido, e mais tarde de carboneto de tungstênio, permitiu a usinagem de aços e de outros materiais metálicos com produtividade crescente, também favorecida pelos avanços tecnológicos no campo das máquinas-ferramentas, como o desenvolvimento de máquinas automáticas e, mais tarde, de máquinas comandadas numericamente (CN).

Por fim, a partir da década de 1940, os processos não convencionais de usinagem passaram a ganhar importância pela capacidade de produzir peças de geometria complexa em materiais de difícil usinabilidade, garantindo assim acabamento de elevada qualidade e tolerâncias estreitas (MACHADO et al., 2009).

Os processos de fabricação que envolve mudança de forma podem ser classificados em duas categorias: fabricação com remoção de material e fabricação sem remoção de material. Segundo Machado et al. (2009), os processos com remoção de material são considerados os mais importantes economicamente, com custos associados estimados em cerca de 10% do PIB americano na primeira metade da década de 80. A simples análise dos custos inerentes aos processos de usinagem, aliados à representatividade destes processos na indústria mundial, faz com que qualquer aprimoramento nestes converta-se em uma grande redução dos custos de produção.

Dentre os processos de fabricação pelos quais os materiais são concebidos na indústria, a usinagem contribui significativamente para o desenvolvimento de diversos setores produtivos, o que a destaca como um dos mais importantes do

setor metal-mecânico. Mais da metade dos produtos na indústria de fabricação são submetidos, no mínimo, a uma operação de usinagem no decorrer de sua fabricação. A usinagem tem a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático e que envolve um elevado número de variáveis. As condições ideais de corte são capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível.

É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. De acordo com Black (apud MACHADO et al., 2009), a imprevisibilidade da usinagem se deve ao fato de esse ser o único processo de deformação plástica cuja única restrição é oferecida pela ferramenta de corte.

Na usinagem dos metais, o atrito entre a ferramenta e o cavaco ocasionam altos desgastes das ferramentas de corte, que interfere diretamente na precisão dimensional e no acabamento superficial da peça, proporcionando altos custos para as indústrias. O calor gerado na região de contato entre a peça e a ferramenta é uma medida do desempenho que deve ser controlada durante o processo de remoção de material.

Conseqüentemente a medida da temperatura durante o corte é o fator mais importante na investigação do uso de ferramentas, pois influencia no uso, na vida e no desgaste da ferramenta. Além da precisão da máquina e a rugosidade superficial do acabamento da peça. Este fato tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas de corte altamente resistentes ao desgaste e a altas temperaturas. Materiais das ferramentas de corte constituídos de metais duros sinterizados, oxicerâmicos, nitreto de boro cúbico e de diamante são resultados de pesquisas intensivas que até hoje se encontram em desenvolvimento.

Para poder satisfazer as exigências crescentes feitas à qualidade e à viabilidade técnica do processo de fabricação por usinagem, as ferramentas devem ser usadas de forma econômica para que todas as grandezas que participam do processo de usinagem como geometria da ferramenta, condições de corte, material da peça e materiais auxiliares não influenciem negativamente a vida ferramenta de corte.

A vida de uma ferramenta de corte pode ser definida como sendo o tempo que a mesma trabalha efetivamente, sem perder a capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Em outras palavras, a ferramenta trabalhando

em condições normais de corte é usada até que o seu desgaste, previamente fixado, seja tal que exija a sua substituição.

Diante do contexto apresentado, pretende-se com este trabalho identificar os principais fatores que afetam a vida útil das ferramentas de corte visando estabelecer padrões uniformes de desempenho entre os fabricantes das mesmas. A avaliação será realizada comparando as ferramentas de corte operando em idênticas condições de usinagens.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

A evolução tecnológica do setor metal-mecânico, mais precisamente no processo de usinagem, apresenta-se em franco desenvolvimento, atingindo níveis de elevada excelência nas máquinas e nas ferramentas. O desempenho da ferramenta necessita de estudos bem aprofundados, principalmente para prever e estabelecer a vida útil da ferramenta, fator que limita a produção de peças de alta qualidade, a um custo econômico, em um mínimo espaço de tempo.

Os custos com as ferramentas de corte são secundários quando comparados com outros custos de operações, como por exemplo, o custo da hora máquina. Freitas (2013) concluiu que, reduzindo os custos da ferramenta de corte em 30%, ou com um aumento de sua vida útil em 50%, nos resultará apenas em 1% na redução dos custos de fabricação. Em contrapartida, um aumento em 20% dos parâmetros de corte resultará numa redução de 15% nos custos produtivos. Desta forma, a vida da ferramenta é reconhecida como um critério de otimização de um sistema de corte e por isso, muitas empresas se interessam em aperfeiçoar os parâmetros de corte, através da análise do desgaste da ferramenta para reduzir custos, melhorar a qualidade do produto e aumentar a eficiência de seus processos produtivos.

Buscando maior precisão e confiabilidade nas ferramentas de corte, faz-se necessário projetar experimentos, coletar dados e analisá-los. Existem poucos modelos dos desgastes das ferramentas apresentados na literatura, devido à complexidade na modelagem desse processo. Experimentos são realizados para entender a influência de variáveis, tais como deformação plástica, desgaste, vibração, parâmetros de corte [velocidade de corte (V_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f ou f_n)] sobre o controle da usinagem, todos envolvidos no processo de usinagem e nos processos de fabricação.

O Planejamento de Experimentos (em inglês *Design of Experiments*, DOE) é uma opção ao desenvolvimento da indústria metal-mecânica ao invés do empirismo. Esta técnica deve ser utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo.

Através da aplicação do DOE será possível alcançar maior qualidade dos resultados dos testes, podendo levar a um projeto de otimização dos parâmetros de corte capazes de garantir desempenho superior, seja em termos de suas características funcionais como também sua robustez. A análise DOE é uma abordagem de otimização que permite combinar todas as possíveis interações entre os fatores de entrada, bem como a influência dos fatores sobre a variável resposta, de modo que o tempo necessário para gerar dados passíveis de interpretação é menor quando comparado a outros métodos estatísticos. Este é o diferencial perante outras análises, que raramente revelam condições ideais para um processo.

Desta maneira, a proposta deste trabalho é realizar o DOE e estabelecer uma relação entre os parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) ao longo do processo de usinagem, levando-se em consideração, também, a variação simultânea dos fatores para a resposta de interesse. Neste contexto se insere este trabalho, cujo objetivo principal é a análise de desempenho de ferramentas de corte e sua influência na produtividade dos processos de usinagem.

O procedimento a ser dotado contemplará a realização de ensaios de usinabilidade em operações de torneamento em aço-liga com ferramenta de metal duro revestida.

Serão considerados, para escolha das amostras experimentadas, fatores críticos de influência direta na vida útil das ferramentas de corte observando a frequência de uso, volume de cavacos gerados, parâmetros de desgaste, delimitando o trabalho em máquinas-operatrizes específicas e tipos exclusivos de ferramentas com os testes práticos realizados.

Algumas dificuldades poderão surgir em função da falta de disponibilidade de máquinas e operadores, restrição de ferramentas de corte para testes, materiais, etc. Nestes casos, um plano de contingência será elaborado para não comprometer a realização do trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Definir um padrão interno de desempenho de pastilhas (ferramentas de corte) de usinagem com parâmetros específicos de testes e critérios mínimos de aceitação para fornecedores.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar e identificar os principais fatores que afetam a vida útil e o desempenho das ferramentas de corte utilizadas em processos de usinagem;
- Realizar estudo comparativo de desempenho utilizando diferentes parâmetros de usinagem e variáveis de corte;
- Definir condições de corte que permitirão melhorar o rendimento do processo de usinagem;
- Determinar valores otimizados para os parâmetros de usinagem objetivando reduzir os custos operacionais.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o atual desenvolvimento das indústrias, crescem também as necessidades de desenvolvimento de novos materiais e melhoria dos processos de fabricação. Com a usinagem possuindo uma parcela considerável do custo final do produto, é de grande importância o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte que possibilitem trabalhar com velocidades cada vez maiores e a um custo cada vez mais reduzido.

Espera-se que esse trabalho promova avanços científicos e tecnológicos no desenvolvimento e aplicações de ferramentas de corte.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Visando estudar o efeito das variações dos principais fatores dos processos de usinagem sobre a ferramenta de corte será preciso variá-los e observar as respectivas respostas na ferramenta de corte. Para a definição da ferramenta de corte ensaiada serão considerados diversos fatores de influência como sua geometria, a composição do seu material e seu revestimento.

No presente trabalho, a vida útil da ferramenta de corte será a variável resposta a ser estudada a qual será submetida às variações dos fatores de processo.

A técnica de planejamento de experimentos em dois níveis será utilizada no desenvolvimento do trabalho. Pretende-se através de ensaios, identificar as variáveis que interferem significativamente em uma determinada resposta. Para a obtenção de uma maior precisão na resposta será avaliada a utilização de um planejamento com um número maior de níveis.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo inicial trata de assuntos focados nas as premissas e problemas da pesquisa, os objetivos, justificativas e procedimentos metodológicos utilizados no trabalho. Nos capítulos finais é explicitada a inter-relação entre os diversos temas abordados e o modo como este relacionamento é implementado para cumprir os objetivos deste trabalho.

Excluindo o presente capítulo, os demais possuem o seguinte conteúdo:

- **Capítulo 2:** apresenta o tema do trabalho e o seu objeto de pesquisa destacando os tópicos principais de estudo no trabalho.
- **Capítulo 3:** apresenta uma revisão bibliográfica dos tópicos relativos ao tema principal do trabalho como os processos de usinagem, ferramentas de corte e o ferramental estatístico utilizado no desenvolvimento do trabalho.
- **Capítulo 4:** mostra a condição atual do ambiente de fabricação em estudo, como o volume de peças usinadas, a demanda e os custos de reposição de ferramentas de corte. Aborda também a otimização da vida das ferramentas e a utilização da técnica de delineamentos de experimentos como instrumento prático de apoios aos testes realizados.
- **Capítulo 5:** descreve os materiais, métodos e ferramentas aplicados, tanto na definição dos ensaios quanto na aquisição dos dados e posterior avaliação dos resultados.
- **Capítulo 6:** aborda os resultados obtidos com a realização do experimento, evidenciando as condições das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios e os tipos de desgaste a que foram submetidas.
- **Capítulo 7:** finaliza o trabalho apresentando a análise dos resultados alcançados bem como os desdobramentos que podem que culminar com trabalhos futuros em temas correlatos.

2 APRESENTAÇÃO DO TEMA / OBJETO DE PESQUISA

Atualmente, os processos de usinagem requerem ferramentas de corte que suportem altos níveis de desgaste e atendam as expectativas de desempenho esperada. Isto implica na melhoria contínua das ferramentas utilizadas devido à busca constante na redução dos custos de fabricação.

Neste contexto, o entendimento do processo de fabricação por usinagem obriga o estudo da influência dos parâmetros de corte sobre o desempenho e custos das ferramentas de corte utilizadas nos processos de usinagem.

Espera-se avaliar com a realização de experimentos práticos quais as variáveis de maior influência na vida útil de ferramentas de corte utilizadas na usinagem dos rolos no processo de lingotamento contínuo de placas de aço.

Ao final, espera-se desenvolver padrões internos de desempenho definindo parâmetros próprios de testes e assim estabelecer critérios mínimos de aceitação de ferramentas de corte para potenciais fornecedores.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo faz uma revisão em todos os temas específicos dos processos de usinagem relativos ao objeto de estudo deste trabalho. Inicia-se pela classificação dos processos de fabricação com destaque do processo de usinagem por remoção de cavacos. Em seguida, aborda-se o conceito de usinabilidade e sua correlação com a ferramenta de corte, material usinado e o processo de remoção de cavacos utilizado nos processos de usinagem.

Na sequência são abordados com relativa abrangência conceitos de ferramentas de corte e os diversos fatores que devem ser considerados para sua correta seleção. Complementa-se o tema explorando os fatores de maior influência na vida da ferramenta de corte como os tipos de desgastes e o critério para avaliação do fim de vida baseado no tipo de desgaste.

Conceitos de DOE são abordados sucintamente de forma a subsidiar os ensaios práticos do experimento proposto no trabalho.

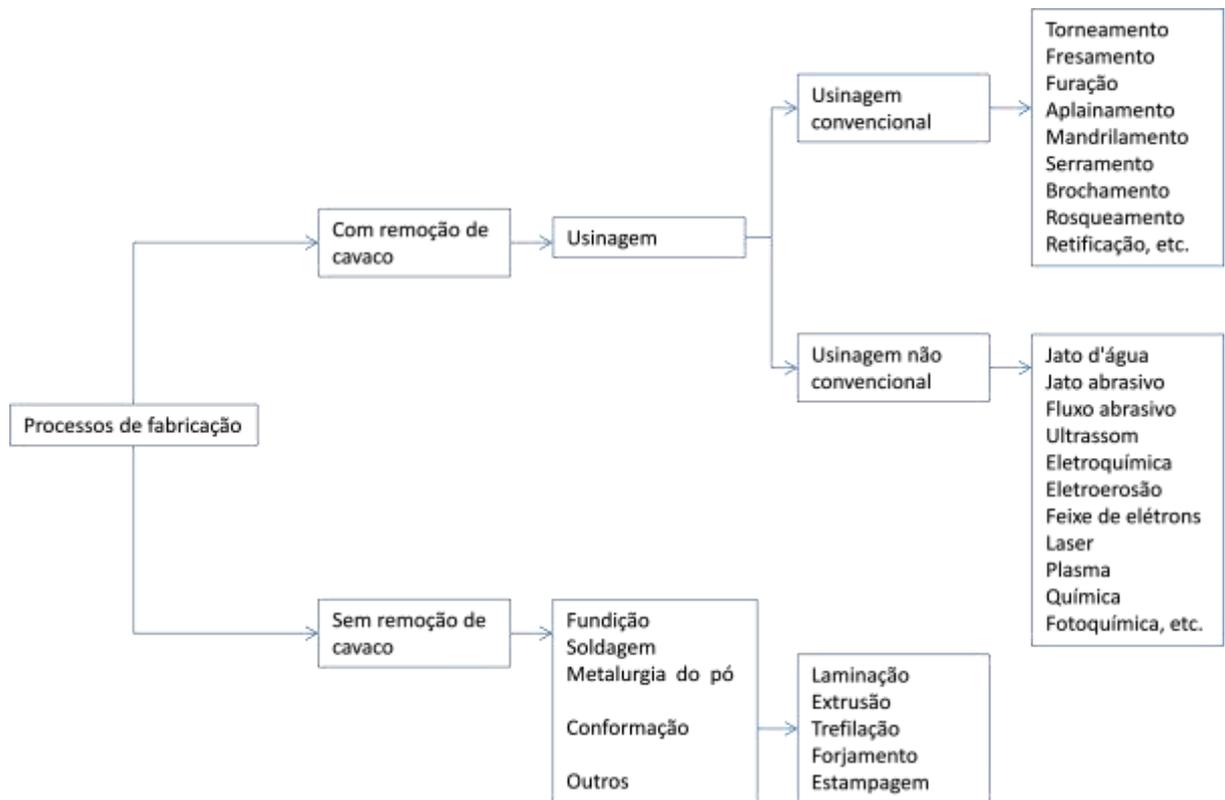
Por fim são explorados conceitos econômicos de usinagem com destaque para definição de ciclos e tempos de usinagem nos processos de fabricação.

3.1 PROCESSOS DE USINAGEM

A usinagem é um termo designado para descrever o processo de remoção de material de uma peça, conferindo-lhe forma, dimensão, acabamento ou a combinação qualquer destes três itens. Geralmente é usada para converter tarugos fundidos, forjados ou pré-moldados em perfis desejados, com dimensões e acabamentos específicos, de acordo com a necessidade do projeto (FERRARESI, 1977).

A Figura 3.1 mostra a classificação dos processos de fabricação, segundo MACHADO et al., 2009, na qual se destaca a usinagem, principal processo tratado nesse trabalho:

Figura 3.1 - Processos de usinagem



Fonte: Machado et al. (2009).

O processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça a ser usinada.

Partindo-se do princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuíram para o aparecimento de novos materiais para a confecção de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem.

Tendo em vista a ampla variedade de peças atualmente disponíveis e o aumento da demanda por usinagem de precisão em altas velocidades, a competitividade da indústria de usinagem aumenta cada vez mais exigindo cada vez mais a procura por um processo de usinagem robusto (PENTEADO, 2011).

Para aumentar a eficiência e a produtividade dos processos de usinagem, é necessário analisar o tipo de ferramenta de corte e os parâmetros de usinagem. A melhora de produtividade e eficiência no processo de usinagem pode ser obtido pela otimização de parâmetros. Esse processo de otimização pode ser alcançado quer

pela relação empírica de modelagem das variáveis de entrada e saída, quer por ferramentas otimizadas (PENTEADO, 2011).

A fim de melhorar os processos de usinagem, máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) são utilizadas para solucionar problemas da usinagem de peça de grande complexidade, e posteriormente vieram a auxiliar na redução da improdutividade (PENTEADO, 2011). Contudo, a utilização destas máquinas só se torna economicamente viável quando for garantido o emprego eficiente de ferramentas durante o processo de usinagem, ou seja, a eficiência do processo de usinagem depende da utilização de dados de corte otimizados, atualizados e adequados às condições reais de trabalho.

A otimização dos parâmetros nos processos de usinagem tem sido uma das opções na busca de melhores desempenhos, representados, principalmente, pela redução de custos ou de tempo de fabricação (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000).

3.2 USINABILIDADE

Usinabilidade é um termo bastante usado no estudo dos processos de usinagem, e diz respeito tanto ao material da peça quanto ao da ferramenta, e às variáveis de processo envolvidas no corte dos metais. A complexidade e a importância desta “propriedade” podem ser observadas pela simples análise das diversas definições encontradas na literatura. A Figura 3.2 mostra os principais fatores que influem na determinação da usinabilidade de um material, segundo Ferraresi, 1977:

Figura 3.2 - Principais fatores que influenciam na usinabilidade de um material

Material da peça	Ferramenta de Corte	Processo/máquina
<ul style="list-style-type: none"> - Composição química - Microestrutura - Propriedades físicas, químicas e mecânicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Geometria da ferramenta - Material da ferramenta 	<ul style="list-style-type: none"> - Processo de usinagem adotado - Condições de usinagem (V_c, f, a_p) - Condições de refrigeração (fluido de corte) - Rigidez da máquina, ferramenta e fixação da peça

Fonte: Ferraresi (1977)

Ainda segundo Ferraresi (1977), usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinagem), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão.

Duas propriedades mecânicas que afetam a usinabilidade dos materiais são a dureza e a resistência mecânica - em altos valores, estas propriedades diminuem a usinabilidade dos materiais, por oferecer demasiada resistência ao processo de corte. Outra importante propriedade que afeta fortemente a usinabilidade é a condutividade térmica, que implica na maior ou menor geração de calor na interface ferramenta-peça. O presente trabalho considerará esta última propriedade fixa, uma vez que foram previamente definidos os materiais das amostras de testes (aço AISI/SAE 4130).

3.3 ENSAIOS DE USINABILIDADE

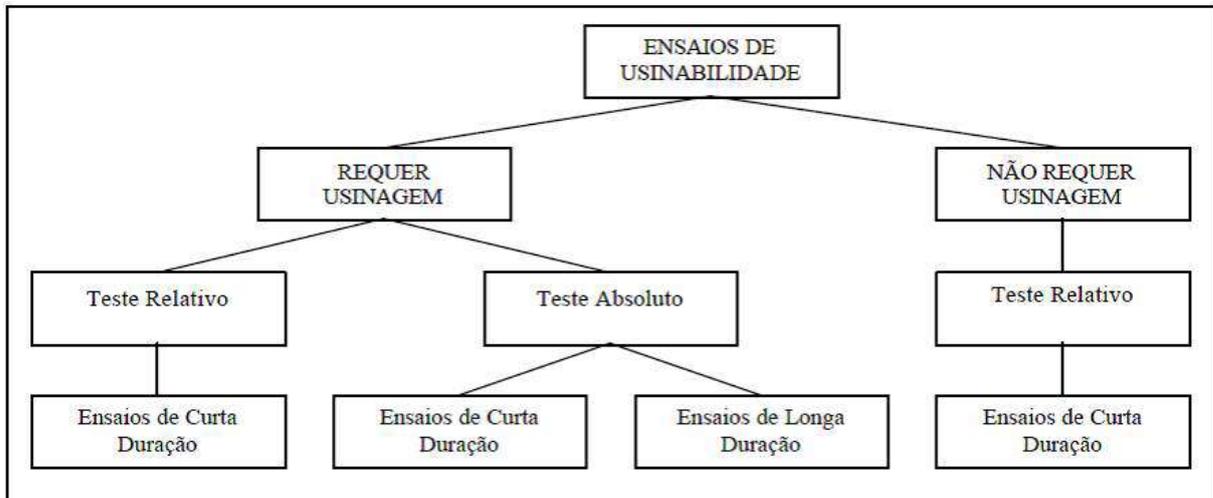
Os ensaios de usinabilidade são divididos em duas categorias básicas, que são ensaios que requerem usinagem e ensaios que não requerem usinagem, com subdivisões entre estas categorias.

A primeira destas faz distinção entre os testes relativos (ranking testes), que indicam a usinabilidade relativa entre dois ou mais pares ferramenta-peça para condições específicas de corte.

Na segunda categoria, encaixam-se os testes absolutos, que indicam os méritos de dois ou mais pares de ferramentas-peça para uma dada faixa de condições de corte. Outra distinção feita entre os ensaios de usinabilidade diz respeito à duração dos ensaios de curta e longa duração.

Os testes relativos são sempre ensaios de curta duração, enquanto os testes absolutos são, na maioria das vezes, de longa duração. A classificação dos ensaios de usinagem é dada de acordo com a Figura 3.3:

Figura 3.3 - Classificação dos ensaios de usinabilidade



Fonte: Amorim (2002).

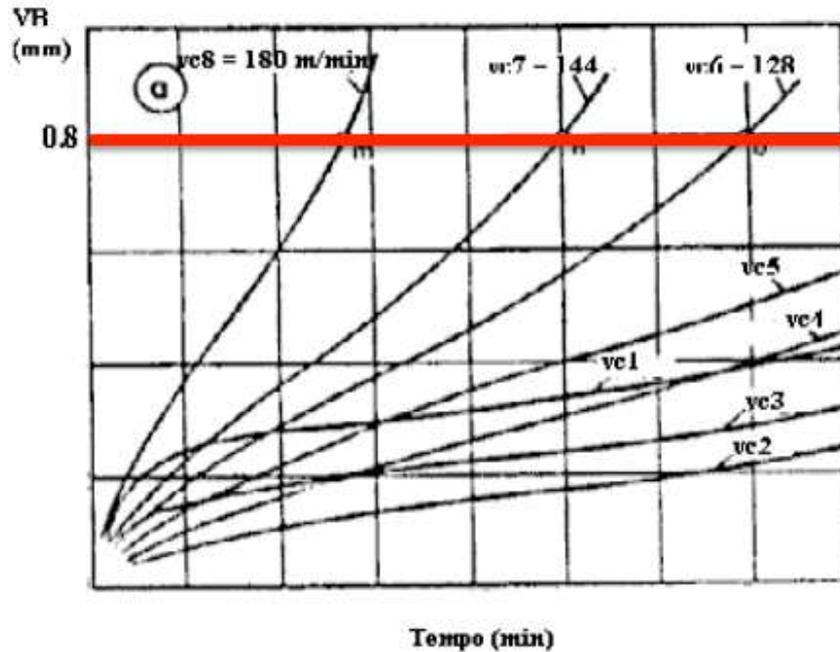
Os testes relativos são muito usados, especialmente na indústria, onde se fazem necessárias decisões rápidas. Uma desvantagem desses testes é que, uma vez que os testes relativos têm o objetivo de comparar a usinabilidade dos materiais para determinada condição de corte, não há garantia de que a classificação permanecerá igual no caso de alguma condição de corte ser alterada.

Os testes absolutos costumam abranger grandes amplitudes de velocidades de corte e, em alguns casos (especialmente quando do uso da Equação de Taylor expandida, que será estudada mais adiante) abrange também outras variáveis envolvidas, como avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta de corte.

Ensaio absoluto são mais completos, abrangendo mais de uma condição de corte. Estes ensaios costumam se basear na equação de Taylor ($T = K.Vc^{-x}$), calculada a partir dos dados obtidos no teste. Ela relaciona a vida da ferramenta de corte (T) com a velocidade de corte (Vc), considerando as propriedades do material através das constantes K e x, dependentes do par ferramenta-peça.

Para execução de curvas de vida deve-se construir, em primeiro lugar, gráficos auxiliares que fornecem vários níveis de desgastes para diferentes velocidades e tempos de trabalho, em determinadas condições de usinagem ao par ferramenta-peça (condições de avanço, profundidade de corte, geometria da ferramenta, etc.). A Figura 3.4 apresenta a variação de desgaste em função do tempo de usinagem com pastilhas de metal duro para diferentes velocidades de corte (FERRARESI, 1977):

Figura 3.4 - Variação de desgaste em função do tempo de usinagem com pastilhas de metal duro

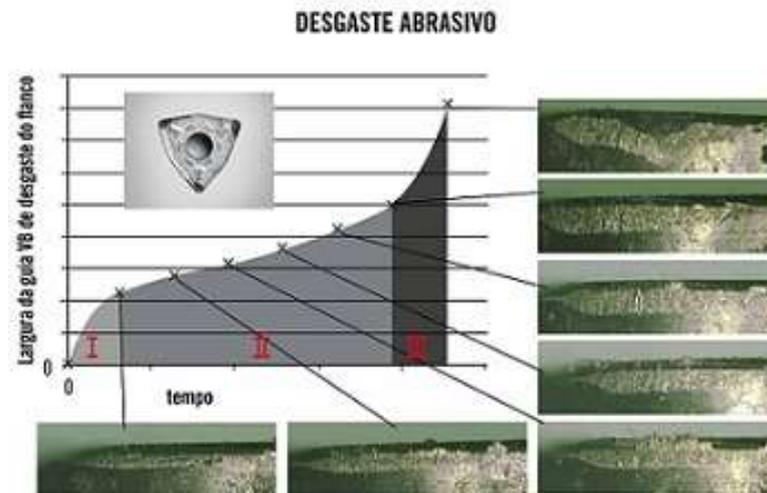


Fonte: Ferraresi (1977).

Por exemplo, fixando o desgaste (VR) em 0.8 mm pode-se estimar a vida da ferramenta, informando que o desgaste chegando a este valor, a ferramenta deve ser substituída para evitar uma possível quebra ou para manter as condições de acabamento fixado.

Taylor também observou que o desgaste da ferramenta tipicamente acelera no começo de uma operação, estabiliza, mas aumenta lentamente em uma segunda fase, entrando finalmente em uma terceira e final fase de rápido desgaste até o fim da vida da ferramenta. Ele criou esse modelo para representar o tempo entre as fases dois e três, conforme mostra a Figura 3.5:

Figura 3.5 - Evolução do desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Sandvik (2014).

Quanto aos critérios usados para a avaliação do comportamento em usinagem do material (mais especificamente, da combinação peça-ferramenta) nos ensaios descritos a seguir, Ferraresi (1977) classificou-os da seguinte maneira: critérios baseados na vida da ferramenta, critérios baseados na força de usinagem, critérios baseados no acabamento superficial, critério baseado na produtividade, critério baseado na análise dimensional, critério baseado na temperatura de corte, critério baseado nas características do cavaco e critério baseado na energia fornecida pelo pêndulo.

Devido à grande quantidade de critérios de usinabilidade, serão avaliados apenas os relacionados ao escopo desse trabalho. Para alcance do propósito do presente trabalho serão realizados testes absolutos, de curta duração com critérios relacionados à vida da ferramenta de corte.

3.4 FERRAMENTAS DE CORTE

Existem diversos fatores a serem considerados para a correta seleção de ferramentas de corte. Alguns fatores, segundo Coppini, Diniz e Marcondes (2000) são:

- **Material a ser usinado:** a composição química e as propriedades do material a ser usinado influenciam, entre outras coisas, a solicitação sobre a ferramenta, o tipo de desgaste ao qual esta será exposta, e o tipo de cavaco resultante do processo de usinagem;
- **Processo de usinagem:** alguns processos de usinagem são mais agressivos à ferramenta do que outros, expondo-a a desgastes mais elevados, choques (térmicos ou mecânicos), ou ainda à ação de fadiga. Além disso, alguns processos apresentam limitação quanto à forma, dimensões e velocidade de corte passível de ser obtida, sendo, muitas vezes, preferível o uso de materiais de ferramenta menos evoluídos. Exemplos típicos são as operações de fresamento e furação com ferramentas de pequeno diâmetro. Como grande parte das máquinas, elas não possuem rotação suficiente para atingirem as altas velocidades de corte usadas na usinagem com metal duro; por isso, se faz necessário o uso de ferramentas compostas de materiais menos tecnológicos, como o aço rápido;
- **Condição da máquina operatriz:** diversos fatores relacionados à máquina e suas condições de conservação e funcionamento demandam cuidado na escolha da ferramenta de corte. A potência da máquina, rotação máxima e seu estado de conservação (ocorrência de vibrações, folgas) são fatores importantes. No caso de uma máquina sujeita a desbalanceamento, com baixa rotação e potência e onde se verifique folgas, se faz necessário o uso de ferramentas com maior tenacidade e que trabalhem a baixas velocidades de corte;
- **Custo do material da ferramenta:** a relação custo-benefício é um item importante a ser considerado na indústria moderna. Apesar de alguns novos materiais apresentarem vida de ferramenta ou produtividade superior a materiais mais comuns, seu uso deve estar condicionado a uma análise da relação custo/benefício;

- **Condições de usinagem:** a condição imposta ao processo através de seus parâmetros é um fator importante a ser considerado na escolha da ferramenta. Operações de acabamento (alta velocidade de corte, baixo avanço e profundidade de corte) necessitam de ferramentas com elevada resistência ao desgaste. Já condições de desbaste (baixa velocidade de corte, alto avanço e profundidade de corte) necessitam de ferramentas com elevada tenacidade, em detrimento da resistência ao desgaste;
- **Condições de operação:** as condições tanto da operação de usinagem quanto de rigidez do sistema máquina-peça-ferramenta influenciam no material da ferramenta. Operações de corte interrompido, ou com baixa rigidez do sistema máquina-peça-ferramenta, demandam ferramenta de corte mais tenaz.

As principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser assim listadas: alta dureza, tenacidade suficiente para evitar falha por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência à compressão, alta resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas, alta resistência ao choque térmico e alta resistência ao impacto (AMORIM, 2002).

Estas propriedades não estão listadas em ordem de importância, até porque as qualidades necessárias à ferramenta podem variar bastante com a operação de usinagem, com o material a ser usinado e com os parâmetros de corte. Porém, de um modo geral, pode se dizer que as mais importantes são a dureza e a tenacidade.

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está exatamente no balanço entre a dureza e a tenacidade, visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material. Atualmente, conseguem-se boas combinações de dureza e tenacidade, tanto em materiais de ferramenta puros quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material de base, que confere propriedades de tenacidade, associado com um revestimento, com alta dureza e resistência à abrasão.

3.5 VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Conforme já descrito em capítulos anteriores a vida da ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim da vida de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desgaste estabelecido (MACHADO et al., 2009).

Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor-limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários.

Em geral, a ferramenta deve ser substituída nas seguintes situações:

- Quando os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é crítico em operações de desgaste onde, por não ser necessária a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que o desgaste chegue a valores altos;
- Quando o desgaste da superfície de folga da ferramenta atingir determinado nível onde não seja mais possível obter tolerâncias apertadas e/ou bons acabamentos superficiais. Isto é crítico em operações de acabamento;
- Quando o desgaste cresce muito, fazendo com que a temperatura da aresta de corte ultrapasse a temperatura que ferramenta possa resistir;
- Quando o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfira no funcionamento do equipamento.

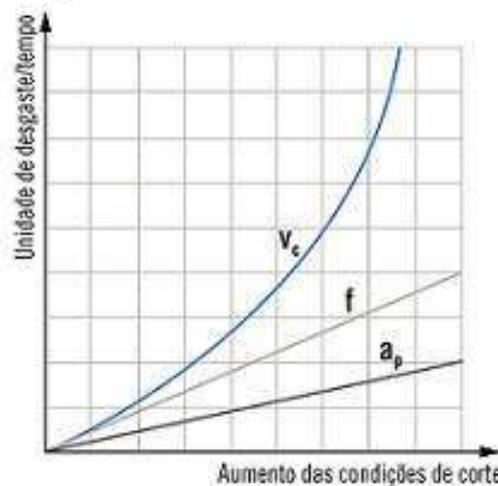
A condição de usinagem tem grande influência na vida da ferramenta. A progressão do desgaste da ferramenta é influenciada principalmente pela velocidade de corte, seguida pelo avanço da ferramenta e, por último pela profundidade de corte (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000).

A velocidade de corte (V_c) é o parâmetro que mais influencia no desgaste da ferramenta, devido ao aumento de energia (calor) que é imputada ao processo sem o aumento da área da ferramenta que recebe esse calor (ponta da ferramenta). Um aumento de V_c , por exemplo, de 130m/min para 195m/min causa uma redução de 90% na vida. O segundo parâmetro de maior influência é o avanço: um aumento de f (ou f_n), por exemplo, de 0,25 mm/r para 0,375 mm/r causou uma redução de 60% na

vida útil. No caso da profundidade de corte, o percentual de diminuição foi menor: um aumento de ap 5,0mm para 7,5mm por exemplo, causou uma redução de 15% (SANDVIK, 2014). A Figura 3.6 ilustra o desgaste da ferramenta resultante do aumento da velocidade (em azul, V_c), avanço (em cinza, f ou f_n) e profundidade de corte (em preto, a_p):

Figura 3.6 - Desgaste da ferramenta de corte em função da velocidade de corte (V_c), avanço (f ou f_n) e profundidade de corte (a_p)

DETERIORAÇÃO RELACIONADA AO DESGASTE - MODELO DE TAYLOR



Fonte: Sandvik (2014).

O aumento do avanço também aumenta a quantidade de calor imputada ao processo, porém, também aumenta a área da ferramenta que recebe esse calor. A influência da profundidade de corte é menor, já que o aumento da profundidade não altera a energia destinada ao corte por unidade de área, nem a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um volume maior seja retirado (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000). Outros fatores também influenciam na vida da ferramenta como: geometria, composição e dureza da ferramenta, fatores metalúrgicos e processo de obtenção do material da peça e características da máquina ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Este trabalho tem como foco a avaliação do desempenho das ferramentas de corte utilizadas na usinagem de diferentes materiais o que necessariamente obriga a análise aprofundada de variáveis relevantes que impactam os processos de usinagem, as ferramentas de corte e respectivas vidas.

3.6 TIPOS DE DESGASTES EM FERRAMENTAS DE CORTE

Existem, num processo de usinagem, duas causas fortes o suficiente para a substituição da ferramenta de corte, que são: avarias ou falhas catastróficas, como lascamento, trincamento ou até mesmo quebra da ferramenta; e desgaste excessivo, de modo que as condições de corte ou a qualidade da peça usinada sejam comprometidas.

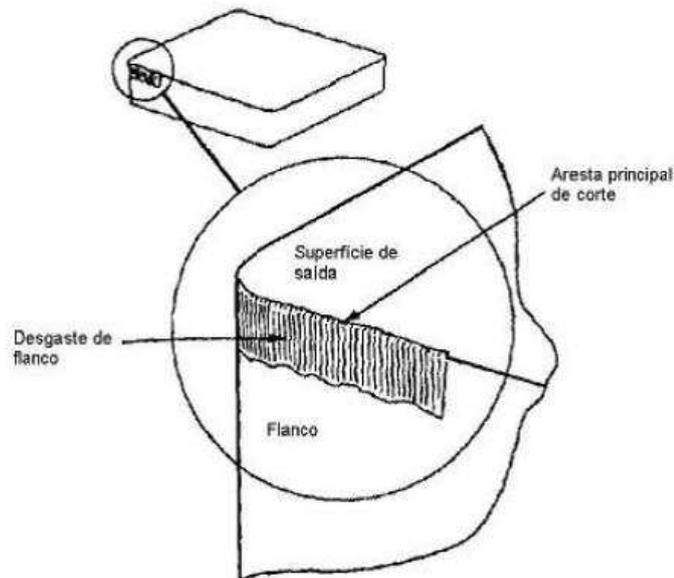
Na prática, as avarias e falhas catastróficas costumam ocorrer em processos de corte interrompido, como o fresamento, devido aos choques térmicos e mecânicos envolvidos nestes processos. Já nos processos de corte contínuo, como o torneamento, sua ocorrência é mais rara, exceto para condições de corte que excedam as recomendadas, ou que a ferramenta possua algum defeito de fabricação, o que torna seu estudo dispensável ao escopo deste texto.

Ao contrário das avarias e falhas catastróficas, o desgaste de ferramenta _e observado tanto nos processos de corte contínuo quanto nos de corte interrompido, podendo se desenvolver de acordo com vários mecanismos diferentes.

Existem três tipos principais de desgaste de ferramenta: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

O desgaste de flanco (Figura 3.7) ocorre nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas. Quando atinge a aresta principal de corte, resulta num aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, podendo causar vibrações tanto na ferramenta como na peça. Já na aresta secundária de corte, da qual dependem o controle dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, um desgaste excessivo resulta numa superfície mal acabada e peças fora da especificação.

Figura 3.7 - Desgaste de flanco

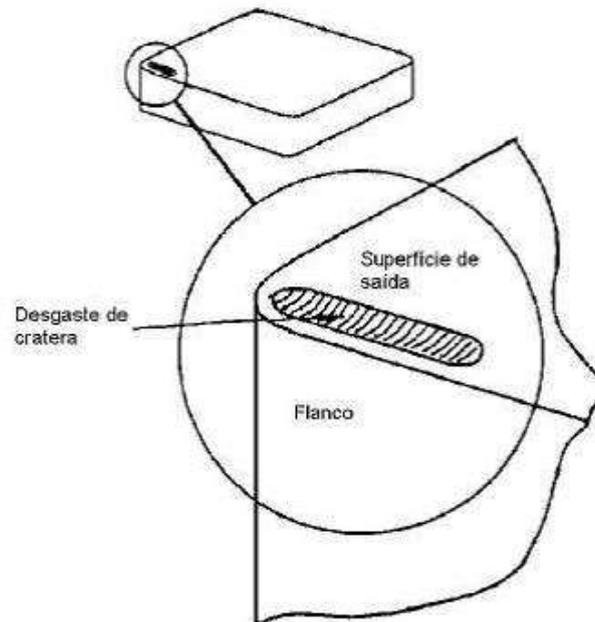


Fonte: Amorim (2002).

Em condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta o maior risco de danos à peça e que exige mais potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida de ferramenta.

O desgaste de cratera (Figura 3.8) ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco. Este tipo de desgaste resulta de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, e ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à redução da resistência à abrasão causada pela difusão, é favorecido o desgaste abrasivo, sendo então a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste assume então a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte.

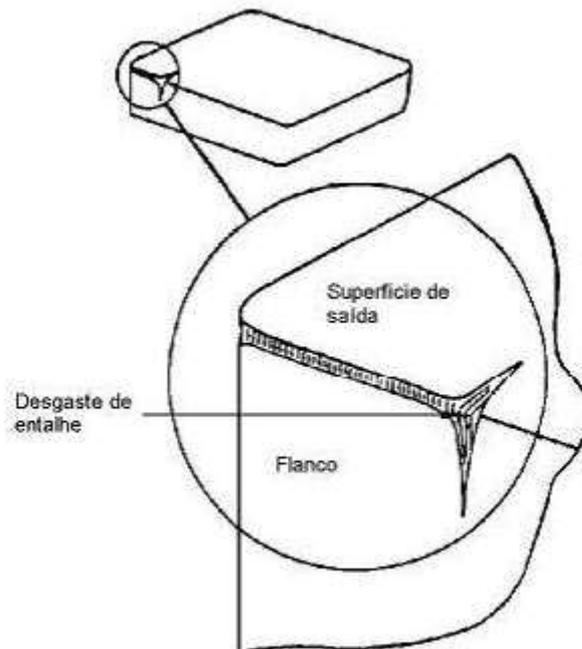
Figura 3.8 - Desgaste de cratera



Fonte: Amorim (2002).

É comum o desgaste de flanco ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como corte de uma camada de material endurecido pelo passe anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido às altas temperaturas, exposição ao ar ou ao fluido de corte. Este tipo de desgaste é chamado de desgaste de entalhe (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Desgaste de entalhe



Fonte: Amorim (2002).

Apesar de nem sempre afetar o processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante prejudicial, pois o entalhe costuma ser relativamente profundo, constituindo uma região de concentração de tensões, que pode levar à quebra da ferramenta.

3.7 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA, SEGUNDO A NORMA ISO 3685/1993

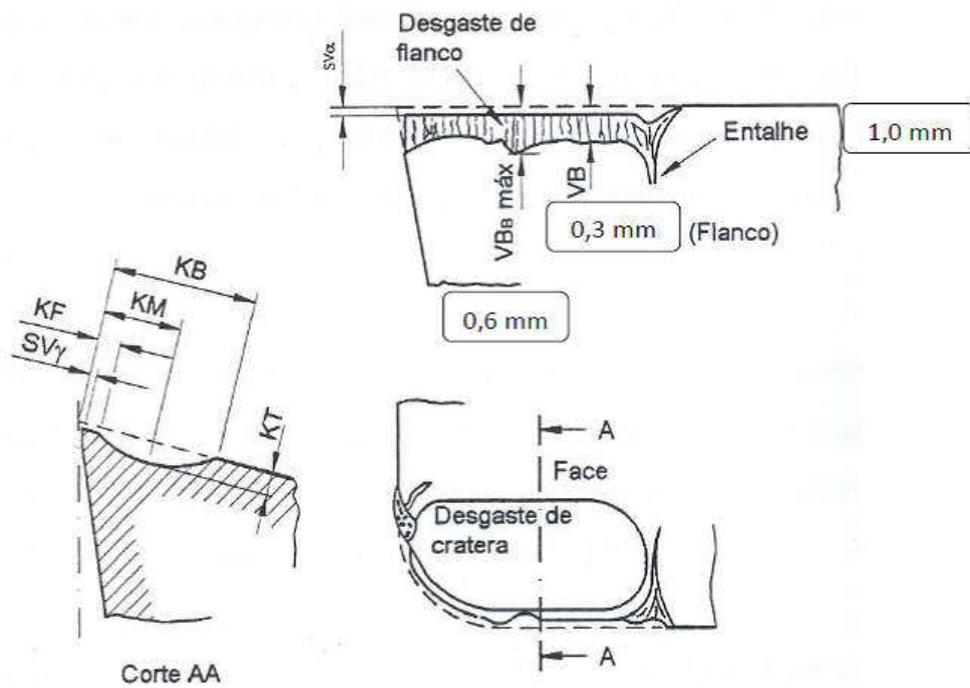
Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina operatriz, que se defina até onde uma ferramenta de corte pode ser útil, e quando esta começa a perder suas características operacionais, ou seja, quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída.

A forma mais usual de determinar este ponto é dada pela norma ISO 3685 (1993). Esta norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição. Este período, denominado de “tempo de vida da ferramenta de

“corte” (T), é determinado através do tempo de trabalho necessário para que se desenvolva um defeito crítico.

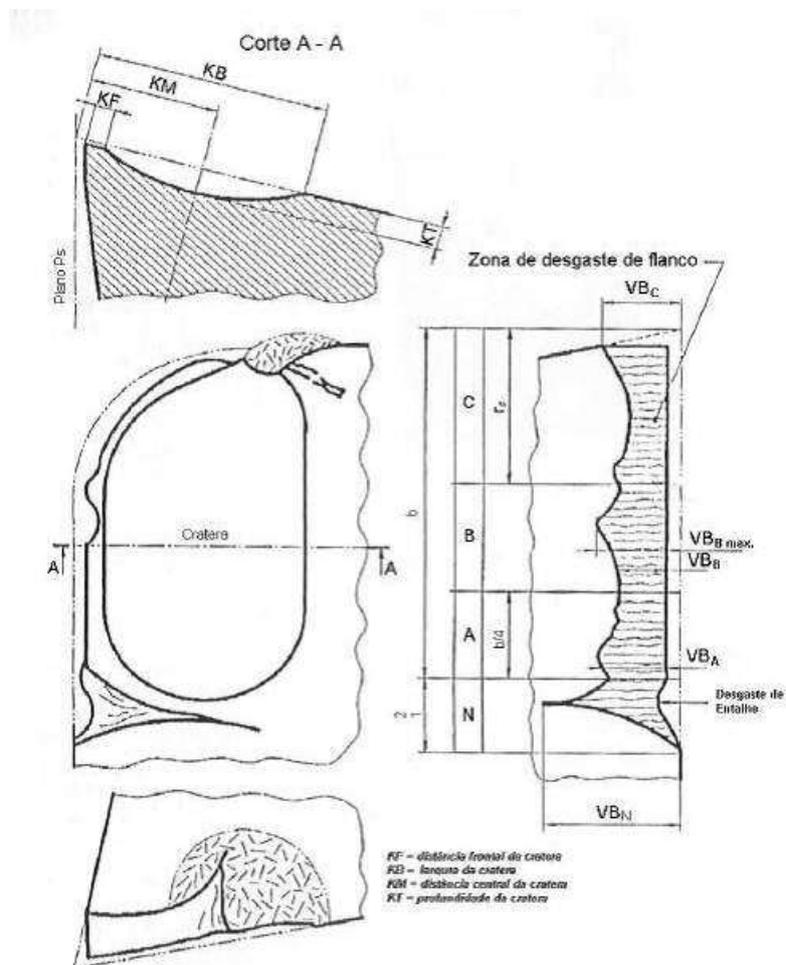
Os desgastes nas ferramentas de corte de aço rápido, metais duros e cerâmicos são quantificados pela norma ISO 3685:1993 (Figura 3.10 e Figura 3.11):

Figura 3.10 - Critérios para o fim da vida em operações de desbaste



Fonte: Amorim (2002).

Figura 3.11 - Critérios para o fim da vida em operações de desbaste



Fonte: Amorim (2002).

São utilizados como critério para o fim da vida em operações de desbaste:

- Desgaste de flanco médio ($VB = 0,3 \text{ mm}$);
- Desgaste de flanco máximo ($VB_{\text{máx}} = 0,6 \text{ mm}$), no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade de cratera ($KT = 0,06 + 0,3 f$), onde f é avanço em mm/rot.;
- Desgaste de entalhe ($VBN = 1 \text{ mm}$);
- Falha catastrófica.

A norma ainda recomenda a reafiação ou substituição da ferramenta ao atingir qualquer um desses parâmetros.

A norma ISO 3685 cita também a rugosidade superficial (de acordo com a norma ISO 468), e o crescimento repentino das forças de usinagem como critério de fim de vida de ferramenta em operações de acabamento. No caso específico da rugosidade média, os valores indicados são: 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5 mm, a serem definidos de acordo com a necessidade do fabricante.

3.8 PROJETOS DE EXPERIMENTOS (DOE)

O conceito de Projetos de Experimentos foi introduzido pela primeira vez no início da década de 1920, em uma pequena Estação de Pesquisa em Agricultura na Inglaterra, por um cientista chamado Ronald Fisher. Ele mostrou como um experimento válido poderia ser conduzido na presença de muitas condições naturais variáveis, tais com: temperatura, condições do solo e chuva. Os princípios do Projeto de Experimentos inicialmente empregado na agricultura foram adaptados com êxito nas indústrias e nas aplicações militares, desde 1940. O Projeto de Experimento (*Design of Experiments*, DOE) é uma técnica utilizada para definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística da resposta e o menor custo (PENTEADO, 2011).

Penteado (2011) afirma ainda que antes de iniciar a experimentação é importante estabelecer o planejamento dos experimentos. Esse autor ressalta a importância do domínio do problema por parte de todas as pessoas envolvidas no experimento e, recomenda que, durante a execução, o processo seja cuidadosamente monitorado para garantir que tudo seja realizado de acordo com o planejado.

Um método usual para otimização de problemas com uma única resposta é o procedimento passo a passo, que consiste em modificar um fator enquanto fixa as outras constantes, e observa o efeito desse procedimento. Porém, esse processo experimental tradicional exige um grande número de experimentos a serem realizados para serem alcançados resultados satisfatórios (PENTEADO, 2011).

Os procedimentos experimentais convencionais envolvem alteração de um fator em um momento, mantendo todos os outros fatores constantes, resultando numa avaliação do impacto desses fatores separadamente, acarretando em uma maior demanda de tempo, pois exigem um maior número de experimentos, sendo

ainda incapazes de fornecer informações sobre interações dos fatores (PENTEADO, 2011).

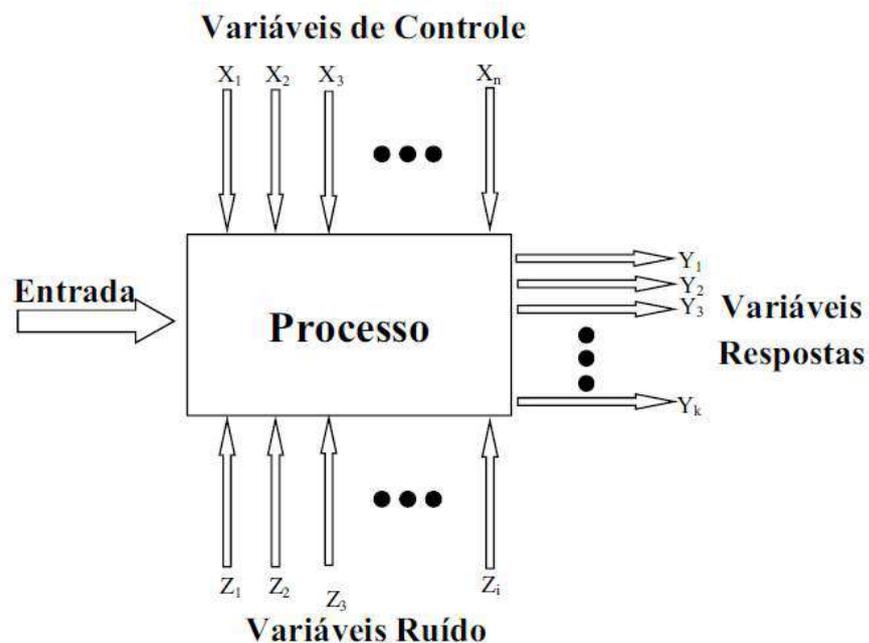
3.8.1 Método de Taguchi

De acordo com Penteado (2011), o método de Taguchi é uma poderosa ferramenta de resolução de problemas, que pode ser usada nos mais variados tipos de processos, além de melhorar a qualidade de produtos, abrangendo um sistema que leva a uma grande diminuição no custo do tempo com experimentos.

O projeto de experimentos segundo o modelo de Taguchi envolve o arranjo ortogonal para organizar os parâmetros que afetam o processo e os níveis em que devem ser variados. Determina os fatores que afetam a qualidade do produto, com um mínimo montante de experimentação (PENTEADO, 2011).

Os projetos de experimentos difundidos por Taguchi consideram dois conjuntos de fatores: aqueles que são controláveis na linha de produção (X_1, X_2, \dots, X_p) e os fatores de ruído (Z_1, Z_2, \dots, Z_p), que são fontes causadoras de variabilidade e podem ser controlados em experimentos de laboratório, mas não são controláveis na linha de produção, como pode ser visto na Figura 3.12:

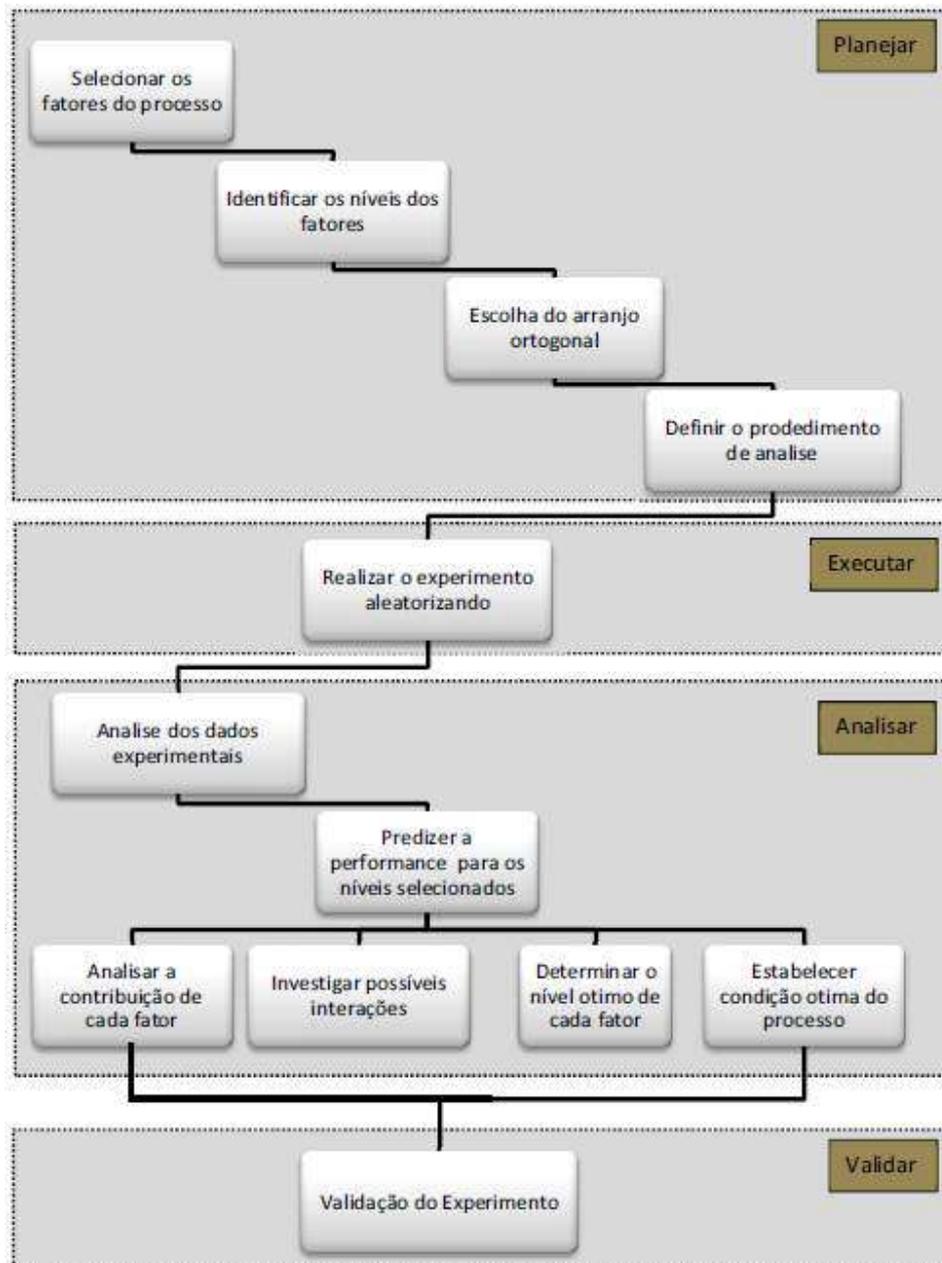
Figura 3.12 - Fontes causadoras de variabilidade



Fonte: Penteado (2011).

Conforme Penteado (2011), o método de Taguchi pode ser dividido em quatro fases: planejar, executar, analisar e validar, como pode ser visto na Figura 3.13:

Figura 3.13 - Fluxograma do método experimental Taguchi



Fonte: Penteado (2011).

O método experimental de Taguchi investiga como os diferentes parâmetros afetam o desempenho de um processo característico, sendo um processo característico capaz de definir a melhor forma e como deve ser o funcionamento processo.

3.8.2 Método da Superfície de Resposta (MSR)

O delineamento de experimentos proposto por Taguchi ajuda a identificar os fatores que afetam a resposta significativamente. Uma vez identificados os fatores significativos, o próximo passo é modelar a relação entre a resposta e os fatores e alocar às configurações o valor ótimo. O valor ótimo para a resposta pode ser um valor máximo, mínimo ou uma meta.

Metodologias que ajudam o engenheiro a alcançar a meta de resposta otimizada é chamado Métodos de Superfície de Resposta (MSR) (SHIMURA, 2016).

A abordagem geral do MSR foi desenvolvida no início da década de 50 por Box e Wilson, tendo como base de aplicação a indústria química em que foi obtido considerável sucesso (PENTEADO, 2011).

O Método da Superfície de Resposta, desde sua criação, vem sendo amplamente utilizado nos mais diversos setores como, por exemplo, para descrever o desempenho de uma ferramenta revestida no processo de torneamento.

O MSR é um método comumente utilizado no processo de otimização, em que se pode prever o efeito de cada um dos parâmetros experimentais em uma saída de resposta definida, bem como a localização de todas as interações entre os parâmetros experimentais.

Ainda de acordo com Penteado (2011), além de analisar os efeitos das variáveis independentes, o método também gera um modelo matemático, no qual estabelece um relacionamento entre a variável resposta e os fatores de controle que pode ser dado pela equação $y = f(x_1; x_2; \dots; x_n)$, onde y é a variável resposta ou variável dependente, f é uma função desconhecida das variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_n , n é o número de variáveis independentes e, finalmente, e é o erro estatístico que representa outras fontes de variabilidade não explicada por f .

Penteado (2011) sugere que, para desenvolver um modelo eficaz baseado no método estatístico, é necessário seguir os seguintes passos:

- Investigar quais parâmetros são importantes para o processo;
- Escolha do melhor procedimento experimental, devendo ser concebidos de modo a que levem em conta todos os parâmetros do processo e seus respectivos níveis;

- Análise dos resultados experimentais utilizando a ANOVA para determinar quais os parâmetros que apresentam influências significativas sobre as realizações do processo;
- Com base na resposta do processo com o modelo estatístico proposto, o processo é otimizado usando as variáveis dentro da faixa prevista pelo modelo;
- Validar o modelo testando nas condições ótimas sugeridas pelo MSR conduzindo um experimento final.

3.9 CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM

Há muitos anos, uma questão tem sido bastante investigada: quais as condições de usinagem que acarretam o mínimo custo de fabricação? Tal pergunta se baseia essencialmente no fato que, com o aumento da velocidade de corte ou do avanço, o tempo de horas de usinagem diminui, abaixando, conseqüentemente, a parte do custo de fabricação devido à máquina. Porém, diminui simultaneamente a vida da ferramenta, ocasionando um aumento da parte do custo devido à ferramenta.

Desta forma, devem existir condições de usinagem, nas quais o custo total de fabricação seja mínimo. Quando tal suposição for exata, deve-se ainda averiguar se estas condições favoráveis de custo são facilmente obtidas nas máquinas operatrizes utilizadas, para as ferramentas e materiais normalmente empregados na indústria (FERRARESI, 1977).

Segundo Sandvik (2014), estima-se que as ferramentas de corte correspondam a até 20% do custo total de fabricação de uma peça. Este custo está associado a diversos fatores como: perdas por uso indevido ou inadequado; perdas por uso de ferramentas obsoletas ou improdutivas; gastos com manutenção das ferramentas; estoques de mal dimensionados; despesas com armazenamento e transporte sem critérios; perda de tempo na localização do ferramental no chão de fábrica; parada de máquinas por falta de ferramenta.

Para Ferraresi (1977), a velocidade econômica de corte é aquela na qual é usinado o máximo volume de cavaco, num determinado tempo total de usinagem. Tal definição foi posteriormente abandonada, pois se refere à velocidade de corte

para a produção máxima e não para um custo mínimo. Atualmente, define-se a velocidade econômica de corte como aquela na qual o custo de fabricação numa indústria é mínimo. Nessa definição deve ser computado o custo direto e indireto da matéria-prima e despesas diretas e indiretas de usinagem ou transformação.

3.10 CICLO E TEMPOS DE USINAGEM

O ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases:

- Colocação e fixação da peça em bruto ou semi-acabada na máquina-ferramenta;
- Aproximação ou posicionamento da ferramenta para o início do corte;
- Corte propriamente dito;
- Afastamento da ferramenta;
- Inspeção (se necessária) e retirada da peça usinada.

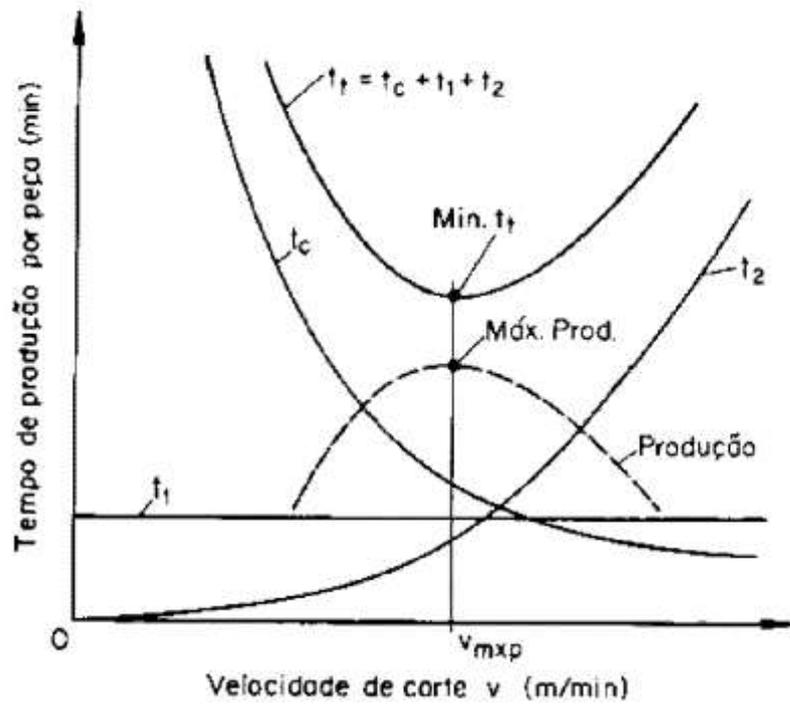
Além destas fases, tomam parte indireta no ciclo de usinagem as seguintes:

- Preparo da máquina-ferramenta para a execução de Z peças, que só ocorre no início da mesma;
- Remoção da ferramenta do seu suporte, para afiação ou substituição;
- Afição da ferramenta;
- Recolocação e ajuste da ferramenta no seu suporte.

Admitindo o caso de uma máquina operatriz com uma única ferramenta de corte, e sendo o tempo de confecção por peça (T_t), pode ser constituída a equação $T_t = T_c + T_1 + T_2$, com três parcelas, sendo T_c o tempo de corte propriamente dito; T_1 o tempo improdutivo, correspondente à colocação, fixação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, preparo da máquina para usinagem do lote e T_2 o tempo de troca (e afiação) da ferramenta.

Ferraresi (1977) apresenta um gráfico de velocidade de corte *versus* tempo de produção por peça, em minutos (Gráfico 3.1):

Gráfico 3.1 - Velocidade de corte x Tempo de produção da peça (em minutos)



Fonte: Ferraresi (1977).

Nota-se que o tempo de corte (T_c) diminui com o aumento da velocidade, o tempo T_1 permanece invariável e o tempo T_2 , devido a troca e afiação da ferramenta, aumenta com a velocidade.

3.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Nesse capítulo, foram abordados os principais conceitos relacionados aos processos de usinagem, destacadamente os processos com remoção de cavacos. Também foram mencionados conceitos teóricos sobre usinabilidade e ensaios de usinabilidade.

Especial enfoque foi dado à formulação da equação de Taylor, com sua correlação entre a velocidade de corte e os tipos de desgastes das ferramentas de corte.

Explorou-se com profundidade a influência dos parâmetros de corte de usinagem, notadamente a velocidade de corte.

Abordou-se a técnica de delineamento de experimentos com enfoques nos métodos de Taguchi e da Superfície de Resposta (MSR).

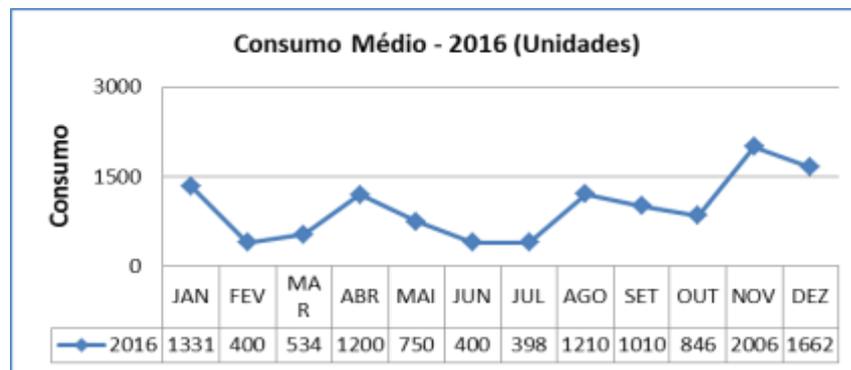
Finalizou-se o capítulo com uma abordagem sobre as condições econômicas de usinagem e seus ciclos ótimos.

No próximo capítulo, será abordada a situação econômica do ambiente de fabricação e sua relação com a vida das ferramentas de corte.

4.2 DEMANDA E CUSTO DE REPOSIÇÃO ATUAL

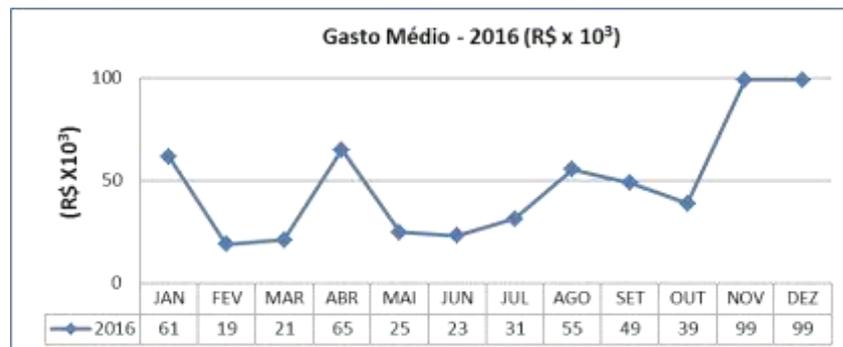
Para realizar a usinagem dos itens mencionados no capítulo anterior, há necessidade de se manter disponível para consumo um volume de pastilhas que permitem usinar diversos itens e materiais. Os gráficos 4.2 e 4.3 mostram, respectivamente, o consumo e os gastos médios de ferramentas de corte em 2016:

Gráfico 4.2 - Consumo médio de ferramentas de corte em 2016



Fonte: o autor (2017).

Gráfico 4.3 - Gastos médios com ferramentas de corte em 2016



Fonte: o autor (2017).

Percebe-se através dos números apresentados nos gráficos acima tendência de elevação no consumo e nos gastos com ferramentas de corte que motivaram o desenvolvimento do trabalho.

4.3 OTIMIZAÇÃO DA VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

Pela representatividade dos custos de reposição e relevância do uso da ferramenta de corte selecionada nas operações de usinagens nas oficinas, espera-se redução nos custos dos itens usinados, com impacto positivo em todas as tarifas dos centros de trabalho produtivos da oficina de usinagem.

Os parâmetros de corte utilizados para a avaliação econômica do trabalho serão definidos pelos resultados da avaliação DOE com a velocidade de corte (V_c) mais significativa pela análise de variância (ANOVA).

Se necessário, valores de avanço e profundidade de corte poderão ser modificados, a fim de obter resposta significativa nos experimentos.

4.4 CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Nesse capítulo, mostrou-se a condição atual do ambiente de fabricação em estudo. Foi feito o levantamento de volume de peças usinadas, da demanda e dos custos de reposição de ferramentas de corte.

Finalizou-se com uma abordagem da importância da otimização da vida das ferramentas e a utilização da técnica de delineamentos de experimentos como instrumento prático de testes, com destaque para o uso da análise estatística ANOVA na verificação das velocidades de corte.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve todos os procedimentos experimentais realizados durante a execução do trabalho para caracterizações e testes das ferramentas de corte utilizadas.

5.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Foram selecionadas as operações de torneamento cilíndrico para realizar os ensaios pelo fato de ser uma operação simples, de baixo custo e de corte contínuo.

Tabela 5.1 - Percentual de execução de operações de usinagem

OPERAÇÃO (% Exec.)	Torneamento	Fresamento/Mandrilamento	Aplainamento	Outras
	43	27	25	5

Fonte: o autor (2017).

Conforme mostra a Tabela 5.1 acima mais de 43% das operações de usinagens são executadas por torneamento o que fez com que fosse escolhida a operação de torneamento para o experimento prático do trabalho.

5.1.1 Máquina-ferramenta utilizada

Para execução dos ensaios de torneamento, foi utilizado um torno horizontal CNC, marca ROMI, modelo CENTUR 45-D, com rotação máxima de 1.038 RPM e potência de 33,6 KW, conforme a Figura 5.1.

Figura 5.1: Máquina-ferramenta utilizada

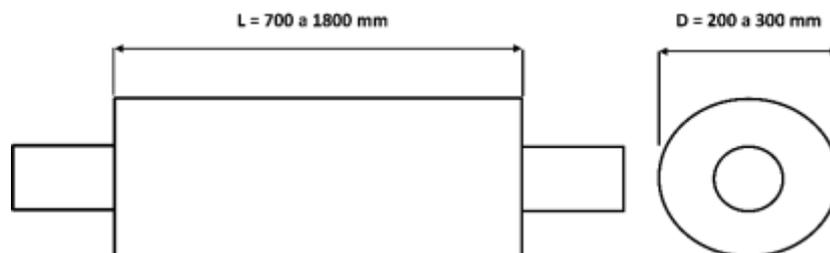


Fonte: o autor (2017).

5.1.2 Materiais utilizados

Para a realização dos experimentos, foram considerados como amostras rolos utilizados no processo de lingotamento contínuo de placas de aço da empresa, que são recuperados nas oficinas. A figura 5.2 mostra um desenho típico dos rolos que foram utilizados no experimento.

Figura 5.2 – Desenho de um rolo utilizado no experimento



Fonte: o autor (2017).

A mesa do rolo tem comprimento (L) variando de 700 a 1800 mm e o diâmetro (D) do rolo variando de 200 a 300 mm. O metal-base típico do rolo é um aço liga

AISI 4130 (ou DIN 21CrMoV5-7), revestida com uma camada de 5 mm de aço inoxidável, liga Cr-Ni-Mn.

Cabe ressaltar que, no processo de recuperação de rolos, a ferramenta de corte irá usinar (usinagem de desbastamento) essa camada de aço inoxidável, soldada sobre o metal-base do rolo (Figura 5.3).

Figura 5.3 - Rolo típico utilizado no experimento

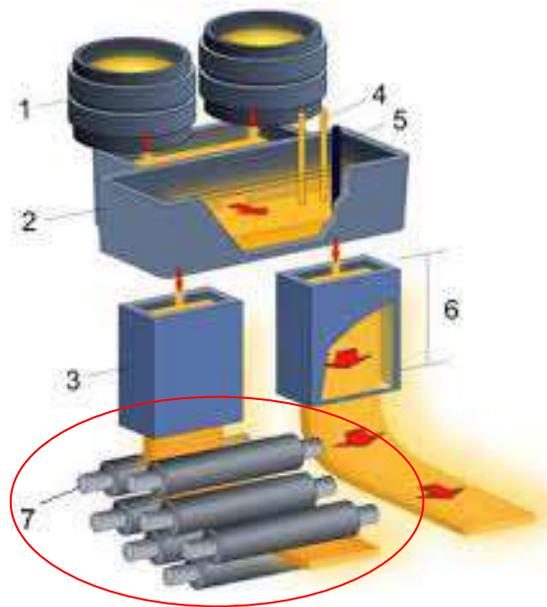


Fonte: o autor (2017).

No processo de recuperação dos rolos, a etapa inicial é o rebaixamento do diâmetro para a remoção de camada de aço inoxidável fadigada, pelo contato com a placa lingotada no processo de produção de placas de aço. Essa camada de revestimento necessita ser reposta para garantia dimensional da espessura da placa de aço lingotada. A dureza dessa camada, após recuperação, situa-se na faixa de 48 a 50 HRc. Após serem utilizados no processo produtivo, a dureza dos rolos se reduz para a faixa de 38 a 44 HRc, devido ao efeito térmico (variação de temperatura em serviço).

A Figura 5.4 ilustra uma torre típica de lingotamento contínuo e o posicionamento dos rolos em operação. O item 7 da figura mostra onde se encontram os rolos que são recuperados na oficina de usinagem:

Figura 5.4 - Torre típica de lingotamento contínuo



Fonte: o autor (2017).

Os rolos são recuperados em lotes e passam pelo processo de recomposição de nova camada, revestida em aço inoxidável. A figura 5.5 mostra o conjunto de rolos reais que foram recuperados para o desenvolvimento do trabalho:

Figura 5.5 - Conjunto de rolos (amostras) que foram usados



Fonte: o autor (2017).

Para efeito de simplificação de testes e alinhado com a norma ISO 3685/1993, será considerado o processo de usinagem cilíndrica de desbaste, na etapa de rebaixamento do diâmetro dos rolos, que é necessário para receber nova

camada de revestimento em aço inoxidável, com o objetivo de restaurar as propriedades mecânicas dos rolos, exigidas pelo processo de lingotamento de placas de aço.

5.1.3 Equipamentos auxiliares para caracterização

Para análise do desempenho da ferramenta, foi analisado o desgaste utilizando lupa com resolução 8x (Figura 5.6):

Figura 5.6 - Lupa utilizada no experimento



Fonte: o autor (2017).

As análises dos desgastes das ferramentas de cortes na condição de semi-desbaste foram realizadas a cada passe.

5.1.4 Critérios para definição de fim de vida de ferramentas de corte

Os critérios de fim de vida das ferramentas foram baseados na literatura. A determinação do fim de vida segue as recomendações da norma ISO 3685/1993, que fixa o desgaste de flanco máximo com um valor igual a 0,6 mm, de forma a obter o melhor aproveitamento das ferramentas.

5.1.5 Parâmetros de corte utilizados

Como já citado em capítulos anteriores, a velocidade de corte V_c será o único fator considerado no experimento, por ser mais relevante que o avanço (f_n) e a profundidade de corte (a_p).

5.1.6 Ferramenta de corte utilizada

Os critérios utilizados para selecionar a pastilha de corte tiveram como principal fator o consumo e os custos de reposição nos processos de usinagens. A Figura 5.7 mostra as dez pastilhas (ferramentas de corte) mais consumidas em 2016 e seus respectivos gastos.

Figura 5.7 - Consumo das pastilhas mais utilizados

Pastilhas de Corte - 10 mais consumidas		
Tipos de Pastilhas	Quant.	Gasto (R\$)
PASTILHA INTER ISO RCMX 250700 H05	115	8.079,55
PASTILHA INTER SNMG 190616 SMR 1115	89	5.215,40
PASTILHA INTER R390-17 04 08M-PM 1025	58	2.745,96
PASTILHA ZCC RCKT1204MODM YBG202	61	1.886,84
PASTILHA INTER R290 12 T3 08 M PM 4030	41	1.590,23
PASTILHA INTER R245-12 T3 E-PL 1025	27	1.385,95
PASTILHA INTER DNMG 150608 P 25 K 20	34	1.214,87
PASTILHA INTER TNMG 160404 P 25	45	1.198,85
PASTILHA INTER R390-11 T 08M-PM 1025	27	1.108,60
PASTILHA INTER R290-12T308M-MM GC 2030	29	1.056,91

Fonte: o autor (2017).

A pastilha situada na primeira posição tem aplicação específica, o que poderia limitar a abrangência dos objetivos do trabalho, apesar do maior consumo e custo. A pastilha de corte SNMG 190616, com aresta de corte de 19 mm, foi selecionada para realização dos experimentos, devido ao seu posicionamento na segunda colocação entre as dez mais consumidas nos processos de usinagens. Entretanto, a sua maior utilização concentra-se em uma célula de usinagem de torneamento convencional de mesma aplicação (rolos do lingotamento contínuo). Esta restrição técnica exigiu a substituição por uma pastilha de corte similar (SNMG 150906, com aresta de corte de 15 mm), que é utilizada na usinagem de desbaste em tornos CNC. Ressalta-se que os parâmetros de corte de trabalho são similares e que o

comprimento da aresta cortante menor da pastilha substituta não comprometeu a replicação das condições reais de trabalho de ambas as pastilhas. As especificações técnicas de fabricação das pastilhas, bem como o critério de escolha das pastilhas, não foram detalhadas nesse trabalho por se uma variável intrínseca aos testes e de responsabilidade dos fornecedores.

Em relação ao critério de desempenho das pastilhas, foi adotado o desgaste de flanco, por ser representativo nas operações de usinagens de desbaste que foram utilizadas no trabalho, analisando-o nas condições estabelecidas no processo.

5.1.7 Parâmetros de testes

Os parâmetros de testes propostos para os experimentos estão mostrados na Tabela 5.2 a seguir:

Tabela 5.2 - Parâmetros de teste do experimento

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Vc (m/min)	69	76	87
Avanço (mm/rot)	0,35	0,35	0,35
Prof. Corte (Ap) (mm)	5,0	5,0	5,0

Fonte: o autor (2017).

Os valores sugeridos levaram em consideração a compatibilidade do material usinado com as características da pastilha de corte (formato, dimensão, raio da ponta e cobertura).

5.2 DELINEAMENTO COM UM FATOR (ONE-WAY ANOVA)

O delineamento com um único fator foi adotado no presente trabalho, pois já se conhece previamente qual fator (velocidade de corte), entre os parâmetros de corte, é o mais relevante para o experimento proposto.

No experimento proposto, pretende-se investigar a influência da velocidade de corte no tempo de vida das ferramentas de corte. A resposta do experimento foi o “tempo efetivo de corte”. O fator do experimento foi a “velocidade de corte”.

Três velocidades de corte (V_c) do torno horizontal CNC foram escolhidas para a investigação: 69, 76 e 87 m/min (três níveis ou três tratamentos). Quatro amostras foram consideradas em cada velocidade (quatro replicações). Desta forma, as observações são tomadas em ordens aleatórias, pela seleção de uma das doze amostras e então selecionados aleatoriamente umas das três velocidades de corte (aleatorização).

O objetivo da análise é determinar se os tempos efetivos de corte obtido nos três níveis são estatisticamente diferentes. Se isso for verdadeiro, então se pode concluir que existe a relação de causa e efeito entre o fator “velocidade de corte” e a resposta “tempo de vida” da ferramenta.

5.2.1 Replicações nos experimentos

A fim de se obter resultados representativos dos experimentos, foi estabelecido usar doze rolos. Os tempos medidos em minutos estão contidos na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Configuração dos experimentos: número de replicações

Fator- V_c (m/min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
69	37,24	39,11	38,91	36,49
76	27,93	30,41	29,33	28,67
87	18,62	19,47	20,60	18,25

Fonte: o autor (2017).

Estabeleceu-se a realização de quatro passes de trabalho para cada velocidade de corte experimentada, com o desgaste de flanco sendo medido a cada passe. Os valores de tempos foram medidos com cronômetro digital e indicador da própria máquina-operatriz, conforme Figuras 5.8 e 5.9:

Figura 5.8 - Medição de tempo de usinagem 1



Fonte: o autor (2017).

Figura 5.9 - Medição de tempo de usinagem 2

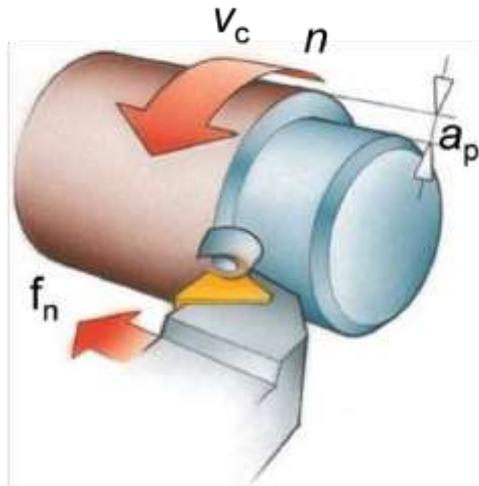


Fonte: o autor (2017).

O cálculo das constantes k e x da equação de Taylor será definido para cada par de parâmetros velocidade de corte (V_c) e tempos efetivos de corte (t_c), calculado pela equação $t_c = (l \cdot d) / (1000 \cdot V_c \cdot f_n)$, sendo t_c o tempo efetivo de corte, l o percurso de avanço da ferramenta, d o diâmetro inicial usinado e f_n o avanço da ferramenta.

A Figura 5.10 ilustra esquematicamente o processo de usinagem (torneamento cilíndrico) proposto para o trabalho, com todos os parâmetros de corte estudados (V_c , a_p , e f_n):

Figura 5.10 – Ilustração de um torneamento cilíndrico com todos os parâmetros de corte



Fonte: o autor (2017).

Os tempos de vida da ferramenta serão calculados segundo a equação de Taylor, para 3 velocidades de corte (V_c) distintas, fixando o avanço (f_n) e a profundidade de corte a_p . Importante ressaltar que a velocidade de corte V_c será mantida constante através de recursos de compensação de redução de diâmetro do CNC do torno utilizado nos ensaios.

5.3 CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu todos os procedimentos experimentais realizados durante a execução do trabalho para caracterizações e testes das ferramentas de corte utilizadas.

Mostrou-se primeiramente a máquina-ferramenta e os materiais utilizados no experimento. Detalhou-se o material usinado (especificação técnica, geometria) e os equipamentos auxiliares.

Os parâmetros de corte também foram estabelecidos conforme as premissas dos testes. Detalhou-se o uso da técnica de experimentos com um único fator (velocidade de corte) e as replicações para as doze amostras ensaiadas.

Por fim, abordou-se a metodologia de avaliação de tempos de vida, com ênfase no cálculo das constantes k e x da equação de Taylor, definidas para cada par de parâmetros, velocidade de corte (V_c) e tempo efetivo de corte (t_c), medidos após a avaliação dos desgastes de flanco e de cratera nas arestas das pastilhas de corte (fim de vida da pastilha).

No próximo capítulo, serão descritos os resultados do experimento, destacando as informações geradas pela ferramenta computacional utilizada no trabalho.

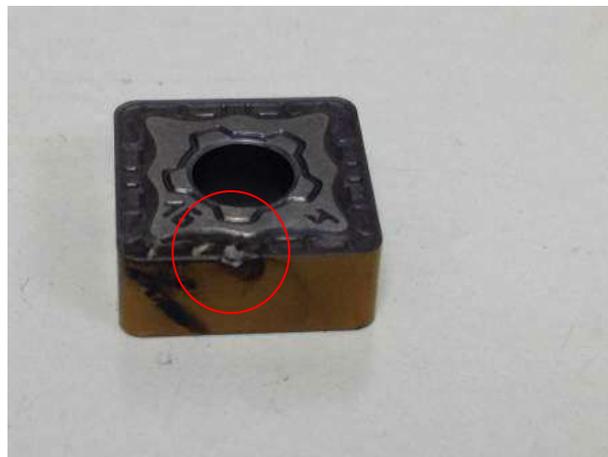
6 RESULTADOS

No teste foram utilizados, ao todo, doze rolos longos, que foram retirados da máquina de lingotamento contínuo de placas de aço como amostras. As dimensões principais dos rolos são: $L = 785$ mm (comprimento da mesa) e $d = 230$ mm (diâmetro do rolo). O experimento foi realizado com o mesmo operador e a mesma máquina-operatriz.

Para verificação prática de fim de vida da ferramenta de corte, foram observados dois tipos de desgaste em conjunto: o desgaste de flanco e o desgaste de cratera, este último em virtude das operações de torneamento de desbaste serem pouco sensíveis a pequenos desgastes de flanco. Ou seja, para fins práticos, com relação à atividade de usinagem de desbaste (rebaixamento da mesa dos rolos), foi considerado para fim de vida da ferramenta de corte o desgaste de cratera.

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram fotos das ferramentas de corte utilizadas no experimento, com desgaste de flanco e de cratera, respectivamente.

Figura 6.1 - Pastilha com desgaste de flanco



Fonte: o autor (2017).

Figura 6.2 - Pastilha com desgaste de cratera



Fonte: o autor (2017).

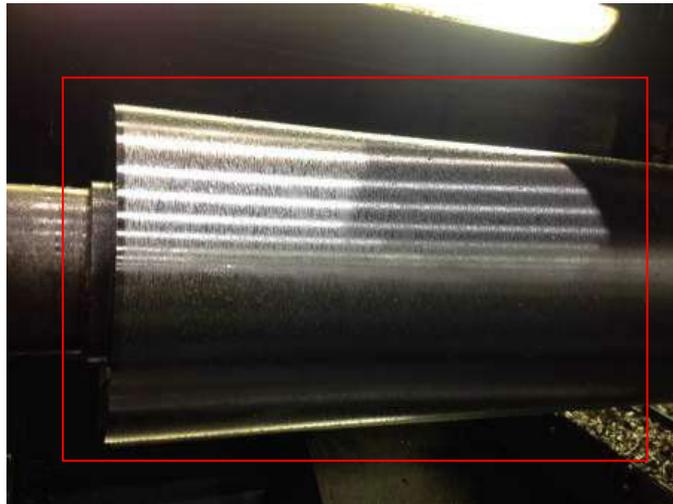
Algumas das amostras testadas (rolos) apresentaram diferenças no grau de acabamento da superfície, devido à ocorrência de desgaste de flanco durante o passo, mas que foi relevado por não comprometer a qualidade requerida de acabamento superficial nas operações de desbaste, conforme mostram as Figuras 6.3 e 6.4 (superfícies desbastadas com riscos da ferramenta de corte visíveis):

Figura 6.3 - Superfície desbastada usinada parcialmente



Fonte: o autor (2017).

Figura 6.4 - Superfície desbastada totalmente usinada



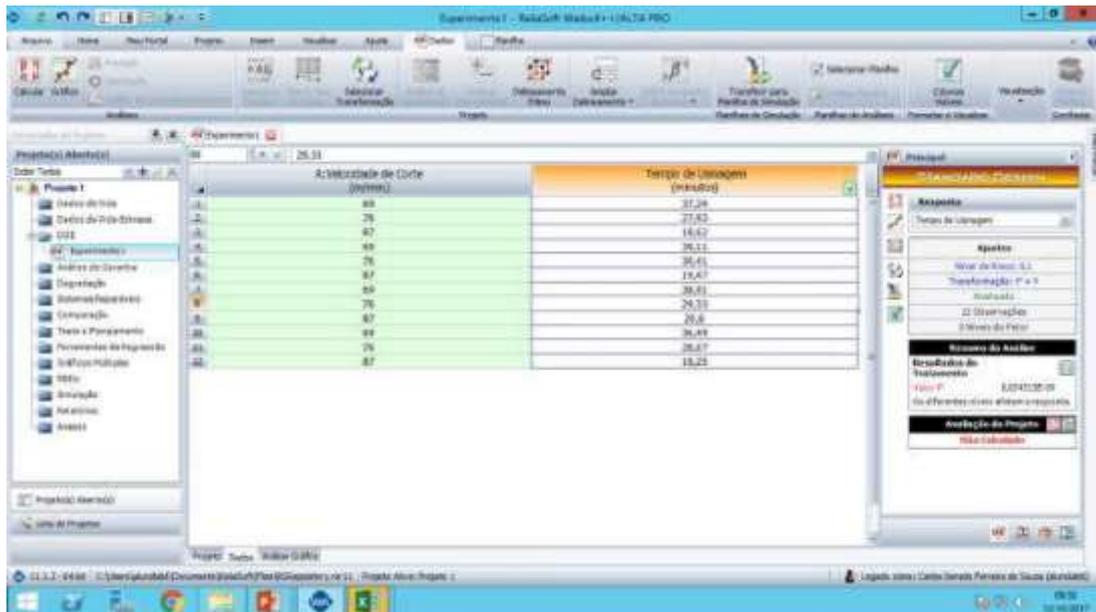
Fonte: o autor (2017).

Todas as operações de torneamento de desbaste foram realizadas com refrigeração, utilizando fluido de corte (condição real de trabalho), pois o objetivo do teste foi reproduzir ao máximo o mesmo ambiente de usabilidade do par ferramenta de corte-rolo usinado.

6.1 RESULTADOS ONE-WAY (ANOVA)

Como software de suporte para avaliação estatística dos dados amostrados, utilizou-se o DOE++, da Reliasoft, conforme mostra a Figura 6.5:

Figura 6.5 - Preparação dos tempos de usinagem no software DOE++



Fonte: o autor (2017).

6.2 TABELA ANOVA

A Figura 6.6 mostra a tabela ANOVA com o teste F e índice de significância P para os valores amostrados:

Figura 6.6 - Tabela ANOVA

Tabela ANOVA					
Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Relação F	Valor P
Tratamento	2	700,23035	350,115175	274,215996	8,634313E-9
ERRO	9	11,491075	1,276786		
Total	11	711,721425			
S = 1,12995					
R-sq = 98,385453%					

Fonte: o autor (2017).

Com $9(N-k)$ e $2(k-1)$ graus de liberdade, verifica-se na distribuição F de Fisher, $F_{calc} = 4,26$ ($N = 12$ elementos e $k = 3$ níveis), conforme Figura 6.7:

Figura 6.7 - Distribuição F de Fischer

df1 \ df2		Graus de liberdade para o denominador																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	24	30	40	60	120	∞						
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,4	244,9	245,4	245,9	246,3	246,7	247,1	247,5	247,8	248,0	248,1	248,2	248,2	248,3	248,3	248,3	
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,42	19,43	19,43	19,44	19,44	19,45	19,45	19,46	19,46	19,47	19,48	19,48	19,49	19,49	19,50	19,50	19,50	
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,72	8,70	8,69	8,67	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53	8,51	8,49	8,47	8,45	8,43	8,41	
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,87	5,86	5,84	5,82	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63	5,61	5,59	5,57	5,55	5,53	5,51	
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,64	4,62	4,60	4,58	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36	4,34	4,32	4,30	4,28	4,26	4,24	
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,96	3,94	3,92	3,90	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67	3,64	3,62	3,60	3,58	3,56	3,54	
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,53	3,51	3,49	3,47	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	3,21	3,19	3,17	3,15	3,13	3,11	
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,24	3,22	3,20	3,17	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93	2,91	2,89	2,87	2,85	2,83	2,81	
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,03	3,01	2,99	2,96	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71	2,69	2,67	2,65	2,63	2,61	2,59	
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,87	2,85	2,83	2,80	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,52	2,50	2,48	2,46	2,44	2,42	

Fonte: o autor (2017).

Pela tabela ANOVA, $F_{crit} = 274,21 > F_{calc} = 4,26$, o que confirma estatisticamente que as diferenças entre as médias são significativamente diferentes, ou seja, afetam fortemente os tempos de usinagem e, conseqüentemente, a vida da ferramenta de corte.

O valor $P = 8,63E-9$ indica que há uma diferença significativa nos tempos de usinagem quando os níveis de velocidade de corte são modificados.

O coeficiente de correlação $R_{sq} = 98,38\%$ mostra a fortíssima relação entre o fator único (velocidade de corte) das amostras selecionadas e a resposta (vida da ferramenta).

6.3 RESUMO DOS DADOS

O resumo dos dados, mostrado na Figura 6.8, evidencia a similaridade entre os desvios padrões das amostras ensaiadas nos três níveis de velocidade escolhidos para investigação:

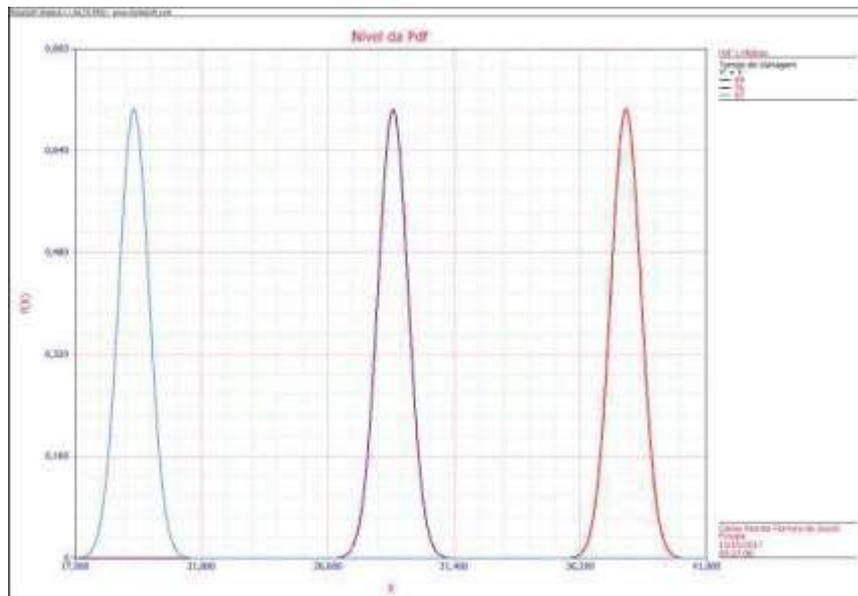
Figura 6.8 - Resumo dos dados

Resumo dos Dados			
Nível do Fator	Número do Nível	Média Estimada	Desvio-Padrão
69	4	37,9375	1,278316
76	4	29,085	1,052283
87	4	19,235	1,043536

Fonte: o autor (2017).

A resposta a cada nível é assumido que é normalmente distribuído, conforme evidenciado na Figura 6.9:

Figura 6.9 - Resposta dos três níveis ensaiados: presunção de normalidade



Fonte: o autor (2017).

6.4 COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS

Pela comparação das médias entre as três velocidades de corte avaliadas, como pode ser notado na Figura 6.10, verifica-se que há uma diferença significativa na resposta entre o nível 1 e o nível 2, entre o nível 1 e o nível 3 e entre o nível 2 e o nível 3.

Figura 6.10 - Comparação das médias

Comparação das Médias						
Contraste	Diferença Média	Erro padrão agrupado	Confiança Inferior	Confiança Superior	Valor T	Valor P
69 - 76	8,8525	0,798995	7,387852	10,317148	11,079543	0,000002
69 - 87	18,7025	0,798995	17,237852	20,167148	23,40753	2,257985E-9
76 - 87	9,85	0,798995	8,385352	11,314648	12,327987	6,117672E-7

Fonte: o autor (2017).

Em resumo, as respostas em todos os níveis possuem diferenças significativas entre si.

6.5 CÁLCULO DAS CONSTANTES K E X (EQUAÇÃO DE TAYLOR)

Para efeito de cálculo das constantes k e x da equação de Taylor, adotou-se as velocidades de corte V_{c1} e V_{c3} , pois foram as que apresentaram maior significância estatística entre as médias amostrais (Figuras 6.11, 6.12 e 6.13):

Figura 6.11 - Resultados do teste 1

TESTE 1	
V_c (m/min)	69
T (min)	47,020
Comprimento (mm)	785
Diâmetro (mm)	230
Avanço (mm/rot)	0,35

Fonte: o autor (2017).

Figura 6.12 - Resultados do teste 2

TESTE 2	
Vc (m/min)	76
T (min)	21,345
Comprimento (mm)	785
Diâmetro (mm)	230
Avanço (mm/rot)	0,35

Fonte: o autor (2017).

Figura 6.13 - Resultados do teste 3

TESTE 3	
Vc (m/min)	87
T (min)	11,188
Comprimento (mm)	785
Diâmetro (mm)	230
Avanço (mm/rot)	0,35

Fonte: o autor (2017).

Adotando as velocidades de corte do teste 1 e teste 3, calculamos as constantes k e x , a saber: $K = 1,15E+13$ e $x = 6,193979383$. Assim, a equação de Taylor, avaliada de forma determinística, fica como segue: $T = 11536566918320,100$ e $Vc^{-6,193979383}$.

Rearranjando a equação de Taylor, podemos reescrevê-la em termos das constantes Y e C , como: $C = Vc.Ty$ com $y = 1/x$ e $C = K.y$. Assim, o coeficiente y , determinado pelo experimento, pode ser comparado com referências da literatura (Figura 6.14):

Figura 6.14 - Constantes da equação de Taylor

CONSTANTES DETERMINADAS DA EQUAÇÃO DE TAYLOR	
K	1,15E+13
x	6,193979383
y	0,16

Fonte: o autor (2017).

Podemos comparar o valor da constante y , calculada deterministicamente, com o proposto por Kienzle (apud FERRARESI, 1977) (Figura 6.15):

Figura 6.15 - Valores do expoente y , segundo Kienzle

Valores do expoente y da fórmula de Taylor para diferentes materiais, segundo Kienzle (ensaios realizados no T. H. Hannover em 1947) [1]

Material	Aço rápido	Metal duro
St. 42.11 (ABNT 1025)	0,26	0,14
St. 50.11 (ABNT 1035)	0,26	0,18
St. 60.11 (ABNT 1045)	0,25	0,17
St. 70.11 (ABNT 1060)	0,25	0,16
St. 85.11 (ABNT 1095)	0,25	0,17
Liga de aço { Mn, Cr, Ni	0,25	0,16
{ Cr, Mo	0,26	0,17
Ferro fundido { 12.91 e 14.91	0,26	0,26
{ 18.91 e 26.91	0,25	0,24
maleável	0,26	0,25

Fonte: o autor (2017).

Nesse caso, utiliza-se como base de comparação uma liga de aço Mn, Cr e Ni (revestimento da superfície do rolo em aço inoxidável), usinado com metal duro.

Outra referência que pode ser utilizada pelo experimento foi a proposta pela Tool Engineers Handbook (apud FERRARESI, 1977) utilizando a usinagem de aço com ferramenta de metal duro (Figura 6.16):

Figura 6.16 - Valores do expoente y , segundo o Tool Engineers Handbook

Valores do expoente y da fórmula de Taylor para diferentes materiais, segundo o Tool Engineers Handbook [6]

Material da peça	Metal duro			Aço rápido (18-4-1)
	Alto grau	Médio grau	Tipos antigos	
Aço	0,3	0,3	0,167	0,15
Ferro fundido	0,25	0,25	0,25	0,25
Metal leve	0,41	0,41	0,41	0,41
Latão e bronze	—	—	—	0,25
Cobre	—	—	—	0,13

Fonte: Ferraresi (1977).

Concluimos que o parâmetro y (ou x) da equação de Taylor, determinado pelo experimento proposto, atingiu valores coerentes com as referências literárias.

Desta forma, podemos estimar a vida da ferramenta de corte para várias velocidades de corte de trabalho, como mostrado na Figura 6.17.

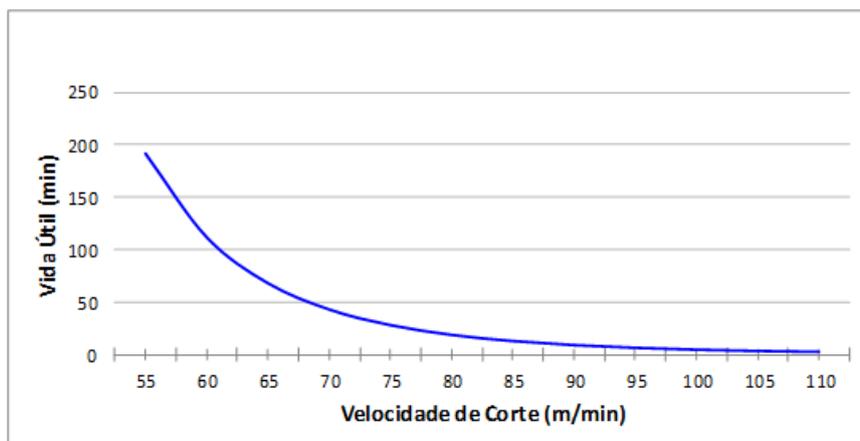
Figura 6.17 - Dados simulados de vida, segundo a equação de Taylor

RPM	Vc (m/min)	Vida estimada da ferramenta de corte (min)
76	55	191,56
83	60	111,75
90	65	68,07
97	70	43,01
104	75	28,05
111	80	18,81
118	85	12,92
125	90	9,07
131	95	6,49
138	100	4,72
145	105	3,49
152	110	2,62

Fonte: o autor (2017).

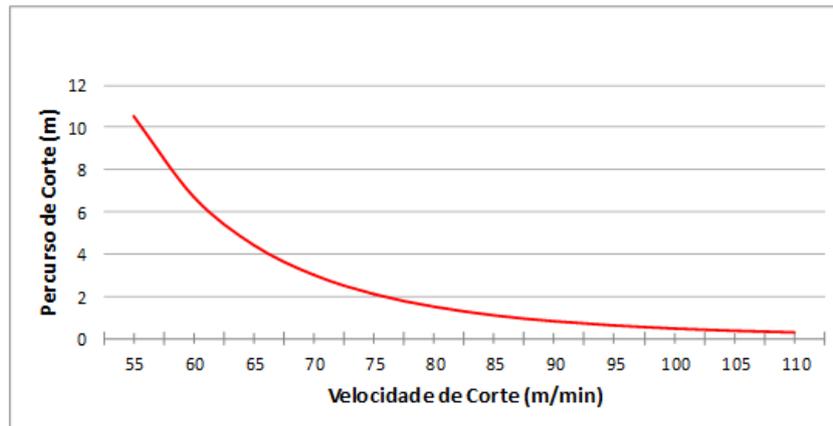
E plotando graficamente, pode-se verificar os gráficos da vida útil da ferramenta de corte, percurso de corte, produção por aresta e custo por aresta, em função da velocidade de corte (Gráficos 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, respectivamente):

Gráfico 6.1 - Vida útil x velocidade do corte



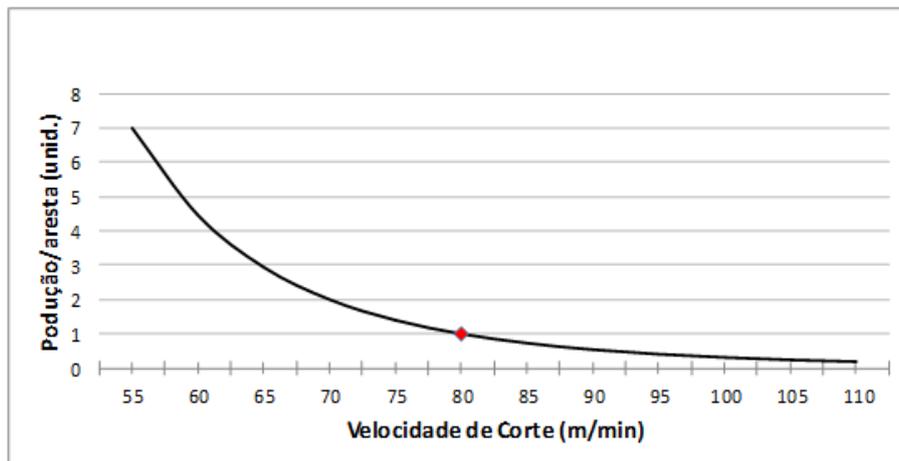
Fonte: o autor (2017).

Gráfico 6.2 - Percurso do corte x velocidade do corte



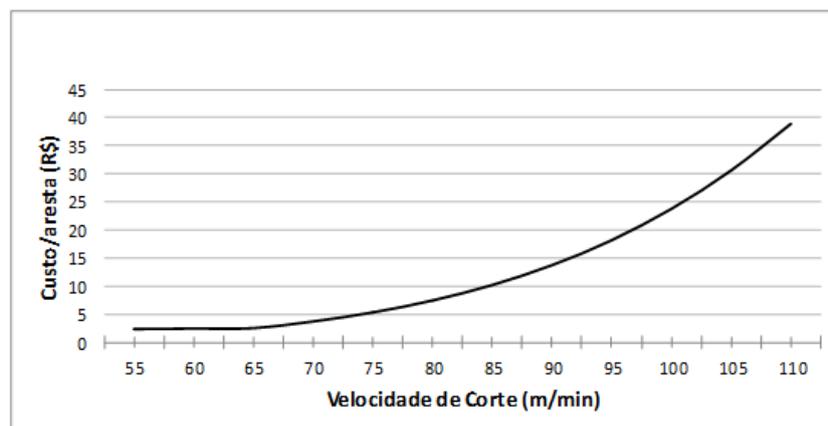
Fonte: o autor (2017).

Gráfico 6.3 - Produção por aresta x velocidade de corte



Fonte: o autor (2017).

Figura 6.4 - Custo por aresta x velocidade de corte



Fonte: o autor (2017).

Os gráficos plotados de vida útil, percurso de corte, produção e custo por aresta versus a velocidade de corte permitiu aferir um padrão de desempenho da ferramenta de corte utilizada no experimento prático.

6.6 PROPOSTA DE PADRÃO DE DESEMPENHO TÉCNICO

Através do levantamento da equação de Taylor, que propõe uma estimativa da vida útil da ferramenta de corte para o caso estudado, pode-se comparar o desempenho das pastilhas de corte entre fabricantes de pastilhas.

É proposta, a seguir, uma sequência para o estabelecimento de testes de desempenho de fabricantes de ferramentas de corte, em três etapas:

Primeira etapa:

- Escolha da peça, com especificação técnica do tipo de material a ser usinado;
- Definição da ferramenta de corte, condições operacionais e parâmetros de usinagem a serem testados (usinagem com ou sem refrigeração, profundidade de corte, avanço e velocidade de corte);
- Escolha da máquina-operatriz em que serão realizados os testes.

Segunda etapa:

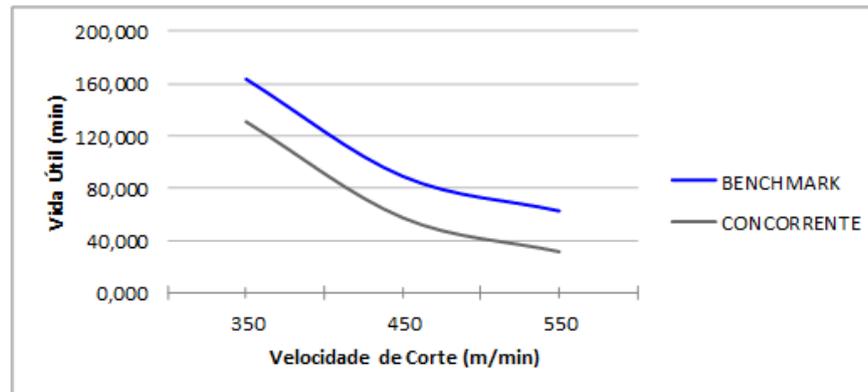
- Realização de experimento prático com, no mínimo, 12 amostras;
- Definição dos critérios de estabelecimento de fim de vida das ferramentas de corte (geometria, material da ferramenta, detalhes construtivos, etc.);
- Medição dos tempos correspondentes de fim de vida.

Terceira etapa:

- Verificação das velocidades de corte mais significativas do experimento via software de apoio (DOE++, da Reliasoft, ou outro com recursos estatísticos semelhantes);
- Cálculo das constantes da equação de Taylor para definição da equação empírica que modele a vida útil das ferramentas testadas;
- Simulação de vida útil nas velocidades de corte de trabalho;
- Comparação das vidas entre fabricantes.

No Gráfico 6.5, é mostrado o exemplo hipotético de duas curvas de vida, uma usada como benchmark e outra como concorrente.

Gráfico 6.5 - Comparação benchmark x concorrente



Fonte: o autor (2017).

Desta forma, consegue-se criar padrões de desempenho comparando ferramentas de corte entre fabricantes, sem necessidade de conhecimento detalhado da ferramenta de corte testada (geometria, material da ferramenta, detalhes construtivos, etc.).

6.7 CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO

O capítulo abordou os resultados obtidos com a realização do experimento. Inicialmente, foram postas em evidência as condições das pastilhas utilizadas nos ensaios, destacando os tipos de desgaste sofridos conforme se variava as velocidades de corte.

Na sequência, mostrou-se o estado da superfície das amostras (rolos) usinadas, focando a condição real de usinagem de desbaste na rotina de recuperação da superfície usinada.

Após a coleta dos tempos de vida medidos nos ensaios, seguiu-se a modelagem do experimento no software estatístico, no qual foram obtidas as seguintes informações: tabela ANOVA, resumo dos dados e comparação entre as médias.

Esses dados permitiram a seleção das velocidades críticas a serem utilizadas no cálculo dos parâmetros x e k da equação de Taylor. Foram comparadas as constantes com as referências da literatura pertinente da área, para validar a aderência das equações empíricas às diferentes velocidades de corte.

Por fim, foram traçados gráficos de curva de vida, percursos de corte e produção por aresta em função de diferentes velocidades de corte.

O capítulo se encerrou com uma proposta de padrão de desempenho, com estabelecimento de uma sequência obrigatória para quaisquer tipos de ferramentas de corte, com foco na avaliação de desempenho e critérios mínimos de aceitação.

7 CONCLUSÃO

Com a realização desse trabalho, foi possível observar e identificar os fatores que influenciam no desgaste das ferramentas, como o tipo e a dureza dos materiais utilizados no experimento. Comprovou-se também que a velocidade de corte é o parâmetro de usinagem mais influente no desgaste de uma ferramenta de corte.

Através do experimento, pode-se verificar, com certa repetitividade, a velocidade de corte ótima da operação. Isso foi comprovado pelo nível de acabamento da superfície usinada, pois uma velocidade abaixo da otimizada reduzia o percurso de corte e, conseqüentemente, a usinabilidade no par ferramenta de corte x amostra. Já uma velocidades acima da velocidade otimizada gerava um nível de usinagem de desbaste bastante irregular, com rápida deterioração da ferramenta de corte.

Observou-se a necessidade de utilizar conjuntamente dois tipos de desgaste (de flanco e de cratera), o que contrariou a diretriz sugerida para o experimento, recomendada pela norma 3685:1993 (desgaste de flanco, entalhe ou catastrófica). Mas isso não invalidou os resultados obtidos, pela particularidade da aplicação da ferramenta de corte, ou seja, a perda da aresta de corte foi avaliada conjuntamente com a qualidade do acabamento da superfície da barra usinada.

Durante a realização do experimento, foi fundamental repetir as condições reais de usinagem da amostra selecionada, fato importante para garantir a solidez dos resultados.

Entre as condições estabelecidas para o teste, podemos citar a realização da operação de usinagem em uma máquina-ferramenta CNC, com garantia de uso dos mesmos parâmetros de usinagem em todas as amostras.

Fatores como tempos improdutivo e de set-up praticamente não influenciaram os tempos de vida da ferramenta, destacadamente os mais impactantes.

Com o uso do software de DOE++, foi possível realizar a análise estatística através da ANOVA (estatísticas F e estatística p). Os resultados gerados pelo software possibilitaram selecionar o par de velocidades de corte mais críticas, pois tiveram fortíssima aderência ao conjunto de amostras testadas, o que foi atestado pelos resultados da tabela ANOVA e pela comparação das médias.

Como já se sabia que a velocidade de corte era a variável mais relevante, optou-se pela análise de experimentos com um único fator, o que simplificou a análise estatística.

Pelo fato de já se conhecer o valor ótimo de velocidade de corte, não foi necessária a análise pelo método da Superfície de Resposta (MSR).

O método de Taguchi também não foi utilizado, pelo pequeno tamanho da amostra e pelo fato de se utilizar apenas um único fator.

Conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, o que foi comprovado pela comparação dos resultados com bases científicas (parâmetro x ou y da equação de Taylor).

A curva de vida obtida permitiu tirar conclusões sobre o desempenho da ferramenta de corte, expandindo-as para a criação de padrões que permitem comparar a performance de diferentes fabricantes, sempre visando à melhor relação custo/benefício da ferramenta de corte avaliada.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O experimento foi de fundamental importância para o conhecimento sobre usinagem e as causas que determinam a vida útil de uma ferramenta de corte, possibilitando avaliar de forma prática quais as variáveis de maior influência na vida útil destas ferramentas utilizadas na usinagem de torneamento.

De forma complementar ao trabalho, poderiam ser executados outros ensaios de usinabilidade para operações de acabamento, avaliando o avanço, a profundidade de corte e a rugosidade da superfície usinada na determinação de parâmetros diferentes da equação de Taylor.

Caberia a aplicação do trabalho a outros processos de fabricação por usinagem (fresamento e furação, por exemplo), buscando correlações entre fenômenos observados em processos diferentes. Desse modo, poder-se-ia mapear o comportamento da vida das ferramentas de corte para uma determinada faixa de processos de usinagens e materiais.

Adicionalmente, recomendamos executar uma análise de custos, considerando a vida útil das pastilhas e o volume de cavacos de material usinado e, assim, estender a análise para um plano mais abrangente (econômico) do processo de usinagem.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.
- BRANDT, T. H.; BRANDT, D. F.; SANTOS, S. N. dos. Uso do planejamento ortogonal de Taguchi para a melhoria de parâmetros de fresamento com ferramenta de metal duro. **Linguagem Acadêmica**, Batatais, v. 6, n. 1, p. 101-126, jan.-jun. 2016.
- COPPINI, N. L.; DINIZ, A.; MARCONDES, F. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Art Liber, 2000.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- FREITAS, B. M. de. **Desgaste de ferramenta e otimização da velocidade de corte na usinagem do aço inoxidável austenítico 304L com fluido vegetal**. 2013. 113 f. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: Tool-life testing with single-point turning tools. [s.l.], 1993.
- MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.
- MENDES, A. A. Aplicação de projeto de experimentos para a otimização de um projeto de usinagem em torno CNC. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Editora da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_stp_114_747_14781.pdf. Acesso em: 2 out. 2017.
- PENTEADO, R. B. **Utilização de técnicas do planejamento de experimentos na otimização de um processo de torneamento da superliga nimonic 80a**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2011.
- SANDVIK. **CVF – Arquivo de Valor ao Cliente**. 2014. Artigo não publicado.
- SHIMURA, S. **Delineamento de experimentos**. Abr. 2016 - set. 2017. 199 f. Notas de aula. Digitado.