

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Ricardo Felipe Faria**

**PROSPECÇÃO DE MELHORIA DA PRODUTIVIDADE NA  
FABRICAÇÃO DE PEÇAS EM AÇO INOX 304 EM UMA EMPRESA DE  
RIBEIRÃO PRETO / SP**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção do Centro Universitário de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

**Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar**  
**Orientador**

Araraquara, SP – Brasil  
2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

F236p Faria, Ricardo Felipe

Prospecção de melhoria da produtividade na fabricação de peças em aço inox 304 em uma empresa de Ribeirão Preto-SP/Ricardo Felipe Faria.

Araraquara: Centro Universitário de Araraquara, 2015.

79f.

Dissertação - Mestrado Profissional em Engenharia de Produção - Centro Universitário de Araraquara- UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar

1. Regressão linear múltipla. 2. Análise de superfície. 3. Análise Canônica. 4. Usinagem.

CDU 62-1

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Faria, Ricardo Felipe. **Prospecção de melhoria da produtividade na fabricação de peças em aço inox 304 em uma empresa de Ribeirão Preto / SP. 2015.** 79f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara-SP.

## ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ricardo Felipe Ferreira

TÍTULO DO TRABALHO: Prospecção de melhoria da produtividade na fabricação de peças em aço inox 304 em uma empresa de Ribeirão Preto / SP.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2015

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede ao Centro Universitário de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.

  
\_\_\_\_\_  
**Ricardo Felipe Faria**

Centro Universitário de Araraquara – UNIARA

Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801-340, Araraquara-SP.

E-mail (do autor): [ricard.faria@yahoo.com.br](mailto:ricard.faria@yahoo.com.br)



Centro Universitário de Araraquara

Rua Voluntários da Pátria, 1309 - Centro - Araraquara - SP  
CEP 14801-320 - Caixa Postal 68 - Fone/Fax: (16) 3301-7100

www.uniara.com.br

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção do Centro Universitário de Araraquara – UNIARA – para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área de Concentração:** Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

**Nome do Autor:** RICARDO FELIPE FARIA

**Título do Trabalho:** *"Prospecção de melhoria da produtividade na fabricação de peças em aço inox 304 em uma empresa de Ribeirão Preto/SP"*

**APROVADA em 03/09/2015.**

Banca examinadora:

**Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (orientador(a))**  
Centro Universitário de Araraquara - UNIARA

**Prof(a). Dr(a). Emílio Augusto Coelho Barros**  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais José e Irene pela educação a mim  
atribuída, aos meus irmãos Renato e Rose pelo respeito mútuo,  
à minha esposa Maria Alice pela compreensão nos inúmeros momentos de ausência.*

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho realizado sem o auxílio de várias pessoas não teria sido concretizado, por esta razão deixo aqui registrado os meus agradecimentos:

Ao meu amigo, professor e orientador **Jorge Alberto Achcar**, por sua paciência e competência e pelo apoio nos momentos de aprendizado.

Aos professores **José Luís Garcia Hermosilla, Claudio Piratelli, Vera Mariza Henriques de Miranda Costa** e todo o corpo docente pelo apoio, incentivo, paciência e comprometimento.

Aos colegas de classe **Daniel, Fábio, Gustavo, Ítalo, Abílio** e toda a classe representada pelos colegas citados.

*“Uma inteligência modesta aliada a muito trabalho  
frequentemente pode ser mais que uma inteligência brilhante e  
vadia”.*

Paulo Boulos e Ivan de Camargo

## RESUMO

No cenário de rápidas mudanças nas indústrias de fabricação de componentes de metal, as aplicações de técnicas de otimização de processos de corte de metal é essencial para uma unidade de fabricação responder eficazmente a acirrada competitividade e crescente demanda de produtos de qualidade no mercado. Neste trabalho será apresentado um estudo para a otimização dos parâmetros de usinagem no processo de fabricação de peças em aço inox 304 em uma indústria de equipamentos e instrumentais médicos / odontológicos, localizada no município de Ribeirão Preto / SP. Um primeiro objetivo deste estudo é analisar os possíveis fatores que afetam o processo de usinagem em termos de quantidade de peças produzidas e tempo de fabricação de cada unidade. Também há interesse em descobrir as covariáveis importantes que afetam o tempo total (durabilidade) de vida útil da ferramenta de corte. Modelos de regressão linear múltipla foram utilizados considerando uma amostra selecionada de tamanho 28 baseada em um planejamento fatorial 7x4. Com os fatores identificados, foram identificados os gráficos de contornos dos valores ideais que maximizam a quantidade produzida e que minimizam o tempo de fabricação usando técnicas de superfícies de respostas como análise canônica e técnicas de caminho de ascensão ao máximo “steepest ascent”, os pontos em questão foram encontrados fora da região experimental, não sendo aplicáveis aos processo, portanto juntamente com o modelo matemático ajustado, foi possível obter a previsão da vida útil da ferramenta de corte em função da produção, e a definição dos valores ótimos, possibilitando também uma proposta para gestão estratégica em função da demanda, e conforme a necessidade da produção: volume de peças, prazos de entregas e o consumo da ferramenta de corte, permitindo a execução de projeções futura dos processos e dos ganhos, comprovando a significativa importância na aplicação e desenvolvimentos de tais modelos para solucionar os problemas industriais.

**Palavras-chave:** regressão linear múltipla, análise de superfície de respostas, análise canônica, usinagem.

## ABSTRACT

*In the scenario of rapid changes in manufacturing industries, applications of metal cutting processes optimization techniques is essential for a manufacturing unit effectively respond to fierce competition and growing demand for quality products in the market. The present work presents a study for the optimization of machining parameters in parts manufacturing process 304 stainless steel in an equipment industry and medical / dental instruments, located in Ribeirão Preto / SP. A first objective of this study is to analyze the possible factors that affect the machining process in terms of quantity of produced parts and manufacturing time of each unit. There is also interest in discovering the important covariates that affect the total time (durability) of the life of the cutting tool. Multiple linear regression models were used considering a selected sample of size 28 based on a 7x4 factorial design. With the identified factors, the contours of the ideal values graphics have been identified that maximize the quantity produced and minimize manufacturing time by using answer surfaces techniques such as canonical analysis and rise to a maximum of road techniques "steepest ascent", points in question were found outside the experimental area and shall not apply to the process, so along with the adjusted mathematical model, it was possible to forecast the cutting tool life based on production, and the definition of optimal values, also enabling proposal for strategic management based on demand, and according to the needs of production: volume parts, delivery times and consumption of the cutting tool, allowing the execution of future projections of processes and gains, proving the importance for the application and development of such models to solve industrial problems.*

**Key-words:** *Multiple linear regression analysis of the response surface, canonical analysis, machining.*



## Lista de figuras

Figura 1 – Fatores que influenciam na rugosidade.....	18
Figura 2 – Processo de Torneamento de uma peça.....	31
Figura 3 – Tipos de torneamento externo e interno.....	33
Figura 4 – Torno Universal.....	34
Figura 5 – Tipos de CNC.....	35
Figura 6 – Efeito dos parâmetros de corte na vida útil da ferramenta .....	36
Figura 7 – Movimentos de avanço e giratório da peça contra o corte da ferramenta.....	36
Figura 8 – Peça fabricada .....	48
Figura 9 – Centro de torneamento.....	48
Figura 10 – Comando do Centro de Torneamento GL 240.....	49
Figura 11 – Quant. peças produzidas x velocidade corte e avanço.....	51
Figura 12 – Tempo de fabricação x velocidade corte e avanço.....	51
Figura 13 – Resíduos (modelo de primeira ordem-peças produzidas) .....	56
Figura 14 – Resíduos (modelo de primeira ordem-tempo).....	56
Figura 15 – Contornos de peças produzidas .....	59
Figura 16 – Tempo de vida do componente versus velocidade corte e avanço.....	60
Figura 17 – Contornos para os tempos de vida útil da ferramenta de corte.....	61
Figura 18 – Resíduos do modelo de regressão de Weibull.....	62
Figura 19 – Valores observados e médias estimadas.....	63

## **Lista de Quadros**

Quadro 1 - Classificação Metodologica deste Trabalho .....	29
Quadro 2 - Exemplo de programa CNC .....	35

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados experimentais de um planejamento fatorial 7x4.....	46
Tabela 2 - Composição química do aço inoxidável 304 ASTM A276 utilizada no estudo.....	47
Tabela 3 - Estimadores de mínimos quadrados (modelo de primeira ordem).....	54
Tabela 4 - Uso de “steepest ascent” para a resposta quantidade de peças produzidas .....	55
Tabela 5 - Uso de “steepest ascent” para a resposta tempo de fabricação .....	55
Tabela 6 - Estimadores de mínimos quadrados (modelo de segunda ordem).....	58
Tabela 7 - Estimadores de máxima verossimilhança (regressão de Weibull) .....	62

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

f.d.p – Função densidade de probabilidade

CN – Comando Numérico

CNC – Comando Numérico Computadorizado

## Sumário

1 Introdução .....	15
1.1 Problemática .....	18
1.2 Questão da Pesquisa.....	18
1.3 Objetivos .....	20
1.4 Justificativas.....	20
1.5 Metodologia .....	29
1.6 Estrutura do trabalho .....	29
2 Conceitos básicos sobre usinagem .....	30
2.1 Usinagem .....	30
2.2 Usinagem: Conceitos e definições.....	30
2.2.1 Torneamento.....	31
2.2.2 Tornos Mecânicos .....	33
2.2.3 Ferramentas de Corte .....	35
2.2.4 Parâmetros de Usinagem .....	35
3 Técnicas estatísticas utilizadas para otimização do processo de usinagem.....	37
3.1 Planejamento Fatorial .....	37
3.2 Regressão linear Múltipla.....	37
3.3 Metodologia de Superfície de Resposta .....	38
3.3.1 Multiplicador de Lagrange .....	40
3.3.2 Forma canônica de um modelo de regressão múltipla (superfície de respostas).....	41
3.4 Distribuição de tempo de sobrevivência .....	42
4 Aspectos metodológicos .....	45
4.1 Classificação da Metodologia da Pesquisa .....	45
4.2 Procedimentos Operacionais .....	45
4.2.1 Recursos e ferramentas utilizados.....	47
5 Modelagem e otimização dos parâmetros no objeto de estudo.....	51
5.1 Modelagem Estatística.....	52
5.2 Técnicas de caminho de ascensão ao máximo “STEEPEST ASCENT”.....	52
5.3 Análise Canônica .....	53
5.4 Resultados.....	53
5.4.1 Uso das técnicas “STEEPEST ASCENT” .....	53

5.4.2	Uso da análise Canônica.....	57
5.5	Análise do tempo de vida (durabilidade) total da ferramenta de corte.....	60
5.5.1	Análise preliminar dos dados .....	60
5.5.2	Uso de um modelo de regressão de Weibull para os tempos de vida da ferramenta de corte .....	62
6	Conclusões.....	64
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	65
6.2	Resultados científicos obtidos a partir dos dados coletados para desenvolvimento deste trabalho.....	65
	Referencias .....	67
	Apêndice A: Desenho mecânico da peça usinada .....	75
	Apêndice B: Programa CNC da peça usinada .....	76

## 1 INTRODUÇÃO

As principais atividades do processo de gestão da produção são o planejamento, a programação e o controle da produção (CORRÊA, 2001). Para uma indústria, é no processo produtivo que estão concentradas as maiores perdas e também o maior potencial de ganho (SEVEGNANI *et al*, 2010). A gestão do processo produtivo é um dos fatores críticos para a melhoria contínua da competitividade industrial. Nessa direção temos as técnicas de otimização.

Para a área de usinagem estudos de otimização são essenciais para a obtenção de melhores resultados em termos de produtividade e maior margem de lucro (WU e HAMADA, 2000). Isso é enfatizado por vários autores, como por exemplo:

Mukherjee e Ray (2006), comentam que:

No cenário de rápidas mudanças nas indústrias de fabricação, as aplicações de técnicas de otimização de processos de corte de metal é essencial para uma unidade de fabricação responder eficazmente a acirrada competitividade e crescente demanda de produtos de qualidade no mercado (MUKHERJEE e RAY, 2006, p. 15).

Já Montgomery (1990), defende que:

O corte de metal é um dos importantes processos e amplamente utilizados de fabricação em indústrias de engenharia. Uma melhoria significativa na eficiência do processo pode ser obtido por otimização de parâmetros do processo que identifica e determina as regiões de fatores críticos de controle de processos que conduzem às saídas ou respostas com variações aceitáveis que asseguram redução de custo na fabricação (MONTGOMERY, 1990, p. 132).

Aggarwal e Singh (2005) apresentam uma boa revisão de várias técnicas convencionais introduzidas na literatura que são empregadas para a otimização de usinagem em geral associadas à programação geométrica, geométrica linear, programação de metas, técnicas de minimização irrestrita sequencial, programação dinâmica, etc. Nesse artigo, Aggarwal e Singh (2005) enfatizam que as técnicas mais usuais de otimização na área de usinagem são as seguintes:

**Lógica fuzzy:** a lógica fuzzy tem grande capacidade de capturar o raciocínio do senso comum humano, tomada de decisão e outros aspectos da cognição humana. Modelagem por lógica fuzzy abre uma nova forma de otimizar as condições de corte e também para seleção da ferramenta. A lógica fuzzy expressa as variáveis de entrada sob a forma de valores de pertinência fuzzy com base em várias funções de pertinência como por exemplo, se a força de corte é alta e tempo de usinagem é alto, então o desgaste da ferramenta é elevado, são formulados com base em observações experimentais. Com base em cada regra a inferência pode ser obtida. Inferências são obtidas a partir de diversas regras que são combinadas para se chegar a uma decisão final.

**Algoritmo genético (AG):** são algoritmos baseados na mecânica da seleção natural e genética naturais, que são mais robustos e mais eficazes para localizar um ótimo global (ver por exemplo, Kumar e Malik, 2013). É devido a esta característica que o AG determina através do espaço a solução a partir de um grupo de pontos e não a partir de um único ponto. As condições de corte são codificados por genes de codificação binária para aplicar GA na otimização dos parâmetros de usinagem. Um conjunto de genes é combinada em conjunto para formar cromossomas, utilizado para executar os mecanismos básicos em AG, como o cruzamento e mutação. Crossover é a operação para trocar alguma parte de dois cromossomas para gerar nova prole, o que é importante quando exploramos todo o espaço de busca rápida. A mutação é aplicada após uma passagem para fornecer uma pequena aleatoriedade para os novos cromossomas. Os melhores resultados de condições de corte são obtidos a partir da comparação dos valores de funções objetivas entre todos os indivíduos após um número fixado de iterações. Na implementação de um algoritmo AG as variáveis são codificados como números binários com n bits atribuído em uma linha como seqüências cromossômicas. Wang & Jawahir (2004) usaram essa técnica para a otimização de parâmetros de máquina de moagem. Kuo & Yen (2002) usaram um algoritmo de ajuste de parâmetros no algoritmo genético como base para controle multidimensional de movimento de um computador numérico máquina-ferramenta de controle.

**Técnica de busca Scatter (SS):** esta técnica se origina de estratégias para a combinação de regras de decisão e restrições substitutos. SS é completamente generalizado e independente de problemas, uma vez que não tem suposições restritivas sobre função objetivo, conjunto de parâmetros e restrição definida. Ele pode ser facilmente modificado para otimizar a operação de usinagem sob vários critérios econômicos e numerosas restrições práticas. A técnica SS pode obter soluções quase ótimas em tempo de execução razoável no PC. Potencialmente, isso pode ser estendido como uma estratégia on-line de controle de qualidade para otimizar os parâmetros de usinagem com base nos sinais dos sensores. Chen & Chen (2003) apresentam um extenso artigo sobre essa técnica. Observar que os modelos de otimização em máquinas são necessários para determinar melhores parâmetros de usinagem, incluindo a velocidade de corte, taxa de alimentação e profundidade de corte, a fim de minimizar custo de produção da unidade. O custo de produção da unidade pode ser dividida em quatro elementos básicos de custo:

- Custo de corte de corte em tempo real.
- Custos ociosos de máquina devido à carga e operação de descarga e custo movimento da ferramenta em marcha lenta
- Custo de reposição de ferramenta
- Ferramenta de custo

Para a otimização do custo de produção da unidade, restrições práticas que apresentam o estado de processos de usinagem devem ser considerados. As restrições impostas durante as operações de usinagem são:

- Restrição de parâmetro - Faixas de velocidade de corte, taxa de alimentação e profundidade de corte;
- Vida útil da ferramenta restrição - valores admissíveis de largura desgaste de flanco e profundidade;
- Restrição operacional - Força máxima admissível de corte, energia disponível na máquina ferramenta e exigência de acabamento superficial.

Dessa forma, um modelo de otimização para operação de torneamento pode ser formulado. Esse modelo é um problema de programação não-linear restrita com múltiplas variáveis (variáveis de usinagem). A solução inicial para SS é escolhido aleatoriamente. A especificação dos parâmetros tem de ser dadas pelo usuário. A experimentação pode ser executada em um PC com um processador Pentium 800Mhz.



**Técnica de Taguchi:** Genichi Taguchi foi um engenheiro japonês muito ativo na melhoria dos produtos industriais e processos do Japão desde o final dos anos 1940. Ele desenvolveu tanto a filosofia e metodologia de processos ou melhoria da qualidade do produto que depende fortemente de conceitos e ferramentas de estatística, especialmente os experimentos planejados estatisticamente. Muitas empresas japonesas têm alcançado grande sucesso através da aplicação de seus métodos. Wu (1982) relata que milhares de engenheiros executaram dezenas de milhares de experimentos baseados em seus ensinamentos. Taguchi recebeu alguns dos mais prestigiados prêmios do Japão para a melhoria de qualidade, incluindo o prêmio Deming. Em 1986, Taguchi recebeu os mais prestigiados prêmios do Instituto de Tecnologia Internacional – entre os quais, a medalha Willard F. Rockwell para Excelência em Tecnologia. A maior contribuição de Taguchi envolveu engenharia combinando e métodos estatísticos para alcançar melhorias rápidas em custo e qualidade, otimizando design de produto e processos de fabricação. O método de Taguchi se diferencia fundamentalmente das técnicas de controle estatístico do processo (SPC), que é um método de controle de qualidade on-line puramente. As idéias de Taguchi podem ser dadas em dois conceitos fundamentais:

- Perdas de qualidade devem ser definidos como desvios das metas.
- Atingir elevados níveis de sistema de qualidade economicamente exige qualidade a ser projetada no produto. Qualidade é projetada, não fabricada.

**Metodologia de superfície de respostas (MSR):** Experimentação e inferências são as características individuais de metodologia científica em geral. A estatística como uma disciplina científica é projetado principalmente para atingir estes objetivos. Planejamento de experimentos é particularmente muito útil para obter conclusões claras e precisas a partir da observações experimentais, com base nos quais podem ser feitas inferências da melhor maneira possível. A metodologia para fazer inferências tem três aspectos principais. Em primeiro lugar, estabelece métodos para fazer inferências a partir de observações, quando estas não são exatas, mas sujeitas a variação, porque inferências não são exatas, mas probabilística por natureza. Em segundo lugar, especifica métodos para a seleção de dados de forma adequada, de modo a que os pressupostos para a aplicação dos métodos estatísticos apropriados para a análise dos dados serem satisfeitos. Por último, técnicas para a interpretação adequada da resultados são concebidos. Algumas vantagens do planejamento de experimentos :

- Os números de ensaios são reduzidos.
- Valores ótimos dos parâmetros podem ser estimados.
- A avaliação do erro experimental pode ser feita.
- A estimativa qualitativa de parâmetros pode ser feita.
- Inferência sobre o efeito dos parâmetros sobre as características do processo pode ser feito (AGGARWAL e SINGH, 2005, p. 701).

Neste trabalho serão utilizados técnicas de superfícies de respostas para buscar a otimização dos parâmetros de usinagem.

A tecnologia de corte de metal tem crescido substancialmente ao longo do tempo, devido ao objetivo comum de alcançar maior eficiência do processo de usinagem. A seleção da condição ideal de usinagem é um fator chave para atingir esta posição (TAN e CREESE, 1995).

Nesse estudo, os experimentos são dirigidos para as operações de usinagem através dos parâmetros de corte, que são analisados estatisticamente para descoberta de possíveis tendências e fatores significativos, aspectos que devem ser aprimorados e com indicações de soluções para a melhoria dos processos industriais. O estudo é implementado em um processo de uma empresa

de pequeno porte para otimizar o processo de usinagem, circunstância imprescindível para esta classe de empresas ter competitividade alinhada ao desenvolvimento tecnológico.

### 1.1 Problemática

Um dos principais fatores que afetam a pressão por transformações é o avanço tecnológico. Oportunidades tecnológicas novas na forma de produtos e processos novos afetam empresas de modos diferentes, oferece oportunidades novas como também novas ameaças (LUNDVALL, 1978).

Sevegnani *et al* (2010), comenta que:

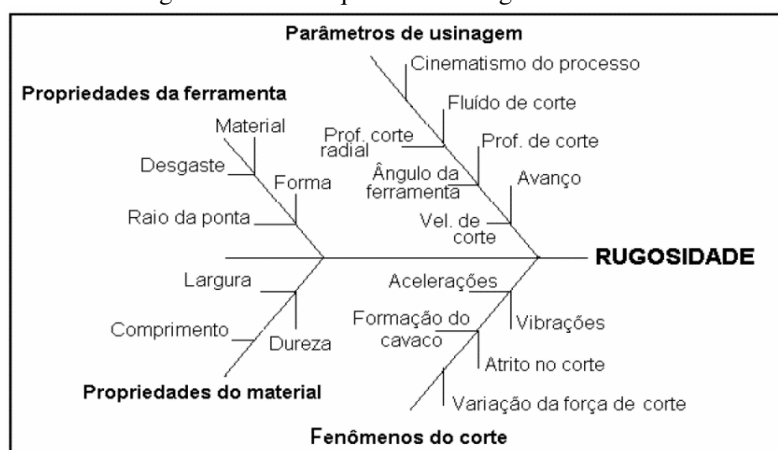
A gestão da produção envolve todos os processos relacionados à produção em uma empresa de manufatura. O ambiente competitivo destas empresas está se tornando cada vez mais disputado, conforme comentado por Souza & Pires (1999), fazendo com que a busca por melhorias no processo de gestão da produção se dê em várias iniciativas. Entre estas melhorias, a busca por uma alta eficiência dos recursos produtivos, como forma de maximizar o rendimento operacional, é frequentemente perseguida em muitas empresas (SEVEGNANI *et al*, 2010, p. 2).

E conforme Gonçalves (2006),

Com a chegada da globalização, as margens de lucro tiveram que ser reduzidas para que as empresas pudessem competir em termos de melhores preços no mercado interno e externo agora muito mais competitivo. Em face desta nova realidade, as empresas começaram a se preocupar mais com o processo produtivo dando um maior destaque para a sua otimização (GONÇALVES, 2006, p. 13.6).

Outros autores, como Su e Chen (1999) afirmam que os parâmetros de usinagem afetam significativamente o custo, a produtividade e a qualidade das peças usinadas, Conforme Batista (2006) os parâmetros de corte como a velocidade, avanço, profundidade de corte, forças, etc, as características do material sendo usinado e da ferramenta também afetam o resultado final em termos de rugosidade (ver figura 1).

Figura 1 - Fatores que afetam a rugosidade.



Fonte: ÇOLAC et al (2005, p. 661)

Shaw (2005) comenta que o aumento da velocidade de corte desenvolve o desgaste da aresta cortante da ferramenta, influenciando na força de corte (cavaco-ferramenta) e causando o aumento do nível de vibrações no conjunto ferramenta-peça que contribui fortemente para piora do acabamento da superfície usinada. O foco deste estudo se limita na prospecção dos melhores parâmetros para maximizar a produtividade, visto também que a amostragem é realizada na operação de desbaste do processo de usinagem, visto que a operação de acabamento da peça não sofrerá alterações.

Nessa direção, Ferrarezi (1977) afirma que, com o aumento da velocidade de corte e / ou do avanço, é diminuído o tempo do processo de usinagem melhorando a produtividade, mas em sentido oposto, isso em geral leva a uma redução da vida útil da ferramenta de corte.

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro e cromo com, pelo menos, 12% de cromo. Também ainda contêm, na sua composição, níquel e baixas quantidades de carbono. O aço inoxidável ABNT 304 é classificado como um aço inoxidável austenítico. Os aços inoxidáveis ferríticos até são considerados aços de boa usinabilidade; os martensíticos apresentam usinabilidade um pouco pior enquanto os austeníticos (utilizados neste estudo) são os aços inoxidáveis que apresentam a pior usinabilidade em comparação aos anteriores, devido ao seu elevado encruamento durante o processo de corte (STEEL EXPORT, 1950; ASM, 1987; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; SULLIVAN; COTTERELL, 2002; DE SOUZA, 2006) e isso conseqüentemente causa prejuízos no processo no processo de usinagem em relação aos aços comuns, ao carbono e aços de baixa liga, também apresentam cavacos longos que levam a um acelerado desgaste da ferramenta (ver por exemplo BOSSERT, 1995; DIAS et al, 2011). Por esses aços apresentarem usinabilidade ruim, a melhoria em suas condições de usinagem é uma atividade importantíssima, especialmente quando grande produtividade é requerida (SULLIVAN; COTTERELL, 2002 e CARBÓ, 2011).

Diante disso observa-se que a busca para a melhoria do processo industrial, através da configuração dos melhores parâmetros é um caminho necessário para todas as organizações industriais.

## **1.2 Questão da pesquisa**

Considerando o uso da ferramenta de corte para uma vida útil eficiente, quais são os valores dos parâmetros de usinagem, velocidade de corte e avanço, que permitem a maximização da produtividade e o menor tempo de processo ?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Gerais**

Prospectar melhoria do processo de usinagem em termos de maior quantidade de peças produzidas e menor tempo de fabricação através dos parâmetros de usinagem e avaliar a vida útil (confiabilidade) da ferramenta de corte.

### **1.3.2 Específicos**

Usando técnicas de Metodologia de Superfície de Respostas como por exemplo, as técnicas “Steepest Ascent” ou a “Análise Canônica” para análise, modelagem dos dados e otimização, baseado em um conjunto de dados levantado de uma pesquisa experimental em uma organização de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo, busca-se:

- a) Identificar os níveis dos parâmetros de usinagem para maximização da produtividade e minimização do tempo de processo;
- b) A partir de um modelo de regressão de Weibull ajustado, obter a previsão da vida útil da ferramenta em função da demanda de produção.

## **1.4 justificativas**

O torneamento é um dos processos de usinagem mais empregados em trabalhos experimentais sobre usinagem e também na indústria (TRENT; WRIGHT, 2000).

A otimização de um processo é considerada uma etapa importante em qualquer empresa que pretende redução das despesas e /ou melhoria do desempenho (RODRIGUES, 2008).

Conforme Ferrarezzi (1988), SU e Chen (1999), Saravanan et al. (2003), Wang e Liu (2007), Sankar et all. (2007), entre outros, os parâmetros que devem ser otimizados na usinagem são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, sendo que a variável profundidade de corte não foi alterada para o experimento realizado neste trabalho por interesse da própria organização, motivada pelo fato de não exceder os limites de esforços nos eixos da máquina, o que possibilitaria causar um desgaste prematuro e conseqüentemente a necessidade de manutenções corretivas na máquina CNC. Dessa forma o trabalho é concentrado em dois parâmetros: velocidade de corte e avanço de corte.

A necessidade das empresas serem altamente produtivas para sobrevivência no mercado altamente competitivo, que está relacionado a processos eficazes, tem colocado lado a lado, pesquisadores, fornecedores, fabricantes e empresas de usinagem, que buscam através de testes e técnicas estatísticas desenvolver soluções para diferentes cenários de fabricação. Considerando o caráter estocástico dos processos de manufatura, a determinação dos parâmetros de usinagem é uma etapa relevante para o processo de fabricação e maior durabilidade da ferramenta (MELO *et al.*, 2013).

A definição correta do material a ser usinado, assim como as ferramentas, fluido de corte, equipamento e condições de usinagem pode trazer retornos econômicos consideráveis como consequência dos grandes aumentos da produtividade (BAKER, 1981; EZUGWU *et al.*, 1990; e CHANDRASEKARAN e JOHANSSON, 1994). Nessa direção, as expressivas contribuições deste trabalho estão relacionadas com a busca do aumento da produtividade através do descobrimento dos parâmetros otimizados para o processo de torneamento do aço inox 304.

Outro ponto importante que justifica a realização deste trabalho é o uso de técnicas de superfícies de respostas, aplicadas ao processo de usinagem para buscar resultados relacionados à otimização da produtividade, um assunto focado em muitas publicações encontradas na literatura com a aplicação da metodologia de superfície de resposta no processo de usinagem. A seguir apresenta-se uma breve revisão dessas publicações introduzidas na literatura:

- ✓ SINGH e SHAN (2002) – Este artigo pesquisa o processo de usinagem com fluxo abrasivos sobre a possível melhora na rugosidade superficial e taxa de remoção de material pela aplicação de um campo magnético em torno da peça. Uma configuração tem sido desenvolvido por um processo denominado composto magneto para usinagem com fluxo de abrasivo (MAFM), e o efeito de parâmetros chave para o desempenho do processo tem sido estudada. Relacionamentos são desenvolvidos entre a taxa de remoção de material e a percentagem de melhoria da rugosidade da superfície de componentes de latão quando acabamento usinado por este processo. A análise da variância foi aplicada para identificar os parâmetros significativos e para testar a adequação dos modelos. Os resultados experimentais indicam significativamente melhor desempenho de MAFM sobre Usinagem com fluxo de abrasivo (AFM), é um processo relativamente novo entre os processos de usinagem não-convencionais. Baixa taxa de remoção de material passa a ser uma séria limitação de quase todos esses processos. Limitadas esforços até agora têm sido dirigidos no sentido de melhorar a eficiência desses

processos, de forma a atingir mais elevadas taxas de remoção de materiais através da aplicação de técnicas diferentes. Como principais resultados foi verificado que o campo magnético afeta significativamente tanto remoção de material e a rugosidade.

- ✓ EBEID et al (2004) - Relata um estudo para obter uma maior precisão para ECM hibridizado com vibrações de baixa frequência, aborda uma melhoria de usinagem de precisão utilizando a metodologia de superfície de resposta. O estudo destaca o desenvolvimento de modelos matemáticos para correlacionar as inter-relações de vários parâmetros de usinagem, tais como: tensão aplicada, taxa de alimentação, de volta pressão e vibração amplitude em sobrecorte e conicidade para alcançar alta precisão controlada. Este trabalho baseia-se na abordagem da metodologia de superfície de resposta (RSM). Esta investigação revela igualmente que os vários resultados de testes, confirmando a validade e correlação dos modelos matemáticos desenvolvidos para analisar o efeito dos diversos parâmetros do processo de o sobrecorte e conicidade. Os resultados experimentais revelam relações úteis entre os parâmetros de vibração de baixa frequência e o ECM gap inter-eletrodo e o fenômeno sobrecorte. Onde foi verificado que amplitude da vibração é o parâmetro que mais afeta a eficiência do processo. s resultados deste estudo são úteis para ambos os engenheiros de projeto e de produção para avaliar as informações necessárias sobre a vibração da ferramenta nos processos de ECM para alcançar um desempenho operacional e baixo custo de equipamentos benéficos.
  
- ✓ HEWIDY et al (2005) – Este artigo trata-se de um estudo sobre modelagem dos parâmetros de usinagem de fios para máquina de descarga eléctrica (WEDM) de Inconel 601 usando metodologia de superfície de respostas . O alto grau de precisão obtido pela qualidade e da fina superfície fazer do WEDM um processo valioso. A correta seleção das condições de usinagem é o aspecto mais importante a ter em consideração nos processos relacionados com a WEDM de material de Inconel 601. Inconel é um dos materiais recentes que são desenvolvidos para ser duro, forte e resistente à temperatura. O presente trabalho destaca o desenvolvimento de modelos matemáticos para correlacionar as inter-relações de

vários parâmetros WEDM usinagem de Inconel material de 601 tais como: pico de corrente, fator de serviço, a tensão do fio e pressão da água sobre a taxa de remoção de metal, desgaste, proporção e rugosidade da superfície. Foi obtido como resultados com base em a metodologia de superfície de resposta (RSM): Proporção de desgaste aumenta com o aumento da corrente de pico; Superfície de rugosidade aumenta com o aumento da corrente de pico e diminui com o aumento do fator de serviço e tensão do fio. O melhor acabamento de superfície (Ra) alcançado foi de 0,8 e foi possível a verificação das correlações através do gráficos.

- ✓ PAIVA et al (2007) – Este artigo apresenta uma abordagem de alternativa híbrida, combinando metodologia de superfície de resposta (RSM) e análise de componentes principais (PCA) para otimizar múltiplas respostas correlacionadas em um processo de torneamento. Como estudo de caso: o processo de torneamento do aço endurecido AISI 52100 é realizado analisando três fatores de entrada: velocidade de corte ( $V_c$ ), taxa de alimentação ( $f$ ) e profundidade de corte ( $d$ ). Os resultados foram considerados: a vida útil da ferramenta de cerâmica mista ( $T$ ), o custo de processamento por peça ( $K_p$ ), reduzindo o tempo ( $CT$ ), o tempo de ciclo de viragem total ( $T_t$ ), rugosidade da superfície ( $R_a$ ) e a taxa de remoção de material ( $MRR$ ). As respostas originais têm os mesmos pesos e a liderança otimização multivariada para a maximização da taxa de remoção de material enquanto minimizar as outras saídas. O tipo de otimização assumida pela função objetivo multivariada pode ser estabelecida examinando os autovetores da matriz de correlação formado com as saídas originais. Os resultados indicam que a otimização multirrespostas é alcançado a uma velocidade de corte de 238 m / min, com uma alimentação taxa de 0,08 mm / rev e em uma profundidade de corte de 0,32 mm.
  
- ✓ AL-AHMARI (2007) – Um estudo sobre usinabilidade com modelos preditivos de um material duro selecionado em operações de torneamento Neste trabalho, modelos empíricos para a vida da ferramenta, rugosidade da superfície e força de corte são desenvolvidos para operações de torneamento. Os parâmetros do processo (velocidade de corte, taxa de alimentação, profundidade de corte e ponta

da ferramenta de raio) são usados como entradas para os modelos de usinabilidade desenvolvidos. Duas importantes técnicas de mineração de dados são usados; eles são uma metodologia de superfície de resposta e redes neurais. Dados de experiências 28 ao girar austenítico AISI 302 foram utilizados para gerar, comparar e avaliar os modelos propostos de vida útil da ferramenta, força e rugosidade da superfície de corte para o material considerado. Os métodos de construção do modelo de três (RA – regressão linear múltipla , RSM - Metodologia de superfície de resposta, e CNN - redes neurais computacionais) são comparadas e avaliadas por meio de estatísticas descritivas e testes de hipóteses. Verificou-se que os modelos CNN são melhores do que os modelos de RA e RSM. Além disso, os modelos RSM são melhores do que os modelos de RA para a previsão de vida útil da ferramenta de corte e modelos de força.

- ✓ CHIANG (2008) – Um estudo sobre modelagem e análise dos efeitos dos parâmetros de usinagem sobre as características de desempenho no processo de usinagem por descarga elétrica (EDM) de cerâmica Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC misturada, tem alcançado notável sucesso na fabricação de materiais cerâmicos condutores para a indústria metal moderno. Os modelos matemáticos são propostos para a modelagem e análise dos efeitos dos parâmetros de usinagem nas características de desempenho no processo de EDM Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC cerâmica misturados que são desenvolvidos utilizando a metodologia de superfície de resposta (RSM) para explicar as influências dos quatro parâmetros de usinagem (a corrente de descarga, pulso de tempo, fator de serviço e de tensão de descarga aberta) sobre as características da taxa de remoção de material de desempenho ( MRR), razão de desgaste do eletrodo (EWR) e rugosidade superficial (SR). O plano de experimento adota o planejamento composto central centrado (CCD). A influência separável de parâmetros de usinagem individuais e da interação entre esses parâmetros também são investigados por meio de análise de variância (ANOVA). Este estudo destaca o desenvolvimento de modelos matemáticos para investigar as influências de parâmetros de usinagem em características de desempenho e os modelos matemáticos propostos neste estudo revelaram-se ajustar e prever valores de características de desempenho próximos a essas leituras registradas experimentalmente com um intervalo de confiança de 95%. Os resultados mostram que dois dos principais fatores significativos no valor da



taxa de remoção de material (MRR) são a corrente de descarga e o fator de serviço. A corrente de descarga e o pulso em tempo também tem significância estatística em relacionadas a ambos: o valor do desgaste dos eléctrodos (EWR) e a rugosidade da superfície (SR).

- ✓ LIM (2009) – Artigo de um estudo sobre otimização dos fatores de desbaste de corte de impulsor com máquina de cinco eixos, utilizando a metodologia de superfície de resposta. A parte central do turbo-máquinas é o impulsor que pode levar a ocorrência de problemas devido a torção das superfícies. Portanto, impulsor de usinagem exige tecnologia de usinagem de cinco eixos e conhecimento especializado. Usinagem em cinco eixos tem as vantagens de ser capaz de selecionar uma variedade de eixo da ferramenta no processo e remover a região sem cortes que são impossíveis no acabamento de três eixos, o que poderia obter uma elevada produtividade e uma boa qualidade de superfície. Desbaste é uma operação muito importante, pois afeta a produtividade em a usinagem do impulsor e é necessário para determinar o corte estratégias e selecionar a condição de corte ideal. Este artigo propõe um método estatístico para otimizar os parâmetros de corte em bruto impulsor usinagem por metodologia de superfície de resposta e estratégia eficiente para dividir a região de corte. Em primeiro lugar, a operação grosseira foi dividida em três passos para remover o volume de indutor e dois passos também foram adicionados para remover os filetes entre as superfícies das lâminas e superfícies de cubo. Estas estratégias de usinagem são selecionados como os fatores qualitativos quando o método de superfície de resposta é usado. Em segundo lugar, o tempo de corte foi definido como o fator de resposta para a produtividade, e passo para baixo, passar por cima, e taxa de alimentar foram determinados como fatores independentes. Finalmente, o modelo de superfície de resposta foi estimada por uma única superfície, a fim de prever o tempo de corte desbaste e as condições de corte ideais foram pesquisados pelo modelo estimado.
  
- ✓ HABIB (2009) – Este artigo estuda os parâmetros de usinagem de descarga elétrica (eletroerosão), o processo é considerado bastante complexo quanto a

correlação entre a taxa de corte, o acabamento da superfície e os parâmetros de usinagem, através da abordagem metodológica superfície de respostas o trabalho tem como principal objetivo experimental estudar as relações entre as variável resposta (MRR; TWR, GS e Ra) e como os vários níveis de parâmetros dependentes. Ele fornece uma oportunidade para estudar não apenas os efeitos de cada fator isoladamente, mas também suas interações, por exemplo, no tempo de corte, pico de corrente, a tensão média lacuna e a fracção por cento em volume de SiC presente na material usinado, características de usinagem (por exemplo, a taxa de remoção de materiais, razão de eletrodo desgaste, tamanho gap e o acabamento da superfície), foram modelados. O efeito da variação do tempo e SiC EDM percentual na taxa de remoção de metal é verificado. Pode-se notar que um aumento do tempo provoca um aumento na taxa de remoção de metal e então a taxa de remoção de materiais passa a diminuir novamente. O aumento no tempo significa aplicar o mesmo fluxo de aquecimento por um tempo mais longo. Isso vai causar um aumento de calor que é conduzido para dentro da peça como o canal de plasma expande o que resultará em um aumento do MRR. Aumenta à medida que a duração da descarga, a pressão no interior do canal de plasma será menor [15]. Assim, não mais MRR Aumento do volume desde o metal fundido não muda e novo aumento pode ser uma causa para diminuir MRR ligeiramente. A análise das observações experimentais destaca que a taxa de remoção de metal, relação de desgaste do eletrodo, o tamanho do fosso e rugosidade superficial na usinagem descarga elétrica são muito influenciados pelos diferentes parâmetros do processo dominantes Considerado no presente estudo. Na verdade, os aumentos da taxa de remoção de metal com um aumento de imprensa no tempo, corrente de pico e Relativamente Com tensão lacuna. Taxa de remoção de metal diminui com o aumento da porcentagem de SiC. Aumenta a proporção de desgaste do eletrodo Com um aumento de Ambos clique na hora e pico de corrente e diminui com o aumento da Ambas SiC porcentagem e tensão lacuna.

- ✓ PARKA et al (2012) – Este estudo descreve uma experimento para determinar as condições de usinagem ideais para um sistema de fuso 40.000 rpm ultra-alta velocidade. Um experimento em duas fases é proposto para obter as melhores

condições de usinagem. Um método de planejamento fatorial fracionário de dois níveis é usado para obter alguns fatores que afetam as condições de usinagem no sistema de fuso. Em seguida um dos métodos de superfície de resposta circunscrita, é usado para obter as condições ótimas para a usinagem do fuso. Várias experiências de usinagem são efetuados fazendo variar a velocidade de rotação, taxa de alimentação, profundidade de corte, o intervalo de aplicação do óleo lubrificante, a pressão do ar, e assim por diante. A rugosidade da superfície, a força de corte, o corte e temperatura são medidos, e os efeitos das condições de usinagem são analisados utilizando um método de análise de regressão. Com base nos resultados experimentais e análises de regressão, obtêm-se condições ótimas de usinagem e equações de estimação para melhorar o processo de usinagem.

- ✓ LIN et al (2012) – Este artigo é sobre um estudo sobre a avaliação das características do processo de usinagem descarga microelétrica (Micro-EDM) utilizando a metodologia de superfície de resposta com base no delineamento composto central, o processo é um desafio, porque envolve relações complexas e inter-relacionadas de modo a abordagem de modelagem adequada é necessário identificar claramente as variáveis de usinagens cruciais e suas inter-relações, a fim de dar início a estratégias mais eficazes para melhorar a qualidades Micro-EDM (desgaste do eletrodo (EW), a taxa de remoção de material (MRR) e overcut). Este trabalho usa um método de superfície de resposta (RSM) com base na desenho central composto (CCD) para problemas Micro-EDM com quatro variáveis EDM (corrente de pico, pulso on-tempo, pulso off-tempo e velocidade de rotação do eletrodo). Os resultados experimentais indicam que o pico atual é a variável EDM que mais afeta as qualidades Micro-EDM para SK3 aço ferramenta de carbono, enquanto pulso off-time teve uma interação significativa com isso. Os resultados mostram que o RSM com base no CCD, poderia eficientemente ser aplicada para a modelagem de qualidades Micro-EDM (EW, MRR, e overcut), e é uma maneira econômica de obter as características dos parâmetros do processo Micro EDM desempenho com o menor número de dados experimentais. Este estudo demonstra que CCD e RSM pode ser utilizado com sucesso para modelar alguns parâmetros do processo de usinagem Micro-EDM

para SK3 aço ferramenta de carbono, usando o menor número possível de experiências. Os resultados deste estudo, no entanto, indicam que a corrente de pico (X1) é o fator significativo das quatro variáveis de usinagem que afeta qualidades Micro-EDM para SK3 ferramenta de aço carbono.

- ✓ DAVOODI e TAZEHKANDI (2014) – Estudo de uma investigação experimental e otimização dos parâmetros de corte em usinagem a seco e molhado de liga de alumínio 5083, a fim de remover o fluido de corte, muitos problemas: como questões de saúde e meio ambiente são identificados com o uso de fluidos de corte de inundação em processos de usinagem. Neste estudo, os efeitos da velocidade de corte e espessura do cavaco não deformada no corte e força de avanço componentes e temperatura da ponta da ferramenta foram investigadas experimentalmente a fim de remover o fluido de corte. AA5083-O liga forjado com um elevado teor de Mg (4,5%) foi usinado em condições de usinagem seco e molhado utilizando ferramenta de metal duro revestido. 02 fatores (velocidade de corte e espessura do cavaco não deformada) e cinco níveis experimento fracional projetos concluídos com uma análise estatística de variância (ANOVA) foram realizadas. Modelos matemáticos para corte e força de avanço componentes e temperatura da ponta da ferramenta foram desenvolvidos usando a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM). Os resultados mostram que as variáveis de saída são significativamente afetados pela espessura do cavaco não deformada. Por outro lado, na alta velocidade de corte e baixa espessura de cavacos não deformada, AA5083 pode ser usinado, sem fluido de corte. Além disso, tanto a velocidade de corte e espessura do cavaco não deformada têm significância estatística sobre os componentes de corte e força de avanço em usinagem a seco e molhado. Finalmente, foram propostas as faixas apropriadas para as condições que giram ideais para a produção industrial.

Todos esses estudos justificam e enfatizam o uso da técnica estatística de metodologia de respostas à usinagem das peças de metálicas, considerados neste trabalho de mestrado.

## 1.5 Classificação Metodológica

No quadro 1 encontra-se o detalhamento da classificação metodológica deste trabalho:

Quadro 1 – Classificação Metodológica deste Trabalho.

CLASSIFICAÇÃO		CARACTERÍSTICAS
NATUREZA	APLICADA	Pesquisa de interesse prático, resultados aplicados na realidade Marconi e Lakatos (2008).
FORMA DE ABORDAGEM DO PROBLEMA	QUANTITATIVA	Conforme Richardson (1999), este método caracteriza-se pelo emprego da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações, quanto no tratamento dessas através de técnicas estatísticas, desde as mais simples até as mais complexas.
OBJETIVOS	DESCRITIVO	Na concepção de Gil (1999), a pesquisa descritiva tem como principal objetivo descrever características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relação entre as variáveis. Uma de suas características mais significativas está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados.
PROCEDIMENTOS TÉCNICOS ADOTADO	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	Desenvolvida a partir de material já elaborado: livros, artigos científicos, etc. Gil (2010).
	PESQUISA EXPERIMENTAL	As pesquisas experimentais tratam de um estudo sobre a relação causal entre duas ou mais variáveis de um sistema sob condições controladas pelo pesquisador, geralmente conduzidas em laboratórios (Miguel, 2007, p. 220).

## 1.6 Estrutura do trabalho

Daqui por diante, o trabalho é organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão da teoria com uma breve explanação sobre os conceitos básicos de usinagem; na Seção 3 também será apresentado uma revisão teórica das técnicas estatísticas utilizadas para a otimização do processo de usinagem; na Seção 4 será apresentado os aspectos metodológicos; na seção 5 será apresentado a modelagem estatística empreendida para abordar o problema e a otimização dos parâmetros no objeto de estudo; e finalmente na Seção 6, algumas considerações e conclusões são apresentadas.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE USINAGEM

### 2.1 Usinagem

A fabricação de componentes através da usinagem demanda uma gestão dos parâmetros aplicados ao processo, a fim de que se fabrique peças com otimização da produtividade sempre visando menores despesas e melhor qualidade. Para isto, é necessário que se tenha um profundo conhecimento do processo de usinagem em questão. Nesse processo, deve-se evitar falhas ocasionais e a determinação com exatidão das condições de corte adequadas para a usinagem correta de cada peça específica.

A otimização dos parâmetros de corte em usinagem está limitado à escolha correta da ferramenta com base em avanços, profundidades de usinagem e velocidades de corte indicados por fontes que publicam a experiência acumulada no assunto, geralmente dadas por catálogos de fabricantes (COPPINI e BAPTISTA, 1998).

A criteriosa seleção de ferramentas, parâmetros de corte e estratégias de usinagem para determinada operação são fatores determinantes para reduzir significativamente os possíveis distúrbios no processo, buscando atingir a especificação do produto e otimizando tempos e custos. (FAVARETTO *et al.*, 2009).

### 2.2 Usinagem: conceitos e definições

Usinagem é um termo que abrange operações de corte que permitem remover excessos de um material bruto com o auxílio de uma ferramenta, até que resulte em uma peça pronta que fará parte de bens duráveis. Uma definição bastante ampla do termo usinagem apresentada por Ferraresi (1988), diz que “como operações de usinagem entendemos aquela que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco”.

O cavaco é definido como uma porção de material removido da peça pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1977).

As operações de usinagem dividem-se em processos de usinagem convencional e não convencional (ex: Eletroerosão, Jato abrasivo, Jato de água, Laser, Ultrassom, Plasma etc). Dentre os processos de usinagem convencional se destacam: o torneamento, o fresamento e a furação.

### 2.2.1 Torneamento

Segundo Trent (2000), o torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O material a ser cortado é fixado ao mandril de um torno é rotacionado, enquanto a ferramenta, presa firmemente em um porta-ferramenta, move-se em um plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça (ver ilustração na Figura 2).

Figura 2 – Processo de torneamento de uma peça.



Fonte: <http://academico.sandvik.com.br/downloads:>. Acesso em fev. 2015.

...as operações de torneamento podem ser classificadas em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. Entende-se por acabamento a operação de usinagem destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. O desbaste é a operação de usinagem, anterior a de acabamento, visando a obter na peça a forma e dimensões próximas das finais (FERRARESI, 1977, p. XXIX).

Existem vários tipos de torneamento (ver por exemplo, FERRARESI, 1977), em especial, quanto à forma de trajetória, pode ser retilíneo ou curvilíneo (ver alguns casos especiais de torneamento na Figura 3).

1.1 – Torneamento retilíneo – processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. O torneamento retilíneo pode ser:

1.1.1 – Torneamento cilíndrico – processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (item 1 de figura 3) ou interno (item 10 de figura 3).

Quando o torneamento cilíndrico visa obter na peça um entalhe circular, na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, o torneamento é denominado sangramento axial (item 5 de figura 3).

1.1.2 – Torneamento cônico – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo de rotação da máquina. Pode ser externo (item 3 de figura 3) ou interno (item 11 de figura 3).

1.1.3 – Torneamento radial – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.

Quando o torneamento radial visa a obtenção de uma superfície plana, o torneamento é denominado torneamento de faceamento (item 2 de figura 3). Quando o torneamento radial visa a obtenção de um entalhe circular, o torneamento é denominado sangramento radial (item 4 de figura 3).

1.1.4 – Perfilamento – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea radial (item 7 de figura 3) ou axial (item 8 de figura 3), visando a obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil da ferramenta.

1.2 – Torneamento curvilíneo – Processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea (item 6 de figura 3).

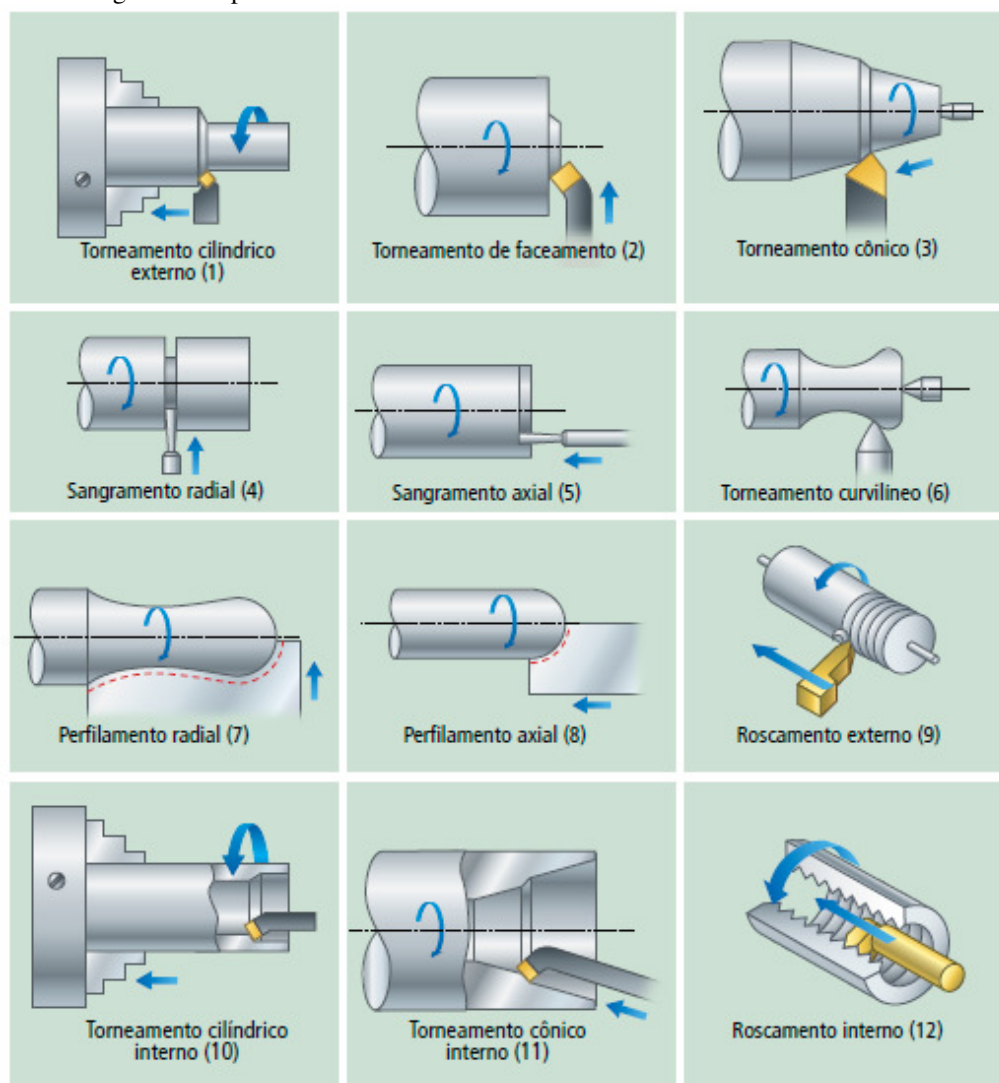
1.3 – Roscamento – Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação. O roscamento pode ser interno ou externo.

1.3.1 – Roscamento interno – Processo de roscamento executado em superfície internas cilíndricas ou cônicas de revolução (item 12 de figura 3).

1.3.2 – Roscamento externo – Processo de roscamento executado em superfície internas cilíndricas ou cônicas de revolução (item 9 de figura 3).  
(FERRARESI, 1977, p. XXVI)



Figura 3 – Tipos de torneamento externo e interno.



Fonte: <http://academico.sandvik.com.br/downloads/10;> Acesso em fev. 2015.

### 2.2.2 Tornos mecânicos

Os tornos são apresentados de formas e tamanhos variados e com funções determinadas. Entre os vários tornos usados nas indústrias podem ser citados: torno universal, vertical, copiador, revólver, automático, semiautomático de cava, comando numérico, etc (ver por exemplo FERRARESI, 1988).

Em 1967, as primeiras máquinas controladas numericamente chegaram ao Brasil, vindas dos Estados Unidos. No início da década de 1970, surgem no Brasil as primeiras máquinas CN de fabricação nacional (MACHADO, 1990).

Observa-se, a partir de então, uma evolução contínua e notável concomitantemente com os computadores em geral, fazendo com que os comandos (CNC) mais modernos empreguem em seu conceito físico (hardware) tecnologia de última geração (AZEVEDO, 2015).

Atualmente, o controle numérico computadorizado (CNC) são máquinas encontradas em quase todos lugares, das pequenas oficinas de usinagem as grandiosas companhias de manufatura (AZEVEDO, 2015), a seguir as figuras ilustram um Torno Universal (figura 4) e um Torno CNC (figura 5).

Figura 4 – Torno Universal



Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br>. Acesso em jan. 2015.

Figura 5 – Torno CNC



Fonte: <http://www.moniz.com.br/usinagem/torno-cnc.php>; Acesso em jan. 2015.

Quase todos controles de CNCs atualmente usam um único formato de endereço de palavra para se programar. Através de formato de endereço de palavra, queremos dizer que o programa é feito sobre sentenças de comandos (AZEVEDO, 2015).

A seguir no Quadro 2 está um exemplo de um pequeno programa onde se deseja executar dois furos em uma peça em um centro de usinagem CNC.

Quadro 2 – Exemplo de programa CNC.

<b>Bloco</b>	<b>Descrição do bloco</b>
O0001	Número de Programa
N005 G54 G90 S400 M03	Seleciona as coordenadas, sistema absoluto e o fuso deve girar no sentido horário a 400 RPM.
N010 G00 X1. Y1.	Rápido para o local de XY do primeiro furo.
N015 G43 H01 Z.1 M08	Inicia a compensação de comprimento de ferramenta, rápido em Z para posição acima da superfície para furar, liga o refrigerante.
N020 G01 Z- 1.25 F3.5	Avance para o primeiro furo a 3,5 polegadas por minutos.
N025 G00 Z.1	Rápido para fora do furo.
N030 X2.	Rápido para o Segundo furo.
N035 G01 Z- 1.25	Avance para o Segundo furo
N040 G00 Z.1 M09	Rápido para fora do segundo furo, desliga o refrigerante.
N045 G91 G28 Z0	Retorno para posição de referência em Z.
N050 M30	Fim de programa, rebobinar a fita.

Fonte: <http://www.moniz.com.br/usinagem/torno-cnc.php>; Acesso em fev. 2015.

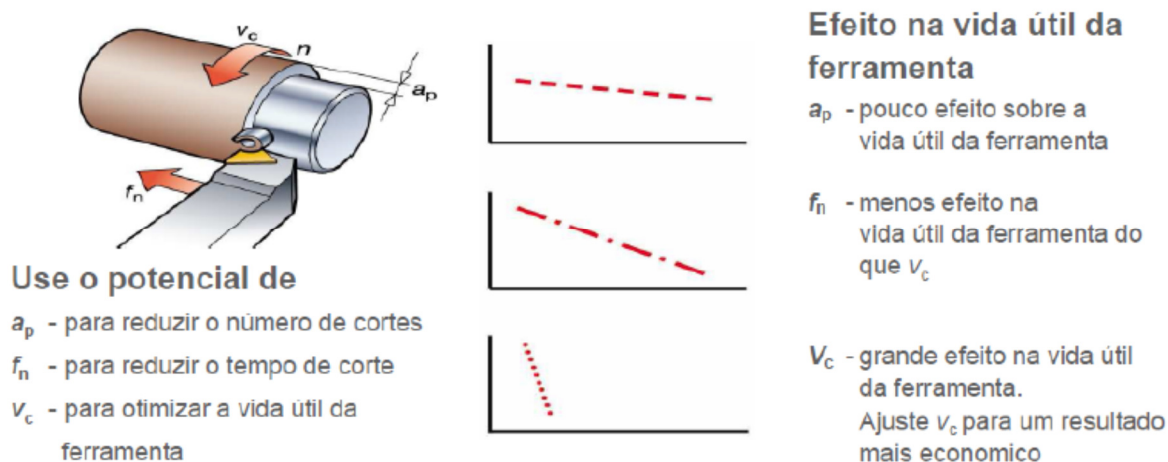
### 2.2.3 Ferramentas de corte

Segundo a norma ABNT NBR 6175:1971, a ferramenta de usinagem mecânica é constituída de arestas cortantes, destinada a remoção de cavaco. No caso da ferramenta possuir uma única superfície de saída, é chamada ferramenta monocortante. Quando possuir mais de uma superfície de saída, é chamada ferramenta multicortante.

### 2.2.4 Parâmetros de usinagem

A velocidade de corte ( $V_c$ ), o avanço ( $f_n$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ) são os parâmetros que afetam a taxa de material removido e a vida útil da ferramenta (FERRARESI, 1977). Conforme pode-se verificar na Figura 6, um aumento deles aumenta a taxa de remoção do material, mas diminui a vida da ferramenta, visto que a velocidade de corte é o parâmetro que tem maior influência direta na vida útil da ferramenta.

Figura 6 – Efeito dos parâmetros de corte na vida útil da ferramenta.



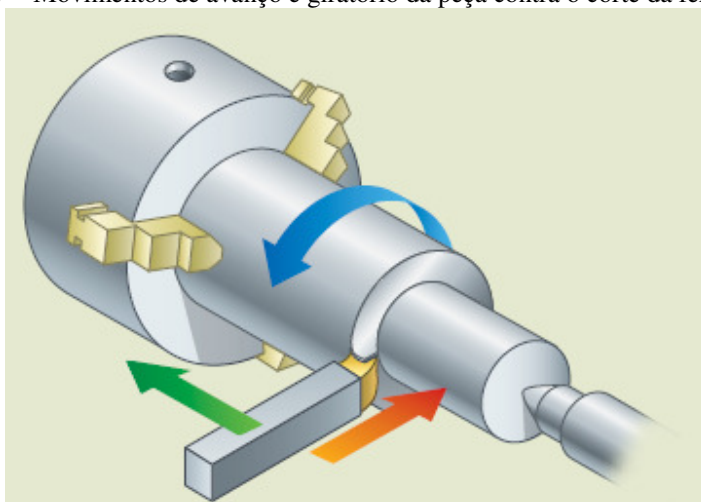
Fonte: <http://academico.sandvik.com.br/downloads/10;>. Acesso em dez. 2014.

Segundo Ferraresi (1977), a velocidade de corte é definida como a velocidade instantânea de um ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte (ver Figura 7).

Definição dos parâmetros de corte:

- Rotação da peça – VELOCIDADE DE CORTE.
- Translação da ferramenta – AVANÇO.
- Transversal da ferramenta – PROFUNDIDADE DE CORTE.

Figura 7 – Movimentos de avanço e giratório da peça contra o corte da ferramenta.



Fonte: <http://academico.sandvik.com.br/downloads/10;>. Acesso em jan. 2015.

### 3 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM.

#### 3.1 Planejamento fatorial

De acordo com Marinho e Castro (2005, p.1)

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que procuramos. Para isso precisamos saber o que é que estamos procurando. Mas isso não é bem assim. Podemos dizer que um bom experimentador é, antes de tudo, uma pessoa que sabe o que quer. O domínio do problema é de fundamental importância.

...quando isso não é feito de forma apropriada, o resultado muitas vezes é uma montanha de números estéreis, da qual estatístico algum conseguiria extrair quaisquer conclusões (BARROS NETO et al., 1995). No entanto existem várias técnicas disponíveis aos cientistas e engenheiros para melhorar ou otimizar sistemas, processos e produtos. Essas técnicas são ferramentas poderosas, com as quais vários objetivos específicos podem ser alcançados (BOX et. al, 1978).

De acordo com Marinho e Castro (2005, p.1)

Para executar um planejamento fatorial, é necessário em primeiro lugar especificar os níveis em que cada fator a ser estudado, isto é, os valores dos fatores (ou as versões, nos casos qualitativos) que serão empregados nos experimentos. Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Em geral, se houver  $n_1$  níveis do fator 1,  $n_2$  do fator 2, ..., e  $n_k$  do fator k, o planejamento será um fatorial  $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$ . Isto não significa obrigatoriamente que serão realizados apenas  $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$  experimentos. Este é o número mínimo, para se ter um planejamento fatorial completo. O experimentador pode ter interesse em repetir ensaios, para ter uma estimativa do erro experimental, e nesse caso o número de experimentos será maior (DEMING, 1981 e JOHNSON, 1994).

Para estudo do efeito do fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Isso obviamente implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator. Um planejamento em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é, portanto, o mais simples de todos eles. Havendo k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ensaios diferentes, sendo chamado por isso de planejamento fatorial  $2^k$  (BOX et. al, 1978).

#### 3.2 Regressão Linear Múltipla

Em estatística, regressão linear é uma abordagem para modelar a relação entre uma variável Y com uma ou mais variáveis dependentes ou explicativas denotadas por X. O caso de

apenas uma variável explicativa é chamado de modelo de regressão linear simples. Com mais de uma variável explicativa, o modelo é chamado de regressão linear múltipla. A técnica de regressão linear múltipla é uma das técnicas estatísticas mais amplamente empregada para se obter previsões de interesse (ver por exemplo, HAIR et al, 2005; e ANDERSON, 2004).

Quando mais de uma variável explanatória é utilizada para prever o comportamento de uma variável resposta, passa-se a nomeá-la como modelo de regressão múltipla (HILL, GRIFFITHS e JUDGE, 2003). Na análise de regressão linear verifica-se o efeito conjunto das covariáveis na resposta Y. (ver, por exemplo, DRAPER e SMITH, 1981; SEBER e LEE, 2003; ou MONTGOMERY e RUNGER, 2011).

Um exemplo de modelo de regressão com duas variáveis independentes é dado por:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \epsilon_i \quad (1)$$

para  $i=1, \dots, n$  e  $\epsilon_i$ , é um termo relacionado ao erro (variável não-observada) suposto como uma quantidade aleatória. Este erro aleatório inclui todos os outros fatores que poderiam influenciar a variável dependente Y não incluídos no modelo de regressão.

Os estimadores dos parâmetros de regressão em geral são obtidos pelo método de mínimos quadrados.

### **3.3 Metodologia de Superfície de Resposta**

Entre as várias técnicas de planejamentos estatísticos de experimentos, uma técnica se destaca na otimização e melhoria da produtividade: a metodologia de superfície de respostas (MSR) introduzida por Box e Wilson (1951) que consiste de uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para a modelagem e análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é otimizar essa resposta (ver por exemplo, KHURI e CORNELL, 1987; MONTGOMERY, 2005; MYERS, 1971; MYERS et al, 1989; MYERS e MONTGOMERY, 1995 ou OEHLERT, 2000).

Aplicações de MSR são importantes em qualquer área de aplicação, com especial destaque para engenharia industrial, engenharia química, biologia ou engenharia dos alimentos (ver por exemplo, ANDERSON e WHITCOMB, 2004; MINTO, 2006; SHI e WEIMER, 1992; RODRIGUES e COELHO, 2007).

Na área de manufatura de equipamentos o uso de técnicas de superfícies de respostas tem sido uma ferramenta fundamental para as indústrias encontrarem as condições ótimas para melhoria da qualidade e produtividade conforme atesta muitos artigos apresentados na literatura.

Como já apresentado na seção 1.4 e repetido novamente aqui, o uso de técnicas de superfícies de respostas tem sido amplamente usada na otimização da usinagem. Alguns exemplos desses estudos que enfatizam o uso de técnicas MSR: Singh e Shan (2002) usam a metodologia de superfície de respostas para obter a otimização do processo de usinagem por fluxo abrasivos; Ebeid et al (2004) aplicaram técnicas de superfícies de respostas para otimização dos parâmetros do processo de usinagem eletroquímica; Parka et al (2012) aplicaram técnicas de superfícies de respostas para otimização dos parâmetros do processo de usinagem por furação; Ramesh et al (2012) aplicaram técnicas de superfícies de respostas no processo de usinagem através do torneamento do titânio a fim de otimizar a qualidade superficial; Hewidy et al (2005) usaram a metodologia de superfície de respostas para obter a otimização da rugosidade por meio dos parâmetros de usinagem por eletroerosão a fio; Paiva et al (2007) utilizam a metodologia de superfície de respostas para realizar a otimização dos parâmetros de usinagem do aço endurecido AISI 52100 obtendo melhor tempo e qualidade superficial; Chiang (2008) utilizaram a metodologia de superfície de respostas para otimizar os parâmetros de usinagem do processo de usinagem por eletro erosão para obter os parâmetros otimizados: rugosidade / consumo eletrodo; Lim (2009) determinaram a minimização do tempo de corte e otimização dos parâmetros de corte, obtendo o aumento da produtividade dos impulsores de usinagem de cinco eixos em cerca de 1,5 com redução do tempo em torno de 110,7 minutos; Habib (2009), aplicou as técnicas de superfícies de respostas para otimização dos parâmetros do processo de usinagem por eletro erosão; John e Vinayagam (2011) utilizaram a metodologia de superfície de resposta, para obter a otimização do processo de polimento de esferas aplicando ferramentas de ligas T215Cr12, sendo os parâmetros de entrada: força, avanço, velocidade e número de passes. Os parâmetros de saída são rugosidade e dureza superficial. A rugosidade da superfície mínima e dureza superficial foram 0,054 MI e 40 HRC, respectivamente. A rugosidade da superfície otimizada e dureza superficial são 0,055 MI e 46.69 HRC, respectivamente, com fator global conveniência de 0,972. Gráficos de contornos foram gerados através dos resultados obtidos; Lin et al (2012) utilizaram o método de superfície de respostas para modelar a influência de quatro variáveis de usinagem: a corrente de pico, tempo de pulso on, tempo de pulso off, e velocidade de rotação do eletrodo, no desempenho da micro usinagem por descarga elétrica com ferramenta de carbono SK3, obtendo as faixas significantes para a otimização desse processo; Davoodi e Tazehkandi (2014) aplicaram a metodologia de superfície

de respostas para realizar um estudo no processo de usinagem da liga forjada de AA5083-O em condições seca e molhada obtendo as faixas otimizadas para menores forças de corte (usinagem sem fluido e com fluido de corte).

### 3.3.1 Multiplicador de Lagrange

Para o uso de algumas técnicas de superfícies de respostas, como a técnica “Steepest Ascent” usadas numa fase preliminar exploratória de um experimento industrial assumindo modelos de regressão de primeira ordem para encontrar direções do máximo ou mínimo de interesse, precisamos usar métodos de otimização sujeitos a uma ou várias restrições. Nessa situação podemos usar o método de Multiplicadores de Lagrange. O método de multiplicadores de Lagrange usualmente é considerado em problemas de otimização. O método dos multiplicadores de Lagrange permite encontrar extremos (máximos e mínimos) de uma função,

$$Q(z_j) = \hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i z_i \quad (2)$$

de uma ou mais variáveis,  $j=1, \dots, k$  associadas a uma restrição, dada por  $\sum_{i=1}^k z_i^2 = R^2$ .

Na prática, observar que é necessário fixar diferentes valores de  $R$  (raio da hiperesfera) para se determinar o caminho ou direção do máximo da superfície de respostas  $Q(z_j)$ . Esses valores são obtidos resolvendo-se as equações,

$$\frac{\partial Q}{\partial z_j} = b_j - 2\mu z_j = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \mu} = -\left[ \sum_{i=1}^k z_i^2 - R^2 \right] = 0 \quad (4)$$

onde  $\mu$  denota o multiplicador de Lagrange.

De (4), encontra-se,

$$x_j = \frac{b_j}{2\mu}, \text{ para } j=1, \dots, k. \quad (5)$$

Observar que na prática é mais simples selecionar valores de  $\mu$  que correspondem a valores nas variáveis independentes obtidos a partir de aumentos de unidades (ou diminuições) na direção do máximo (ou mínimo) da resposta  $Y$  (ver por exemplo, MYERS, 1971). Essa



escolha é arbitrária. Daí, esse procedimento continua à procura da direção do máximo (ou mínimo) da superfície ajustada tomando cuidado de não extrapolar para valores fora dos limites de variação das covariáveis.

### 3.3.2 Forma canônica de um modelo de regressão múltipla (superfície de respostas)

Se  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  são as raízes características (todas reais) de uma matriz simétrica real  $A$  ( $k \times k$ ), então existe uma transformação ortogonal  $X = P\mathbf{w}$  tal que a forma quadrática real  $Q = X'AX$  seja transformada para uma forma canônica  $\lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2$ . Isto é, a forma quadrática  $Q$  é transformada para uma forma com uma matriz diagonal, onde seus elementos diagonais são as raízes características da matriz  $A$ .

Considerar a superfície ajustada de 2ª. ordem,

$$\hat{y} = b_0 + \sum_j b_j x_j + \sum_j \sum_m b_{jm} x_j x_m + \sum_j b_{jj} x_j^2 \quad (6)$$

em que  $j < m$ , ou, numa forma alternativa vetorial dada por,

$$\hat{y} = b_0 + \mathbf{X}'\mathbf{b} + \mathbf{X}'\mathbf{B}\mathbf{X} \quad (7)$$

O objetivo dessa técnica é determinar a natureza de um ponto estacionário. (ver, por exemplo, DRAPER e SMITH, 1981; SEBER e LEE, 2003; ou MONTGOMERY e RUNGER, 2011). Para isso, considerar uma translação da superfície de respostas da origem  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$  para o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0$ . Portanto, a função de respostas passa a ser formulada em termos de novas variáveis  $w_1, w_2, \dots, w_k$  cujos eixos correspondem aos eixos principais do sistema de contornos. A função de respostas em termos das novas variáveis  $w_1, w_2, \dots, w_k$  (forma canônica) é dada por,

$$\hat{y} = \widehat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (8)$$

em que  $\widehat{y}_0$  é a resposta estimada no ponto estacionário

$$\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} \quad (9)$$

e  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  são raízes características (constantes) da matriz B. Observar que:

- Os sinais das constantes  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  e a grandeza dos  $\lambda_i$  determinam a natureza do ponto estacionário.
- A relação existente entre as variáveis  $w_i$  e as variáveis  $x_i$  também é importante, pois indica regiões úteis para serem exploradas pelo pesquisador.
- A forma canônica é uma translação da superfície de respostas para uma nova origem  $\mathbf{x}_0$ .

Definir  $\mathbf{z} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ ; portanto em (7), temos:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \mathbf{z}'(\mathbf{b} + 2\mathbf{B}\mathbf{x}_0) + \mathbf{z}'\mathbf{B}\mathbf{z} \quad (10)$$

pois  $\mathbf{z}'\mathbf{B}\mathbf{x}_0$  e  $\mathbf{x}_0'\mathbf{B}\mathbf{z}$  são equivalentes (ver MYERS, 1971).

Portanto, substituindo a expressão (10) para o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{2}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}$ , temos,

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \mathbf{z}'\mathbf{B}\mathbf{z} \quad (11)$$

A expressão (11) define a superfície de respostas de 2ª ordem na nova origem  $\mathbf{x}_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0})$ . Agora, transformar a forma quadrática  $\mathbf{z}'\mathbf{B}\mathbf{z}$  para uma forma canônica  $\lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2$  em que  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  são as raízes características da matriz B. Observar que existe uma transformação ortogonal  $\mathbf{z} = \mathbf{M}\mathbf{w}$  tal que,

$$\mathbf{z}'\mathbf{B}\mathbf{z} = \mathbf{w}'\mathbf{M}'\mathbf{B}\mathbf{M}\mathbf{w} = \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (12)$$

em que  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  são as raízes características da matriz B; M é uma matriz (k x k) ortogonal, isto é,  $\mathbf{M}'\mathbf{M} = \mathbf{I}_k$ . Observar que a determinação da matriz M é importante porque a transformação  $\mathbf{w} = \mathbf{M}'\mathbf{z}$  permite ao pesquisador a obtenção da expressão que relaciona as variáveis  $z_i$  com as variáveis  $w_i$ .

### 3.4 Distribuições de tempo de sobrevivência

Esta metodologia também é chamada de análise de confiabilidade em engenharia. Uma das distribuições mais populares utilizadas para analisar tempos de vida é a distribuição Weibull (ver WEIBULL, 1951). Entre as grandes vantagens da distribuição Weibull, podemos destacar a sua versatilidade e facilidade de uso. A distribuição fornece um bom ajuste para uma ampla

faixa / variedade de conjuntos de dados (ver, por exemplo, LAWLESS, 1982 e NELSON, 2004). Neste trabalho tem – se a presença de algumas covariáveis que afetam as repostas (tempo total de vida útil), onde velocidade de corte e avanço afeta o tempo total de vida útil da ferramenta de corte que fabrica as peças (ver, por exemplo COLOSIMO e GIOLO, 2006). Nesse sentido, é apresentado um modelo de regressão paramétrico Weibull afetando um ou mais parâmetros da distribuição de Weibull. Considerando-se a resposta T (tempo de fabricação) supõe-se um modelo de regressão de Weibull de primeira ordem.

Dessa forma, assumimos uma distribuição de Weibull para T com função densidade de probabilidade (f.d.p) dada por,

$$f(t_i) = \alpha(t_i)^{\alpha-1} \exp\{- (t_i/\lambda)^\alpha\} / \lambda^\alpha \quad (13)$$

em que  $t_i > 0$  denota os tempos de fabricação das peças. Os parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha$  denotam respectivamente, os parâmetros de escala e de forma da distribuição. Diferentes valores de  $\alpha$  levam a diferentes formas para a distribuição o que a torna muito flexível na análise de dados para tempos entre chegadas. Observar que se  $\alpha = 1$ , temos a distribuição exponencial, isto é, a distribuição exponencial é um caso especial da distribuição de Weibull (ver por exemplo, LAWLESS, 1982).

Assumindo um modelo de regressão de Weibull de segunda ordem para os tempos totais de vida útil da ferramenta que fabrica as peças definido por,

$$\log(\lambda_i) = \theta_0 + \theta_1 x_{1i} + \theta_2 x_{2i} + \theta_3 x_{1i}^2 + \theta_4 x_{2i}^2 + \theta_5 x_{1i} x_{2i} \quad , \quad (14)$$

em que  $x_{1i}$  denota a velocidade de corte na forma codificada para a i-ésima observação amostral;  $x_{2i}$  denota o avanço na forma codificada para a i-ésima observação amostral. Observar que o modelo de regressão dado por (14) define um modelo de regressão no parâmetro de escala (ver por exemplo, LAWLESS, 1982) assumindo mesmo parâmetro de forma. A média da distribuição de Weibull com f.d.p. (14) é dada por,

$$E(T) = \lambda \Gamma[1+1/\alpha], \quad (15)$$

isto é,

$$E(T_i) = \Gamma[1+1/\alpha] \exp[\theta_0 + \theta_1 x_{1i} + \theta_2 x_{2i} + \theta_3 x_{1i}^2 + \theta_4 x_{2i}^2 + \theta_5 x_{1i} x_{2i}]. \quad (16)$$

Na estimação dos parâmetros do modelo de regressão de Weibull definidos por (13) e (14) podemos usar o método de máxima verossimilhança (ver por exemplo, LAWLESS,1982).

## 4 ASPECTOS METODOLÓGICOS

### 4.1 Classificação metodológica da pesquisa

Conforme Miguel (2007), metodologicamente este trabalho pode ser classificado como aplicado, de objetivo descritivo e abordagem quantitativa. Neste sentido, quantifica-se o comportamento das variáveis dependentes sob um domínio específico, permitindo ao pesquisador realizar previsões.

Bertrand e Fransoo (2002) definem a pesquisa quantitativa em Engenharia de Produção como aquela em que se modela um problema cujas variáveis apresentam relações causais e quantitativas. Em geral, utilizam modelagem matemática, estatística ou computacional (simulação) – e especificamente, neste trabalho será adotada a modelagem estatística.

Fonseca (2002), também afirma que a pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis, entre várias outras.

De acordo com Lewis (1998) com a crescente frequência e magnitude das mudanças na tecnologia e métodos de gestão, as operações de gestão tem levado os pesquisadores a considerar cada vez mais, o emprego de métodos baseados em pesquisa de campo.

Quanto às técnicas de pesquisa serão utilizadas a pesquisa bibliográfica e a observação direta intensiva, segundo a classificação de Lakatos e Marconi (2008), a pesquisa bibliográfica, conforme a classificação de Gil (2008) e a pesquisa experimental baseada em Miguel (2007).

### 4.2 Procedimentos operacionais

Para realização deste trabalho, inicialmente foi concedido pela organização os recursos necessários, foi consistido uma coleta dos resultados aleatórios de tamanho 28 selecionada a partir de um planejamento fatorial  $7 \times 4$ , conforme tabela 1 (ver por exemplo, BOX, HUNTER e HUNTER, 1978; ou DEAN e VOSS, 1999), os fatores definidos para o experimento na indústria foram: velocidade de corte e avanço, que foram definidos em função das condições de minimização dos esforços da máquina operatriz, que associados ao planejamento fatorial  $7 \times 4$  são dados na Tabela 1 na forma original e na forma codificada (padronizada), isto é, com  $x_1 = (\text{velocidade de corte} - 80)/10$  e  $x_2 = (\text{avanço} - 0,2)/0,08$ . onde para cada amostra selecionada foi reportada como respostas associadas a cada unidade amostral: a quantidade de peças fabricadas,

o tempo de fabricação de cada unidade, e a confiabilidade da ferramenta (a partir da multiplicação da quantidade de peças fabricadas e tempo de manufatura de cada peça). Os parâmetros de usinagem utilizados e dados coletados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1- Dados experimentais de um planejamento fatorial 7x4

Amostra	Vel. corte (m/min)	Avanço (mm/rev.)	Quant. pçs prod.	Tempo fixo/peça (min.)	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	Vida útil ferramenta de corte (min).
1	50	0,08	130	6,5	-3	-1,5	845
2	50	0,16	130	6,4	-3	-0,5	832
3	50	0,24	120	6,3	-3	0,5	756
4	50	0,32	120	6,2	-3	1,5	744
5	60	0,08	130	6,4	-2	-1,5	832
6	60	0,16	120	6,2	-2	-0,5	744
7	60	0,24	120	5,4	-2	0,5	648
8	60	0,32	90	5,2	-2	1,5	468
9	70	0,08	130	6,1	-1	-1,5	793
10	70	0,16	120	5,5	-1	-0,5	660
11	70	0,24	120	5,3	-1	0,5	636
12	70	0,32	90	5,1	-1	1,5	459
13	80	0,08	130	6,0	0	-1,5	780
14	80	0,16	120	5,4	0	-0,5	648
15	80	0,24	120	5,2	0	0,5	624
16	80	0,32	90	5,0	0	1,5	450
17	90	0,08	110	5,4	1	-1,5	594
18	90	0,16	100	5,2	1	-0,5	520
19	90	0,24	100	5,0	1	0,5	500
20	90	0,32	80	4,4	1	1,5	352
21	100	0,08	110	5,2	2	-1,5	572
22	100	0,16	100	5,0	2	-0,5	500
23	100	0,24	100	4,4	2	0,5	440
24	100	0,32	80	4,2	2	1,5	336
25	110	0,08	100	5,0	3	-1,5	500
26	110	0,16	100	4,4	3	-0,5	440
27	110	0,24	80	4,2	3	0,5	336
28	110	0,32	70	4,0	3	1,5	280

Fonte: própria

Cada amostra é usinada até que ocorra o fim da vida útil da ferramenta, que nessas condições deve ser substituída por uma nova (ferramenta / aresta).

Segundo Ferraresi (1977), citado também em Ferreira (1999) e Diniz et al. (2001), a vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder a capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido.

Na prática do estudo é percebido que os critérios que definem esse momento de troca ou substituição da ferramenta ocorrem quando:

- A ferramenta atinge valores elevados de desgaste;
- A ferramenta atinge temperaturas excessivas;
- As tolerâncias dimensionais (das peças) fogem do controle;
- O acabamento superficial não é mais satisfatório;
- Há aumento excessivo das forças de usinagem.

#### 4.2.1 Recursos e Ferramentais Utilizados

Foram utilizados como matéria prima o aço inoxidável 304 ASTM, na Tabela 2, encontra-se a composição química da matéria prima.

Tabela 2 – Composição química do aço inoxidável 304 ASTM A276 utilizada no estudo.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	N
0,03	0,38	1,75	0,042	0,014	17,25	0,43	9,2	0,35	0,022

(Fonte: própria)

As amostras (Ver foto na Figura 8 e apêndice A: Desenho mecânico da peça usinada) provenientes da produção da indústria para a pesquisa experimental, foram submetidas às operações de torneamento em desbaste em centro de torneamento CNC Romi modelo GL 240 (Foto na figura 9), utilizando fluido de corte Metcut Semi sintético com 6% de emulsão em água, em abundância.

Figura 8 – Peça fabricada



Fonte: própria

Figura 9 – Centro de torneamento GL 240



Fonte: própria

Foram utilizados insertos intercambiáveis ISCAR de metal duro com geometria ISO TNMG 160404 TF (IC 907), e fixados no porta-ferramenta ISCAR ISO MTJNR-2020K. Ademais, a habilidade do operador, oscilação do material e turno de operação não foram analisados.

As alterações do processo foram aplicadas somente na operação de desbaste, o que não altera o aspecto visual variando-se os dois parâmetros de usinagem em 7x4 níveis, na seguinte sequência: velocidade de corte ( $V_c$ ) e avanço ( $f$ ), e quanto aos parâmetros de usinagem referente à etapa de acabamento não foram alterados.

Conforme já mencionado o experimento foi realizado no Centro de usinagem GL 240, com a sequência das etapas:

- Preset da máquina: configuração dos parâmetros de calibração,
- Montagem do ferramental: suporte de ferramenta de corte, ferramenta de corte,
- Execução do programa, que propriamente dito é o comando numérico computadorizado, onde as variáveis: velocidade de corte e avanço foram inseridas (alteradas) para cada unidade amostral, sendo estabelecido um programa para cada unidade amostral, os valores em questão foram inseridos no display do comando, somente no ciclo de desbaste, visto que o ciclo de acabamento (operação que deixa a peça na dimensão final e inclusive define a qualidade superficial.

- Execução do programa, que propriamente dito é o comando numérico computadorizado, onde as variáveis: velocidade de corte e avanço foram inseridas (alteradas) para cada unidade amostral, sendo estabelecido um programa para cada unidade amostral, os valores em questão foram inseridos no display do comando, somente no ciclo de desbaste, visto



que o ciclo de acabamento (operação que deixa a peça na dimensão final e inclusive define a qualidade superficial).

A seguir pode-se verificar na figura 10, a imagem do comando de interface e programação da máquina de usinagem.

Figura 10 – Comando do centro de torneamento GL 240



Fonte: própria

Na realização da usinagem das amostra, o processo segue de forma automática e continua, e só é interrompido de forma voluntária, caso seja necessário qualquer correção, e cada amostra foi realizada por um programa, editando apenas as variáveis: velocidade de corte e avanço (Ver apêndice B: Programa CNC da peça usinagem), as informações de tempo de ciclo ou da unidade produzida (peça) e a somatória ou quantidade total produzida (por aresta da ferramenta) é indicada no próprio monitor da máquina.

Após a coleta e execução do plano amostral, foi aplicado um modelo de regressão linear múltipla para verificar estatisticamente se os fatores definidos: Velocidade de corte e Avanço afetam significativamente as respostas.

Na sequência para encontrar os extremos (máximos e mínimos) da função e modelo adotado utilizou-se dos métodos dos multiplicadores de Lagrange e Steepest Ascent através da utilização do software MINITAB<sup>®</sup> versão 17, e modelo de 1<sup>o</sup> ordem que permitiu aproximação do máximo local dessa função.

Após foi realizado uma análise canônica, adotado agora um modelo de segunda ordem para as duas respostas. A equação de segunda ordem ajustada por mínimos quadrados e usando o software MINITAB<sup>®</sup> versão 17, juntamente com o ajuste através da metodologia de superfície

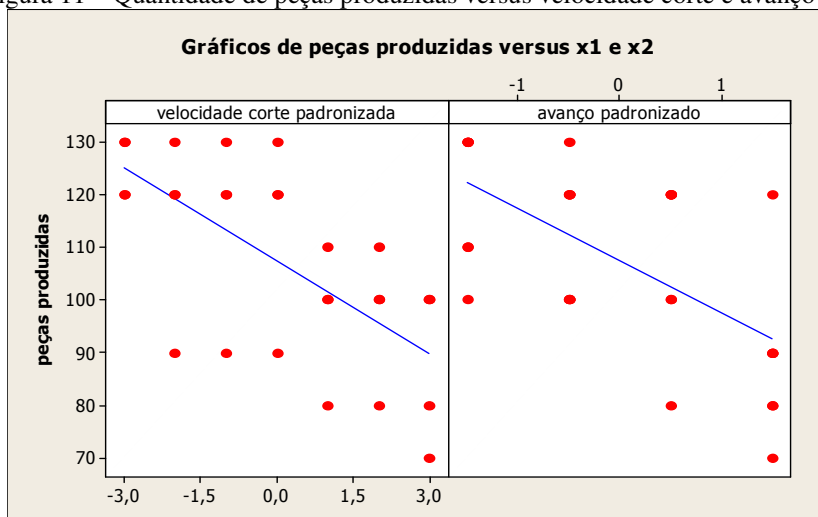
de respostas para indicar os pontos ótimos do experimento industrial, e através da Regressão de Weibull e modelagem das covariáveis que afetam o tempo total (confiabilidade) da ferramenta de corte.

## 5 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS NO OBJETO DE ESTUDO

Inicialmente, se realiza a descrição das variáveis respostas; quantidade de peças fabricadas e tempo de manufatura de cada peça. Nas respectivas figuras 11 e 12, estão os gráficos de dispersão bidimensional para as variáveis respostas (quantidade de peças produzidas e tempo de fabricação) versus os fatores (velocidade de corte e avanço de corte codificados,  $x_1$  e  $x_2$ ).

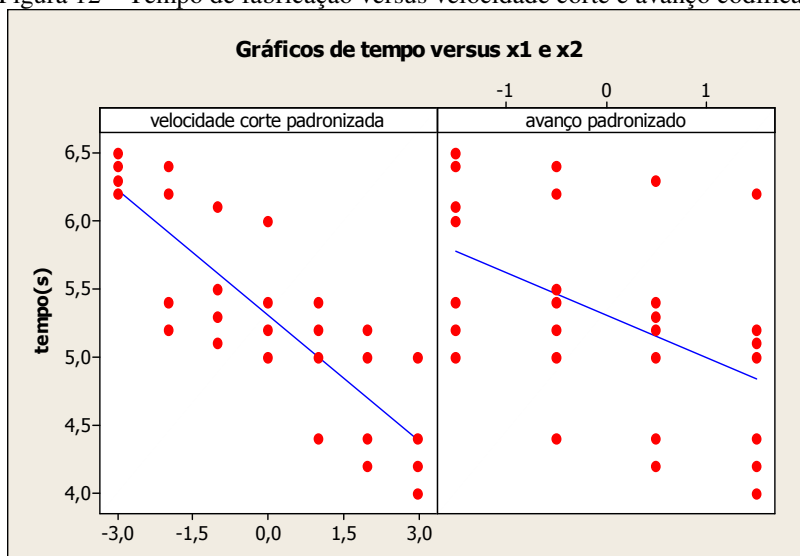
A partir dos gráficos das Figuras 11 e 12, algumas hipóteses preliminares relacionando às covariáveis com as respostas podem ser levantadas: pode ser observado que um aumento de velocidade de corte e de avanço leva a menor quantidade de peças produzidas e também menor tempo de fabricação.

Figura 11 – Quantidade de peças produzidas versus velocidade corte e avanço codificados



(Fonte: própria)

Figura 12 – Tempo de fabricação versus velocidade corte e avanço codificados



(Fonte: própria)

## 5.1 Modelagem estatística

Para analisar os dados amostrais de fabricação das peças de aço inox 304, foi utilizado um modelo de regressão linear múltiplo considerando as duas covariáveis velocidade de corte e avanço de corte. Assim considerando as variáveis respostas  $Y_1$  (quantidade de peças produzidas) e  $Y_2$  (tempo de fabricação), supõe-se um modelo de regressão linear múltiplo de primeira ordem dado por,

$$Y_{ji} = \beta_{j0} + \beta_{j1}x_{1i} + \beta_{j2}x_{2i} + \varepsilon_i \quad (17)$$

onde os parâmetros de regressão são interpretados da seguinte forma:  $\beta_{j0}$  é o intercepto;  $\beta_{j1}$  e  $\beta_{j2}$  representam o número de unidades que a resposta muda para cada mudança de uma unidade nas covariáveis padronizadas  $x_1$  e  $x_2$ . Se o estimador é positivo, temos um aumento na resposta devido à covariável correspondente; quando o estimador é negativo, temos um decréscimo na resposta devido à covariável correspondente.

Em que  $j=1,2$  (indica a  $j$ -ésima resposta);  $i = 1,2,\dots,28$  (indica a  $i$ -ésima unidade amostral);  $\varepsilon_i$  são erros aleatórios supostos como independentes seguindo distribuição normal com média zero e variância constante  $\sigma^2$ ;  $x_{1i}$  denota a velocidade de corte na forma codificada para a  $i$ -ésima observação amostral ;  $x_{2i}$  denota o avanço na forma codificada para a  $i$ -ésima observação amostral. Observar que, usando as variáveis independentes codificadas temos estas variáveis com valores centrais iguais a zero; esta transformação é importante para usar técnicas de superfícies de respostas onde obtemos direções do máximo da superfície partindo dos valores centrais das variáveis independentes (ver por exemplo, MYERS, 1971).

Para a procura do ponto ótimo da superfície ajustada (maior quantidade de peças fabricadas,  $Y_1$  ou menor tempo de fabricação,  $Y_2$ ) serão utilizadas técnicas de superfície ajustada para explorar o melhor modelo de regressão ajustado por mínimos quadrados na determinação das regiões dos níveis das covariáveis (condições ideais) que otimizam as variáveis dependentes dentro dos limites de variabilidade de cada covariável.

## 5.2 Técnicas de caminho de ascensão ao máximo “STEEPEST ASCENT”

Considerando-se modelos de primeira ordem, isto é, modelos de regressão incluindo só termos lineares, uma técnica exploratória será utilizada (“*steepest ascent*”) para encontrar as regiões da superfície que otimizam a resposta (ver, por exemplo, MYERS, 1971). Supor que o modelo ajustado por mínimos quadrados seja dado por,

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{l=1}^k b_l x_l \quad (18)$$

em que  $b_l$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots, k$  são EMQ (estimadores de mínimos quadrados) dos parâmetros de regressão  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ . No nosso caso,  $k=2$ . Para achar os valores de  $x_1, x_2, \dots, x_k$  que maximizam a resposta  $b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i$  sujeito à restrição  $\sum_{i=1}^k x_i^2 = R^2$  (uma hiperesfera de dimensão  $k$  e raio  $R$  fixado), é apresentada a função a ser maximizada dada por,

$$Q(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{l=1}^k b_l x_l - \mu \left( \sum_{l=1}^k x_l^2 - R^2 \right) \quad (19)$$

em que  $\mu$  é um multiplicador de Lagrange.

Para a determinação dos valores de  $x_1, x_2, \dots, x_k$  que maximizam a resposta maximizar (19) usando o procedimento de otimização sujeito à restrições introduzido na seção 3.3.1.

### 5.3 Análise canônica

Para uma análise canônica, considera-se a redução de uma forma quadrática do modelo ajustado de segunda ordem para uma forma canônica, na localização das regiões de condições ótimas (ver detalhes sobre análise canônica na seção 3.3.2).

## 5.4 Resultados

### 5.4.1 Uso de técnicas “STEEPEST ASCENT”.

Usando o software MINITAB<sup>®</sup> versão 17 e, inicialmente considerando o modelo (1) construiu-se a Tabela 3, contendo os estimadores de mínimos quadrados (EMQ) para os coeficientes de regressão do modelo, os erros-padrões (EP) dos estimadores obtidos, a estatística  $t$  de Student observada e os  $p$ -valores.

Dos resultados da Tabela 3, conclui-se que, considerando um nível de significância de 5% o aumento de velocidade de corte e avanço tem efeitos lineares significativos na resposta (quantidade de peças produzidas e tempo de produção das peças); resultado da Tabela 3 observar que os  $p$ -valores dos testes de significância (parâmetro de regressão correspondente ser igual à zero) são menores do que 0,05.

Tabela 3 – Estimadores de mínimos quadrados (modelo de primeira ordem)

Resposta: quantidade de peças produzidas				
Predictor	Coef	EP	T	P
Constante	107,500	1,432	75,08	<0,001
Veloc corte codificado	-5,8929	0,7159	-8,23	<0,001
Avanço codificado	-9,857	1,281	-7,70	<0,001
Resposta: tempo para produção				
Predictor	Coef	EP	T	P
Constante	5,30714	0,03424	154,99	<0,001
Veloc corte padr	-0,30536	0,01712	-17,83	<0,001
Avanço padronizado	-0,31143	0,03063	-10,17	<0,001

Fonte: própria (EP: erro padrão; T: valor da estatística t de Student; P: p-valor).

Observar que o modelo de regressão associado aos resultados da Tabela 3 são dados pela equação (17) onde os parâmetros de regressão  $\beta_{j1}$  e  $\beta_{j2}$  representam o número de unidades que a resposta muda para cada mudança de uma unidade nas covariáveis padronizadas  $x_1$  e  $x_2$ . Como os estimadores de mínimos quadrados são negativos, o aumento de velocidade de corte ( $x_1$ ) e avanço ( $x_2$ ) levam a um decréscimo nas respostas quantidade de peças produzidas e tempo para produção.

Usando a técnica exploratória “steepest ascent” e considerando o modelo de primeira ordem (1) e os resultados da Tabela 3, observa-se com resposta quantidade de peças produzidas onde as covariáveis codificadas são definidas em  $x_1 \in (-3;3)$  e  $x_2 \in (-1,5; 1,5)$ , os estimadores de mínimos quadrados para  $\beta_1$  e  $\beta_2$  dados respectivamente por,  $b_1 = -5,89$  e  $b_2 = -9,86$ . Seja  $x_1 = -0,1$ ; de  $x_j = b_j/(2\mu)$  temos  $\mu = b_j/(2x_j)$  para  $j = 1,2$ ; assim,  $\mu = b_1/(2x_1) = -5,9/[2(-0,1)] = 29,5$ . Também,  $x_2 = b_2/[2\mu] = -9,86/59 = -0,1671186$ .

Considerar como base o centro do planejamento, isto é,  $x_1=0$  e  $x_2=0$ . Refazer o mesmo procedimento acima para  $x_1=-0,2$ ; e assim sucessivamente. Na Tabela 4, temos o caminho do valor estimado máximo da quantidade de peças produzidas.

Dos resultados da Tabela 4, considerar experimentos na vizinhança de  $x_1 = -0,9$  e  $x_2 = -1,50407$  (valores dentro da região experimental) que corresponde à velocidade = 71 e avanço =  $0,0796744 \approx 0,08$  para encontrar o maior número de peças produzidas.

Usando o mesmo procedimento, temos na Tabela 5 o caminho do tempo mínimo assumindo o modelo de primeira ordem ajustado com a resposta tempo.

Tabela 4 – Uso de “steepest ascent” para a resposta quantidade de peças produzidas

	X1	X2	Resposta estimada
Base	0	0	108
$\Delta$	-0,1	-0,1671186	
Base + $\Delta$	-0,1	-0,1671186	110,238
Base + 2 $\Delta$	-0,2	-0,3342372	112,476
Base + 3 $\Delta$	-0,3	-0,501356	114,713
Base + 4 $\Delta$	-0,4	-0,6684745	116,951
Base + 5 $\Delta$	-0,5	-0,8355932	119,189
Base + 8 $\Delta$	-0,8	-1,336949	125,902
Base + 9 $\Delta$	-0,9	-1,50407	128,140

(Fonte: própria)

Dos resultados da Tabela 5, considerar experimentos na vizinhança de  $x_1 = 1,5$  e  $x_2 = 1,543916$  (valores dentro da região experimental) que corresponde à velocidade = 95 e avanço =  $0,323513 \approx 0,32$  para encontrar menor tempo de fabricação.

Tabela 5 – Uso de “steepest ascent” para a resposta tempo de fabricação

	X1	X2	Resposta estimada
Base	0	0	5,30714
$\Delta$	0,2	0,2058553	
Base + $\Delta$	0,2	0,2058553	5,18137
Base + 2 $\Delta$	0,4	0,4117107	5,0556
Base + 3 $\Delta$	0,6	0,6175663	4,92982
Base + 5 $\Delta$	1	1,029277	4,67828
Base + 7,5 $\Delta$	1,5	1,543916	4,36385

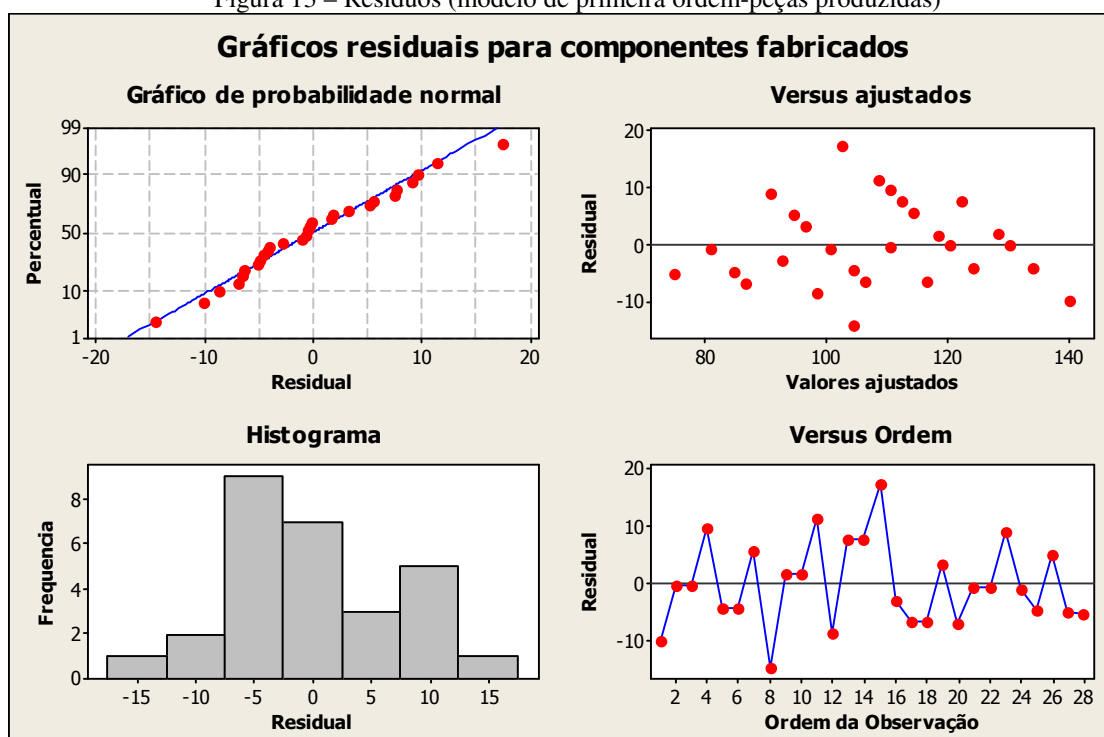
(Fonte: própria)

É importante salientar que também consideramos o ajuste do modelo de regressão (1) considerando as respostas (quantidade e tempo) transformadas para a escala logarítmica, mas os resultados foram similares e não houve ganhos em termos de ajuste dos modelos aos dados.

Nas Figuras 13 e 14, temos os resíduos dos modelos ajustados de primeira ordem. Observa-se dessas figuras excelente ajuste do modelo e que as suposições necessárias (normalidade dos resíduos, variância constante) são verificadas.

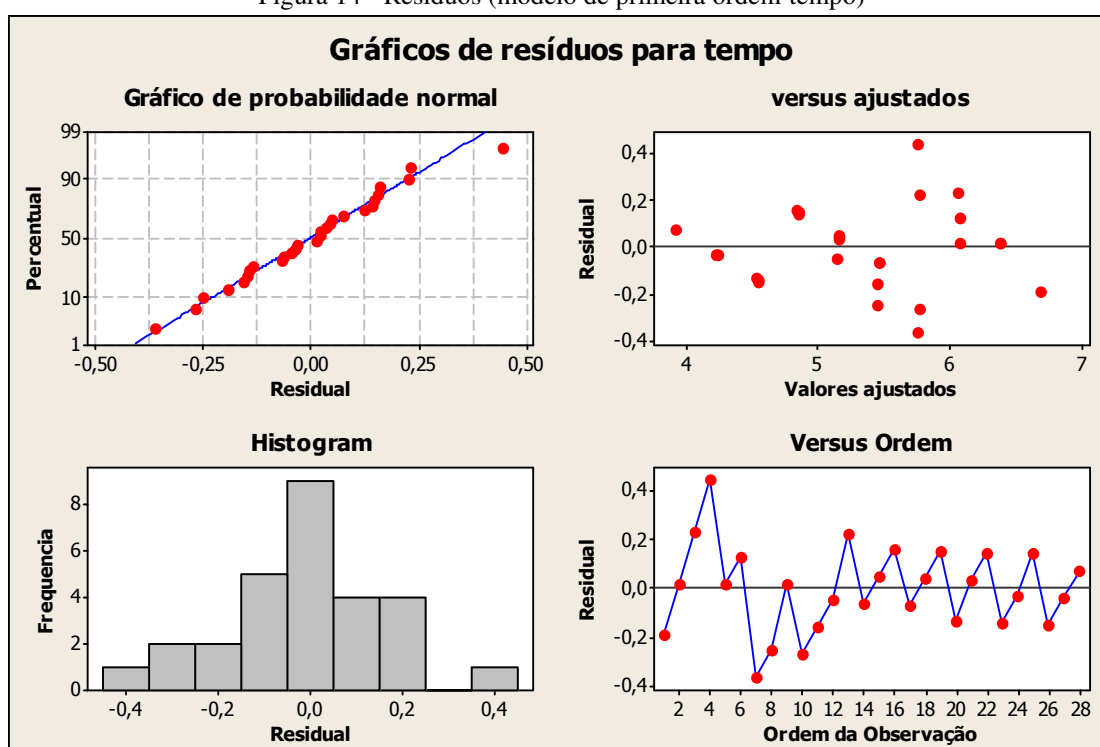
Assim, observa-se a partir da Figura 13, que os resíduos estão próximos da reta no gráfico de probabilidade normal, uma indicação de bom ajuste da distribuição normal aos resíduos. Da mesma forma observa-se na Figura 13 que o gráfico de resíduos versus valores ajustados mostra uma variabilidade dentro de uma faixa, uma indicação de variância constante. Além disso o histograma dos resíduos tem um comportamento aproximadamente simétrico e o gráfico de resíduos versus ordem observacional não mostra tendências significativas.

Figura 13 – Resíduos (modelo de primeira ordem-peças produzidas)



Fonte: própria

Figura 14 - Resíduos (modelo de primeira ordem-tempo)



Fonte: própria

Assim, também observa-se a partir da Figura 14, que os resíduos estão próximos da reta no gráfico de probabilidade normal, uma indicação de bom ajuste da distribuição normal aos resíduos. Da mesma forma observa-se na Figura 14 que o gráfico de resíduos versus valores



ajustados mostra uma variabilidade dentro de uma faixa, uma indicação de variância constante. Além disso histograma dos resíduos tem um comportamento aproximadamente simétrico e o gráfico de resíduos versus ordem observacional não mostra tendências significativas.

#### 5.4.2 Uso da análise canônica

É adotado agora um modelo de segunda ordem (ver (7)) para as duas respostas. A equação de segunda ordem ajustada por mínimos quadrados e usando o software MINITAB® versão 17 considerando a resposta quantidade de peças fabricadas é dada por,

$$\begin{aligned} \text{quantidade} = & 113 - 5,89 (\text{velocidade}) - 9,86 (\text{avanço}) - 0,417(\text{velocidade})^2 \\ & - 3,21(\text{avanço})^2 - 0,429 (\text{velocidade}).(\text{avanço}). \end{aligned} \quad (20)$$

Considerando a resposta tempo de fabricação, temos a seguinte equação ajustada,

$$\begin{aligned} \text{tempo} = & 5,24 - 0,305 (\text{velocidade}) - 0,311 (\text{avanço}) + 0,00774(\text{velocidade})^2 + \\ & 0,0286(\text{avanço})^2 - 0,0179(\text{velocidade}).(\text{avanço}). \end{aligned} \quad (21)$$

Na Tabela 6, verifica-se os estimadores de mínimos quadrados (EMQ) para os coeficientes de regressão do modelo, os erros-padrões (EP) dos estimadores obtidos, a estatística t de Student observada e os p-valores. Os coeficientes de determinação para os dois modelos são dados respectivamente por, 87,8% e 95,0% o que indica bom ajuste do modelo. Além disso, foram verificados os gráficos de resíduos onde observou-se que as suposições usuais foram verificadas (normalidade dos resíduos e variância constante).

Dos resultados da Tabela 6, conclui-se que considerando um nível de significância de 5%, o aumento de velocidade de corte e avanço tem efeitos lineares significativos na resposta quantidade de peças produzidas; o avanço ao quadrado tem efeito quadrático significativo na resposta (quantidade de peças produzidas); da mesma forma, considerando um nível de significância de 5% o aumento de velocidade de corte e avanço tem efeitos lineares significativos na resposta tempo; observar que os p-valores para testes de significância (parâmetro de regressão correspondente ser igual à zero) são menores do que 0,05.

Tabela 6 – Estimadores de mínimos quadrados (modelo de segunda ordem)

Resposta: quantidade de peças produzidas				
Predictor	Coef		T	P
Constante	113,185	2,591	43,68	< 0,001
Velocidade corte padr	-5,8929	0,6564	-8,98	< 0,001
Avanço padronizado	-9,857	1,174	-8,39	< 0,001
Velocidade ao quadrado	-0,4167	0,3790	-1,10	0,283
Avanço ao quadrado	-3,214	1,313	-2,45	0,023
interação (veloc) (avanço)	-0,4286	0,5871	-0,73	0,473
Resposta: tempo para produção				
Predictor	Coef	EP	T	P
Constante	5,24048	0,06809	76,96	<0,001
Veloc corte padr	-0,30536	0,01725	-17,70	<0,001
Avanço padronizado	-0,31143	0,03086	-10,09	<0,001
Velocidade ao quadrado	0,007738	0,009959	0,78	0,445
Avanço ao quadrado	0,02857	0,03450	0,83	0,416
Interação (veloc) (avanço)	-0,01786	0,01543	-1,16	0,260

Fonte: própria (EP é o erro padrão; T é o valor da estatística t de Student; P é o valor-p)

Observar que os parâmetros de regressão são interpretados da seguinte forma:  $\beta_{j0}$  é o intercepto; os outros parâmetros de regressão representam o número de unidades que a resposta muda para cada mudança de uma unidade nas covariáveis correspondentes. Se o estimador é positivo, temos um aumento na resposta devido à covariável correspondente; quando o estimador é negativo, temos um decréscimo na resposta devido à covariável correspondente. Em muitas situações esses estimadores não são significativos observados a partir de intervalos de confiança ou testes de hipóteses. Isso leva à conclusão de que a covariável correspondente não apresenta um efeito significativo na resposta.

A partir dos resultados da seção 3.2, considerando-se o modelo ajustado (12) para a resposta número de peças fabricadas, as raízes características da matriz B são dadas por:

$$\begin{vmatrix} -0,417 - \lambda & -0,2145 \\ -0,2145 & -3,21 - \lambda \end{vmatrix} = 0,$$

de onde obtém-se, os autovalores dados por:  $-3,22638$   $-0,40062$ . Como temos sinais negativos para os autovalores, temos um ponto estacionário que maximiza a resposta. O ponto estacionário é dado por:  $x_1 = -6,49561$  e  $x_2 = -1,10177$  ( $\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{2}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}$ ). No ponto estacionário  $x_1 = -6,49561$  e  $x_2 = -1,10177$  temos uma previsão de 137 peças produzidas (máxima resposta). Na escala original, temos velocidade corte = 15,0439 e avanço = 0,111858. É necessário muito cuidado com esses valores pois são valores fora da região experimental.

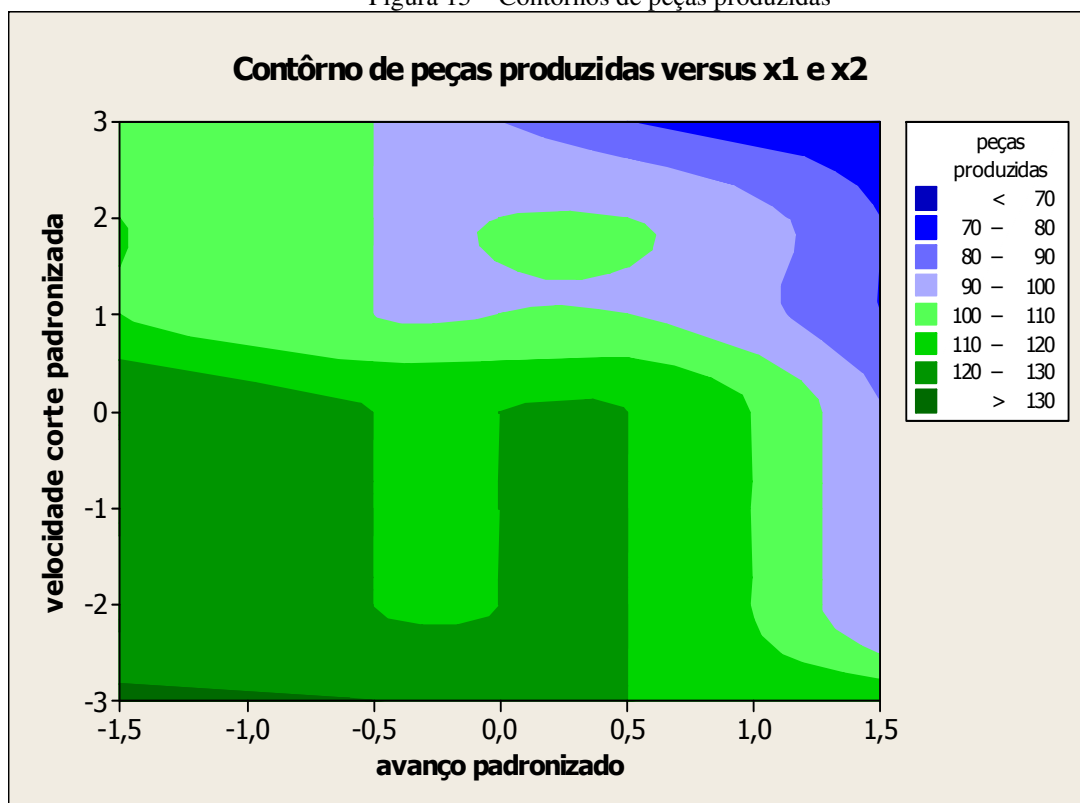
De forma similar, considerando-se o modelo ajustado (13) para a resposta tempo de fabricação, as raízes características da matriz B são dadas por:

$$\begin{vmatrix} 0,00774 - \lambda & -0,00895 \\ -0,00895 & 0,0286 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

de onde obtém-se, os autovalores dados por : 0,0319136 e 0,0044264. Isto é, temos um ponto estacionário que minimiza a resposta. O ponto estacionário é dado por:  $x_1 = 40,7275$  e  $x_2 = 18,1822$  ( $\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b}$ ). No ponto estacionário  $x_1 = 40,7275$  e  $x_2 = 18,1822$ , temos uma previsão igual à -3,79827 (mínima resposta) que é um valor impossível pois tempo deve ser positivo. Na escala original, temos velocidade corte = 487,275 e avanço = 1,65458, que são valores fora da região experimental. Assim, deveríamos explorar a superfície para pontos ótimos que estejam dentro da região experimental.

Na Figuras 15 temos os contornos das superfícies usando os dados experimentais introduzidos na Tabela 2.

Figura 15 – Contornos de peças produzidas



Fonte: própria

A partir da Figura 15, observa-se que o ponto de máximo  $x_1 = -6,49561$  e  $x_2 = -1,10177$  encontrado a partir da análise canônica estão fora da região experimental, mas pelo contôrno observa-se (região com cor verde musgo com respostas estimadas maiores do que 130) que o

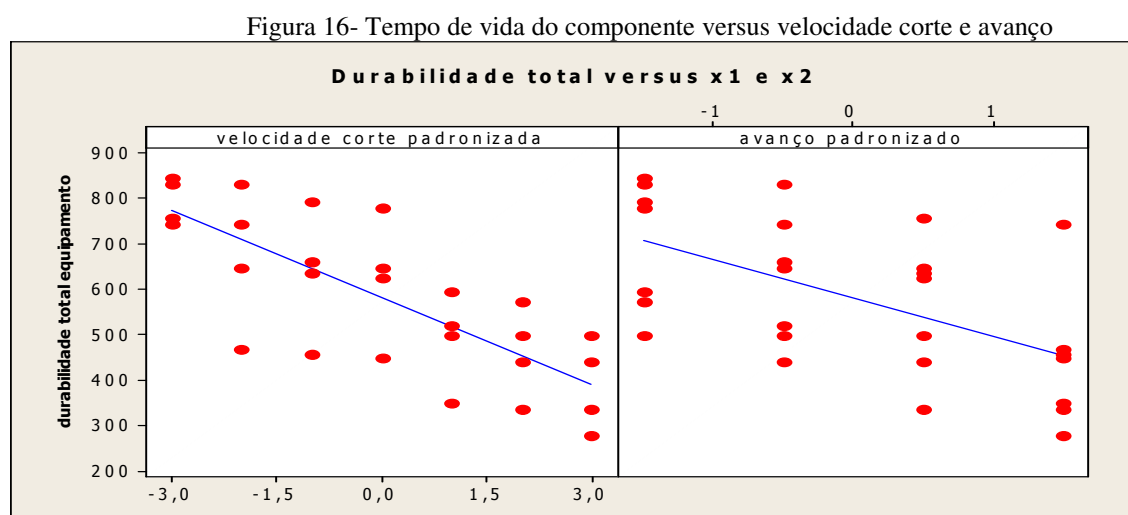
ponto está indicado nessa região o que está de acordo com os resultados obtidos. É importante salientar que o modelo ajustado pode levar a um máximo global fora da região do experimento, uma característica do modelo estatístico (previsão).

## 5.5 Análise do tempo de vida (durabilidade) total da ferramenta de corte

Observar que o tempo de vida útil (durabilidade) da ferramenta de usinagem é denotado por  $T$ , é dado a partir dos dados da Tabela 1, pela multiplicação da contagem de peças fabricadas pelo tempo de fabricação de cada unidade. Assim podemos usar a análise de confiabilidade, considerando os tempos até a falha dos componentes da máquina (ferramenta de corte).

### 5.5.1 Análise preliminar dos dados

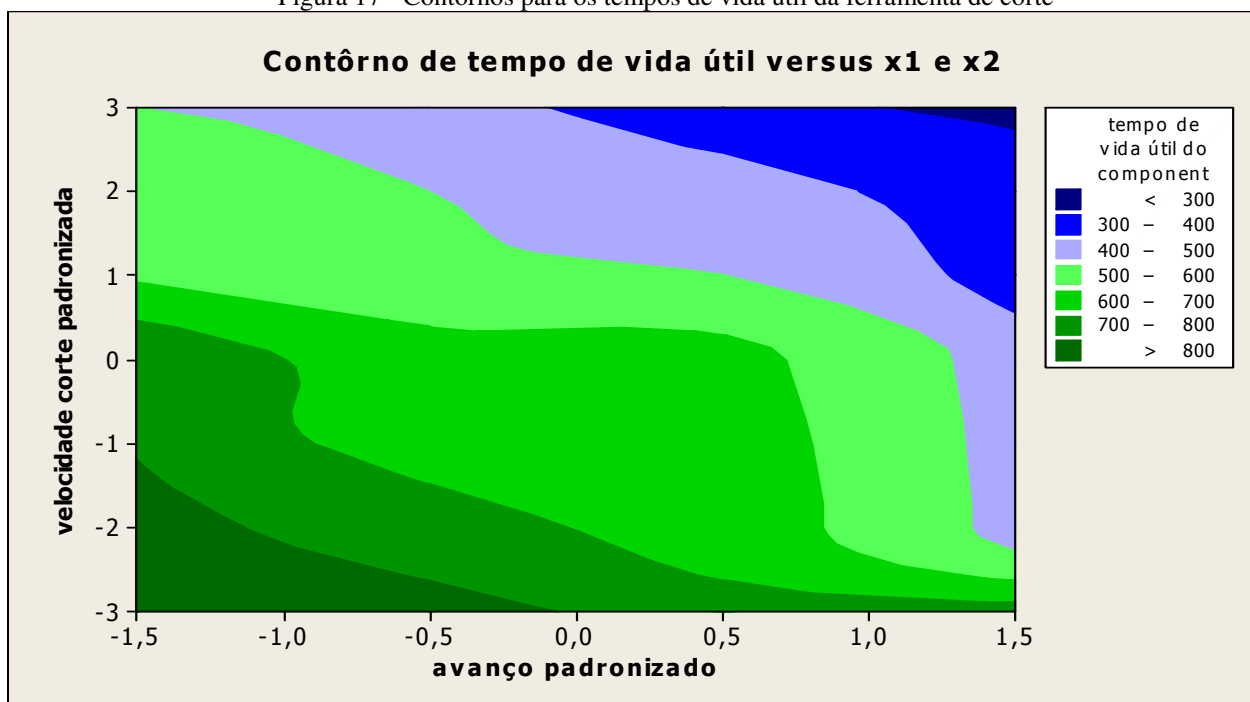
Na Figura 16, verifica-se os gráficos de dispersão bidimensional das respostas (tempo total de vida útil da ferramenta de corte que fabrica a peças de aço inox 304) versus os fatores (velocidade de corte e avanço codificados). A partir dos gráficos da Figura 17, observa-se que um aumento de velocidade de corte e de avanço, diminuem o tempo de vida útil da ferramenta de corte.



Fonte: própria

Na Figura 17, temos os contornos das superfícies usando os tempos de vida útil da ferramenta de corte da máquina que fabrica as ferramentas de inox 304 com as covariáveis velocidade de corte e avanço. Por esse contorno observa-se que as regiões com menores tempos de vida útil para a ferramenta são dados para valores grandes de velocidade de corte e avanço (região assinalada em azul escuro). Da mesma forma, observa-se maiores tempos de vida útil da ferramenta para valores menores da velocidade de corte e do avanço.

Figura 17 - Contornos para os tempos de vida útil da ferramenta de corte



Fonte: própria

### 5.5.2 Uso de um modelo de regressão de Weibull para os tempos de vida da ferramenta de corte

Assumindo o modelo de regressão de Weibull (16), na presença das covariáveis velocidade de corte e de avanço assumindo um modelo de segunda ordem (15) no parâmetro de escala  $\lambda$ , isto é, incluindo os efeitos lineares, quadráticos e de interação das covariáveis velocidade de corte e de avanço, temos na Tabela 7, os estimadores de máxima verossimilhança (EMV) dos parâmetros de regressão associados as duas covariáveis e para o parâmetro de forma (shape)  $\alpha$  obtidos usando o software MINITAB®

Dos resultados da Tabela 7, conclui-se que a velocidade de corte e avanço tem efeitos lineares significativos no parâmetro de escala da distribuição de Weibull; a velocidade também tem efeito quadrático significativo no parâmetro de escala (relacionado aos tempos de vida útil da ferramenta de corte); da mesma forma a interação (velocidade) x (avanço) é significativa pois os p-valores para testes de significância (parâmetro de regressão correspondente ser igual à zero) são menores do que 0,05. Na Tabela 7, também verifica-se os erros-padrões das estimativas obtidas baseadas na normalidade assintótica dos EMV obtidos (ver LAWLESS, 1982).

Tabela 7 – Estimadores de máxima verossimilhança (regressão de Weibull)

Standard				
Preditor	Coef	Erro	Z	P
Intercepto	6,42334	0,0217821	294,89	<0,001
Velocidade corte padr	-0,120583	0,0060890	-19,80	<0,001
Avanço padr	-0,140510	0,0112849	-12,45	<0,001
Velocidade ao quadrado	-0,0098013	0,0033848	-2,90	0,004
Avanço ao quadrado	-0,0210504	0,0123181	-1,71	0,087
int (veloc) (avanço)	-0,0230835	0,0051042	-4,52	<0,001
Parâmetros de forma	16,3605	2,48175		

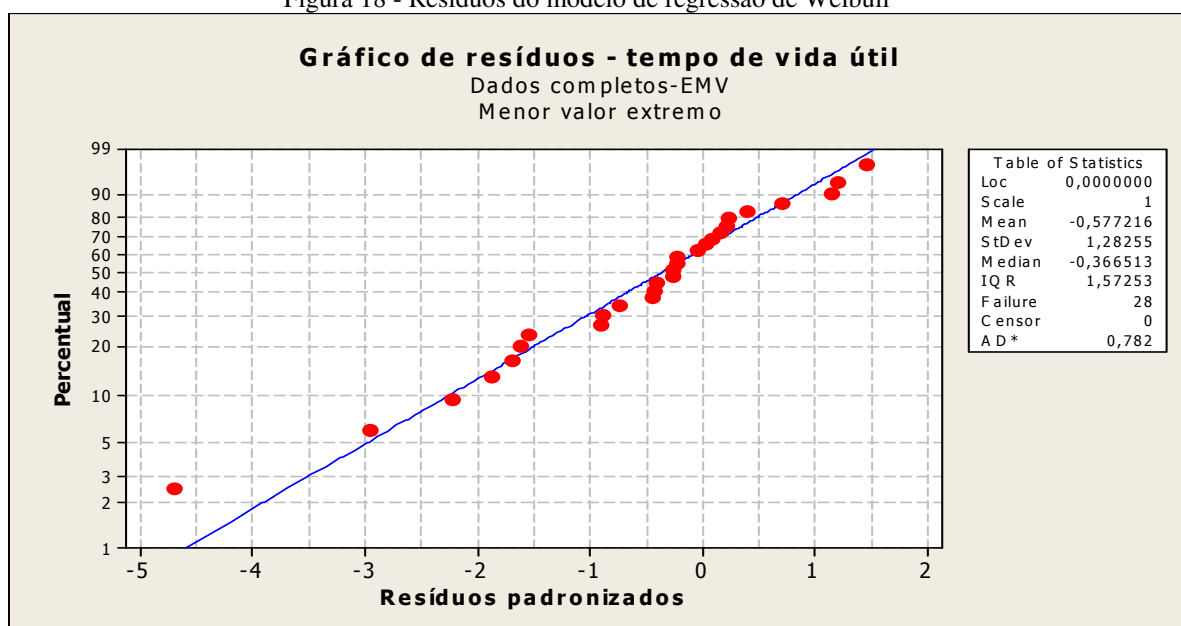
Fonte: própria (Z é o valor da estatística Z; P é o valor-p)

A partir dos resultados da Tabela 7, observa-se o seguinte:

- ✓ A velocidade de corte apresenta um efeito positivo (estimador do parâmetro de regressão igual à -0,120583), isto é, um aumento na velocidade de corte leva à um decréscimo no tempo de corte.
- ✓ O avanço apresenta um efeito negativo (estimador do parâmetro de regressão igual à -0,140510), isto é, um aumento no avanço leva à um decréscimo na quantidade de peças produzidas.
- ✓ Da mesma forma observa-se estimadores negativos para os termos quadráticos e de interação velocidade de corte x avanço.

Na Figura 18, temos o gráfico dos resíduos para o ajuste do modelo de regressão de Weibull obtidos diretamente do software MINITAB®. Como temos uma relação aproximadamente linear, concluímos que há um bom ajuste do modelo aos dados.

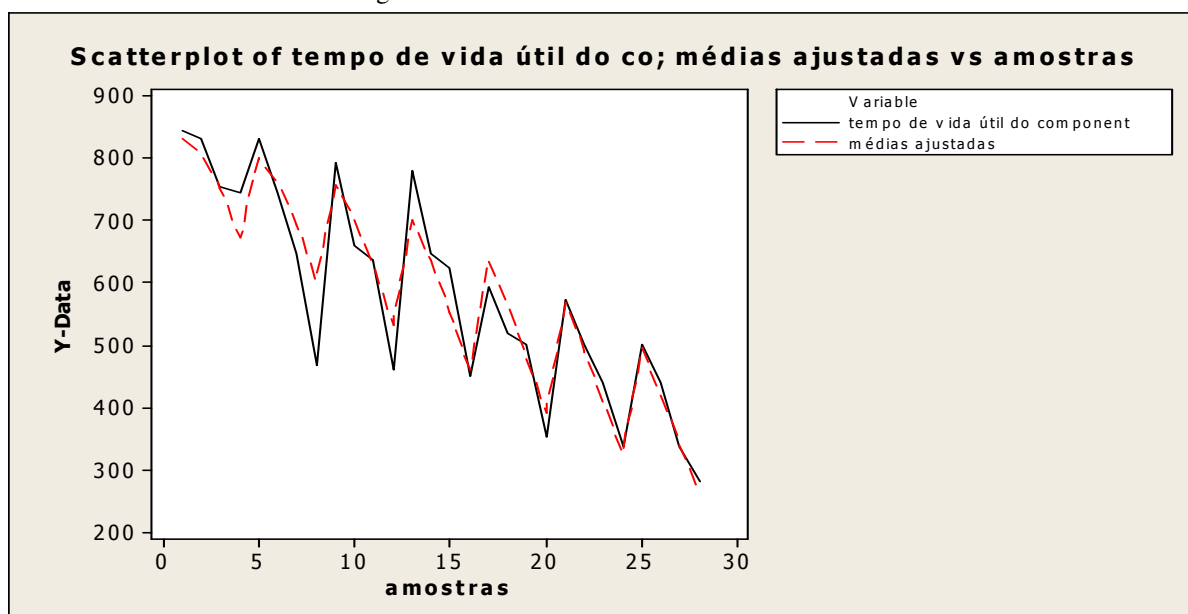
Figura 18 - Resíduos do modelo de regressão de Weibull



Fonte: própria

Na Figura 19, temos os gráficos das observações e médias ajustadas versus amostras. Observa-se bom ajuste do modelo do modelo de regressão de Weibull aos tempos de vida útil e juntamente com os gráficos de contornos, pode ser verificado o valor ótimo adotado, que seria a amostragem nº 13, considerando o menor avanço, visto que esse parâmetro apresenta um efeito negativo, isto é, um aumento no avanço leva à um decréscimo na quantidade de peças produzidas, a velocidade de corte = 80m/min e avanço de 0,08 mm/rev.; onde tem-se uma vida útil da ferramenta em 780 mim, o que proporciona a máxima quantidade de peças produzidas = 130 peças, e corresponde a um tempo unitário de 6,0 minutos.

Figura 19 - Valores observados e médias estimadas



Fonte: própria

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram alguns pontos importantes para a fabricação de peças produzidas pelo setor de usinagem da empresa Work Medic Equipamentos Médicos Ltda: as duas covariáveis consideradas (velocidade de corte e avanço de corte) tem efeitos significativos nas respostas (quantidade de peças produzidas e tempo de fabricação) como observado a partir dos modelos de regressão múltipla ajustados aos dados, a velocidade de corte e o avanço apresentam um efeito negativo, pois um aumento desses parâmetros levam a um decréscimo da vida útil da ferramenta de corte.

Usando técnicas de superfícies de respostas, foi possível detectar os níveis das covariáveis (velocidade de corte e avanço de corte) ótimos para identificar as regiões experimentais que otimizam as respostas (máxima quantidade de peças produzidas e mínimo tempo de fabricação), Além disso, foi ajustado um modelo de regressão de Weibull para os tempos de vida da ferramenta de corte de onde foi possível identificar as covariáveis significativas na durabilidade média das ferramentas de corte. Esse modelo também pode ser utilizado em previsões, outro ponto de grande interesse da indústria e através disso e juntamente com os gráficos de contornos, pode ser determinado o valor ótimo adotado, a velocidade de corte = 80m/min e avanço de 0,08 mm/rev.; onde tem-se uma vida útil da ferramenta em 780 mim, o que proporciona a máxima quantidade de peças produzidas = 130 peças, e corresponde um tempo de 6,0 minutos para cada peça produzida, permitindo responder a questão da pesquisa: onde a identificação dos parâmetros para melhor produtividade são correlacionados a eficiência da ferramenta de corte, inclusive também são encontrados os objetivos deste trabalho, pois os resultados demonstram as influenciam dos fatores e parâmetros no processo de usinagem e mostrando uma previsão da vida útil da ferramenta em função da demanda de produção, esses resultados direcionam a melhoria da produtividade e são de grande interesse para a indústria inclusive também para a minimização dos desperdícios.

Do ponto de vista da engenharia, os valores que maximizam a resposta encontrada fora da região experimental, não se aplicam ao processo de usinagem estudado, pois nas respostas encontradas: velocidade de corte = 15,0439 e avanço = 0,111858, a ferramenta de corte sofre muita vibração e está fora da recomendação de uso pelo fabricante. E o ponto que minimizam a resposta também foram encontrados fora da região experimental, e também não se aplica ao processo de usinagem estudado, pois nas respostas encontradas: velocidade de corte = 487,275 e avanço = 1,65458, as forças de cisalhamento geradas no processo de corte do metal extrapolam



a rigidez estrutural da máquina operatriz utilizada no estudo, causando danos aos componentes da mesma, inclusive a ferramenta de corte utilizada também não suportaria trabalhar nesses parâmetros. Diante disso, a repercussão dos resultados na empresa prospectou relevantes oportunidades nos aspectos relacionados a gestão produtiva, ou seja, diante da variação da demanda de serviços e os respectivos prazos de entregas, os gráficos de contorno possibilitaram o uso estratégico conforme padrões otimizados, onde:

- As regiões ótimas de peças fabricadas: são aplicadas quando existe a necessidade de buscar maior quantidade de peças (volume).

- As regiões ótimas do tempo de fabricação: são aplicadas quando existe a necessidade de finalizar uma ordem de produção, inclusive o prazo de entrega do lote de peças.

- As regiões ótimas do tempo de vida útil do componente: são aplicadas quando existe uma demanda de produção mais estável, possibilitando prolongar a utilização da ferramenta.

E com base na literatura consultada para este trabalho, BHATTACHARYYA e SORKHEL (1999); SINGH e SHAN (2002); EBEID et al (2004); SEN e SHAN (2005); HEWIDY et al (2005); PAIVA et al (2007); AL-AHMARI (2007); CHIANG (2008); LIM (2009); HABIB (2009); HABEEB et al (2010); LIN et al (2012); PARKA et al (2012); YANG et al (2012); DAVOODI e TAZEHKANDI (2014), pode ser verificado através de aplicações de métodos estatísticos, inclusive com a metodologia de superfície de resposta, que as obtenção das condições ótimas assim com neste trabalho, nem sempre são obtidas diretamente, pois os pontos de maximização ou minimização podem estar fora das faixas amostrais, mas os efeitos de cada fator isoladamente, e também suas interações direcionam a obtenção dos valores ótimos, e esses resultados assim como neste trabalho, revelaram relações úteis entre os parâmetros experimentados, comprovando a significativa importância na aplicação e desenvolvimentos de tais modelos para solucionar os problemas industriais.

## 6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Este trabalho gerou questionamentos que devem ser investigados em trabalhos futuros.

- Realizar o estudo considerando como variável a: profundidade de corte, além da velocidade de corte e o avanço (utilizadas neste trabalho).
  
- Quantificar os custos e ganhos financeiros inerente as opções experimentais.

- Executar o estudo com ferramentas de corte mais resistente, ou seja, com maiores limites de velocidade de corte e avanço, estabelecendo a relação de ganhos de produtividade x durabilidade x custos entre elas.

## **6.2 Resultados científicos obtidos a partir dos dados coletados para desenvolvimento deste trabalho**

- (1) Artigo publicado em revista estrangeira: Achcar, J. A; Faria, R. F ; Souza, R. M. Response surface methodology considering Poisson and Weibull regression models: a case study. **International Journal, Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, p. 1867-1879, 2014.
- (2) Artigo submetido para a **revista eletrônica Produção & Engenharia**: Achcar, J. A; Faria, R. F; Piratelli, C. L: “Otimização dos parâmetros de usinagem para a fabricação de peças em aço inox 304”.
- (3) Artigo publicado no **congresso nacional SIMPEP, 2014**, Bauru, SP: Faria, R. F. ; Achcar, J. A. Determinação dos parâmetros ótimos de usinagem através das técnicas de superfícies de respostas em uma organização de Ribeirão Preto/SP. In: **XXI SIMPEP - Ensino de Engenharia de Produção - Simpósio de Engenharia de Produção**, 2014, Bauru, SP. anais, 2014.
- (4) Artigo aceito em 2015 para **congresso nacional ENEGEP**: Faria, R. F.; Achcar, J. A. Prospecção de melhoria da produtividade na fabricação de peças em aço Inóx 304 em uma empresa de Ribeirão Preto / SP. In: **XXXV ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Fortaleza, CE, 2015.
- (5) Convite de uma editora da Alemanha para preparar um texto com o material da dissertação.

## Referências

- AZEVEDO, Américo Luiz de. **Conceitos Básicos do CNC**. Disponível em [www.mundocnc.com.br](http://www.mundocnc.com.br). Acesso em: 13 jun. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Processos mecânicos de usinagem, Rio de Janeiro, 1971.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). **Metals handbook. Properties and selection: stainless steels tool materials and specials purpose metals**. 9.ed. v.3 Ohio: ASM, 882p., 1987.
- AGGARWAL, A.; SINGH, H. Optimization of machining techniques. A retrospective and literature review. **Sadhana**, v 30, Part 6, p. 699-711, 2005.
- AL-AHMARI, A. M. A. Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 190, p.305–311, 2007.
- ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. Design solutions from concept through manufacture: Response surface methods for process optimization. **Desktop Engineering**, 2004. Disponível em: <http://www.deskeng.com/de/response-surface-methods-for-process-optimization/>. Acesso em: 14 jan. 2015.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.
- BAKER, R. D. Ceramic cutting tools: Application guidelines. **Carbide Tool**, p.28-35, 1981.
- BATISTA, M. F. **Estudo da rugosidade de superfícies planas usinadas por fresas de topo esférico**. 2006. 103f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2006.
- BERTRAND, J. W. M. A; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p.241-261, 2002.
- BHATTACHARYYA, B.; SORKHEL, S. K. Investigation for controlled electrochemical machining through response surface methodology-based approach. **Journal of Materials Processing Technology**, n.86, p. 200–207, 1999.
- BOSSERT, M. Machining Stainless alloys. **Advanced Materials & Processes**, n. 7, p. 43-44. 1995.

BOX, E. P. G.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistics Society, Series B, Methodology**, v. 13, p. 1-45, 1951.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building**. New York: John Wiley, 1978.

CARBÓ, Hector Mario. **Aço inoxidável: aplicações e especificação**. São Paulo: Núcleo Inóx, 2001.

CHANDRASEKARAN, H., JOHANSSON, J. O. Chip flow and notch wear mechanisms during the machining of high austenitic stainless steels. *CIRP Annals*, v. 43, n. 1, p. 101-105, Jan. 1994.

CHEN, M.; CHEN K. Y. Determination of optimum machining conditions using scatter search. **New optimization techniques in engineering**, p. 681–697, 2003.

CHIANG, K. T. Modeling and analysis of the effects of machining parameters on the performance characteristics in the EDM process of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiC mixed ceramic. **Int J Adv Manuf Technol**, n.37 p.523–533, 2008.

COLOSIMO, E; GIOLO S.R. **Análise de sobrevivência aplicada**, Edgard Blucher, 2006.

COPPINI, N.L., BAPTISTA, E.A., Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. In: *ENC. NAC. ENG. PROD.*, **Anais.** Rio de Janeiro: ABEPRO, v.2, p. 28-36, 1998.

CORRÊA, Henrique L., GIANESI, Irineu G. N., CAON, Mauro. **Planejamento, programação e Controle da Produção**. São Paulo: Atlas, 2001

ÇOLAC, O.; KURBANOGU, C.; KAYACAN, M. C. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. **Materials & Design**, Oxford, v.28, n.2, p. 657-666, 2005.

DAVOODI, B.; TAZEHKANDI, A. H. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. **Journal of Cleaner Production**, n.68, p.234–242, 2014.

DEAN, A.; VOSS, D. **Design and Analysis of Experiments**. New York: Springer, 1999.

DEMING, S. N. **Experimental designs: response surface in chemometrics, mathematics and statistics in chemistry**. Kowalski, B. R. (ed.) Dordrecht; Reidel, 1981.

DE SOUZA, Sergio A. **Composição química dos aços**. 1. ed. São Paulo: Edgar e Blücher LTDA, 2006.

DIAS, A. P.; ALVARES, J. F.; ROSA, H. A.; SOUZA, M. P.; RAYMUNDO, E. A.; RIBEIRO, R. B. Análise dos parâmetros de usinagem do aço inox austenítico ABNT 304 como recebido via microscopia eletrônica de varredura. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação – COBEF**, 6, Caxias do Sul: 2011.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3ªed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

DRAPER N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**, Wiley series in probability and mathematical statistics, 1981.

EBEID, S. J.; HEWIDY, M. S.; El-Taweel, T. A.; YOUSSEF, A. H. Towards higher accuracy for ECM hybridized with low-frequency vibrations using the response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology**, n.149, p.432-438, 2004.

EZUGWU, E. O., MACHADO, A. R., PASHBY, I. R., WALLBANK, J. The effect of high-pressure coolant supply. **Lub. Eng.**, n.47, p. 751-757, 1990.

FAVARETTO, A. S.; VALLE, P. D.; JUNIOR, O. C. O gerenciamento de ferramentas de corte na indústria automotiva: um estudo de casos na região metropolitana de Curitiba. **Produto & Produção**, vol. 10, n. 3, p. 45 - 60, out. 2009.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FERRARESI, D. **Fundamentos Da Usinagem Dos Metais**. 7ª Reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1988.

FERREIRA, J. R. **Torneamento de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono**. 1999. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas / SP, 1999.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da Pesquisa Científica**. Fortaleza: UEC, Apostila, 2002.

Gil, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. Ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo, 5ª Edição, Editora Atlas S.A, 2010.

GOLÇALVES, E. L. Z. Inovação no processo produtivo no segmento metal-mecânico com uso de tecnologia a CNC (Pesquisa do perfil profissional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2006, Passo fundo / RS. **Anais do XXXIV COBENGE**.

HABEEB, H. H.; KADIRGAMA, K.; NOOR, M. M.; RAHMAN, M. M.; MOHAMMAD, B.; BAKAR, R. A.; HOSSEIN, K. A. A. Machining of Nickel Alloy 242 with Cubic Boron Nitride Tools. **Journal of Applied Sciences**, v.10, n.19, p.2322-2327, 2010.

HABIB, S. S. Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach. **Applied Mathematical Modelling**, n.33, p.4397-4407, 2009.

HAIR, J. F. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariada de Dados**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HEWIDY, M. S.; EL-TAWEEL, T.A; EL-SAFTY, M. F. Modelling the machining parameters of wire electrical discharge machining of Inconel 601 using RSM. **Journal of Materials Processing Technology**, n.169, p.328–336, 2005.

HILL, R. C.; GRIFFITHS, W. E.; JUDGE, G. G. **Econometria**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2003.

JOHN, M. R. S.; VINAYAGAM, B. K. Optimization of Ball Burnishing Process on Tool Steel (T215Cr12) in CNC Machining Centre Using Response Surface Methodology. **Arab J Sci Eng**, n.36, p.1407–1422, 2011.

JOHNSON, N.L.; KOTZ, S.; BALAKRISHNAN, N. **Continuous univariate distributions**, vol 1, Wiley series in probability and mathematical statistics: applied probability and statistics, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley & Sons, 1994.

KHURI, A.I.; CORNELL, J.A. **Response surfaces: designs and analyses**. New York: Marcel Dekker, 1987.

KUMAR, M.; MALIK, S. Optimizing the process parameters of machinability through the Taguchi Technique, **International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering**, 2 (8), 48-57, 2013.

KUO, L.Y; YEN, J.Y. A genetic algorithm based parameter-tuning algorithm for multidimensional motion control of a computer numerical control machine tool. **Proc. Inst. Mech. Eng.** B216, 2002.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LAWLESS, J. F. **Statistical models and methods for lifetime data**, Wiley series in probability and mathematical statistics, Wiley & Sons, 1982.

LEWIS, M. W. Iterative Triangulation: a Theory Development Process using Existing Case Studies. **Journal of Operations Management**, v. 16, p. 455-469, 1998.

LIM, P. Optimization of the rough cutting factors of impeller with five-axis machine using response surface methodology. **Int J Adv Manuf Technol**, n.45, p.821–829, 2009.

LIN, Y. C.; TSAO, C. C.; HSU, C. Y.; HUNG, S. K.; WEN, D. C. Evaluation of the characteristics of the microelectrical discharge machining process using response surface methodology based on the central composite design. **Int J Adv Manuf Technol**, n. 62, p.1013–1023, 2012.

LUNDVALL Bent-Ake, **The Globalising Learning Economy: Implications for Small and Medium Sized Enterprises**. Aalborg University, 1978.

MACHADO, Aryoldo. **Comando Numérico Aplicado as Máquinas Ferramentas**. 4. Ed. São Paulo: Ícone Editora, 1990.

MARCONI, Maria de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de Pesquisa**. São Paulo, 7ª edição, Editora Atlas, 2008.

MARINHO, M. R. M.; DE CASTRO, W. B. **Planejamento fatorial: uma ferramenta poderosa para os pesquisadores**, In: XXXIII – Congresso Brasileiro de Ensino de engenharia, COBENGE, Campina Grande (Pb), 2005.

MELO, A.; CATEN, C. S.; SANT'ANNA, A. M. O. Otimização dos parâmetros de usinagem na manufatura do ferro fundido. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.13, n. 1, p. 375-388, jan./mar. 2013.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução, **Produção**, v.17, n.1, p. 216-229, 2007.

MINTO, C. **Response Surface Modeling of Drug Interactions**, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control** (2nd ed.). New York: Wiley, 1990.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments: Response surface method and designs**. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2005.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. Fifty Ed. New York: Wiley, 2011.

MUKHERJEE, I.; RAY, P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. **Computers & Industrial Engineering**, n. 50, p. 15-34, 2006.

MYERS, R. H. **Response surface methodology**. Boston: Allyn and Bacon, 1971.

MYERS, R. H.; KHURI, A. I.; CARTER, W. H. Jr. Response surface methodology: 1966-1988. **Technometrics**, v. 31 , n. 2, p. 137-153, 1989.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response Surface Methodology: process improvement with steepest ascent, the analysis of response Surfaces, experimental designs for fitting response surfaces**, 183-351. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1995.

NELSON, W. **Applied life data analysis**, Wiley-Blackwell, 2004.

OEHLERT, G. W. **Design and analysis of experiments: Response surface design**, New York: W.H. Freeman and Company, 2000.

PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, n.189, p.26–35, 2007.

PARKA, S. J.; KIMB, D. H.; LEEB, C. M. A study determining the optimal machining conditions for a 40,000 rpm ultra high speed spindle system. **Precision Engineering**, n.36, p.451-457, 2012.

PARO, J.; HÄNNINEN, H.; KAUPPINEN. Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels. **Journal of materials processing technology**, v.119, p.14-20, 2001.

RAMESH, S.; KARUNAMOORTHY, L.; PALANIKUMAR, K. Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5). **Measurement**, n. 45, p.1266-1276, 2012.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1999.

RODRIGUES, A.R. , COELHO,R.T. Influence of the Tool Edge Geometry on Specific Cutting Energy at High-Speed Cutting, **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, v. XXIX, n. 3, p. 279-283, 2007.

RODRIGUES, L. C. A. **Notas de aula da disciplina Métodos Heurísticos**, 2008.

SANKAR, R.S.; ASOKAN, P.; SARAVANAN, R.; KUMANAN, S.; PRABHAHARAN, G. Selection of machining parameters for constrained machining problem using evolutionary computation. **Int J Adv Manuf Technol**, vol. 32, p. 892-901, 2007.



SARAVANAN, R.; ASOKAN, P.; VIJAYAKUMAR, K.. Machining Parameters Optimization for Turning Cylindrical Stock into a Continuous Finished Profile Using Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA). **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, vol. 21, p. 01-09, 2003.

SEBER, G. A. F.; LEE, A. J. **Linear regression analysis**. Second edition. Wiley series in probability and mathematical statistics, 2003.

SEN, M.; SHAN, H. S. Analysis of hole quality characteristics in the electro jet drilling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n.45, p.1706–1716, 2005.

SEVEGNANI, G.; MARTINS, A. A.; BERKENBROCK, T.; RENÓ, G. W. S.; FISCHER, D. A. Sistema de monitoramento de paradas de maquinas em uma linha de usinagem – um estudo de caso. In: **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP**, 2010, São Carlos.

SHAW, M.C., **Metal cutting principles**. New York: Oxford University Press, 2° ed., 432p. 2005.

SHI, Y.; WEIMER, P. J. Response surface analysis of the effects of pH and Dilution rate on ruminococcus flavefaciens FD-1 in cellulose-fed continues Culture. **American Society for Microbiology**, v. 58, n. 8, p.2583-2591, 1992.

SINGH, S.; SHAN, H. S. Development of magneto abrasive flow machining process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n.42, p.953–959, 2002.

STEEL EXPORT. **Fabricação dos aços USS inoxidáveis e resistentes ao calor**. New York: 135p., 1950.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Análise e proposições sobre o balanceamento e uso de excesso de capacidade em recursos produtivos. **Gestão & Produção**, vol. 6, n.3, p.111-126, ago. 1999.

SU, CHAO-TON; CHEN, MU-CHEN. Computer-aided optimization of multi-pass turning operations for continuous forms on CNC lathes. **IIE Transactions**, vol. 31, p. 583-596, 1999.

SULLIVAN, D.O.; COTTERELL, M. Machinability of austenitic stainless steel SS 303. **Journal of materials processing technology**, v.124, p.153-159, 2002.

TAN, F. P; CREESE, R. C. A generalized multi-pass machining model for machining parameter selection in turning. **International Journal of Production Research**, 33 (5), 1467–1487, 1995.

TRENT, E. M; WRIGHT, P. K.; **Metal cutting**. 4th ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

YANG, R. T.; TZENG, C. J.; YANG, Y. K.; HSIEH, M. H. Optimization of wire electrical discharge machining process parameters for cutting tungsten. **Int J Adv Manuf Technol**, n.60, p.135–147, 2012.

WANG, RONG-TSU; LIU, SHIANG-TAI. An economic machining process model with interval parameters. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, vol. 33, p. 900-910, 2007.

WANG, X. ; JAWAHIR, I.S. Web based optimization of milling operations for the selection of cutting conditions using genetic algorithms. **Proc. Inst. Mech. Eng.** 218: 212–223, 2004.

WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability, **Journal of Applied Mechanics – ASMC**, v. 18, n.3, p.293-297, 1951.

WU, V. **Off-line quality control: Japanese quality engineering**. Dearborn, MI: American Supplier Institute, 1982.

WU, C. F.; HAMADA, M. **Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization**. New York: Wiley-Interscience, 2000.

## Apêndice A: Desenho mecânico da peça usinada

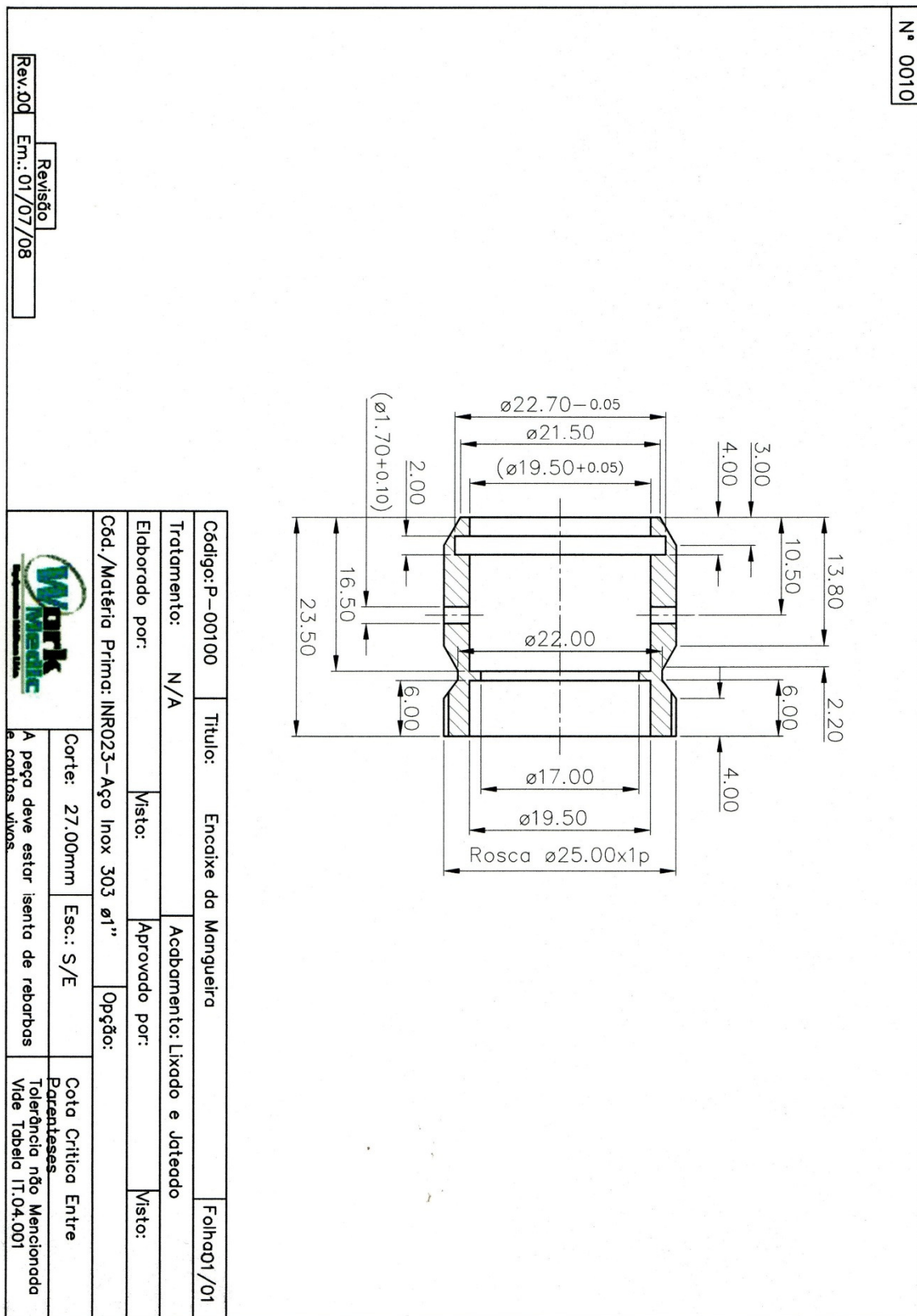


Fig. A.3 – Desenho mecânico da peça usinada

**Apêndice B: Programa CNC da peça usinada**

```
%  
O0001(P0010021)  
M48  
G53X-50Z-150  
T0606M8 (TOR.EXT.-TNMG 160404)  
G96S80M3  
G92S1350  
G0X26.5Z5  
Z0  
G1X-1F.05  
X21.5Z1F1  
Z.05  
X25C1.5F.05  
Z-16.3F.06  
X23.1Z-17.3F.02  
Z-18.5F.03  
X24.9Z-19.4  
G0X25.5  
Z-16.1  
G1X25F.1  
X23Z-17F.02  
Z-18.5  
X24.9Z-19.5  
Z-25F.06  
X26.5F.3  
G53X-50Z-150  
T0303M8 (CORTAR - DGR 3102)  
G96S80M3  
G92S1300M3  
G0X26.5Z5  
Z-26.6  
G1X22.5F.03  
G0X26.5  
Z-25.4  
G1X25.1F.07  
X22.7Z-26.6F.03  
X23  
G0X26.5  
G53X-50Z-150  
M00  
T0202M8 (ROSCA - 16ER A 60)  
G97S1200M3  
G0X26.5Z5  
Z-17.5  
G76P020060Q00R00  
G76X23.8Z-24.5P500Q158F1  
G53X-50Z-150
```

T0404M8 (BROCA INTERCAMBIAVEL)

G97S1300M3

G0X0Z5

Z1

G65P9000Z-26.5W5F.07

G0Z5

G53X-50Z-150

T0707M8 (TMAX MAIOR)

G96S70M3

G92S2000

G0X-19Z5

Z1

G1Z-24F.03

X-18.8

G0Z1

G1Z.05X-21F.2

X-19.5C.6F.05

Z-24

X-18.5

G0Z5

G53X-50Z-150

T1212M8 (CANAL)

G96S50M3

G92S1300

G0X-18.5Z5

Z-4

G1X-22.4F.02

X-19.5F.15

Z-4.3

X-20.1Z-4F.02

X-22.4

X-19.5F.15

Z-3.7

X-20.1Z-4F.02

X-22.4

X-18.5F.2

G0Z5

G53X-50Z-150

T0303M8 (CORTAR - DGR 3102)

G96S80M3

G92S1350M3

G0X26.5Z5

Z-26.6

G1X23.5F.05

G0X26.5

Z-25.4

G1X25.1F.07

X22.7Z-26.6F.03

X19.8

M5

M9  
M24  
G4X1  
G94  
G1Z.1F1500  
G4X1  
M25  
G4X1  
G95  
G0X26.5M8  
Z.3  
G96S70M3  
G92S1350  
G1X-1F.03  
G0Z5  
G53X-50Z-150  
G65P9001A550Q26.5  
/M99  
M9  
M5  
%