

Unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

DANILO TEIXEIRA DE SOUZA

**MELHORIA DA QUALIDADE DE UM PROCESSO DE USINAGEM UTILIZANDO
AS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE TAGUCHI**

Guaratinguetá
2012

DANILO TEIXEIRA DE SOUZA

MELHORIA DA QUALIDADE DE UM PROCESSO DE USINAGEM UTILIZANDO AS
TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE TAGUCHI

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Ricardo Batista Penteadó

Guaratinguetá
2012

S729m Souza, Danilo Teixeira de
Melhoria da qualidade de um processo de usinagem utilizando as técnicas de avaliação de Taguchi / Danilo Teixeira de Souza – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
61 f : il.
Bibliografia: f. 56-61

Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Ricardo Batista Penteado

1. Controle de qualidade 2. Taguchi, Metodo de (Controle de qualidade) 3. Usinagem I. Título

CDU 658.56

**MELHORIA DA QUALIDADE DE UM PROCESSO DE USINAGEM
UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE TAGUCHI**

DANILO TEIXEIRA DE SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA



Prof. Dr. Valério A. P. Salomon

Vice-coordenador

No Exercício da coordenação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. MSc RICARDO BATISTA PENTEADO
Orientador / UNESP – FEG



Prof. MSc FABRÍCIO MACIEL GOMES
UNESP – FEG



Prof. RENANN PEREIRA GAMA
UNESP - FEG

DADOS CURRICULARES

DANILO TEIXEIRA DE SOUZA

NASCIMENTO 09.05.1988 – GUARATINGUETÁ/SP

FILIAÇÃO Dimas Umberto Teixeira de Souza
Célia Maria Pinto de Souza

2007/2012 Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, de modo especial à minha mãe Célia pela dedicação e apoio por todos esses anos e aos meus irmãos.

Muito Obrigado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela conquista de mais um objetivo importante em minha vida;

agradeço a minha mãe pelo amor e dedicação que fizeram com que eu chegasse até aqui e aos meus irmãos Grazielle, Júnior e de modo especial ao meu irmão Diego pela ajuda, companheirismo e incentivo em toda caminhada de minha vida;

ao meu orientador Ricardo Batista Penteado pelo direcionamento, pela dedicação e presteza em me atender, auxiliar e principalmente compartilhar comigo todo o seu conhecimento durante esse ano;

aos meus amigos Juliana Harumi Ishihara, Amanda Trombini e Leandro Ragazzi pelos ótimos momentos de estudo e divertimento dentro e fora da Faculdade, em especial a amiga Juliana com quem pude contar não só na vida acadêmica como também em todos os momentos de minha vida, obrigado por ser minha amiga;

a colega Monique Takenouchi pela contribuição dada na confecção deste trabalho;

e a todas as pessoas que não foram mencionadas acima, mas que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho e principalmente no meu desenvolvimento pessoal.

EPÍGRAFE

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

Charles Chaplin

SOUZA, D.T. **Melhoria da Qualidade de um Processo de Usinagem Utilizando as Técnicas de Avaliação de Taguchi**. 2012. 61f. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A busca pela garantia de entrega de um produto ou serviço com a qualidade esperada pelo cliente, associado a enorme competitividade existente no mercado atual, tem feito com que as organizações enfoquem cada vez mais no planejamento da qualidade utilizando-se de técnicas as quais se direcionam rumo ao processo de melhoria contínua e otimização da produção. Com isso, este trabalho objetiva a melhora de um processo de usinagem por meio das técnicas do planejamento de experimentos para a otimização deste e inclui também a análise do sistema de medição. Para tal, utilizou-se a liga Nimonic 80A, uma superliga a base de níquel, como material do processo visto sua vasta utilização para altas temperaturas, aplicando-se neste estudo o método robusto proposto por Genichi Taguchi, determinando a influência dos fatores considerados como variáveis de entrada, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, tipo de pastilha, lubrificação e dureza do material, na variável resposta rugosidade superficial, concluindo-se com o emprego do arranjo ortogonal L16 de Taguchi e por meio da análise de variâncias ANOVA, que a variável avanço oferece maior efeito de significância sobre a variável resposta estudada, devendo ser ajustada para 0,12mm/rev. Além disso, nota-se ainda que o tipo de pastilha exerce maior influência sobre o processo quando comparado aos demais fatores, sendo a CP250 o tipo de pastilha mais adequado ao processo. Por fim, a interação avanço x velocidade de corte oferece maior nível de significância no processo em relação a variável rugosidade, sendo a melhor combinação de resultados o avanço em 0,12mm/rev para uma velocidade de corte no nível alto de 90m/min. Para avaliar o sistema de medição foi aplicado o método da repetitividade e reprodutibilidade (R&R), por meio do qual se viu que o sistema necessita de melhorias (R&R = 88,04% >>> 30%), pois o valor encontrado no estudo foi bem acima do qual se classifica o sistema como inadequado.

PALAVRAS-CHAVES: Otimização, processo de usinagem, Taguchi, ANOVA, R&R.

SOUZA, D.T. **Machining Process Quality Improvement using Taguchi Assessment Technique**. 2012. 61f. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Delivering to the customers a product or service with the expected quality associated to the huge competitiveness that exists in the market nowadays, has been making organizations increasingly focus on quality planning using techniques which are directed towards the continuous improvement process and production optimization. Thus, this paper aims to improve a machining process using the techniques of experimental design to the optimization and this also includes the analysis of the measurement system. For this purpose, the alloy Nimonic 80A, a nickel base superalloy, was used in the process due to its widespread use for high temperatures, applying this study the robust method proposed by Genichi Taguchi, determining the influence of the factors considered input variables, cutting speed, feed rate, depth of cut, type of tool, lubrication, and material hardness, in the output or response variable, surface roughness, concluding with the use of Taguchi orthogonal array L16 and by analysis of ANOVA that the factor feed rate is significant and offers greater effect on the response variable studied, should be set to 0,12mm/rev. Moreover, the factor type of tool has more influence on the process when compared to other factors, being CP250 the one more suitable to the process. Lastly, the interaction feed rate x cutting speed provides greater significance in the process regarding to surface roughness variable, being the best match between them 0,12mm/rev to the feed rate and 90m/min to the cutting speed. In order to evaluate the measurement system, it was applied the repeatability and reproducibility method (R&R), through which we saw that the system needs improvement ($R \& R = 88.04\% \gg 30\%$) as the value found in the study was well above compared to the one that classifies the system as inappropriate.

KEYWORDS: Optimization, machining process, Taguchi, ANOVA, R&R.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Configuração de um Torno	18
Figura 2: Torno CNC.....	19
Figura 3: Perfil Teórico de Rugosidade de uma Peça Torneada	22
Figura 4: Ilustração da Formação do Cavaco	23
Figura 5: Modelo geral de um processo.	25
Figura 6: Integração entre o conhecimento do processo, a estatística e o bom senso na definição do PE adequado	27
Figura 7: Diagrama dos Parâmetros.	29
Figura 8: Gráfico Linear do Arranjo Ortogonal L4.....	30
Figura 9: Estratégia para o método de Taguchi.....	34
Figura 10: Irregularidades da superfície de um material.....	41
Figura 11: Gráfico Linear de Taguchi para o arranjo L16	43
Figura 12: Torno CNC Romi CENTUR 30S – FEG – UNESP	44
Figura 13: Rugosímetro Mitutoyo SURFTEST-301	45
Figura 14: Efeito dos fatores e suas interações sobre a média R_y	48
Figura 15: Comportamento da Rugosidade em relação ao avanço x velocidade de corte.....	50
Figura 16: Linhas de contorno da Rugosidade em relação ao avanço x velocidade de corte ..	51
Figura 17: Gráfico das medidas coletadas por operador	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Arranjo Ortogonal L4	30
Tabela 2: Exemplo de estrutura de Tabela ANOVA.....	32
Tabela 3: Valor da constante d2	36
Tabela 4: Parâmetros e respectivos níveis para teste.....	40
Tabela 5: Arranjos Ortogonais padrão de Taguchi.....	42
Tabela 6: Arranjo Ortogonal L16 para dois níveis	43
Tabela 7: Resultados para Ry obtidos através do experimento	47
Tabela 8: ANOVA para Ry em relação à média	49
Tabela 9: Medidas de Rugosidade coletadas pelos operadores	52
Tabela 10: Resultados dos estudos de R&R.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação da medição do sistema quanto à R&R	38
Quadro 2: Composição química da superliga Nimonic 80A.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo.....	14
1.1.1 Objetivos específicos	14
1.2 Justificativa	14
1.3 Métodos	15
1.4 Estrutura do Trabalho	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. Processo de Usinagem.....	17
2.1.1 A liga Nimonic 80A	19
2.1.2 Acabamento superficial.....	20
2.1.3 Ferramenta de Corte	22
2.1.4 Mecanismo de formação do cavaco	23
2.1.5 Fluidos de Corte	24
2.2 Planejamento de Experimentos.....	25
2.3 Método de Taguchi	28
2.4 Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R)	34
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1. Material Nimonic 80A	39
3.2. Parâmetros (Variáveis de entrada).....	39
3.3. Parâmetro (Variável de saída).....	40
3.4. Arranjo Ortogonal.....	41
3.5. Processo de Torneamento	44
3.6. Confeção dos dados para o R&R	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1. Resultados do ensaio	47
4.2. Efeito do comportamento da variável resposta Ry em relação à média	48
4.3. Resultados do ensaio para aplicação do R&R	52
5. CONCLUSÃO.....	54
5.1 Considerações Finais	54
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

Segundo Juran (2009), a qualidade tornou-se um pré-requisito para o sucesso das empresas. A qualidade está diretamente relacionada com as necessidades de cada consumidor. Tal termo é geralmente empregado para significar “excelência” de um produto ou serviço, o qual está em conformidade com as exigências dos clientes, tem uma boa relação custo/benefício, possui certo valor agregado, enfim, produtos e/ou serviços com efetividade.

Em busca dessa qualidade final, surgiu a necessidade de melhoria nos processos para que se alcançasse a tão esperada combinação de redução dos custos alinhado a entrega de um produto/serviço com a qualidade esperada pelo cliente.

É partindo desse pensamento que se faz a abordagem deste trabalho, utilizando-se das técnicas de Planejamento de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) que visa à otimização de processos para justamente alcançar a melhor combinação das variáveis de um determinado processo que gerarão um produto final com um menor custo e com a qualidade desejada.

É comum nas indústrias aparecerem problemas em que é preciso investigar várias propriedades ao mesmo tempo. Daí surge a relevância da seguinte questão: “Como investigar o efeito das variáveis e suas interações sobre todas as propriedades em um processo para minimizar o esforço experimental necessário e o custo dos experimentos?”. Usando-se da ferramenta Planejamento de Experimentos, baseada em princípios estatísticos, pode-se extrair do sistema o máximo de informação útil, fazendo-se um número mínimo de experimentos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995).

Ainda segundo Neto, Scarminio e Bruns (1995) o Planejamento de Experimentos permite alcançar diferentes objetivos específicos, tais como a diminuição do tempo de fabricação de um produto, o aumento da produtividade de processos e um bastante interessante que é a minimização a sensibilidade das variações ambientais que ocorrem no ambiente em que acontece o processo, além de outros não citados.

O presente trabalho propõe a utilização das técnicas de planejamento de experimentos na otimização do processo de torneamento da liga a base de níquel Nimonic 80A, material este com excelentes propriedades mecânicas e térmicas, porém com dificuldades em seu processo de usinagem (MARQUES, 2007). Daí a necessidade em dispor-se de um arranjo que contemple da melhor forma os recursos disponíveis para a usinagem deste material tais

como ferramenta de corte e os parâmetros de usinagem para que se possa atender ao cenário atual de qualidade exigido pelos clientes.

É utilizando-se das técnicas estatísticas do DOE, introduzidas pelo Sir Ronald A. Fisher, no começo dos anos da década de 1920 na Inglaterra, que estuda os efeitos de mais de uma variável simultaneamente, que será mostrado a otimização do processo de usinagem da superliga Nimonic 80A, ou seja, a melhor combinação dos fatores pertinentes ao processo que o levarão a qualidade desejada (ROY, 2001).

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo a otimização de um processo de usinagem utilizando-se das técnicas de Planejamento de Experimentos.

1.1.1 Objetivos específicos

Para se chegar ao objetivo do trabalho, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Aplicação do modelo robusto proposto por Taguchi, inserido dentro das técnicas de Planejamento de experimentos, determinando a influência dos fatores estudados na variável resposta, assim como a análise da variância no processo;
- Realizar a análise do sistema de medição utilizando-se do método R&R (Repetitividade e Reprodutibilidade);
- Analisar a viabilidade dos métodos utilizados no processo em questão.

1.2 Justificativa

A garantia de entrega de um produto ou serviço com a qualidade esperada pelo cliente, atrelada a um cenário atual de enorme concorrência, levando ainda em consideração a diminuição dos custos de um processo, faz com que seja necessário o estudo de técnicas que visam otimizar os processos de produção para atender a tais objetivos (RAISSI; FARSANI, 2009).

Rodrigues e Iemma (2005) comentam sobre a deficiência atual em se pensar no desenvolvimento de processos ou produtos sem atrelar a tal desenvolvimento um método científico de trabalho devido ao atual cenário de custos altos e grande competitividade.

Atualmente as superligas, materiais mais resistentes ao desgaste, corrosão e oxidação são os mais procurados. Porém, a mesma composição química desses materiais, com elevado teor de elementos de liga, os quais certificam as excelentes propriedades mecânicas e térmicas dessas superligas, dificultam a realização da usinagem das mesmas, o que torna o processo dispendioso (SILVA; COELHO; CATAI, 2004).

A superliga Nimonic 80A, amplamente utilizada em indústrias automobilísticas, é objeto deste trabalho que busca controlar o processo de torneamento cilíndrico externo (variáveis de entrada) desta liga a base de níquel para obtenção da variável resposta Rugosidade otimizada.

Desses parágrafos geram-se a importância do trabalho em questão visando identificar os fatores que garantem o aperfeiçoamento desse processo de usinagem.

1.3 Métodos

Como procedimento de pesquisa, este estudo pode ser classificado como descritivo quanto aos objetivos, pois se busca descrever as características da qualidade do processo de usinagem da superliga Nimonic 80A com base nas relações entre as variáveis de controle do processo. Quanto à forma, este pode ser classificado como quantitativo e quanto ao procedimento técnico, experimental.

A pesquisa experimental é toda pesquisa que envolve algum tipo de experimento. Considerada como melhor exemplo de pesquisa científica, na pesquisa experimental há um alto nível de controle da situação e sua principal característica é o fato da variável independente ser manipulada pelo pesquisador, evitando-se possíveis equívocos (KERLINGER, 1979). Quanto à natureza, esta pode ser classificada como aplicada.

Primeiramente, foi realizado um estudo bibliográfico em livros, artigos e internet sobre os assuntos de usinagem, superligas, Planejamento de experimentos, método de Taguchi, repetitividade & reprodutibilidade.

A partir disso, utilizando-se também da literatura, foram definidos os parâmetros para análise, ou seja, as variáveis de entrada e saída relevantes para o processo em estudo, determinando-se assim o método de pesquisa como experimental.

Com essas variáveis definidas, foram realizados os ensaios depois de definido através do método de Taguchi o melhor arranjo ortogonal. Os ensaios foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, utilizando-se de um torno CNC, realizando-se as medições de rugosidade e aspectos da ferramenta de corte para as condições avaliadas usando-se uma lupa.

Obtido-se os dados, determinou-se os fatores e seus respectivos níveis com os quais tem-se um processo de usinagem mais adequado em termos de qualidade e custo. Utilizando-se do *software Statistica 8.0*, tabelas e gráficos necessários para análise e conclusão foram demarcados, finalizando-se assim o trabalho.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos, resumidos abaixo:

O capítulo 2 aborda os principais conceitos de usinagem, da ferramenta Planejamento de Experimentos, da técnica de Taguchi e alguns dos conceitos como análise de variância, relação sinal/ruído, arranjo ortogonal, e do estudo de Repetitividade & Reprodutibilidade.

O capítulo 3 descreve a definição dos parâmetros e seus respectivos níveis, a determinação do arranjo ortogonal adequado e de forma sucinta, os ensaios realizados.

Já o capítulo 4 tem como base os resultados obtidos e análises aplicadas, apresentando a possível otimização do processo em questão e também mostrando os resultados do R&R.

Por último, o capítulo 5 mostra as principais conclusões e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda sobre o processo de usinagem e apresenta os principais conceitos dos métodos utilizados no trabalho, os quais são: Planejamento de Experimentos, com enfoque nas técnicas de Taguchi e Repetitividade & Reprodutibilidade.

2.1. Processo de Usinagem

O processo de usinagem corresponde a todo processo mecânico no qual a peça passa por uma remoção de material, denominado cavaco. Na prática, isso significa submeter a peça bruta à ação de uma máquina-ferramenta para ser trabalhada (tornos, fresas, furadeiras, mandriladoras, entre outras) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

O processo de usinagem sofreu uma enorme evolução devido à tecnologia das máquinas de alta precisão, como é o caso das máquinas CNC (comando numérico computadorizado) que chegam a uma precisão de até um micron (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Atualmente, o processo de usinagem se faz presentes em diversas indústrias, como a naval, a aeroespacial, a automotiva, a de eletrodomésticos e a eletrônica.

Para Silva *et al.*(2004), a usinagem pode interferir no custo final do produto, e é com o objetivo de diminuir esses custos que atualmente tem surgido estudos para o processo de usinagem, para otimizá-lo.

Segundo Watanabe *et al.*(2003), diminuir o tempo de usinagem em um processo é uma das maneiras de otimizar a produção. O aumento da velocidade de corte, que é a velocidade em que o material é usinado, faz com que esse tempo de usinagem diminua, porém gera um efeito negativo sobre a vida útil da ferramenta, desgastando-a mais rápido, surgindo a necessidade de sua troca frequente e, por consequência, um aumento do tempo de fabricação do produto. Daí a necessidade de estudar o processo para reduzir esse tempo de usinagem escolhendo a ferramenta correta, utilizando parâmetros de avanço e profundidade coerentes com a máquina-ferramenta, o fluido de corte adequado, para que dessa forma o processo seja realmente otimizado, gerando um resultado final de qualidade, e não perdas em outros aspectos.

Existem muitos tipos de processo de usinagem, destacando-se entre os convencionais os processos de torneamento, fresamento, retificação, roscamento, alargamento,

mandrilamento, serramento, aplainamento, entre outros, sendo o presente estudo voltado para o processo de torneamento, definido como sendo um processo de usinagem onde se utiliza uma ferramenta cortante para se obter determinadas superfícies, no qual a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente. A trajetória da ferramenta pode ser retilínea (a trajetória da ferramenta se dá em linha reta) ou curvilínea (a trajetória da ferramenta pode ser cilíndrica, cônica, radial ou de perfilamento) (AMORIM, 2002).

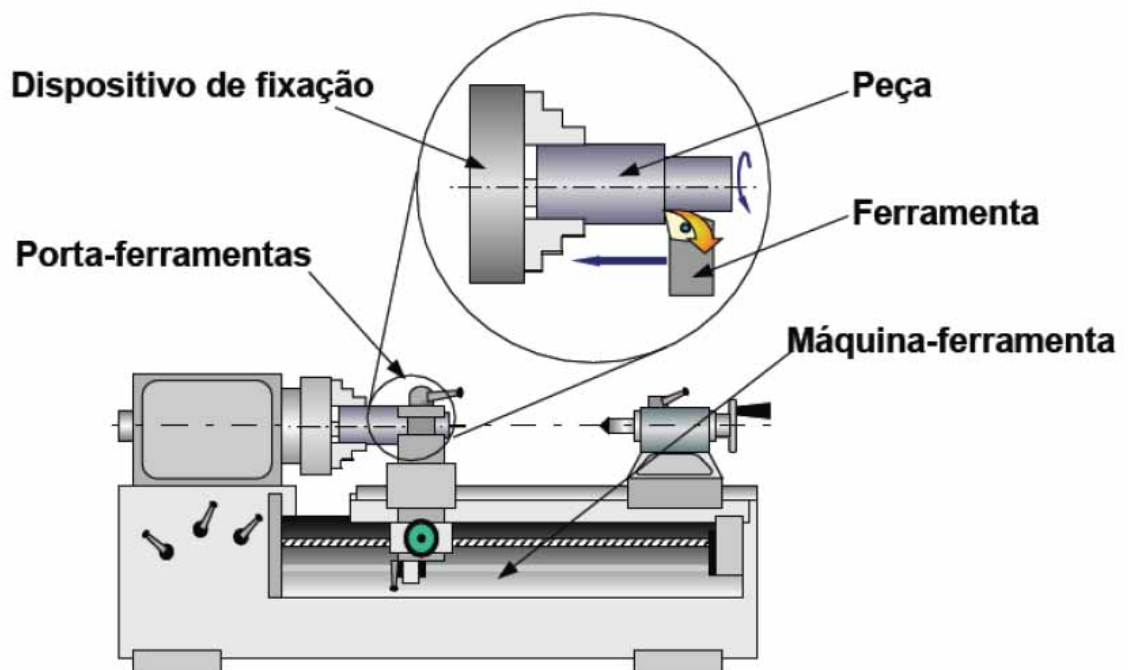


Figura 1: Configuração de um Torno (AMORIM, 2002)

Para o estudo aqui apresentado, o processo de torneamento cilíndrico utilizando um torno de Comandos Numéricos Computadorizados (CNC) foi empregado.

A máquina-ferramenta torno CNC executa o processo de usinagem através dos comandos numéricos computadorizados os quais se utilizam de coordenadas vertical (coordenadas X = eixo que determina o diâmetro da peça) e longitudinal (coordenadas Z = eixo que determina o comprimento da peça) para executar os movimentos de corte. Possui grande vantagem em relação ao torno mecânico em termos de acabamento superficial e tempo de produção. A Figura 2 retrata um torno CNC.



Figura 2: Torno CNC (Google imagens)

2.1.1 A liga Nimonic 80A

No cenário atual, existe um aumento na procura por ligas refratárias devido a sua maior resistência ao desgaste, à corrosão e a oxidação. As superligas, como são definidas, são ligas de alto desempenho que além da resistência à corrosão, oxidação e ao desgaste, apresentam também elevada resistência mecânica, resistência à fluência a altas temperaturas e boa estabilidade superficial (FARIA, 2007).

A liga Nimonic 80A é uma superliga a base de níquel (mais de 50% da composição química), Crômio (cerca de 20%), e outros elementos em composições menores como o Titânio, o Alumínio, entre outros. Sua aplicação se dá principalmente em componentes de turbinas a gás, embora como parte da família das superligas também se faz presente nas indústrias aeronáutica, marítima, química e petroquímica, sempre em componentes que trabalham a altas temperaturas (KIM *et al.*, 2001).

A família Nimonic de ligas foi desenvolvida pela primeira vez em 1940, em paletas de turbinas, devido a sua grande resistência à oxidação e resistência mecânica. Justamente, devido a tal resistência, a usinabilidade desse material, que é definida como o grau de dificuldade de remoção de material para uma peça, faz-se de difícil execução (FARIA, 2007).

Segundo Witting (2002), o Nimonic 80A é uma liga não temperável, com um nível percentual de usinabilidade de apenas 18%, ou seja, uma liga de difícil usinabilidade, o que encarece o processo de usinagem para esse material.

Dentre os principais fatores determinantes para a usinabilidade dos metais estão as características da ferramenta de corte e do material da peça (composição química, microestrutura, propriedades físicas, químicas e mecânicas), que leva a dificuldade de execução desse processo para estas ligas devido à sua elevada resistência e dureza a quente, a matriz austenítica presente na liga de níquel que promove um rápido endurecimento do material, a presença de carbeto duros e abrasivos na microestrutura dessas ligas e a sua baixa condutividade térmica que leva a temperatura de corte a aproximadamente 1000°C, dentre outras (FERRARESI, 1924; EZUGWU *et al.*, 2003).

Diversos métodos são propostos para a medição do índice de usinabilidade de um material. O chamado ensaio de longa duração, onde se obtém a velocidade de corte para uma determinada vida da ferramenta através da usinagem do material ensaiado e do material padrão é o método mais aceito. Por fim, o índice de usinabilidade (I.U.) é dado pela relação entre a velocidade de corte (V_c) do material ensaiado pela velocidade de corte (V_c) do material padrão, conforme a equação (1) abaixo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

$$I.U. = \frac{V_c_{(\text{material ensaiado})}}{V_c_{(\text{material padrão})}} \quad (1)$$

Devido a sua relação com a vida útil da ferramenta, formação de cavaco, e qualidade superficial da peça, a usinabilidade, tem grande influência sobre a produtividade e o custo final de produção, por isso a necessidade de estudos que aperfeiçoem processos como o tal (FARIA, 2007).

2.1.2 Acabamento superficial

Primeiramente, vale detalhar a definição de três importantes grandezas do processo de usinagem: a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), a velocidade de corte (V_c) pode ser determinada, tanto para a operação de torneamento como também para as operações de fresamento ou furação, nas quais os movimentos de corte e de avanço ocorrem simultaneamente, como a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da

ferramenta em torno da peça. Já o avanço (f) é definido como o percurso de avanço em cada volta (é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta de corte da ferramenta sobre a peça, segundo a direção do avanço) ou em cada curso da ferramenta. Por último, a profundidade de corte (a_p) é a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho numa direção perpendicular à este.

As superfícies das peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes, as quais são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça.

O acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, resistência à fadiga, atrito, escoamento de fluidos, corrosão, transmissão de calor. A importância desse estudo aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas. O acabamento superficial é medido através da rugosidade superficial (Ra) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Para dar acabamento adequado às superfícies é necessário determinar o nível em que elas devem ser usinadas, ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade.

Os fatores que influenciam na rugosidade da peça são basicamente o avanço e o raio de ponta da ferramenta que seguem a relação mostrada pela equação abaixo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

$$R_{\text{maxteor}} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2)$$

Onde:

R_{maxteor} = Rugosidade;

f = avanço;

r_ϵ = raio de ponta.

Este valor é apenas teórico, normalmente a rugosidade real obtida é bem maior devido a fatores como a vibração da ferramenta que ocorre devido ao atrito da área de contato da ferramenta com a peça, a deformação do cavaco, entre outros não presentes na equação acima (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

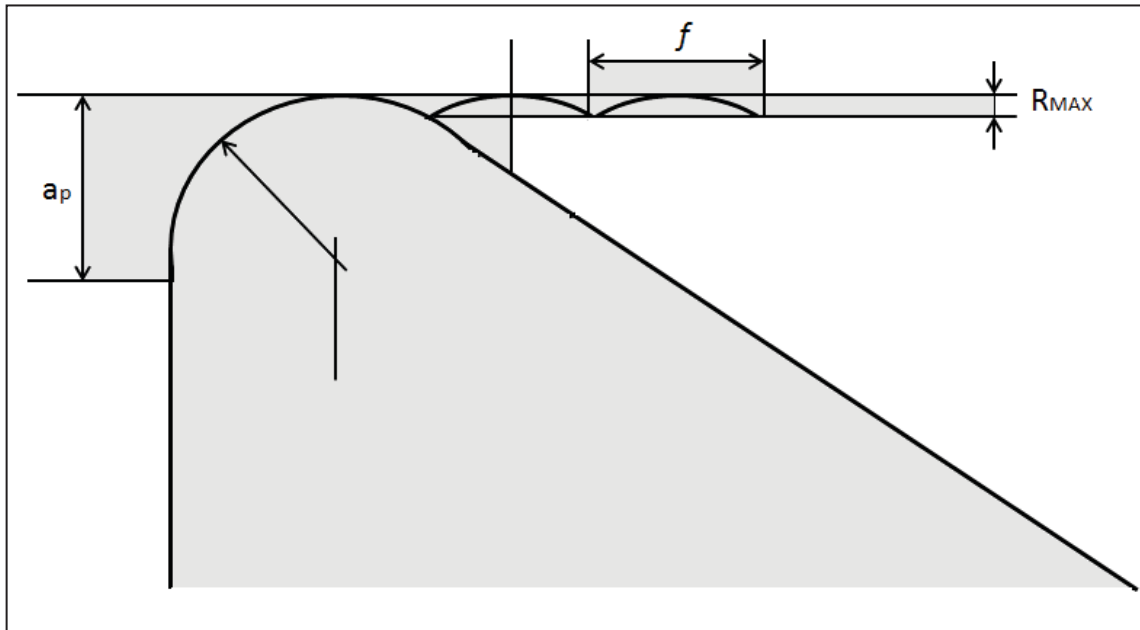


Figura 3: Perfil Teórico de Rugosidade de uma Peça Torneada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001)

2.1.3 Ferramenta de Corte

A maioria dos processos de torneamento faz uso de ferramentas simples, as quais tem basicamente forma semelhante, composta de uma parte cortante e de uma haste para fixação.

O desgaste da ferramenta de corte no processo de usinagem que leva a necessidade de troca da mesma, e por consequência encarece o processo, além de aumentar o tempo para que este seja completo, deve ser uma preocupação dentro desta análise.

O desgaste que compromete a vida útil da ferramenta é influenciado principalmente, em ordem decrescente, pela velocidade de corte, depois pelo avanço e então pela profundidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Durante a execução da atividade de usinagem, o calor que é gerado por este processo aumenta, porém a área da ferramenta que recebe esse aumento de energia continua a mesma, por isso o parâmetro velocidade de corte, responsável por esse calor gerado, é o que influencia mais no processo de desgaste da ferramenta. Em relação ao avanço, este também gera um aumento na quantidade de calor, todavia ele também aumenta a área da ferramenta que recebe este calor, influenciando menos na vida útil da ferramenta quando comparado à velocidade, pois tem uma área maior para dissipar o calor que gera. Já a influência da profundidade de corte é a menor entre os três parâmetros porque a medida que aumenta ela

não altera nem a velocidade de retirada do cavaco e nem a energia destinada ao corte por unidade de área, apenas aumenta o volume de material removido através da utilização de uma porção maior da aresta de corte da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

As superligas à base de níquel têm alta compatibilidade química com muitos materiais de ferramenta. Com isso, formam uma camada de aderência conduzindo aos mecanismos de difusão, fortemente dependente da temperatura, que leva a degradação da ferramenta, levando a um desgaste rápido desta quando se utiliza velocidade de corte alta na usinagem das ligas a base de níquel (CHOUDHURY; BARADIE, 1998).

2.1.4 Mecanismo de formação do cavaco

O desgaste da ferramenta, o calor gerado na usinagem, os esforços de corte, entre outros fatores que influenciam na perda de qualidade do processo, são influenciados pela formação do cavaco, definido como a porção de material removido da peça pela ação da ferramenta, caracterizado por apresentar forma irregular.

Portanto, estão envolvidos aspectos econômicos, de qualidade da peça, de utilização correta da máquina-ferramenta e de segurança do operador no processo de formação do cavaco na usinagem dos materiais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

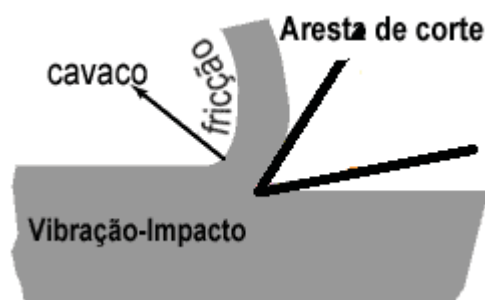


Figura 4: Ilustração da Formação do Cavaco (Adaptado de: Google imagens)

Todo calor gerado pela energia mecânica da formação do cavaco, associado ao atrito do cavaco com a ferramenta e ao atrito da ferramenta com a peça contribui nesse processo de perda de qualidade da usinagem. A quantidade de calor dissipado pelo cavaco aumenta com o aumento da velocidade do processo, no qual a maior parte do calor é carregado pelo cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

A formação do cavaco esta diretamente ligada ao comprimento de corte (L_c). Tal relação pode ser facilmente exposta associando-se o conceito de comprimento de corte à quantidade de cavaco expressa em comprimento.

$$L_c = \frac{L_f \pi D}{f 1000} \quad (3)$$

Onde:

L_c = Comprimento de corte (mm);

L_f = Comprimento de avanço (mm);

D = Diâmetro (mm);

f = Avanço (mm/volta).

O comprimento de corte está associado à vida útil da ferramenta. Maximizar o comprimento de corte, trabalhando-se com os parâmetros da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, no intuito de diminuir a temperatura do processo de usinagem, ajuda na obtenção de uma melhor produtividade.

2.1.5 Fluidos de Corte

Devido as suas excelentes propriedades físicas e químicas, incluindo principalmente a alta dureza a temperaturas elevadas, as ligas a base de níquel apresentam uma usinabilidade ruim (EZUGWU *et al.*, 2003).

Ezugwu *et al.* (2003) fala que a dificuldade de usinagem das ligas de níquel pressupõe uma forte tensão térmica e mecânica à aresta de corte da ferramenta, levando à deformações plásticas (quando a tensão não é mais proporcional à deformação, ocorrendo então uma deformação não recuperável e permanente) e acelerados desgastes da ferramenta.

Com a presença de altas temperaturas em condições de alta velocidade de corte, a usinagem dessas superligas a base de níquel devem ser executadas por ferramentas de corte com adequada dureza a quente (FARIA, 2007).

Uma maneira de se aumentar o impacto da usinagem das ligas de níquel na preservação da vida da ferramenta é utilizar fluidos de corte, lubrificantes e refrigerantes, os quais agem na redução do calor gerado no processo. Porém, há alguns anos, por questões de sustentabilidade e econômicas, dentre outras, o uso desses fluidos foi restringido ao máximo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Para Mason (2001), o ideal seria utilizar uma quantidade mínima de fluido (MQF) suficiente para lubrificar e refrigerar a peça e a ferramenta e garantir um bom resultado de corte, não existindo um posterior problema quanto ao descarte do líquido refrigerante/lubrificante devido à baixa quantidade usada.

No caso das ligas de difícil usinagem, como é o caso do Nimonic 80A, o efeito de tais fluidos de corte é mais restrito por causa da alta temperatura gerada no processo de usinagem com estes tipos de materiais, que faz com que o fluido evapore rapidamente, não permitindo o seu acesso na interface cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Devido a isto, existe apenas a formação de uma camada fina de óleo que reduz o atrito no processo, diminuindo a temperatura da região de corte, já explicitando então a importância da utilização do fluido de corte (FARIA, 2007).

2.2 Planejamento de Experimentos

Quando se trata de estatística, logo as pessoas a associam a uma grande quantidade de informações, sejam elas, números, tabelas, percentagens. Porém, a análise destas informações é apenas uma parte da estatística. “Tão ou mais importante que ela é o planejamento dos experimentos que fornecerão os dados a serem posteriormente analisados” (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995, P.21).

Segundo Montgomery (2005), um experimento nada mais é do que uma serie de testes em que as variáveis de entrada de um processo sofrem mudanças propositalis que refletem nas variáveis respostas (Figura 1) das quais se tiram conclusões sobre quais variáveis de entrada e suas possíveis interações provocaram mudanças nestas variáveis respostas do processo.



Figura 5: Modelo geral de um processo. (Adaptado de: NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995)

Em geral, um experimento estuda o desempenho de um processo ou sistema. Um processo pode ser visto como uma combinação de recursos (geralmente materiais) como máquinas, métodos, pessoas, denominados como as “entradas” do processo, que resultam nas chamadas “saídas” desse mesmo processo, que podemos considerar o produto final ou o serviço oferecido os quais possuem as variáveis respostas para as quais se deseja a melhor combinação de resultados conseguidos através do controle dos fatores de entrada, obtendo por fim a maior qualidade possível no que está sendo produzido pelo processo (MONTGOMERY, 2005).

Para Neto *et al.*(1995), o planejamento de experimentos deve seguir primeiramente duas ações:

- Determinar quais os fatores e as respostas, ou seja, as variáveis de entrada e saída, do processo em estudo;
- Definir claramente qual o objetivo esperado com os testes, pois este determinará o tipo de planejamento experimental que deve ser utilizado.

Já Montgomery (2005) definiu sete passos que servem como um guia para o planejamento de experimentos, listados abaixo:

- 1- Definir os objetivos do estudo: primeiramente é importante definir o problema do produto e/ou processo. Recomendam-se sessões de *brainstorming*;
- 2- Verificar os parâmetros do experimento: listar os fatores de controle, ruído e as variáveis respostas no estudo;
- 3- Escolher os fatores, níveis e alcance: selecionar os fatores de controle (variáveis independentes), o número de níveis e as variáveis respostas (dependentes);
- 4- Escolher a matriz experimental: de acordo com o número de réplicas e corridas, considerando-se as possíveis restrições dos testes e as interações que possam ocorrer entre os fatores avaliados;
- 5- Executar o experimento: nesta etapa é importante o acompanhamento pela equipe ou responsável pelo estudo para assegurar a execução correta do procedimento além de registrar possíveis alterações no plano dos ensaios que deverão ser relatadas no final;
- 6- Fazer a análise estatística dos dados: utilizar de *softwares* estatísticos ajuda na análise dos dados obtendo-se diferentes formas de respostas que vão desde números até gráficos que melhoram a percepção dos resultados finais e ajudam na tomada de decisão;
- 7- Levantar as conclusões: extrair as conclusões dos resultados e recomendar as ações de melhoria contínua do processo são as principais tarefas desta etapa.

Tem-se por definição que a estatística é a “ciência que planeja e otimiza experimentos, orientando a sua condução, descrevendo e analisando suas respostas, retirando destas o maior número de informações possíveis” (RODRIGUES; IEMMA, 2005, P.7). O Planejamento fatorial juntamente com a análise das superfícies de resposta tem como base a teoria estatística. No entanto, para que este método seja utilizado de forma eficiente, torna-se necessário o entrosamento entre o processo, a estatística e o bom senso tanto da equipe que realiza os experimentos quanto da equipe que executa a análise dos resultados, ou seja, a interação dos três itens citados torna os resultados confiáveis, possibilitando por fim, uma tomada de decisão adequada para se melhorar o desempenho de um processo (RODRIGUES; IEMMA, 2005).

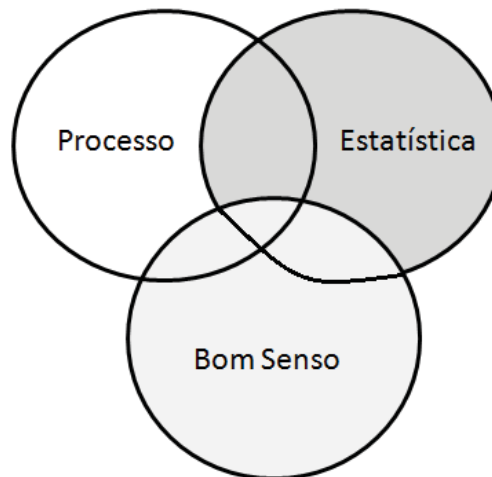


Figura 6: Integração entre o conhecimento do processo, a estatística e o bom senso na definição do PE adequado. (RODRIGUES; IEMMA, 2005)

Em suma, o método planejamento de experimentos, possui como principais vantagens a redução do número de experiências ou repetições e melhora na qualidade do resultado e permite a otimização das respostas, podendo maximizar variáveis, como a produtividade e minimizar outras, por exemplo, o custo (RODRIGUES; IEMMA, 2005). A escolha adequada do arranjo experimental é o fator chave da utilização do planejamento de experimentos, em que o fatorial completo está entre os mais usados, para o qual se tem que o número de experimentos é igual a n^k , sendo n a quantidade de níveis dos fatores e k a quantidade de fatores (MATTOS, 2004).

2.3 Método de Taguchi

Logo após a Segunda Guerra Mundial, Genichi Taguchi, cientista japonês, envolveu-se com o desenvolvimento de um método de melhoria de qualidade que mais tarde seria adotado por muitas empresas como Toyota, Fuji Film, entre outras, método este reconhecido mundialmente como o método de Taguchi, que fez as técnicas de planejamento de experimentos mais aplicáveis (ROY, 2001).

Ainda segundo Roy (2001), Taguchi aperfeiçoou as técnicas do planejamento de experimentos criando um padrão de aplicação deste método e mostrando as empresas as quais dava consultoria, o quanto elas economizavam em termos de dinheiro além de melhorar a qualidade de seus produtos.

Focada no objetivo da experimentação de encontrar a condição operacional em que a variável resposta de interesse é otimizada, faz-se necessário concentrar no processo a mais alta redução da variabilidade possível, qualificada por Taguchi como robustez do processo, definida como sendo a pouca variação do produto ou processo frente às variações de fatores de difícil controle, os chamados ruídos (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Taguchi dividiu as estratégias da engenharia de qualidade em três fases: Projeto do sistema, projeto dos parâmetros e projeto da tolerância. Para o projeto do sistema, deve-se determinar as configurações do produto ou processo para garantir um bom resultado. Para a fase de projetos dos parâmetros, aplica-se o que se tem por conhecimento como método de Taguchi, usado para melhorar o desenvolvimento do processo por meio do ajuste dos níveis dos fatores, controlando-se os ruídos para obter um produto final de maior qualidade o diminuir os custos de produção, e por último, para o projeto da tolerância, o objetivo é determinar um limite para o qual as características dos níveis dos fatores mantêm a variabilidade do processo “aceitável”, ou seja, dentro do esperado pelos clientes e para as empresas em termos de custo (ROY, 2001; WERKEMA & AGUIAR, 1996).

Ressalta-se que a segunda fase citada acima, de projeto dos parâmetros, pode ser considerada a fase mais importante, visto que as características da qualidade do produto ou processo otimizado, a resposta considerada para o propósito do experimento em questão, é encontrada nesta fase, sendo ainda determinado nesta mesma fase, os parâmetros que podem influenciar nessas características de qualidade, os quais são classificados como fatores de sinal (valores pretendidos para a resposta a ser otimizada), ruído (parâmetros que não podem ser controlados no processo, que causam desvio da resposta da meta especificada, levando a

perda de qualidade) e controle (fatores especificados pelo time que faz os experimentos e seus respectivos níveis).

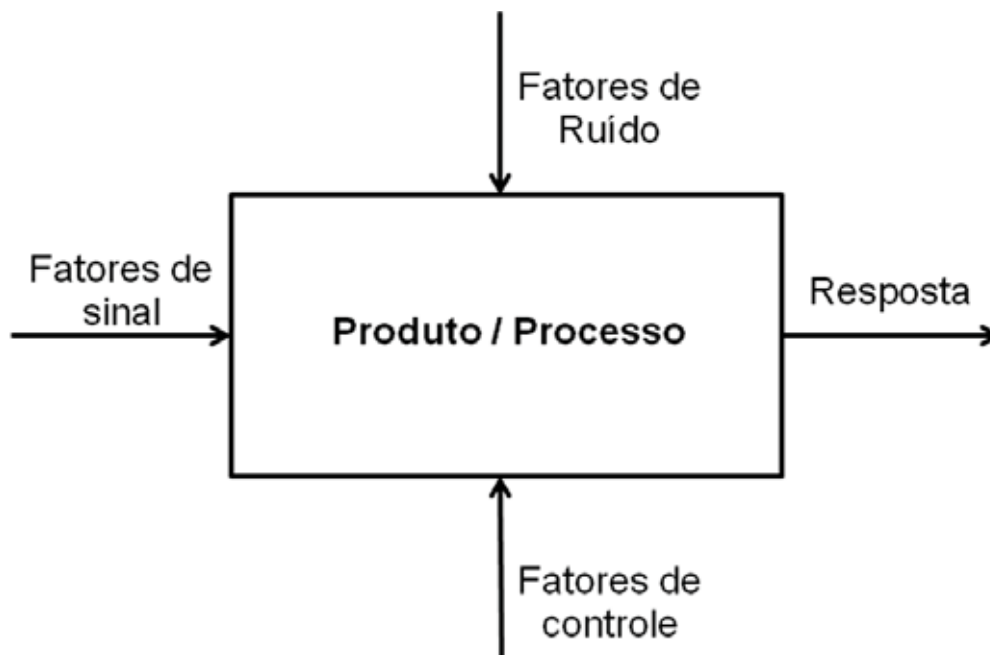


Figura 7: Diagrama dos Parâmetros. (Adaptado de < <http://www.eps.ufsc.br/teses98/glaucia/cap3.html>> Acessado em 23 Abr. 2012)

O modelo proposto por Taguchi, inserido dentro das técnicas de planejamento de experimentos, é útil na redução do número de experimentos necessários utilizando, para isso, matrizes ortogonais, das quais se extrai o máximo de informações possíveis através de um número mínimo de experimentos realizados, sendo este um modelo que gera informações suficientes para a otimização de um problema (ASILTURK, AKKUS, 2011).

Um arranjo ou matriz ortogonal é uma matriz bidimensional construída com propriedades matemáticas especiais, de maneira tal que a escolha de um par qualquer de colunas no arranjo fornece todos os pares de combinação de cada número do arranjo.

De maneira geral, Xiansheng *et al.*(2011) coloca em suas definições que a matriz ortogonal admite analisar os dados de forma eficiente devido ao fato de ser construída para permitir uma avaliação matemática independente da influência de cada um dos fatores no processo.

O registro mais antigo da matemática dos arranjos ortogonais data de 1897, por Jacques Hadamard, matemático francês. De fato, a exploração desse artifício matemático, deu-se apenas a partir da Segunda Guerra Mundial, com o emprego do conceito de projeto saturado pelos estatísticos ingleses Plackett e Burman (ROSS, 1991).

Basicamente, a partir do problema em estudo, uma vez identificado o número de fatores que se deseja investigar, os respectivos níveis e a quantidade de experimentos que se pretende executar, levando em consideração tempo e custo, escolhe-se o arranjo ortogonal de Taguchi que melhor se ajusta as características de tal problema (SENTHILKUMAR *et. al.*, 2010).

Os arranjos ortogonais seguem o seguinte modelo de divisão: L4, L8, L12, L16 e L32, quando se tem dois níveis para os fatores em questão e L9, L18, L27 para três níveis, sendo que o número que acompanha a designação do arranjo determina a quantidade de experimentos necessários, ou seja, L4 possui 4 ensaios (ROY, 2001).

Tabela 1: Arranjo Ortogonal L4

Ensaio	Colunas		
	1(A)	2(B)	3(AxB)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

De acordo com Ross (1991), uma vez selecionada a matriz ortogonal, os fatores e interações são atribuídos às colunas da matriz.

Seguindo o exemplo da Tabela 1, nota-se que dentro dos limites de uma determinada coluna, por exemplo, a do fator A, o número de níveis presentes é igual, ou seja, nesta coluna existem dois 1's e dois 2's. Além disso, os números seguem uma certa ordem, não sendo distribuídos aleatoriamente, sendo este o significado de ortogonalidade quando trata-se de arranjos, significando um equilíbrio presente na matriz (ROY, 2001).

Pode-se ainda ilustrar a influência de cada fator e a interação dos mesmos no problema por meio dos gráficos lineares desenvolvidos por Taguchi, em que para o exemplo do arranjo ortogonal L4, os pontos representam as colunas referentes a cada fator com dois níveis e a linha que os interliga representa a coluna de interação entre eles (ROSS, 1991).



Figura 8: Gráfico Linear do Arranjo Ortogonal L4 (ROSS, 1991)

Para que os fatores estudados sejam aperfeiçoados, faz-se necessário contemplar também no estudo a identificação dos valores que minimizam a perda esperada. Tal perda, relacionada à variação existente no processo que provoca, por consequência, variações no desempenho do produto, é denominada relação sinal/ruído (S/R). As fontes de ruído podem ser variações nas condições ambientais, tais como variação de temperatura, umidade, entre outras, assim como variações no uso do produto como imperfeições de fabricação, provocados pelo homem, levando os valores esperados a se desviar dos valores nominais dos parâmetros (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Foram desenvolvidas por Taguchi mais de setenta relações sinal/ruído, porém três destas podem ser utilizadas para um grande número de características de desempenho, as quais são mostradas abaixo:

- Menor é melhor

$$S/R = -10\log(1/r \sum_{i=1}^r y_i^2) \quad (4)$$

- Nominal é melhor

$$S/R = -10\log(\bar{y}/s^2) \quad (5)$$

- Maior é melhor

$$S/R = -10\log(1/r \sum_{i=1}^r 1/y_i^2) \quad (6)$$

Onde:

r = número de repetições no ensaio;

\bar{y} = média das observações;

s^2 = variância das observações.

A relação sinal/ruído tem o objetivo de identificar os valores que minimizam a perda esperada, o que implica na sua maximização, ou seja, quanto maior a relação S/R, melhores os níveis de controle ou parâmetros do processo, resultando no mínimo de variação da qualidade (ANTONY *et al.*, 2006; WERKEMA & AGUIAR, 1996).

Com o objetivo de complementar a resposta do estudo, obtendo-se a melhor combinação dos parâmetros, toda essa análise de efeito dos fatores é realizada através da análise de variância (ANOVA), que verifica se existe uma diferença significativa entre as

médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente, identificando quais fatores são os principais responsáveis pela variação da relação sinal/ruído.

A ANOVA é uma ferramenta estatística que auxilia na tomada de decisão, que verifica a significância das variáveis experimentadas (ROSS, 1991).

Basicamente, aplica-se o teste da distribuição “F” de Snedecor-Fisher para analisar cada fator. A distribuição “F” de Snedecor é uma ferramenta estatística que auxilia na determinação dos fatores que são significantes no processo, através da comparação da variância “dentro” dos tratamentos com a variância obtida “entre” estes. Se a razão do fator do experimento é muito maior que o valor padrão do “F” de Snedecor, logo o fator correspondente exerce efeito significativo no processo (RIBEIRO, 2008).

A Tabela 2 ilustra todos os valores necessários para que se chegue ao valor final de “F” de Snedecor utilizado para comparação e posterior análise do processo.

Tabela 2: Exemplo de estrutura de Tabela ANOVA (Adaptada de MATTOS, 2004)

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio(QM)	F
Fator A	SQ_A	$a - 1$	SQ_A / gl_A	QM_A / QM_{ERRO}
Fator B	SQ_B	$b - 1$	SQ_B / gl_B	QM_B / QM_{ERRO}
Interação AB	SQ_{AB}	$(a - 1) (b - 1)$	SQ_{AB} / gl_{AB}	QM_{AB} / QM_{ERRO}
Erro	SQ_{ERRO}	$ab(n - 1)$	SQ_{ERRO} / gl_{ERRO}	
Total	SQ_{Total}	$abn - 1$		

Desta forma, pode-se generalizar SQ_A , SQ_B e SQ_{AB} pela equação 7 (ZHOU *et al.*,2010):

$$SQ_p = t \cdot \sum_{i=1}^q (E_{p,i} - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

Onde:

p = fatores / interações;

t = número de repetições da variável resposta para cada nível dos fatores do arranjo ortogonal;

q = número de níveis de cada fator

$E_{p,i}$ = efeito dos fatores para cada nível i a ser estudado.

Para o SQ_{ERRO} , a equação 8 abaixo mostra que este é representado pela soma dos quadrados devido ao erro que provém do experimento:

$$SQ_{ERRO} = \sum_{i=1}^q (\bar{y}_i - \bar{Y})^2 - \sum_{j=1}^k SQ_p \quad (8)$$

Onde:

\bar{y}_i = média das respostas para cada condição experimental;

j = número mínimo de fatores a serem analisados;

k = número máximo de fatores e interações a serem analisados.

Já o SQ_{Total} é representado pela soma dos Quadrados Total de cada fator do experimento e interações entre os fatores, segundo a equação 9 abaixo:

$$SQ_{TOTAL} = \sum_{j=1}^k SQ_p + SQ_{ERRO} \quad (9)$$

O valor padrão de F de Snedecor ou $F_{crítico}$, comparado com o valor encontrado na ANOVA leva em consideração o nível de confiança, o grau de liberdade associado a fonte de variação e o grau de liberdade associado ao erro. Por meio destes três aspectos, determina-se o valor de $F_{crítico}$ na tabela de Snedecor-Fisher. Vale ressaltar que se o valor de F encontrado na ANOVA for maior que o $F_{crítico}$, o fator ou interação de fatores correspondente exerce influência na variável resposta, do contrário, o fator ou interação de fatores correspondente ao F obtido na ANOVA que é menor que o $F_{crítico}$ não tem significância no processo, não exercendo influência alguma sobre o mesmo do ponto de vista da otimização deste (ROSS, 1991). A partir desta definição, define-se o valor- p , estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses, cujos fatores/interações com valor- p menor que 0,05 causam efeitos significativos na variável resposta (MATTOS, 2004).

Portanto, o método proposto por Genichi Taguchi é baseado na análise da variância (ANOVA), envolvendo o conceito de Sinal/Ruído e escolha do arranjo ortogonal adequado para delineamento do experimento. Trata-se do modelo robusto de Taguchi que faz com que as empresas aumentem a qualidade de seus produtos e processos, tornando-se competitivas no mercado. A Figura 9 trata da estratégia para o método proposto.

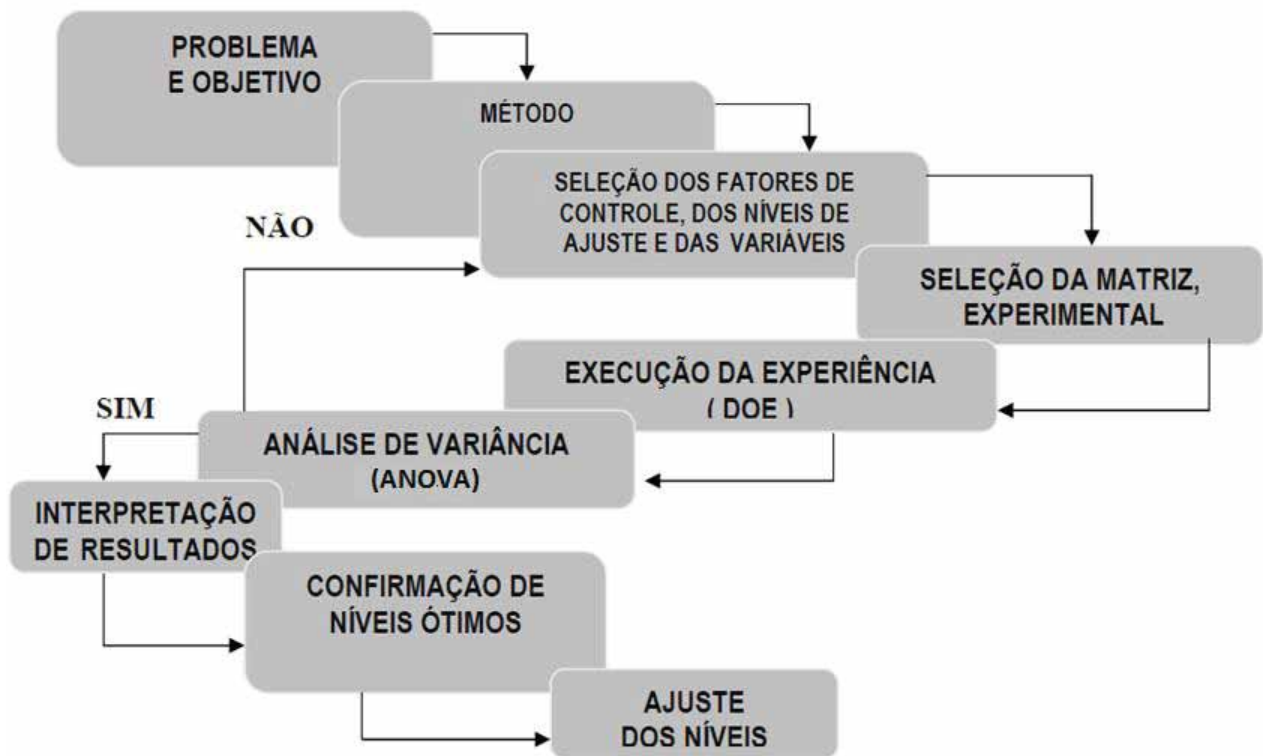


Figura 9: Estratégia para o método de Taguchi (CORREA; CARDOZA, 2004)

Em suma, determinar os parâmetros de projeto necessários para o produto ou processo e seus respectivos níveis, executar as experiências, analisar os resultados por meio da razão sinal-ruído e análise de variância para determinar as condições de melhor ajuste e, por fim, a realização de um teste de confirmação com as melhores condições depois de ajustados os níveis, são as principais etapas do método de Taguchi (SENTHILKUMAR *et al*, 2010).

É importante destacar as novas idéias da engenharia de qualidade introduzidas por Taguchi, dentre as quais a obtenção de produtos e processos “centrados no valor alvo” no lugar de “valor dentro da especificação”, por meio dos experimentos planejados que levam a menor variabilidade (produtos robustos) dos resultados finais, tornando as empresas eficientes para que alcancem posições de liderança (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

2.4 Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R)

A Repetitividade pode ser definida como sendo os graus de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições: método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e em intervalo de tempo curto entre medições. A Repetitividade pode ser expressa

quantitativamente em termos da dispersão dos resultados. Já a Reprodutibilidade mede o grau de concordância entre os resultados das medições de uma mesma grandeza, onde as medições individuais são efetuadas variando-se uma ou mais das seguintes condições: método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e tempo. Para que uma expressão de reprodutibilidade seja obtida é necessário especificar as condições que foram alteradas. A Repetitividade e a Reprodutibilidade são fatores indispensáveis à garantia de resultados confiáveis. Daí a importância da utilização deste método para fazer a análise do sistema de medição dos experimentos que serão realizados para o estudo deste trabalho, verificando-se a qualidade dos dados utilizados (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005).

Para Costa, Epprecht e Carpinetti (2005), todos os processos produzem erros e incertezas. Tais parâmetros ocorrem porque existe uma variabilidade real acoplada às características medidas no processo, o qual é influenciado por causas aleatórias e causas especiais. A variância total do sistema também engloba a variância de medição, a qual é causada geralmente pela falta de calibração do equipamento e pelas condições de medição utilizadas. Portanto, a equação 10 define a variância total do sistema.

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{processo}}^2 + \sigma_{\text{medição}}^2 \quad (10)$$

A variância atribuída ao erro se divide em duas parcelas denominadas variância de repetitividade e variância de reprodutibilidade, conforme a equação 11.

$$\sigma_{\text{medição}}^2 = \sigma_{\text{repetitividade}}^2 + \sigma_{\text{reprodutibilidade}}^2 \quad (11)$$

A repetitividade consiste em, através do mesmo equipamento de medição e método, medir repetidamente uma mesma grandeza de um único corpo de prova com o intuito de fornecer indicações muito próximas dos valores do que se está medindo. O cálculo da variância da repetitividade é estimado pela equação abaixo (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005).

$$\sigma_{\text{repetitividade}} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (12)$$

Onde:

\bar{R} = média das diversas amplitudes calculadas para cada conjunto de medidas de um mesmo corpo de prova;

d_2 = número de medidas repetidas para cada corpo de prova, retirado da Tabela 3, entrando com o valor “n” referente ao tamanho da amostra.

Tabela 3: Valor da constante d_2 (Adaptado: COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005)

N	d_2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534
7	2,704
8	2,847
9	2,970
10	3,078
11	3,173
12	3,258
13	3,336
14	3,407
15	3,472

Se mais de um operador realizar a medição, aplica-se a equação 13 para se calcular a variância da repetitividade (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005).

$$\sigma_{\text{repetitividade}} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (13)$$

Onde:

\bar{R} = média aritmética da média das amplitudes \bar{R} de todos os operadores que realizaram as medições.

A reprodutibilidade consiste na variação das médias obtidas por diferentes operadores utilizando o mesmo equipamento de medição para medir repetidamente uma mesma grandeza de um corpo de prova com o intuito de gerar concordância dos resultados obtidos por meio de tais medições. O cálculo da variância da reprodutibilidade é estimado pela equação abaixo (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005).

$$\sigma_{\text{reprodutibilidade}} = \sqrt{\left(\frac{R_{\bar{X}}}{d_2}\right)^2 - \frac{(\sigma_{\text{repetitividade}})^2}{nr}} \quad (14)$$

Onde:

r = número de vezes que cada item é medido por cada operador;

n = número de itens medidos.

d_2 = valor da constante obtida na Tabela 3.

Em que:

$$R_{\bar{X}} = \bar{X}_{\text{max}} - \bar{X}_{\text{min}} \quad (15)$$

Onde:

\bar{X}_{max} = máximo valor dos resultados médios mensurados pelos operadores;

\bar{X}_{min} = mínimo valor identificado entre os resultados medidos pelos operadores;

O valor de $\sigma_{\text{reprodutibilidade}}$ é considerado zero quando $(R_{\bar{X}}/d_2)^2$ for menor que $(\sigma_{\text{repetitividade}}/nr)^2$, o que pode acontecer devido a tais parcelas serem estimativas estatísticas e, portanto, variáveis aleatórias.

Assim, o índice de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) pode ser calculado pela equação 16, representada abaixo (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005).

$$R\&R = 6\sigma_{\text{medição}} = 6\sqrt{\sigma_{\text{repetitividade}}^2 + \sigma_{\text{reprodutibilidade}}^2} \quad (16)$$

A equação 17 mostra a porcentagem da variabilidade total dos dados devido ao sistema de medição (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005).

$$\%R\&R = \frac{R\&R}{6\sigma_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (17)$$

Em que:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r (X_{ijk} - \bar{\bar{X}})^2}{onr - 1}} \quad (18)$$

Onde:

o = número de operadores, sendo $i = \{1,3\}$;

n = número de itens, sendo $j = \{1,3\}$;

r = número de medidas de cada item por cada operador, sendo $k = \{1,9\}$;

$\bar{\bar{x}}$ = média aritmética global de todas as onr medidas.

O Quadro 1 mostra a adequabilidade do sistema de medição de acordo com o valor obtido do método R&R.

Quadro 1: Classificação da medição do sistema quanto à R&R (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005)

%R&R	Classificação
$\%R\&R \leq 10\%$	Adequado
$10\% < \%R\&R \leq 30\%$	Pode ser adequado dependendo da importância da aplicação, do custo do instrumento, do custo de manutenção, etc
$\%R\&R > 30\%$	Inadequado. Sistema de medição necessita de melhorias

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o levantamento da configuração necessária do experimento, primeiramente foi feita uma revisão bibliográfica em livros e artigos sobre a usinabilidade da liga escolhida, o Nimonic 80A, uma superliga a base de níquel com excelentes propriedades mecânicas e térmicas, amplamente utilizada nas indústrias, porém com dificuldades de usinagem. Assim, definiram-se os parâmetros tal qual seus respectivos níveis e variáveis respostas do processo. Por fim, o arranjo ortogonal de Taguchi mais adequado para o estudo de acordo com as condições escolhidas foi determinado, permitindo a realização do ensaio.

3.1. Material Nimonic 80A

A composição química da liga Nimonic 80A utilizada nos ensaios está especificada no Quadro 2 a seguir:

Quadro 2: Composição química da superliga Nimonic 80A (Adaptado de FARIA, 2007)

Composição	Ni	Cr	Cu	Fe	Ti	Al	Co	Nb	Mn	Si	S	Mo	B	P	C
Nimonic 80 ^a	≈ 74	20,0	0,05	0,75	2,35	1,25	1,00	-	0,35	0,35	0,007	-	-	-	0,06

O Nimonic 80A é uma liga a base de níquel e cromo conforme o Quadro 2, com adições de titânio e alumínio para viabilizar o endurecimento por precipitação de partículas. É uma superliga que sofreu modificações a partir de ligas já existentes e é principalmente utilizada na indústria automotiva (SILVA, 2001).

3.2. Parâmetros (Variáveis de entrada)

A definição dos parâmetros, variáveis de entrada e seus respectivos níveis, foram determinados com base nos conceitos de usinagem apresentados no capítulo 2. Com o objetivo de avaliar o comportamento da rugosidade, os seguintes parâmetros foram selecionados: Velocidade de corte (V_c) – velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte; avanço (f) - espaço percorrido pelo

ponto de referência da aresta de corte da ferramenta sobre a peça, segundo a direção do avanço; profundidade de corte (a_p) - é a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho numa direção perpendicular à este; tipo de pastilha (Tp) – elemento responsável pelo corte do material, o qual possui características tais como elevada dureza a quente/frio, tenacidade, estabilidade química, entre outras; lubrificação (L) – tem por objetivo agir na redução do calor gerado no processo, melhorando as condições de usinagem; dureza do material (dm) – considerada como sendo a maneira com que o material foi processado, sendo que para o presente estudo a liga Nimonic 80A foi trabalhada nas condições solubilizada para o nível 1 e laminada para o nível 2, proporcionando duas características diferentes para o material.

A Tabela 4 mostra os parâmetros do processo e seus respectivos níveis.

Tabela 4: Parâmetros e respectivos níveis para teste

	Parâmetros	Nível 1	Nível 2
A	Velocidade de corte (Vc)	75m/min	90m/min
B	Avanço (f)	0,12mm/rev	0,18mm/rev
C	Profundidade de Usinagem (ap)	0,8mm	1,6mm
D	Tipo de Pastilha (Tp)	TP2500	CP250
E	Lubrificação (L)	MQF	Abundante
F	Dureza do Material (dm)	Solubilizado	Laminado

3.3. Parâmetro (Variável de saída)

Após definidos os parâmetros de entrada, a análise do estudo em questão foi interpretada em relação a variável de saída Rugosidade, sendo esta a variável dependente das variáveis de entrada definidas e suas possíveis interações também avaliadas. Vale ressaltar, que para a variável resposta em questão (Rugosidade), tem-se que quanto menor o seu valor, melhor para a peça/processo, seguindo-se dos conceitos de Taguchi abordados no capítulo anterior.

As superfícies dos materiais devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. A rugosidade é definida como sendo as irregularidades que caracterizam uma superfície, irregularidades estas que vão desde pequenas saliências (picos) até reentrâncias (vales). O rugosímetro é o aparelho utilizado para avaliar tais irregularidades.

As principais causas para o mau acabamento superficial, ou seja, que geram a rugosidade são o desgaste das ferramentas, as vibrações no sistema peça-ferramenta, o método de conformação da peça e as imperfeições no mecanismo das máquinas-ferramenta (SANTIAGO, 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Uma superfície real é composta de rugosidade ou textura primária (causadas pela ferramenta no processo de produção), ondulação ou textura secundária (irregularidades causadas por vibrações ou deflexões geradas no processo de tratamento térmico ou na produção) e erro de forma (erros macrogeométricos) (SANTIAGO, 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

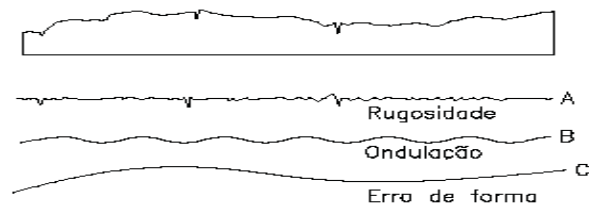


Figura 10: Irregularidades da superfície de um material
(Google imagens)

Assim como recomendado pela norma ISO, foram medidos nos ensaios com o rugosímetro 5 comprimentos de amostragem (Cut-off) e indicado o valor médio.

3.4. Arranjo Ortogonal

Depois de executada a determinação das variáveis de entrada e saída foi feita uma análise do arranjo ortogonal de Taguchi que melhor se adequasse ao estudo em questão. Para isso, utilizou-se a Tabela 5.

Tabela 5: Arranjos Ortogonais padrão de Taguchi (Adaptado de SANTOS, 2007)

Arranjo Ortogonal	Número de Experimentos	Número de Fatores	Máximo número de colunas na matriz			
			2 níveis	3 níveis	4 níveis	5 níveis
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L'36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Com o auxílio da Tabela 5, que representa os arranjos ortogonais disponíveis, o respectivo número de experimentos para cada arranjo, o número de fatores e o número de níveis que os fatores podem ser trabalhados, foi selecionado o arranjo L16. Este arranjo permite a realização de 16 experimentos com até 15 fatores com 2 níveis, possibilitando a análise de cada fator e suas interações na variável resposta estudada, arranjo este adequado aos fatores definidos na Tabela 4.

A influência de cada fator e a interação dos mesmos no problema pode ser ilustrada por meio dos gráficos lineares desenvolvidos por Taguchi, que mostra quais colunas os fatores devem ser alocados assim como suas possíveis interações. A Figura 11 mostra o gráfico linear do arranjo escolhido.

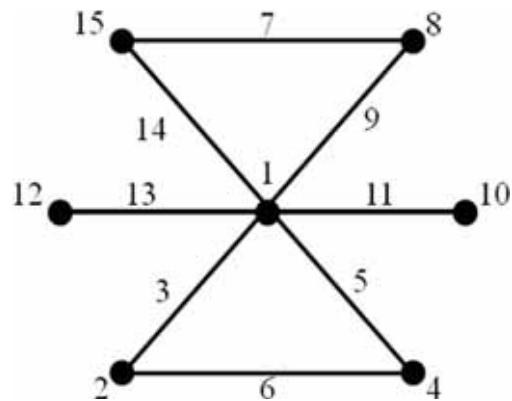


Figura 11: Gráfico Linear de Taguchi para o arranjo L16 (Adaptado de ROSS, 1991)

Com a determinação do arranjo L16 a ser utilizado no estudo e com o auxílio do gráfico linear da Figura 11, pode-se construir a Tabela 6, que mostra a alocação dos fatores e de suas interações na matriz de Taguchi com as respectivas combinações dos níveis utilizados para cada uma das variáveis em cada ensaio, níveis estes mostrados pela Tabela 4.

Tabela 6: Arranjo Ortogonal L16 para dois níveis

Experimento	Coluna														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	F	A	AF	B	BF	AB	ED	D	DF	C	CF	-	-	EF	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Com os resultados obtidos no ensaio de torneamento foram calculadas as médias para a variável resposta em estudo, a razão Sinal/Ruído (S/R) e seus efeitos, e por fim, a ANOVA para testar a significância e verificar quais variáveis e interações influem na resposta, utilizando como auxílio o *software Statistica 8.0*.

3.5. Processo de Torneamento

No ensaio de torneamento a máquina-ferramenta foi ajustada de acordo com os níveis dos parâmetros definidos na Tabela 4.

Os ensaios foram realizados no departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, com o uso de um torno CNC Romi CENTUR 30S com potência de 10kW e rotação de 25 a 3500rpm, com corpos de prova de 190mm de comprimento e 54mm de diâmetro médio.



Figura 12: Torno CNC Romi CENTUR 30S – FEG – UNESP

A rugosidade do corpo de prova foi medida após cada etapa do processo, efetuando-se três medidas no início, meio e fim da peça, distribuídas em um giro de 120°, utilizando-se para isso um rugosímetro Mitutoyo SURFTEST-301.



Figura 13: Rugosímetro Mitutoyo SURFTTEST-301 (FARIA, 2007)

Os experimentos foram conduzidos com a garantia de que todos os ensaios executados tivessem as mesmas limitações através da fixação do valor de desgaste de flanco (VB) em 0,05mm medidos com uma Lupa (8x) graduada em 0,01mm. A partir do momento em que o desgaste da ferramenta atingisse 0,05mm iniciava-se um outro ciclo de torneamento.

3.6. Confeção dos dados para o R&R

Com o intuito de analisar o sistema de medição e a qualidade dos dados utilizados para se chegar ao objetivo geral do trabalho, o método da Repetitividade e Reprodutibilidade foi aplicado. Para tal, ensaios de torneamento foram realizados no departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, utilizando-se um torno CNC e, como corpo-de-prova, Alumínio AA7075. Após cada etapa do processo, mediu-se a rugosidade do material da seguinte forma: primeiramente, o rugosímetro, aparelho usado para coletar as medidas necessárias, foi calibrado. Após essa etapa, o primeiro operador coletou três medidas no início, três medidas no meio e três medidas no fim da peça, distribuídas em um giro de 120°. Foram efetuadas três réplicas por operador. Após cada ensaio, o rugosímetro era descalibrado e recalibrado novamente e o operador replicava o processo, coletando novas medidas. A repetitividade foi garantida com a coleta de medições sucessivas

e a reprodutibilidade com a variação do observador, no caso, foram três os operadores do processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão analisados os resultados obtidos no ensaio determinados por meio do *software Statistica 8.0* e os resultados para o R&R, levando em consideração os conceitos citados no capítulo 2.

4.1. Resultados do ensaio

Os experimentos foram realizados através das condições definidas pela Tabela 6 do arranjo ortogonal L16 de Taguchi, utilizando os parâmetros de corte e seus respectivos níveis apresentados na Tabela 4, obtendo-se então a Tabela 7 com os resultados para a Rugosidade (R_y).

Tabela 7: Resultados para R_y obtidos através do experimento

Experimento	A	B	C	D	E	F	$R_{\bar{y}} 1$ (μm)	$R_{\bar{y}} 2$ (μm)	$R_{\bar{y}} \text{médio}$ (μm)
1	1	1	1	1	1	1	8,80	7,83	8,32
2	1	1	2	2	2	1	11,50	10,57	11,04
3	1	2	1	1	2	1	14,28	18,43	16,36
4	1	2	2	2	1	1	12,17	13,51	12,84
5	2	1	2	1	2	1	7,81	6,93	7,37
6	2	1	1	2	1	1	8,10	6,89	7,50
7	2	2	2	1	1	1	20,04	19,86	19,95
8	2	2	1	2	2	1	9,12	11,92	10,52
9	1	1	1	1	2	2	19,20	13,68	16,44
10	1	1	2	2	1	2	7,30	9,04	8,17
11	1	2	1	1	1	2	12,34	14,86	13,60
12	1	2	2	2	2	2	22,80	17,03	19,92
13	2	1	2	1	1	2	9,18	7,78	8,48
14	2	1	1	2	2	2	7,73	4,96	6,35
15	2	2	2	1	2	2	19,82	18,87	19,35
16	2	2	1	2	1	2	13,62	16,15	14,89

O ensaio utilizou-se de duas repetições para cada experimento $R_{\bar{y}} 1$ e $R_{\bar{y}} 2$ sendo que cada repetição já apresenta a média de uma amostra para R_y (μm).

4.2. Efeito do comportamento da variável resposta Ry em relação à média

Por meio da Tabela 7 apresentada acima e com a utilização do *software Statistica 8.0* foram obtidos os gráficos abaixo com os efeitos dos fatores e suas possíveis interações em relação à média tendo-se como variável resposta a rugosidade Ry.

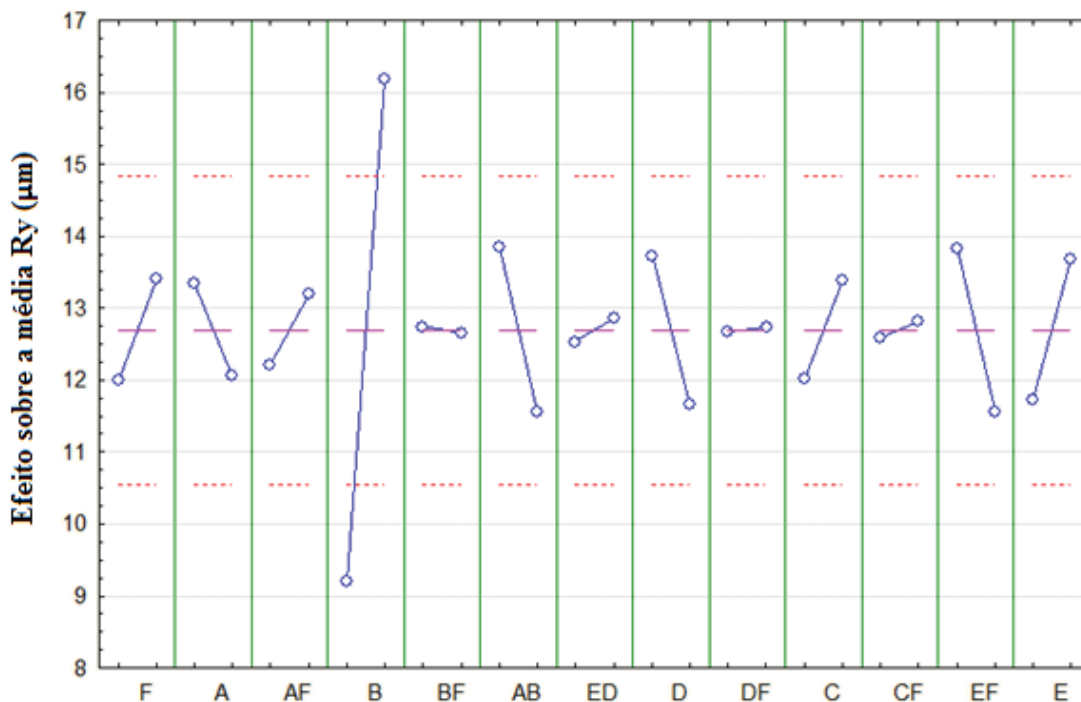


Figura 14: Efeito dos fatores e suas interações sobre a média Ry (Statistica 8.0)

Nota-se na Figura 14, visto que quanto maior a amplitude da reta da média maior a influência exercida pelo fator sobre a variável resposta em análise, que o fator B (avanço) é o fator de maior influência no processo, sendo também o único fator a exceder a barreira de $\pm 2\sigma$ (desvio padrão). Nota-se ainda que os fatores D (Tipo de pastilha) e E (Lubrificação) exercem mais influência sobre o processo quando comparados aos demais fatores A (Velocidade de corte), C (Profundidade de usinagem) e F (Dureza do material).

Em termos de interação entre os fatores estudados, conclui-se que os parâmetros AB (Velocidade de corte x Avanço) e EF (Lubrificação x Dureza do material) são as interações de maior influência para a rugosidade (Ry) visto que são as interações de maior amplitude, ou seja, que tem maior distância do nível baixo ao nível alto em relação à reta central (reta média).

Lembrando-se que para a variável resposta Rugosidade abordada, seguindo-se também os conceitos de Taguchi, quanto menor for o seu valor melhor será, por meio da análise da Figura 14 podemos concluir que, em média pode-se alcançar menores valores de rugosidade ajustando-se os parâmetros avanço e lubrificação para o nível baixo e o parâmetro tipo de pastilha para o nível alto, ou seja, a melhor obtenção de resultados seria alcançada utilizando-se o tipo de pastilha CP250, trabalhando-se com um avanço de 0,12 mm/ver e com a mínima quantidade de fluído de lubrificação no processo.

Contudo, apesar da avaliação executada acima, é imprescindível a realização de uma análise comprovada através do uso da estatística. Para isso, utilizou-se a ferramenta estatística ANOVA (Análise de variância) para verificação dos resultados encontrados nesse estudo.

A Tabela 8 mostra os resultados encontrados para a variável resposta rugosidade com a ferramenta ANOVA, usando-se o *software Statistica 8.0*, sendo o grau de influência de cada fator e suas interações determinados por meio do teste de F.

Tabela 8: ANOVA para Ry em relação à média

Fatores	SS	df	MS	F	p
F	5,0634	1	5,0634	1,12392	0,303095
A	13,7673	1	13,7673	3,05592	0,097479
AF	2,2881	1	2,2881	0,50788	0,485194
B	209,3829	1	209,3829	46,47664	0,000002
BF	0,1011	1	0,1011	0,02244	0,882577
AB	25,8905	1	25,8905	5,7469	0,027581
ED	1,0447	1	1,0447	0,23189	0,635928
D	16,5505	1	16,5505	3,6737	0,071293
DF	1,9887	1	1,9887	0,44143	0,514856
C	5,8987	1	5,8987	1,30934	0,267504
CF	0,6829	1	0,6829	0,15158	0,701595
EF	9,68	1	9,68	2,14867	0,159945
E	9,9492	1	9,9492	2,20842	0,154564
Erro	81,0922	18	4,5051		

Com o teste F, analisando-se os fatores para $p \leq 0,05$, nota-se que o fator B (avanço) é o parâmetro que exerce maior influência no processo, ou seja, é o fator avanço o qual altera com maior significância os valores da rugosidade estudada, com um grau de confiança de quase 100% devido ao valor p do avanço muito próximo de zero. Ainda pode-se notar que o fator D (tipo de pastilha) está mais próximo do valor desejado ($p \leq 0,05$) para o intervalo de

confiança em torno de 95%, o que faz com que o tipo de pastilha usada tenha um grau de importância a ser considerado no processo, seguido pelo fator A (velocidade de corte).

Em termos de interação entre os fatores estudados, observa-se que a relação entre os parâmetros AB (velocidade de corte x avanço; $p = 0,027581 < 0,05$) oferece maior nível de significância no processo com relação a variável rugosidade.

Levando-se em consideração o fator mais influente no processo e também a interação mais significativa através dos resultados obtidos com a ferramenta estatística ANOVA, sendo que o fator de maior autoridade sobre o processo é também um dos fatores da interação mais expressiva do mesmo, construiu-se o gráfico da Figura 15 com o intuito de averiguar o comportamento dos fatores presentes na interação predominante no processo em relação ao comportamento da variável resposta rugosidade.

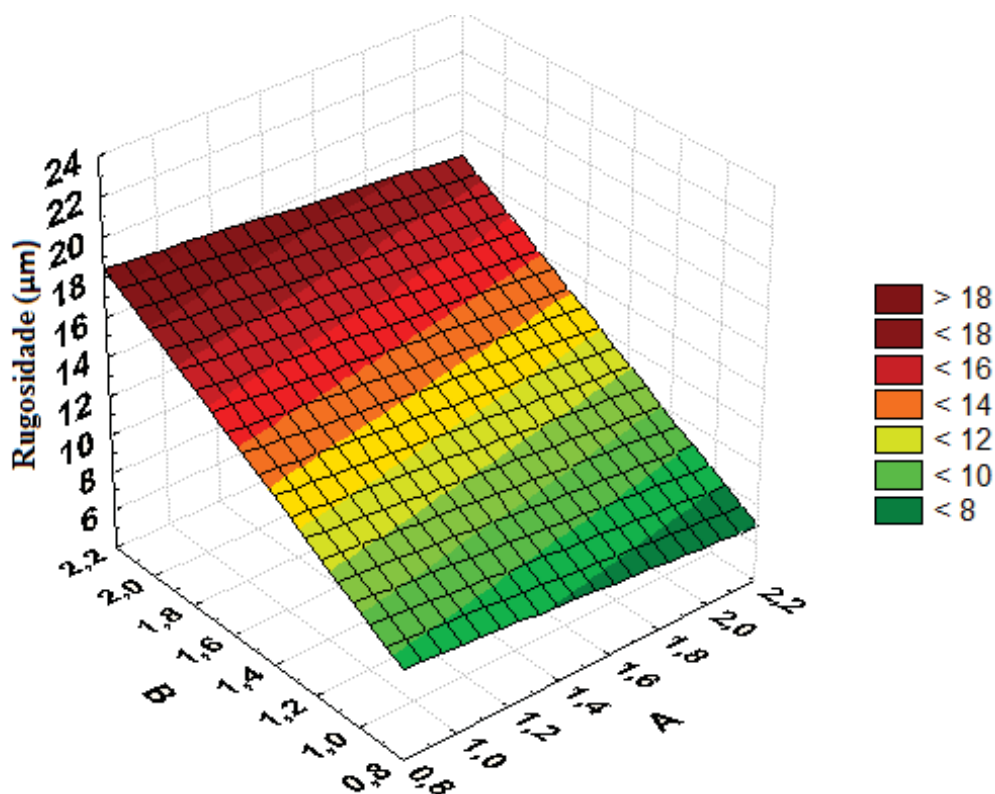


Figura 15: Comportamento da Rugosidade em relação ao avanço x velocidade de corte (Statistica 8.0)

A partir da Figura 15, vê-se que o valor da rugosidade é nitidamente alterado pela variação do avanço (B) do nível mais baixo para o nível mais alto, sendo que quanto maior o valor do avanço, maior a rugosidade encontrada, o que é ruim para o processo. Como já dito, quanto menor o valor da rugosidade, melhor a peça, ou seja, menos irregularidades

caracterizando-a. Portanto, pelo gráfico acima, quanto menor o valor do avanço (B), menor o valor da rugosidade. Em relação ao comportamento da rugosidade com a variação da velocidade de corte (A) do nível mais baixo para o nível mais alto, note-se pelo gráfico que existe uma pequena diminuição no valor desta, sendo valores muito menores comparados à variação do avanço.

Para uma melhor visualização da Figura 15, construiu-se a Figura 16 a qual exhibe as linhas de contorno da variável rugosidade.

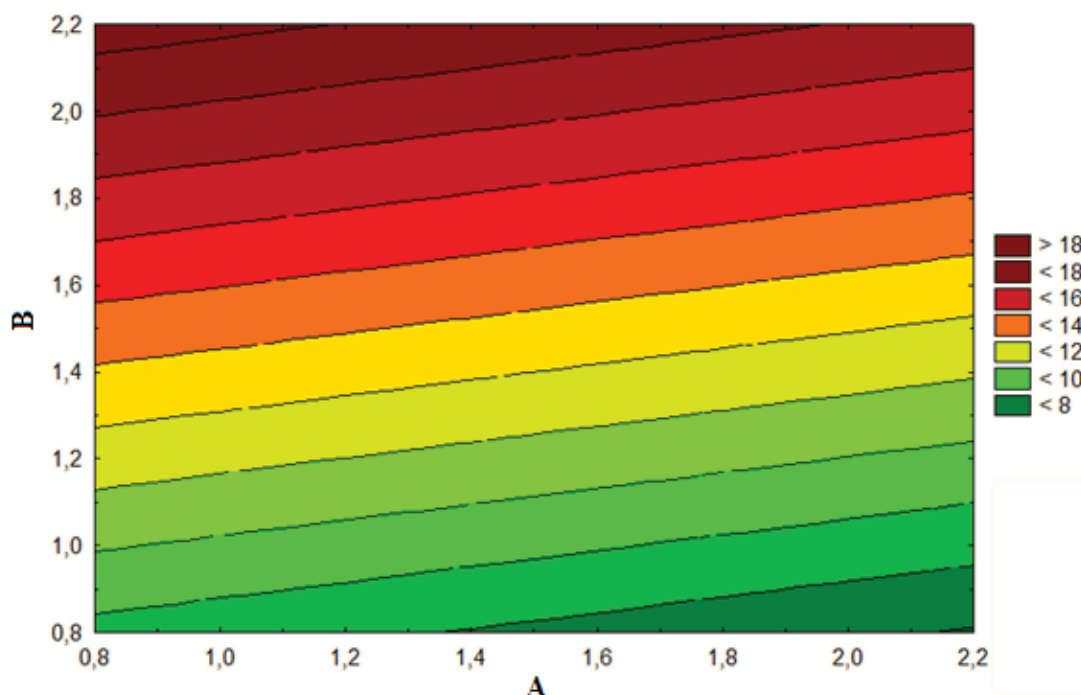


Figura 16: Linhas de contorno da Rugosidade em relação ao avanço x velocidade de corte (Statistica 8.0)

Assim como mostrado na Figura 15, pode-se observar que quanto maior o valor do avanço (B), maior a rugosidade média da superfície usinada. Portanto, conclui-se que, ao se trabalhar com o valor de avanço no nível baixo (0,12mm/rev) e velocidade de corte (A) em seu nível alto (90m/min), pode-se obter os melhores valores para a variável resposta rugosidade (inferiores a $8\mu\text{m}$), enquanto que para o avanço em seu nível alto (0,18mm/rev) e velocidade de corte em nível baixo (75m/min), pode-se obter valores de rugosidade altos (superiores a $18\mu\text{m}$), valores estes não desejados para o processo de usinagem.

Em suma, uma maior velocidade de corte combinado a um menor valor de avanço gera os menores valores para a rugosidade, otimizando o processo.

4.3. Resultados do ensaio para aplicação do R&R

De acordo com o descrito no item 3.6 do trabalho, para a verificação da adequabilidade do sistema de medição fazendo uso dos conceitos de R&R, as seguintes medidas, mostradas na Tabela 9, foram coletadas e as médias mostradas, calculadas.

Tabela 9: Medidas de Rugosidade coletadas pelos operadores

	Rugosidade Ry(μm)								
	OPERADOR 1			OPERADOR 2			OPERADOR 3		
	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3
Início	5,75	6	6,1	7,1	4,2	7,4	7,2	4,9	5,9
	5,6	3,6	7,3	4,5	5,5	5,1	4	4,7	7
	5,9	6,2	5,4	4,6	4,9	5,6	4,2	5,4	6,7
média	5,75	5,27	6,27	5,40	4,87	6,03	5,13	5,00	6,53
Meio	5,4	6,1	5	3,5	4,7	6,9	3,9	5,9	6,9
	3,8	5,9	3,4	5,3	5,5	5,9	4,6	4	5,3
	4,5	5,7	4,2	7,9	5,9	6,2	7	5,5	7,7
média	4,57	5,90	4,20	5,57	5,37	6,33	5,17	5,13	6,63
Fim	4,1	7,8	5,4	5	5,1	3,8	4,9	5,5	6,9
	4,3	5,4	4,3	3,8	6,1	8,7	5	3,9	5,6
	4,2	4,6	5,1	5,3	5,5	7,5	4,5	5,3	5,8
média	4,20	5,93	4,93	4,70	5,57	6,67	4,80	4,90	6,10
<i>Média das médias</i>	<i>4,84</i>	<i>5,70</i>	<i>5,13</i>	<i>5,22</i>	<i>5,27</i>	<i>6,34</i>	<i>5,03</i>	<i>5,01</i>	<i>6,42</i>
<i>Amplitude R</i>	<i>2,1</i>	<i>4,2</i>	<i>3,9</i>	<i>4,4</i>	<i>1,9</i>	<i>4,9</i>	<i>3,3</i>	<i>2</i>	<i>2,4</i>

Com a utilização do *Software Statistica 8.0*, os resultados abaixo foram obtidos.

Tabela 10: Resultados dos estudos de R&R

	Variância	%Contribuição da variância	Desvio-padrão	Varição do estudo (6 x desvio-padrão)	%Variação do estudo
R&R	0,46459	77,51	0,681605	4,08963	88,04
Repetitividade	0,27468	45,83	0,524100	3,14460	67,69
Reprodutibilidade	0,1899	31,68	0,435780	2,61468	56,29
Operadores	0,000000	0,00	0,000000	0,00000	0,00
Operador x ensaio	0,1899	31,68	0,435780	2,61468	56,29
ensaio x ensaio	0,13482	22,49	0,367171	2,20303	47,43
Varição Total	0,599400	100,00	0,774209	4,64526	100,00

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que o sistema de medição é inadequado, uma vez que %R&R é igual a 88,04, valor este que de acordo com o Quadro 1, classifica o sistema como tal. O R&R é composto pela variação da análise das medidas

coletadas mais a variação dos operadores, pois neste estudo o operador foi a variável que garantiu a reprodutibilidade. Pelos resultados, a variação do operador foi alta (56,3%). Porém, não se pode condenar o método de análise como um todo levando em consideração este valor de variação dos operadores, uma vez que os operadores do processo não tinham as mesmas características de conhecimento para efetuar a coleta dos dados. Contudo, nota-se pela Figura 17, que o operador 3 foi o que teve menor variação na repetitividade. O ideal seria baixar a variação da repetitividade para se obter uma menor reprodutibilidade nesse estudo, deixando o sistema confiável.

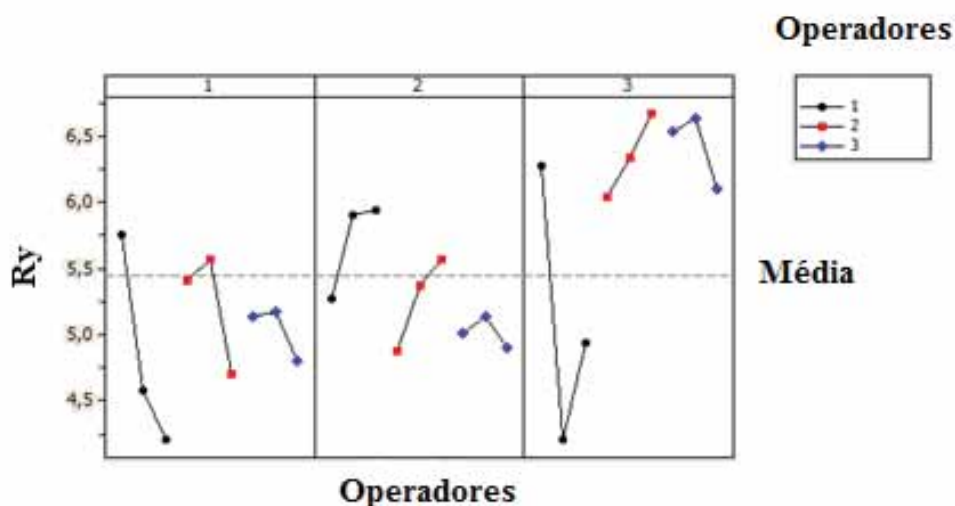


Figura 17: Gráfico das medidas coletadas por operador (Statistica 8.0)

A repetitividade pode ser afetada pela falta de limpeza ou manutenção no equipamento, por condições ambientais, pelo desgaste dos componentes, por procedimentos de medição inadequados, entre outras características enquanto que a reprodutibilidade pode ser prejudicada principalmente pela utilização de diferentes procedimentos de medição por parte dos operadores e pelo seu treinamento insuficiente. Como mostrado na Tabela 10, tanto o valor da repetitividade como o da reprodutibilidade deram altos, confirmando a necessidade de melhorias para o sistema de medição analisado. Tais melhorias podem abranger uma calibração mais adequada do equipamento para efetuar as medidas, mudança nos métodos de análise e principalmente, para este estudo, o treinamento adequado dos operadores.

5. CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

O planejamento experimental destaca-se como uma ferramenta poderosa para se chegar as condições otimizadas de um processo. O modelo robusto proposto por Taguchi, inserido dentro das técnicas de planejamento de experimentos, proporcionou a identificação dos fatores que influenciam o processo de usinagem estudado, levando à otimização deste.

Analisando a variável resposta Rugosidade superficial, pode-se concluir que o avanço é o fator de maior efeito significativo para o processo, tanto pela análise dos efeitos dos valores, assim como pela análise da ANOVA, devendo este ser ajustado para seu nível baixo, 0,12mm/revolução, visto que se deseja um menor valor de rugosidade para um melhor processo, o que é obtido por meio do nível de avanço citado.

Em termos de interação entre os fatores estudados, a interação velocidade de corte x avanço aparece exercendo maior influência no processo também na análise dos efeitos dos fatores e na ANOVA.

Pode-se notar ainda que o tipo de pastilha aparece como um fator bastante significativo no processo em ambas as análises efetuadas, sendo a melhor obtenção de resultados obtida com este fator em seu nível alto, ou seja, utilizando-se a pastilha CP250 para a usinagem.

Já para a análise do sistema de medição, estudado por meio dos conceitos da repetitividade e reprodutibilidade (R&R), viu-se que o sistema necessita de melhorias, uma vez que o valor de R&R foi bastante alto (88,04%), mostrando a inadequabilidade deste.

Por fim, pode-se concluir que ambos os métodos utilizados atenderam a todos os objetivos propostos no trabalho de forma satisfatória, apresentando as condições que afetam a resposta de maneira a obter os melhores níveis para o processo, além de mostrar a análise do sistema de medição usado para a coleta dos dados que nos leva ao alcance do objetivo geral.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho propiciou a análise dos fatores que influenciam o processo de usinagem para a superliga Nimonic 80A. Em continuidade a este estudo, para compor trabalhos futuros, sugere-se os seguintes temas:

- Estudo da otimização para outros processos de usinagem, por exemplo, fresamento ou furação, utilizando as técnicas do Planejamento de Experimentos;
- Estudo deste mesmo processo aplicado a outros tipos de materias (outras ligas, superligas);
- Estudo dos fatores estatísticos de desvio α e β , para que os critérios de decisão sejam avaliados com mais eficiência, por exemplo, pode-se rejeitar H_0 sendo que este deveria ser aceito, ou seja, este estudo viabiliza uma melhor tomada de decisão;
- Estudo aprofundado do método da repetitividade e reprodutibilidade, aplicando todos seus conceitos em sistemas de medições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, H. J. de. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

ANTONY, J. Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner. *Sensor Review*. Vol. 26 , n. 3, 227–230, 2006.

ANTONY, J., ANAND, R.B., KUNAR, M., TIWARI, M.K. Multiple response optimization using Taguchi methodology and neuro-fuzzy based model. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 17 Iss: 7, pp.908 – 925, 2006.

ASILTURK, I., AKKUS, H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, v. 44, p. 1697–1704, 2011.

CALEGARE, A. J. A. Introdução ao Delineamento de Experimentos. 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2001. 130p.

CAMARGO, L. F. R.; MOREIRA, V.; VACCARO, G. L. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de novos produtos em uma empresa de saneantes. *Estudos Tecnológicos*. v. 5, n° 3, p.404-420, 2009.

CAMARGO, L. F. R.; MOREIRA, V.; VACCARO, G. L. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de novos produtos em uma empresa de saneantes. *Estudos Tecnológicos*. v. 5, n° 3, p.404-420, 2009.

CHOUDHURY, I. A.; BARADIE, M. A. Machinability of Nickel-base Super Alloys: A General Review. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 77, 1998, p. 278 – 287.

COPPINI, N. L.; DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 3. Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

CORREIA, E. A. S.; CARDOZA, J. A. S. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi. . IN. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24, INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 15, 2004, Florianópolis. Anais:

Florianópolis, Santa Catarina, 2004. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2004>>. Acesso em: 11 abr. 2011.

COSTA, A. F. B., EPPRECHT, E. K., CARPINETTI, L. C. R. Controle Estatístico de Qualidade. 2º Ed. – São Paulo – Editora Atlas, 2005. 334p.

DAVID, B.; MATEVZ, F.; GORAN, K.; SAVO, S. Microstructure development of Nimonic 80A superalloy during hot deformation. RMZ – Materials and Geoenvironment , Vol. 55, No.3, p.319-328, 2008.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. Journal of Quality Technology, v.12, p. 214–219, 1980.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology, v.134, 2003, p. 233 – 253.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO A. R. The machinability of nickel- based alloys: a review. Journal of Materials Processing Technology, v. 86, 1999.

FARIA, J. C. de Estudo da Usinagem em Torneamento da Superliga a base de Níquel Nimonic 80A. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2007. 88f.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos Metais. São Paulo, Edgard Blucher, 1924.

FOX-RABINOVICH, G. S., BEAKE, B. D., YAMAMOTO, K., AGUIRRE, M. H., VELDHUIS, S. C., DOSBAEVA, G., ELFIZY, A., BIKSA, A., SHUSTER, L. S. Structure, properties and wear performance of nano-multilayered TiAlCrSiYN/TiAlCrN coatings during 55 machining of Ni-based aerospace superalloys. Surface & Coatings Technology, v. 204, p. 3698-3706, 2010.

GALDÁMEZ, E. V. C. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Rev. Gestão e Produção, v.11, n.1, p.121-134, 2002.

GOUVEIA, E. R.; NASCIMENTO, R. T.; SOUTO-MAIOR, A. M.; ROCHA, G. J. M. Validação de Metodologia Para a Caracterização Química de Bagaço de Cana-de-Açúcar. Quim. Nova, Vol. 32, No. 6, 1500-1503, 2009

HACHICHA, W.; MASMOUDI, F.; HADDAR, M. Taguchi Method Application for the Part Routing Selection in Generalizes Group Technology: A Case Study. 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics 16 - 18 December, 2008, Sousse, Tunisia.

JURAN, J. M. A qualidade desde o projeto. Editora Cengage Learning, 2009. 558p.

KERLINGER, F.N. Metodologia da pesquisa em Ciências Sociais. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1979.

KIM, D. K., KIM, D. Y., RYU, S. H., KIM, D. J. Application of NOMINC 80A to the hot forging of an exhaust valve head. Journal of Materials Processing Technology, v.113, p. 148-152, 2001.

LOPES, A. A. P. Uma Análise Emparelhada entre Delineamento de Experimentos Clássico e de Taguchi. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção. Itajubá, 2008.

MARQUES, D. C., Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 95 p. Dissertação (Mestrado).

MASON, F. Usinando a seco, ou quase a seco. Máquinas e Metais. v.37 (424), p 160-173, 2001.

MATTOS, V. L. D. de. Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 4 ed. USA: John Wiley&Sons, 1997.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 6ª edição. New York: John Wiley & Sons, 2005. 643 p.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Planejamento e Otimização de Experimentos. 2ª edição. Campinas: Editora da Unicamp, 1995. 299 p.

OSBORNE, D. M., ARMACOST, R. L., PET-EDWARDS, J. State of the art in multiple response surface methodology. IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, v 4, pp. 3833-3838, 1997.

PAIVA, E. J. de Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseada em Índices de Capacidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008. 118f.

PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; RIBEIRO, R. B.; RAMOS, A. W. Planejamento de Experimentos (DOE) aplicado no Processo de Têmpera e Revenimento de Arames de Aço SAE 9254. Janus, v.5, n.8, 2008. p.119-139. Disponível em: <<http://publicacoes.fatea.br/index.php/janus/article/viewArticle/366>>. Acesso em: 27 abr. 2012.

PIRES, T. S. Método de Superfície de Resposta Aplicado à Otimização Termoeconômica de Sistemas de Cogeração Modelados em um Simulador de Processo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. 106f.

PONTES, F. J.; FERREIRA, J. R.; PAIVA, A. P. de. Aplicação de um arranjo Ortogonal de Taguchi ao projeto dos parâmetros de uma Rede neural artificial RBF para predição da vida de ferramentas em processo de torneamento. IN. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27, INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 15, 2007, Foz do Iguaçu. Anais: Foz do Iguaçu, Paraná, 2007. Disponível em: <http://www.labceo.com.br/bibliografia/archive/files/14_61c55548b3.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2011.

PRATES, G. A. Ecodesign utilizando QFD, métodos Taguchi e DFE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. 174f. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/teses98/glaucia/cap3.html>>. Acesso em: 23 Abr. 2012.

RAISSI, S.; FARSANI, R. E. F. Statistical Process Optimization Through Multi-Response Surface Methodology. World Academy of Science, Engineering and Technology, v.51, p.267-271, 2009.

RIBEIRO, C. B. Projeto de experimentos em rodas ferroviárias fundidas em aço, com uso da técnica de Taguchi. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2008. 98f.

RIBEIRO, J. N.; CERQUEIRA, J. ; SANTOS, P.; LOUZA, A. Internal validation of an ATP assay method for hygiene monitoring of inox surfaces in the dairy industry. *Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias*.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: uma Estratégia Sequencial de Planejamento. São Paulo: Casa do Pão, 2005. 326 p.

ROSS, P. J. Aplicações das Técnicas de Taguchi na Engenharia da Qualidade. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

ROSS, P. J. Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade. Editora Makron, McGraw-Hill. São Paulo, 1991.

ROY, R. K. Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement. New York: John Wiley & Sons, 2001. 538p.

SANTIAGO, L. F. F. Caracterização da influência da velocidade de corte, pressão e granulometria de lixa no lixamento plano do pinus elliottii. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011. 125f.

SANTOS, G. R. dos Caracterização de filme DLC e avaliação dos esforços de usinagem em insertos revestidos no torneamento de ligas Al-Si. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006. 71f.

SANTOS, S. N. dos. Uso do Planejamento de Experimentos na Melhoria do Produto e Processo no Setor de Próteses de Quadril em uma Empresa de Produtos Cirúrgicos. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.

SENTHILKUMAR, R.; VAIDYANATHAN, S.; SIVARAMAN, B. Thermal analysis of heat pipe using Taguchi Method. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol.2 (4), 2010, 564-569.

SILVA, L. R. da, COELHO, R. T., CATAI, R. E. Desgaste de Ferramenta no Torneamento com alta velocidade de corte da superliga “Waspaloy”. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 57(2), p. 109-114, abr. jun. 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v57n2/v57n2a07.pdf>>. Acesso em: 30 mar 2012.

SILVA, L. R. et al. Estudo da geometria de corte para torneamento de Inconel. *Máquinas e Metais*, v. 37 (427), 2001, p. 32 – 55.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; TAGUCHI, S. *Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market*. McGraw-Hill, 1. ed, 1999, p.241.

TAY, K. M.; BUTLER, C. Methodologies for Experimental Design: A survey, comparison, and future predictions. *Quality Engineering*, v 11, n.3, p.343-356, 1999.

VIGNEAU. J. Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. *Máquinas e Metais*, n. 380, p.16-31, set. 1997.

WATANABE, C. T., NOGUERIA, J. L., RIBEIRO, M. V. Otimização da Usinagem de Válvulas de Nimonic 80A. Departamento de Engenharia de Materiais. FAENQUIL, Lorena. *Revista de Ciências Exatas*, Taubaté, vol. 9/10, n. 1-2, p. 37-42, 2003/2004.

WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S. Otimização estatística de processos: Como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria. Belo Horizonte, MG. Fundação Christiano Ottoni, Escola de engenharia da UFMG, 1996. 331p.

WITTING, H. Torneamento de superligas. *Máquinas e metais*, v. 38 (440), 2002, p. 156 – 65.
XIANSHENG, N.; ZHENGGAN, Z.; XINGWEI, W.; LUMING, L. The use of Taguchi method to optimize the laser welding of sealing neuro-stimulator. *Optics and Lasers in Engineering*, v.49, p. 297–304, 2011.

YIH-FONG, T. Parameter design optimisation of computerised numerical control turning tool steels for high dimensional precision and accuracy. *Materials and Design*, v. 27, Issue 8, p. 665–675, 2006.

ZHOU, J.; WU, D.; GUO, D. Optimization of the production of thiocarbonylhydrazide using the Taguchi method. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, v. 85, Issue 10, p. 1402–1406, 2010.