

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA GESTÃO E OTIMIZAÇÃO

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DO PLANEJAMENTO DE
EXPERIMENTOS NA OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE
TORNEAMENTO DA SUPERLIGA NIMONIC 80A**

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

Co-Orientador: Prof. Dr Marcos Valério Ribeiro

Aluno: Ricardo Batista Penteado

Guaratinguetá

2011

RICARDO BATISTA PENTEADO

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DO PLANEJAMENTO
DE EXPERIMENTOS NA OTIMIZAÇÃO DE UM
PROCESSO DE TORNEAMENTO DA SUPERLIGA
NIMONIC 80A**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2011

P419u	<p>Penteado, Ricardo Batista</p> <p>Utilização de técnicas do planejamento de experimentos na otimização de um processo de torneamento da superliga NIMONIC 80A / Ricardo Batista Penteado– Guaratinguetá : [s.n], 2011.</p> <p>88 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 79-87</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro</p> <p>1.Taguchi, Método de (Controle de qualidade) 2. Planejamento experimental I. Título</p> <p>CDU 658.56</p>
-------	--

RICARDO BATISTA PENTEADO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: GESTÃO E OTIMIZAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. MARCELA A.R.G. MACHADO DE FREITAS
Unesp-Feg



Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
FATEA

DADOS CURRICULARES

RICARDO BATISTA PENTEADO

NASCIMENTO	14.07.1982 – Bebedouro – SP – Brasil
FILIAÇÃO	Manoel Penteado Elenice Aparecida Batista Penteado
2004/2008	Engenharia de Materiais Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2009/2011	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

DEDICATÓRIA

À minha mãe Elenice e meu pai Manoel, que com os seus esforços e dedicação foram os maiores incentivadores para que eu atingisse meu objetivo, e de modo especial à minha namorada Rubia pelo grande apoio e ajuda em meus momentos difíceis.

"O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem - mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir."

Albert Einstein

AGRADECIMENTO

Ao Professor Doutor Messias Borges Silva, orientador brilhante e incansável, que estimulou e acreditou em meu trabalho.

Ao Professor Doutor Marcos Valério Ribeiro, que tanto me incentivou e auxiliou dando suporte para que o trabalho fosse bem sucedido.

Ao meu sogro Alfredo Toledo de Oliveira, minha sogra Cleusa B. R. T. de Oliveira e minha cunhada Naralice R. T. de Oliveira, pela grande ajuda e incentivo à realização desse trabalho.

As minhas irmãs Christiane e Patricia por todo apoio, carinho e paciência durante a realização deste trabalho.

A Seco Tools pelo apoio a pesquisa e fornecimento das ferramentas de estudo.

A Villares Metals S.A pelo fornecimento do material utilizado para os testes.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

PENTEADO, R.B. **Utilização de técnicas do Planejamento de Experimento na Otimização de um processo de Torneamento da Superliga Nimonic 80A**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

As ligas a base de níquel possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga, os quais são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas. Sua vasta utilização se dá ao seu bom desempenho em altas temperaturas. O objetivo deste trabalho foi estudar o processo de usinagem via torneamento cilíndrico externo da liga a base de níquel Nimonic 80A, utilizando ferramentas do projeto de experimentos como a Metodologia de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Respostas para o auxílio à resolução de problemas com múltiplas respostas em experimentos de usinagem, visando analisar qual o melhor arranjo dentre os fatores estudados, tendo como variável resposta a rugosidade superficial (R_a) e comprimento de corte (L_c). Os ensaios de usinagem foram realizados em um torno CNC, sendo considerados os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de corte (75 e 90 m/min), profundidade de usinagem (0,8 e 1,6 mm) e avanços (0,12 e 0,18 mm/v), pastilhas CP250 e TP2500, corpo de prova feito com material Nimonic 80A laminado a quente e Solubilizado, por fim, o fluido refrigerante variando em Mínima quantidade de Fluido (MQF) e abundante. Todo o processo foi conduzido em ciclos, em que cada ciclo terminava quando atingisse o comprimento de avanço máximo (L_f). Após cada etapa do torneamento foram realizadas as medidas do desgaste ferramental, bem como a rugosidade das peças. Pôde-se observar que o avanço apresentou maior significância com relação à rugosidade e comprimento de corte, levando a concluir que para menores valores de avanço, menores valores de rugosidades e maiores valores de comprimento de corte serão encontrados.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto de Experimentos, Método de Taguchi, Método de Superfície de Resposta, *Desirability*, Processo de Usinagem e Superliga.

PENTEADO, R.B. **Use of Design of Experiment technique in Optimization of a turning process of the superalloy Nimonic 80A.** 2011. 87p. Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The nickel-based alloys have a chemical composition with high content of alloying elements, which are responsible for their mechanical and thermal properties. Its widespread use in these areas is mainly due to its performance at high temperatures. The propose of this work is to study the machining process in a cylindrical external turning in a nickel based alloy Nimonic 80A, using tools of the design of Experiments such as Taguchi Method and Response Surface Methodology for assistance to solve problems with multiple responses machining experiments aimed at analyzing what are the best setting among the factors studied with variable response to surface roughness and cutting length. The machining tests were performed on a CNC lathe, being considered the following machining parameters: cutting speed (75 and 90 m / min), depth of cut (0.8 and 1.6 mm) and feed rate (0.12 and 0.18 mm / V), TP2500 and CP250 tools, workpiece of Nimonic 80A material hot rolled and annealed and Fluid Lubricant varying amount in Minimal Quantity of Fluid (MQF) and abundant. The whole process was conducted in cycles where each cycle ended when it reached the maximum feed length (Lf). After each step of turning, were performed the measurements of the tool wear and the roughness of the parts. It can be observed that the factor feed had greater significance with respect to roughness and cutting length, leading to the conclusion that the lower were feed rate, lower values of roughness and higher values for cutting length will be found.

KEY WORDS: Design of Experiment, Taguchi Method, Response Surface Method, Desirability, Turning Process, Superalloy.

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1 – Modelo Básico de um Processo.....	25
FIGURA 2 – Representação esquemática das etapas envolvidas no processo de otimização de Taguchi.....	26
FIGURA 3 – Representação do experimento para o caminho de máxima inclinação..	33
FIGURA 4 – Representação do experimento rotacionado.....	33
FIGURA 5 – Representação do corpo de prova para uso nas operações de torneamento	38
FIGURA 6 – Fluxograma macro das fases de execução do planejamento experimental	39
FIGURA 7 – Fluxograma do Processo A da Figura 6	40
FIGURA 8 – Fluxograma do Processo B da Figura 6.....	41
FIGURA 9 – Microestrutura típica da liga NIMONIC 80A	42
FIGURA 10 – Representação do avanço (f) ao longo do corpo de prova no processo de torneamento	44
FIGURA 11 – Representação da Profundidade (ap) do corpo de prova no processo de torneamento	44
FIGURA 12 – Representação dos dois tipos de pastilhas de usinagem utilizadas, (a) CP 250 e (b) TP2500	45
FIGURA 13 – Representação da microestrutura característica do Nimonic 80A em que (a) é o Laminado a quente com ampliação de 200x (grãos equiaxiais), (b) Solubilizado e envelhecido com ampliação 200x (precipitação) e (c) foto do solubilizado com ampliação 1000x (carbeto em sua forma primária “MC”)	46
FIGURA 14 – Gráfico Linear para Arranjo de Taguchi L16.....	48
FIGURA 15 – Torno CNC Romi CENTUR 30S utilizado para a realização dos ensaios	50
FIGURA 16 – Representação do ensaio de torneamento cilíndrico externo	51
FIGURA 17 – Representação esquemática das medições de rugosidade	52
FIGURA 18 – Efeito dos fatores sobre a média Lc	56
FIGURA 19 – Comportamento do tipo de pastilha vs avanço em relação ao comprimento de corte	58
FIGURA 20 – Representação do Gráfico de contorno para o comportamento do tipo de pastilha vs avanço em relação ao comprimento de corte	59
FIGURA 21 – Efeito dos fatores sobre a razão S/N em relação a Lc	60

FIGURA 22 – Superfície de Resposta para o efeito do tipo de pastilha e avanço para Lc	62
FIGURA 23 – Gráfico de contorno para predição da Superfície de Resposta para o efeito do tipo de pastilha e avanço para Lc	63
FIGURA 24 – Efeito dos fatores sobre a média Ra	64
FIGURA 25 – Representação da rugosidade de uma peça	65
FIGURA 26 – Comportamento da Rugosidade em função do avanço x lubrificação ..	66
FIGURA 27 – Comportamento do tipo de lubrificação vs avanço em relação a Rugosidade	67
FIGURA 28 – Gráfico dos efeitos de S/N para Rugosidade da superliga Nimonic 80A	68
FIGURA 29 – Superfície de Resposta para o efeito da lubrificação e avanço em relação a Ra.	70
FIGURA 30 – Contorno da Superfície de Resposta para o efeito da Lubrificação e avanço em relação a Ra	71
FIGURA 31 – Gráfico para a análise conjunta segundo proposto pelo método <i>desirability</i>	73
FIGURA 32 – Representação do desgaste da ferramenta para os dois casos de melhor e pior condição para as variáveis respostas. (a) representa o ponto de vista superior da ferramenta e (b) representa a visão da aresta de corte da ferramenta para a condição 12, (c) e (d) representam os mesmos pontos de vista porém para a condição 14.....	75

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 – Ilustração do Arranjo experimental de Taguchi L ₁₂	27
TABELA 2 – Resultados da ANOVA para avaliação da qualidade dos efeitos dos fatores.	29
TABELA 3 – Parâmetros de usinagem com seus respectivos níveis.....	43
TABELA 4 – Arranjos Ortogonais Padrão de Taguchi	47
TABELA 5 – Arranjo ortogonal L16 para 2 níveis.....	49
TABELA 6 – Resultados obtidos com os experimentos de torneamento cilíndrico.....	55
TABELA 7 – Análise de Variância para o Lc em relação à média.....	57
TABELA 8 – Análise de Variância para o Lc em relação ao S/N	61
TABELA 9 – Tabela do Planejamento Fatorial 2 ² com réplica no ponto central para Lc	62
TABELA 10 – Análise de Variância para o Ra em relação à média.	66
TABELA 11 – Análise de Variância para o Ra em relação ao S/N.....	69
TABELA 12 – Tabela do Planejamento Fatorial 2 ² com réplica no ponto central.....	70
TABELA 13 – Dados utilizados para a análise conjunto segundo proposto pelo método <i>desirability</i>	72
TABELA 14 – Gráfico Linear para Arranjo de Taguchi L16.....	72
TABELA 15 – Comparação dos valores Reais com o Predito.....	74
TABELA 16 – Representação das condições experimentais 12 e 14 do arranjo ortogonal de Taguchi.....	75

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

Al	Alumínio
a_p	Profundidade de usinagem (mm)
B	Boro
C	Carbono
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DOE	Design of Experiment
f	Avanço (mm/volta)
Fe	Ferro
L_c	Comprimento de corte (m)
Mn	Manganês
Mo	Molibidnio
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
MSR	Método da Superfície de Resposta
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
R_a	Rugosidade média (μm)
S/N	Sinal/Ruído
Si	Silício
Ti	Titânio
VB	Desgaste de flanco (mm)
v_c	Velocidade de corte (m/min)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Considerações Iniciais	16
1.2. Justificativa	17
1.3. Objetivo	18
1.3.1. Objetivo Geral	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4. Limitações	19
1.5. Estrutura do Trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Processo de Usinagem	21
2.2. Projeto de Experimentos (DOE – Design of Experiment)	22
2.3. Método de Taguchi	24
2.4. Método de Superfície de Resposta	30
2.5. Otimização de Processo com Múltiplas Respostas	34
3. MÉTODOS	38
3.1. Fluxograma do Trabalho Proposto	38
3.2. Definição do Material Nimonic 80A	42
3.3. Parâmetros de Usinagem (Variáveis de Entrada)	43
3.3.1. Velocidade de Corte	43
3.3.2. Avanço	43
3.3.3. Profundidade ou Largura de Corte (ap)	44
3.3.4. Ferramenta de Corte ou Pastilha	44
3.3.5. Lubrificação	45
3.3.6. Dureza do Material	46
3.4. Variáveis Resposta (Variáveis de Saída)	47
3.5. Elaboração do Modelo de Taguchi	47
3.6. Ensaio de Torneamento	49
3.7. Planejamento da MSR	53
3.8. Método de Análise dos Resultados Simultâneos	53

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1. Variável Resposta Comprimento de Corte	56
4.1.1. Comportamento de Lc em Relação à Média	56
4.1.2. Comportamento de Lc em Relação à Razão S/N	60
4.2. Superfície de Resposta para Lc	61
4.3. Variável Resposta Rugosidade	63
4.3.1 Comportamento da Rugosidade em Relação à Média.....	63
4.3.2 Comportamento da Rugosidade em Relação à Razão S/N.....	68
4.4 Superfície de Resposta para Ra	69
4.5 Otimização Conjunta	72
5. CONCLUSÃO	77
5.1. Considerações Finais	77
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Atualmente, levando em consideração a competitividade tão intensa, empresas estão descobrindo que necessitam fazer algo para se manterem em atividade. Estão percebendo que mudanças são inevitáveis para que possam acompanhar todas as transformações do mercado.

A globalização da economia e o surgimento rápido e contínuo de novas tecnologias mobilizaram as organizações para a obtenção do grau máximo de competitividade, modernidade e qualidade, de modo a assegurarem sua sobrevivência e o seu crescimento (BERNARDOS; VOSNIAKOS, 2002; BESSERIS, 2009).

Neste cenário, as empresas passaram a buscar qualidade em seu processo produtivo, aumentando assim, consideravelmente sua produção e lançando no mercado uma quantidade maior de produto com qualidade para atender plenamente as exigências do consumidor.

Para Paiva (2006) quanto mais complexa as exigências dos clientes e consumidores, mais atributos de qualidade serão necessários agregar nos serviços prestados, a fim de atingir tal expectativa, e assim encontrar um arranjo do processo de produção que satisfaça este perfil de exigência.

Na indústria de processamento metálico essas exigências não são diferentes, em que para Lee e Kwon (2010), para aumentar a eficiência e a produtividade do processo de usinagem, é necessário determinar adequadamente os melhores recursos tais como: ferramenta de corte e parâmetros de usinagem, onde a melhoria da produtividade e da eficiência pode ser obtido através da otimização desses parâmetros.

Para atingir tais objetivos, diversos pesquisadores, têm utilizado métodos de otimização construídos a partir de experimentos planejados. Esta estratégia é conhecida como Projeto de Experimentos (DOE, do inglês *Design of Experiments*).

Benardos e Vosniakos (2002) utilizaram DOE para predição do mecanismo de formação da rugosidade superficial em uma fresagem facial em uma Liga de alumínio Série 2 normalmente utilizado em indústria aeroespacial. Já Yih-Fong (2006) utiliza a técnica DOE para obter a melhor precisão dimensional na usinagem dos materiais

SKD-11 e SKD-61 utilizando um torno CNC, enquanto que Chang e Kuo (2007) utilizam DOE para a avaliação da rugosidade superficial na usinagem com laser em cerâmica de óxido de alumínio.

Todos estes trabalhos objetivam a otimização de processos de usinagem, obtidas a partir de arranjos experimentais previamente elaborados, em um trabalho *off-line*, com resultados plenamente satisfatórios.

Com essa finalidade, o presente estudo propõe uma abordagem experimental, empregando-se a utilização de técnicas do planejamento de experimento na otimização de processo de torneamento da superliga Nimonic 80A.

1.2. Justificativa

Em uma época onde a concorrência nunca foi tão intensa, um importante fator para a sobrevivência das organizações é a entrega de produtos ou serviços com o menor custo, aliados a padrões de qualidade compatíveis aos exigidos pelo mercado consumidor, que vem se tornando cada vez mais exigentes (RAISSI; FARSANI, 2009).

Sabe-se que custos e qualidade, na maioria dos casos, são parâmetros inversamente proporcionais, parâmetros estes onde a melhoria de um significa a redução do outro. O processo de usinagem não é diferente, para Raissi e Farsani (2009) muitas vezes o desempenho de um produto fabricado é caracterizado por um grupo de respostas, ou seja, vários atributos são considerados fatores preponderantes para o aumento da produtividade e a satisfação das necessidades dos clientes.

Para Fogliatto (2008) o desempenho desses itens são avaliados a partir de múltiplos critérios, ou seja, múltiplas características capazes de determinar a qualidade do produto, leva a necessidade da otimização conjunta desses critérios para obter o melhor produto.

Em um problema de otimização com múltiplas respostas, o objetivo principal é encontrar uma melhor combinação entre as variáveis de entrada do processo, que acarrete como resultado um valor ideal de todas as variáveis resposta. Em geral, é muito difícil obter essa combinação, porque valores ótimos de uma variável resposta

podem levar a valores não ótimos para as variáveis resposta remanescentes (PAL; GAURI, 2010).

No caso de processos de usinagem, esses conceitos não se alteram, uma vez que a dificuldade de usinagem de certas ligas pode levar a uma maior complexidade nos estudos de seu processo, levando a dificuldades extremas no ponto de vista da otimização, como por exemplo, no caso das superligas, que são ligas extremamente difíceis de serem usinadas, levam a um desgaste intenso da ferramenta de corte por ter como característica principal sua elevada resistência ao calor e corrosão, além de elevada dureza.

Na literatura, existem poucos trabalhos relacionados com processos de usinagem da superliga NIMONIC 80A, liga muito utilizada na indústria automotiva, sendo empregada principalmente em válvulas de exaustão, por possuir característica intrínseca quanto à trabalhabilidade em elevadas temperaturas.

Com essa finalidade, pretende-se, portanto, ilustrar como é possível considerar o melhor arranjo entre as variáveis de entrada, ou seja, as variáveis de controle no processo de Torneamento cilíndrico externo da superliga NIMONIC 80A, para a otimização conjunta das variáveis respostas Rugosidade e Comprimento de corte.

1.3. Objetivo

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi estudar o processo de usinagem por torneamento cilíndrico externo da liga a base de níquel Nimonic 80A, utilizando ferramentas do projeto de experimentos como a metodologia de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Respostas para o auxílio à resolução de problemas com múltiplas respostas em experimentos de usinagem, visando analisar qual o melhor arranjo dentre os fatores estudados, tendo como variável resposta a rugosidade superficial (R_a) e comprimento de corte (L_c).

1.3.2. Objetivos Específicos

Os procedimentos são desenvolvidos para atingir os seguintes objetivos específicos:

- 1) Aplicar o Modelo Robusto proposto por Taguchi, bem como Análise de Variância para as médias e a razão S/N em um processo de torneamento.
- 2) Aplicar as técnicas de planejamento de experimento da Metodologia de Superfície de Resposta.
- 3) Aplicar o método “Desirability” para os métodos de Superfície de Respostas e Modelo Taguchi.
- 4) Aprofundamento dos estudos envolvendo a influência dos parâmetros de corte sobre as variáveis comprimento de corte e rugosidade no processo de torneamento.

1.4 Limitações

Não é o intuito deste trabalho abordar todas as questões possíveis sobre o assunto, entretanto, suas limitações servirão como indicações e sugestões para futuras pesquisas nas áreas de otimização de processos e engenharia de materiais.

Nesta pesquisa, foi utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta como uma ferramenta para a otimização de um processo de torneamento da superliga NIMONIC 80A Laminado a quente e Solubilizado e Envelhecido. Nada se pode inferir sobre a aplicabilidade desta metodologia sobre outros materiais ou processos de usinagem.

A utilização do Método Desirability é apenas uma possibilidade dentro de um universo de métodos disponíveis. Não se pretende inferir que o Método Desirability é mais eficaz que outros, uma vez que sua escolha deve-se apenas por ser um método clássico e muito utilizado pela comunidade científica.

Por fim, não o intuito do presente trabalho questionar ou criticar alguma ferramenta metodológica utilizada, mas sim apenas a utilização dessas ferramentas como método de otimização do processo de usinagem.

1.5. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 discute sobre processo de usinagem, abordando alguns conceitos que embasam as escolhas das variáveis a serem estudadas, os métodos do projeto de

experimento (DOE), tais como Método de Taguchi, bem como alguns conceitos sobre análise de variância (ANOVA), Superfície de Resposta (MSR) e uma abordagem sobre o método *Desirability*, como o método utilizado para a otimização das variáveis respostas conjuntamente.

O Capítulo 3 aborda os métodos e etapas do projeto experimental, explicando de forma sucinta desde a etapa de definição das variáveis de controle e resposta, passando pela explicação de todo o procedimento experimental e chegando até como os resultados obtidos no torneamento foram trabalhados.

Já no Capítulo 4 apresentam-se os principais resultados obtidos com esta pesquisa, assim como as análises de significância, apresentação gráfica (efeitos dos fatores, superfícies de respostas e gráficos de contorno), principais resultados obtidos para rugosidade e comprimento de corte separadamente e o método de otimização conjunta.

Por fim, no Capítulo 5 encerra o presente trabalho, apresentando sucintamente as principais conclusões obtidas com o estudo, além de recomendar e apontar direções para futuras pesquisas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vive-se em uma época em que as empresas fazem grandes esforços para aperfeiçoar seus produtos de acordo com diferentes critérios para satisfazer as necessidades dos consumidores (MAO; DANZART, 2008). Para isso, muitos cenários exibem a necessidade de otimizar conjuntamente os critérios afim de obter a melhor configuração em um procedimento conhecido como Otimização de Múltiplas Respostas (FOGLIATTO, 2008).

2.1 Processo de Usinagem

Indústrias que fabricam componentes a base de ligas de níquel, aços inoxidáveis especiais (válvulas automotivas), ligas de titânio (turbinas aeronáuticas), caracterizam-se por apresentarem um custo elevado na fabricação das peças usinadas, principalmente em relação ao custo hora/máquina, por este motivo é interessante diminuir os tempos de usinagem das peças e aumentar o uso efetivo das ferramentas (RIBEIRO, 2003; LÓPES DE LACALLE *et al.* 1998).

Tendo em vista a ampla variedade de peças atualmente disponíveis e ao aumento da demanda por usinagem de precisão em altas velocidades, a competitividade da indústria de usinagem aumenta cada vez mais exigindo cada vez mais a procura por um processo de usinagem robusto (YIH- FONG, 2006).

Para Xavier e Adithan (2009) torneamento cilíndrico é o processo que mais se destaca em meio a outros processos de usinagem, se baseando principalmente por meio de uma ferramenta de corte para remoção de material da superfície de uma peça cilíndrica rotativa.

Para Gaitonde *et al.* (2009) o processo de usinagem tem sido utilizado em muitas aplicações tais como a fabricação de engrenagens, eixos, rolamentos, cames, peças forjadas, moldes e matrizes, fazendo com que haja uma redução significativa dos custos de produção, nos prazos e melhoria geral na qualidade do produto.

Segundo Lee e Kwon (2010) para aumentar a eficiência e a produtividade do processo de usinagem, é necessário analisar o tipo de ferramenta de corte e parâmetros

de usinagem onde a melhora de produtividade e eficiência no processo de usinagem pode ser obtido pelo processo otimização. Esse processo de otimização pode ser alcançado quer pela relação empírica de modelagem das variáveis de entrada e saída ou por ferramentas de otimização.

A fim de melhorar o processo, as máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) tiveram como objetivo inicial solucionar problemas da usinagem de peças de grande complexidade, e posteriormente vieram a auxiliar na redução de tempos improdutivos (TZENG *et al.*, 2009). Contudo, a utilização destas máquinas só se torna economicamente viável quando for garantido o emprego eficiente destas máquinas e ferramentas durante o processo de usinagem, ou seja, a eficiência do processo de usinagem depende da utilização de dados de corte otimizados, atualizados e adequados às condições reais de trabalho (RIBEIRO, 1999).

Bons resultados na operação de usinagem estão relacionados com a realização das medições dos componentes desejados, seleção de ferramentas de corte e condições de corte são elementos essenciais no processo de planejamento do processo de usinagem, pois cada material seria influenciada por diferentes parâmetros de usinagem (WANG *et al.* 2007; YIH-FONG, 2006).

A otimização de processos de usinagem tem sido uma das opções, para indústrias manufatureiras, na busca de melhores desempenhos, representados, principalmente, pela redução de custos ou de tempos de fabricação (DINIZ *et al.*, 2001).

2.2 Projetos de Experimentos (DOE – Design of Experiment)

O conceito de Projetos de Experimentos foi introduzido pela primeira vez no início da década de 1920, em uma pequena Estação de Pesquisa em Agricultura na Inglaterra, por um cientista chamado Sir. Ronald Fisher. Ele mostrou como um experimento válido poderia ser conduzido na presença de muitas condições naturais variáveis, tais com: temperatura, condições do solo e chuva. Os princípios do projeto de experimentos inicialmente empregado na agricultura foram adaptados com êxito nas indústrias e nas aplicações militares, desde 1940 (JOHN; JAMES, 1996).

De acordo com Mattos (2004), um experimento é um teste ou uma série de testes nos quais as variáveis de entrada de um sistema são manipuladas para serem identificadas as razões das mudanças nas variáveis de saída. O projeto experimental permite manipular os fatores interferidores em um processo produtivo, fazendo-os variar para avaliar seus efeitos nas características funcionais.

O Projeto de Experimento (*Design of Experiments*, DOE) é uma técnica utilizada para definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística da resposta e o menor custo (ARANDA, 2008).

Montgomery (1997) afirma que antes de iniciar a experimentação é importante estabelecer o planejamento dos experimentos. Esse autor ressalta a importância do domínio do problema por parte de todas as pessoas envolvidas no experimento e, recomenda que durante a execução o processo seja cuidadosamente monitorado para garantir que tudo seja realizado de acordo com o planejado.

A aplicação do DOE ganhou aceitação como uma ferramenta essencial para a melhoria da qualidade de bens e serviços. Este reconhecimento é parcialmente devido ao trabalho de Genichi Taguchi, um japonês perito em qualidade, que promoveu o uso do DOE, na concepção robusta de produtos - os relativamente insensíveis às variações ambientais (JOHN; JAMES, 1996).

Os benefícios do projeto de experimentos incluem a possibilidade da melhoria do desempenho no processo, evitando o método de tentativa e erro para a busca de soluções (KLEIJNEN *et al.*, 2005).

Weidenbacher e Klerx (2003), reconhecem que as técnicas do DOE, oferecem oportunidades ainda maiores de aperfeiçoamento da qualidade e de aumento da produtividade, bem como enfatiza o desenvolvimento e a utilização de modelos de regressão para prever o comportamento do processo sob diferentes condições do processo a certo nível de confiança (ANTONY, 2006).

Um método usual para otimização de problemas com uma única resposta é o procedimento passo a passo, que consiste em modificar um fator enquanto fixa as outras constantes, e observa o efeito desse procedimento, porém, esse processo

experimental tradicional exige um grande número de experimentos a serem realizados para serem alcançados resultados satisfatórios (FUNG; KANG, 2005).

Segundo Mohan *et al.* (2007), os procedimentos experimentais convencionais envolvem alteração de um fator em um momento mantendo todos os outros fatores constantes, resultando numa avaliação do impacto desses fatores separadamente, acarretando em uma maior demanda de tempo, pois exigem um maior número de experimentos, sendo ainda incapazes de fornecer informações sobre interações dos fatores.

Para Hajjaji *et al.* (2010) as técnicas do planejamento de experimento possuem inúmeras vantagens, sendo que dentre elas podem ser dadas por:

- mais informações levantadas nos experimentos planejados, que em relação as abordagens feitas pelo método de tentativa e erro;
- Redução no número de experimentos e conseqüentemente no custo;
- torna possível o cálculo de interações entre as variáveis de controle, levando a um maior conhecimento do processo;
- Facilita a determinação das melhores condições experimentais na tentativa de aumentar a escala de produção.

Segundo Tansel *et al.* (2011) uma das mais importantes ferramentas do planejamento de experimento que vem sendo amplamente utilizada na otimização de processo é o Método de Taguchi.

2.3 Método de Taguchi

Segundo Xiansheng *et al.* (2011) o método de Taguchi é uma poderosa ferramenta de resolução de problema que pode ser usado nos mais variados tipos de processo, que pode melhorar a qualidade de produtos, abrangendo um sistema que leva a uma grande diminuição no custo do tempo com experimentos.

O projeto de experimentos segundo modelo Taguchi envolve o arranjo ortogonal para organizar os parâmetros que afetam o processo e os níveis em que devem ser variados. Determina os fatores que afetam a qualidade do produto, com um mínimo montante de experimentação (KISHORE *et al.*,2009).

Para Taner e Antony (2006) os métodos Taguchi podem ser utilizados para reduzir o tempo com experimentos e produzir informações suficientes para reduzir as variações.

Os projetos de experimentos difundidos por Taguchi consideram dois conjuntos de fatores: aqueles que são controláveis na linha de produção (X_1, X_2, \dots, X_p) e os fatores de ruído (Z_1, Z_2, \dots, Z_p), que são fontes causadoras de variabilidade e podem ser controlados em experimentos de laboratório, mas não são controláveis na linha de produção Barbetta *et al.* (2008), como pode ser visto na Figura 1.

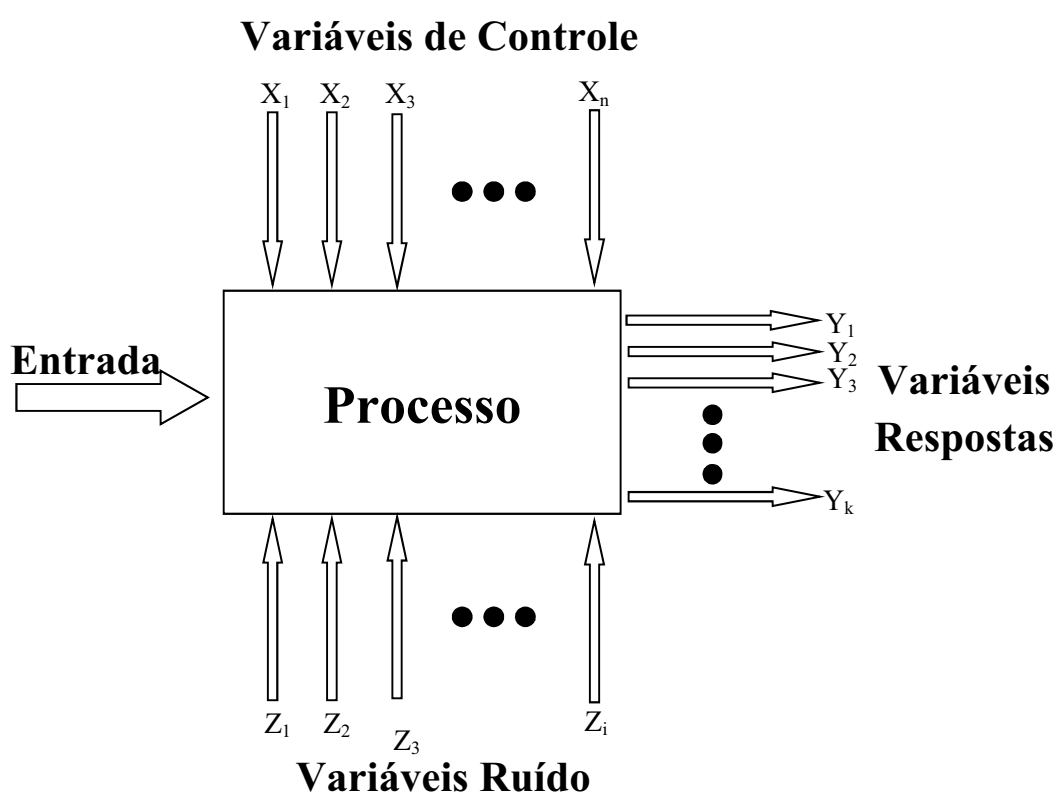


Figura 1- Modelo Básico de um Processo

Fonte: Adaptado de Paiva (2008)

O método experimental de Taguchi investiga como os diferentes parâmetros afetam o desempenho de um processo característico, sendo um processo característico capaz de definir a melhor forma e como deve ser o funcionamento processo (KISHORE *et al.*,2009).

Este método utiliza os conceitos do planejamento de experimento e função perda de qualidade para a realização de um projeto robusto de processos e produtos, com o objetivo de resolver vários problemas de qualidade em indústrias, propondo os

melhores ajustes dos fatores de controle de um produto ou processo insensível a fatores de ruído (XIANSHENG *et al.*, 2011).

Mohan *et al.* (2007) definem que o método de Taguchi pode ser dividido em 4 fases: Planejar, executar, analisar e validar, como pode ser visto na Figura 2:

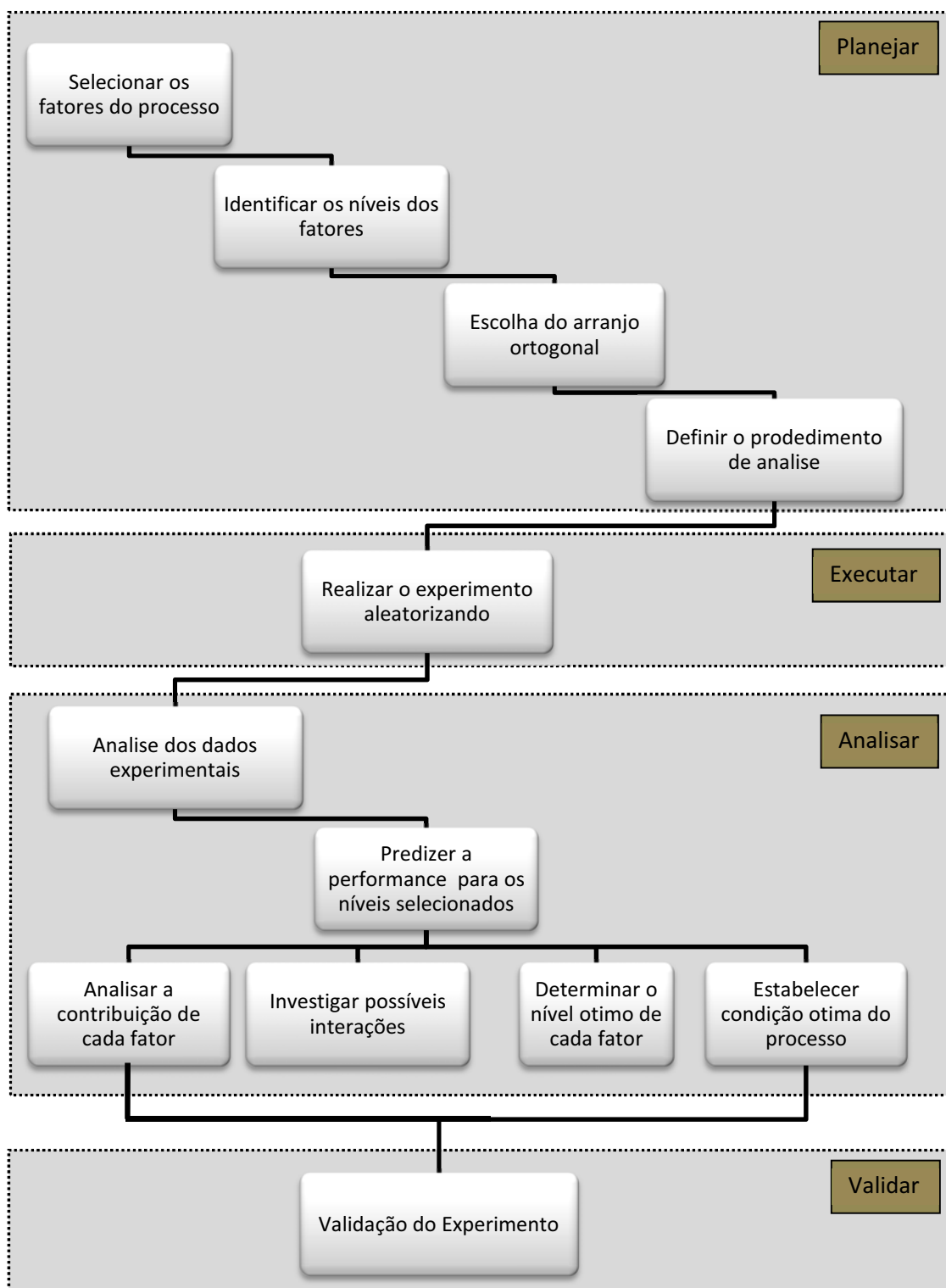


Figura 2: Representação esquemática das etapas envolvidas no processo de otimização de Taguchi

Santos *et al.* (2007) relatam que o método baseia-se principalmente em duas ferramentas: a função perda e o uso do delineamento de experimentos. A primeira determina as perdas monetárias pagas pela sociedade, devido ao desvio da característica de desempenho do produto, do seu valor médio, e a segunda é a utilização do delineamento de experimentos de uma maneira diferenciada, procurando os níveis dos parâmetros que tornam o produto melhor às fontes de variabilidade e ao projeto de tolerâncias de menor custo (SANTOS *et al.*, 2007).

Para Taner e Antony (2006) Taguchi desenvolveu um tipo de matriz especial (arranjo ortogonal) que se pode empregar em várias situações, sendo a quantidade de colunas nessas matrizes o número máximo de fatores que podem ser estudados.

Uma matriz ortogonal é um projeto experimental construído para permitir uma avaliação matemática independente do efeito de cada um dos fatores, permitindo assim analisar os dados coletados de forma eficiente. As características de qualidade a serem otimizadas e a funções alvo, podem ainda serem determinadas em função dos fatores mais importantes, sendo apresentada como solução uma condição experimental adequado (XIANSHENG *et al.*, 2011; TANSEL *et al.*, 2011).

Um exemplo de uma matriz experimental de Taguchi pode ser visto na Tabela 1:

Tabela 1: Ilustração do Arranjo experimental de Taguchi L_{12}

Arranjo Ortogonal L_{12}													
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	\bar{Y}_i	S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	\bar{Y}_1	S/N ₁
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	\bar{Y}_2	S/N ₂
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	\bar{Y}_3	S/N ₃
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	\bar{Y}_4	S/N ₄
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	\bar{Y}_5	S/N ₅
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	\bar{Y}_6	S/N ₆
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	\bar{Y}_7	S/N ₇
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	\bar{Y}_8	S/N ₈
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	\bar{Y}_9	S/N ₉
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	\bar{Y}_{10}	S/N ₁₀
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	\bar{Y}_{11}	S/N ₁₁
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	\bar{Y}_{12}	S/N ₁₂

onde F = parametros de processo, \bar{Y}_i a média das variáveis respostas para cada condição experimental e S/N = razão sinal ruído.

Taguchi ainda classificou as características de desempenho em três categorias: menor é melhor, maior é melhor e nominal é melhor (BESSERIS *et al.*, 2008).

– **Menor é o Melhor**

$$S/N = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{n} \right) \quad (3)$$

onde n é o número de respostas observadas para cada condição experimental, e Y_i sendo o valor da resposta na dada condição experimental, com i inteiro positivo.

– **Maior é o Melhor**

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{1}{Y_i^2} \right) \right] \quad (4)$$

– **Nominal é o Melhor**

$$S/N = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (5)$$

onde $\bar{Y} = \frac{Y_i}{n}$ e $S = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2$

Para a análise dos resultados do método Taguchi foi utilizado a razão sinal-ruído (S/N) onde a (S/N) pode refletir tanto a média quanto a variação (dispersão) das características qualitativas sob uma condição julgamento (TONG; SU 1997).

O desempenho estatístico (S/N) é utilizado para medir o desempenho funcional do produto ou processo, onde, para minimizar a variação da qualidade, é desejável manter o (S/N) o mais alto possível, portanto, quanto mais alto a razão (S/N) melhores serão os níveis de controle ou parâmetros de processo (ANTONY *et al.*, 2006).

A fim de obter a melhor combinação de parâmetros, a análise dos efeitos dos fatores é realizada usando a análise de variância (ANOVA), tendo como objetivo principal identificar quais os fatores que são os principais responsáveis pela variação da razão S/N e da sensibilidade em relação a média.

A análise da variância ANOVA é utilizada como análise de sensibilidade, tendo como principal aplicação a comparação de médias oriundas de grupos diferentes (HACHICHA *et al.*, 2008). Essa análise permite ver o quanto de significância existe

entre os efeitos dos resultados da variação dos grupos, onde se $F_0 > F_{\text{critico}}$, o fator será significativo para o dado nível de significância, caso contrario é considerado não significativo.

A fim de ilustrar o exposto sobre a anova, a Tabela 2 foi construída utilizando dois fatores A e B, bem como sua respectiva interação.

Tabela 2 – Resultados da ANOVA para avaliação da qualidade dos efeitos dos fatores.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀
Fator A	SS _A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Fator B	SS _B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interação AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Erro	SS _E	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
TOTAL	SS_T	abn-1		

Dessa maneira, segundo Zhou et al. (2010) é possível escrever SS_A, SS_B e SS_{AB} generalizando, pela Equação 6:

$$SS_p = t \cdot \sum_{i=1}^q (E_{p,i} - \bar{Y})^2 \quad (6)$$

sendo p representado pelos fatores ou interações entre tratamentos a serem analisados, t o número de repetições da variável resposta para cada nível dos fatores do arranjo ortogonal, q o número de níveis de cada fator e E_{p,i} o efeito dos fatores p para cada nível i a ser estudado.

Já o SS_E é representado pela soma de quadrados devido ao erro experimental, como é observado pela Equação 7.

$$SS_E = \sum_{i=1}^q (\bar{y}_i - \bar{Y})^2 - \sum_{j=1}^k SS_p \quad (7)$$

onde \bar{y}_i é representado pela média das respostas para cada condição experimental, j sendo o número mínimo de fatores a serem analisados e k o número máximo de fatores e interações a serem analisados.

Já (SS_T) é representado pela Soma dos Quadrados Total do arranjo por meio da soma dos quadrados referente aos tratamentos de linha SS_A (fator A), soma dos quadrados referente aos tratamentos de coluna SS_B (fator B), a soma de quadrados devido à interação entre A e B (SS_{AB}), dada pela Equação 8.

$$SS_T = \sum_{j=1}^k SS_p + SS_E \quad (8)$$

Sendo ainda todo o tratamento dado para ANOVA da variável resposta aplicável para a variável sinal/ruído (S/N).

2.4 Método da Superfície de Resposta

A abordagem geral do Método da Superfície de Resposta (MSR) foi desenvolvida no início da década de 50 por Box e Wilson, tendo como base de aplicação a indústria química em que foi obtido considerável sucesso (LIMA, 2006).

O método da superfície de resposta, desde sua criação, vem sendo amplamente utilizado nos mais diversos setores como, por exemplo, Noordin et al.(2007) utilizou o método da superfície de resposta para descrever o desempenho de uma ferramenta revestida no processo de torneamento, Chávez-Valencia et al. (2007) utilizaram o método para modelagem do desempenho de pavimentação asfáltica em relação a cinética do envelhecimento.

Kalathenos et al. (1995) utilizaram o método para estudo sobre o papel de alguns fatores ambientais que afetam o crescimento de *Saccharomyces cerevisiae*, Ghadge e Raheman (2006) e Zabeti et al. (2009) utilizaram o método para otimização do

processo de produção de produção de biodiesel, enquanto que Khayet et al. (2011) utilizaram o método para desenvolver modelos preditivos para a simulação e otimização de osmose reversa no processo de dessalinização.

O MSR é um método comumente utilizado no processo de otimização, em que se pode prever o efeito de cada um dos parâmetros experimentais em uma saída de resposta definida, bem como a localização de todas as interações entre os parâmetros experimentais (BAS; BOYACI, 2007; COWPE et al., 2007)

De acordo com Aslan (2008), Costa e Pires (2007), Montgomery (2001) e Dutra (2007) o método da Superfície de Resposta é uma coleção de métodos estatísticos e matemáticos que são úteis para modelar e analisar problemas dentro de um contexto de processo, tendo como objetivo principal estimar o valor da resposta dentro do intervalo de variação definido para as variáveis envolvidas no estudo.

De acordo com Bas e Boyacı (2007), além de analisar os efeitos das variáveis independentes, o método também gera um modelo matemático, no qual estabelece um relacionamento entre a variável resposta e os fatores de controle que pode ser dado pela Equação 9.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (9)$$

onde y é a variável resposta ou variável dependente, f é uma função desconhecida das variáveis independentes $x_1, x_2 \dots x_n$, n é o número de variáveis independentes e, finalmente, ε é o erro estatístico que representa outras fontes de variabilidade não explicada por f .

Camargo et al (2009) relata que geralmente utiliza-se de uma regressão polinomial de baixo grau em alguma região das variáveis independentes, sendo o menor modelo de regressão polinomial o de primeiro grau, ao qual é dada pela Equação 10:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (10)$$

Para Vitanov et al. (2010), com base na análise dos efeitos (principais e de interação), aqueles que mostraram-se estatisticamente significativos, devem ser incluídos nos modelos desenvolvidos. A superfície de resposta quadrática, com

entradas de projeto variável x_i e x_j e variável de saída y foi formulado pela Equação 11:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (11)$$

\uparrow
 Efeito Linear

\uparrow
 Efeito
 Quadrático

\uparrow
 Efeito da
 Interação

onde β é o coeficiente polinomial, K é o número de fatores e ε é o erro (PAIVA, 2008).

Dehghani et al (2010) sugerem que para desenvolver um modelo eficaz baseado no método estatístico, é necessário seguir os seguinte passos:

- investigar quais parâmetros são importantes para o processo;
- escolha do melhor procedimento experimental, devendo ser concebidos de modo a que levam em conta todos os parâmetros do processo e seus respectivos níveis;
- análise dos resultados experimentais utilizando a ANOVA para determinar quais os parâmetros que apresentam influências significativas sobre as realizações do processo;
- com base na resposta do processo com o modelo estatístico proposto, o processo é otimizado usando as variáveis dentro da faixa prevista pelo modelo.
- validar o modelo testando nas condições ótimas sugeridos pelo MSR conduzindo um experimento final.

Montgomery (2001) propõe alguns passos, porém será utilizado apenas depois de ser realizado um estudo exploratório sobre quais fatores são mais influentes no processo, a partir daí tem-se:

- 1- Planejar fatorial completo 2^2 com os dois fatores mais influentes do processo realizando réplicas no ponto central.

- 2- Cálculo dos efeitos dos fatores, obtendo o modelo matemático e realizar o teste de curvatura, teste negativo para curvatura, significa estar afastado do ponto ótimo, conseqüentemente modelo linear.
- 3- Caso não haja curvatura programar experimento no caminho de máxima inclinação (**steepest ascent or descent**). Repetir procedimento até obter a condição desejada Figura 3.

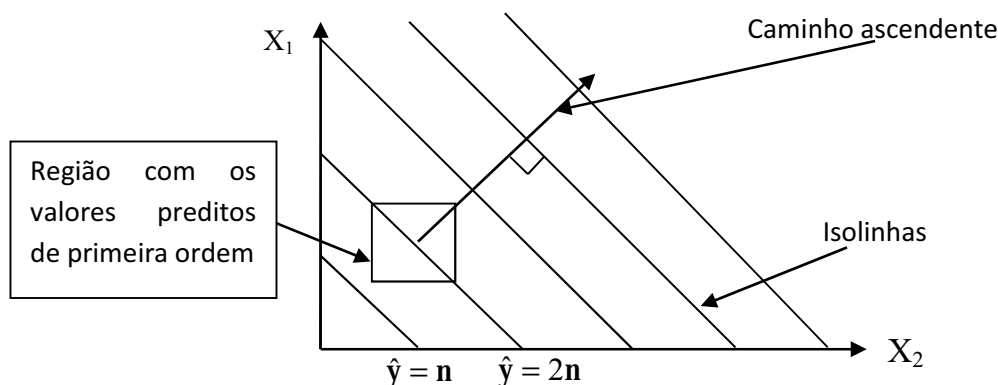


Figura 3: Representação do experimento para o caminho de máxima inclinação

- 4- Teste para curvatura positivo executar experimento estrela (rotacionado) para se obter o modelo quadrático Figura 4.

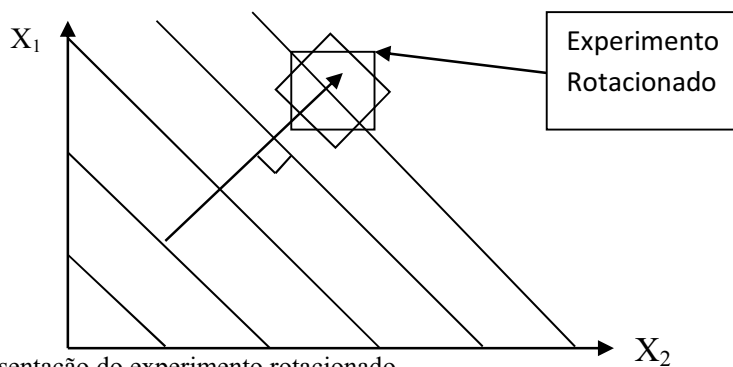


Figura 4: Representação do experimento rotacionado

- 5- Simular o modelo quadrático obtido e encontra o ponto ótimo.

Para Tang et al. (2010) no entanto, a precisão da previsão do modelos empíricos quando preditos utilizando funções polinomiais, geralmente são insatisfatórios, conseqüentemente, a confiabilidade para identificação do ponto ótimo do processo é baixa.

2.5. Otimização de Múltiplas Respostas

No desenvolvimento do produto ou processo, é bastante comum que diversas variáveis respostas sejam de interesse. Problemas envolvendo múltiplas respostas têm se tornado cada vez mais relevantes quando mais de uma característica devem ser avaliadas simultaneamente em um processo (BASHIRI; SALMASNIA, 2009).

Neste caso, a determinação de condições ótimas na entrada variáveis que requerem uma consideração simultânea de todas as variáveis respostas é chamado de otimização de problemas com múltiplas características ou respostas, que segundo Jeong e Kim (2009) o método consiste em três etapas importantes etapas: coleta de dados, construção do modelo e otimização.

Segundo Ortiz et al. (2004), existem muitos métodos criativos discutidos na literatura para o tratamento estatístico de problemas de múltiplas respostas, sendo que o desempenho destas técnicas é dependente ou limitado pelo tamanho e complexidade dos problemas.

Outra abordagem é fazer uma otimização utilizando o projeto de experimentos e uma análise da superfície de resposta, a fim de definir as condições em que as respostas assumem certo valor, máximo ou mínimo. Esta abordagem também considera possíveis interações entre diversos fatores (DELFA, 2009).

A análise de problemas com respostas múltiplas tem sido alvo de um interesse crescente em diferentes áreas do conhecimento. Determinar um conjunto de níveis dos fatores ótimos para as respostas não é um problema trivial, pois dificilmente os níveis dos fatores que são ótimos para uma determinada resposta, serão ótimos para as outras.

Por este motivo é importante considerar, de forma conjunta, o efeito dos fatores na locação e dispersão das respostas, onde em muitos casos, este relacionamento é estabelecido a partir de estratégias experimentais, onde soluções ótimas podem ser encontradas a partir de combinações entre a Metodologia de Projeto de Experimentos e outros procedimentos de otimização (CH'NG et al, 2005; PAIVA, 2006).

Esta estratégia converte um problema de múltiplas respostas em um único conjunto de medidas resolvendo-o como um problema de otimização de uma função-objetivo singular, sendo esses problemas determinados pela função **Desirability**.

A função **Desirability**, proposta inicialmente por Harrington (1965), posteriormente aprimorado por Derringer e Suich (1980), é uma técnica útil para a análise de experimentos em que várias respostas podem ser otimizadas simultaneamente (MONTGOMERY et al, 1996).

Segundo Porocho-Seritan et al. (2011) a função “**Desirability**” em uma abordagem geral consiste em traduzir o desempenho de produtos ou processos em valores d_i que estejam dentro de um intervalo de $0 \leq d_i \leq 1$, sendo que o valor de d_i aumenta quando a i -ésima resposta se aproxima dos limites impostos.

Ela considera as diferentes características de qualidade dos processos ou produtos que estão sendo analisados. Isto é, se quisermos encontrar os níveis dos fatores que levam a um valor máximo a variável resposta é preciso definir $d_i = 1$ para valores altos e $d_i = 0$ para valores baixos da variável resposta. Por outro lado, se o desejado é um valor mínimo da variável resposta, deve-se definir $d_i = 0$ para valores altos e $d_i = 1$ para valores baixos da variável resposta (GRANATO et al, 2011).

Quando um processo não atinge suas metas e fica fora de seus limites de especificação o mesmo recebe valor ‘zero’. Os processos que operam entre os limites de especificação, mas não atingem o valor alvo, recebem valores entre o intervalo $0 \leq d_i \leq 1$ (WU, 2005).

Com base em cada uma das funções **desirability** individuais, em geral é calculada como a média geométrica ponderada dos entes individuais. Desta forma, o problema multicritério é reduzido a um problema único critério de otimização D (Karatapanis et al., 2011).

Derringer e Suich (1980) modificaram essa função **Desirability** onde definiram três classes das funções em três diferentes tipos de variáveis de resposta que são: Nominal é Melhor, Maior o melhor e Menor é Melhor. Para o tipo Nominal é Melhor, onde possui as duas restrições: máximo e mínimo para se atingir um valor alvo (Equação 12):

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^s, & L_i \leq \hat{Y} \leq T_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_s}{T_i - L_s} \right]^t, & T_i \leq \hat{Y} \leq L_s \\ 0, & \hat{Y} < L_i \text{ ou } \hat{Y} > L_s \end{cases} \quad (12)$$

sendo s e t são valores preponderantes da função **desirability** onde de uma maneira geral são valores entre 0,01 e 10, L_i e L_s são limites inferiores e superiores respectivamente do especificado para a i -ésima resposta e T_i é o valor alvo.

Para a condição Menor é Melhor onde se procura minimizar a variável resposta, a função **desirability** é definida pela Equação 13:

$$d_i = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_i > L_s \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_s}{a - L_s} \right]^t, & a \leq \hat{Y}_i \leq L_s \\ 1, & \hat{Y}_i < a \end{cases} \quad (13)$$

onde a é o menor valor possível para a variável resposta \hat{Y} .

Por fim, quando se deseja a maximização da variável resposta Maior é Melhor, a fórmula de transformação empregada é dada pela Equação 14:

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{L_s - L_i} \right]^s, & \hat{Y}_i < L_i \leq \hat{Y} \leq L_s \\ 0, & L_i < \hat{Y}_i \leq L_s \\ 1, & \hat{Y}_i > L_s \end{cases} \quad (14)$$

Para Pal e Gauri (2010), uma vez que cada variável resposta for convertida para um valor d_i , então a função **desirability** D pode ser calculada partir da combinação das respostas transformadas através de uma média geométrica individual, tal como descreve a (Equação 15).

$$D = (d_1(Y_1) \cdot d_2(Y_2) \dots d_k(Y_k))^{\frac{1}{k}} \quad (15)$$

Ainda para Pal e Gauri (2010), a função **desirability** pode ser expressa ainda pela Equação 16:

$$D = d_1^{w_1} \cdot d_2^{w_2} \dots d_j^{w_j} \quad (16)$$

onde w_j é um dado valor de peso entre ($0 < w_j < 1$) para a importância da j -ésima variável resposta, sendo ainda que $\sum_1^j w_j = 1$. Com isso, se todas as variáveis respostas são de iguais importâncias, então w_j assumirá o valor de $1/k$, onde k é o número de variáveis respostas.

Segundo Osborne et al. (1997) e Paiva (2006), quanto mais próximo de 1 estiver D, mais próximas as respostas originais estarão dos seus respectivos limites de especificação, sendo o ponto de ótimo geral do sistema alcançado pela maximização da média geométrica (Equação 15), calculada a partir das funções **desirability** individuais.

Por fim, vale destacar que a função **Desirability** é uma técnica que fornece uma visão do desempenho global de um processo específico, considerando diferentes métricas, onde o objetivo comum é sempre alcançar as metas propostas, sendo um meio eficaz de uma otimização simultânea de um problema com múltiplas respostas (RAISSI; FARSANI, 2009).

3 MÉTODOS

O presente estudo tem como objetivo realizar uma avaliação do comportamento das variáveis respostas quando combinadas entre si, e que venha satisfazer as condições de melhor ajuste do processo de Torneamento Cilíndrico Externo da superliga NIMONIC 80A.

Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica no banco de dados do portal CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e SCIELO – Scientific Electronic Library Online, em que uma série de artigos nacionais e internacionais de diversos autores a respeito do assunto foram analisadas a fim de contextualizar este estudo.

Realizada a revisão, o próximo passo a ser realizado é o de obtenção dos dados que deverão ser desenvolvidos, analisados e otimizados.

Os resultados para Rugosidade e Comprimento de Corte serão obtidos a partir de ensaios de usinagem realizados em um corpo de prova, com diâmetro D (mm) e comprimento de avanço L_f (mm), conforme pode ser observado na Figura 5.

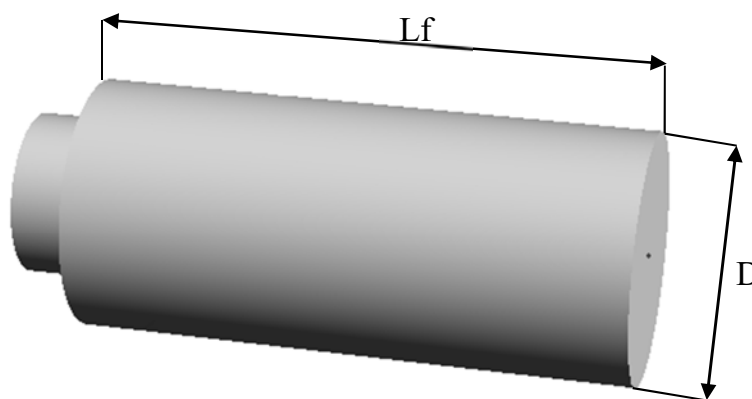


Figura 5 - Representação do corpo de prova para uso nas operações de torneamento

3.1. Fluxogramas do Trabalho Proposto

Todas as etapas desde as definições das variáveis de interesse até a conclusão dos resultados obtidos a partir dos experimentos de torneamento podem ser vistos a partir dos Fluxogramas representados pelas Figuras 6, 7 e 8.

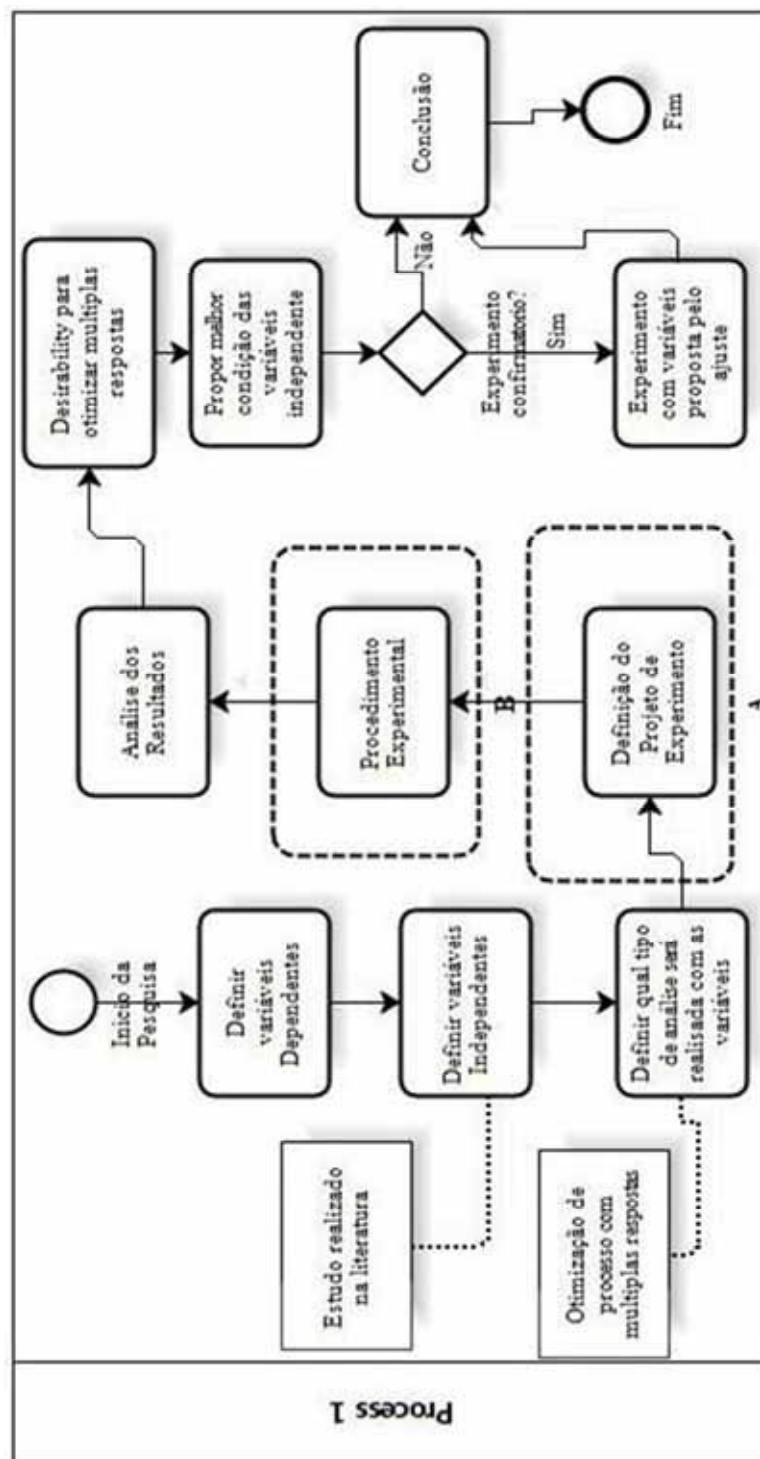


Figura 6: Fluxograma macro das fases de execução do planejamento experimental

A Figura 6 representa de uma forma macro todas as etapas do desenvolvimento do proposto trabalho, mostrando a sequência lógica de todos os passos executados na pesquisa.

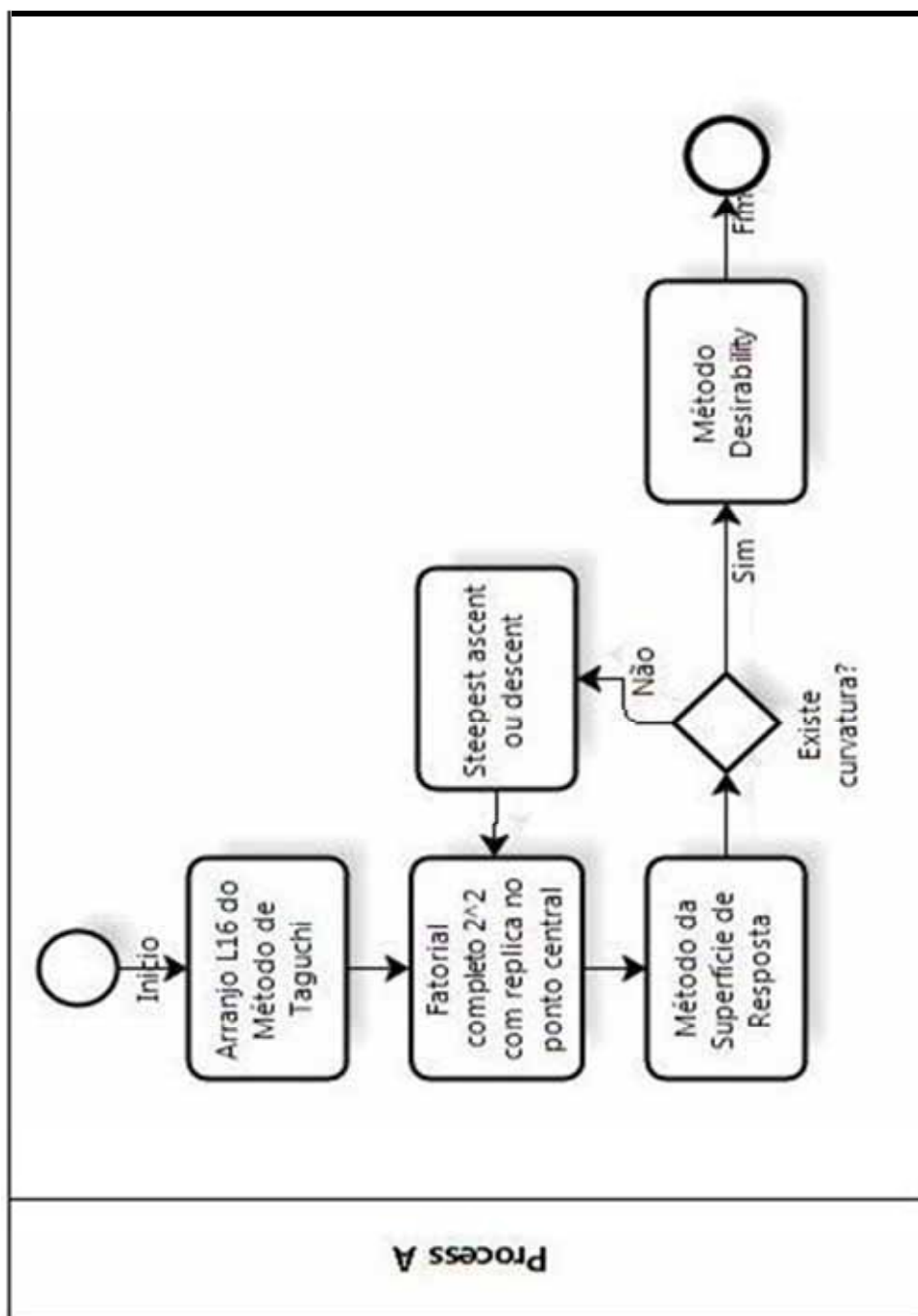


Figura 7: Fluxograma do Processo A da Figura 6

A Figura 7 retrata o desenvolvimento da etapa A do processo representado pela Figura 6, ou seja, mostra de forma clara e sucinta todas as ferramentas do planejamento de experimentos utilizada pelo pesquisador, desde o planejamento do arranjo ortogonal de Taguchi, passando pelo método da superfície de resposta, até chegar no método de otimização com múltiplas respostas (**desirability**).

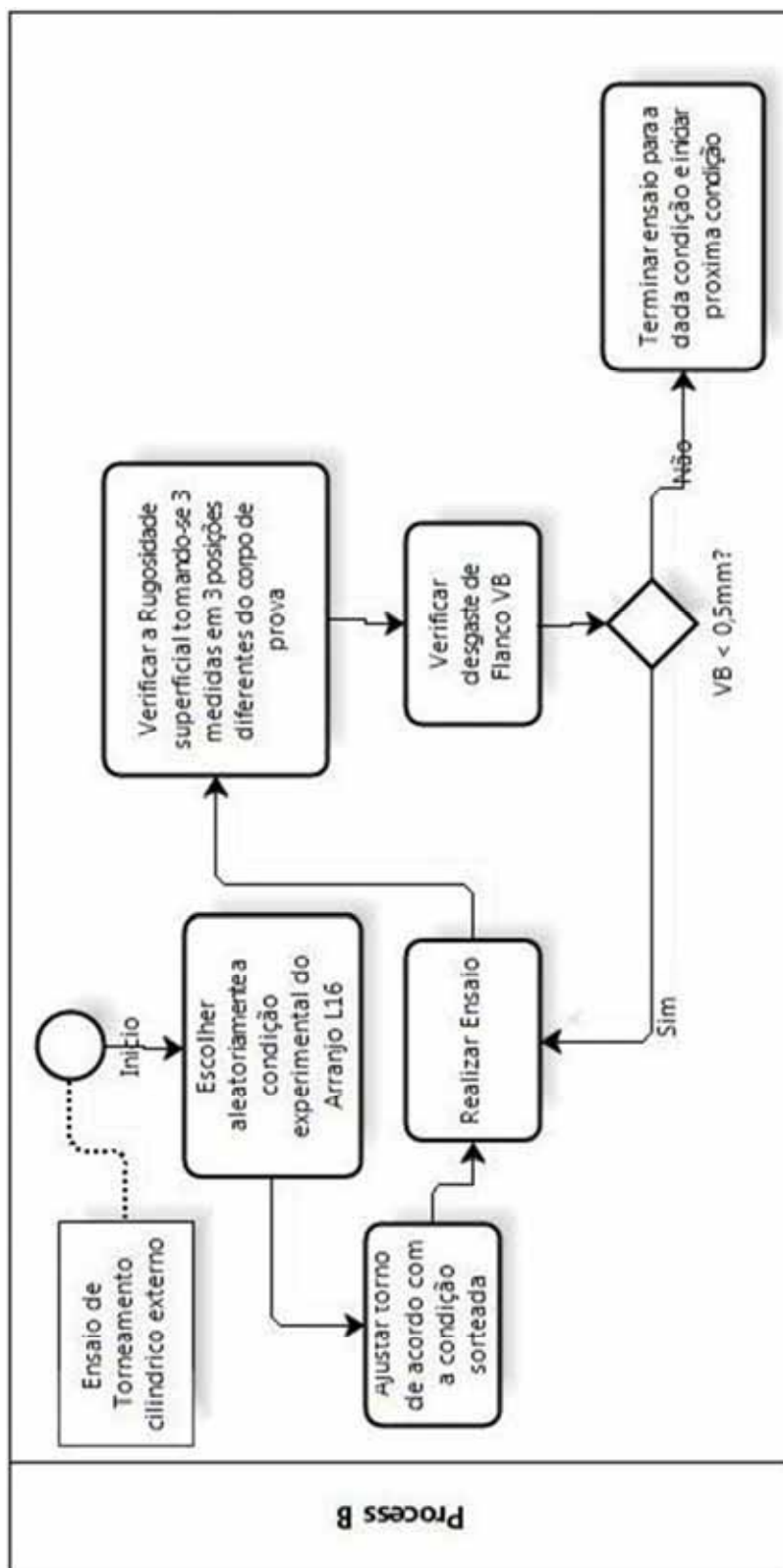


Figura 8: Fluxograma do Processo B da Figura 6

Já a Figura 8 retrata o desenvolvimento da etapa B do processo representado pela Figura 6, representando todo o processo de coleta dos resultados da rugosidade e

comprimento de corte, dentro do planejamento experimental de Taguchi representado pelo arranjo ortogonal L16.

3.2. Definição do material Nimonic 80A

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma liga a base de níquel, o NIMONIC 80A cuja composição química está especificada no Quadro 1.

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	1,0	-	0,35	0,35	0,007	-	-	-	0,06

Quadro 1 - Composição química da liga à base de níquel utilizada no presente trabalho.
Fonte: Adaptado de Faria (2007)

A liga Nimonic 80A nada mais é do que modificações da liga já existente contendo 80% Ni e 20% Cr com adições de titânio e alumínio para viabilizar o endurecimento por precipitação de partículas. Esta liga é classificada como superliga sendo muito utilizada na indústria automotiva principalmente em válvulas de exaustão por possuírem grande resistência ao calor a um amplo intervalo de temperatura.

Sua composição química com elevado teor de elementos de liga confere excelentes propriedades mecânicas e térmicas às superligas, mas dificultam a realização da usinagem desses materiais (MARQUES, 2007). Sua microestrutura pode ser visualizada na Figura 9.



Figura 9: Microestrutura típica da liga NIMONIC 80A
Fonte: Adaptado de Kim et al (2001)

3.3. Parâmetros de usinagem (Variáveis de Entrada)

Para tanto, a fim de otimizar o processo de torneamento cilíndrico externo e avaliar o comportamento tanto da rugosidade quanto do comprimento de corte, serão considerados os seguintes parâmetros: Velocidade de Corte (v_c), Avanço (f), Profundidade de Usinagem (a_p), Tipo de Pastilha (T_p), Lubrificação (L) e Dureza do Material (d_m).

Sendo assim, todos os parâmetros e seus respectivos níveis são representados pela Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de usinagem com seus respectivos níveis

		Nível 1	Nível 2
A	Velocidade de Corte (V_c)	75 m/min	90 m/min
B	Avanço (f)	0,12 mm/rev.	0,18 mm/rev.
C	Profundidade de Usinagem (a_p)	0,8 mm	1,6 mm
D	Tipo de Pastilha (T_p)	TP2500	CP250
E	Lubrificação (L)	MQF	Abundante
F	Dureza do Material (d_m)	Solubilizado	Laminado

3.3.1. Velocidade de corte

A velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção a sentido de corte.

3.3.2. Avanço

É o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta na direção do movimento de avanço. A taxa de avanço é dada em mm/volta (Figura 10).

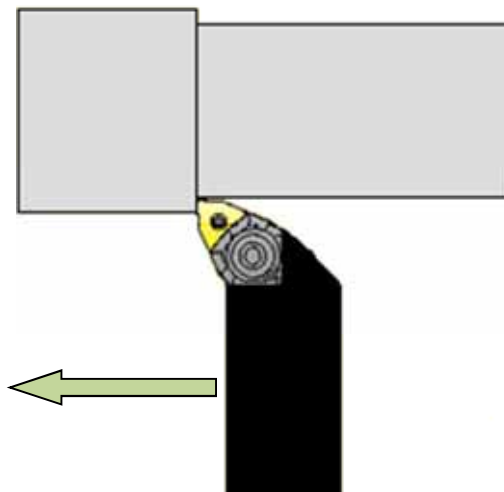


Figura 10 – Representação do avanço (f) ao longo do corpo de prova no processo de torneamento

3.3.3. Profundidade ou largura de corte (a_p)

É a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho. No torneamento propriamente dito, faceamento, aplainamento, fresamento frontal e retificação frontal, a_p corresponde à profundidade de corte. A profundidade de usinagem é uma grandeza dada em (mm) (Figura 11).

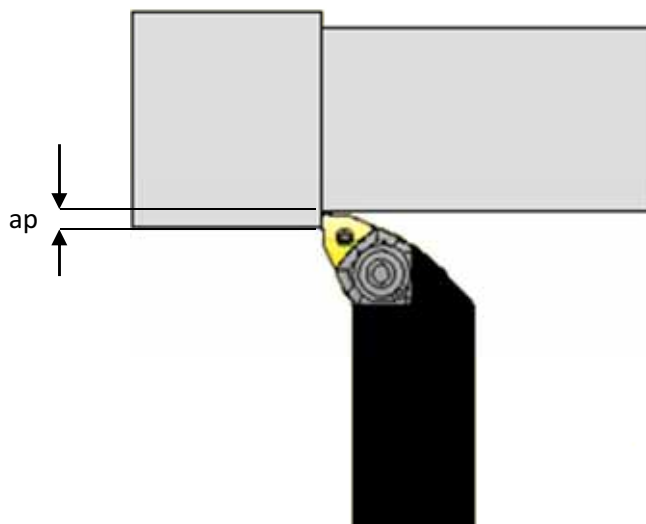


Figura 11 – Representação da profundidade (a_p) ao longo do corpo de prova no processo de torneamento

3.3.4. Ferramenta de corte ou Pastilha

A pastilha é o elemento responsável pelo corte do material, devendo possuir

algumas características como: elevada dureza a quente, elevada dureza a frio bem superior à da peça usinada, tenacidade para resistir aos esforços de corte e impactos, resistência à abrasão, estabilidade química, entre outros.

As pastilhas podem assumir diferentes formas geométricas. Elas podem também ser classificadas por tipo; face simples, dupla face, com ou sem quebra cavaco.

No trabalho em questão, foram utilizados dois tipos de pastilhas ambas com o mesmo tipo de quebra cavaco (-UX), que são:

- TNMG160404R-UX TP2500: Tem como característica uma ampla gama de aplicações de torneamento tanto em aços inoxidáveis, sendo também uma boa opção para ferros fundidos devido sua alta resistência ao desgaste e resistência de aresta.

- TNMG160404R-UX CP250: Possui maior Tenacidade sendo recomendada principalmente em ligas resistentes a altas temperaturas, ou seja, as superligas tais como NIMONIC 80A.

A representação das pastilhas utilizadas nos ensaios de torneamento pode ser vistas na Figura 12.

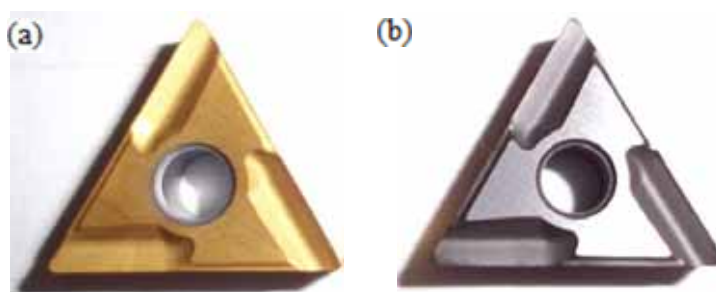


Figura 12: Representação dos dois tipos de pastilhas de usinagem utilizadas, (a) CP 250 e (b) TP2500

3.3.5. Lubrificação

Nos ensaios foi utilizado um fluido de corte desenvolvido para atender às operações de usinagem para metais ferrosos e ligas de alumínio, LUBRAX OP 38 EM. Este fluido consiste de uma microemulsão de concentração de 10% em água. Contém, em sua composição uma mistura de óleos minerais, ésteres, amidas bóricas, tensoativos, biocidas e anti-espumantes. O fluido foi aplicado de forma convencional

(abundante) e para os ensaios com a mínima quantidade de fluido foi utilizado LB1000 – ITW.

3.3.6. Dureza do Material

A dureza do material foi considerada como sendo a maneira com que o material foi processado, uma vez que foi trabalhado com a liga Nimonic 80A solubilizado (35 a 36 HRC) e laminado a quente (33 a 35 HRC), proporcionando duas características diferentes para o material, sendo valores estes fornecido pela Villares Metals S.A.

Sua microestrutura típica pode ser vista na Figura 13, foi feita pelo microscópio óptico, modelo Epiphot 200, Nikon do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

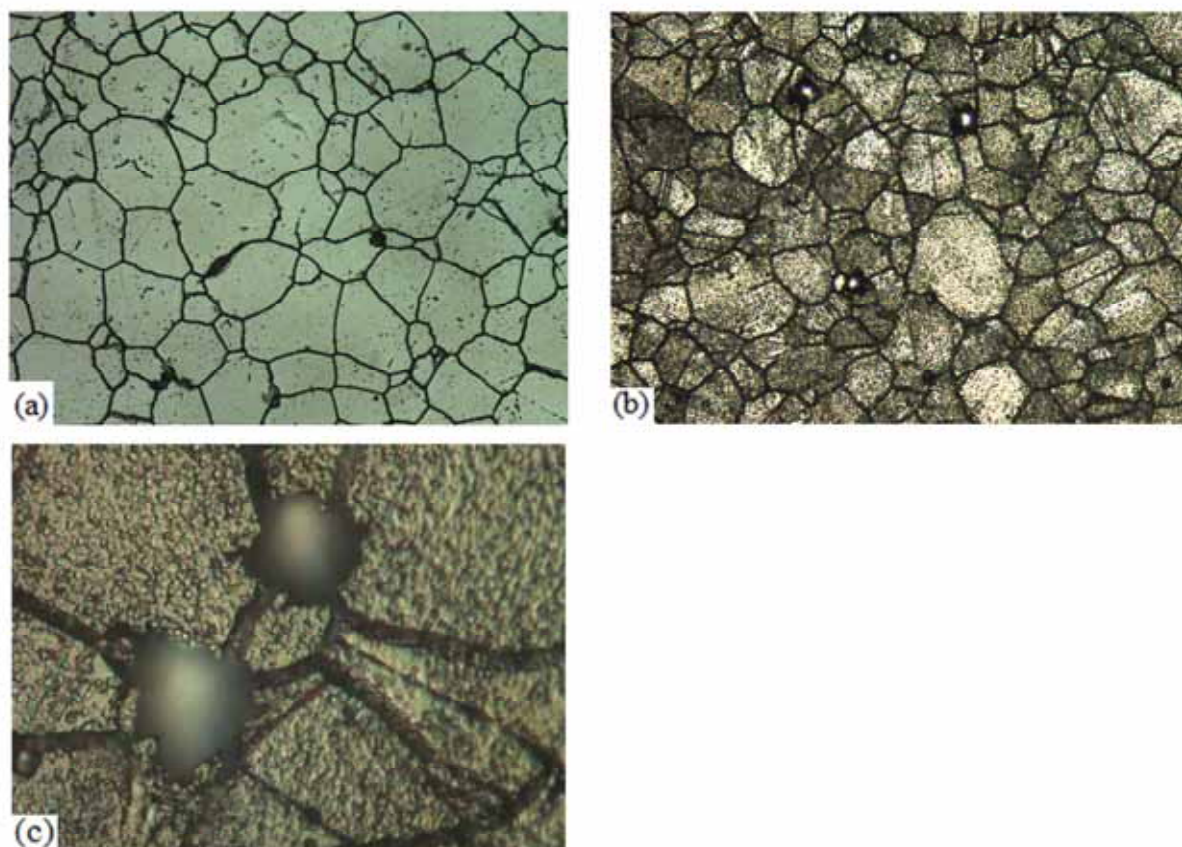


Figura 13: Representação da microestrutura característica do Nimonic 80A em que (a) é o Laminado a quente com ampliação de 200x (grãos equiaxiais), (b) Solubilizado e envelhecido com ampliação 200x (precipitação) e (c) foto do solubilizado com ampliação 1000x (carbeto em sua forma primária “MC”).

3.4. Variáveis Respostas (Variáveis de Saída)

Após serem definidos os parâmetros de entrada, ou variáveis independentes, os critérios escolhidos como variáveis respostas, ou variáveis dependentes, a serem otimizadas serão o Comprimento de Corte (Lc) e a Rugosidade Média (Ra).

Para Faria (2007) a medida do Lc é uma forma eficaz de se analisar a vida da ferramenta nas dadas condições e para Ozel e Karpát (2005) na usinagem de peças, a qualidade da superfície é um dos requisitos mais especificados pelos clientes, onde a principal indicação de qualidade da superfície de peças usinadas é rugosidade da superficial (Ra).

3.5. Elaboração do modelo de Taguchi

Após serem definidos os parâmetros a serem estudados, dependentes e independentes, foi realizado um estudo para saber qual a melhor configuração do arranjo ortogonal de Taguchi que comportasse os parâmetros a serem estudados. Para isso foi necessário o auxílio da Tabela 4:

Tabela 4: Arranjos Ortogonais Padrão de Taguchi

Arranjo Ortogonal	Número de Experimentos	Número de Fatores	Máximo Número de Colunas na Matriz			
			2 Níveis	3 Níveis	4 Níveis	5 Níveis
L ₄	4	3	3	-	-	-
L ₈	8	7	7	-	-	-
L ₉	9	4	-	4	-	-
L ₁₂	12	11	11	-	-	-
L ₁₆	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	-	5	-
L ₁₈	18	8	1	7	-	-
L ₂₅	25	6	-	-	-	6
L ₂₇	27	13	-	13	-	-
L ₃₂	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	-	9	-
L ₃₆	36	23	11	12	-	-
L'36	36	16	3	13	-	-
L ₅₀	50	12	1	-	-	11
L ₅₄	54	26	1	25	-	-
L ₆₄	64	63	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L ₈₁	81	40	-	40	-	-

Fonte: Adaptada de Phadke (1989)

A Tabela 4 representa os tipos de arranjos experimentais de Taguchi bem como o número de experimentos a serem realizados, número máximo de fatores utilizáveis bem como os níveis que os fatores podem ser trabalhados, todos variando de acordo com o arranjo ortogonal disponível.

Tendo feito a análise da Tabela 4 comparando com o número de fatores bem como os níveis expostos na Tabela 3, a melhor escolha foi o arranjo ortogonal L_{16} (Tabela 5), sendo possível utilizar até 15 fatores com 2 níveis, que proporciona uma configuração com um número suficiente de ensaios para as condições e níveis desejados, bem como avaliação de um maior número de interações.

Para a alocação dos fatores em suas respectivas colunas dentro do arranjo experimental L_{16} mostrado na Tabela 5, foi utilizada a Figura 13 que representa o gráfico linear que tem como finalidade mostrar quais colunas os fatores devem ser alocados, bem como quais interações é possível estudar.

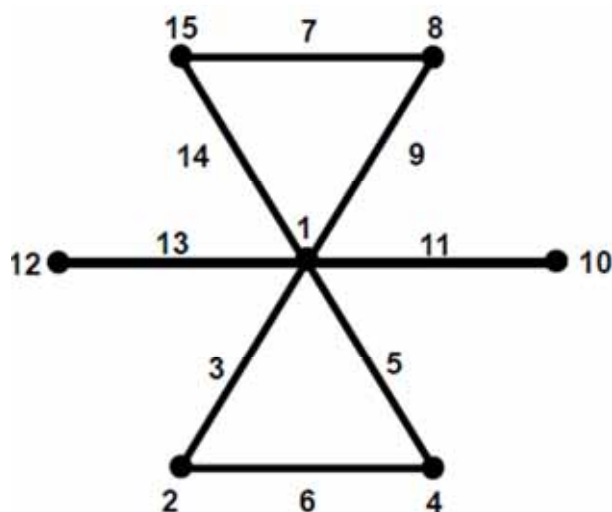


Figura 14: Gráfico Linear para Arranjo de Taguchi L_{16}

Feito a análise com o auxílio da Tabela 4 e Figura 14, pode-se construir a Tabela 5, que é a tabela com o arranjo experimental de Taguchi L_{16} , para que seja alocado os fatores em suas respectivas colunas, bem como suas interações.

Tabela 5: Arranjo ortogonal L16 para 2 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

A partir dos resultados obtidos no processo de usinagem, as etapas seguintes foram as de calcular as médias, a razão Sinal/Ruído (S/N) e seus respectivos efeitos. Como último passo do método de Taguchi, foi realizado a ANOVA, onde a mesma foi utilizada para testar a significância dos efeitos, e para isso foram utilizados dois softwares estatísticos, Minitab[®] 15 e Statistica 7.0.

3.6. Ensaio de Torneamento

Para realizar o torneamento foi necessário efetuar a regulagem da máquina de acordo com os parâmetros pré-estabelecidos encontrados na Tabela (3).

Os ensaios foram do tipo torneamento cilíndrico externo como pode ser visto na representação esquemática da Figura (7), sendo assim realizados em um torno CNC CENTUR 30S, marca ROMI de 25 a 3500 rpm, com potência de 10 kW, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT), Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá (FEG), UNESP (Figura 15).



Figura 15 - Torno CNC Romi CENTUR 30S utilizado para a realização dos ensaios - DMT-FEG-UNESP

A peça foi fixada por meio de três castanhas, apertadas simultaneamente com o auxílio de uma chave. A ferramenta (pastilha) foi presa na porta ferramenta. A máquina foi ajustada no modo automático, conforme parâmetros pré-determinados. Em seguida, liga-se o torno, posiciona-se a ferramenta na posição para zerar o anel graduado, aprofunda a ferramenta no diâmetro dado e inicia o processo como representado na Figura 16.

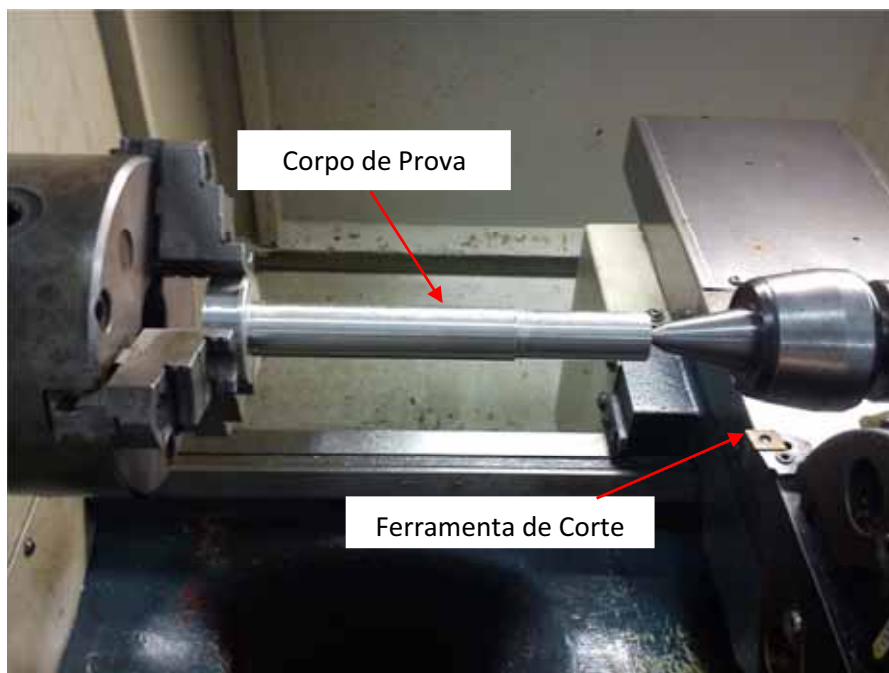


Figura 16 - Representação do ensaio de torneamento cilíndrico externo - DMT-FEG-UNESP

Todo o processo foi conduzido em ciclos, em que cada ciclo terminava quando fosse atingido o comprimento de avanço máximo (L_f), ver Figura (5), onde a partir daí era retirada a peça do torno e analisada a rugosidade da superfície do corpo de prova.

Os ensaios de usinagem foram realizados em um corpo de prova da liga, com diâmetro médio de 54 mm e comprimento de avanço médio de 190 mm, de acordo como recebido.

A rugosidade da peça foi avaliada após cada etapa do processo empregando-se um rugosímetro Mitutoyo SURFTEST-301, realizado no Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, UNESP, Figura 17.

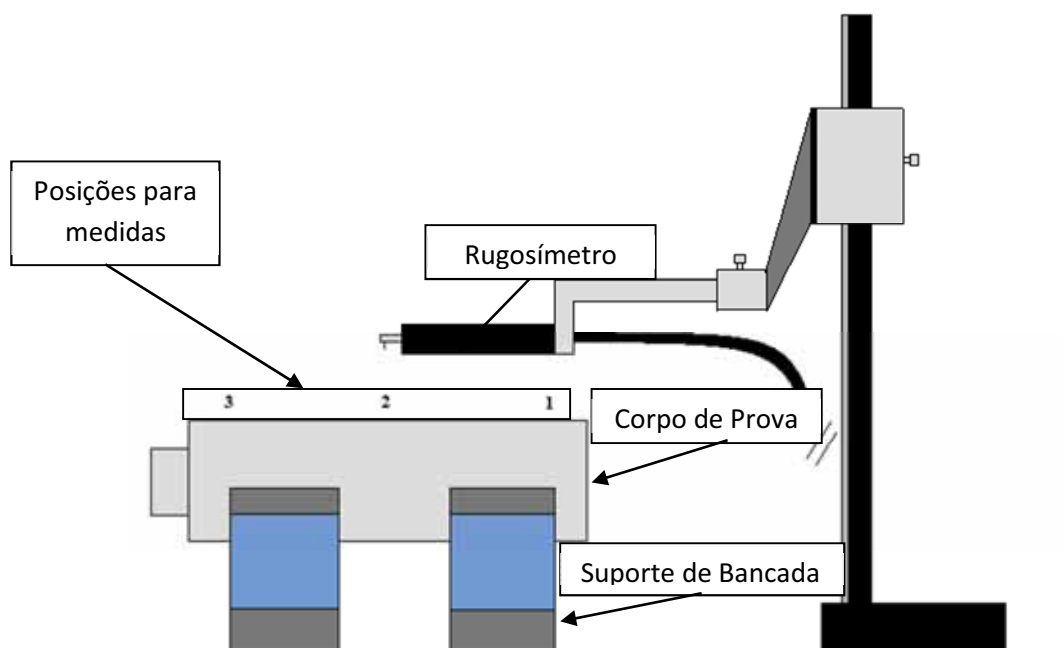


Figura 17: Representação esquemática das medições de rugosidade

O processo de medição da rugosidade iniciou-se após a realização de cada ciclo de torneamento, onde a peça é retirada do torne e levada até uma bancada de medição onde se encontra o rugosímetro (Figura 17).

Colocado o corpo de prova em um suporte de bancada (Figura 17), foram tomadas 3 posição de medida, posição de 1 a 3, onde para cada posição foram tomadas 3 medidas de pontos diferente da mesma posição girando aproximadamente 120° o corpo de prova.

As durações de todos os ensaios ficaram condicionadas ao desgaste de flanco das ferramentas, para garantir que todas as condições experimentais tenham as mesmas limitações quanto à vida da ferramenta. Esse método possibilita o estudo da progressão do desgaste e do comportamento da rugosidade entre todas as etapas dos ensaios.

Os experimentos foram conduzidos de forma que fixado o valor de desgaste de flanco (VB) em 0,5mm, ou seja, a sequência de experimentos para cada condição experimental encerraria apenas no momento em que a ferramenta atingisse o desgaste de 0,5mm, sendo mensurável a partir de uma lupa (8x) graduada em 0,1mm. Caso o desgaste da ferramenta não atingisse o valor de 0,5mm de desgaste, um novo ciclo de torneamento seguia sendo realizado.

Para a obtenção dos resultados de L_c , foi utilizada a Equação 17.

$$L_c = \frac{L_f \cdot \pi \cdot D}{f \cdot 1000} \text{ (m)} \quad (17)$$

onde L_f é dado pelo comprimento de avanço, D o diâmetro do corpo de prova cilíndrico e f o avanço utilizado.

3.7. Planejamento da MSR

A MSR consistiu na construção da matriz do projeto dos fatores do experimento segundo o fatorial completo 2^2 com réplica no ponto central, utilizando os 2 fatores mais significantes no processo, dado pela ANOVA do método de Taguchi.

Após realizar o planejamento do experimento fatorial completo, o próximo passo foi o cálculo dos efeitos a fim de obter o modelo matemático para que possa ser encontrado o ponto ótimo, realizando testes de curvatura para verificar se o arranjo entre as variáveis controláveis estão próximas do ponto de melhor resultado esperado para as variáveis respostas.

No caso proposto, o teste será realizado analisando-se graficamente a presença de curvatura da área do gráfico plotada pelas duas variáveis mais influentes no processo, juntamente com uma réplica no ponto central.

Se o teste de curvatura resultar em um gráfico planar, isso significará que o ponto ótimo encontra-se longe do ponto em que foi retirado os resultados, porém se a área gráfica resultar em uma região não planar, temos o indício de que o arranjo dos parâmetros estudados está próximo da região de melhor ajuste, valendo ressaltar que esses procedimentos foram realizados para ambas as respostas: comprimento de corte e rugosidade.

3.8. Método de Análise dos Resultados Simultâneos

Por fim, para a otimização dessas respostas foi utilizado o método “Desirability”, proposto por Hurrington (1965), para os dois métodos, que consiste em uma análise de experimentos em que várias respostas podem ser otimizadas simultaneamente.

Para a realização do método de otimização foi utilizado o software Minitab[®] 15 e Statística 7.0, em que a análise dos resultados obtidos será realizada no próximo capítulo, propondo o melhor ajuste dos parâmetros para a melhoria do processo de usinagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os ensaios foram conduzidos a partir das condições de corte sugeridas pelo catálogo do fabricante de ferramenta, representadas pelas variáveis B e C, sendo que a variável A é a única a estar acima do especificado para o estudo com o dado material.

O procedimento experimental foi conduzido utilizando duas repetições para cada experimento, considerando que cada repetição já representa a média de uma amostra para $Ra(\mu\text{m})$, cujo procedimento de medição foi estabelecido anteriormente no Capítulo 3.

Utilizando os parâmetros de corte apresentados na Tabela 3 e realizando os experimentos nas condições definidas pela Tabela 5 do arranjo de Taguchi, pode-se então construir a Tabela 6, onde se observam os resultados obtidos tanto para a rugosidade (Ra) quanto para o comprimento de corte (Lc).

Tabela 6: Resultados obtidos com os experimentos de torneamento cilíndrico

Experimento	Colunas						Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra Médio (μm)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Lc Médio (m)
	1	2	4	8	10	15						
1	F	A	B	D	C	E	1,88	1,74	1,81	483,9	302,8	393,4
2	1	1	1	2	2	2	1,51	1,93	1,72	975,3	1215,4	1095,4
3	1	1	2	1	1	2	3,32	3,73	3,53	241,3	166,5	203,9
4	1	1	2	2	2	1	2,4	3,08	2,74	392,9	283,1	338,0
5	1	2	1	1	2	2	1,39	1,73	1,56	245,3	203,0	224,2
6	1	2	1	2	1	1	1,66	1,46	1,56	372,7	348,9	360,8
7	1	2	2	1	2	1	3,85	4,52	4,19	151,6	159,0	155,3
8	1	2	2	2	1	2	2,25	2,51	2,38	326,9	392,7	359,8
9	2	1	1	1	1	2	3,36	2,35	2,86	184,3	229,7	207,0
10	2	1	1	2	2	1	1,4	1,57	1,49	713,3	543,8	628,5
11	2	1	2	1	1	1	2,51	2,92	2,72	145,6	100,4	123,0
12	2	1	2	2	2	2	5,77	4,52	5,15	333,4	262,8	298,1
13	2	2	1	1	2	1	2,2	1,54	1,87	228,5	160,8	194,6
14	2	2	1	2	1	2	1,38	0,91	1,15	1615,6	1062,6	1339,1
15	2	2	2	1	2	2	4,04	3,95	3,99	301,6	135,9	218,8
16	2	2	2	2	1	1	3,64	4,01	3,83	269,6	426,3	348,0

4.1. Variável Resposta Comprimento de corte

4.1.1. Comportamento de Lc em relação à Média

Com os resultados da Tabela 6 e o auxílio do software estatístico Statistica 7.0 foi possível elaborar o gráfico da Figura 17 que representa os efeitos de cada fator e interação em relação a variável resposta Lc.

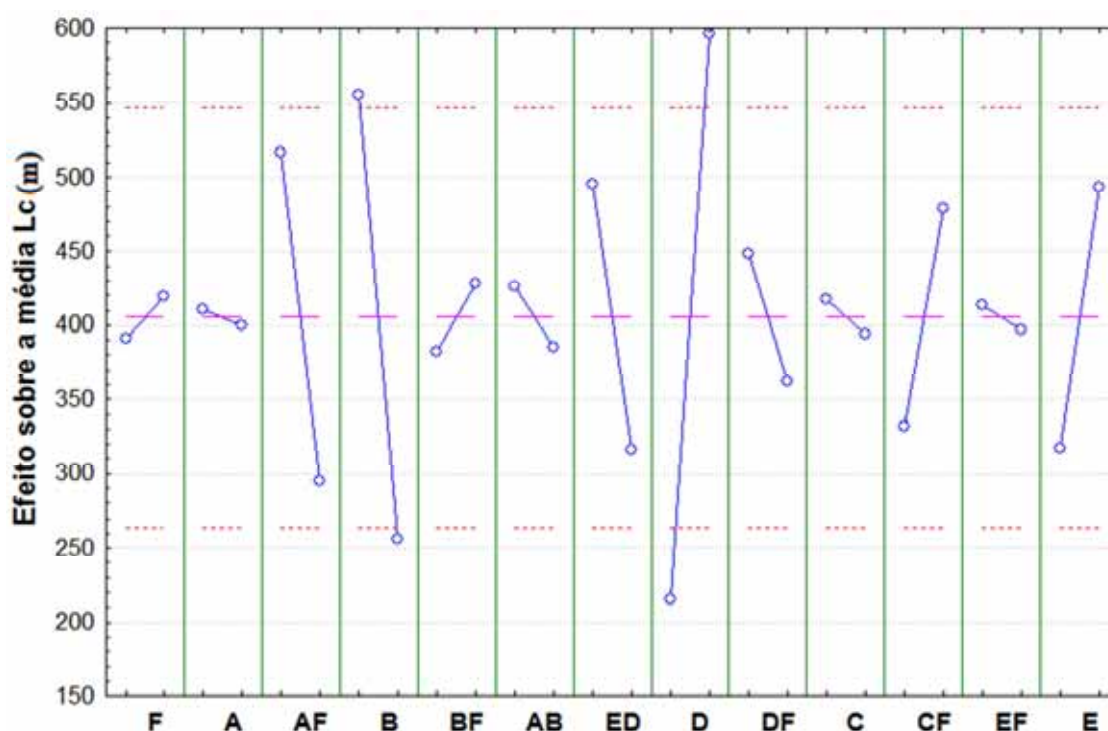


Figura 18: Efeito dos fatores sobre a média Lc

Na Figura 18, são listados os efeitos que cada fator exerce sobre a variável resposta, sendo demonstrada em valores médios, onde nitidamente pode ser observada uma diferença de amplitude entre os níveis dos fatores B (avanço) e D (tipo de pastilhas), em relação aos demais fatores, sendo ainda os únicos fatores a excederem a barreira de $\pm 2\sigma$ (desvio padrão), levando a conclusão de serem os dois fatores mais influentes em relação ao Lc.

Pode-se perceber ainda que o fator E (Lubrificação) em relação aos fatores A (velocidade de corte), C (profundidade de usinagem) e F (dureza do material), apresenta-se com maior influência no processo, vale ressaltar, que quanto maior a

amplitude entre a reta formada pela média da variável resposta no nível baixo até o nível alto em relação à reta central (reta média), maior será o efeito dos fatores sobre a variável resposta.

É possível ainda identificar na Figura 18, forte influência de interações entre alguns fatores, tais como: velocidade de corte x dureza do material, tipo de pastilha x lubrificação e profundidade de usinagem x dureza do material.

Para tanto, ao observar a Figura 18, ao se ajustar os parâmetros tipo de pastilha e lubrificação ambos para o nível alto, em média pode-se alcançar maiores valores de comprimento de corte, já para o fator avanço, é necessário utilizar ao nível baixo, ou seja, para se alcançar maiores valores de Lc deve-se utilizar a ferramenta CP250 e lubrificação abundante, juntamente com a variável avanço em 0,12mm/revol.

Porém, para se fazer a análise de quais fatores e interações realmente exercem alguma influência no processo de torneamento que tenha significância estatisticamente comprovada, foi utilizado a ferramenta estatística ANOVA, sendo o grau de confiança da influência de cada fator determinado por meio do teste F. A análise dos resultados obtidos está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: ANOVA para o Lc em relação à média

Fatores	Seq SS	DF	Adj Ms	F	P
F	6407	1	6407	0,16063	0,69329
A	940	1	940	0,02357	0,87968
AF	393567	1	393567	9,86716	0,00564
B	718880	1	718880	18,0231	0,00048
BF	16640	1	16640	0,41717	0,52650
AB	13160	1	13160	0,32993	0,57281
ED	255451	1	255451	6,40445	0,02092
D	1160933	1	1160933	29,1059	0,00004
DF	60026	1	60026	1,50492	0,23572
C	4143	1	4143	0,10387	0,75094
DF	171728	1	171728	4,30540	0,05260
EF	2215	1	2215	0,05552	0,81638
E	246607	1	246607	6,18271	0,02294
Erro	717959	18	39887		

Através do teste F pode-se afirmar com 95% de confiança que os fatores: avanço, tipo de pastilha e Lubrificação exercem grande influencia sobre a variável resposta comprimento de corte. No caso do todos os fatores que apresentarem valores de p-

value muito próximo do desejado ($p \leq 0,05$) para o dado intervalo de confiança, são considerados como sendo fatores significantes.

A partir dos resultados da Tabela 7, foram tomados os dois fatores mais influentes no processo que foram os fatores B (avanço) e D (tipo de pastilha), para que se possa visualizar melhor o comportamento das mesmas, dado pela Figura 19 e Figura 20.

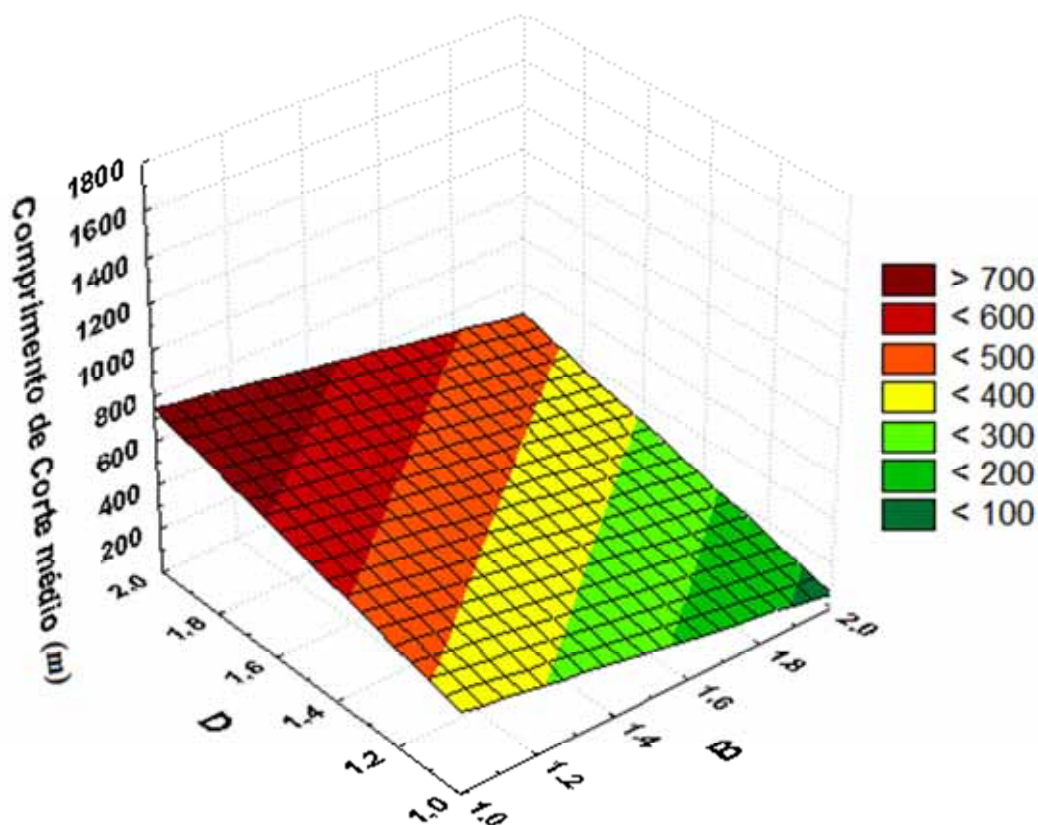


Figura 19: Comportamento do tipo de pastilha vs avanço em relação ao comprimento de corte

A Figura 19 representa o comportamento do L_c em função dos fatores avanço e pastilhas, em que se pode concluir que quanto menor o avanço utilizado no ensaio de torneamento, utilizando a pastilha CP250, maior será o comprimento de corte. Isso se deve ao fato da pastilha CP250 possuir maior resistência a abrasão e conseqüentemente ao calor, prolongando assim a vida da ferramenta e proporcionando um maior comprimento de corte. O mesmo comportamento pode ser visto a partir da Figura 20, que nada mais é que o gráfico de contorno representando os níveis de L_c alcançado em metros.

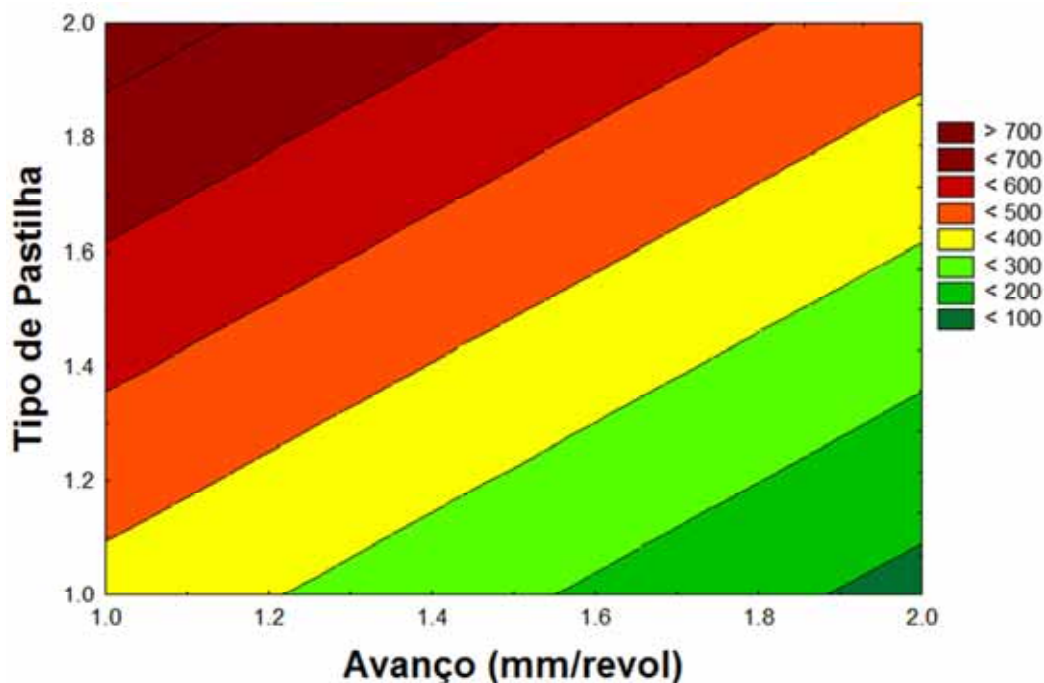


Figura 20: Representação do Gráfico de contorno para o comportamento do tipo de pastilha vs avanço em relação ao comprimento de corte

As Figuras 19 e 20 revelam que as variáveis possuem grandezas inversamente proporcionais, ou seja, para se alcançar a condição que aumente o L_c , devemos trabalhar com o nível 2 da ferramenta e nível 1 para avanço, sendo ainda a pior condição encontrada quando o avanço se encontra ao nível 2 e a ferramenta ao nível 1.

De fato, a ferramenta teve grande importância no processo, uma vez que a ferramenta modelo TP2500 é uma ferramenta produzida para usinagem de aços inoxidáveis, sendo empregados também em ferros fundidos, ao passo a CP250 é uma ferramenta específica para o tipo de material utilizado nos experimentos, ou seja, feitos para a usinagem de superligas, tais como a NIMONIC 80A cuja característica é a de possuírem grande resistência ao calor.

Essa resistência ao calor afeta negativamente a vida da ferramenta, fazendo com que o calor gerado no sistema ferramenta material não seja dissipado, sendo transmitido para a ferramenta, formando uma região de elevada temperatura ao redor da aresta de corte, reduzindo assim o tempo de usinagem da ferramenta devido a perda precoce da aresta de corte.

4.1.2. Comportamento de Lc em relação à Razão S/N

Os resultados foram analisados também em relação ao S/N. Como a variável resposta desejada é um maior comprimento de corte, logo, a equação proposta por Taguchi para o cálculo da relação S/N a ser utilizada foi a de acordo com a relação "Maior é melhor" (ROSS, 1996). Os resultados dos efeitos sobre a relação S/N são mostrados na Figura 21, sendo ainda a análise de variância realizada para os efeitos de S/N mostrada pela Tabela 8.

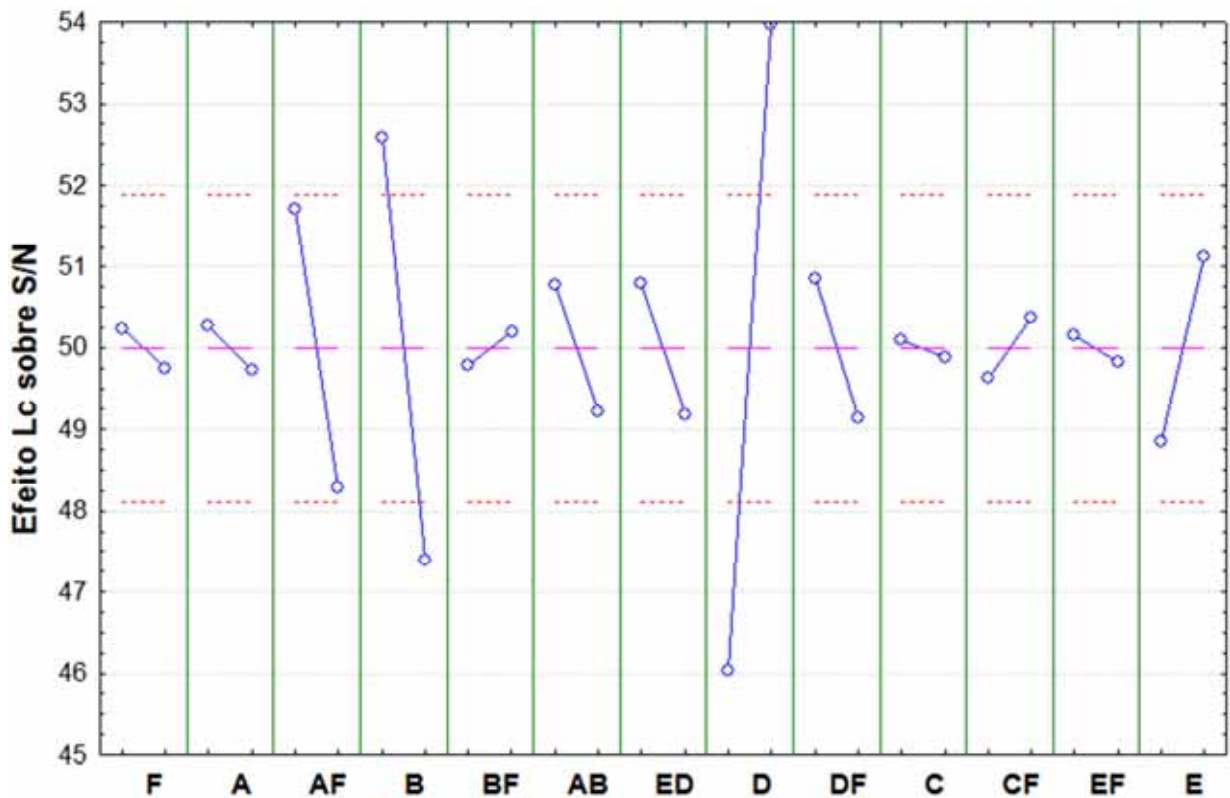


Figura 21: Efeito dos fatores sobre a razão S/N em relação a Lc

Tabela 8: ANOVA para o Lc em relação ao S/N

Fatores	Seq SS	DF	Adj Ms	F	P
F	1,9600	1	1,9600	0,27695	0,60513
A	2,3979	1	2,3979	0,33883	0,56772
AF	93,7251	1	93,7251	13,2438	0,00188
B	214,7485	1	214,7485	30,3451	0,00003
BF	1,3144	1	1,3144	0,18573	0,67161
AB	19,5478	1	19,5478	2,76222	0,11383
ED	20,7234	1	20,7234	2,92833	0,10421
D	504,0898	1	504,0898	71,2306	0,00000
DF	23,2330	1	23,2330	3,28295	0,08672
C	0,3639	1	0,3639	0,05143	0,82315
DF	4,2781	1	4,2781	0,60452	0,44695
EF	0,8614	1	0,8614	0,12172	0,73122
E	41,0745	1	41,0745	5,80405	0,02692
Erro	127,3836	18	7,0769		

Comparando os efeitos dos fatores em relação à média (Figura 18) com os efeitos dos fatores em relação ao S/N (Figura 21), pode se perceber que os resultados foram semelhantes, provando assim que para ambas as análises deve-se utilizar os parâmetros tipo de pastilha e lubrificação no nível alto, já para o fator avanço, é necessário utilizar ao nível baixo para alcançar maiores valores de comprimento de corte, bem como a forte o aparecimento de forte influencia de interações entre alguns fatores tais como: velocidade de corte x dureza do material, podendo ser expandido também para o tipo de pastilha x lubrificação.

A diferença entre a comparação entre as duas análises fica em relação à interação entre a profundidade de usinagem x dureza do material, que para a análise comparativa, aparece como resultado significativo para os resultados em relação à média, não figurando como interação significativa em relação à razão S/N.

4.2. Superfície de Resposta para Lc

Utilizando-se de um fatorial completo 2^2 tomando os dois fatores mais influentes do processo, foi possível construir a Superfície de Resposta representada pela Figura 19. Para isso foram utilizados os dados da Tabela 9.

Tabela 9: Tabela do Planejamento Fatorial 2^2 com replica no ponto central para Lc

Experimento	B	D	Lc Médio
1	-1	-1	224,00
2	1	-1	159,05
3	-1	1	380,60
4	1	1	392,80
5	-1	-1	229,10
6	1	-1	152,30
7	-1	1	448,85
8	1	1	330,15
9	0	1	767,56

Após o planejamento e a realização dos experimentos no ponto central vide Tabela 9, foi possível averiguar se houve a presença de curvatura na região estudada ou foi uma região planar.

Vale a pena ressaltar que para a condição experimental nove da Tabela 9 é representado a condição no ponto central e em virtude de o fator tipo de pastilha ser uma variável categórica, foi utilizado a pastilha ao nível 2, sendo assim, optou-se por utilizar a pastilha do tipo CP250.

A fim de ilustrar a presença de curvatura, a Figura 22 foi construída a partir dos resultados da Tabela 9.

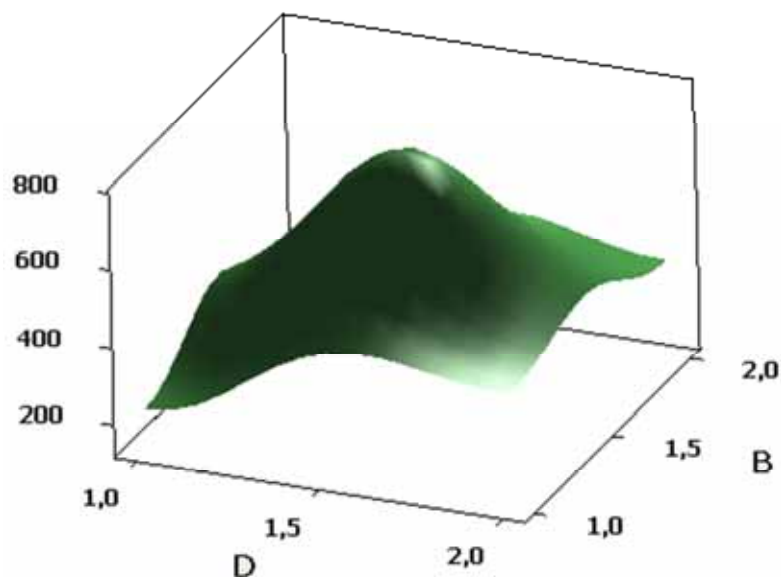


Figura 22: Superfície de Resposta para o efeito do tipo de pastilha e avanço para Lc

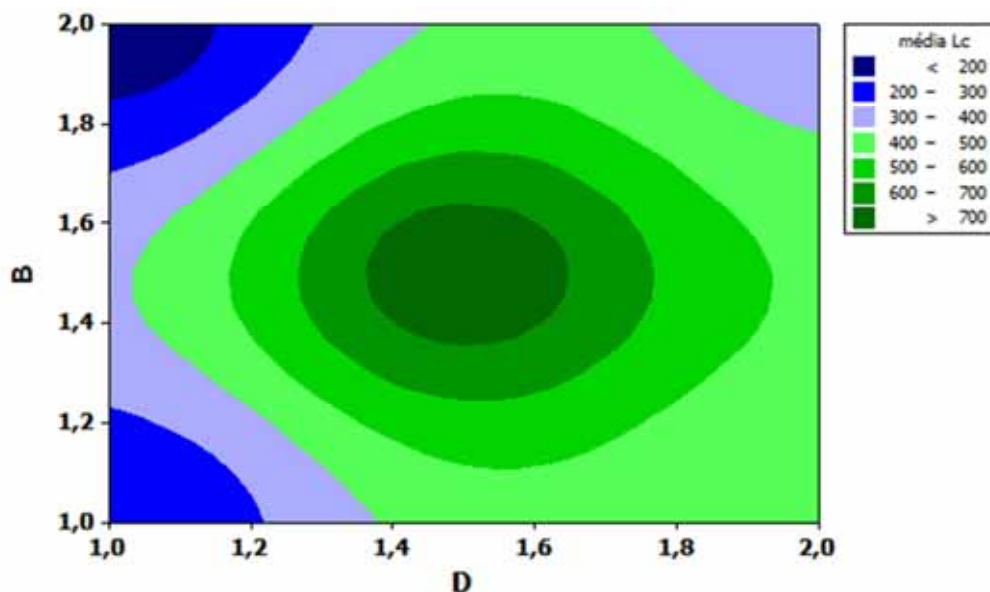


Figura 23: Gráfico de contorno para predição da Superfície de Resposta para o efeito do tipo de pastilha e avanço para Lc

Analisando as condições da Figura 22 e 23 pode ser observado que ao se trabalhar com a ferramenta ao nível 1, obtêm os piores para Lc, isso acontece tanto para a combinação com o avanço ao nível de 0,18mm quanto para nível 0,12mm, porém ao ser utilizado o avanço ao nível de 0,18mm e a pastilha TP2500, pode-se concluir que esta é a pior condição possível, uma vez que esta trabalhando com maiores esforços envolvidos com uma ferramenta teoricamente mais suscetível a deformações térmicas, conseqüentemente menor tempo de usinagem.

Portanto, a uma visão macro do processo e utilizando-se das Figuras 22 e 23, é possível observar que a melhor condição, ou seja, o máximo valor alcançado de Lc expresso em metros é a condição central, onde pode ser observado o ponto de máxima curvatura.

4.3. Variável Resposta Rugosidade

4.3.1. Comportamento da Rugosidade em Relação à Média

A partir dos resultados obtidos do Arranjo experimental de Taguchi L16 mostrado na Tabela 6 e o auxílio do software estatístico Statistica 7.0 foi possível realizar a representação gráfica dos efeitos dos fatores em relação à variável resposta

Ra (μm), tomando-se como base a média dos valores, como pode ser observado na Figura 24.

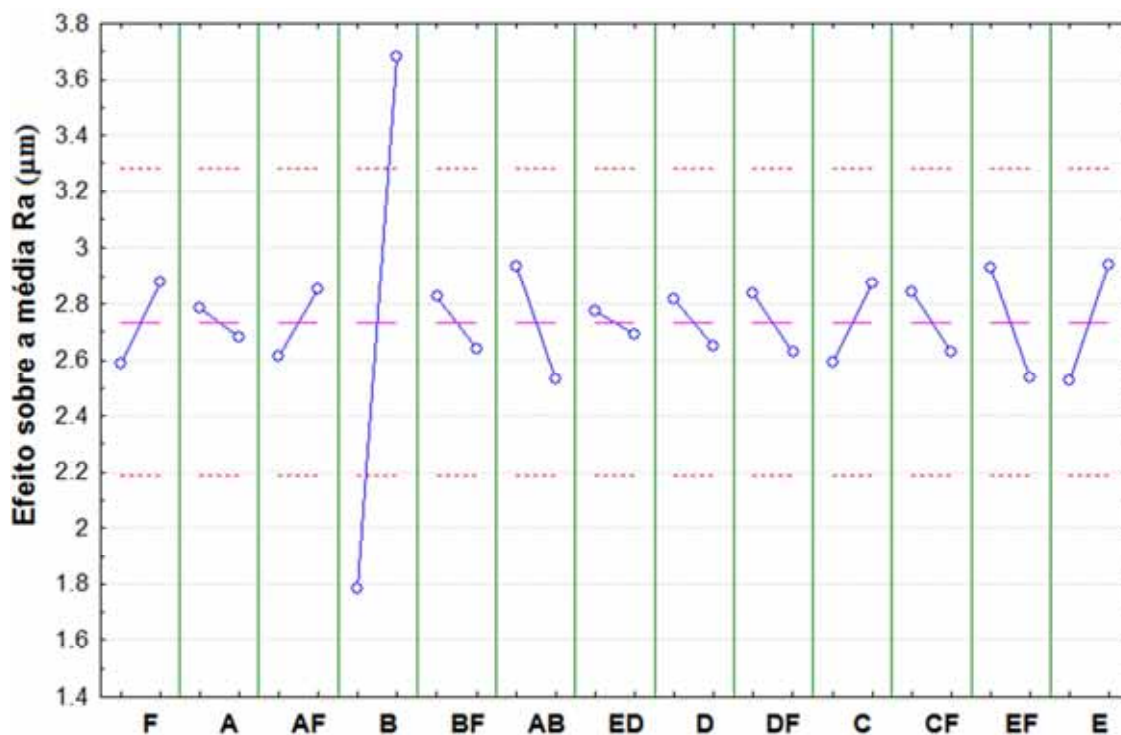


Figura 24: Efeito dos fatores sobre a média Ra

Na Figura 24, o Fator B (avanço) se destaca claramente como o parâmetro dominante do processo, sendo observado ainda que há um aumento drástico na rugosidade, à medida que aumente a taxa de avanço, sendo ainda o único a se mostrar importante nesse processo por ultrapassar a barreira dos $2*\sigma$ sendo σ dado como sendo o desvio padrão.

Para Bouacha et al. (2010), esse resultado era esperado, pois é bem sabido que a rugosidade teórica superficial pode ser predita sendo estabelecida em função do avanço e do raio da ferramenta, como pode ser explicado pela Figura 25 e Equação 17.

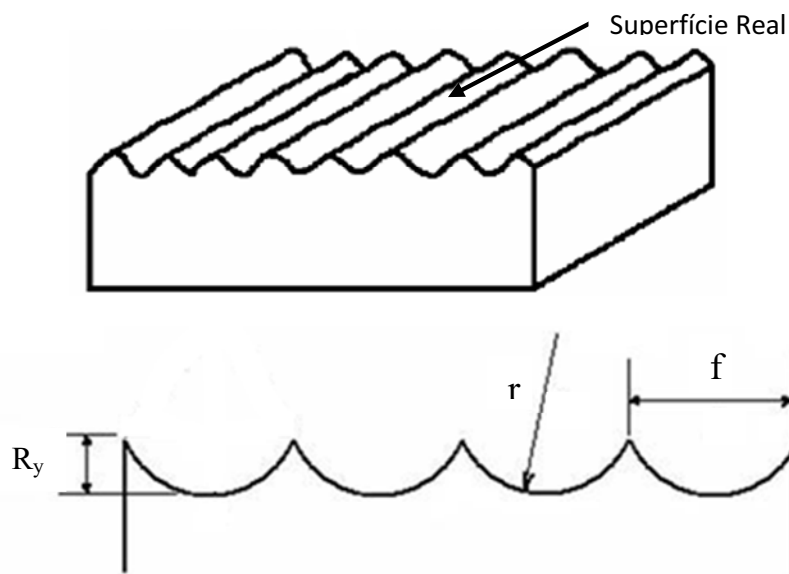


Figura 25: Representação da rugosidade de uma peça (Faria 2007)

$$R_a = \frac{f^2}{32r} \quad (17)$$

onde f é o avanço e r o raio da ponta da ferramenta.

Ao se analisar os resultados juntamente com a Equação 17, pode-se perceber que a rugosidade depende apenas do avanço e raio da ferramenta, uma vez que o raio da ferramenta não variou durante todo o processo de torneamento, o único fator realmente influente seria o avanço, como mostrado pela Figura 24.

Para que se possa comprovar a existência de significância dos resultados obtidos pela Figura 24, foi utilizada a ANOVA dos fatores e das possíveis interações presentes no processo em questão, dado pela Tabela 10.

Tabela 10: ANOVA para o Ra em relação à média

Fatores	Seq SS	DF	Adj Ms	F	P
F	0,68445	1	0,68445	1,14456	0,298828
A	0,08000	1	0,08000	0,13378	0,718809
AF	0,46561	1	0,46561	0,77861	0,389198
B	28,80405	1	28,80405	48,1670	0,000002
BF	0,27011	1	0,27011	0,45169	0,510069
AB	1,28801	1	1,28801	2,15386	0,159469
ED	0,05120	1	0,05120	0,08562	0,773170
D	0,21125	1	0,21125	0,35326	0,559671
DF	0,33211	1	0,33211	0,55537	0,465753
C	0,61051	1	0,61051	1,02092	0,325692
DF	0,36125	1	0,36125	0,60409	0,447116
EF	1,23245	1	1,23245	2,06094	0,168267
E	1,40281	1	1,40281	2,34583	0,143005
Erro	10,76406	18	0,59800		

Para comprovar o exposto pela análise dos efeitos, a ANOVA foi realizada para todos os fatores e interações possíveis, comprovando que o único fator realmente significativo para o devido processo foi à taxa de avanço, mostrado pelo p-valor próximo de zero, significando que com quase 100% de confiança que a rugosidade superficial média é afetada pelo avanço.

Seguindo os resultados obtidos pela Tabela 10, foi tomado os dois fatores mais influentes e averiguado o comportamento dos mesmos em relação ao comportamento da variável resposta, com isso foi possível construir o gráfico da Figura 26.

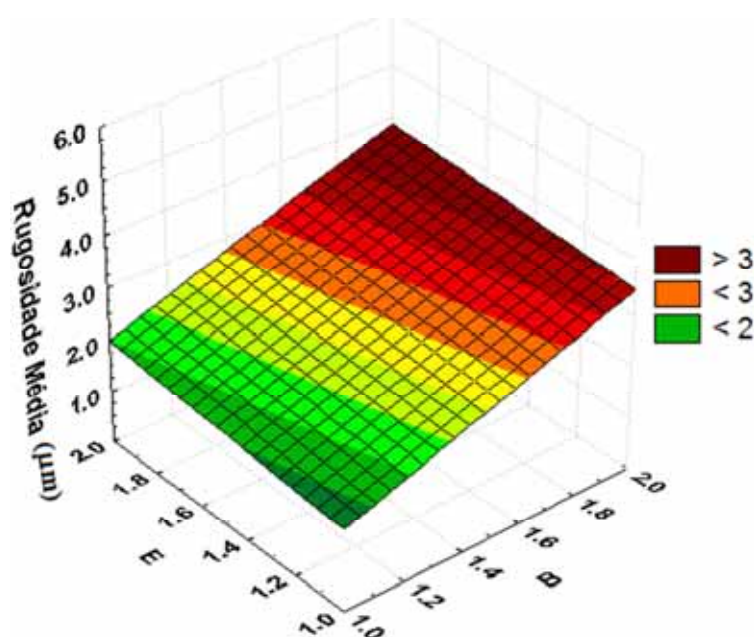


Figura 26: Comportamento da Rugosidade em função do avanço x lubrificação

A partir da Figura 26 nota-se que existe uma forte relação entre as duas variáveis em relação a variável resposta rugosidade. É nítido que ao ser analisado os resultados, a rugosidade sofre grande influencia principalmente ao elevar a variável avanço do nível 1 para o nível 2, isso acarreta em um grande aumento dos valores da rugosidade, porém ao analisar o comportamento em relação ao fluido lubrificante, pode-se observar um pequeno aumento da rugosidade quanto sai do nível de Mínima quantidade de Fluido (MQF) para abundante, sendo valores muito menores quando comparados com a variável avanço.

Esse comportamento não é de se surpreender, pois para Kamata e Obikawa (2007), a usinagem utilizando MQF é quase igual ou muitas vezes melhor do que a tradicional usinagem com fluido abundante, tanto em se tratando de vida da ferramenta como para o acabamento superficial. Contudo, a partir dos pontos ambientais e vista econômico, a mínima quantidade de fluido sempre será uma boa alternativa para o processo, principalmente quando comprovado que o resultado é benéfico para o processo.

Para que se possa ter uma melhor visualização da Figura 26, foi construído a Figura 27 representando as linhas de contorno da variável resposta rugosidade.

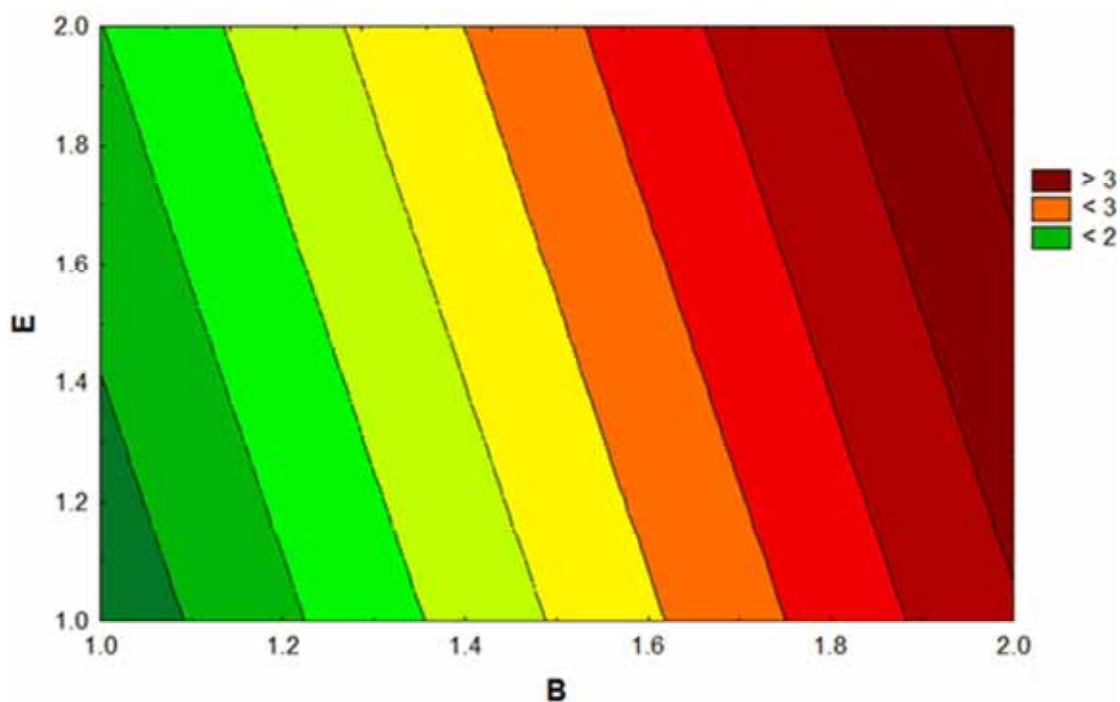


Figura 27: Comportamento do tipo de lubrificação vs avanço em relação a Rugosidade

Comprovando os resultados obtidos pelo Figura 26, pode-se observar que quanto maior o avanço, maior a Rugosidade média da superfície usinada, ficando evidente que ao se trabalhar com o avanço em 0,12mm/revol. e fluido em MQF, pode-se alcançar resultados de rugosidade inferiores a $2\mu\text{m}$, enquanto que ao se trabalhar com avanço em 0,18mm/revol. e fluido abundante, pode-se obter valores de rugosidade superiores a $3\mu\text{m}$.

4.3.2. Comportamento da Rugosidade em Relação à Razão S/N

Tomando-se como base a análise dos efeitos em relação à razão S/N, tendo como a variável resposta desejada a menor Rugosidade, foi utilizada a equação proposta por Taguchi para o cálculo da relação S/N de acordo com a relação "Menor é Melhor", como pode ser visualizada na Figura 28.

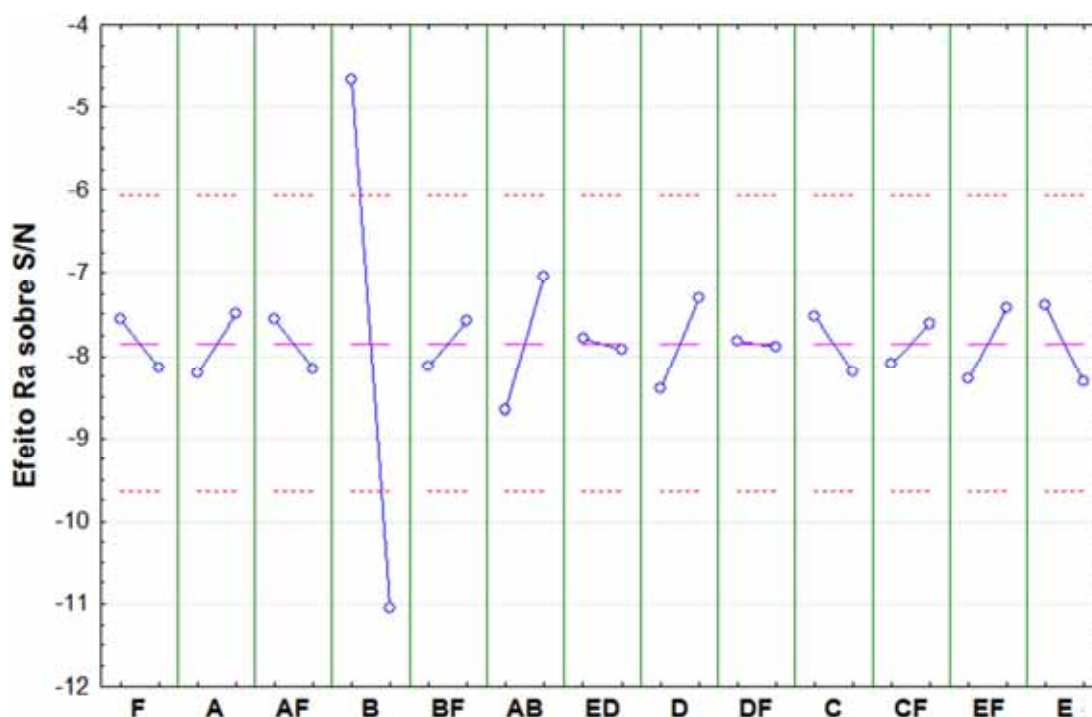


Figura 28: Gráfico dos efeitos de S/N para Rugosidade da superliga Nimonic 80A

A partir da análise da Figura 28 pode-se concluir que apenas a variável avanço mostrou-se influente no processo, uma vez que o avanço é o único fator a mostrar-se com grande amplitude quando se trabalha ao nível alto e baixo, não esquecendo que a condição que minimize a variável resposta em relação a razão sinal

ruído é aquela quem maximize a razão, logo o melhor nível a se trabalhar para esse fator é o nível baixo, ou seja, o avanço deve ser ajustado em 0,12mm.

Para se comprovar esses resultados, foi realizada a ANOVA representada pela Tabela 11, em que pode ser comprovado que o único fator ao nível de 95% confiança o único fator realmente significativo.

Tabela 11: ANOVA para o Ra em relação ao S/N

Fatores	Seq SS	DF	Adj Ms	F	P
F	2,7278	1	2,7278	0,42363	0,523353
A	4,0748	1	4,0748	0,63282	0,436689
AF	2,8618	1	2,8618	0,44444	0,513442
B	328,48	1	328,48	51,0126	0,000001
BF	2,3583	1	2,3583	0,36625	0,552612
AB	20,863	1	20,863	3,24000	0,088645
ED	0,1274	1	0,1274	0,01978	0,889718
D	9,7364	1	9,7364	1,51206	0,234657
DF	0,0531	1	0,0531	0,00825	0,928626
C	3,6461	1	3,6461	0,56623	0,461487
DE	1,9129	1	1,9129	0,29707	0,592418
EF	5,8082	1	5,8082	0,90202	0,354820
E	6,9758	1	6,9758	1,08333	0,311732
Erro	115,91	18	6,4392		

Outra consideração importante é a não ocorrência de nenhuma interação significativa, mostrando que não existe influencia alguma de fatores em conjunto dentro do processo.

Comparando os efeitos dos fatores em relação à média (Figura 24) com os efeitos dos fatores em relação ao S/N (Figura 28), pode se notar que os resultados foram semelhantes, provando assim que para ambas as análises devem-se utilizar o parâmetro avanço em 0,12mm/revol.

4.4. Superfície de Resposta para Ra

Depois de averiguado quais fatores são os mais influentes no processo, tomou-se os dois fatores que apresentaram melhores resultados, utilizando-se de um fatorial completo 2^2 tomando os dois fatores mais influentes do processo, foi possível construir

a Superfície de Resposta para a realização da análise de ocorrência de curvatura, utilizando-se do experimento com replica no ponto central (condição 9).

Tabela 12: Tabela do Planejamento Fatorial 2^2 com replica no ponto central

Run	B	E	Ra Médio
1	-1	-1	1,470
2	1	-1	2,660
3	-1	1	1,620
4	1	1	3,885
5	-1	-1	1,515
6	1	-1	2,795
7	-1	1	1,380
8	1	1	4,235
9	0	1	4,565

Após o planejamento e realizado os experimentos mostrados pela Tabela 12, foi possível averiguar se houve a presença de curvatura no gráfico. Vale à pena lembrar que para a condição experimental nove da Tabela 12 é representado a condição no ponto central e em virtude de o fator lubrificação ser uma variável categórica, foi adotado para o dado fator a condição de nível dois, sendo assim, optou-se por utilizar a lubrificação como sendo abundante, por proporcionar um maior resfriamento entre o conjunto ferramenta/corpo de prova, conseqüentemente, haverá uma diminuição do desgaste da ferramenta, obtendo um melhor acabamento superficial.

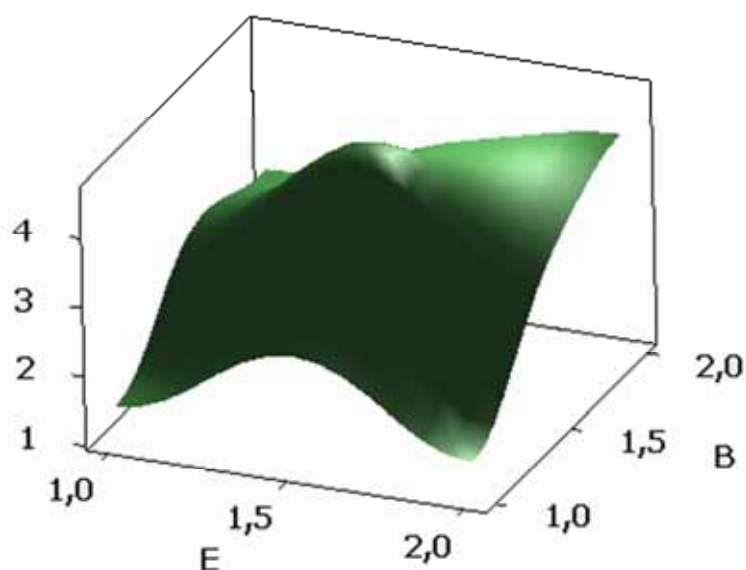


Figura 29: Superfície de Resposta para o efeito da Lubrificação e avanço em relação a Ra

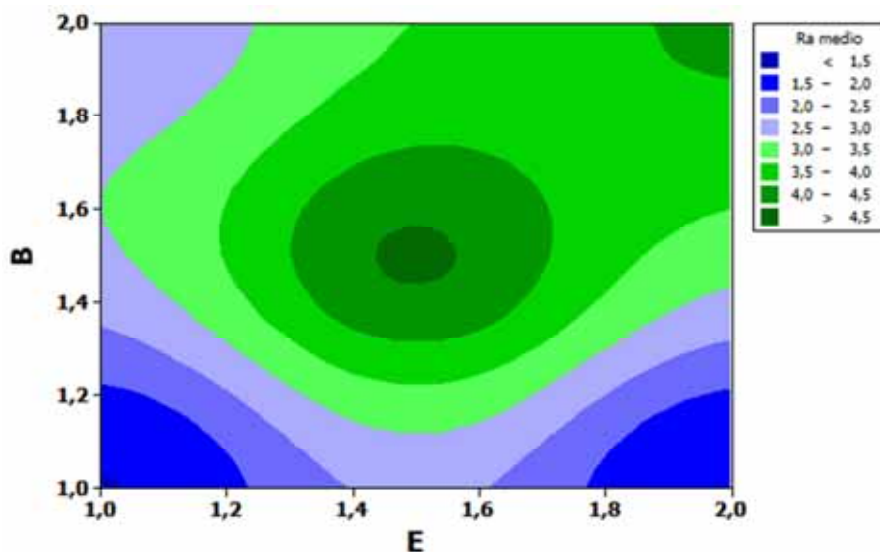


Figura 30: Contorno da Superfície de Resposta para o efeito da Lubrificação e avanço em relação a Ra

Analisando as condições das Figuras 29 e 30 pode ser observado que ao se trabalhar com a lubrificação e o avanço ao nível 1, obtêm se os melhores resultados de Ra, uma vez que se deseja minimizar os valores de rugosidade.

Pode-se observar ainda, mesmo trabalhando com a lubrificação abundante e avanço baixo, é possível se obter resultados satisfatórios, ou seja, obter valores de rugosidade média baixos, inferiores a $2\mu\text{m}$.

Isso acontece devido à falta de interação entre fatores, fazendo com que o fator avanço tenha muito mais relevância que os demais fatores, quando se comparado conjuntamente.

Para tanto, utilizando-se combinação do avanço ao nível de $0,15\text{mm}$ e lubrificação abundante (condição do ponto central), pode-se concluir que esta é a pior condição possível, bem como resultados parecidos podem ser encontrados para a condição onde o avanço é ajustado em $0,18\text{mm/revol.}$ (nível 2) e lubrificação abundante.

Portanto, como conclusão das análises feitas tem-se que a partir dos resultados das Figura 29 e 30, é possível observar que a melhor condição, ou seja, o menor valor alcançado de Ra é a condição em que avanço é ajustado em $0,12\text{mm/revol.}$ e lubrificação MQF.

4.5. Otimização Conjunta

Com os resultados obtidos pelo Arranjo L16 de Taguchi com réplica no ponto central e o auxílio do software Minitab 15, foi possível utilizar da função **desirability** para a análise conjunta dos resultados tanto para a variável resposta comprimento de corte, como para a rugosidade.

Primeiro passo foi analisar na literatura valores alvos para as duas variáveis respostas, onde se pode realizar uma estimativa de valores alvos ideais para a otimização, como pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13: Dados utilizados para a análise conjunto segundo proposto pelo método **desirability**

	Meta	L_i	T_i	L_s
Média Lc (m)	Maximizar	300	1000	1000
Média Ra (μm)	Minimizar	1,5	1,5	2

Utilizando os referidos dados da Tabela 13, foi possível assim definir os limites propostos pelo método e assim obter os valores de d_i individual para cada variável resposta, bem como os valores preditos das variáveis respostas, como pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados dos **desirability** individuais, bem como valores preditos das variáveis respostas

Variável Resposta	Valor Predito	Desirability d_i
Comprimento de Corte (m)	846,7325	0,78105
Rugosidade (μm)	1,3441	1,0000

Para Derringer and Suich (1980), o método se baseia na transformação de cada resposta y_i a uma função **desirability** individual, com valores entre [0,1] sendo possível realizar as seguintes conclusões:

- $d_i = 1$: valor desejável;
- $0,80 \leq d_i < 1$: valor excelente;
- $0,63 \leq d_i < 0,80$: valor está adequado;
- $0,40 \leq d_i < 0,63$: valor aceitável, mas pobre;
- $0,30 \leq d_i < 0,40$: valor no limite de aceitabilidade;

- $0 \leq d_i < 0,30$: valor fora da faixa adequada;

Seguindo a classificação proposta por Derringer and Suich, no caso da variável resposta L_c , cujo valor **desirability** é $d_i=0,781$ pode-se classificar como sendo um valor aceitável tendo em vista que o valor predito seja 846,73 metros. Já para a variável resposta R_a , o valor **desirability** é o valor unitário máximo, sendo classificado como valor desejável, tendo como valor predito de rugosidade 1,3441 μm .

Com os resultados individuais e utilizando-se da Equação 15, é possível verificar a função **desirability** conjunta D , que pode ser vista pela Figura 31.

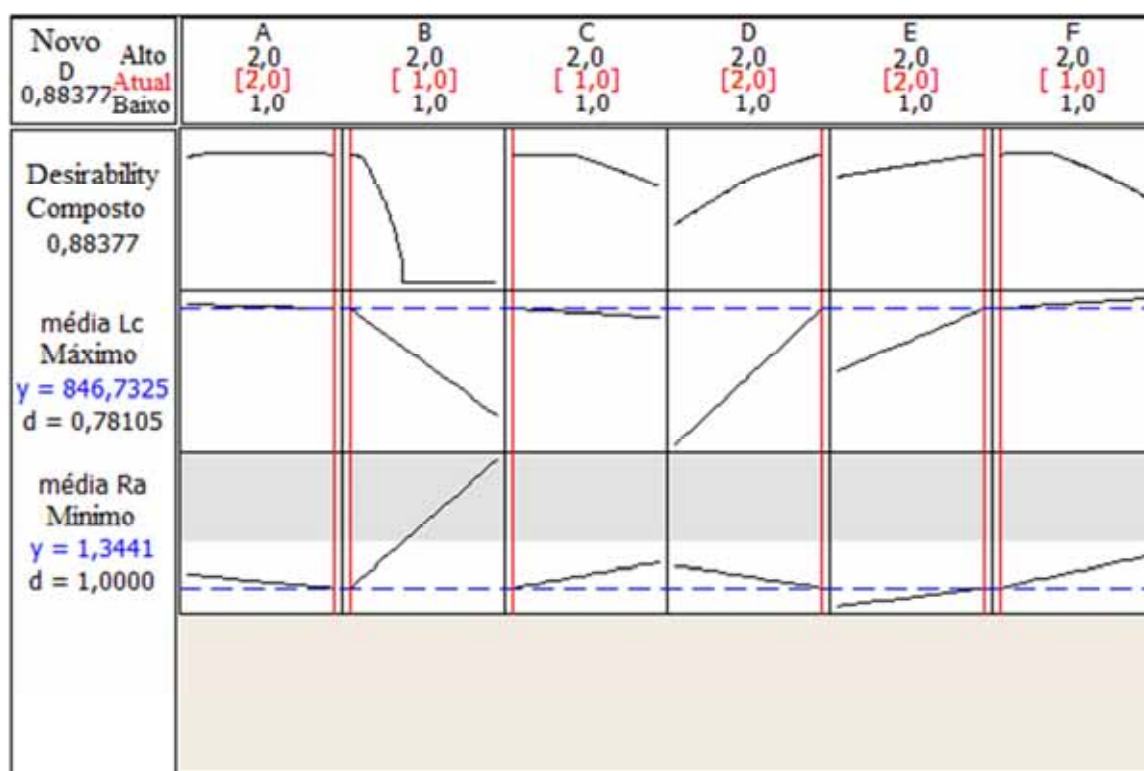


Figura 31: Gráfico para a análise conjunta segundo proposto pelo método **desirability**

Na Figura 31 é possível verificar da função **desirability** conjunta, que se encontra no canto superior esquerdo, ou seja, $D = 0,88377$. Esse valor da função é classificado com sendo excelente em relação aos valores preditos. Pode-se observar ainda na parte superior da Figura 31, os valores em vermelho são os valores preditos pelo método, sendo os valores acima deles os máximos possíveis e os abaixo os mínimos, ou seja, os níveis 1 e 2 do arranjo ortogonal.

É possível ainda extrair da Figura 31 os melhores níveis dos fatores para que se alcance o melhor resultado combinado entre as respostas, ou seja, os valores que otimizem o processo. Para o processo em questão o método propõe a utilização da variável velocidade de corte em 90m/min, o avanço deve ser ajustado em 0,12mm/revol., já a profundidade de usinagem deve se encontrar em 0,8mm, a pastilha utilizada deve ser a CP250, em fluido MQF e material solubilizado.

Pode-se notar que a condição dada como ideal, foi realizada durante a realização dos experimentos do Arranjo Ortogonal L16, dada mais precisamente pela condição de número 10 da Tabela 6.

A partir daí, foi possível construir a Tabela 15 a fim de comparar os resultados preditos com os resultados reais.

Tabela 15: Comparação dos valores Reais com o Predito

	Lc	Ra
Real	628,5	1,49
Predito	846,73	1,34
% Variação	25,77	10

O processo ao longo do trabalho mostrou-se não ser robusto, ou seja, o nível de ruído encontrado foi em média na ordem de 15% de variação para o processo, sendo executado com as mesmas condições.

Para tanto, pode-se perceber que a variação para a variável resposta rugosidade é consideravelmente menor que se for comparado com o valor da variável resposta Lc, isso era esperado, pois a função d_i apresenta maior variação para Lc, enquanto que a função **desirability** para Ra assume o máximo valor, esperando uma baixa variação.

Ao se analisar as ferramentas de corte, tanto para a condição de melhor resultado quanto para a condição que apresentou os piores resultados, ou seja, analisando as condições experimentais de Taguchi de número 12 e número 14 respectivamente, podem-se fazer as seguintes considerações a partir da Figura 32.

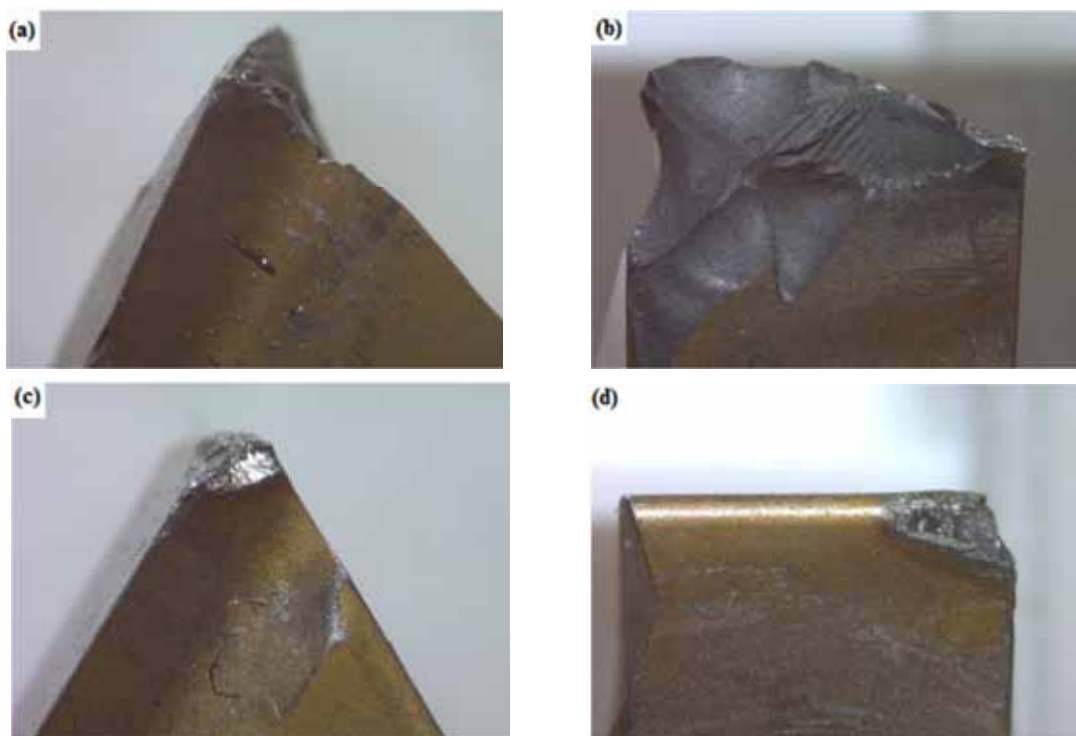


Figura 32: Representação do desgaste da ferramenta para os dois casos de melhor e pior condição para as variáveis respostas. (a) representa o ponto de vista superior da ferramenta e (b) representa a visão da aresta de corte da ferramenta para a condição 12, (c) e (d) representam os mesmos pontos de vista porém para a condição 14.

As condições 12 e 14, representadas na Tabela 16 mostram quais variações ocorreram entre as duas condições experimentais.

Tabela 16: Representação das condições experimentais 12 e 14 do arranjo ortogonal de taguchi

Condição	A	B	C	D	E	F
12	1	2	2	2	2	2
14	2	1	1	2	2	2

Ao se comparar as duas condições, pode-se notar que os fatores D, E e F são os mesmos para ambas as condições, ou seja, apresentaram a mesma ferramenta CP250, o mesmo tipo de lubrificação (abundante) sendo utilizado o material laminado.

Para que se possa fazer uma análise mais profunda, é possível averiguar que a variável velocidade de corte não se mostrou significativa para nenhuma das variáveis respostas estudada, com isso, pode-se considerar que essa variável não exerceu nenhum tipo de influência na condição final da ferramenta.

Já a variável profundidade de corte a influência é baixa, uma vez que ao ser aumentada, a profundidade de usinagem não altera a relação de energia destinada ao corte por unidade de área, nem mesmo altera a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um maior volume seja retirado através da utilização de uma maior porção da aresta de corte. Conseqüentemente, pode-se concluir que a variável avanço, sendo alterada do nível 1 para o nível 2 leva a geração de uma grande região térmica acarretando em maiores esforços, saindo de uma região de desgaste normal da ferramenta para uma região de esforço excessivo, levando ao colapso da ferramenta.

Por fim, os métodos de Taguchi, Superfície de Resposta e **Desirability** quando trabalhados conjuntamente, mostraram-se eficientes no que se diz respeito a resolução do problema proposto, sendo possível ainda saber quais condições e em quais níveis devem ser ajustados os fatores de controle, para se alcançar o maior desempenho das variáveis respostas quando analisadas conjuntamente.

5. CONCLUSÃO

5.1. Considerações Finais

A utilização de um arranjo ortogonal por Taguchi auxiliou na escolha dos fatores e parâmetros dos testes de aplicação, definiu a sequência de experimentos realizados e as propriedades medidas, onde após a realização dos experimentos foi possível identificar a influência dos fatores tanto para a rugosidade quanto para Lc.

Analisando a variável resposta Lc, o processo deve ser ajustado ao nível onde pode ser encontrada a maior média de Lc, onde o melhor ajuste para o avanço deve ser feita ao nível de 0,12mm/revol., a pastilha a ser utilizada deve ser a CP250 o fluido refrigerante abundante, pois a partir dos resultados obtidos com a ANOVA, são os fatores que apresentam significância no processo em relação ao Lc, os demais devem ser ajustados de acordo com a relevância do processo.

Já para a Rugosidade, o avanço se destacou como o único parâmetro influente, tanto pela análise dos efeitos dos fatores, como para a ANOVA, sendo ainda observado que a rugosidade superficial aumenta à medida que aumente a taxa de avanço. Concluindo, como o desejo é minimizar a rugosidade, deve-se ajustar a variável avanço em 0,12mm/revol.

Para a otimização conjunta pelo método **desirability** propôs a utilização da variável velocidade de corte em 90m/min (nível 2), o avanço em 0,12mm/revol. (nível 1), já a profundidade de usinagem deve se encontrar em 0,8mm (nível 1), a pastilha utilizada deve ser a CP250 (nível 2), em fluido MQF (nível 1) e material solubilizado (nível 1).

Por fim, pode se concluir que os métodos utilizados foram bem sucedidos, pois o objetivo proposto no trabalho foi bem conduzido pelos passo a passo de cada método, sendo possível a determinação dos melhores arranjos dos fatores em um processo com múltiplas respostas.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Em continuidade a presente pesquisa, sugere-se trabalhos que possam abordar os seguintes temas:

- Análise microestrutural do NIMONIC 80 A em função do processo de usinagem a partir do projeto de experimentos;
- Análise Morfológica dos cavacos via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Óptica (MO).
- Utilização das ferramentas DOE em outros processos de usinagem utilizando a liga NIMONIC 80A, como por exemplo, furação ou fresamento.
- Estudo sobre a cinética de ataque químico em superligas a base de níquel, tipo NIMONIC 80A, utilizando o Método de Taguchi.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

ARANDA, M. H.; JUNG, C. F.; TEN CATEN, C. S. Aplicação do Projeto de Experimentos para Otimização de uma Inovação Tecnológica. **Revista Gestão Industrial**, v. 04, n. 02, p. 116-132, 2008.

ASLAN, N. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. **Powder Technology** v.185, p.80–86, 2008.

BARROS-NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.

BAS, D.; BOYACI, I. H. Modeling and optimization I: usability of response surface methodology, **Journal of Food Engineering**. V.78, p.836–845, 2007.

BASHIRI, M.; SALMASNIA, A. Decision Making for Interactive Optimization of correlated desirability functions. **Industrial Engineering and Engineering Management. IEEM 2009**. IEEE International Conference on Hong Kong.p 2075 – 2079, 2009.

BERNARDOS, P. G., VOSNIAKOS, G. C. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v.18, p.343–354, 2002.

BESSERIS, G. J. Product Screening to Multicustomer Preferences: Multiresponse Unreplicated Nested Super-ranking. **International Journal of Quality, Statistics, and Reliability**, 2008, v. 2008, 16p.

BESSERIS, G. J. Multi-response unreplicated-saturated Taguchi designs and super-ranking in food formulation improvement. **International Journal of Quality, Statistics, and Reliability**, v.26 (4), p.341-368, 2009.

BOUACHA, K.; YALLESE, M. A.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v. 28, p.349–361, 2010.

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.

CHANG, C. W.; KUO, C. P. Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, p.141–147, 2007.

CHAVEZ -VALENCIA, L.E; MANZANO, R. A.; CONTRERAS G. M. E.; ALONSO-G. E. Modelling of the performance of asphalt pavement using response surface methodology—the kinetics of the aging. **Building and Environment**. v.42, Issue 2, p.933-939, 2007.

CH'NG C.K. QUAH, H.; LOW, H. C. A New Approach for Multiple-Response Optimization. **Quality Engineering**, v.17, p. 621-626, 2005.

COPPINI, N. L.; BAPTISTA, E. A. Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18, Niterói, **Anais Associação Brasileira de Engenharia de Produção**, 1998.

COSTA, N.; PIRES, R.: Resposta Múltiplas: Uma abordagem para melhorar os processos e os produtos. In: 8 CONGRESSO IBEROAMERICANO DE DELFA, Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007.

GERARDO, M.; ALEJANDRO, O.; CARLOS, E. B. Multiple response optimization of styrene–butadiene rubber emulsion polymerization. **Computers & Chemical Engineering**. v. 33, Issue 4, p. 850-856, 2009.

COWPE, J. S.; ASTIN, J. S.; PILKINGTON, R. D.; HILL, A. E. Application of Response Surface Methodology to laser- induced breakdown spectroscopy: Influences of hardware configuration. **Spectrochimica Acta Part B**, v. 62, p.1335–1342, 2007.

DEHGHANI, K.; NEKAHI, A.; MIRZAIE, M. A. Optimizing the bake hardening behavior of Al7075 using response surface methodology. **Materials and Design**, v. 31 p.1768–1775, 2010.

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

DUTRA, C. C. **Extensões no Método de Comparação Indireta aos Pares para Otimização de Produtos com Variáveis Sensoriais**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 87, 2007.

FARIA, J.C. **Estudo da usinagem em torneamento da superliga à base de níquel NIMONIC 80A**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

FOGLIATTO, Flávio Sanson. Otimização de experimentos com variáveis de resposta descritas por perfis. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, Dec. 2008.

FUNG, C. P.; KANG, P. C. Multi-response optimization in friction properties of PBT composites using Taguchi method and principle component analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v.170 p. 602–610, 2005.

GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; FIGUEIRA, L.; DAVIM, J. P. Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts **Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, 27 p.754–763, 2009.

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, 2004.

GHADGE, S. V.; RAHEMAN, H. Process optimization for biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil using response surface methodology. **Bioresource Technology**, v. 97, Issue 3, p. 379-384, Feb 2006.

GRANATO, D.; BRANCO, G. F.; CALADO, V. M. de A. Experimental design and application of response surface methodology for process modeling and optimization: A review, **Food Research International** (2011), article in press, acesso em 09/03/2011.

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.

HAJJAJI, N., RENAUDIN, V., HOUAS, A., PONS, M. N. Factorial design of experiment (DOE) for parametric exergetic investigation of a steam methane reforming process for hydrogen production. **Chemical Engineering and Processing**, v.49, p.500–507, 2010.

HARRINGTON, E. The Desirability Function. **Industrial Quality Control**, v.21, p. 494–498, 1965.

JEONG, I. J.; KIM, K. J. An interactive desirability function method to multiresponse optimization. **European Journal of Operational Research**, v.195 p.412–426, 2009.

JOHN, S. K.; JAMES, W. K. Desing of Experiments an Overview and Application Example. **Medical Device & Diagnostic Industry**, 1996.

KALATHENOS, P.; BARANYI, J.; SUTHERLAND, J. P.; ROBERTS, T. A. A response surface study on the role of some environmental factors affecting the growth of *Saccharomyces cerevisiae*, **Int. J. Food Microbiol.**, v.25, p.63–74, 1995.

KAMATA, Y.; OBIKAWA, T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192-193, p.192–193, 2007.

KARATAPANIS, A. E.; FIAMEGOS, Y. C.; SAKKAS, V. A.; STALIKAS, C. D. Effect of chromatographic parameters and detector settings on the response of HILIC–evaporative light-scattering detection system using experimental design approach and multicriteria optimization methodology. **Talanta**, v.83, p.1126–1133, 2011.

KHAYET, M.; COJOCARU, C.; ESSALHI, M. Artificial neural network modeling and response surface methodology of desalination by reverse osmosis. **Journal of Membrane Science**, v.368, Issues 1-2, p. 202-214, Feb. 2011.

KLEIJNEN, J.P.C.; SANCHES, S.M.; LUCAS, T.W.; CIOPPA, T.M. State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. **Journal on Computing**, v.17, n.3, p.263–289, 2005.

KISHORE, R.A., TIWARI, R., DVIVEDI, A.; SINGH, I. Taguchi analysis of the residual tensile strength after drilling in glass fiber reinforced epoxy composites. **Materials and Design**, v. 30, Issue 6, pp. 2186-2190, 2009.

LEE, H. W.; KWON, W. T. Determination of the minute range for RSM to select the optimum cutting conditions during turning on CNC lathe. **Journal of Mechanical Science and Technology**, V.24 (8), p.1637-1645, 2010.

LIMA, C. N. de. **Ajuste de uma Superfície de Resposta no Delineamento em Blocos Incompletos: Análise de Verossimilhança Restrita e Bayesiana em uma Simulação de Abubação em Citros**. Dissertação Mestrado em Agronomia, Universidade Federal de Lavras, p. 71, 2006.

LÓPES DE LACALLE, L.N.; LLORENT, J.I.; SANCHEZ, J.A. Improving the cutting Parameters the machining of Nickel and Titanium alloys, in **Annals of the CIRP**, v. 47. 1998.

MAO, M.; DANZART, M. Multi-response optimisation strategies for targeting a profile of product attributes with an application on food data. **Food Quality and Preference**, v.19, p. 162–173, 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).

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.

MOHAN, S. V.; SIRISHA, K.; RAO, R. S.; SARMA, P.N. bioslurry phase remediation of chlorpyrifos contaminated soil: Process evaluation and optimization by Taguchi design of experimental (DOE) methodology. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.68, p.252–262, 2007.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5a Edição. New York: John Wiley and Sons, 684p, 2001.

MONTGOMERY, D. C.; CASTILHO, E. Del McCarville, DANIEL, R. Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization. **Journal of Quality Technology**, Vol. 28, No. 3, p.337-345, July 1996.

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

NOORDIN, M.Y.; VENKATESH, V.C.; SHARIF, S.; ELTING, S.; ABDULLAH, A. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel, **J. Mater. Process. Technol.**, v. 145, p.46–58, 2004.

ORTIZ, F. Jr.; SIMPSON, J. R.; PIGNATELLO, J. J. Jr. A Genetic Algorithm Approach to Multiple-Response Optimization. **Journal of Quality Technology**, Vol. 36, No. 4, pp. 432-450, 2004.

OZEL, T.; KARPAT, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.45, p. 467–479, 2005.

PAIVA, A. P. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas**. Tese (Doutorado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, p. 229, 2006.

PAIVA, E. J. de; PAIVA, A. P. de; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. Otimização de Múltiplas Respostas Baseada no Erro Quadrático médio Multivariado. **XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

PAL, S.; GAURI, S. K. Assessing effectiveness of the various performance metrics for multi-response optimization using multiple regression. **Computers & Industrial Engineering**, v.59, p.976–985, 2010.

PHADKE, M.S. 1989. **Quality Engineering using Robust Design**, Prentice Hall, New Jersey.

POROCH-SERITAN, M.; GUTT, S.; GUTT, G.; CRETESCU, I.; COJOCARU, C.; SEVERIN, T. Design of experiments for statistical modeling and multi-response optimization of nickel electroplating process. **Chemical Engineering Research and Design**, v.89, p.136–147, 2011.

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, M. V. **Otimização das Condições de Corte Assistida por Computador Durante o Desenvolvimento do Processo**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas 138f., 1999.

RIBEIRO, M. V., MOREIRA, M. R. V.; FERREIRA, J. R. Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v 143/144C, p. 453-458, 2003.

SANTOS, D. T.; ARAUJO, M. O. P. H.; MALVEZZI, C. K.; OLIVEIRA, M. A. F.; SILVA, M. B.; SILVA, S. S. Utilização da Metodologia de Planejamento de Experimentos para a Melhoria da Qualidade de Vida, **Revista Analytica**, Nº28, 2007.

TANER, T., ANTONY, J. Applying Taguchi methods to health care. **Leadership in Health Services**, v. 19, p. 26–35, 2006.

TANG, Q.; LAU, Y. B.; HU, S.; YAN, W.; YANG, YANHUI; C. T. Response surface methodology using Gaussian processes: Towards optimizing the trans-stilbene epoxidation over Co^{2+} -NaX catalysts. **Chemical Engineering Journal**, v.156, p.423–431, 2010.

TANSEL, I.N.; GULMEZ, S.; DEMETGUL, M.; AYKUT, S. Taguchi Method–GONNS integration: Complete procedure covering from experimental design to complex optimization. **Expert Systems with Applications**, v.38, p.4780–4789, 2011.

TONG, L.I.; SU, C. T. The optimization of multiresponse problems in the Taguchi method. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 14, n. 4, p. 367-380, 1997.

TSAI, H. H.; WU, D. H.; CHIANG, T. L.; CHEN, H. H. Robust Design of SAW Gas Sensors by Taguchi Dynamic Method. **Sensors**, v 9, p.1394-1408, Feb. 2009.

TZENG, C. J.; LIN, Y. H.; UANG, Y. K.; JEONG, M. C. Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, p. 2753–2759, 2009.

VITANOV, V.I.; JAVAID, N.; STEPHENSON, D.J. Application of response surface methodology for the optimisation of micro friction surfacing process. **Surface & Coatings Technology**, v. 204, p. 3501–3508, 2010.

WEIDENBACHER, M.; KLERX, R. Process Optimization by Design of Experiments. **SKF Reliability Maintenance Institute on line**, 2003. Disponível em <http://www.skf.com/portal/skf/home/aptitudexchange?contentId=0.237932.237937.237983.238006.238271> acesso em 24/07/2010.

WANG, X.; DA, Z. J.; BALAJI, A. K.; JAWAHIR, I. S. Performance-Based Predictive Models and Optimization Methods for Turning Operations and Applications: Part 3—Optimum Cutting Conditions and Selection of Cutting Tools. **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 9, n1, p. 61-74, 2007.

WU, C. F. Optimization of correlated multiple quality characteristic using desirability function. **Quality Engineering**, Vol. 17, p. 119-126, 2005.

XAVIOR, M. A.; ADITHAN, M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, p. 900–909, 2009.

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.

XIAOMING, H.; ZHONGQI, Y.; XINMIN, L. Robust parameters control methodology of microstructure for heavy forgings based on Taguchi method. **Materials and Design**, v. 30, Issue 6, p. 2084-2089, June 2009.

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.

ZABETIA, M.; WAN, D.; WAN, M. A.; AROUA, M. K. Optimization of the activity of CaO/Al₂O₃ catalyst for biodiesel production using response surface methodology. **Applied Catalysis A: General**, v. 366, Issue 1, p.154-159, September 2009.

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