



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

MONIQUE DE MEDEIROS TAKENOUCI

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DA SUPERLIGA NIMONIC 80A
UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI**

Guaratinguetá

2011

MONIQUE DE MEDEIROS TAKENOUCI

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DA SUPERLIGA NIMONIC 80A
UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI

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

Orientador: Prof. MSc. Ricardo Batista Penteado

Guaratinguetá

2011

T136o

Takenouchi, Monique de Medeiros

Otimização do processo de usinagem da superliga nimonic 80A utilizando o Método de Taguchi / Monique de Medeiros Takenouchi. - Guaratinguetá: [s.n.], 2011

54 f.: il.

Bibliografia: f. 52-54

Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011
Orientador: Prof. MSc. Ricardo Batista Penteadó

1. Taguchi, Método de (Controle de qualidade) I. Título

CDU 658.56



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DA SUPERLIGA NIMONIC
80A UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI

MONIQUE DE MEDEIROS TAKENOUCI

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

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

Prof. Dr. Valério A. P. Salomon
Sub-coordenador
No Exercício da coordenação

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc RICARDO BATISTA PENTEADO
Orientador / UNESP – FEG

Prof. Dr MESSIAS BORGES SILVA
UNESP – FEG

Prof. MSc FABRÍCIO MACIEL GOMES
UNESP - FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

MONIQUE DE MEDEIROS TAKENOUCI

NASCIMENTO	18.09.1987 – CRUZEIRO / SP
FILIAÇÃO	Carlos Takachi Takenouchi Maria Helena Alves de Medeiros Takenouchi
2007/2011	Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Helena, ao meu irmão Nahoto e ao meu namorado Paulo Henrique, que não mediram esforços para me apoiarem em todos os momentos e foram os maiores incentivadores para que eu concluísse mais essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTO

Primeiramente à minha família e ao meu namorado pelo incansável apoio, dedicação e confiança.

Ao Professor MSc Ricardo Batista Penteado, orientador dedicado e prestativo, dando suporte para que o trabalho fosse realizado e bem sucedido.

Aos meus amigos e colegas de turma pelo companheirismo em todos os dias vividos em Guaratinguetá, por sempre estarem à disposição para me ajudar quando necessário e em especial a minha amiga Simone Ishiba, companheira em todos os anos da faculdade, com quem sempre pude contar. Por todos os momentos vividos nestes cinco anos de faculdade, momentos de alegria, desafios e responsabilidades, que me proporcionaram grande crescimento profissional e pessoal.

A Seco Tools pelo apoio a pesquisa e fornecimento de Pastilhas.

A Villares Metals pelo fornecimento dos corpos de prova.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo financiamento para realização dos ensaios e do estudo.

Por fim, a todas as pessoas que de maneira direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

EPÍGRAFE

“Procure ser uma pessoa de valor, em vez de procurar ser uma pessoa de sucesso. O sucesso é consequência”.

Albert Einstein

TAKENOUCHI, M. M. Otimização do Processo de Usinagem da Superliga Nimonic 80A utilizando o Método de Taguchi. 2011. 54 f. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Atualmente, atender as necessidades dos consumidores é uma das metas mais importantes, os consumidores estão em busca de produtos com qualidade e preços mais acessíveis, para isso, é indispensável que as empresas se atualizem para melhorar seus produtos e serviços. Com este cenário, as superligas estão cada vez mais ganhando mercado, pois possuem ótimas propriedades, principalmente em relação a operar em temperaturas elevadas, podendo proporcionar maior eficiência para motores que necessitam trabalhar em altas temperaturas. Em contra partida a essa vantagem, as superligas possuem uma baixa usinabilidade, sendo importante a análise do processo de usinagem para se tornarem mais aplicáveis. Este trabalho visa à otimização do processo de torneamento cilíndrico da superliga Nimonic 80A, com o intuito de melhorar a qualidade do produto, utilizando o Método de Taguchi, com o arranjo ortogonal L_{16} , sendo o comprimento de corte definido como variável resposta e analisados seis fatores que poderiam influenciar na sua variação, tais fatores são: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, tipo de pastilha, lubrificação e dureza do material. Os resultados obtidos demonstraram que os fatores avanço, tipo de pastilha e lubrificação são significativos e exercem influencia no processo, sendo que o avanço deve ser ajustado no nível de 0,12 mm/rev, a pastilha a ser utilizada deve ser CP250 e a lubrificação deve ser feita de maneira abundante, para a otimização do processo. Com a análise dos resultados, também podemos observar a eficiência e confiabilidade do método utilizado, mostrando resultados coerentes.

PALAVRAS-CHAVE: Método de Taguchi, Superligas e Torneamento Cilíndrico.

TAKENOUCHI, M. M. **Optimization of the Machining Process of the Superalloy NIMONIC 80A using the Taguchi Method.** 2011. 54 f. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

Currently, the needs of consumers is one of the most important goals, consumers are looking for quality products and affordable prices, so it is essential that companies upgrade to improve its products and services. With this scenario, the superalloys are increasingly gaining market share because they have excellent properties, especially in relation to operate at elevated temperatures, and can provide greater efficiency for engines that need to work at high temperatures. In return for this advantage, have a super low machinability, it is important to analyze the machining process to become more applicable. This work aims at optimizing the process of turning the cylindrical superalloy Nimonic 80A in order to improve product quality, using the Taguchi method with L16 orthogonal array, and the cut length defined as the response variable and analyzed six factors that could influence the variation in such factors are: cutting speed, feed rate, depth of cut, type of tool, lubrication and hardness. The results showed that the factors feed rate, type of tools and lubrication are significant and exert influence on the process, and the feed rate should be adjusted to the level of 0.12 mm/rev, the tool should be used to CP250 and lubrication must be made abundantly for process optimization. By analyzing the results, we can also observe the efficiency and reliability of the method used, showing consistent results.

KEYWORDS: Taguchi Method, Superalloys and Turning Cylindrical

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxograma de todas as fases realizadas no presente estudo.....	15
FIGURA 2 – Esquema de um Torno.....	18
FIGURA 3 – Modelo geral de um sistema de processo	23
FIGURA 4 – Fluxograma do processo de planejamento de experimentos.	25
FIGURA 5 – Gráfico Linear para o Arranjo Ortogonal de Taguchi L_{16}	36
FIGURA 6 – Torno CNC Romi CENTUR 305 utilizado para a realização dos ensaios	38
FIGURA 7 – Efeitos dos fatores e das interações sobre a média L_c	40
FIGURA 8 – Comportamento do avanço x tipo de pastilha em relação ao L_c	42
FIGURA 9 – Gráfico de contorno do avanço x tipo de pastilha em relação ao L_c	43
FIGURA 10 – Comportamento da velocidade de corte x dureza do material em relação à L_c	44
FIGURA 11 – Gráfico de contorno da velocidade de corte x dureza do material em relação à L_c	44
FIGURA 12 – Comportamento do tipo de pastilha x lubrificação em relação à L_c	45
FIGURA 13 – Gráfico de contorno do tipo de pastilha x lubrificação em relação à L_c	46
FIGURA 14 – Comportamento da profundidade de usinagem x dureza do material em relação à L_c	47
FIGURA 15 – Gráfico de contorno da profundidade de usinagem x dureza do material em relação à L_c	47
FIGURA 16 – Efeito dos fatores e das interações sobre a razão S/N em relação ao L_c	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Relação entre a usinabilidade e as ligas.....	20
TABELA 2 – Níveis dos fatores para teste	34
TABELA 3 – Arranjos ortogonais de Taguchi.....	35
TABELA 4 – Arranjo ortogonal de Taguchi L_{16}	36
TABELA 5 – Resultados dos experiemntos de torneamento cilíndrico da superliga NIMONIC 80A	39
TABELA 6 – ANOVA para Lc em relação à média.....	41
TABELA 7 – ANOVA para Lc em relação à razão S/N.....	49

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Quadro da ANOVA para avaliação da significância de fatores e interações em um experimento fatorial com dois fatores	33
QUADRO 2 – Composição química da superliga NIMONIC 80A	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Métodos	15
1.4	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Usinagem.....	17
2.1.1	Usinabilidade da Liga NIMONIC 80A	19
2.1.2	Condições de Corte.....	20
2.1.3	Comprimento de corte associado à formação de cavaco.....	22
2.2	Planejamento de Experimentos	23
2.2.1	Método de Taguchi.....	26
2.2.1.1	Arranjo Ortogonal	28
2.2.1.2	Razão Sinal-Ruído.....	29
2.2.1.3	Análise de Variância.....	30
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
3.1	Definição dos Parâmetros.....	34
3.2	Arranjo Ortogonal	35
3.3	Ensaio de Torneamento	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Resultados obtidos dos experimentos de torneamento cilíndrico.....	39
4.2	Comportamento da variável resposta (Lc) em relação à Média	40
4.3	Comportamento da variável resposta (Lc) em relação à Razão S/N	47
5	CONCLUSÃO.....	50
5.1	Considerações Finais	50
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da concorrência entre as empresas e com a crescente exigência do consumidor, que está em busca por produtos com qualidade e preços mais acessíveis, a técnica de planejamento de experimentos está ganhando mais importância, pois esta técnica mostra quais os fatores significantes para o processo ou produto e ainda o melhor nível a ser utilizado para otimizar a variável resposta, melhorando a qualidade do processo ou produto, com o mínimo possível de experimentos, utilizando assim menos tempo e recursos.

O presente trabalho propõe a utilização de uma técnica de planejamento de experimentos, para a otimização do processo de torneamento cilíndrico da superliga a base de níquel, Nimonic 80A. Para isso, foi realizada a aplicação do Modelo Robusto de Taguchi para determinar os fatores que influenciam a variável resposta.

A escolha por esse material a ser estudado se deve ao cenário atual, onde a busca por materiais cada vez mais resistentes ao desgaste, à corrosão e a oxidação está proporcionando um aumento na procura por superligas.

As superligas possuem excelentes propriedades mecânicas e térmicas, suas principais características são: alta resistência mecânica à fluência, a elevadas temperaturas, à fadiga e boa resistência a corrosão. Porém, a utilização das superligas encontra um obstáculo, a dificuldade de usinagem desses materiais, a usinagem afeta negativamente a integridade da peça. Apesar dessa barreira e devido a suas características, as superligas são altamente recomendadas para varias aplicações, alertando para os cuidados com a sua usinagem, que pode causar danos prematuros a ferramenta, assim como ao acabamento superficial da peça (SILVA *et al*, 2004).

As superligas à base de níquel também são notáveis por sua resistência à degradação química e mecânica em temperaturas de até 1000 °C, essas ligas são aplicáveis a uma variedade de motores a jato, turbinas e sistemas de compressão ou bombeamento (REED *et al*, 2009).

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a otimização do processo de torneamento cilíndrico da superliga Nimonic 80A, utilizando uma técnica de planejamento de experimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar os fatores que influenciam a variável resposta, por meio da aplicação do Modelo Robusto de Taguchi.
- ✓ Analisar e discutir a viabilidade do método utilizado.

1.2 Justificativa

Os avanços tecnológicos estão proporcionando uma crescente necessidade por materiais metálicos cada vez mais tenazes e resistentes ao desgaste, à corrosão e a oxidação. Os materiais utilizados para aplicações que requerem estas propriedades são comumente os aços inoxidáveis e os aços ligados, mas o aumento na cobrança por materiais que suportem temperaturas mais elevadas, que seja aplicável a motores mais eficientes e com maiores potências, impulsionou o desenvolvimento das chamadas superligas (FARIA, 2007).

As superligas possuem excelentes propriedades mecânicas e térmicas e são conhecidas como materiais de difícil usinabilidade, isso devido as suas principais características, tais como: alta resistência mecânica em altas temperaturas, elevada dureza, baixa condutividade térmica e facilidade de reagir com o material da ferramenta de corte (SILVA *et al*, 2004).

Superligas a base de níquel são conhecidas como materiais capazes de operar em altas temperaturas, que resistem a elevadas esforços mecânicos, possuem boa resistência a corrosão, a fadiga e a fluência. Devido a essas características são utilizadas principalmente nas áreas aeroespaciais e em plantas de geração de energia (RESENDE *et al*, 2009).

A usinagem de superligas apresenta sérios problemas, afetando o lado econômico da utilização destes materiais e dificultando o lado técnico de execução da usinagem, e muitos

destes problemas pode-se atribuir a alta temperatura de usinagem, com a geração de calor na interface cavaco-ferramenta durante o processo (RODRIGUES *et al*, 2005).

Devido à crescente importância da qualidade dos produtos e processos e também a crescente procura pela utilização de superligas e ainda os visíveis problemas na sua usinagem, o presente estudo propõe a otimização do processo de usinagem da superliga Nimonic 80A, por meio da aplicação do Método de Taguchi para determinar os fatores que afetam na qualidade do produto, sendo este um fator cada vez mais valorizado pelos consumidores. Este método também proporciona o mínimo possível de experimentos, diminuindo custos e/ou tempo do estudo.

1.3 Métodos

A Figura 1 mostra todas as etapas realizadas, desde a revisão bibliográfica até a conclusão do estudo.

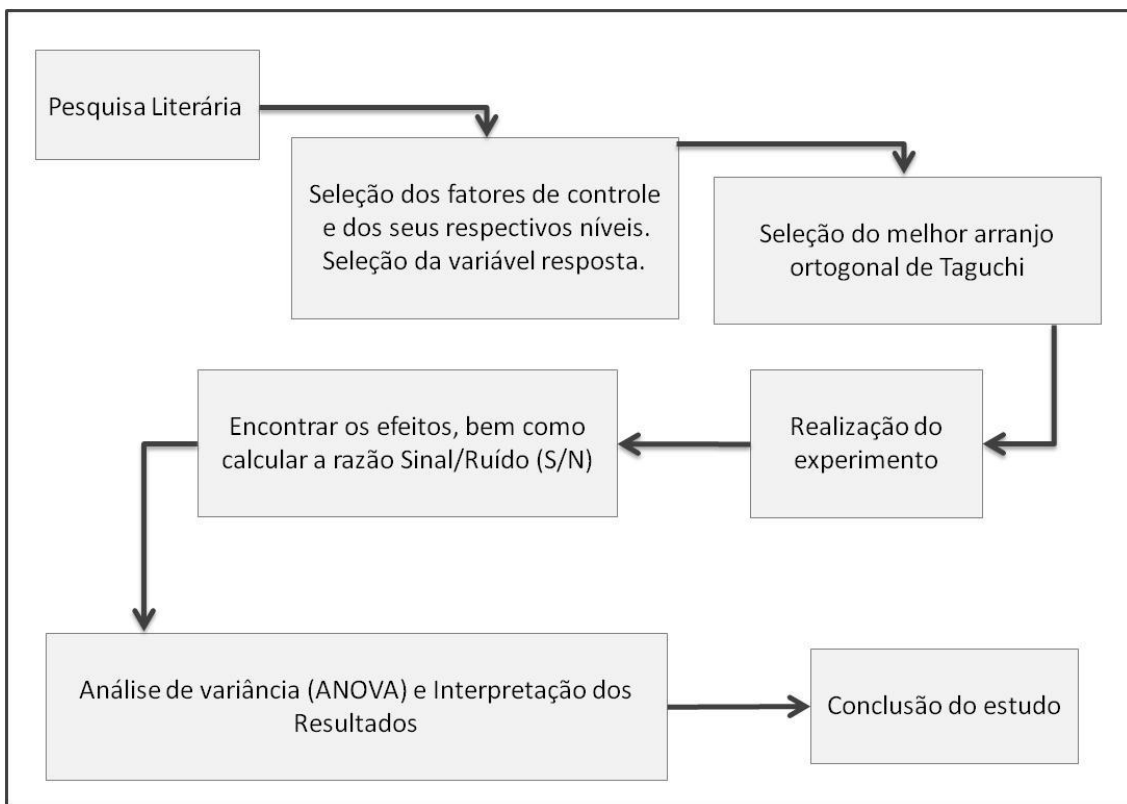


Figura 1 – Fluxograma de todas as fases realizadas no presente estudo. Fonte: Autor.

Conforme já apresentado no Fluxograma da Figura 1, foi realizada uma revisão bibliográfica em relação ao assunto, sendo analisadas uma série de artigos em relação às superligas e a sua usinagem e também artigos com a utilização de Planejamento de Experimentos, assim como o Método de Taguchi para a otimização de processos ou produtos.

A partir da revisão bibliográfica e com base na literatura foram definidos os parâmetros para a análise, ou seja, os fatores e seus respectivos níveis, que podem influenciar no processo de usinagem e as variáveis respostas significantes para a usinabilidade do material.

Definidos tais parâmetros, e aplicando o método de Taguchi para a escolha do melhor arranjo ortogonal, foram realizados os ensaios. Os ensaios foram realizados em um Torno CNC, no Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, UNESP, assim como, a análise do desgaste da ferramenta de corte para cada condição avaliada, por meio de uma lupa.

Com os dados da experimentação realizada, determinou-se os fatores que influenciam o processo de usinagem e qual o melhor nível destes fatores para o processo. Para tal foi utilizado os softwares *Minitab® 16* e *Statistica 7.0*, nos quais foi possível obter as tabelas e os gráficos necessários para a análise, avaliação e discussão dos resultados. E por fim, realizada a conclusão sobre o estudo.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos, descritos a seguir:

O Capítulo 2 descreve de maneira sucinta a usinagem de materiais, abordando a usinabilidade da liga estudada e alguns conceitos considerados para a escolha dos parâmetros a serem estudados, em seguida são abordados os conceitos de Planejamento de Experimentos, assim como, o Método de Taguchi e suas ferramentas (arranjos ortogonais, razão sinal/ruído e análise de variância).

O Capítulo 3 descreve o método de pesquisa realizado, sendo a definição dos parâmetros de estudo, a especificação dos seus níveis, a escolha do arranjo ortogonal de Taguchi e a realização do experimento.

O Capítulo 4 apresenta os principais resultados deste trabalho, a análise destes resultados, assim como a determinação dos fatores que exercem influencia sobre o processo.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o presente estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo inicia com a apresentação da usinagem de materiais, tratando de seus aspectos gerais e específicos em questão ao material estudado. Em seguida, são apresentados os conceitos de Planejamento de Experimentos, priorizando o enfoque na metodologia de Taguchi e suas formas de análise.

2.1 Usinagem

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais conhecido no mundo, esse processo de fabricação pode ser definido como uma operação em que se deseja adquirir à peça uma forma, dimensão e/ou acabamento, com a produção de cavaco. E entende-se por cavaco, porção de material retirada da peça por meio da ferramenta de corte e caracterizada pela sua forma irregular (MACHADO *et al*, 2009).

As técnicas fundamentais da usinagem de materiais foram fundadas com o início da tecnologia de produção em massa, pioneira pelas linhas de produção de Henry Ford. As operações de usinagem consomem uma grande quantidade de dinheiro anualmente em todo o mundo e sabe-se que a indústria de usinagem converte cerca de 10% do material utilizado em cavacos (desperdício), pode-se prever que se ocorrer a utilização correta de ferramentas de corte e condições de usinagem, tenha-se uma economia de até 20% do total de custos (EZUGWU, 2005).

A usinagem pode interferir no custo final dos componentes mecânicos, tornando-os mais caros, por esse motivo, atualmente tem-se investido no estudo do processo de usinagem (SILVA *et al*, 2004).

A diminuição dos tempos de usinagem pode ser uma das opções para a otimização do processo, para tanto, a análise do processo deve ser realizada, encontrando o melhor arranjo entre as variáveis que influenciam o mesmo. A análise é extremamente importante, por exemplo, aumentando a velocidade de corte logo se conclui que ocorrerá a diminuição dos tempos de usinagem, mas deve-se atentar que o aumento da velocidade de corte influencia negativamente a vida da ferramenta, o que pode provocar um aumento no tempo de processo devido ao maior número de trocas de ferramenta (WATANABE *et al*, 2003).

Os processos de usinagem são divididos em processos convencionais e não convencionais, os processos convencionais mais utilizados e difundidos são: o torneamento, o fresamento e a furação (AMORIM, 2002).

No presente estudo, foi utilizado o processo de torneamento cilíndrico em um torno CNC (Comandos Numéricos Computadorizados), uma definição apresentada por Machado (2009) diz que, torneamento é um processo mecânico de usinagem utilizado para a obtenção de superfícies de revolução, no torneamento a peça gira em torno do eixo de rotação da máquina e ao mesmo tempo a ferramenta de corte realiza movimentos de avanço longitudinal e transversal.

A Figura 2 mostra o esquema de um torno.

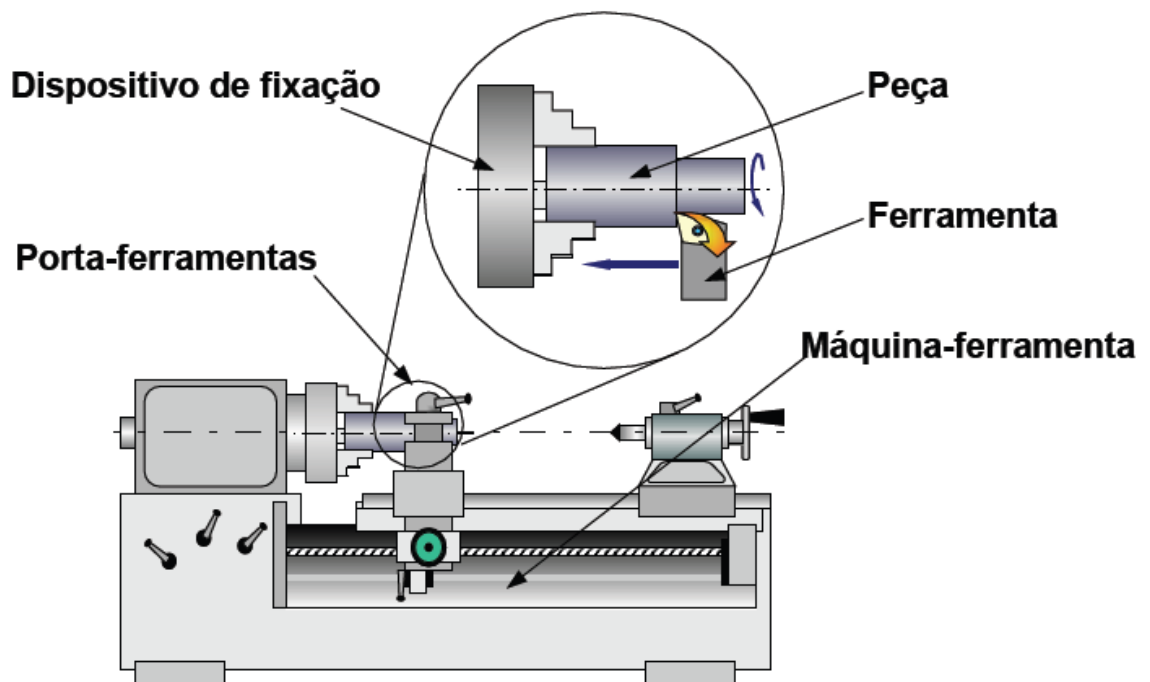


Figura 2: Esquema de um Torno. Fonte: Amorim, 2002.

Segundo Amorim (2002), o processo de torneamento possui características peculiares, tais como, o corte é normalmente contínuo, pode receber descrição em coordenadas cilíndricas (coordenadas polares designam a seção reta da peça em rotação e mais a coordenada de profundidade para designar o movimento da ferramenta) e também podemos destacar que a peça e a ferramenta possuem movimentos simultâneos, enquanto a peça possui movimentos de rotação, ao mesmo tempo a ferramenta possui movimentos de translação.

2.1.1 Usinabilidade da Liga NIMONIC 80A

A demanda contínua por maior eficiência com segurança e custo mínimo levou a um aumento da temperatura operacional, aumentando a necessidade de novas ligas com propriedades superiores em temperaturas elevadas, neste âmbito, que as superligas vêm se destacando (BRUNI *et al*, 2002).

As superligas à base de níquel são normalmente utilizadas na fabricação de componentes para aplicações aeroespaciais, devido à sua combinação única de alta resistência a temperaturas elevadas, além de uma forte estabilidade química e térmica. No entanto, estas propriedades reduzem drasticamente a usinabilidade dessas ligas. A maioria dos problemas encontrados durante a usinagem é devido à geração de calor na zona de corte e do atrito gerado na interface ferramenta-peça, a matriz austenítica dessas ligas lhes permite reagir com o material da ferramenta em condições atmosféricas e ocorre rapidamente o endurecimento (FOX-RABINOVICH *et al*, 2010).

Essas dificuldades de usinagem podem ser explicadas pelas seguintes características: esses materiais possuem elevada resistência mecânica, dureza a quente, rápido endurecimento devido sua matriz austenítica, desgaste a abrasão, baixa condutividade térmica e soldabilidade do material da peça com o material da ferramenta, essas características podem causar desgaste prematuro e deformação da ferramenta de corte e com isso interferir na qualidade de usinagem da liga (FARIA, 2007).

A superliga a base de níquel, NIMONIC 80A, é muito utilizada em motores a jato para turbinas de aeronaves, motores a gás para usinas e motores a diesel marítimos. Este material possui alta fluência e resistência a ruptura em alta temperatura pelo endurecimento e precipitação dos elementos, alumínio e titânio, e também possui alta resistência à corrosão e soldabilidade, pois contém 20% de cromo e um conteúdo relativamente pequeno de alumínio (KIM *et al*, 2001).

Segundo Diniz *et al* (2008), a usinabilidade pode ser determinada como o grau de dificuldade de usinagem de um material. A usinabilidade de metais é definida com relação aos aspectos: formação de cavacos, qualidade superficial da peça, vida da ferramenta, temperatura de corte, forças de corte e produtividade. A Tabela 1 relaciona a usinabilidade com as ligas a base de níquel.

Tabela 1- Relação entre a usinabilidade e as Ligas (Fonte: WITTING, 2002).

Grupo	1	2	3	4	5
Usinabilidade (%)	<i>Ligas de Ni-Cu do grupo principal</i>	<i>Ligas não temperáveis</i>	<i>Ligas temperáveis</i>		<i>Ligas fundidas de alta resistência ao calor</i>
	Monel 400				
	Monel 401				
	Monel 404				
	Monel R405				
20		Hastelloy B			
18		Hastelloy X			
20		Inconel 600			
20		Inconel 601			
18		Nimonic 80A			
14			Inconel 718		
14			Inconel X-750		
14			Waspalloy		
10				Nimonic 90	
10				Rene 41	
12				Udimet 500	
12				Udimet 700	
8					IN-100
10					Inconel 713C
					Nimocast 739

Existem diversos métodos para a medição do índice de usinabilidade de um material, sendo que o ensaio chamado de longa duração é o método mais aceito. Neste método o material que se quer determinar sua usinabilidade e o material padrão, são ensaiados até o fim da vida da ferramenta, ou até um determinado desgaste da ferramenta, com velocidades de cortes diferentes, com isso tem-se a velocidade de corte para uma determinada vida da ferramenta (DINIZ *et al*, 2008).

2.1.2 Condições de Corte

Nos processos de usinagem, o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte é de extrema importância, pois eles afetam a potência necessária para a

usinagem, a capacidade de obtenção de tolerâncias, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta (DINIZ *et al*, 2008).

Segundo Amorim (2002), os fatores que influenciam os esforços de corte são: material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, velocidade de corte, uso de fluido de corte, desgaste da ferramenta e área de seção de corte (avanço e profundidade de corte).

Algumas grandezas dos processos de usinagem serão detalhadas a seguir, segundo Diniz *et al* (2008):

- ✓ Velocidade de Corte (V_c) – para operações como torneamento, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem ao mesmo tempo, a velocidade de corte é considerada a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça.
- ✓ Avanço (f) – pode ser definido como o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta.
- ✓ Profundidade de corte (a_p) – no torneamento é considerado profundidade de corte, sendo a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça.

Um fator importante em um processo de usinagem é a utilização ou não utilização do fluido de corte, nos últimos tempos intensificaram-se as pesquisas nesta área com o objetivo de diminuir ao máximo o seu uso. As justificativas para tal atitude incluem os custos operacionais da produção, a questão ecológica, as exigências legais quanto à preservação da natureza, a preservação da saúde do ser humano, entre outros (DINIZ, 2008).

A crescente preocupação com o meio ambiente e a sustentabilidade estão levando as indústrias para um novo conceito de produção sustentável, uma atenção especial não está focada apenas no consumo de energia e eliminação de resíduos, mas também no custo gerado pelas práticas industriais não adequadas. E como já conhecido, os lubrificantes e refrigerantes são utilizados para melhorar o desempenho da usinagem em muitos casos, mas um novo ponto de vista está surgindo quando são pagos multas pelos riscos associados ao seu uso (FRATILA, CAIZAR, 2011).

Técnicas para a diminuição do uso de fluido de corte têm sido intensamente experimentadas, uma destas técnicas é o corte com mínima quantidade de fluido (MQF), onde a quantidade de óleo é mínima e pulverizada em um fluxo de ar comprimido (DINIZ, 2008).

O fluido de corte durante o processo de torneamento pode ser utilizado para reduzir o calor (lubrificação) e/ou para extrair o calor (refrigeração) da ferramenta e peça, para minimizar o desgaste, a dilatação térmica da peça e o dano térmico à estrutura superficial da peça (DINIZ, 2008).

2.1.3 Comprimento de corte associado à formação de cavaco

Na usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas, ocorre pequena condução de calor para o cavaco, devido a sua baixa condutividade térmica, com isso, surgem-se elevadas pressões e temperaturas na zona de contato entre a ferramenta e a peça (FARIA, 2007).

A formação do cavaco influencia vários fatores relacionados à usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, calor gerado na usinagem, esforços de corte, penetração do fluido de corte, entre outros. Com isso, podemos dizer que o processo de formação do cavaco envolve aspectos econômicos e de qualidade da peça, utilização de maneira adequada a máquina-ferramenta, segurança dos operadores, etc. (DINIZ, 2008).

O comprimento de corte se relaciona diretamente com a quantidade de cavaco obtida do processo de usinagem expressa em dimensão de comprimento.

Segundo FARIA (2007), o comprimento de corte (L_c) é definido como a quantidade de material retirada da peça em dimensão de comprimento, segundo a Equação 1.

$$L_c = \frac{L_f \pi D}{f 1000} \quad (1)$$

onde:

L_c : Comprimento de Corte (mm)

L_f : Comprimento de Avanço (mm)

D : Diâmetro obtido (mm)

f : Avanço (mm / volta)

A produtividade do processo de usinagem pode ser acrescida com o aumento da formação do cavaco, já para o aumento da formação do cavaco deve-se diminuir a temperatura gerada na formação do mesmo, ou conciliar os níveis de temperatura que não proporcione perda de produtividade, com isso maximiza-se o comprimento de corte.

O comprimento de corte pode ser diretamente associado à produtividade do processo, sendo que quanto maior melhor, podendo ser associado à vida da ferramenta, com a determinação de qual comprimento de corte a ferramenta pode suportar.

2.2 Planejamento de Experimentos

Segundo Montgomery (2001), podemos definir experimento como um teste, ou uma série de testes em que são realizadas mudanças intencionais nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, para que possamos observar as mudanças ocorridas nas variáveis de saída, ou seja, nas variáveis respostas e identificar as possíveis razões para tal mudança.

Em geral, os experimentos são usados para estudar o desempenho dos processos e sistemas. Podemos visualizar o processo como uma combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transforma uma entrada (geralmente um material) em uma saída que possui uma ou mais respostas observáveis. Algumas variáveis do processo são controláveis, enquanto outras variáveis são incontroláveis. Um experimento pode determinar quais variáveis de entrada são influentes na resposta, definir qual o nível das variáveis influentes proporciona uma resposta perto do valor desejado, com uma variabilidade pequena na resposta e até mesmo a diminuição dos efeitos causados pelas variáveis incontroláveis (MONTGOMERY, 2001).

Um processo ou sistema pode ser representado de maneira simplificada na Figura 3.

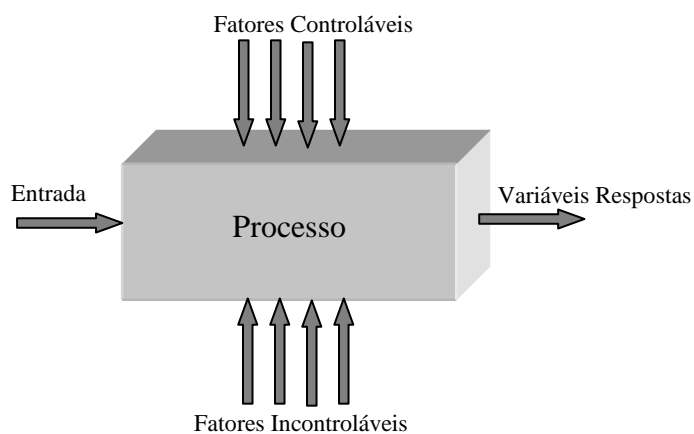


Figura 3 – Modelo Geral de um sistema de processo. Fonte: adaptado de MONTGOMERY, 2001.

O planejamento de experimentos (DOE, Design of Experiments) começou a se desenvolver na era agrícola, onde foi liderado pelo trabalho pioneiro de Ronald Fisher em 1920 a 1930. Durante este tempo Fisher foi responsável pela análise estatística de dados, na Estação Agrícola Experimental de Rothamsted, Inglaterra. Fisher reconheceu que as falhas ocorridas na realização dos experimentos muitas vezes prejudicavam a análise de dados do processo ou sistema. Ao interagir com cientistas e pesquisadores em muitos campos, ele

desenvolveu idéias que levaram a três princípios básicos do projeto de experimentos: aleatorização, replicação e blocagem. Fisher sistematiza o pensamento estatístico e os princípios para projetar investigações experimentais, incluindo o conceito de experimento fatorial e da análise de variância (MONTGOMERY, 2001).

Embora o uso de planejamento estatístico em ambientes industriais começou somente na década de 1930, esta era foi impulsionada pelo desenvolvimento da metodologia de superfície resposta por Box e Wilson (1951). Eles reconheceram e exploraram o fato de que muitos experimentos industriais são fundamentalmente diferentes dos experimentos agrícolas de duas maneiras: a variável resposta geralmente pode ser observada imediatamente, e o pesquisador pode aprender rapidamente informações cruciais de um pequeno grupo de pistas, e que podem ser usados para planejar a próxima experiência. Ao longo dos próximos 30 anos, a metodologia de superfície resposta e as técnicas de planejamento de experimento foram espalhadas por todas as indústrias de processo e principalmente em pesquisa e desenvolvimento (MONTGOMERY, 2001).

No final de 1970, teve início o crescente interesse da indústria ocidental na melhoria da qualidade com o uso de planejamento de experimentos, este fato se deve ao trabalho de Genichi Taguchi. Taguchi defendeu o uso de experimentos projetados, que ele chamou de projeto robusto, onde os processos se tornam insensíveis a fatores ambientais ou outros fatores que são difíceis de controlar, encontrando os níveis das variáveis do processo que proporcionam uma variável resposta em torno do valor desejado, ao mesmo tempo reduzindo a variabilidade em torno deste valor. Taguchi sugere os experimentos fatoriais fracionários e matrizes ortogonais, juntamente com alguns métodos estatísticos para resolver estes problemas (MONTGOMERY, 2001).

DOE é uma poderosa ferramenta para a identificação de um conjunto de fatores de um processo (parâmetros), que são importantes, exercendo influencia sobre o mesmo, e determina que níveis desses fatores devem ser mantidos para otimizar a resposta (ou característica de qualidade) de interesse. O DOE ajuda a maximizar as informações obtidas a partir de um determinado número de experimentos, utilizando o mínimo de recursos, é obtida por meio de um design fatorial, uma abordagem estruturada com base em métodos estatísticos que suporta a simultânea mudança de mais de um fator (GUNASEGARAM *et al*, 2009).

Segundo Montgomery (2001), o planejamento de experimentos é realizado de maneira ordenada, de modo que o experimentador possa avaliar diversas fontes de variação que influenciam o processo estudado. Esse processo deve ser realizado conforme a Figura 4.

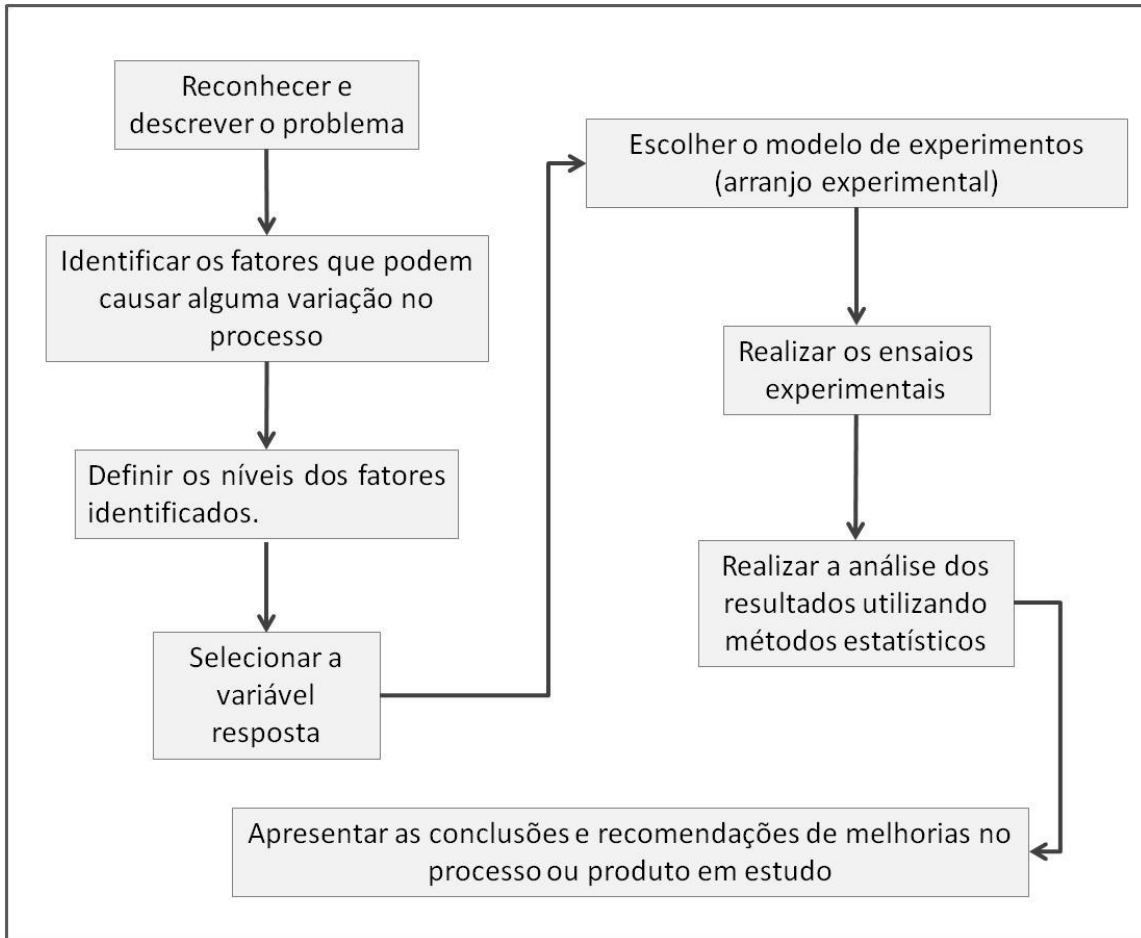


Figura 4 – Fluxograma do processo de planejamento de experimentos. Fonte: Autor.

Os métodos de planejamento de experimentos podem desempenhar um papel importante em projetos de engenharia, onde novos produtos são desenvolvidos ou melhorados os já existentes. Algumas aplicações incluem: avaliação e comparação de projeto básico, avaliação de alternativas de material, seleção de parâmetros do projeto para assegurar que o produto funcione em amplas condições de campo, tornando o produto robusto e determinação de parâmetros chave do projeto que produzem impacto na execução (MONTGOMERY, 2001).

A chave da utilização de planejamento de experimentos está na escolha adequada do arranjo experimental, diminuindo assim a quantidade de experimentos (MATTOS, 2004).

Na área industrial, entre os projetos mais utilizados está o fatorial completo, onde o número de experimentos é igual à n^k , sendo n a quantidade de níveis dos fatores e k a quantidade de fatores, este método permite avaliar todos os fatores e todas as possíveis interações. Embora o fatorial seja o mais comum, ele apresenta limitações quando se analisam muitos fatores ao mesmo tempo, pois a quantidade de experimentos aumenta

exponencialmente com o aumento linear dos fatores, tornando em alguns casos o experimento inviável em relação a tempo e/ou custo (MATTOS, 2004).

Segundo Calado e Montgomery (2003), uma maneira de resolver esse problema é considerar que termos de ordens superiores pode ser negligenciado e que os termos principais e de ordem inferiores podem ser obtidos através de uma fração do planejamento fatorial completo, sendo o planejamento fatorial fracionário utilizado para projeto de produtos e processos e para a melhoria de processos.

Ainda segundo Calado e Montgomery (2003), o uso principal do planejamento fracionário é para selecionar quais fatores possuem os maiores efeitos. Na etapa inicial de um planejamento com muitas variáveis independentes, as mais importantes são detectadas e um novo planejamento é feito considerando apenas as variáveis que apresentam os maiores efeitos.

2.2.1 Método de Taguchi

Com a crescente valorização da qualidade, inúmeros estudos foram desenvolvidos visando assegurar o bom desempenho dos produtos e processos a baixo custo, com isso, vários conceitos, técnicas e métodos foram revisados e aprimorados. Foi destacada a importância da qualidade desde o planejamento de um produto, passando pela produção até a assistência técnica. E com esse cenário, Taguchi propôs uma metodologia que utiliza experimentos estatísticos, entre outras ferramentas, para alcançar a melhoria na qualidade de produtos e processos sem o aumento de custos (MATTOS, 2004).

Para Taguchi (1990), a perda da qualidade de um produto pode ser definida como o prejuízo que esse produto causa para a sociedade a partir do momento em que é liberado para a venda, perdas como efeitos prejudiciais, poluição, mau funcionamento, custos operacionais e custos de manutenção são todos considerados prejuízos para a sociedade.

O método de Taguchi tornou-se uma ferramenta poderosa para melhorar o produto ou processo durante a pesquisa e o desenvolvimento, com isso, a alta qualidade dos produtos e processos pode ser produzida de forma rápida e com baixo custo (SALEHUDDIN *et al*, 2011).

O método desenvolvido por Taguchi, chamado de Projeto Robusto, foi introduzido na década de 1950 e 1960 primeiramente no Japão, o que proporcionou um rápido crescimento das indústrias Japonesas, pois estas necessitavam de melhorias na qualidade de seus produtos.

Taguchi aplicou o seu método em vários ramos das indústrias japonesas, tais como, automotiva, eletrônica, fotografia, entre outros (PADKE, 1989).

Para Taguchi a qualidade pode ser dividida em duas áreas fundamentais, sendo o controle da qualidade fora da linha e o controle da qualidade na linha. Em relação a custos, as duas áreas podem causar custos bem elevados, dependendo das decisões que podem ser tomadas nas atividades de cada área, o controle da qualidade fora da linha é aplicado nos estágios de desenvolvimento do produto e processo e o controle da qualidade na linha se aplica na produção de produtos ou nos processos de produção, onde se monitora os processos industriais para verificar a qualidade produzida (ROSS, 1991).

A filosofia de Taguchi é fundamentada em dois princípios, sendo os dois visando à diminuição da variabilidade dos processos e produtos, a primeira se baseia na redução da variação do produto ou processo, que proporciona uma qualidade aperfeiçoada, representando uma perda menor para a sociedade e a segunda se baseia na estratégia adequada de desenvolvimento do produto ou processo (ROSS, 1991).

O Método de Taguchi visa à melhoria na qualidade dos produtos e/ou processos sem o aumento de custos, sua metodologia utiliza experimentos estatísticos. Seu objetivo é tornar os produtos e/ou processos robustos, ou seja, insensíveis a fatores incontrolláveis ou difíceis e caros de serem controlados, como as variações do meio ambiente (LOPES, 2008). Este método é uma técnica de projeto de experimento, sendo útil na redução drástica do número de experimentos utilizando matrizes ortogonais e também minimiza os efeitos dos fatores fora de controle. Taguchi defende a garantia da qualidade na fase de projeto, suas vantagens consistem na diminuição do tempo experimental, para reduzir o custo e para descobrir fatores significantes em um curto período de tempo (ASILTURK, AKKUS, 2011).

Taguchi propõe a utilização de arranjos ortogonais para formar uma matriz de experimentos, para extrair o máximo de informações com um número mínimo de experimentos, o método também fornece informações suficientes para otimizar o problema. As principais etapas do método de Taguchi são: determinar as características de qualidade e os parâmetros de projeto necessários para o produto ou processo, projetar e realizar as experiências, analisar os resultados, por meio da razão sinal-ruído e análise de variância, para determinar as condições de melhor ajuste e por fim a realização de um teste de confirmação com as melhores condições (SENTHILKUMAR *et al*, 2010).

2.2.1.1 Arranjo Ortogonal

O planejamento de experimentos é utilizado para estudar o desempenho de processos e sistemas, sendo que na área de engenharia essa técnica de delineamento de experimentos é de extrema importância (LOPES, 2008).

Um experimento fatorial completo verifica todos os efeitos dos fatores na variável resposta, e ainda verifica todas as possíveis interações, porém esse tipo de experimento não é muito aplicável quando existem muitos fatores. Se por exemplo, um experimento fatorial saturado for empregado a uma situação que se tem 7 fatores e 2 níveis, deve-se realizar um total de 128 ensaios, com isso a realização desse ensaio pode ser impedida por limitações como tempo e recursos financeiros (ROSS, 1991).

Alguns estatísticos desenvolveram planejamentos mais eficientes, designados com fatorial fracionário, estes utilizam somente uma parte de todas as combinações possíveis para estimar os efeitos principais do fator e alguns efeitos das interações (ROSS, 1991).

Genichi Taguchi teve como meta de seu trabalho o projeto de parâmetros, que utiliza experimentos estatisticamente planejados, ele propõe uma estratégia para realização de experimentos baseada em experimentos fatoriais fracionários (MATTOS, 2004).

Taguchi desenvolveu um tipo de matriz especial que pode ser utilizado em várias situações, essas matrizes são denominadas arranjos ortogonais (ROSS, 1991). A importância da utilização do arranjo ortogonal consiste na habilidade de avaliar vários fatores com um número mínimo de testes (LOPES, 2008).

A escolha da matriz ortogonal de Taguchi que melhor se ajusta ao problema depende do número de fatores que se deseja investigar, dos níveis dos fatores e da quantidade de experimentos que se pretende realizar, conforme a disponibilidade de tempo e custo (CARDOZA, 2007).

Os arranjos ortogonais com dois níveis são denominados L4, L8, L12, L16 e L32, com três níveis podem ser L9, L18 e L27. O número na designação do arranjo indica quantos ensaios serão necessários, por exemplo, L16 possui 16 ensaios (ROSS, 1991).

Com o arranjo ortogonal selecionado, os fatores e as interações que se deseja analisar poderão ser atribuídos as diversas colunas. Cada fator deve ser colocado em uma coluna e as colunas restantes as interações que se pretendem analisar seus efeitos, mas para realizar a distribuição das colunas de interação deve ser utilizada uma das ferramentas propostas por Taguchi (ROSS, 1991).

Taguchi forneceu duas ferramentas para auxiliar na determinação de fatores e interações aos arranjos. Cada arranjo ortogonal possui uma série diferente de gráficos lineares e uma tabela triangular associada a ela, os gráficos lineares indicam as diversas colunas às quais os fatores podem estar atribuídos, e as colunas avaliam subsequentemente, a interação desses fatores, já as tabelas triangulares contêm todas as interações possíveis entre os fatores (colunas) (ROSS, 1991).

2.2.1.2 Razão Sinal-Ruído

Para o aperfeiçoamento da qualidade deve-se reduzir a variação existente, essa variação pode ser identificada observando a resposta do experimento. Taguchi idealizou uma transformação dos dados em outro valor, que representa a relação Sinal-Ruído (S/N), determinada pela medição da variação. A relação S/N exige no mínimo dois valores observados de cada configuração do experimento, combinando várias repetições em um valor que reflete o quanto de variação está presente, sendo que existem três relações S/N disponíveis, sendo selecionada de acordo com o tipo de característica analisada (ROSS, 1991).

A relação S/R não leva em consideração o tipo de resposta analisada, ela sempre deve ser maximizada, sendo que esta representa uma diminuição da variabilidade do processo em relação à média, melhorando a qualidade do processo (PAIVA, 2004).

Segundo Ozbay *et al* (2009), Taguchi se refere a fatores de ruído como as causas de variabilidade no desempenho, inclusive porque os produtos podem falhar, um fator de ruído é algo que faz com que o produto ou processo com características mensuráveis, se desvie do seu valor alvo.

Os valores alvo podem ser, segundo Taguchi (1990):

- Menor-Melhor, segundo Equação 2, quando o objetivo é minimizar a variável resposta, como por exemplo, impurezas, deteriorização e nível de perturbação.

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

- Nominal-Melhor, segundo Equação 3, quando o objetivo é atingir um valor alvo para a variável resposta, como por exemplo, dimensões, folgas e viscosidade.

$$\frac{S}{R} = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3)$$

- Maior-Melhor, segundo Equação 4, quando o objetivo é maximizar a variável resposta, sendo aplicável a características tais como, resistência dos materiais e o rendimento de combustíveis.

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

Onde:

$\frac{S}{R}$ = Razão Sinal / Ruído

r = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído).

\bar{y} = média das observações.

y_i = observação i , sendo $i = (1, \dots, r)$

S^2 = variância das observações.

Como resultado do experimento pode-se utilizar a relação S/N, sendo que essa relação constitui a medida da variação dentro do ensaio quando os fatores de ruído estão presentes, concentra as repetições e o efeito dos níveis de ruído em um único valor observado. Para complementar o resultado dos efeitos encontrados com a relação S/N, pode-se aplicar a ANOVA padrão em relação ao S/N para identificar os fatores significantes para o aumento do valor médio da relação S/N, proporcionando assim a redução da variação do produto ou processo (ROSS, 1991).

2.2.1.3 Análise de Variância

A utilização do DOE otimiza as grandezas de interesse, podendo contribuir para o desenvolvimento industrial, determina os fatores influentes sobre essas grandezas, eventualmente suas interações e promove a diminuição dos efeitos da variabilidade sobre o desempenho do produto ou processo (BONDUELLE, 2000).

A experimentação é realizada com o intuito de proporcionar a redução na variação do produto ou processo, e auxiliar na tomada de decisão em relação aos parâmetros que afetam o desempenho do produto ou processo. Com o ajuste da média e a redução da variação, as perdas referentes ao produto ou processo são minimizadas (ROSS, 1991).

Neste estudo o método estatístico a ser utilizado para interpretar os dados experimentais e tomar decisões necessárias será a análise de variância (ANOVA).

Como já dito anteriormente, este método foi desenvolvido por Ronald Fisher, em 1930, como um modo de interpretar os resultados das experiências agrícolas. A ANOVA é uma ferramenta estatística de decisão, utilizada para encontrar quaisquer diferenças no desempenho médio de todas as medidas testadas (ROSS, 1991).

Para Montgomery (2001), a ANOVA baseia-se na relação entre a variação dentro (*Within*) do tratamento e a variação entre (*Between*) os tratamentos. A variação entre os tratamentos é gerada pela diferença entre as médias dos tratamentos, e a variação dentro de um tratamento é devido ao erro aleatório. Assim, podemos afirmar que a variabilidade total dos dados pode ser expressa pela Equação 5.

$$SQ_{Total} = SQ_{Condições\ experimentais} + SQ_{Erro} \quad (5)$$

Para demonstrar a aplicação de uma ANOVA, foi considerada uma situação experimental onde existem dois parâmetros controlados.

Segundo ROSS (1991), na ANOVA com dois fatores, a variação total pode ser decomposta nas seguintes variações: variação devida ao fator A, variação devida ao fator B, variação devida à interação dos fatores A e B, e a variação devida ao erro.

Para a aplicação de uma ANOVA com dois fatores, é encontrada a soma dos quadrados para cada fator (SQ_A e SQ_B), como expresso nas Equações 6 e 7, para as condições experimentais (SQ_{CE}), segundo Equação 8, e para todas as observações (SQ_{Total}), segundo a Equação 9.

$$SQ_A = \frac{\sum_{a=1}^{A'} (\sum_{b=1}^{B'} \sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{B'N} - \frac{(\sum_{a=1}^{A'} \sum_{b=1}^{B'} \sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{A'B'N} \quad (6)$$

$$SQ_B = \frac{\sum_{b=1}^{B'} (\sum_{a=1}^{A'} \sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{A'N} - \frac{(\sum_{a=1}^{A'} \sum_{b=1}^{B'} \sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{A'B'N} \quad (7)$$

$$SQ_{CE} = \frac{\sum_{a=1}^{A'} \sum_{b=1}^{B'} (\sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{N} - \frac{(\sum_{a=1}^{A'} \sum_{b=1}^{B'} \sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{A'B'N} \quad (8)$$

$$SQ_{Total} = \sum_{a=1}^{A'} \sum_{b=1}^{B'} \sum_{n=1}^N y_{abn}^2 - \frac{(\sum_{a=1}^{A'} \sum_{b=1}^{B'} \sum_{n=1}^N y_{abn})^2}{A'B'N} \quad (9)$$

sendo: A e B , os fatores investigados no experimento;

a identifica o a -ésimo nível do fator A ($a = 1, 2, \dots, A'$);

b identifica o b -ésimo nível do fator B ($b = 1, 2, \dots, B'$);

n identifica o número de réplicas do experimento ($n = 1, 2, \dots, n$);

y_{abn} é a observação na replicação n , do nível a do fator A e do

nível b do fator B ;

N identifica o número total de observações.

Outro elemento a ser considerado na aplicação de uma ANOVA, consiste nos graus de liberdade. Um grau de liberdade, no sentido estatístico, está associado a cada parcela de informação que é estimada dos dados (ROSS, 1991). A fórmula dos graus de liberdade estão descritas no Quadro 1.

Para completar os cálculos da ANOVA, aplica-se o teste F . O teste F é uma ferramenta que proporciona uma decisão com um certo nível de confiança quanto ao fato de estas estimativas serem significativamente diferentes, consiste simplesmente na razão de variâncias de amostras (ROSS, 1991).

A estatística F utilizada na ANOVA é calculada segundo a Equação 10.

$$F = \frac{\frac{SQ_{Fonte\ de\ variac\~ao}}{gl_{Fonte\ de\ variac\~ao}}}{\frac{SQ_{Erro}}{gl_{Erro}}} \quad (10)$$

sendo que SQ é a soma dos quadrados e gl os graus de liberdade (MATTOS, 2004).

Para determinar o valor de F crítico, que pode ser comparado com o valor encontrado na ANOVA, deve-se considerar três aspectos: nível de confiança necessário, os graus de liberdade associados a fonte de variação e os graus de liberdade associados ao erro. A interpretação dos resultados pode ser realizada considerando que os fatores que possuam razão F maior que a F crítica exerçam influência sobre o valor da média para a população, e os

fatores que possuem razão F menor que a F crítica não causem efeito algum sobre a média (ROSS, 1991).

O Quadro 1, adaptado de MATTOS (2004), mostra um resumo da aplicação da ANOVA para um experimento fatorial com dois fatores.

Quadro1: Quadro da ANOVA para avaliação da significancia de fatores e interações em um experimento fatorial com dois fatores. Fonte: adaptdo de MATTOS, 2004.

Fontes de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	F
Total	SQ_{Total}	$A'B'N - 1$		
Condição Experimental	SQ_{CE}	$A'B' - 1$		
A	SQ_A	$A' - 1$	SQ_A / gl_A	QM_A / QM_{Erro}
B	SQ_B	$B' - 1$	SQ_B / gl_B	QM_B / QM_{Erro}
AB	$SQ_{CE} - SQ_A - SQ_B$	$(A' - 1)(B' - 1)$	SQ_{AB} / gl_{AB}	QM_{AB} / QM_{Erro}
Erro	$SQ_{Total} - SQ_{CE}$	$A'B'(N - 1)$	SQ_{Erro} / gl_{Erro}	

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios foi utilizada a superliga NIMONIC 80A, onde sua composição química está especificada no Quadro 2.

Quadro 2: Composição química da liga NIMONIC 80A. Fonte: adaptado de FARIA, 2007.

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

A definição dos parâmetros é a primeira parte da experimentação, ou seja, a escolha dos fatores, assim como seus respectivos níveis e variáveis respostas do processo. Em seguida determinou-se o arranjo ortogonal de Taguchi adequado para as condições já estabelecidas, e com isso, foi possível a realização dos ensaios.

3.1 Definição dos Parâmetros

A definição dos parâmetros para a realização do ensaio foi estabelecida em relação aos conceitos de usinagem já apresentados, sendo selecionados os fatores: avanço, profundidade de corte, velocidade de corte, tipo de pastilha, lubrificação e dureza do material.

A variável resposta definida, comprimento de corte (L_c), é a quantidade de material removido pelo processo de usinagem expressa em dimensão de comprimento, sendo quanto maior melhor.

A Tabela 2 apresenta os fatores de entrada do processo e seus respectivos níveis.

Tabela 2 – Níveis dos fatores para teste.

Fatores	Símbolo	Nível 1	Nível 2
Velocidade de corte (V_c)	A	75 m/mim	90 m/mim
Avanço (f)	B	0,12 mm/rev	0,18 mm/rev
Profundidade de usinagem (a_p)	C	0,8 mm	1,6 mm
Tipo de Pastilha (TP)	D	TP2500	CP250
Lubrificação (L)	E	MQF	Abundante
Dureza do material (dm)	F	Laminado	Solubilizado a quente

3.2 Arranjo Ortogonal

Com os parâmetros já definidos, foi realizada a análise da Tabela 3, para a escolha do melhor arranjo de Taguchi, considerando a quantidade de fatores e de seus níveis, e a intenção de analisar possíveis interações.

Tabela 3 – Arranjos Ortogonais de Taguchi. Fonte: adaptado de Santos, 2007.

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

Com a análise da Tabela 3, foi selecionado o arranjo ortogonal de Taguchi L₁₆. Com este arranjo é possível analisar até 15 fatores com 2 níveis, sendo que esta configuração proporciona um número suficiente de ensaios para analisar a influencia dos fatores e de possíveis interações.

O Método de Taguchi possui uma ferramenta para auxiliar na alocação dos fatores e interações que podem ser estudados, nas suas respectivas colunas dentro do arranjo experimental, esta ferramenta é denominada gráfico linear. A Figura 5 mostra o gráfico linear do arranjo ortogonal de Taguchi L₁₆, escolhido para a realização do ensaio.

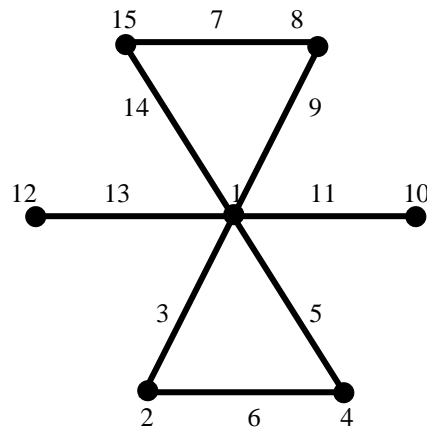


Figura 5: Gráfico Linear para o Arranjo Ortogonal de Taguchi L_{16} . Fonte: adaptado de ROSS, 1991.

Selecionado o Arranjo Ortogonal de Taguchi e com base no Gráfico linear da Figura 5, foi possível montar a Tabela 4, com o arranjo experimental L_{16} para a realização do experimento.

Tabela 4 – Arranjo Ortogonal de Taguchi L_{16}

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

Com os ensaios definidos na Tabela 4, ou seja, a combinação dos níveis dos fatores para cada ensaio foi realizado o experimento e obtidos os resultados.

Com os resultados obtidos foram calculados as médias, a razão Sinal/Ruído e seus respectivos efeitos, e realizada a ANOVA para testar a significância dos resultados, por meio dos softwares *Minitab*® 16 e *Statistica* 7.0.

3.3 Ensaio de Torneamento

A determinação da configuração dos experimentos possibilitou a realização dos ensaios, estes foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP, campos de Guaratinguetá.

Os ensaios foram realizados para dois tipos de corpos de prova que se diferenciavam pelo tratamento térmico sofrido. Em um corpo de prova foi aplicado a solubilização a quente e o outro corpo de prova foi laminado. Os corpos de prova utilizados possuíam comprimento de 190 mm e diâmetros iniciais de 50 mm e foram fornecidos pelas Villares Metals.

A usinagem foi realizada em um torno CNC CENTUR 30S, marca ROMI de 25 a 3500 rpm, com potência de 10 kW, mostrado na Figura 6, do próprio Departamento já citado acima, no final de cada ensaio, era verificado o diâmetro final, com o auxílio de um paquímetro Mitutoyo SURFTEST-301 de 0,05mm de graduação. Também foi realizada a análise do desgaste de flanco da pastilha, com uma Lupa (8x) graduada em 0,1mm.

Os ensaios eram condicionados ao desgaste de flanco da pastilha, com isso, garantia-se que todas as condições experimentais tivessem as mesmas limitações em relação à vida da ferramenta. Os experimentos foram realizados de maneira que cada condição experimental era encerrada somente no momento em que o desgaste de flanco atingisse 0,5mm de desgaste, a partir deste momento iniciava-se outro ciclo de torneamento.



Figura 6 – Torno CNC Romi CENTUR 30S utilizado para a realização dos ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir da experimentação, bem como sua análise, determinando os fatores de efeitos significantes para a variável resposta.

4.1 Resultados obtidos dos experimentos de torneamento cilíndrico

Os ensaios foram conduzidos utilizando duas repetições para cada experimento, desta maneira foi possível determinar o comprimento de corte médio para análise de cada condição experimental. Os resultados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos experimentos de torneamento cilíndrico da superliga NIMONIC 80A

Experimento	A	B	C	D	E	F	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Lc Médio (m)
1	1	1	1	1	1	1	483,9	302,8	393,4
2	1	1	2	2	2	1	975,3	1215,4	1095,4
3	1	2	1	1	2	1	241,3	166,5	203,9
4	1	2	2	2	1	1	392,9	283,1	338,0
5	2	1	2	1	2	1	245,3	203,0	224,2
6	2	1	1	2	1	1	372,7	348,9	360,8
7	2	2	2	1	1	1	151,6	159,0	155,3
8	2	2	1	2	2	1	326,9	392,7	359,8
9	1	1	1	1	2	2	184,3	229,7	207,0
10	1	1	2	2	1	2	713,3	543,8	628,5
11	1	2	1	1	1	2	145,6	100,4	123,0
12	1	2	2	2	2	2	333,4	262,8	298,1
13	2	1	2	1	1	2	228,5	160,8	194,6
14	2	1	1	2	2	2	1615,6	1062,6	1339,1
15	2	2	2	1	2	2	301,6	135,9	218,8
16	2	2	1	2	1	2	269,6	426,3	348,0

4.2 Comportamento da variável resposta (Lc) em relação à Média

Com os resultados obtidos por meio da experimentação realizada, e com a ajuda do *software Minitab® 16* encontrou-se os efeitos dos fatores e das interações em relação à média para a variável resposta Lc, que podem ser analisados na Figura 7.

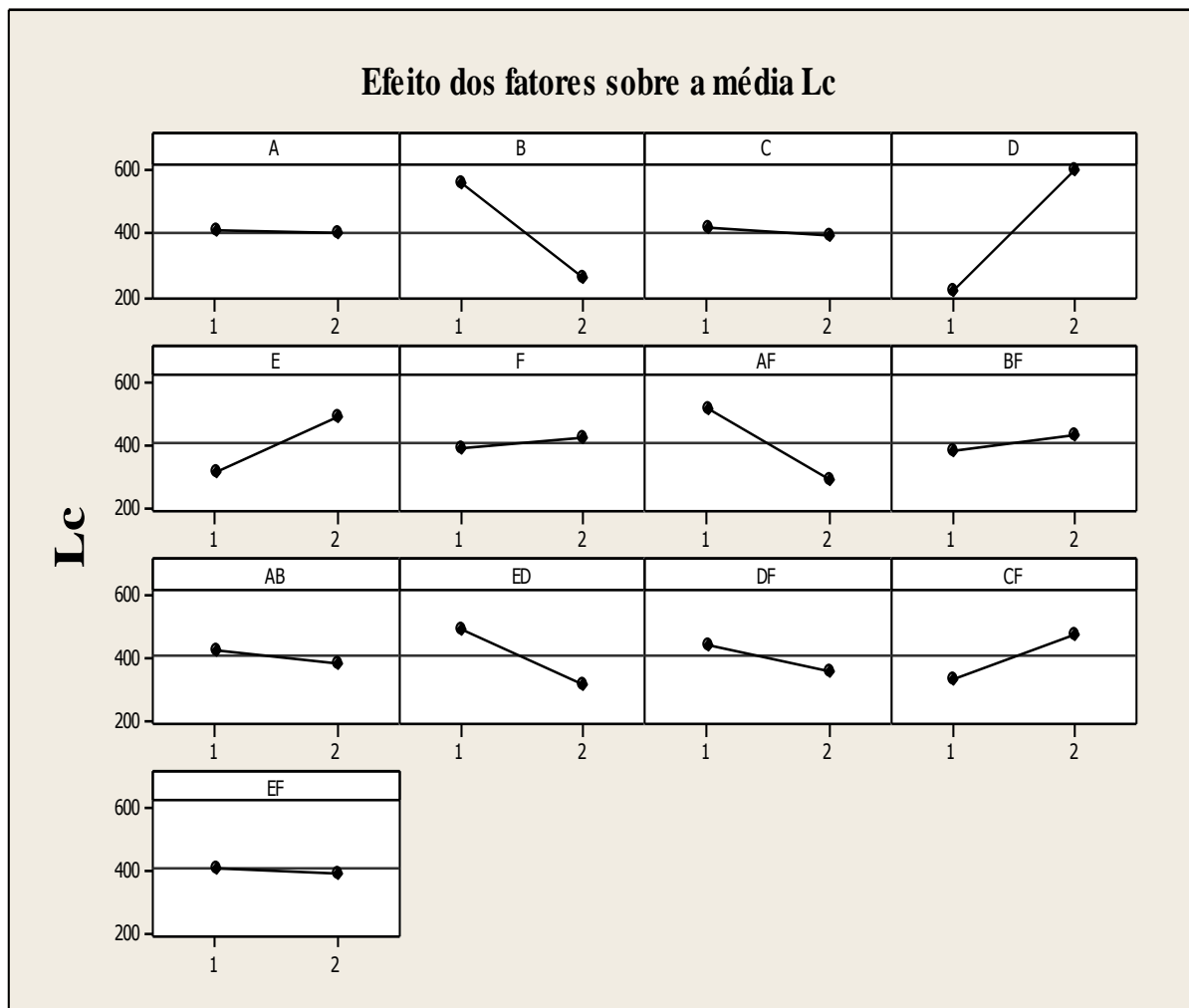


Figura 7: Efeitos dos fatores e das interações sobre a média Lc.

Analisando a Figura 7, efeito dos fatores e das interações sobre a média da variável resposta Lc, e sabendo que quanto maior a amplitude da reta da média Lc, maior a influência do fator sobre a variável resposta, podemos observar que os fatores B e D, sendo respectivamente avanço e tipo de pastilha, são os maiores influentes no processo de torneamento estudado. Também é possível observar que o fator E, lubrificação, exerce maior influência que os fatores A, C e F.

Ainda em relação à Figura 7, é possível observar uma forte influência das interações entre os fatores: AF (velocidade de corte x dureza do material), ED (lubrificação x tipo de pastilha) e CF (profundidade de corte x dureza do material).

A partir da análise realizada podemos ajustar o processo de modo a proporcionar a melhor resposta, para isso deve-se ajustar o avanço no nível baixo, 0,12 mm/rev, o tipo de pastilha no nível alto, pastilha CP250, e a lubrificação também no nível alto, fluido de corte abundante, para alcançar maiores valores da variável resposta Lc.

Apesar da análise dos gráficos dos efeitos já ter sido realizada é importante realizarmos um análise estatisticamente comprovada, para isso foi utilizada a ferramenta estatística ANOVA (Análise de Variância) para testar se os resultados encontrados com os gráficos dos efeitos são estatisticamente significativos.

A estatística pode ser utilizada para descrever dados e obter conclusões, auxiliando na tomada de decisão e na melhoria de processos e produtos.

A Tabela 6 mostra os resultados da ANOVA, encontrados com a utilização do *software Statistica 7.0*, para a variável resposta estudada em relação à média, sendo utilizado o teste de F para determinar o grau de influência de cada fator ou interação.

Tabela 6: ANOVA para 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
CF	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		

Considerando 95% de confiança, observa-se pela análise do valor-p ($p \leq 0,05$) que os fatores B (avanço), D (tipo de pastilha) e E (lubrificação) são fatores significantes para o processo, em relação à variável resposta Lc.

A análise do teste de F nos mostra, também com 95% de confiança, que os mesmos fatores, B, D e E, considerados significantes pela análise do valor-p, exercem grande influencia sobre a variável resposta Lc.

Analisando as interações estudadas, é possível observar pela análise do valor-p, que as interações AF (velocidade de corte x dureza do material), ED (lubrificação x tipo de pastilha) e CF (profundidade de corte x dureza do material), são significantes para o processo.

Também se pode observar que os fatores mais influentes foram o avanço e o tipo de pastilha, com isso, as Figuras 8 e 9, podem ser utilizadas para visualizar melhor o comportamento desses fatores.

Com a análise das Figuras 8 e 9 é possível observar que quanto menor o avanço e utilizando a pastilha no nível alto, ou seja, a pastilha CP250, maior o comprimento de corte, proporcionando assim uma maior vida para a ferramenta e conseqüentemente uma economia para o processo.

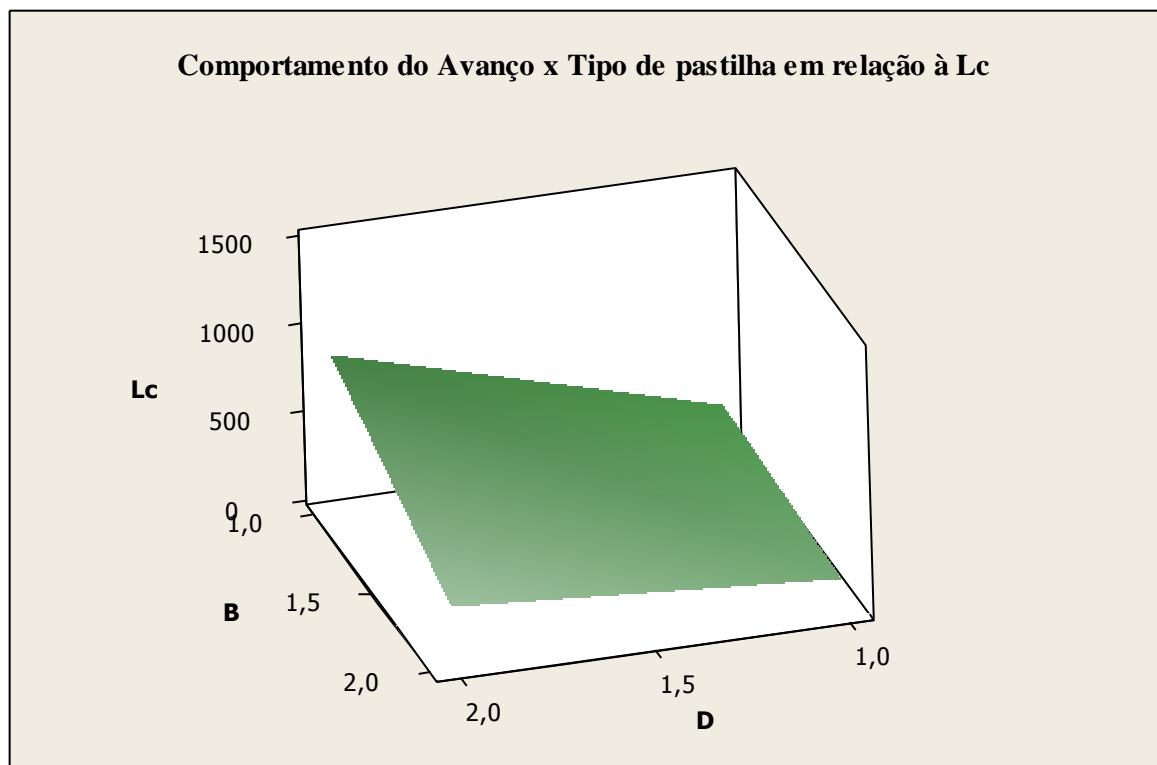


Figura 8: Comportamento do Avanço x Tipo de pastilha em relação à Lc.

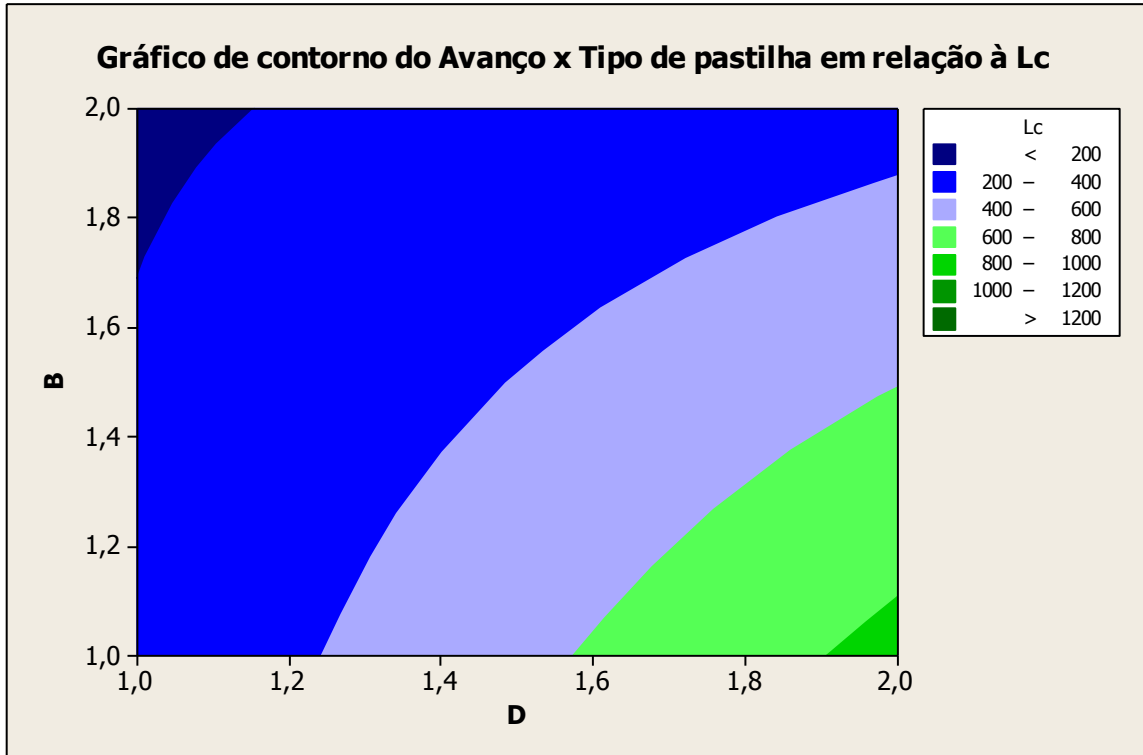


Figura 9: Gráfico de contorno do Avanço x Tipo de pastilha em relação à Lc.

A interação AF (velocidade de corte x dureza do material) pode ser observada nas Figuras 10 e 11.

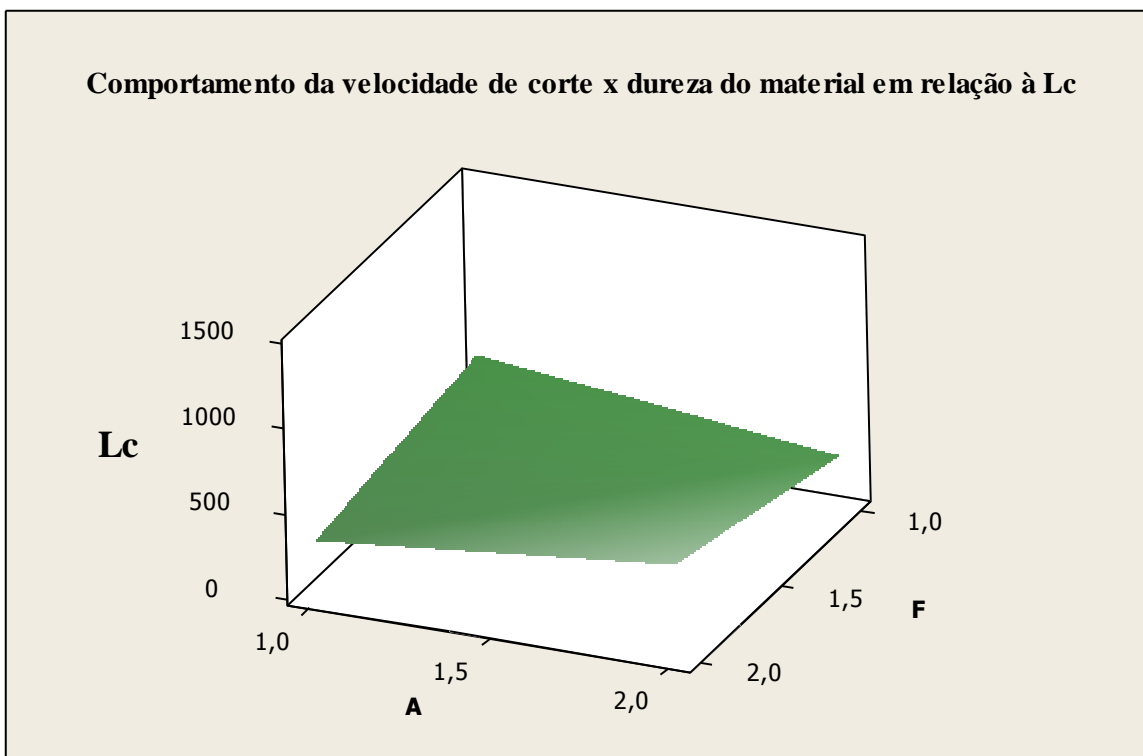


Figura 10 – Comportamento da velocidade de corte x dureza do material em relação à Lc.

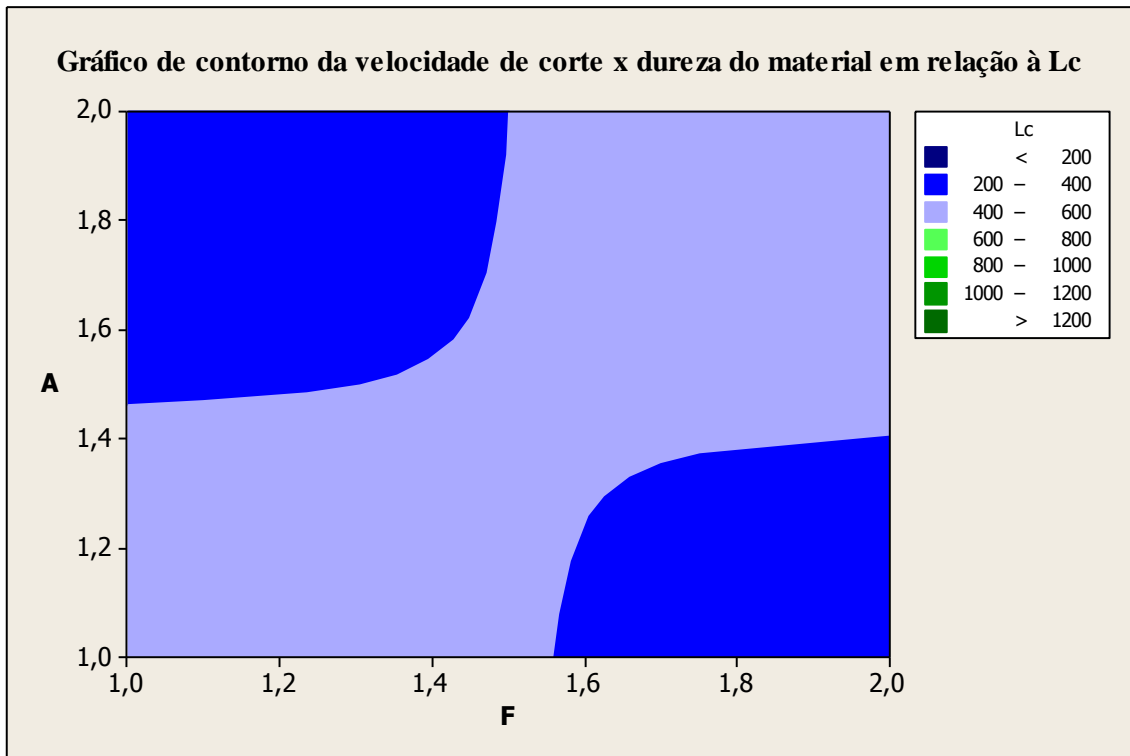


Figura 11 – Gráfico de contorno da velocidade de corte x dureza do material em relação à Lc

Com a análise das Figuras 10 e 11, pode-se observar que quando deseja-se utilizar a dureza do material no nível baixo (laminado), deve-se utilizar a velocidade de corte também no nível baixo (75 m/mim), já para a dureza do material no nível alto (solubilizado a quente), deve-se utilizar a velocidade de corte mais alta, ou seja, no nível alto (90 m/mim), para obter um maior comprimento de corte.

As Figuras 12 e 13 mostram o efeito da interação tipo de pastilha x lubrificação sobre a variável resposta Lc. Analisando essas figuras podemos observar que quanto maior a lubrificação do processo, utilizando a pastilha no nível alto, CP250, especifica para torneamento de superligas, maior é o comprimento de corte, otimizando o processo.

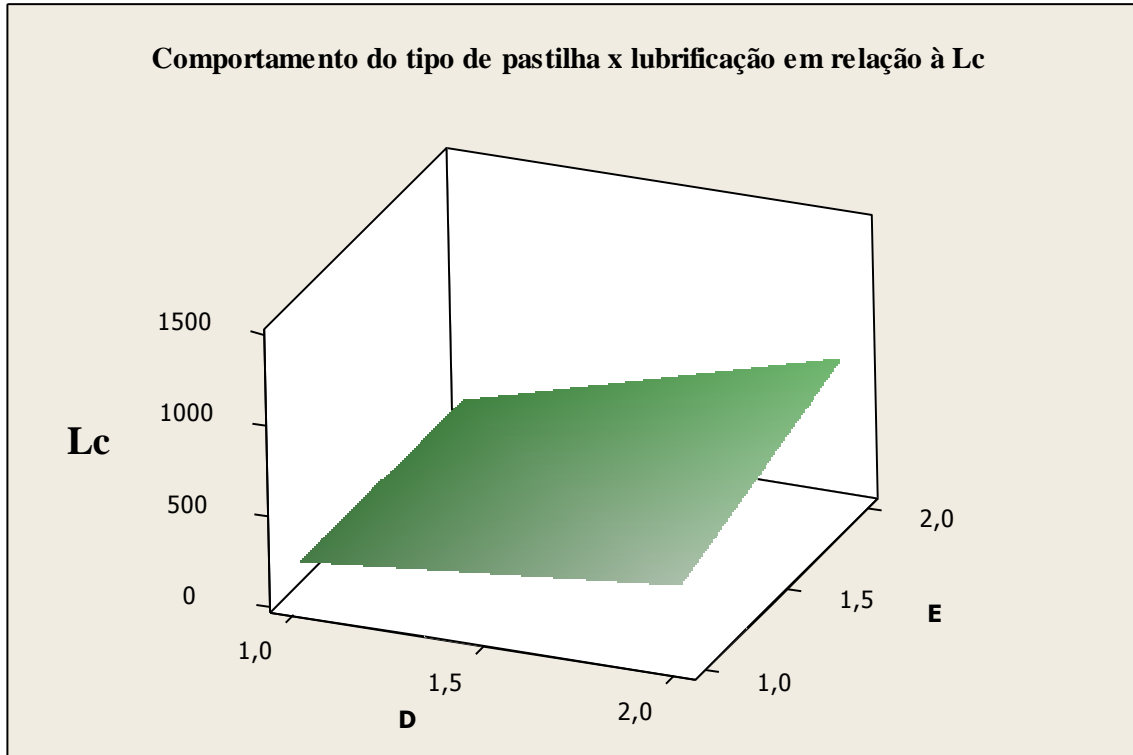


Figura 12 – Comportamento do tipo de pastilha x lubrificação em relação à L_c .

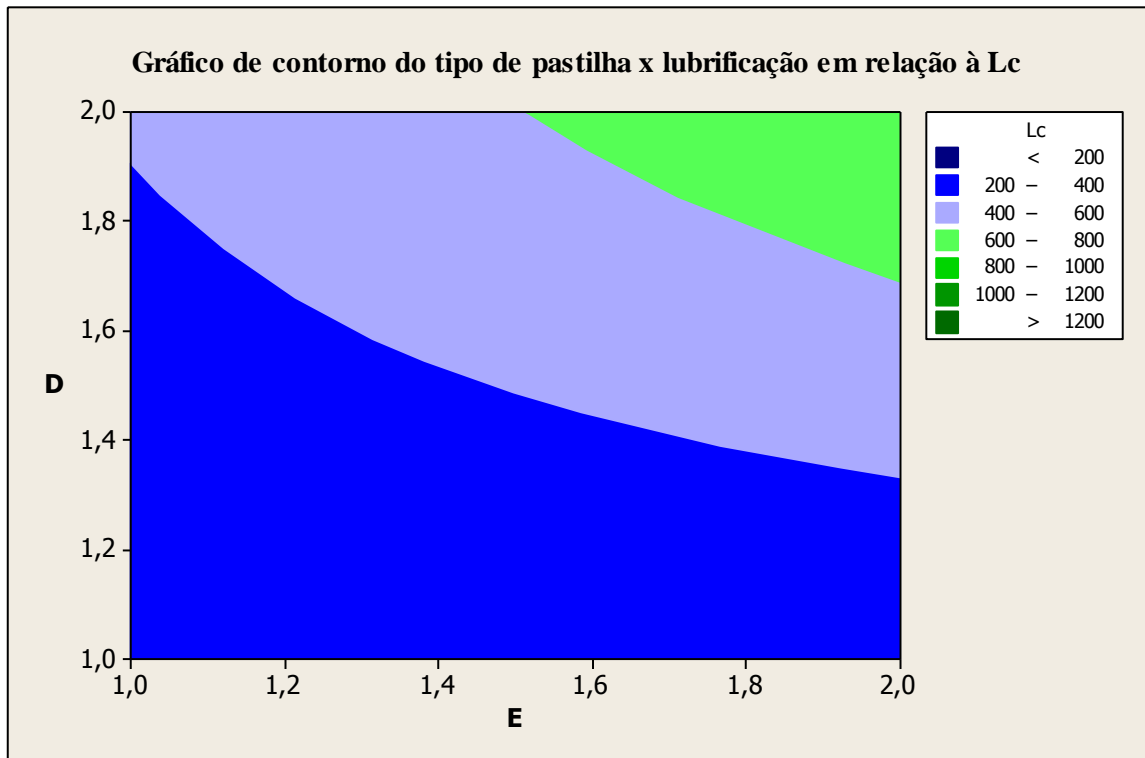


Figura 13 – Gráfico de contorno do tipo de pastilha x lubrificação em relação à L_c

As Figuras 14 e 15 mostram o efeito da interação profundidade de corte x dureza do material em relação à L_c , ao realizar suas análises pode-se observar que com a utilização da dureza do material no nível alto, solubilizado a quente, deve-se utilizar a menor profundidade de usinagem, e com a utilização da dureza do material no nível baixo, laminado, deve-se utilizar a maior profundidade de usinagem, para obter um maior comprimento de corte.

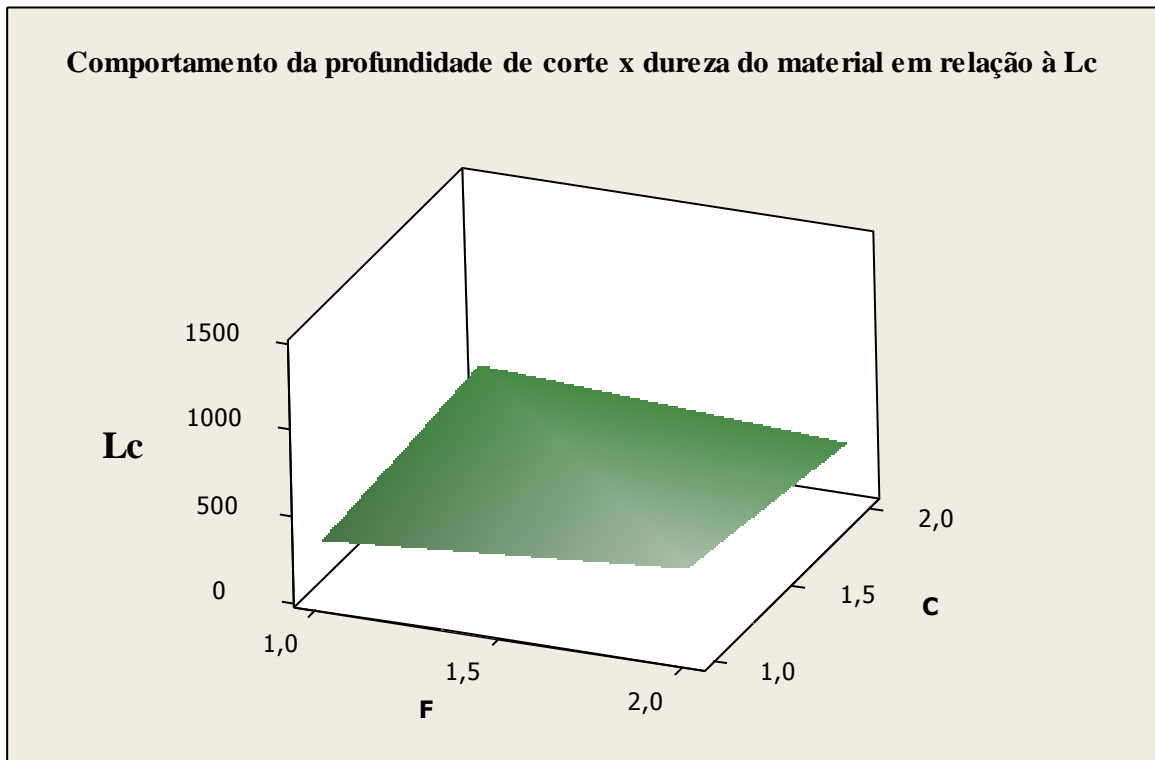


Figura 14 – Comportamento da profundidade de corte x dureza do material em relação à L_c .

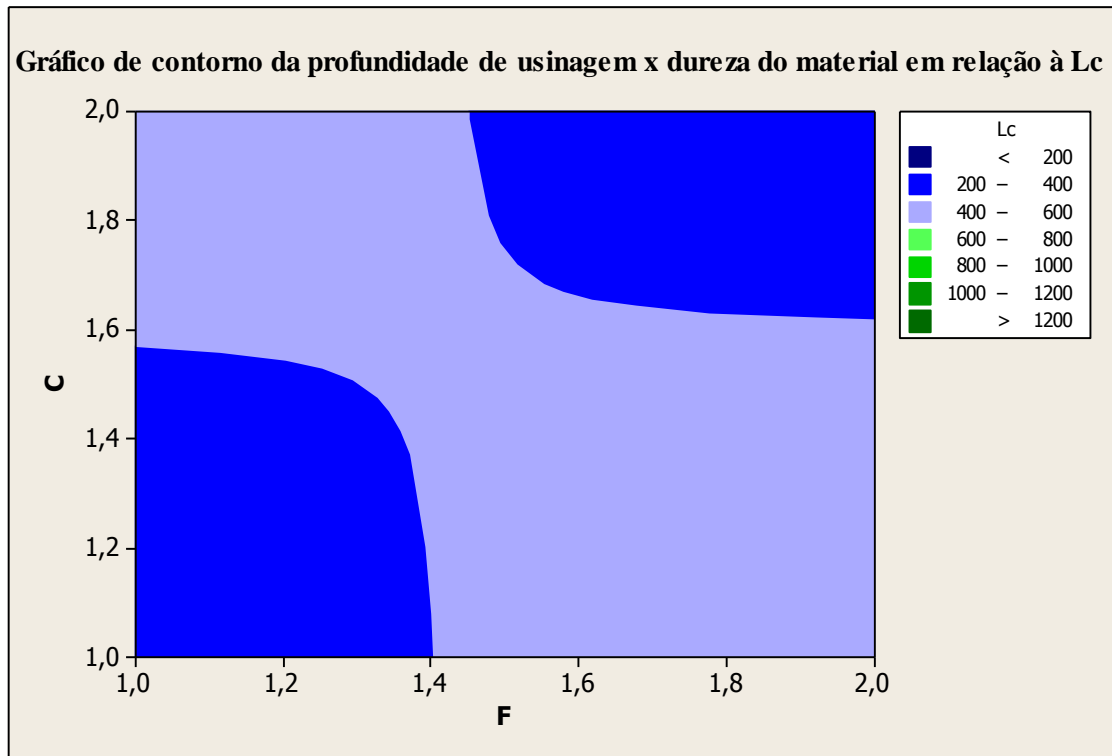


Figura 15 – Gráfico de contorno da profundidade de usinagem x dureza do material em relação à L_c

4.3 Comportamento da variável resposta (L_c) em relação à Razão S/N

Outra ferramenta do Método de Taguchi é a análise dos dados obtidos pela experimentação por meio da Razão Sinal/Ruído (S/N). Sabendo que a variável resposta do processo, o comprimento de corte, é quanto maior melhor, ou seja, quanto maior o comprimento de corte maior a vida da ferramenta, otimizando o processo, deve-se utilizar a relação “maior-melhor” para o cálculo da Razão S/N. A Figura 16 mostra os gráficos dos efeitos e das interações dos fatores sobre a variável resposta em relação à Razão S/N.

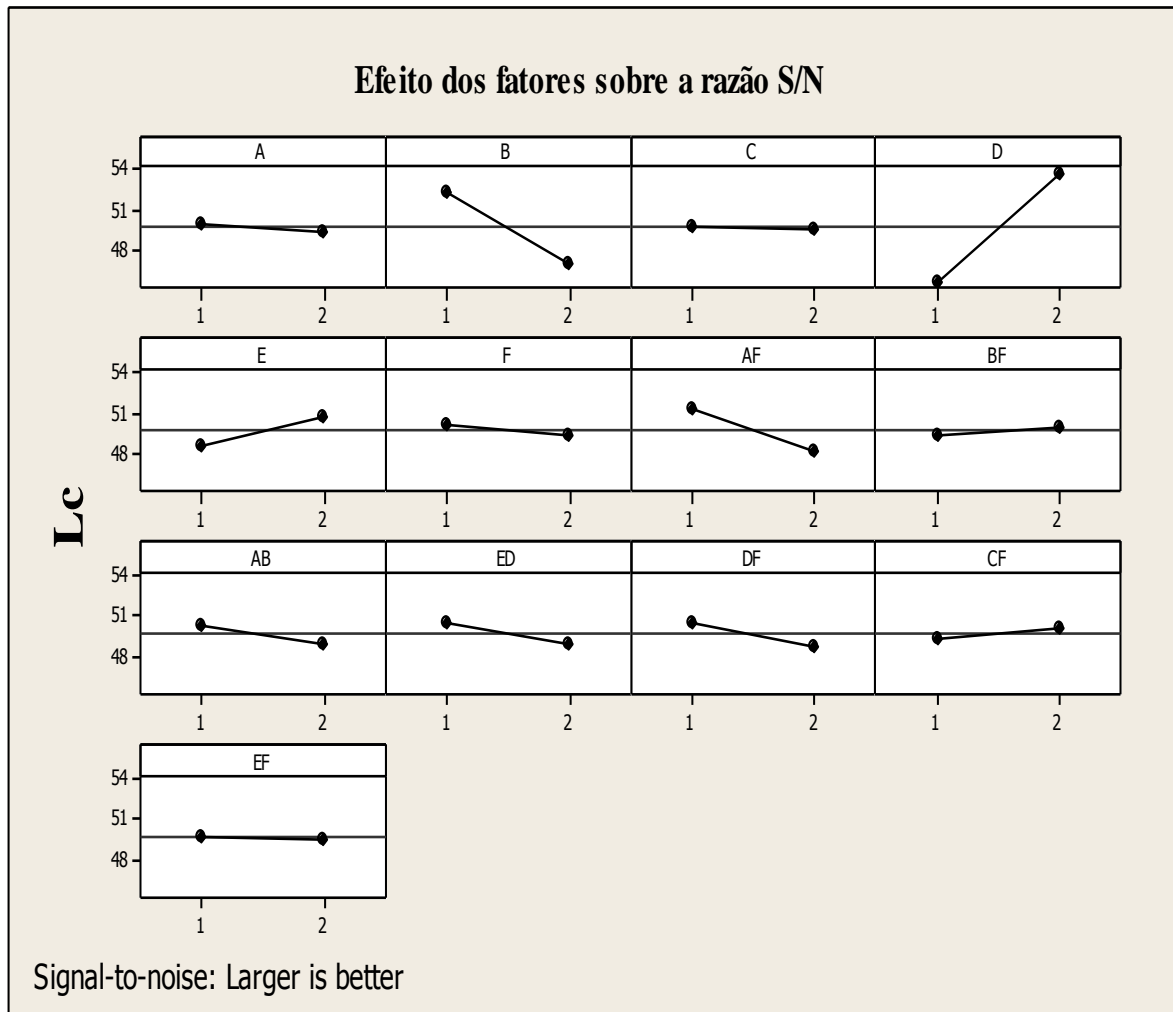


Figura 16: Efeitos dos fatores e das interações sobre a razão S/N em relação ao L_c .

Com a análise da Figura 16, efeito dos fatores e das interações sobre a razão S/N em relação à variável resposta L_c , pode-se observar que o resultado obtido é semelhante ao resultado dos efeitos em relação à média L_c , sendo os fatores B e D, os maiores influentes no processo de torneamento estudado e o fator E exerce uma maior influência na variável resposta L_c em relação aos fatores: A, C e F. O melhor ajuste para o processo estudado em relação à razão S/N também é semelhante ao ajuste em relação à média.

Ainda segundo a Figura 16, observamos que as interações dos fatores sobre a razão S/N, diferem em relação à interação profundidade de usinagem x dureza do material, sendo que esta interação não é influente no processo em relação à razão S/N.

Os resultados da ANOVA em relação à razão S/N podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7: ANOVA para Lc em relação à razão 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
CF	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 resultados obtidos para a razão S/N com os resultados em relação à média pode-se observar a mesma resposta, sendo os Fatores B, D e E significantes para o processo, considerando a análise do valor-p, e exercem influencia para a análise do teste de F.

Analisando as interações percebe-se uma diferença em relação aos resultados obtidos para média, somente a interação velocidade de corte x dureza do material é significativa para o processo em relação à razão S/N.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações finais do estudo realizado e as sugestões para trabalhos futuros, podendo assim contribuir com futuras pesquisas.

5.1 Considerações Finais

A aplicação do Método de Taguchi proporcionou a identificação dos fatores significantes para o processo de torneamento cilíndrico da superliga NIMONIC 80A, otimizando o processo estudado, e conseqüentemente melhorando a qualidade do produto.

Com a análise realizada nesse trabalho, em relação à variável resposta comprimento de corte (L_c), podemos concluir que os fatores avanço, tipo de pastilha e lubrificação são influentes no processo, com isso, o avanço deve ser ajustado no seu nível baixo, 0,12 mm/revolução, o tipo de pastilha no seu nível alto, pastilha CP250 especifica para usinagem de superligas, e a lubrificação também no seu nível alto, sendo fluido de corte abundante, e os demais fatores devem ser ajustados considerando o seu nível mais acessível, pois não existe evidencia estatística de que eles são influentes no processo.

Em relação à análise das interações dos fatores, podemos concluir que a interação velocidade de corte x dureza do material é significantes para o processo, tanto em relação a média como para a razão S/N, e as interações tipo de pastilha x lubrificação e profundidade de corte x dureza do material são significantes somente em relação a média L_c .

Por fim, observou-se que o método utilizado atendeu todos os objetivos propostos no trabalho, sendo que se mostrou eficiente, definindo os fatores e as condições que afetam diretamente a variável resposta.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente estudo proporcionou a identificação dos fatores que influenciam o processo de torneamento cilíndrico da superliga NIMONIC 80A, sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

- ✓ A investigação da viabilidade econômica da escolha dos níveis dos fatores que exercem influencia sobre o processo, otimizando o mesmo;
- ✓ O estudo de outros processos de usinagem utilizando a superliga NIMONIC 80A, tais como, furação ou fresamento, com a utilização de DOE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

BONDUELLE, G. M. **Aplicação do Planejamento de Experimentos no Controle da Fabricação de Chapas de Fibras de Madeira.** CERNE, v. 6, p.001-010, 2000.

BRUNI, C., FORCELLESE, A., GABRIELLI, F. Hot Workability and models for flow stress of NIMONIC 115 Ni-base superalloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 242-247, 2002.

CALADO, V., MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando *Statística*.** Editora E-Papers Serviços Editoriais, Rio de Janeiro, 2003. 260p.

CARDOZA, J. A. S., CORREIA, E. A. S. **Planejamento de Experimentos no Processo Produtivo.** II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. João Pessoa, 2007.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 1353-1367, 2005.

FARIA, J. C. de. **Estudo da Usinagem em Torneamento da Superliga a Base de Níquel NIMONIC 80A.** Dissertação de Mestrado. Guaratinguetá: UNESP, 2007.

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

FRATILA, D., CAIZAR, C. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 640-645, 2011.

GUNASEGARAM, D. R., FARNSWORTH, D. J., NGUYEN, T. T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments. **Journal of materials processing technology**, v. 209, p. 1209–1219, 2009.

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

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

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Blucher, 1 ed., 2009.

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

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, 5 ed., 2001. 699p.

OZBAY, E., OZTAS, A., BAYKASOGLU, A., OZBEBEK, H. Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 694-702, 2009.

PADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1989.

PAIVA, A. P., SOUZA, M. A., BALESTRASSI, P. P. **Otimização do Procedimento de Homogeneização de Emulsões de Petróleo através da Metodologia de Taguchi**. XI SIMPEP – Bauru, 2004.

REED, R. C., TAO, T., WARNKEN, N. Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. **Acta Materialia**, v.57, p. 5898-5913, 2009.

RESENDE, D. L., NETO, C. de M., REIS, D. A. P., HIRSCHMANN, A. C. de O. **Estudo do Comportamento Mecânico da Superliga Inconel 718 em Temperaturas Elevadas**. Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA. São José dos Campos, 2009.

RODRIGUES, M. A., HASSUI, A. **Análise dos Desgastes de Ferramentas de Metal Duro Revestidas no Fresamento da Liga a Base de Níquel – Inconel 625 – Depositada em Forma de Revestimento Metálico**. Trabalho de Graduação. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, PMR/POLI/USP. São Paulo, 2005.

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

SALEHUDDIN, F., AHMAD, I., HAMID, F. A., ZAHARIM, A. Optimization of Process Parameter Variability in 45nm PMOS Device using Taguchi Method. **Journal of Applied Sciences**, v. 11, p. 1261-1266, 2011

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

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

SILVA, L. R. da, COELHO, R. T., CATAI, R. E. **Desgaste de Ferramenta no Torneamento com alta velocidade de corte da superliga “Waspaloy”**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 57(2), p. 109-114, abr. jun. 2004.

TAGUCHI, G., ELSAYED, E. A., HSIANG, T. C. **Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção**. Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1990.

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

WITTING, H. **Torneamento de superligas**. Máquinas e metais, v. 38 (440), 2002, p. 156 – 65.