

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

ARTHUR TERLECKI HANKE

**UTILIZAÇÃO DE DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO
APLICADO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM NO
DESBASTE DE LIGA INCONEL SOLDADA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2017

ARTHUR TERLECKI HANKE

**UTILIZAÇÃO DE DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO
APLICADO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM NO
DESBASTE DE LIGA INCONEL SOLDADA**

Monografia de Conclusão do Curso apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade.

Orientador: Prof. Emerson Rigoni
Co-orientador: Prof. Sérgio Shimura

CURITIBA
2017



TERMO DE APROVAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO APLICADO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM NO DESBASTE DE LIGA INCONEL SOLDADA

por

ARTHUR TERLECKI HANKE

Esta monografia foi apresentada em 08 de maio de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

RESUMO

HANKE, Arthur Terlecki. **UTILIZAÇÃO DE DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO APLICADO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM NO DESBASTE DE LIGA INCONEL SOLDADA.** Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho de monografia foi elaborado e desenvolvido no departamento de usinagem de uma empresa do ramo de petróleo e gás. Os processos de usinagem desenvolvidos são de extrema precisão, alta complexidade e de alto esforço de corte devido aos tipos de materiais e revestimentos utilizados. A monografia apresenta o processo de usinagem, suas muitas variáveis, as influências externas e internas à operação, e também a ferramenta da engenharia de confiabilidade aplicada no desenvolvimento deste estudo que precisou de inúmeros ensaios em peças da linha de produção. O intuito é otimizar o processo de corte na operação de desbaste de uma liga de inconel, soldada ao material base, por meio da identificação de parâmetros ideais para o processo de usinagem. Além de otimizar o uso dos insertos de corte, há o interesse em diminuir os tempos de fabricação destas peças e consequentemente diminuir gastos na operação de usinagem e verificar outros ganhos possíveis. Toda a metodologia utilizada está apresentada e nos últimos capítulos os resultados obtidos demonstram que é possível melhorar os parâmetros utilizados atualmente na operação de usinagem e obter reduções de tempo e custo, e aumento de produtividade.

Palavras-chave: DOE. Ferramenta de corte. Usinagem. Produtividade.

ABSTRACT

HANKE, Arthur Terlecki. **UTILIZAÇÃO DE DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO APLICADO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM NO DESBASTE DE LIGA INCONEL SOLDADA.** Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This monography work was elaborated and developed in the machining department of a petroleum and gas company. The machining processes developed are of extreme precision, high complexity and of high cutting strength due to the material types and cladding used. The monography presents the machining process, its many variables, the external and internal influences of the operation, and also the reliability engineering tool applied in the development of this study which needed innumerable experiments in work pieces from the production line. The aim is to optimize the cutting process in the grinding operation of an inconel alloy welded to the base material through the ideal parameters identification for the machining process. Beyond the optimization in the cutting tool usage, there is interest in reducing the work piece manufacturing lead time and consequently reduce operation costs and verify other possible savings. The whole methodology applied is presented and in the last chapters the obtained results show that it is possible to improve the currently used parameters in the machining operation and obtain lead time and cost reductions, and productivity increases.

Keywords: DOE. Cutting tool. Machining. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Torno Vertical TOS HULIN.....	20
Figura 2 - Desenho da camisa com indicação da superfície estudada	21
Figura 3 – Ilustração da velocidade de corte.....	24
Figura 4 – Ilustração do movimento de avanço axial.....	25
Figura 5 – Ilustração da profundidade de corte	26
Figura 6 – Ilustração dos movimentos de usinagem de uma peça em torneamento.....	26
Figura 7 - Fluxograma DOE	45
Figura 8 – Impacto da escolha dos níveis dos fatores em um experimento sem réplica com pequeno espaçamento entre os níveis.....	50
Figura 9 – Impacto da escolha dos níveis dos fatores em um experimento sem réplica com espaçamento agressivo entre os níveis	51
Figura 10 – Matriz delineamento 2^3	52
Figura 11 – Matriz delineamento 2^{3-1}	53
Figura 12 – Aliases da matriz delineamento 2^{3-1}	53
Figura 13 – (a) Experimento fatorial 2^2 , (b) Experimento composto central com $\alpha=1$, (c) Experimento de composição central com $\alpha=\sqrt{2}$	59
Figura 14 – Experimento de Box-Behnken com $k=3$	60
Figura 15 – Insetos com diferentes formas de falha.....	63
Figura 16 – Alteração da superfície com mudança súbita de acabamento devido a falha da ferramenta.....	64
Figura 17 - Formação de rebarbas na peça devido a falha da ferramenta	65
Figura 18 – Alteração no cavaco devido a falha da ferramenta	65
Figura 19 – Níveis do Delineamento Composto Central	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação da profundidade de corte com a vida útil da ferramenta.....	29
Gráfico 2 – Relação da velocidade de avanço com a vida útil da ferramenta.....	29
Gráfico 3 – Relação da velocidade de corte com a vida útil da ferramenta.....	30
Gráfico 4 – Experimento fatorial sem interação.....	47
Gráfico 5 – Experimento fatorial com interação.....	47
Gráfico 6 – Superfície de resposta tridimensional mostrando η em função de x_1 e x_2	54
Gráfico 7 – Linhas de contorno da superfície de resposta com curvatura significativa.....	55
Gráfico 8 – Direção do caminho de ascensão em uma superfície de resposta sem curvatura significativa.....	56
Gráfico 9 - Superfície de contorno do delineamento fatorial 2^2 com pontos centrais.....	73
Gráfico 10 – Curvas de nível do delineamento RSM.....	77
Gráfico 11 – Superfície de contorno do delineamento RSM.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de avanço máximo em função de um valor R_a especificado, para diferentes tamanhos de raio de ponta	19
Quadro 2 – Efeitos da profundidade de corte na usinagem.....	28
Quadro 3 – Efeitos da velocidade de avanço na usinagem	29
Quadro 4 – Efeitos da velocidade de corte na usinagem	30
Quadro 5 - Tipos de falha na pastilha e recomendações para aperfeiçoar a operação.....	35
Quadro 6 – Delineamento fatorial fracionado dos quatro fatores com dois níveis e uma replicação.....	62
Quadro 7 – Delineamento fatorial 2^2 com pontos centrais.....	66
Quadro 8 – Delineamento de máxima descida.....	67
Quadro 9 – Delineamento para teste de curvatura	68
Quadro 10 – Delineamento RSM de segunda ordem	70
Quadro 11 – Respostas do delineamento fatorial fracionado 2^3	71
Quadro 12 – Tabela de regressão para o delineamento fatorial fracionado 2^3	71
Quadro 13 – Respostas do delineamento fatorial 2^2 com cinco pontos centrais.....	72
Quadro 14 – Tabela de regressão para o delineamento fatorial 2^2 com pontos centrais	73
Quadro 15 – Resultados dos experimentos para o método de máxima descida	74
Quadro 16 – Resultados do delineamento para teste de curvatura	74
Quadro 17 – Tabela ANOVA para o delineamento de teste de curvatura.....	75
Quadro 18 – Resultado do delineamento composto central	75
Quadro 19 – Tabela ANOVA para o delineamento composto central	76
Quadro 20 – Resultados dos experimentos de validação dos parâmetros ótimos....	78

LISTA DE SIGLAS

ANC	Árvore de natal convencional
ANM	Árvore de natal molhada
ANOVA	Análise de Variância
CBN	Boro cúbico cristalino
CFC	Cloro flúor carbono
CNC	Controle numérico computadorizado
DOE	Design of experiments
DOE++	Software utilizado para as análises de delineamento
EP	Extrema pressão
FMEA	Failure mode and effects analysis
FTA	Fault tree analysis
LDA	Life data analysis
PVD	Physical vapor deposition
RGA	Reliability growth analysis
RSM	Response surface method
SRA	System reliability analysis
TiN	Nitreto de Titânio

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Distância entre o ponto central e o de estrela
Δ	Delta
β	Coefficiente da equação
η	Superfície de resposta
ε	Erro aleatório
\emptyset	Diâmetro
Π	Pi
f	Velocidade de avanço
a_p	Profundidade de corte
v_c	Velocidade de corte
v_o	Velocidade de corte de menor desgaste
v_L	Velocidade de corte limite
Vt	Valor total de operação da usinagem
C	Concentração de óleo de corte
y	Variável resposta
x	Fator
kg	Quilograma
g	Gramma
km	Quilômetro
m	Metro
mm	Milímetro
μm	Micrômetro
cm^3	Centímetro cúbico
N	Newton
kVA	Quilo volt ampere
min	Minuto
GPa	Giga pascal
HV	Vickers
D	Diâmetro
n	Rotação
rpm	Rotação por minuto
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
rot	Rotação
Ni-Cr-Mo	Níquel cromo molibdênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	14
1.4	METODOLOGIA	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2	OBJETO DE PESQUISA	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO DE USINAGEM, FERRAMENTAS DE CORTE E LIGA INCONEL.....	23
3.1	CONCEITOS DE USINAGEM.....	23
3.2	USINABILIDADE DOS MATERIAIS	26
3.2.1	Variáveis dependentes da máquina	27
3.2.2	Variáveis dependentes da ferramenta.....	27
3.2.3	Variáveis dependentes da peça	27
3.2.4	Variáveis dependentes do fluido de corte.....	27
3.2.5	Variáveis dependentes do processo	27
3.3	RELAÇÃO DA VIDA DA FERRAMENTA COM AS VARIÁVEIS	28
3.3.1	Variáveis dependentes do processo	28
3.3.2	Variáveis dependentes da máquina	30
3.3.3	Variáveis dependentes da ferramenta.....	31
3.3.4	Variáveis dependentes do fluido de corte.....	31
3.3.5	Variáveis dependentes da peça	32
3.4	MATERIAIS USADOS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	32
3.5	ESCOLHA DO MÉTODO E DA FERRAMENTA DE CORTE	33
3.6	FALHA E DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE	34
3.7	CRITÉRIOS PARA DETERMINAR O FIM DE VIDA DA FERRAMENTA	36
3.8	LIGA DE ALTA DUREZA – INCONEL 625.....	37
3.8.1	Características e propriedades da Superliga Inconel 625.....	38
3.8.2	Usinabilidade do Inconel	39
4	REFERENCIAL TEÓRICO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	41
4.1	INTRODUÇÃO AO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS	42
4.2	DEFINIÇÕES DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTO	46
4.3	EXPERIMENTOS FATORIAIS COMPLETOS GERAIS	48
4.4	EXPERIMENTOS FATORIAIS COMPLETOS DE DOIS NÍVEIS.....	49
4.5	EXPERIMENTOS FATORIAIS FRACIONADOS	51
4.5.1	Delineamento Fracionado pela Metade.....	52
4.6	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	54
4.6.1	Delineamento Composto Central	58
4.6.2	Delineamento Box-Behnken.....	60
5	APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO NO OBJETO DE PESQUISA	61
5.1	ESCOLHA DOS FATORES INICIAIS.....	61
5.2	DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO	62
5.3	MÉTODO DA MÁXIMA ASCENSÃO/DESCIDA.....	66
5.4	DELINEAMENTO COM SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	69
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	71

7 CONCLUSÕES.....	79
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo traz a apresentação do tema, objetivos da pesquisa, justificativas, a metodologia aplicada e a forma de estruturação do trabalho.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

A ciência da usinagem é extremamente especializada, muito estudada e com inúmeras variáveis em seu processo. As variáveis podem ser dependentes da máquina, da ferramenta, da peça, do fluido de corte e dependentes do processo. Cada um desses grupos pode ser desmembrado em outros vários, por exemplo, a ferramenta de corte, depende da geometria da ferramenta (formato do inserto, também chamado de pastilha, tolerâncias, ângulo de folga, tipo, espessura, preparação da aresta de corte, comprimento da aresta de corte, raio de ponta, etc.), do material da ferramenta (aços ferramenta, aços rápidos comuns, aços rápidos com cobalto, ligas fundidas, carbonetos sinterizados, cerâmica, diamantes, etc.) e da qualidade do gume.

Devido ao enorme número de variáveis existente na escolha dos parâmetros em um processo de usinagem, nem sempre referências bibliográficas, testes de fornecedores, catálogos de insertos de usinagem e outras fontes de informação conseguem determinar com exatidão as condições ideais para a usinagem de uma determinada peça.

A engenharia de materiais vem se aprimorando e novos materiais capazes de suportar os enormes esforços de corte, que os insertos de usinagem sofrem ao cortar o material, vêm sendo muito desenvolvidos. Neste trabalho partiu-se do princípio que ensaios preliminares já foram feitos para determinar o inserto ideal e usou-se esta única especificação de inserto para os estudos.

Estudou-se nesta monografia a usinagem de uma liga (Inconel) soldada ao material base através de um processo de soldagem robotizado. Foi assumido que a superfície soldada é uniforme e com depósito constante do material de revestimento. A dureza do material é extremamente alta, gerando falha da aresta cortante em tempos muito pequenos, o que conseqüentemente gera uma alta taxa de troca de

ferramenta, paradas frequentes do processo e aumento do tempo de usinagem das peças, além do alto gasto com pastilhas.

Os fatores envolvidos nas técnicas de usinagem serão apresentados, assim como aqueles para a escolha de insertos apropriados ao processo de usinagem em Inconel, os que aceleram o desgaste mecânico dos insertos e as recomendações a serem adotadas.

1.2 OBJETIVOS

O interesse desta pesquisa é identificar os parâmetros ideais no processo de usinagem de uma peça revestida com a liga inconel.

1.2.1 Objetivo Geral

Procura-se diminuir os tempos de fabricação das peças, alcançar um aumento do tempo de vida útil das ferramentas e conseqüentemente diminuir gastos com insertos e verificar outros ganhos possíveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir os objetivos gerais, precisa-se primeiramente determinar as variáveis de controle e a variável resposta. Determinar a influência de cada uma das variáveis de controle. Encontrar os níveis ótimos para os fatores de interesse e por fim certificar que foi encontrada a melhor configuração.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como as condições do equipamento, do meio lubrificante, da superfície a ser usinada, da forma da peça e outros tantos fatores tem forte influência no desgaste da ferramenta, provavelmente as condições aconselhadas não são exatas e muito menos iguais para equipamentos de usinagem similares ou peças em uma linha de

produção. Muitas usinagens são executadas com o que se definiu ser a melhor configuração, no entanto acredita-se que grandes oportunidades de ganho em produtividade e redução de custos estão presentes neste ramo de atividade.

1.4 METODOLOGIA

Inicialmente foram levantadas quais seriam as variáveis de controle a serem estudadas e qual seria a variável de resposta. O estudo se focou em um único equipamento, um torno vertical, e em um único tipo peça, a que possui a operação de usinagem de maior tempo em uma única etapa.

Na sequência foram delineados experimentos com quatro fatores (velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte e concentração do fluido de corte) em somente dois níveis para entender o processo e suas influências na variável resposta, que é a distância de corte até desgaste do gume da ferramenta de corte.

Após esta primeira etapa, os experimentos foram classificados onde então, com somente os fatores relevantes, foram investigados com mais detalhe em um delineamento com resposta de superfície, buscando encontrar os níveis ótimos para cada fator.

Ao final um experimento de validação que confirma o encontro da melhor configuração e verifica a viabilidade de expandir para outras máquinas e permite criar novos procedimentos de usinagem para as diversas peças e máquinas da linha de fabricação.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será apresentado em seis capítulos. Este primeiro capítulo faz de forma sucinta a introdução ao estudo, onde se apresenta o tema, os objetivos, as justificativas e metodologia que será adotada.

O capítulo dois apresentará em detalhe o tema e o objeto de pesquisa. Também descreverá o equipamento onde o experimento foi conduzido, o processo de

usinagem estudado, a ferramenta utilizada, a peça estudada e a metodologia usada para o estudo.

No terceiro capítulo constará o referencial teórico de processos de usinagem e suas variáveis, e dos tipos de ferramentas de usinagem. Constarão também as informações teóricas sobre a liga de alta dureza.

O capítulo quatro trará o referencial teórico da engenharia de confiabilidade, onde se utilizou o delineamento de experimentos (DOE) para estudar o tema.

Mais adiante no capítulo cinco a aplicação do referencial teórico do delineamento de experimentos na pesquisa do processo de usinagem do Inconel.

Por fim nos últimos capítulos os resultados obtidos e conclusões sobre os experimentos do trabalho. Relata-se sobre as dificuldades encontradas, as soluções para as dificuldades encontradas e as proposições para trabalhos futuros.

2 OBJETO DE PESQUISA

Este capítulo descreverá em detalhes o tema e o objeto de pesquisa. Apresentará as especificações e características da ferramenta utilizada, do equipamento onde o estudo foi feito, da peça, detalhes do processo de usinagem e relatará por completo qual foi a metodologia utilizada.

Conforme capítulo anterior, esta monografia busca identificar possibilidades de melhoria no processo de usinagem de uma peça de grande diâmetro na etapa de desbaste de um revestimento extremamente duro, o Inconel, em um torno CNC vertical. As melhorias procuradas são tais como ganhos em produtividade através da pesquisa por parâmetros ideias de usinagem, redução no consumo de ferramentas de usinagem através do seu aumento de vida útil.

Os processos de usinagem adotados nesta pesquisa são processos antigos e já há algum tempo sem revisão ou desenvolvimento. Acredita-se que os parâmetros de usinagem e insertos utilizados estão de tal maneira configurados para uma máxima produtividade e mínimo custo, porém esta pesquisa quer comprovar esta informação, ou identificar novos parâmetros, aqueles ditos como ideais, para alcançar o máximo da produtividade com o mínimo de recursos.

Percebeu-se durante a primeira parte deste trabalho que a maior parte da informação utilizada para se “desenhar” o processo de usinagem vem das informações técnicas contidas nos catálogos de ferramentas de usinagem e experiência dos próprios operadores de máquina. Mais especificamente material da marca Seco ou Sandvik, líderes de mercado no fornecimento de ferramentas de usinagem, adotando os estudos feitos por eles como referencial para determinar os parâmetros máximos a serem utilizados nos processos de desbaste, acabamento, furação, etc..

Apesar de servirem como um bom referencial, mais adiante (no capítulo três) o trabalho descreverá que existe uma infinidade de variáveis em cada processo específico. Estas variáveis podem ser dependentes da máquina, da ferramenta, da peça, do fluido de corte e do processo. Sendo assim, é bem provável que as condições encontradas e definidas pelos fabricantes de ferramentas em seus testes, não sejam as melhores condições a serem utilizadas nos processos estudados. As máquinas não são as mesmas, o fluido de corte pode não ser o mesmo ou pode não

estar na concentração idêntica, o meio ambiente é outro, as condições da superfície usinada é outra e além desses fatores encontramos mais uma série de outros, e todos juntos colocam em questionamento se é possível adotar informações de terceiros para definir qualquer um dos processos de usinagem das diversas peças manufaturadas.

A pastilha de usinagem utilizada para este estudo não foi considerada uma das variáveis, apesar de haver uma centena delas e possivelmente existir uma pastilha que traga melhorias ao processo. Partiu-se do princípio que a pastilha e o porta-ferramenta adotados no estudo são os ótimos e que trazem o melhor desempenho ao processo. Mais especificamente o inserto usado é um metal duro com liga de nitreto de titânio fundida aplicada por processo de depósito físico de vapor, conforme será apresentado no capítulo três. O inserto tem o código CNMG120412-MR3, CP500 da marca Seco.

Conforme o Catálogo & Guia Técnico (SECO TOOLS, 2008), o código significa que é um inserto com um ângulo de 80° de ponta no gume principal e consequentemente 100° no gume secundário (gume utilizado para a operação de desbaste com o intuito de aproveitar ao máximo a pastilha), um ângulo de folga de 0° , uma classe de tolerância M (ver tabela do fabricante para detalhes), um tipo de pastilha G (ver tabela do fabricante para detalhes), com um comprimento de aresta de corte de 12 mm (ou seja, indicada para uma máxima profundidade de corte (a_p) de 5 mm), uma espessura de 4,76 mm, um raio de ponta de 1,2 mm, um quebra-cavaco com um ângulo de saída altamente positivo que reduz os esforços de corte, tendendo a aumentar a resistência da aresta. Ainda, é indicado para operações de semi-desbaste e desbaste de superligas e aços endurecidos. Gama de aplicação sendo avanço (f) variando de 0,2 a 0,6 mm/rotação, profundidade de corte (a_p) variando de 1,5 a 7 mm. e com uma classe CP500, que envolve as propriedades básicas de tenacidade e resistência ao desgaste de acordo com a norma ISO, neste caso classe micro-grão de elevada tenacidade, indicada para acabamento e semi-desbaste dos aços inoxidáveis. Apresenta um bom comportamento quando em contato com cortes interrompidos.

O inserto acima descrito tem um custo aproximado de R\$ 53,00 (cinquenta e três) reais por pastilha. Levando-se em consideração que esta pastilha tem oito arestas de corte, sendo quatro principais e quatro secundárias, que podem ser

usadas e que uma aresta pode se desgastar em apenas quinze minutos de usinagem, conclui-se que em um ano de produção milhares de reais são gastos em insertos em apenas um equipamento.

A pastilha utilizada alcança as rugosidades apresentadas no Quadro 1 de acordo com as velocidades de avanço, o que permitem uma usinagem dentro das tolerâncias solicitadas em projeto.

Acabamento superficial R_a (μm)	Raio da ponta, r_ϵ (mm)					
	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,4
	Avanço, f (mm/rot.)					
0,6	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17
1,6	0,08	0,12	0,16	0,20	0,23	0,29
3,2	0,12	0,16	0,23	0,29	0,33	0,40
6,3	–	0,23	0,33	0,40	0,47	0,57
8,0	–	–	0,40	0,49	0,57	0,69

Quadro 1 - Valores de avanço máximo em função de um valor R_a especificado, para diferentes tamanhos de raio de ponta

Fonte: Catálogo & Guia Técnico (SECO TOOLS, 2008).

O torno vertical utilizado neste estudo foi o torno da marca TOS HULIN modelo SKIQ 16 CNC C, fabricado em 1996 (Figura 1), porém passou por um retrofiting eletroeletrônico completo em 2015 onde foi instalado um novo comando numérico mais atual, cabeamento e servomotores novos. A máquina possui excelentes características mecânicas, apresentando usinagens extremamente precisas mesmo com grandes esforços. A placa de torneamento da máquina possui 1600 mm de diâmetro com quatro castanhas para fixação de peças. O torno possui 6240 mm de altura e pesa 30000 kg. As máximas medidas de peças para usinar são 2000 mm de altura e 2000 mm de diâmetro. O esforço de corte máximo é de 44000 N e a potência total do equipamento é de 107 kVA. A velocidade de avanço pode variar de 0,001 até 50 mm/rotação.



Figura 1- Torno Vertical TOS HULIN

Fonte: Autoria própria.

A peça estudada trata-se de uma camisa, parte de uma árvore de natal molhada, equipamento submarino formado por um conjunto de válvulas, utilizado para regular a produção em poços de exploração de petróleo e gás natural. Há, atualmente, dois tipos de árvore de natal: as árvores de natal convencional - ANC e a árvore de natal molhada - ANM, esta utilizada em plataformas de exploração em alto mar.

Algumas superfícies da árvore de natal entram em contato direto com os hidrocarbonetos extraídos do poço de exploração. Esta superfície precisa ser muito resistente à abrasão e passagem de petróleo, e permanecer idealmente inalterada durante toda a vida útil do equipamento no ambiente submarino, que é de aproximadamente vinte anos.

A camisa necessita de aproximadamente sessenta horas de usinagem entre passes de desbaste e de acabamento para ser finalizada. Este longo tempo de fabricação fez com que fosse a peça escolhida para o estudo, pois é a uma das operações mais demoradas e severas.

Na Figura 2 - **Desenho da camisa com indicação da superfície estudada** é apresentado um croqui da peça indicando qual foi a superfície estudada no passe de desbaste. O grande diâmetro de 1168 mm e a altura considerável de 750 mm resulta em mais de 18 km lineares de usinagem. Sabendo que a cada rotação o avanço é

de somente 0,15 mm, são necessárias 5000 rotações em um perímetro de 3667 mm para usinar toda a superfície interna da camisa.

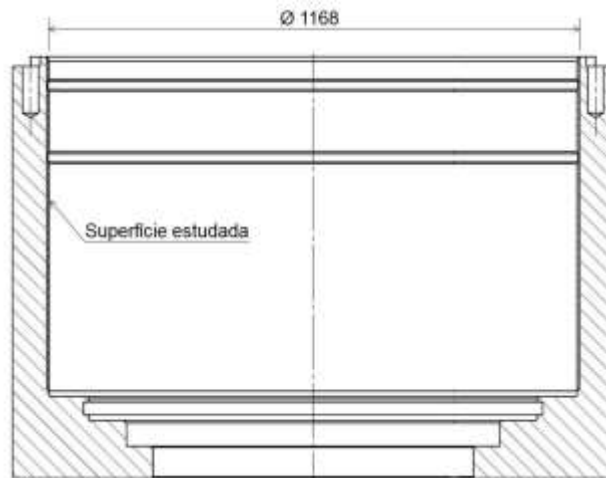


Figura 2 - Desenho da camisa com indicação da superfície estudada

Fonte: Autoria própria.

Conforme o próximo capítulo descreverá, os principais fatores que desgastam a aresta de corte de uma ferramenta e que podem ser facilmente alterados para melhorar a vida útil do inserto são a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte (FREIRE, 1975).

O processo de desbaste da camada de revestimento em Inconel na peça pesquisada está atualmente configurado para uma velocidade de corte de 30 m/min, um avanço de 0,15 mm/rot e uma profundidade de corte de 1,5 mm. Para ser mais abrangente, também se estudou a variação da concentração de fluido de corte.

O produto atualmente utilizado é um fluido de corte de alto desempenho, à base de óleo mineral com emulsificantes, aditivos EP (extrema pressão) e inibidores. Este óleo é miscível em água e desenvolvido para operações de usinagem severa. Sua concentração deve ser mantida acima de 7% de acordo com documentos do fabricante para o tipo de operação estudada (BLASER SWISSLUBE DO BRASIL, 2015).

Esta pesquisa iniciou com um delineamento fatorial fracionado com quatro fatores, dois níveis e uma replicação, para compreendermos os efeitos de cada fator na variável resposta. A replicação foi adicionada para diminuirmos os erros.

Após esta primeira etapa, eliminou-se os fatores menos relevantes, e um novo delineamento de experimentos foi feito com resposta de superfície, para encontrar os níveis ótimos para cada fator.

Com os dados obtidos nos experimentos anteriores um novo experimento de validação foi elaborado para confirmar o encontro da melhor configuração.

3 REFERENCIAL TEÓRICO DE USINAGEM, FERRAMENTAS DE CORTE E LIGA INCONEL

Neste capítulo será apresentada a teoria necessária para entender melhor o processo de usinagem. Esta teoria ajudará durante a condução do estudo no que diz respeito a escolha das variáveis de controle e variável resposta, assim como direcionar o estudo para o objetivo geral.

3.1 CONCEITOS DE USINAGEM

De acordo com Infopédia (2016), “a usinagem é a operação que tem por objetivo dar forma a matéria-prima”. Esta matéria-prima pode ser uma peça metálica ou não, e esta operação pode ser uma furação, torneamento, fresamento, aplainamento, serramento, entre outros.

Segundo ainda o dicionário Michaelis (2016), “usinagem significa o ato ou efeito de usinar”, onde usinar segundo o mesmo autor é “submeter um material em bruto à ação de uma máquina-ferramenta”.

O início da usinagem vem de muitos anos atrás com processos totalmente manuais e evoluiu de tal forma que hoje em dia, com o uso de máquinas de alta precisão, como é o caso das chamadas CNC (comando numérico computadorizado), é possível obter uma precisão que chega a ser tão pequena quanto a um micron.

Para facilitar a compreensão do assunto desta monografia abaixo estão alguns termos básicos utilizados no vocabulário da usinagem, suas definições e um breve referencial teórico sobre cada um desses termos. Todos os movimentos, direções de movimentos e velocidades são definidas relativamente à peça.

Movimento de corte corresponde ao movimento principal produzido com o objetivo de provocar um deslocamento relativo entre a ferramenta e a peça, forçando material da peça sobre a face da ferramenta. Num torno este movimento é produzido pela rotação da peça. O movimento de corte só pode remover material sob a forma de cavacos por mais de uma rotação, se houver um movimento de avanço, como definido a seguir (STEMMER, 1993, p.10).

De acordo com Freire (1975, p.41) “**velocidade de corte** (v_c) é a velocidade com o qual se dá a retirada do cavaco, ou seja, a velocidade do gume da ferramenta em relação à peça”, medida em (m/min) na aresta de corte.

Para se determinar a velocidade de corte deve-se levar em conta a ferramenta, o avanço e a profundidade de corte (definições mais adiante) a serem utilizados, o tipo de máquina e a natureza da operação a ser feita. No desbaste, que visa uma retirada rápida de material, usa-se a maior velocidade compatível com a profundidade de corte e o avanço.

A velocidade de corte (Figura 3) é calculada pela fórmula seguinte, onde D é o diâmetro da peça sendo usinada, dado em mm, e n é a rotação da peça dada em rpm.

$$v_c = (\pi \times D \times n)/1000 \text{ m/min} \quad (\text{equação 3.1})$$

A produção da ferramenta, sua vida útil, varia com a velocidade de corte. O máximo de produção corresponde a uma velocidade denominada velocidade de menor desgaste (v_o). Se a afiação e substituição/montagem da ferramenta podem ser realizadas rapidamente, adota-se velocidades superiores à de menor desgaste e compreendidas na zona situada entre velocidade de menor desgaste e a velocidade limite (v_L). Tais velocidades exigem substituições de ferramenta mais frequentes durante o trabalho, no entanto o resultado final se traduz por uma economia apreciável de tempo, correspondendo a um regime de produção econômico e por este motivo denominadas velocidades de corte econômicas (FREIRE, 1975, p.41).

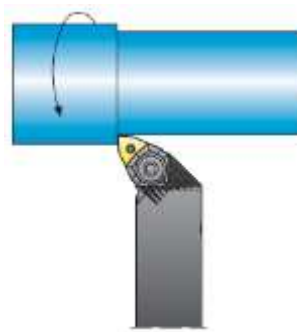


Figura 3 – Ilustração da velocidade de corte.

Fonte: Sandvik (2011).

Enquanto que a peça ligada à árvore de trabalho, também chamada de placa de fixação, gira continuamente durante o torneamento e com isto produz o movimento principal de corte, a ferramenta ao mesmo tempo vai se adiantando, produzindo o **movimento de avanço** (f_n). A velocidade de avanço é medida pelo percurso em mm que a ferramenta percorre durante um giro da peça, ou seja, mm/rotação. Em operações de desbaste o avanço costuma ser maior que o avanço em operações de acabamento (FREIRE, 1975, p.65).

No torneamento podemos ter dois tipos de avanço, aquele com movimento axial da ferramenta (Figura 4), em operações de usinagem do diâmetro da peça ou aquele com movimento radial, no torneamento de face. Quando o avanço é radial em direção ao centro da peça, a velocidade de corte irá diminuir até atingir zero m/min no centro da peça (SANDVIK, 2011).

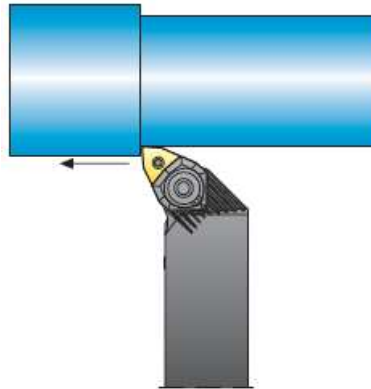


Figura 4 – Ilustração do movimento de avanço axial

Fonte: Sandvik (2011).

A **profundidade de corte** (a_p) é a diferença entre a superfície cortada e a bruta. A profundidade de corte (Figura 5) é medida em mm em um ângulo reto (90°) com relação à direção de avanço (SANDVIK, 2011).

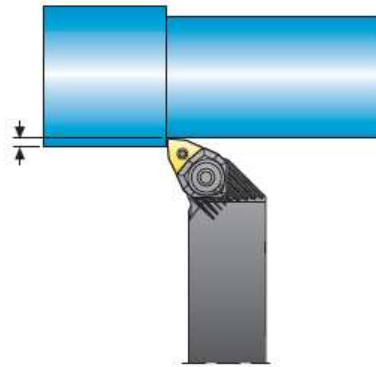


Figura 5 – Ilustração da profundidade de corte

Fonte: Sandvik (2011).

Na Figura 6 constam todos os movimentos ilustrados juntos.

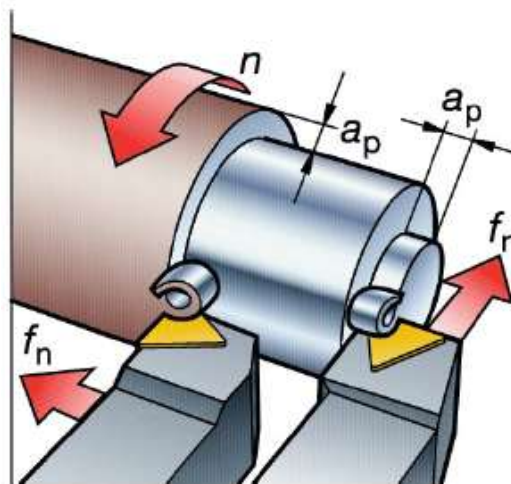


Figura 6 – Ilustração dos movimentos de usinagem de uma peça em torneamento

Fonte: Seco Tools (2008).

3.2 USINABILIDADE DOS MATERIAIS

Conforme Stemmer (1993, p.126) a propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte denomina-se usinabilidade. Para orientar o estudo subsequente e alertar sobre o grande número de fatores que efetivamente podem influir na usinabilidade, abaixo segue uma lista subdividida em cinco grupos:

3.2.1 Variáveis dependentes da máquina

- a) Rigidez estática da máquina, do porta-ferramenta e do dispositivo de sujeição da peça.
- b) Rigidez dinâmica: amortecimento e frequências próprias da máquina na faixa de trabalho.
- c) Potência e força de corte disponíveis na ponta da ferramenta.
- d) Gama de velocidades de corte e de avanço.

3.2.2 Variáveis dependentes da ferramenta

- a) Geometria da ferramenta.
- b) Material da ferramenta.
- c) Qualidade do gume.

3.2.3 Variáveis dependentes da peça

- a) Forma, dimensões, rigidez da peça.
- b) Propriedades físicas, químicas e mecânicas do material da peça.
- c) Temperatura da peça.

3.2.4 Variáveis dependentes do fluido de corte

- a) Propriedades refrigerantes.
- b) Propriedades lubrificantes.
- c) Temperatura do fluido.
- d) Forma e intensidade de aplicação.

3.2.5 Variáveis dependentes do processo

- a) Velocidade de corte.
- b) Dimensões de usinagem (avanço, profundidade).
- c) Modo de atuação da ferramenta sobre a peça (condições de entrada e saída, corte contínuo ou interrompido, comprimento de contato entre gume e peça, etc.).

3.3 RELAÇÃO DA VIDA DA FERRAMENTA COM AS VARIÁVEIS

3.3.1 Variáveis dependentes do processo

Estas são as variáveis mais fáceis de serem modificadas em um processo de usinagem, pois são facilmente alteradas através do painel de operações da máquina.

Velocidade de corte é a variável com maior influência sobre a vida da ferramenta. Dimensões de usinagem, ou seja, avanço e profundidade de corte, evidentemente também influenciam na vida de uma ferramenta, sendo que estão em segundo e terceiro lugar respectivamente. Quando se aumenta o avanço ou a profundidade de corte a velocidade deve ser reduzida para manter a vida da ferramenta constante.

Conforme Stemmer (1993, p.139) “a combinação de uma profundidade de corte máxima possível e de um grande avanço com uma baixa velocidade de corte determina uma alta taxa de remoção de material durante uma dada vida da ferramenta. A aplicação desta regra é bastante vantajosa na usinagem de desbaste de peças estáveis, em máquinas rígidas, que permitem pesadas operações de corte. O limite é determinado pela qualidade de acabamento superficial e pelo aumento das forças de corte atuando sobre a ferramenta, peça e máquina”.

Segundo consta em Sandvik (2011) os efeitos destas três variáveis seguem conforme quadros 2, 3 e 4, e gráficos 1, 2 e 3.

a) Efeitos da profundidade de corte:

Muito pequena	Muito profunda
Perda de controle de cavacos	Alto consumo de potência
Vibrações	Quebra da pastilha
Calor excessivo	Aumento nas forças de corte
Não econômico	

Quadro 2 – Efeitos da profundidade de corte na usinagem

Fonte: Sandvik (2011).

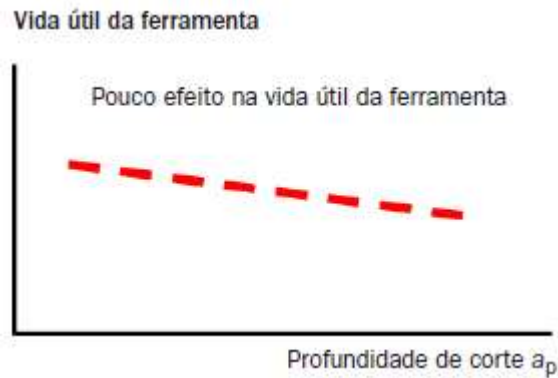


Gráfico 1 – Relação da profundidade de corte com a vida útil da ferramenta

Fonte: Sandvik (2011).

b) Efeitos da velocidade de avanço:

Muito leve	Muito pesada
Cavacos em forma de fita	Perda de controle de cavacos
Desgaste rápido do flanco	Acabamento superficial insatisfatório
Aresta postiça	Caraterizações/deformações plásticas
Não econômico	Alto consumo de potência
	Soldagem do cavaco
	Martelamento do cavaco

Quadro 3 – Efeitos da velocidade de avanço na usinagem

Fonte: Sandvik (2011).



Gráfico 2 – Relação da velocidade de avanço com a vida útil da ferramenta

Fonte: Sandvik (2011).

c) Efeitos da velocidade de corte:

Muito baixa	Muito alta
Aresta postiça	Desgaste rápido do flanco
Perda do corte da aresta	Acabamento insatisfatório
Não econômico	Craterizações rápidas
Superfície insatisfatória	Deformação plástica

Quadro 4 – Efeitos da velocidade de corte na usinagem

Fonte: Sandvik (2011).



Gráfico 3 – Relação da velocidade de corte com a vida útil da ferramenta

Fonte: Sandvik (2011).

3.3.2 Variáveis dependentes da máquina

Rigidez da máquina, do porta-ferramenta e a qualidade do dispositivo de fixação da peça também influenciam na vida da pastilha, pois vibrações, mesmo que de pequena intensidade, já produzem micro lascamentos do gume. Além disso a potência, força e as gamas de velocidade permitem programar a máquina nos parâmetros ideais de usinagem para as ferramentas (STEMMER, 1993).

3.3.3 Variáveis dependentes da ferramenta

A influência da forma e o comprimento do gume tem importância do ponto de vista tenacidade do material da ferramenta e das vibrações. O material da ferramenta tem influência ponderável na velocidade de corte admissível. O modo de atuação da ferramenta sobre a peça, ou seja, se a operação é de corte contínuo ou sofre impactos, isto também determina a vida da ferramenta, que é mais longa quando realiza uma operação de corte contínuo. O impacto na ferramenta causa uma falha mais rápida (STEMMER, 1993).

3.3.4 Variáveis dependentes do fluido de corte

Segundo Stemmer (1993) “o emprego de meios lubri-refrigerantes tem por finalidade aumentar a vida da ferramenta, aumentar a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento superficial e reduzir a força e potência de corte. Fluidos de corte têm as funções básicas de refrigeração, lubrificação, proteção contra corrosão, arrastamento de cavacos e eliminação de gume postiço”.

De acordo com Stemmer (1993) “a refrigeração tem especial importância em altas velocidades de corte, pois a grande quantidade de calor gerado no corte pode amolecer o gume da ferramenta e um pequeno esfriamento pode aumentar sua vida útil. A lubrificação deve estar presente principalmente na zona de contato da peça e do cavaco com a face da ferramenta, pois assim reduz a geração de calor”.

O gume postiço se forma especialmente em baixas velocidades de corte, prejudicando o acabamento superficial. A lubrificação da face da ferramenta por fluidos com aditivos de extrema pressão (EP) ou por óleos graxos pode evitar a formação do gume postiço (STEMMER, 1993).

Não existe um fluido de características universais, que atende a todas as exigências. A melhoria de certas qualidades induz frequentemente a piora de outras.

O emprego de fluidos lubrificantes/ refrigerantes possibilita aumentar a velocidade de corte ficando constantes todas as outras condições de trabalho. Quanto melhor a qualidade do fluido maior será o aumento de velocidade possível devido a maior retirada de calor da ferramenta, facilitando ao mesmo tempo o corte do metal e o destacamento do cavaco (FREIRE, 1975, p.58).

Segundo Freire (1975, p.71) com o resfriamento, a velocidade de corte pode ser aumentada de 10 a 30 por cento em operações de usinagem em geral. Tanto a refrigeração como a lubrificação só são aplicadas aos cortes profundos, nos materiais duros e duteis quando usinados. Uma lubrificação adequada aumenta a duração de corte da ferramenta, diminui a potência necessária à execução do corte e produz melhor acabamento.

Empregando algum lubrificante em operações de torneamento, podem-se aumentar as velocidades de corte em até 50 por cento (FREIRE, 1975, p.41).

3.3.5 Variáveis dependentes da peça

Conforme Stemmer (1993) o desgaste da ferramenta, decorrente da ação abrasiva do material da peça se pode atribuir pelo menos a duas causas: 1) inclusões e pontos duros presentes na microestrutura do metal em usinagem; 2) o aumento da dureza do cavaco e da peça em virtude do encruamento decorrente do próprio processo de usinagem.

A primeira está presente na maioria dos metais e é, geralmente, uma pequena quantidade de partículas insolúveis. Se forem muito mais duras que o metal, provocam um rápido desgaste da ferramenta de corte. Por outro lado, se forem mais moles, aumentam consideravelmente a vida da ferramenta.

Quanto maior a dureza ou a encruabilidade do material, maior será o desgaste da ferramenta.

3.4 MATERIAIS USADOS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

Segundo Stemmer (1993, p.78) as exigências básicas a fazer para um material de corte são:

- a) Elevada dureza a frio bem superior à da peça usinada;
- b) Elevada dureza a quente;
- c) Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos;
- d) Resistência à abrasão;
- e) Estabilidade química;

f) Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Nenhum dos inúmeros materiais de corte disponíveis hoje em dia possui todas estas qualidades no mais alto grau. Desta forma em cada trabalho específico devem-se verificar quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a se poder escolher o material mais adequado ao caso.

Os materiais de corte podem ser agrupados em aços ferramenta, aços rápidos comuns, aços rápidos com cobalto, ligas fundidas, carbonetos sinterizados, cerâmica, diamantes e nitreto de boro cúbico cristalino (CBN) (STEMMER, 1993, p.78).

Nesta pesquisa, conforme já mencionado no capítulo dois, foram utilizadas ferramentas com ligas fundidas como o revestimento de TiN (Nitreto de Titânio, que é uma cerâmica técnica) aplicado por processos de PVD (*Physical Vapor Deposition*). Estes conferem uma aparência dourada à ferramenta e produzem os seguintes efeitos segundo Stemmer (1993):

- a) Redução do desgaste na face e no flanco da ferramenta, pela alta dureza de cerca de 2000 a 2500 Vickers;
- b) Caráter não metálico, estabilidade química e mínima tendência de adesão ao revestimento de TiN, asseguram baixo atrito e impedem a aderência de material na ferramenta e portanto, a formação de gume postiço. Isto reduz a força de corte e melhora o acabamento superficial;
- c) Proteção do metal de base contra altas temperaturas pelo baixo coeficiente de transmissão de calor do TiN.

A camada de TiN tem de 1 a 3 μm de espessura. O sucesso da ferramenta depende, porém, pouco da espessura da camada e muito mais de sua aderência ao substrato. O lascamento do revestimento tem sido a maior causa de insucesso de ferramentas com revestimento.

3.5 ESCOLHA DO MÉTODO E DA FERRAMENTA DE CORTE

Segundo Sandvik (2011) “três diferentes áreas devem ser consideradas para determinar o melhor método e as melhores soluções de ferramentas”.

a) Característica geral da peça de torneamento: dimensões, demanda de qualidade (tolerância, acabamento superficial), tipo de operação se externa ou interna, longitudinal, perfilamento, faceamento, desbaste ou acabamento, peça estável e grande ou peça delgada e longa, ou de parede fina e pequena, raio de canto;

b) Material da peça, formato e quantidade: qualidades de quebra de cavacos, tamanho do lote, fixação da peça, criticidade do escoamento dos cavacos;

c) Parâmetros da máquina: estabilidade, potência, torque, fornecimento de refrigeração (alta ou baixa pressão) e fluido de corte, número de vezes de troca de ferramenta / número de ferramentas na torre, limitações de rpm.

3.6 FALHA E DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE

Conforme colocado por Stemmer (1993, p.128) a falha de uma ferramenta de corte pode ocorrer sob três formas distintas:








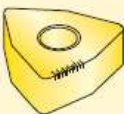

- a) Lascamento do gume, ou seja, quebra de pedaços do gume;
- b) Desgaste do flanco (superfície e incidência) formando uma marca de desgaste;
- c) Desgaste na face (superfície de saída) sob forma de cratera.

Lascamento ocorre devido à sobrecarga mecânica ou térmica do gume. É causa de lascamento a falta de resistência da ferramenta, cortes interrompidos ou impactos, inclusões duras no material da peça, dimensões excessivas do cavaco, vibrações de qualquer origem e resfriamento brusco de pastilhas muito quentes (STEMMER, 1993).

Marca de desgaste é expressa pela largura da marca. Esta largura, em geral, não é uniforme, mas é maior nos extremos da marca e na quina da ferramenta. Um raio de quina adequado pode diminuir a largura da marca nesta zona (STEMMER, 1993).

Cratera é a concavidade que se forma na face da ferramenta, devido ao atrito da mesma com o cavaco. A cratera é caracterizada pela sua profundidade e pela distância do meio ao gume (STEMMER, 1993).

Porém, conforme Seco Tools (2008) as pastilhas podem falhar de outras diversas maneiras mais específicas, conforme Quadro 5 abaixo. O quadro apresenta formas de falha e as recomendações para aumentar a vida útil. O primeiro passo para aumentar a duração da pastilha é reduzir os dados de corte (primeiro a taxa de avanço depois a profundidade de corte). Em segundo verificar o desgaste da pastilha no quadro e utilizar as recomendações para aperfeiçoar a operação.

<p>Quebra da pastilha</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza a taxa de avanço. • Reduza a profundidade de corte. • Selecione uma classe mais tenaz. • Selecione um formador de cavacos mais resistente. • Selecione uma pastilha mais espessa. 	<p>Desgaste de entalhe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza a velocidade de corte. • Reduza a taxa de avanço. • Selecione uma ferramenta com um ângulo de posição menor.
<p>Lascamento</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumente a velocidade de corte. • Reduza a taxa de avanço. • Selecione um formador de cavacos mais resistente. • Selecione uma classe mais tenaz. • Minimize as vibrações do sistema. 	<p>Deformação plástica</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilize refrigeração. • Selecione uma classe mais resistente ao desgaste. • Reduza a velocidade de corte. • Reduza a taxa de avanço.
<p>Lascamento por cavacos</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Modifique a taxa de avanço. • Modifique a profundidade de corte. • Utilize, se possível um porta-ferramentas com um ângulo de posição diferente. 	<p>Aresta postiça</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumente a velocidade de corte. • Não utilize refrigeração. • Aumente a taxa de avanço. • Selecione um quebra-cavacos mais positivo.
<p>Desgaste de flanco</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza a velocidade de corte. • Selecione uma classe mais resistente ao desgaste. 	<p>Trincas térmicas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilize refrigeração em abundância ou execute a usinagem a seco. • Reduza a velocidade de corte. • Reduza a taxa de avanço.
<p>Craterização</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilize refrigeração. • Selecione uma classe mais resistente ao desgaste. • Reduza a velocidade de corte. • Reduza a taxa de avanço. 		

Quadro 5 - Tipos de falha na pastilha e recomendações para aperfeiçoar a operação

Fonte: Seco Tools (2008).

3.7 CRITÉRIOS PARA DETERMINAR O FIM DE VIDA DA FERRAMENTA

É possível estimar um tempo de vida útil para as ferramentas de usinagem, porém devido às diversas variáveis apresentadas acima, podemos afirmar que um desvio padrão relativamente alto é inerente ao processo.

À medida que o material vai sendo usinado e a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações mais ou menos profundas no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram, o acabamento superficial piora (STEMMER, 1993, p.136).

É muito importante em um estudo de usinabilidade que o critério de descarte da ferramenta, ou seja, o estado de fim de vida seja muito bem definido. Esta escolha depende, em grande parte, das exigências da usinagem e do material da ferramenta. De acordo com Stemmer (1993) pode-se citar:

- a) Falha completa da ferramenta que a inabilita para o corte, por superaquecimento (queima), lascamento ou quebra;
- b) Falha preliminar da ferramenta acusada pelo aparecimento na superfície usinada ou transitória da peça, de uma estreita faixa altamente polida, indicando forte atrito de escorregamento com o flanco da ferramenta;
- c) Largura da marca de desgaste, no flanco. Este é o critério de emprego mais frequente na indústria;
- d) Vibrações intensas da peça ou da ferramenta, ruídos fortes por vibração da máquina, que podem ter como causa o desgaste no flanco da ferramenta;
- e) Profundidade da cratera ou faixa remanescente entre o gume e o início da cratera;
- f) Deficiência de acabamento superficial. Ocorre frequentemente uma mudança súbita e pronunciada do grau de acabamento superficial;
- g) Formação de rebarbas de usinagem na peça;
- h) Brusca variação na forma do cavaco;

- i) Alteração das dimensões da peça. O desgaste provoca um deslocamento do gume, o que por sua vez determina uma alteração nas dimensões da peça usinada;
- j) Força de corte, torque ou potência, que podem ser medidos em ensaios de laboratório, ou em equipamentos dotados de potenciômetro;
- k) Aumento da força de avanço;
- l) Aumento da temperatura do gume, também usado em laboratório.

3.8 LIGA DE ALTA DUREZA – INCONEL 625

As aplicações de superligas a base de níquel vêm aumentando em função da crescente demanda de materiais que resistam a processos e ambientes considerados agressivos, onde a utilização dos materiais metálicos tradicionais é inadequada. O Inconel 625 é utilizado com frequência em indústrias petroquímicas, mais precisamente na prospecção de petróleo, devido à sua alta resistência à corrosão. A contra partida dessa característica é a baixa usinabilidade desse material, que ocorre em função da alta resistência mecânica a altas temperaturas, alta abrasividade, alta ductilidade e alta taxa de encruamento (RODRIGUES; HASSUI, p.1).

Superliga é a denominação dada às ligas a base de níquel, cobalto ou titânio, com determinadas características mecânicas, químicas e térmicas, tais como: alta resistência a corrosão, baixa perda de resistência em altas temperaturas e adequação a aplicações de risco e de ordem médica (RODRIGUES; HASSUI).

Na indústria petrolífera, a utilização de superligas garante que as altas taxas de oxidação do meio (água salgada) não interfiram no funcionamento de válvulas, dutos, flanges e bocais. Ainda na indústria petrolífera, sabe-se que o atrito gerado pelo escoamento do produto bombeado de poços profundos, submetido a altas pressões, gera elevadas temperaturas ao longo dos dutos que o conduzem. Conforme Shankar et al (2001 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 1), a exposição desta liga à altas temperaturas altera seu limite de resistência e sua ductilidade.

Outra característica marcante das superligas a base de níquel é a sua baixa usinabilidade. Conforme Ezugwu et al (1999 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 2), as ligas a base de níquel são bastante difíceis de serem usinadas.

Podem-se caracterizar as superligas a base de níquel, como um material que possui alta resistência mecânica em elevadas temperaturas, alta abrasividade devido aos constituintes químicos da liga, alta ductilidade e alta taxa de encruamento com o trabalho mecânico. (SHANKAR et al, 2001 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 2)

O Inconel 625 tem sua usinagem prejudicada, porque os quatro fatores citados são opostos às características desejáveis para uma boa usinabilidade. Em geral, para obtenção de vidas razoáveis das ferramentas de metal duro, é necessária a utilização de baixas velocidades de corte, o que representa uma condição pouco econômica (RODRIGUES; HASSUI, p.2).

3.8.1 Características e propriedades da Superliga Inconel 625

A superliga a base de níquel Inconel 625 possui uma estrutura CFC, austenítica. Sua densidade é de $8,44 \text{ g/cm}^3$ (21°C). O módulo de elasticidade a tração e a torção são respectivamente 208 e 81 GPa, ambos a 21°C (METALS HANDBOOK apud RODRIGUES; HASSUI, p. 2). Esta liga possui alto percentual de elementos químicos na forma de solução sólida em sua matriz Ni-Cr-Mo. Conforme citado por Ezugwu et al (1999 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 2), a baixa usinabilidade de uma liga de níquel ocorre devido a alguns fatores:

- a) A maior parte da resistência do material é mantida durante a usinagem devido a sua alta resistência aos efeitos térmicos;
- b) Encruamento ocorre rapidamente a partir dos esforços aplicados sobre o material durante a usinagem;
- c) Alto desgaste abrasivo da ferramenta devido à presença de diversos carbonetos na liga;
- d) Altas taxas de difusão no par ferramenta-peça devido às altas temperaturas presentes na região de corte;

- e) Soldagem por fricção da liga de níquel na superfície de saída e de folga da ferramenta de corte, devido à alta adesão da liga além das baixas velocidades empregadas para a usinagem;
- f) Alta ductilidade em uma dureza média (~300 HV), levando a dificuldade de formação do cavaco;
- g) Baixa condutividade térmica, tornando a superliga refratária. Esta característica prejudica o desempenho da ferramenta uma vez que o calor gerado no processo de usinagem não será extraído pelo cavaco ou pelo fluido de corte.

Ainda no tocante a avaliação físico-química, o Inconel 625 apresenta uma proeminente capacidade de aumentar sua resistência quando deformado além do seu limite elástico. A taxa de encruamento deste material é um dos principais aspectos de sua baixa usinabilidade. (EZUGWU et al, 1999 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 4).

3.8.2 Usinabilidade do Inconel

Como já citado acima, as ligas a base de níquel são resistentes ao calor e a corrosão quando submetidas a meios quimicamente agressivos. Essas ligas permanecem com elevada resistência mecânica em altas temperaturas e a corrosão é relativamente lenta. Este aspecto deve ser observado quando da especificação da ferramenta de corte e dos parâmetros de processo, além do meio lubrificante/refrigerante que deverá ser utilizado ou não durante a usinagem. (RODRIGUES; HASSUI, p.4).

Durante a usinagem das superligas a base de níquel, o calor gerado concentra-se na aresta de corte da ferramenta com uma intensidade superior aquela atingida na usinagem de aços e ferros fundidos usualmente processados, visto que a condutibilidade térmica deste material é baixa, tornando esta liga refratária. Ainda em relação à usinagem dessa liga, o atrito gerado entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco, além do atrito entre a superfície de folga primária e secundária da ferramenta e a peça, resulta em calor e, por conseguinte, em desgaste da ferramenta de corte durante a evolução do processo. Uma terceira fonte

de calor, também importante, é o atrito interno que ocorre no plano de cisalhamento ao longo da formação do cavaco. Para diminuir o efeito da temperatura na usinagem de superligas, utiliza-se fluido de corte que pode ter ação refrigerante, ou lubrificante (RODRIGUES; HASSUI, p.4).

Devido à característica refratária das superligas a base de níquel, faz-se necessário considerar a temperatura gerada durante o processo de remoção de material como um dos principais fatores para a evolução do desgaste nas ferramentas, além da não diminuição da resistência à tração em temperaturas elevadas. Trent (1984 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 4) considera que a usinagem de ligas a base de níquel apresenta sérios problemas de ordem econômica e técnica devido à geração do calor durante o corte.

Trent (1984 apud RODRIGUES; HASSUI, p. 4) reforça a afirmação que a temperatura na interface cavaco-ferramenta aumenta com o acréscimo da velocidade de corte e tal parâmetro constitui o limite prático para a usinagem de materiais com alto ponto de fusão, como é o caso das superligas.

O Inconel 625 é um material altamente resistente ao calor, portanto, a ferramenta e o fluido de corte ficam incumbidos de dissipar a maior parte do calor gerado no processo. Outras características que devem ser consideradas são a sua propensão ao encruamento e a presença de carbonetos duros que o tornam abrasivos a ferramenta de corte (RODRIGUES; HASSUI, p.6).

4 REFERENCIAL TEÓRICO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Este capítulo traz a parte teórica da engenharia de confiabilidade usada no desenvolvimento dos ensaios, assim como algumas definições e alguns conceitos.

Segundo Portal Action I (2016), “confiabilidade está intuitivamente associada à probabilidade de um produto realizar sua função por um período de tempo especificado. Em outras palavras, podemos definir confiabilidade como uma medida da capacidade de um produto funcionar bem durante um período de tempo especificado, sob condições de uso pré-estabelecidas”.

O estudo da confiabilidade surgiu e cresceu com a necessidade crescente da indústria, pois em alguns campos é vital, como é o caso da engenharia aeronáutica, em usinas nucleares, em submarinos, setores de óleo e gás e telecomunicações, onde são intoleráveis falhas.

Embora o conceito de confiabilidade tenha iniciado na indústria de produção em larga escala para identificar defeitos (WIKIPÉDIA, 2016) e reduzir gastos, nos últimos tempos tem avançado também na área de manutenção, tornando os equipamentos mais disponíveis.

Este ramo da engenharia está voltado para o estudo da confiabilidade de sistemas com um todo, durante todo seu ciclo de vida, utilizando técnicas oriundas da probabilidade e estatística. Também tem como foco a melhoria de processos e produtos para alcançar o melhor desempenho com o menor custo. Ainda pode ser aplicada em áreas como qualidade e pós-vendas.

O engenheiro de confiabilidade utiliza de diversas ferramentas para fazer suas análises. Uma dessas ferramentas importantes é uma base de dados sólida e confiável a respeito do equipamento, processo ou objeto a ser estudado. A aplicação da engenharia de confiabilidade pede o uso de softwares dedicados e práticos para à interpretação dos resultados analisados, além de uma infinidade de técnicas e metodologias a serem compreendidas e utilizadas.

As metodologias e teorias fundamentais do tema vão desde análises quantitativas como o DOE (*Design of Experiments*), a LDA (*Life Data Analysis*), a SRA (*System Reliability Analysis*), a RGA (*Reliability Growth Analysis*), a FTA (*Fault Tree Analysis*) dentre outras, e também análises qualitativas como a FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), por exemplo.

A seguir entraremos mais a fundo no estudo da metodologia DOE, que pode ser traduzida para Delineamento de Experimentos, que foi a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta monografia.

4.1 INTRODUÇÃO AO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Experimento conforme Portal Action II (2016) “é um procedimento no qual alterações propositais são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões de sua alteração”.

Ao observar um sistema ou processo é possível aprender bastante sobre ele, mas somente realizando experimentos, ou seja, alterando fatores deliberadamente, podem-se entender as causas e efeitos dessas mudanças. A observação cria teorias e hipóteses sobre o que faz o sistema funcionar, mas os experimentos demonstram que estas teorias estão corretas (MONTGOMERY, 2013).

Através do planejamento de uma série de experimentos é possível obter conclusões e alcançar alguns objetivos conforme citados em Montgomery (2013):

- a) Redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores obtidos e os valores pretendidos;
- b) Redução do tempo do processo;
- c) Redução do custo operacional;
- d) Melhoria no rendimento do processo.

Para ter sucesso ao final dos experimentos, é necessário definir todos os possíveis fatores que influenciam nas características da qualidade do objeto de estudo.

Segundo Montgomery (2013) existem algumas aplicações típicas do delineamento de experimentos:

- a) Avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;
- b) Avaliação de materiais alternativos;
- c) Seleção de parâmetros de projeto para deixar o produto mais robusto;
- d) Determinação de parâmetros de projeto que melhorem o desempenho de produtos;

e) Formulação de novos produtos.

Ainda Portal Action II (2016) destaca mais uma aplicação:

f) Obtenção de produtos que sejam mais fáceis de fabricar, que sejam projetados, desenvolvidos e produzidos em menos tempo, que tenham melhor desempenho e confiabilidade que os produzidos pelos competidores.

Ainda de acordo com Portal Action II (2016) são três os princípios básicos de um planejamento de experimentos:

- a) Replicação;
- b) Aleatoriedade;
- c) Blocagem.

O ideal é que em todo e qualquer experimento esses três princípios estejam sempre presentes, pois tornam o experimento mais confiável e preciso no que tange as conclusões obtidas.

A replicação é importante, pois permite obter o erro experimental e verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente diferentes. Além disso, um segundo motivo para replicarmos o experimento é que se a média de uma amostra for usada para estimar o efeito de um fator, esta estimativa será mais precisa (PORTAL ACTION II, 2016).

Os experimentos, com suas réplicas, devem ser aleatórios, garantindo a igual distribuição de todos os fatores não considerados. Esta aleatoriedade vai de encontro com os requisitos dos métodos estatísticos para as observações, ou os erros, uma vez que eles devem ser variáveis aleatórias distribuídas independentemente. Por exemplo, ao realizarmos um experimento para determinar o consumo de combustível de um automóvel, devemos cuidar da aleatoriedade na execução dos experimentos, pois fatores críticos que não estão no estudo, como resistência do ar e atrito dos pneus com a superfície, podem influenciar as variáveis resposta de forma diferenciada, o que compromete a independência e a variabilidade entre os erros experimentais (PORTAL ACTION II, 2016).

O último dos princípios é a blocagem, que se trata de uma técnica muito importante utilizada para aumentar a precisão de um experimento. “Em certos processos, podemos controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante

da presença de fatores conhecidos que perturbam o sistema, mas que não temos interesse em estudá-los. A blocagem é usada, por exemplo, quando uma determinada medida experimental é feita por duas diferentes pessoas, levando a uma possível não homogeneidade nos dados. Outro exemplo seria quando um determinado produto é produzido sob as mesmas condições operacionais, mas em diferentes lotes. De modo a evitar a não homogeneidade, é melhor tratar cada pessoa e lote como um bloco” (PORTAL ACTION II, 2016).

Uma estratégia experimental utilizada extensivamente é a técnica de alterar um fator por vez. Escolhe-se um nível base para cada fator e alterando-se este nível ao redor do nível base de uma variável por vez, mantendo-se todos os outros fatores constantes, as respostas são agrupadas em gráficos que mostram como a variável resposta foi afetada pelos fatores. De acordo com as inclinações das linhas desenhadas nos gráficos é possível ver quanto cada fator influencia na variável resposta, permitindo o ajuste de cada fator para o seu nível ótimo (MONTGOMERY, 2013).

A grande desvantagem dessa estratégia é que ela não considera interações entre os fatores. Estas interações entre fatores são muito comuns, e se estão presentes a estratégia de um fator por vez apresentará resultados pobres, e muitas pessoas não reconhecem isto. A correta maneira de lidar com vários fatores é realizando um experimento fatorial. Nesta estratégia os fatores são variados ao mesmo tempo ao invés de um por vez, permitindo verificar as interações entre cada um dos fatores (MONTGOMERY, 2013). Este conceito é muito importante e será discutido mais a fundo nos capítulos seguintes.

Os experimentos devem seguir uma sequência definida. Primeiramente procura-se fazer um experimento de peneiramento, para determinar que variáveis são importantes, ou seja, as variáveis críticas. Os experimentos subsequentes são usados para definição dos níveis das variáveis críticas identificadas anteriormente, que trazem um desempenho ótimo ao processo (PORTAL ACTION II, 2016).

Em resumo, o objetivo é descrever certo fenômeno com um modelo matemático apropriado executando um mínimo de experimentos. O delineamento de experimentos possibilita eficiência e economia no processo experimental e resulta em objetividade científica nas conclusões pelo uso de métodos estatísticos na análise dos dados obtidos (PORTAL ACTION II, 2016).

Conforme Portal Action II (2016) os objetivos da utilização dos métodos básicos no planejamento experimental são:

- a) A seleção do melhor modelo entre uma série de modelos plausíveis;
- b) A estimação eficiente de parâmetros do modelo selecionado.

As variáveis utilizadas nos experimentos podem ser do tipo qualitativas (tipo de material, operador, etc.) ou quantitativa (velocidade, profundidade, etc.). Os resultados devem ser estudados e adequações devem ser feitas no experimento realimentando o planejamento prévio. A Figura 7 apresenta este fluxo (PORTAL ACTION II, 2016).

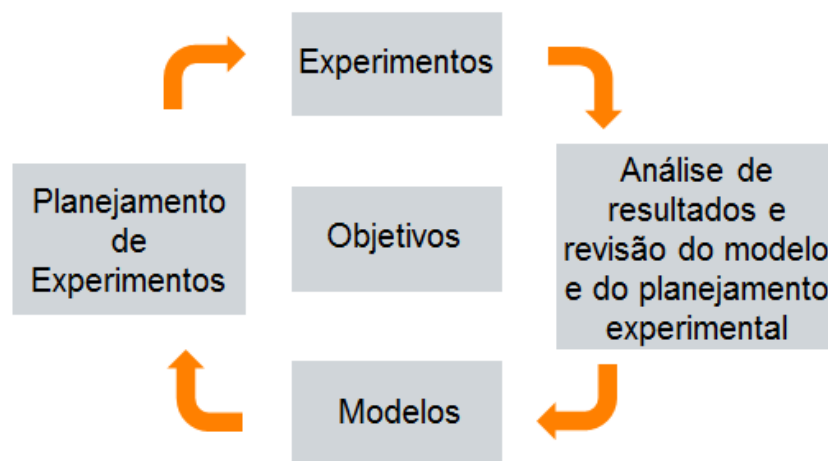


Figura 7 - Fluxograma DOE

Fonte: Portal Action II (2016).

Segundo Portal Action II (2016) deve-se entender bem os objetivos e os critérios antes de começar a realizar os experimentos, de modo a dar subsídios para a escolha:

- a) Das variáveis envolvidas nos experimentos;
- b) Da faixa de variação das variáveis selecionadas;
- c) Dos níveis escolhidos para essas variáveis. No caso de muitos fatores, é melhor escolher inicialmente dois níveis;
- d) Da variável de resposta;

- e) Do planejamento experimental. Nessa etapa, há que se considerar o tamanho da amostra (número de réplicas), a seleção de uma ordem de realização dos tratamentos e se há vantagem em fazer a blocagem dos experimentos; dos métodos de análise dos resultados dos experimentos. Os métodos estatísticos são usados para guiar uma tomada objetiva de decisão.

Existem vários tipos de projetos experimentais que podem ser divididos em três grupos. Pertencem a estes grupos os seguintes tipos de delineamentos.

- a) Delineamentos Investigativos:
- Delineamento com Fator Único
- b) Delineamentos Seleccionadores:
- Delineamento Fatorial Completo Geral
 - Delineamento Fatorial Completo de Dois Níveis
 - Delineamento Fatorial Fracionado de Dois Níveis
 - Delineamento Fatorial Fracionado Plackett-Burman
 - Delineamento Fatorial Fracionado Taguchi
- c) Delineamentos Otimizadores:
- Delineamento com Superfície de Resposta

Para os propósitos dessa monografia trataremos somente dos tipos fatorial completo geral, fatorial completo de dois níveis, fatorial fracionado de dois níveis e com superfície de resposta, os quais serão abordados de maneira mais aprofundada nos próximos itens.

4.2 DEFINIÇÕES DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTO

Experimentos fatoriais são os mais eficientes tipos de experimento quando dois ou mais fatores estão envolvidos. Em um experimento fatorial, diz-se que todas as possíveis combinações de níveis dos fatores são investigadas, logo se diz que os fatores são cruzados. Os níveis são chamados de alto e baixo e denotados pelos sinais “+” e “-” respectivamente (MONTGOMERY, 2013).

Em alguns experimentos é possível verificar que a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis de outros fatores. Quando isto

ocorre diz-se que existe uma interação entre os fatores. Esta ideia pode ser ilustrada no Gráfico 4 e Gráfico 5 abaixo, onde no Gráfico 4 vemos as linhas aproximadamente paralelas, indicando uma falta de interação entre os fatores A e B. Similarmente no Gráfico 5 onde as linhas não são paralelas e indicam interação. Estes gráficos são frequentemente usados para interpretar interações significantes (MONTGOMERY, 2013).

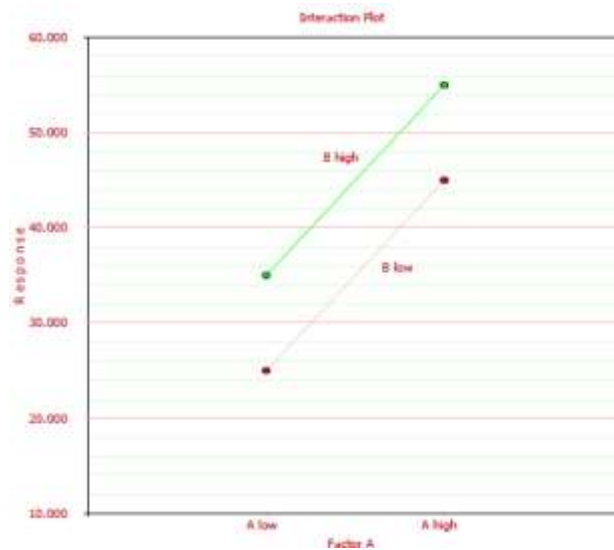


Gráfico 4 – Experimento fatorial sem interação

Fonte: Shimura (2016).

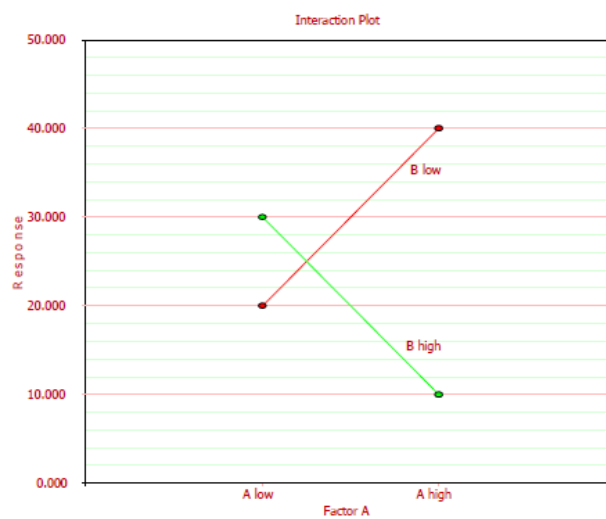


Gráfico 5 – Experimento fatorial com interação

Fonte: Shimura (2016).

Também é possível ilustrar o conceito de interação quando se tem fatores quantitativos, ou seja, quando se pode representar o modelo de regressão do experimento fatorial de dois fatores em uma fórmula tal como

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (\text{equação 4.1})$$

Onde y é a variável resposta, x são os fatores, β são os coeficientes e ε é o erro aleatório. Se o coeficiente β_{12} for pequeno em comparação aos demais coeficientes β_1 e β_2 significa falta de interação, por outro lado, se for um valor alto, indica haver interação significativa entre os fatores (MONTGOMERY, 2013).

Conforme Portal Action II (2016) “o efeito de um fator pode ser definido como a mudança sofrida pela variável resposta quando passamos do nível baixo do fator para o nível mais alto”. “Matematicamente, o efeito da interação entre dois fatores é a metade da diferença entre os efeitos de um fator nos níveis do outro fator”.

4.3 EXPERIMENTOS FATORIAIS COMPLETOS GERAIS

Estes delineamentos são utilizados quando temos diferentes números de níveis dos fatores analisados, ou seja, a níveis do fator A, b níveis do fator B, c níveis do fator C e assim por diante. Eles fornecem uma completa investigação para todos os fatores e suas interações e inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento, mas a ordem dos ensaios é aleatorizada.

A aleatorização é essencial para obter bons resultados, pois é muito provável que não estejam sendo investigadas todas as variáveis que influenciam o experimento e desta forma estas variáveis externas influenciam de maneira igual. Mesmo que alguém possa identificar e controlar algumas dessas variáveis, complicações não planejadas são comuns. A aleatorização não evita complicações dentro do experimento, mas oferece alguma proteção contra o vício do experimento (PORTAL ACTION II, 2016).

4.4 EXPERIMENTOS FATORIAIS COMPLETOS DE DOIS NÍVEIS

Um caso especial dos experimentos fatoriais é quando temos k fatores com dois níveis cada. Nestes casos dizemos que é um experimento fatorial 2^k . Experimentos 2^k são particularmente úteis nos primeiros estágios experimentais quando muitos fatores são prováveis de investigação. Eles possibilitam uma pequena quantidade de ensaios com todos os k fatores em um experimento fatorial completo (MONTGOMERY, 2013).

Por ter essa característica, experimentos 2^k são muito usados para classificar os fatores relevantes para posterior investigação mais aprofundada com somente estes fatores. A região experimental nestes experimentos pode ser restrita, porém pode indicar tendências e determinar uma melhor, ou mais adequada direção para novos experimentos (MONTGOMERY, 2013).

Segundo Montgomery (2013) uma sequência de seis passos deve ser seguida na análise de experimentos 2^k . “O primeiro passo é estimar os efeitos dos fatores e examinar seus sinais e magnitudes. Isto dá ao experimentador informações preliminares de quais fatores e interações podem ser importantes e em que direção estes fatores devem ser ajustados para melhorar a resposta. Depois deve-se formar o modelo inicial. Então no passo três realiza-se o teste estatístico usando a análise de variância para testar a significância dos efeitos principais e interações. Passo quatro, refinar o modelo, retirando fatores não significativos do modelo completo. Passo cinco é a análise residual para checar adequação do modelo e suposições. Algumas vezes ocorrerá um refinamento do modelo após a análise residual se for encontrado que o modelo é inadequado ou as suposições estão muito violadas. O passo final normalmente consiste na análise gráfica, que pode ser traçado tanto o efeito principal e interações, como a superfície de resposta e contornos.

Um experimento 2^5 tem 32 combinações de ensaios. Como normalmente as verbas são limitadas, o número de replicações fica restrito para o experimentador. Frequentemente acaba-se fazendo somente uma replicação, a menos que alguns dos fatores sejam omitidos. O risco de ter somente uma replicação é incluir ruídos ao modelo, ou seja, se a resposta y é altamente variável, conclusões erradas podem ser feitas pelo experimentador (MONTGOMERY, 2013).

Esta situação pode ser ilustrada na Figura 8 e Figura 9 abaixo. A linha no centro da faixa cinza ilustra o efeito real do fator. A faixa representa a variabilidade aleatória da variável resposta. Uma conclusão errada do experimentador pode ocorrer facilmente devida esta grande faixa de respostas possíveis. Note que o efeito estimado na Figura 8 é bem diferente do efeito estimado na Figura 9. Se houver uma variabilidade menor na resposta a probabilidade de uma conclusão errada é menor. Outra maneira de diminuir a chance de conclusões errôneas, é através de um aumento agressivo do espaçamento entre os níveis alto e baixo dos fatores, como visto na Figura 9. O efeito estimado está muito mais próximo do efeito real quando o espaçamento é maior (MONTGOMERY, 2013).

Como geralmente esta estratégia de uma única replicação é usada em experimentos de classificação de fatores, quando se tem relativamente muitos fatores, e não se pode ter certeza que o erro experimental é pequeno, uma boa prática é aumentar agressivamente o espaçamento entre os níveis dos fatores (MONTGOMERY, 2013).

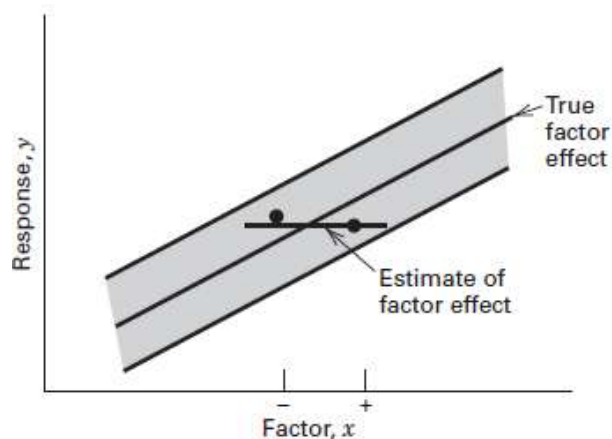


Figura 8 – Impacto da escolha dos níveis dos fatores em um experimento sem réplica com pequeno espaçamento entre os níveis

Fonte: Montgomery (2013).

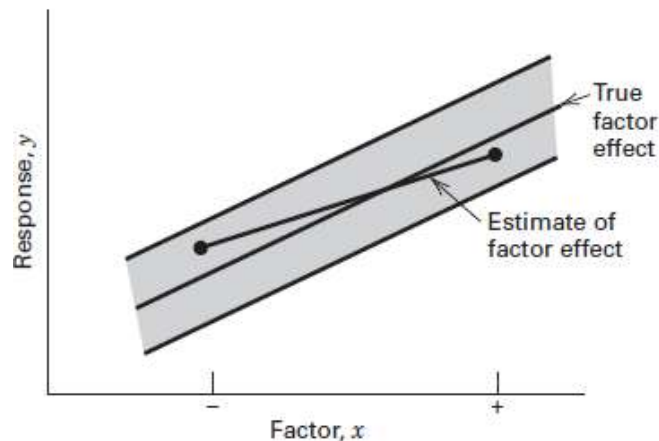


Figura 9 – Impacto da escolha dos níveis dos fatores em um experimento sem réplica com espaçamento agressivo entre os níveis

Fonte: Montgomery (2013).

4.5 EXPERIMENTOS FATORIAIS FRACIONADOS

Conforme aumenta o número de fatores em um delineamento fatorial 2^k , o número de ensaios necessários também aumenta e consequentemente o número de interações de ordem alta. Os recursos rapidamente se esgotariam. Por exemplo, em um delineamento 2^6 , 64 ensaios seriam necessários. Neste experimento dos 63 graus de liberdade, somente 6 são efeitos principais e somente 15 graus de liberdade correspondem a interações de dois fatores. Existem 21 graus de liberdade associados a efeitos que são prováveis de ser de maior interesse. O restante dos 42 graus de liberdade é associado a três fatores e interações mais altas (MONTGOMERY, 2013).

Delineamentos fatoriais fracionados são baseados no princípio da dispersão dos efeitos, que segundo Shimura (2016) “afirma que a maior parte das vezes, as respostas são afetadas por um pequeno número de efeitos principais e interações de baixa ordem enquanto interações de ordem superior são relativamente pouco importantes”.

O experimentador pode assumir que as interações de mais alta ordem são desprezíveis, pois são difíceis de interpretar. Por permitirem um número menor de ensaios estes delineamentos são utilizados na fase inicial do experimento para

classificar os poucos fatores relevantes dos muitos triviais. Posteriormente experimentos mais detalhados somente com os fatores que influenciam são realizados (PORTAL ACTION II, 2016).

Conforme Montgomery (2013) o sucesso no uso destes experimentos estão fundamentalmente baseados em três ideias:

- a) Efeitos principais: Na presença de muitas variáveis, o sistema ou processo será dirigido por alguns efeitos principais e interações de baixa ordem.
- b) Propriedades projetivas: Fatoriais fracionados podem ser projetados para que os fatores mais significantes tenham os maiores efeitos.
- c) Experimentos sequenciais: É possível combinar os ensaios de dois, ou mais fatoriais fracionados para montar sequencialidade em delineamentos grandes para estimar os fatores e interações de interesse.

4.5.1 Delineamento Fracionado pela Metade

Estes delineamentos consistem na execução de somente metade dos ensaios do fatorial completo correspondente. A metade do fracionado é representada por 2^{k-1} . Por exemplo, o delineamento 2^3 requer oito execuções, já o delineamento 2^{3-1} requer somente quatro.

A Figura 10 mostra a matriz delineamento para o delineamento 2^3 onde constam todas as oito execuções.

<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 10 – Matriz delineamento 2^3

Fonte: Shimura (2016).

Podemos escolher qualquer uma das colunas e separar os sinais iguais para montar a matriz do delineamento fracionado 2^{3-1} , no entanto o mais comum é escolher a coluna de mais alto grau de interação. Escolhendo as linhas onde ABC tem sinal positivo, ou negativo, tem-se na Figura 11 somente as quatro execuções do delineamento fracionado 2^{3-1} . Neste caso vamos adotar sinal positivo.

<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 11 – Matriz delineamento 2^{3-1}

Fonte: Shimura (2016).

Como se pode ver a interação ABC não pode ser medida, pois está sempre no mesmo nível (1). Por este motivo ABC é chamado de gerador do projeto. A coluna identidade I também é sempre igual a 1, logo $I = ABC$ é chamada a relação definida para o projeto. Este delineamento fracionado seria aceitável se a interação dos três fatores, ABC, pudesse ser negligenciada (MONTGOMERY, 2013).

Nos delineamentos fracionados alguns efeitos não podem ser distinguidos, pois se confundem com outros. Estes efeitos são chamados de “aliasés”. Na Figura 12 os “aliasés” estão destacados e são eles A e BC, B e AC e AB e C. Os efeitos estimados A, B e C são na realidade os efeitos A+BC, B+AC e C+AB. O efeito não pode ser atribuído somente a A ou a BC por exemplo, a menos que haja outra prova que um desses efeitos seja nulo. O efeito é dito que é devido a ambos (MONTGOMERY, 2013).

<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 12 – Aliasés da matriz delineamento 2^{3-1}

Fonte: Shimura (2016).

4.6 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Após a identificação dos fatores que afetam a resposta significativamente, onde modelos ANOVA foram usados, o próximo passo é modelar a relação entre a resposta e os fatores e alocar às configurações o valor ótimo, o qual pode ser um máximo, mínimo ou uma meta. Métodos de superfície de resposta (RSM) auxiliam a modelar e examinar a natureza da relação entre a resposta e os fatores e a alcançar a meta de resposta utilizando modelos de regressão (SHIMURA, 2016).

Supondo que uma resposta y é dada em função da temperatura (x_1) e pressão (x_2), ou seja,

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon = E(y) = \eta \quad (\text{equação 4.2})$$

onde ε representa o barulho ou erro na resposta y , $E(y)$ a resposta esperada e η é chamado superfície de resposta (MONTGOMERY, 2013).

O Gráfico 6 e Gráfico 7 representam o traçado de η em função dos níveis de x_1 e x_2 .

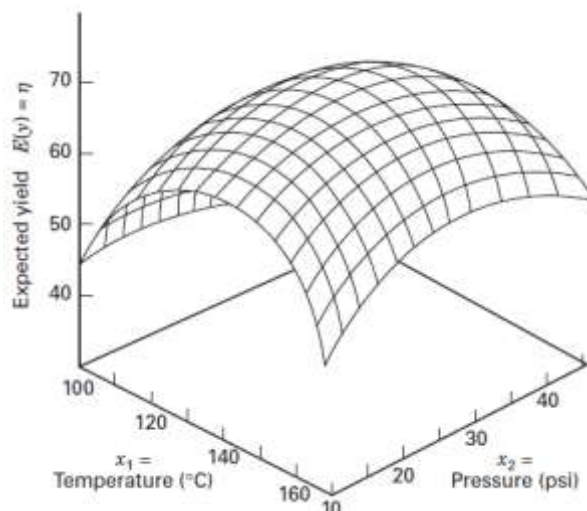


Gráfico 6 – Superfície de resposta tridimensional mostrando η em função de x_1 e x_2

Fonte: Montgomery (2013).

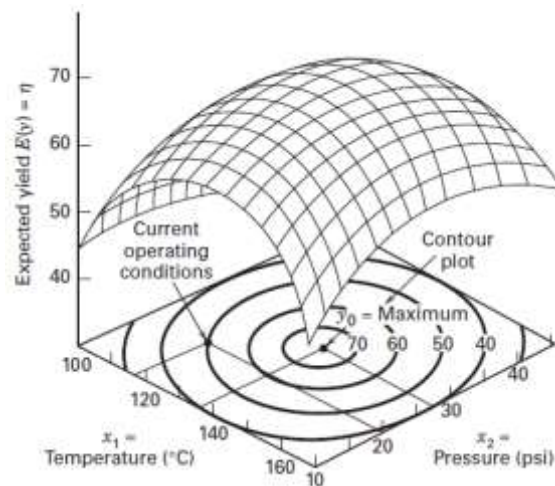


Gráfico 7 – Linhas de contorno da superfície de resposta com curvatura significativa

Fonte: Montgomery (2013).

O RSM é um procedimento sequencial. Normalmente quando iniciamos uma pesquisa estamos em um ponto da superfície de resposta distante do ótimo, onde existe pouca curvatura e um modelo de primeira ordem pode ser usado. O **método da máxima ascensão/descida** tem o objetivo de levar o experimentador de maneira rápida e eficiente para o ponto ideal. Uma vez que a região ótima é encontrada, um modelo mais elaborado pode ser empregado, o **ajuste de um método de segunda ordem**, e a análise pode ser realizada para encontrar o ponto ótimo (MONTGOMERY, 2013).

A direção do caminho de ascensão pode ser representada pela seta do Gráfico 8, que forma uma linha perpendicular aos contornos. Sucessivos delineamentos têm de ser realizados com cada experiência com nova origem que se situa na linha até que haja uma indicação de que o valor ótimo está próximo, ou seja, até que a curvatura seja significativa para o experimento (SHIMURA, 2016).

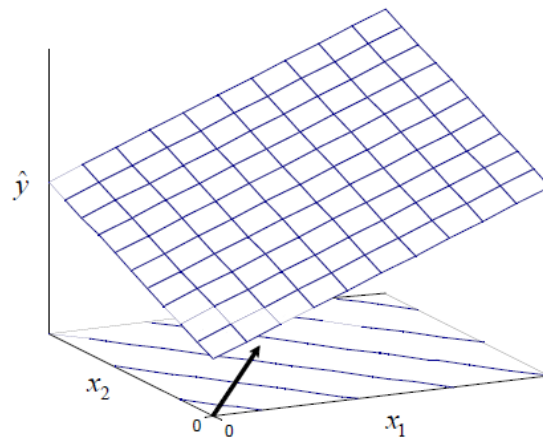


Gráfico 8 – Direção do caminho de ascensão em uma superfície de resposta sem curvatura significativa

Fonte: Shimura (2016).

Conforme Portal Action II (2016) o método da máxima ascensão/descida pode ser dividido em algumas etapas.

- a) Primeiramente precisamos definir a equação do modelo de primeira ordem que representa a região atual. Geralmente esta região está longe do ponto ótimo e a curvatura não é significativa, logo o modelo de primeira ordem já é suficiente. Um delineamento 2^k com cinco pontos centrais permitirá a exploração das condições operacionais e checar se o modelo linear é suficiente usando o teste de curvatura;
- b) Verificar qual é a direção de máxima inclinação, através da verificação dos coeficientes da equação;
- c) Calcular as configurações para o caminho de ascensão/descida mais íngreme com base em valores codificados;
 - c.1) Calcular o valor codificado do primeiro fator (x_i) usando a fórmula abaixo:

$$\text{variação no valor codificado} = \text{variação no valor real} / \text{metade do intervalo} \quad (\text{equação 4.3})$$

- c.2) Calcular o valor codificado do segundo fator (x_j) usando a fórmula abaixo:

$$\Delta x_i = (\beta_i / \beta_j) \cdot \Delta x_j \quad (\text{equação 4.4})$$

onde, β_i e β_j são os coeficientes da equação de primeira ordem.

- c.3) Calcular o valor real da variação do fator x_j usando a fórmula do item c.1.
- d) Realizar os experimentos com os valores reais calculados no item c;
- e) Encontrar o ponto que parece estar mais próximo do ótimo, observando a mudança na alteração da variável resposta;
- f) Fazer um novo delineamento com cinco pontos centrais neste ponto ótimo para o teste de curvatura e verificar presença de curvatura. Caso não haja, um novo caminho de ascensão/descida é determinado e o procedimento repetido.

No caso de haver curvatura um modelo de segunda ordem será necessário neste ponto para modelagem da resposta. Isto é feito usando o delineamento RSM. Dois desses delineamentos são:

- a) Delineamento Composto Central
- b) Delineamento Box-Behnken

Conforme Portal Action II (2016) “a importância de utilizarmos delineamentos do tipo superfície de resposta está no fato de possibilitar conclusões mais gerais do que os experimentos fatoriais. Quando executamos um experimento fatorial, definimos alguns níveis dos fatores para trabalhar e verificamos qual é a melhor configuração dentre os níveis dos fatores considerados. Já as técnicas de superfície de resposta nos possibilitam verificar qual é a melhor configuração para os níveis em todo o intervalo considerado. Isso se deve à possível curvatura que o modelo incorpora. Além disso, podemos também verificar se a configuração ótima faz parte do intervalo considerado ou se há necessidade de executar um novo experimento considerando novos níveis dos fatores. Muitas vezes após ajustarmos um modelo fatorial do tipo 2^k , percebemos que nenhuma das configurações está razoável ou percebemos uma falta de ajuste no modelo. Neste caso, poderíamos acrescentar novos níveis nos fatores propondo um experimento fatorial do tipo 3^k ou 4^k , por exemplo. Porém o custo seria muito mais elevado e poderíamos novamente não chegar a boas conclusões”.

4.6.1 Delineamento Composto Central

Esta classe de delineamento é a mais comum e muito eficiente para a modelagem de modelos de segunda ordem. São compostos de um ponto central executado com réplicas que dará uma estimativa interna do erro puro e de pontos axiais, que irão determinar os termos quadráticos. Esses experimentos são fatoriais completos de dois níveis ou fatoriais fracionados que foram aumentados com um pequeno número de tratamentos, para permitir a estimativa do modelo de superfície de resposta de segunda ordem (PORTAL ACTION II, 2016).

Para exemplificar estes tratamentos a Figura 13(a) mostra a representação de um experimento fatorial 2^2 , já a Figura 13(b) traz um experimento composto central um ponto central somado e quatro execuções estrela (pontos axiais). Um ponto axial é aquele em que todos os fatores são fixados em suas médias. A distância entre o ponto central e o de estrela é representado por α . Também é possível colocar os pontos de estrela para além dos limites inferiores e superiores conforme Figura 13(c). Neste último caso existe a vantagem de poder conduzir os testes para efeitos de curvatura cúbicos e quadráticos (PORTAL ACTION II, 2016).

O valor de α pode ser obtido pela equação

$$\alpha = [2^{k-f}(n_f)/n_s]^{1/4} \quad (\text{equação 4.5})$$

onde:

n_f é o número de repetições das execuções do delineamento fatorial original

n_s é o número de repetições das execuções nos pontos axiais

2^{k-f} representa o delineamento fatorial original ou fatorial fracionado.

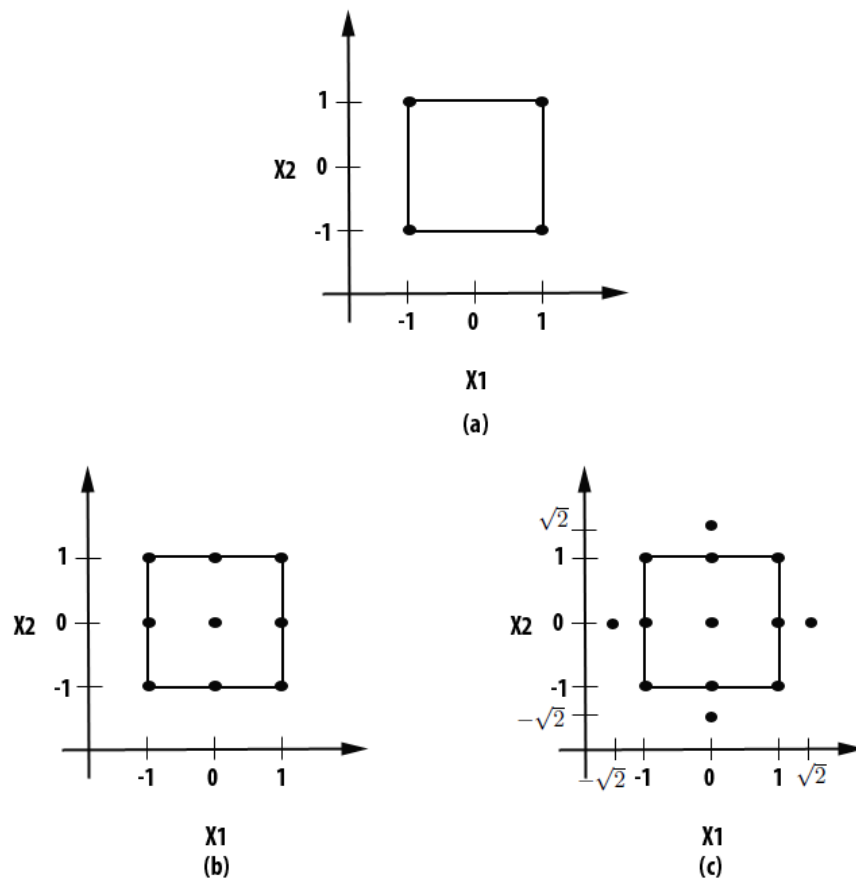


Figura 13 – (a) Experimento fatorial 2^2 , (b) Experimento composto central com $\alpha=1$,
(c) Experimento de composição central com $\alpha=\sqrt{2}$

Fonte: Portal Action II (2016).

É importante para um modelo de segunda ordem fornecer boas previsões ao redor da região de interesse. Isto ocorre se a variância da resposta prevista é constante em todas as direções desde que estejam a uma mesma distância ao centro do delineamento. Quando esta condição existe, diz-se ter rotacionalidade (MONTGOMERY, 2013).

O delineamento composto central pode ser do tipo face centrada, ou seja, quando $\alpha=1$, ou do tipo esférico, ou seja, quando a região de interesse é uma esfera. O melhor valor de α do ponto de vista da previsão de variância é $\alpha=\sqrt{k}$, sendo assim a esfera terá raio igual a \sqrt{k} . Quando a região de interesse é uma esfera, o delineamento deve conter pontos centrais para fornecer variância razoavelmente estável da resposta prevista. Normalmente recomendasse de três a cinco pontos centrais (MONTGOMERY, 2013).

4.6.2 Delineamento Box-Behnken

Segundo Montgomery (2013) Box e Behnken (1960) sugeriram um delineamento com três níveis para superfície de resposta. Este delineamento é formado pela combinação de um fatorial 2^k com um delineamento bloqueado incompleto.

Suas vantagens são ser rotacionais ou quase rotacionais, esféricos, não haver execuções com vértices, o que pode ser uma vantagem quando estas execuções são caras ou inconvenientes, e por oferecerem uma blocagem ortogonal, o parâmetro de estimativa para os efeitos dos fatores não são afetados pelos blocos incluídos no delineamento (SHIMURA, 2016).

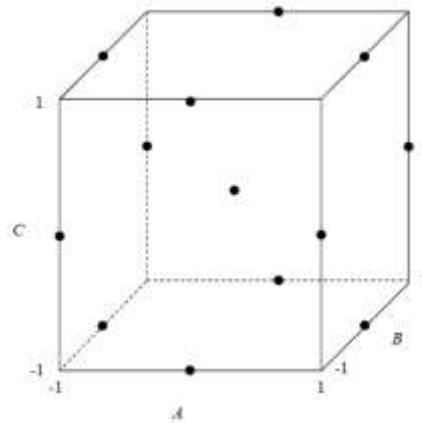


Figura 14 – Experimento de Box-Behnken com $k=3$

Fonte: Shimura (2016).

5 APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO NO OBJETO DE PESQUISA

Conforme os capítulos 1 e 2 esta monografia busca encontrar as condições ideais de usinagem para ter a maior eficiência e tempo de vida dos insertos de usinagem em uma operação de longa duração no desbaste de uma superliga de inconel soldada para obter o máximo de produtividade.

A peça selecionada para o estudo e ensaios é uma camisa de uma ANM por ter uma das operações de maior tempo de processo e severidade de usinagem.

5.1 ESCOLHA DOS FATORES INICIAIS

Como descrito no capítulo 3 muitas são as variáveis influenciadoras na vida útil de uma ferramenta de corte. Nesta pesquisa as variáveis dependentes da máquina foram descartadas, pois não se tem interesse em descobrir qual é o equipamento ideal. Além disso, acredita-se que a rigidez dinâmica e estática do equipamento utilizado nos ensaios satisfazem as condições necessárias para o inserto, assim como potência e força de corte.

As variáveis da ferramenta também não foram abordadas, pois conforme já relatado anteriormente, estudos anteriores foram feitos e acredita-se que a ferramenta CNMG120412-MR3 CP500 da marca Seco é a mais indicada para o processo de usinagem em questão.

Em relação às variáveis dependentes da peça, devido ao fato dos ensaios serem executados com as peças de uma linha de produção, com forma e tolerâncias específicas de projeto, nenhuma variação é possível.

Já no que diz respeito às variáveis do fluido de corte, uma série de testes de produtividade e desgaste de ferramentas foi executada em anos passados e o fluido de corte de melhor desempenho foi adotado. Com este óleo desenvolvido para operações de usinagem severa determinado, a única variável controlada e possível de estudo é a concentração do fluido, que conforme já relatado deve ser mantida acima de 7% para o tipo de operação estudada.

Por fim as variáveis do próprio processo de usinagem são as de maior influência no desgaste dos insertos. De acordo com o capítulo 3, das quatro variáveis:

velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte e modo de atuação da ferramenta sobre a peça, as duas últimas não são controláveis durante o processo de manufatura, a primeira, pois a profundidade de corte já é fixada na deposição de camada de inonel durante o processo de soldagem e a segunda, pois o modo de atuação é fixo de acordo com o tipo da máquina.

Assim a pesquisa iniciou com os três fatores velocidade de corte, avanço de corte e concentração do óleo de corte.

5.2 DELINEAMENTO FATORIAL FRACIONADO

Para conhecer o grau de significância dos fatores e poder focar somente naqueles que realmente influenciam no objeto de pesquisa, um delineamento fatorial fracionado de dois níveis com uma replicação foi executado. O Quadro 6 apresenta os parâmetros das oito execuções deste primeiro delineamento.

	f:Avanço (mm/rotação)	vc:Velocidade de Corte (m/min)	C:Concentração óleo de corte (%)
1	0,18	24	8
2	0,18	24	8
3	0,12	36	8
4	0,12	36	8
5	0,12	24	10
6	0,12	24	10
7	0,18	36	10
8	0,18	36	10

Quadro 6 – Delineamento fatorial fracionado dos quatro fatores com dois níveis e uma replicação

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros atuais de usinagem adotados na operação de desbaste da peça são velocidade de corte (v_c) de 30 m/min, avanço (f) de 0,15 mm/rot e uma profundidade de corte (a_p) de 1,5 mm. A concentração do óleo de corte (c) é mantida em cerca de 10%.

Os dois níveis dos fatores velocidade de corte e de avanço são: nível alto igual a mais 20% do valor utilizado como padrão atual, ou seja, 120% dos dados listados

acima (36m/min e 0,18mm/rot), e baixo igual a menos 20%, ou seja, 80% (24m/min e 0,12mm/rot). A concentração de fluido de corte adotada como nível baixo foi de 8% e nível alto 10%.

Como variável resposta dos ensaios foi adotada a distância vertical usinada (ΔZ), onde Z é a altura total da peça sendo usinada, até a falha do gume de corte. Porém como o objetivo da pesquisa é encontrar a maior produtividade, a variável resposta adotada nas análises de delineamento foi o valor total (V_t) gasto na operação. A equação abaixo determina este custo.

$$V_t = [(Z/\Delta Z)/A]*V_i + \{T_t*(Z/\Delta Z) + [P/(v_c*60*1000)]*(Z/f)\} * HH \quad (\text{equação 5.1})$$

Onde:

A: número de arestas do inserto de usinagem

V_i : valor do inserto

T_t : tempo de troca da aresta do inserto

HH: valor hora homem na usinagem

P: perímetro da peça

Conforme descrito no capítulo 3.6 a falha de uma ferramenta ocorre de três formas que são o lascamento do gume, o desgaste do flanco formando uma marca de desgaste e o desgaste na face sob a forma de cratera. A Figura 15 mostra estes tipos de falha.



Figura 15 – Insertos com diferentes formas de falha

Fonte: Autoria própria.

O capítulo 3.7 apresentou os critérios para determinação do fim de vida da ferramenta e dentre os doze critérios apresentados foram usados cinco deles ocorrendo sozinhos ou em conjunto para determinar o fim de vida dos insertos sem gerar prejuízos ao processo de fabricação devido a paradas no equipamento. Adotaram-se os ruídos fortes por vibração da máquina, que podem ter como causa o desgaste no flanco da ferramenta; a deficiência de acabamento superficial, onde ocorre frequentemente uma mudança súbita e pronunciada do grau de acabamento superficial; a formação de rebarbas de usinagem na peça; a brusca variação na forma do cavaco; e a alteração das dimensões da peça, pois o desgaste provoca um deslocamento do gume, o que por sua vez determina uma alteração nas dimensões da peça usinada e deixa marcas na superfície. A Figura 16, Figura 17 e Figura 18 trazem fotos dos critérios relacionados acima.



Figura 16 – Alteração da superfície com mudança súbita de acabamento devido a falha da ferramenta

Fonte: Autoria própria.

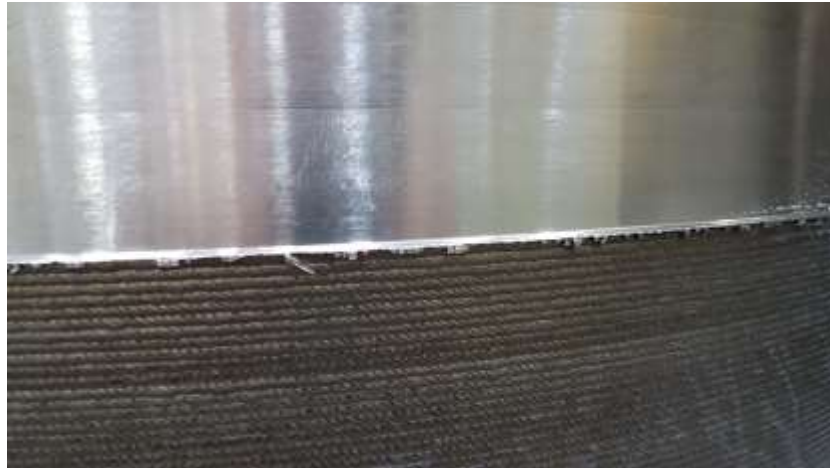


Figura 17 – Formação de rebarbas na peça devido a falha da ferramenta

Fonte: Autoria própria.



Figura 18 – Alteração no cavaco devido a falha da ferramenta

Fonte: Autoria própria.

Como a percepção do operador é fundamental para estas observações de fim de vida, variações podem ocorrer e por este motivo uma replicação foi incluída.

5.3 MÉTODO DA MÁXIMA ASCENSÃO/DESCIDA

Com os fatores relevantes conhecidos, que conforme será apresentado no capítulo 6 são velocidade de corte e avanço, uma análise da proximidade em relação ao ponto ótimo foi feita e para isto o método da máxima ascensão/descida foi utilizado para levar o estudo de maneira rápida e eficiente para o ponto ideal. O Quadro 7 apresenta os parâmetros das treze execuções deste segundo delineamento fatorial 2^2 com cinco pontos centrais.

	f:Avanço (mm/rotação)	vc:Velocidade de Corte (m/min)
1	0,12	24
2	0,12	24
3	0,12	36
4	0,12	36
5	0,15	30
6	0,15	30
7	0,15	30
8	0,15	30
9	0,15	30
10	0,18	24
11	0,18	24
12	0,18	36
13	0,18	36

Quadro 7 – Delineamento fatorial 2^2 com pontos centrais

Fonte: Autoria própria.

Na equação que representa o modelo na região estudada

$$V_t = 916,37 - 91,18 \cdot v_c - 142,85 \cdot f \quad (\text{equação 5.2})$$

os coeficientes β_1 igual a -91,18 e β_2 igual a -142,85 se referem aos fatores velocidade de corte e velocidade de avanço respectivamente. Os sinais dos coeficientes da equação indicam a direção de máxima inclinação da superfície de resposta gerada, ou seja, se é preciso maximizar ou minimizar os coeficientes para alcançar a meta. A equação mostra que maximizando a velocidade de corte e o avanço, diminui o valor total da operação de usinagem.

Para a configuração do caminho de descida mais íngreme, os valores codificados precisam ser calculados, para calcular as variações nos valores reais para então definir o delineamento que precisa ser executado para verificar a significância da superfície de resposta, conforme apresentado no capítulo 4.6.

Aplicando a equação 4.3 temos:

variação no valor codificado f = variação no valor real f / metade do intervalo f,

logo, $\Delta f_C = 0,03 / ((0,18-0,12)/2) = 1$

Aplicando a equação 4.4 encontramos a variação no valor codificado v_c .

$$\Delta v_{cC} = (\beta_1 / \beta_2) \cdot \Delta f_C$$

Logo, $\Delta v_{cC} = (-91,18 / -142,85) \cdot 1 = 0,638$

Retornando à equação 4.3 para calcular a variação no valor real v_c temos:

$$\Delta v_{cR} = 0,638 * ((36-24)/2) = 3,83 \approx 4$$

Sendo assim o delineamento para encontrar de forma rápida os parâmetros de usinagem onde a superfície de resposta deve ser significativa deve seguir os degraus do quadro abaixo.

Degrau	Nível dos Fatores			
	Codificado		Real	
	Vc	f	Vc	f
Operação atual	0	0	30	0,15
1	0,64	1	34	0,18
2	1,28	2	38	0,21
3	1,92	3	42	0,24
4	2,56	4	46	0,27
5	3,20	5	50	0,30
6	3,84	6	54	0,33
7	4,48	7	58	0,36
8	5,12	8	62	0,39
9	5,76	9	66	0,42
10	6,40	10	70	0,45

Quadro 8 – Delineamento de máxima descida

Fonte: Autoria própria.

Realizando os experimentos acima, encontrar-se-á o degrau onde se observa uma mudança na alteração da variável resposta valor total de operação. Este degrau é possivelmente o ponto ótimo (mínimo) e para verificar isto é necessário realizar um novo delineamento nesta região com cinco pontos centrais para o teste de curvatura. Conforme será apresentado no capítulo 6 o degrau de mínimo é o degrau um, onde os níveis são 34 m/min e 0,18 mm/rotação.

O Quadro 9 apresenta os parâmetros das nove execuções deste delineamento fatorial 2^2 com cinco pontos centrais.

	f:Avanço (mm/rotação)	Vc:Velocidade de Corte (m/min)
1	0,15	30
2	0,15	38
3	0,18	34
4	0,18	34
5	0,18	34
6	0,18	34
7	0,18	34
8	0,21	30
9	0,21	38

Quadro 9 – Delineamento para teste de curvatura

Fonte: Autoria própria.

Observando a presença de curvatura significa que o experimento está próximo da região ótima de operação. Neste caso um delineamento RSM de segunda ordem deve ser executado para modelar a relação entre a resposta e os fatores. Caso não haja, um novo caminho de descida é determinado e o procedimento repetido. Sucessivos delineamentos têm de ser realizados com cada experiência com nova origem que se situa na linha até que a curvatura seja significativa para o experimento.

No capítulo 6 o delineamento acima apresentou curvatura, possibilitando a continuação para o delineamento RSM.

5.4 DELINEAMENTO COM SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Encontrada a região ótima, onde o mínimo valor total está, um modelo de segunda ordem pode ser empregado para encontrar o ponto ótimo. Foi utilizado um delineamento composto central, aumentando o delineamento anterior adicionando execuções axiais. Para a distância α entre o ponto central e o ponto de estrela, utiliza-se a equação 4.5.

$$\alpha = [2^{k-f}(n_f/n_s)]^{1/4} = [2^2(1/1)]^{1/4} = 1,414$$

Com o valor codificado α , utilizamos uma regra de três para encontrar os valores reais dos níveis nos pontos estrela para os dois fatores.

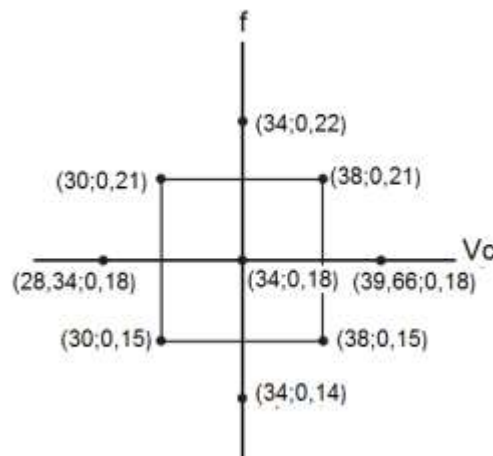


Figura 19 – Níveis do Delineamento Composto Central

Fonte: Autoria própria.

Com os treze pontos do delineamento definidos realizam-se os experimentos e verifica-se a significância do ajuste do modelo. Se este não for significativo o modelo de segunda ordem é adequado para a região do experimento. Caso seja significativo, então acrescentar novos níveis nos fatores propondo um experimento fatorial do tipo 3^k ou 4^k seria uma possibilidade de continuar o experimento, muito embora novamente pudesse não chegar a boas conclusões. Por estes motivos e devido ao custo e necessidade de colocar em prática os resultados, não se optou

em continuar os ensaios, mas sim aplicar o ponto ótimo aproximado encontrado até esta etapa.

	f:Avanço (mm/rotação)	Vc:Velocidade de Corte (m/min)
1	0,18	28,34314575
2	0,15	30
3	0,21	30
4	0,1375735931	34
5	0,18	34
6	0,18	34
7	0,18	34
8	0,18	34
9	0,18	34
10	0,2224264069	34
11	0,15	38
12	0,21	38
13	0,18	39,65685425

Quadro 10 – Delineamento RSM de segunda ordem

Fonte: Autoria própria.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo trás os resultados obtidos em cada etapa dos experimentos do trabalho.

Nos primeiros experimentos executados, onde se queria conhecer o grau de significância dos fatores, ao executar os oito ensaios obteve-se o ΔZ como resposta da máquina, no entanto a equação 5.1 foi utilizada para transformar a distância vertical na variável resposta de interesse V_t . No Quadro 11 verificam-se as respostas.

	f:Avanço (mm/rotação)	vc:Velocidade de Corte (m/min)	C:Concentração óleo de corte (%)	Valortotal (R\$)
1	0,18	24	8	816,77
2	0,18	24	8	828,44
3	0,12	36	8	984,77
4	0,12	36	8	867,11
5	0,12	24	10	1178,12
6	0,12	24	10	1206,89
7	0,18	36	10	666,44
8	0,18	36	10	782,46

Quadro 11 – Respostas do delineamento fatorial fracionado 2^3

Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados no software DOE++ pode-se gerar a tabela de regressão, onde se observam em vermelho os fatores significativos avanço e velocidade de corte.

Tabela de Regressão							
Informação da Regressão							
Termo	Efeito	Coefficiente	Erro Padrão	Baixa Confiança	Confiança Elevada	Valor T	Valor P
Intercepção		916,375	21,0165	871,571	961,179	43,6026	1,65E-06
f:Avanço	-285,695	-142,8475	21,0165	-187,6515	-98,0435	-6,7969	0,0024
vc:Velocidade de Corte	-182,36	-91,18	21,0165	-135,984	-46,376	-4,3385	0,0123
C:Concentração óleo de corte	84,205	42,1025	21,0165	-2,7015	86,9065	2,0033	0,1157

Quadro 12 – Tabela de regressão para o delineamento fatorial fracionado 2^3

Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa do estudo várias dúvidas apareceram em relação ao limite máximo dos níveis dos fatores. Como todos os experimentos foram feitos com peças da linha de produção, limites conservadores foram adotados de maneira que nenhum dano pudesse ocorrer nas peças, inviabilizando sua continuação na linha de manufatura.

Com os dois fatores significativos a análise da proximidade em relação ao ponto ótimo foi feita utilizando o método da máxima ascensão/descida. O Quadro 13 apresenta os resultados deste segundo delineamento fatorial 2^2 com cinco pontos centrais.

	f:Avanço (mm/rotação)	vc:Velocidade de Corte (m/min)	Valor total (R\$)
1	0,12	24	1178,12
2	0,12	24	1206,89
3	0,12	36	984,77
4	0,12	36	867,11
5	0,15	30	795,96
6	0,15	30	1019,44
7	0,15	30	1050,27
8	0,15	30	923,12
9	0,15	30	880,73
10	0,18	24	816,77
11	0,18	24	828,44
12	0,18	36	666,44
13	0,18	36	782,46

Quadro 13 – Respostas do delineamento fatorial 2^2 com cinco pontos centrais

Fonte: Autoria própria.

Observando a tabela de regressão, obtêm-se na coluna coeficiente os valores dos coeficientes para cada fator e a equação formada por estes coeficientes que representa o modelo na região estudada. Para os termos não significantes pode-se considerar seu valor na equação como erro e desconsiderá-los.

$$V_t = 916,37 - 91,18.v_c - 142,85.f$$

Os sinais negativos dos coeficientes de v_c e f indicam que para diminuir o V_t precisamos aumentar a velocidade de corte e o avanço, conforme pode ser observado no Gráfico 9 abaixo.

Tabela de Regressão							
Informação da Regressão							
Termo	Efeito	Coefficiente	Erro Padrão	Baixa Confiança	Confiança Elevada	Valor T	Valor P
Intercepção		916,375	29,8339	860,8974	971,8526	30,7159	1,37E-09
f:Avanço	-285,695	-142,8475	29,8339	-198,3251	-87,3699	-4,7881	0,0014
vc:Velocidade de Corte	-182,36	-91,18	29,8339	-146,6576	-35,7024	-3,0563	0,0157
f • vc	84,205	42,1025	29,8339	-13,3751	97,5801	1,4112	0,1959
Curvatura		17,529	48,1057	-71,9259	106,9839	0,3644	0,725

Quadro 14 – Tabela de regressão para o delineamento fatorial 2^2 com pontos centrais

Fonte: Autoria própria.

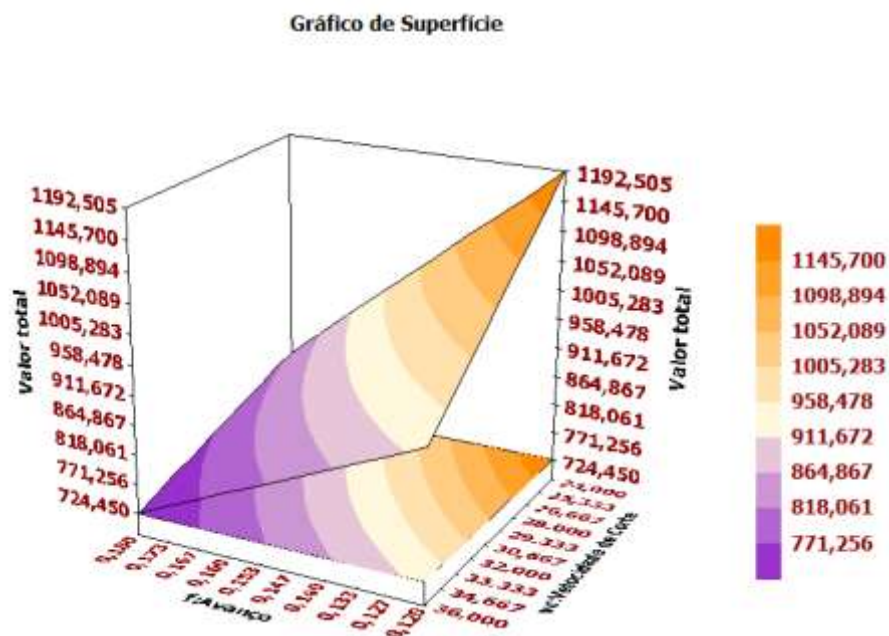


Gráfico 9 - Superfície de contorno do delineamento fatorial 2^2 com pontos centrais

Fonte: Autoria própria.

Após calcular os valores codificados para a configuração do caminho de descida mais íngreme, para calcular as variações nos valores reais para então definir o delineamento que precisa ser executado para verificar a significância da superfície de resposta, o quadro 15 com uma sequência de experimentos foi elaborado e os resultados são apresentados abaixo.

Degraus	Nível dos Fatores				Valor total
	Codificado		Real		
	Vc	f	Vc	f	
Operação atual	0	0	30	0,15	1006,04
1	0,64	1	34	0,18	975,04
2	1,28	2	38	0,21	1154,55
3	1,92	3	42	0,24	2012,87
4	2,56	4	46	0,27	x
5	3,20	5	50	0,30	x
6	3,84	6	54	0,33	x
7	4,48	7	58	0,36	x
8	5,12	8	62	0,39	x
9	5,76	9	66	0,42	x
10	6,40	10	70	0,45	x

Quadro 15 – Resultados dos experimentos para o método de máxima descida

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que no degrau um temos uma variação no valor total, que de decrescente passa a ser crescente no degrau seguinte, indicando o possível ponto ótimo.

Para verificar se o ponto é realmente um ponto de mínimo foi realizado o delineamento demonstrado no Quadro 15 para o teste de curvatura, onde se obteve as respostas abaixo.

	f:Avanço (mm/rotação)	Vc:Velocidade de Corte (m/min)	Valor Total (R\$)
1	0,15	30	993,76
2	0,15	38	1177,97
3	0,18	34	899,69
4	0,18	34	1007,33
5	0,18	34	946,78
6	0,18	34	831,19
7	0,18	34	975,04
8	0,21	30	1638,25
9	0,21	38	2096,42

Quadro 16 – Resultados do delineamento para teste de curvatura

Fonte: Autoria própria.

Tabela ANOVA					
Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados [Parcial]	Média dos Quadrados [Parcial]	Relação F	Valor P
Modelo	4	1,39E+06	3,48E+05	73,4322	0,0005
Efeitos Principais	2	7,14E+05	3,57E+05	75,3329	0,0007
2-Caminho de Interações	1	1,88E+04	1,88E+04	3,9602	0,1174
Curvatura	1	6,59E+05	6,59E+05	139,1029	0,0003
Resíduo	4	1,90E+04	4738,0227		
Erro Puro	4	1,90E+04	4738,0227		
Total	8	1,41E+06			

Quadro 17 – Tabela ANOVA para o delineamento de teste de curvatura

Fonte: Autoria própria.

Na tabela ANOVA acima se observa que a curvatura é significativa, logo o experimento está próximo da região ótima de operação e um delineamento RSM de segunda ordem deve ser executado para modelar a relação entre a resposta e os fatores.

Um delineamento composto central foi escolhido para esta modelagem aumentando o delineamento anterior adicionando execuções axiais. Os resultados são vistos no quadro abaixo.

	f:Avanço (mm/rotação)	Vc:Velocidade de Corte (m/min)	Valor Total (R\$)
1	0,18	28,34314575	1111,77
2	0,15	30	1006,04
3	0,21	30	906,91
4	0,1375735931	34	1011,42
5	0,18	34	774,1
6	0,18	34	794,2
7	0,18	34	817,78
8	0,18	34	879,86
9	0,18	34	805,5
10	0,2224264069	34	949,51
11	0,15	38	1691,72
12	0,21	38	1369,83
13	0,18	39,65685425	2708,81

Quadro 18 – Resultado do delineamento composto central

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela ANOVA do delineamento verifica-se que a falta de ajuste é significativo, o que indica que o modelo não é adequado para a região e que novos níveis nos fatores deveriam ser acrescentados, formando um experimento fatorial do tipo 3^k ou 4^k .

Tabela ANOVA					
Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados [Parcial]	Média dos Quadrados [Parcial]	Relação F	Valor P
Modelo	5	3,23E+06	6,45E+05	17,6585	0,0008
Efeitos Principais	2	1,48E+06	7,42E+05	20,3037	0,0012
2-Caminho de Interações	1	1,24E+04	1,24E+04	0,3396	0,5783
Efeitos Quadráticos	2	1,73E+06	8,65E+05	23,6728	0,0008
Resíduo	7	2,56E+05	3,65E+04		
Falta de ajuste	3	2,49E+05	8,31E+04	51,8767	0,0012
Erro Puro	4	6407,7133	1601,9283		
Total	12	3,48E+06			

Quadro 19 – Tabela ANOVA para o delineamento composto central

Fonte: Autoria própria.

No entanto como isto também não garante boas conclusões e se aceita os novos parâmetros de soldagem como suficientes para o estudo, opta-se por encerrar o trabalho aplicando o ponto de menor V_t no processo de fabricação.

Pelo Gráfico 10 observam-se as curvas de nível do delineamento, onde o possível ponto ótimo foi identificado no cruzamento dos fatores nos níveis 0,20 mm/rotação de velocidade de avanço e 32,5 m/min de velocidade de corte. No Gráfico 11 vê-se a superfície de resposta tridimensional onde é possível avaliar a variação do valor total gasto na operação de desbaste da liga inconel no torno vertical conforme ocorre a variação dos fatores.

Para validar os experimentos e verificar o ganho de produtividade e redução de gastos, cinco experimentos com os parâmetros ótimos citados acima foram feitos e os resultados estão apresentados no Quadro 20 – **Resultados**.

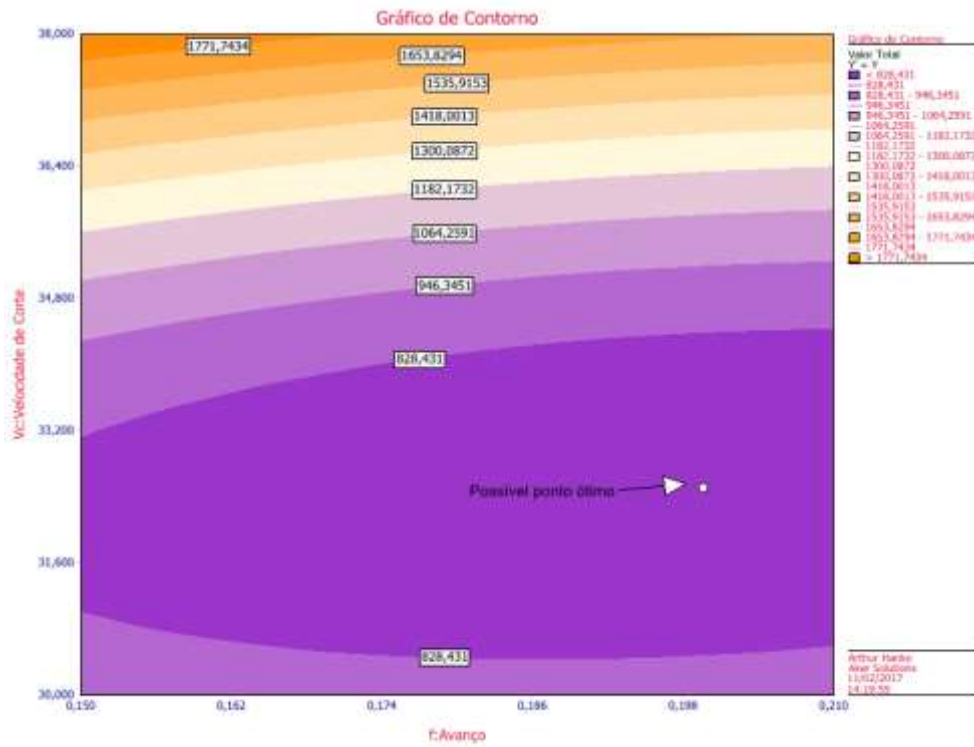


Gráfico 10 – Curvas de nível do delineamento RSM

Fonte: Autoria própria.

Gráfico de Superfície

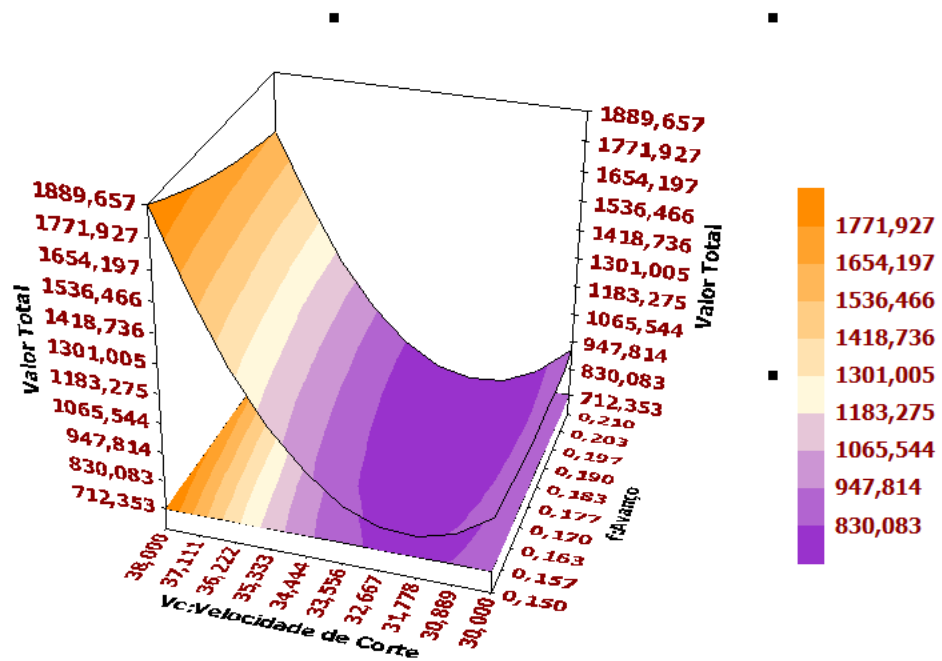


Gráfico 11 – Superfície de contorno do delineamento RSM

Fonte: Autoria própria.

	f:Avanço (mm/rot)	Vc:Velocidade de corte (m/min)	Valor total (R\$)
1	0,2	34	809,72
2	0,2	34	741,9
3	0,2	34	955,04
4	0,2	34	847,39
5	0,2	34	1087,14

Quadro 20 – Resultados dos experimentos de validação dos parâmetros ótimos

Fonte: Autoria própria.

Fazendo o cálculo da média dos cinco valores totais para os níveis ótimos do quadro acima, e comparando com a média dos cinco valores totais com os níveis atuais, que estão apresentados no Quadro 13 nos experimentos 5 a 9, verifica-se que realmente o valor total da operação diminuiu de R\$ 934,00 reais para R\$ 888,00 reais. O tempo total da operação caiu de 11h para 8,3h.

7 CONCLUSÕES

Verifica-se com os resultados apresentados que os objetivos foram atingidos. Foram identificados os parâmetros otimizados para o processo de usinagem da camisa revestida com a liga de inonel, que passou de 0,15 mm/rotação de velocidade de avanço e 30 m/min de velocidade de corte para 0,20 mm/rotação de velocidade de avanço e 32,5 m/min de velocidade de corte.

Com esta mudança nos parâmetros de desbaste o tempo de fabricação das peças baixou de 11 horas para 8,3 horas e isto fez com que o valor total da operação diminuísse de R\$ 934,00 reais para R\$ 888,00 reais.

Para alcançar esta melhora, primeiro as variáveis de controle e resposta foram determinadas. As influências de cada variável também foram determinadas, e algumas foram descartadas para os demais ensaios. Os níveis ótimos para os fatores relevantes foram encontrados e certificados através de ensaios.

Como possibilidades alternativas para reduzir ainda mais o tempo em que ocorre efetiva remoção de material, pode-se utilizar usinagem simultânea por várias ferramentas, aumento da velocidade de corte pelo emprego de ferramentas mais resistentes ou materiais de melhor usinabilidade ou, ainda refrigerantes mais efetivos.

Conforme visto neste trabalho, existe uma velocidade de corte econômica que corresponderá a uma despesa mínima, mas nem sempre a velocidade econômica é a mais recomendada, pois normalmente o que é desejado é o lucro máximo e não o mínimo dispêndio.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das dificuldades encontradas para o desenvolvimento desta monografia e deste estudo, propõem-se para futuros trabalhos de investigação em outras máquinas e/ou condições de usinagem, a realização dos ensaios em corpos de prova, de maneira que os limites dos níveis dos fatores não restrinjam as condições ideias dos experimentos.

Acredita-se que os experimentos poderiam ser mais controlados e apresentar resultados mais precisos e significativos utilizando corpos de prova, podendo levar o resultado final a uma conclusão mais precisa sobre os parâmetros ideias para se obter a melhor vida útil dos insertos com a melhor produtividade dentro da linha de manufatura.

REFERÊNCIAS

SHANKAR, K. V. et al. **Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy**. Journal of nuclear materials, n. 228, p. 222-232, 2001.

EZUGWU, E. O. et al. **The machinability of nickel based alloys: a review**. Journal of Materials Processing technology, n. 86, p. 1-16, 1999.

METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Stainless Steels, Tool materials and Specials Purpose metals. Heat-Resistant Materials**. 9. ed. v. 3.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2. ed. p. 242, London: Butterworths, 1984.

SECO TOOLS. **Catálogo & Guia Técnico**. Sorocaba, 2008.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo Torneamento Geral**. 2011.

BLASER SWISSLUBE DO BRASIL. **Artigo número 00873-12**. 2. v. São Paulo, 2015.

FREIRE, J.M. **Tecnologia Mecânica Torno Mecânico**, Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 3. v. Rio de Janeiro, 1975.

DICIONÁRIO INFOPÉDIA DA LÍNGUA PORTUGUESA COM ACORDO ORTOGRÁFICO. Porto: Porto Editora, 2003-2016. Disponível em: <<https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/usinagem>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

MICHAELIS. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?id=4bB10>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. Editora da UFSC, 3. ed. Florianópolis, 1993.

RODRIGUES, Marcelo Acácio; HASSUI, Amauri. **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**. Escola Politécnica da USP. São Paulo

PORTAL ACTION I. **Confiabilidade**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/confiabilidade>>. Acesso em: 28 dez. 2016.

WIKIPÉDIA. **Engenharia de confiabilidade**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Engenharia_de_confiabilidade>. Acesso em: 28 dez. 2016.

PORTAL ACTION II. **Planejamento de experimento**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/planejamento-de-experimento>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc. Arizona State University, 8. ed. Arizona, 2013.

SHIMURA, Sérgio. **Notas de Aula Delineamento de Experimentos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.