

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ANA CAROLINE DZULINSKI**

**MODELO DESIGN FOR SIX SIGMA PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
USINADOS: UMA ABORDAGEM PARA PRESTADORES DE SERVIÇOS DE  
USINAGEM**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**ANA CAROLINE DZULINSKI**

**MODELO DESIGN FOR SIX SIGMA PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
USINADOS: UMA ABORDAGEM PARA PRESTADORES DE SERVIÇOS DE  
USINAGEM**

**Design for six sigma model for machined product development: an approach  
for machining service providers**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Aldo Braghini Junior.

**PONTA GROSSA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ANA CAROLINE DZULINSKI

**MODELO DESIGN FOR SIX SIGMA PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS USINADOS: UMA ABORDAGEM PARA PRESTADORES DE SERVIÇOS DE USINAGEM**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 27 de Maio de 2022

Dr. Aldo Braghini Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Antonio Augusto De Paula Xavier, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Cassiano Moro Piekarski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Dr. Daniel Amoretti Goncalves, Doutorado - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Dr. Marcelo Gitirana Gomes Ferreira, Doutorado - Fundação Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/05/2022.

Dedico este trabalho aos meus pais,  
David e Elizandra, todas as minhas  
conquistas só foram alcançadas devido a  
educação e amor que eles me  
proporcionam.

## AGRADECIMENTOS

Deus tem sido minha grande fortaleza sempre, e mais uma vez mantive minha fé e meus pensamentos guiados por Ele para que mais uma grandiosa etapa da minha vida fosse concluída. Não poderia jamais não ser grata primeiramente a Ele.

Meus pais, Elizandra e David. Obrigada por jamais me impedirem de sonhar, por sempre acreditarem em mim e por terem me formado uma cidadã consciente, com olhar ao meu semelhante, e acima de tudo uma mulher forte. Tudo o que passamos juntos tornou possível o meu mais alto grau de formação, devo não somente minha vida a vocês, mas tudo que construo dia após dia. Aos meus irmãos Isabela, André e Bianca, quero que saibam que o nosso laço fortalece minha vida, e sustentou também essa conquista.

Ao meu querido orientador, Prof. Aldo. Sua confiança em mim foi primordial, e a paciência foi fundamental. Acaba aqui uma parceria entre orientador e orientanda, mas permanece o sentimento de gratidão e amizade.

A minha universidade UTFPR! Toda minha vida acadêmica e profissional foi construída nessa instituição, e sou imensamente grata a todos os servidores que mantêm, ano após ano, a seriedade e competência dessa organização. Um agradecimento especial a toda equipe do PPGE, pela eficiência e auxílio em todas as dificuldades ao longo desse tempo.

Agradeço ao meu companheiro de vida Thiago. Não é fácil acompanhar uma pesquisadora em seus altos e baixos, e você esteve presente em todas as situações. Eternizo aqui meu agradecimento aos meus amores de quatro patas também: Nelson e Maick! Eles compõem nossa família e me trouxeram calma em incontáveis momentos.

Aos meus amigos sinceros, André, Karen, Guilherme e Marcos. Boa parte das angústias e alegrias desse doutorado foi compartilhada com vocês, e vocês sempre me encorajaram a continuar.

A minha amiga e fada madrinha Daiane de Genaro, que sempre me ofereceu não apenas apoio na pesquisa, mas uma amizade sincera e um carinho sem limites! Compartilhou suas experiências, e foi sempre um espelho para mim.

Por fim, mas não menos importante, ao meu atual trabalho, IFRS, em especial ao campus de Caxias do Sul, pela oportunidade de continuar minha capacitação por meio do doutorado, e estimular o contínuo aperfeiçoamento de seus servidores.

## RESUMO

As ferramentas e estratégias aplicadas no desenvolvimento de novos produtos são fundamentais para a competitividade das organizações. Desde a década de 1980, diversos são os métodos e ferramentas que vem sendo criadas visando este processo, sendo o Design for Six Sigma (DFSS), uma das metodologias mais atuais. A presente pesquisa tem como objetivo propor um modelo de DFSS para produtos usinados, voltado para o planejamento e desenvolvimento de produtos metálicos com médio e alto volume de produção. Os processos de usinagem em largas escalas são ofertados em vastas cadeias de suprimentos (como a automotiva), onde a manufatura da peça usinada deve atender ao projeto de produto, caracterizando um codesenvolvimento entre cliente e fornecedor. Esta característica difere o desenvolvimento do produto em relação aos modelos convencionais, onde o projeto e a manufatura ocorrem sob a gestão única de uma mesma organização. Para atender o objetivo principal, e assim preencher a lacuna de pesquisa sobre modelos de DFSS destinados a peças usinadas, foram seguidas as seguintes etapas metodológicas: (a) levantamento teórico sobre as definições, objetivos, fases e respectivas atividades e ferramentas empregadas na metodologia DFSS; (b) proposta da estrutura teórica de DFSS específica para usinagem; (c) análise sobre as relações estatísticas que compõe o DFSS para usinagem – índice Critical to Quality proposto para fases iniciais do desenvolvimento baseado em capacidade de processos ( $C_p$  e  $C_{pk}$  Fuzzy); (d) validação do modelo proposto por meio da análise crítica de especialistas que atuam na indústria com o desenvolvimento da manufatura de peças usinadas. Como resultados da pesquisa, uma proposta de DFSS genérico foi obtida, onde a partir desta e considerando as entradas, operações e saídas dos processos de usinagem convencional, e a opinião de 12 profissionais do segmento de usinagem e de representantes de 4 grandes grupos de empresas clientes do segmento da usinagem, todas situadas na região da Serra do Rio Grande do Sul, foi obtido o modelo de DFSS para usinagem. Visando viabilizar o contato entre os profissionais do segmento estudado e a pesquisa, o modelo é apresentado em uma página da web. Entre as contribuições acadêmicas e práticas que o modelo apresenta, destaca-se o índice Critical to Quality para análise de risco nas fases iniciais de desenvolvimento de produtos usinados, o qual considera dados históricos de processo e foi criado visando a inserção do DFSS para usinagem em planos de processo de usinagem que possuem interface com sistemas cyber físicos empregados na indústria 4.0.

Palavras-chave: desenvolvimento de produtos; design for six sigma; usinagem; análise de risco; sistemas cyber físicos.

## ABSTRACT

The tools and strategies applied in the new products development are fundamental for the organizations competitiveness. Since the 1980s, several methods and tools have been created for this process, with Design for Six Sigma (DFSS) being one of the most current methodologies. The present research aims to propose a DFSS model for machined products, aimed at the planning and development of metallic products with medium and high production volume. Large-scale machining processes are offered in vast supply chains (such as automotive), where the manufacture of the machined part must meet the product design, featuring a co-development between customer and supplier. This feature differs product development from conventional models, where design and manufacturing take place under the single management of the same organization. To meet the main objective, and thus fill the research gap on DFSS models for machined parts, the following methodological steps were followed: (a) theoretical survey on the definitions, objectives, phases and respective activities and tools used in the DFSS methodology; (b) proposal of the theoretical structure of DFSS specific for machining; (c) analysis of the statistical relationships that make up the DFSS for machining – Critical to Quality index proposed for early stages of development based on process capability (Cp and Cpk Fuzzy); (d) validation of the proposed model through the critical analysis of specialists who work in the industry with the development of the manufacture of machined parts. As a result of the research, a generic DFSS proposal was obtained, where from this and considering the inputs, operations and outputs of conventional machining processes, and the opinion of 12 professionals in the machining segment and representatives of 4 large groups of companies customers in the machining segment, all located in the Serra do Rio Grande do Sul region, the DFSS model was obtained for machining. To facilitate contact between professionals in the studied segment and the research, the model is presented on a web page. Among the academic and practical contributions that the model presents, the Critical to Quality index for risk analysis in the early stages of development of machined products stands out, which considers historical process data and was created with a view to inserting the DFSS for machining, in machining process plans that interface with cyber physical systems used in industry 4.0.

Keywords: product development; design for six sigma; machining; risk analysis; physical cyber systems.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais pontos de delimitação do tema da pesquisa .....	29
Figura 2 - Síntese da estrutura da pesquisa .....	30
Figura 3 - Estrutura do referencial teórico e relação com os objetivos específicos da pesquisa .....	31
Figura 4 - Comparação entre o processo convencional do PDP e o DFSS em relação aos requisitos de produto .....	33
Figura 5 - Diagrama representativo para análise de diversas estruturas de DFSS comparando-as com as fases de DNP .....	38
Figura 6 - Ferramentas empregadas no DFSS de acordo com estágio de DP ...	41
Figura 7 - Percentual de citações das ferramentas empregadas no DFSS de acordo com o estágio de DP .....	42
Figura 8 - Classificação dos processos de usinagem convencionais (tradicionais) e não convencionais (não tradicionais) .....	45
Figura 9 - Entradas e saídas do processo de usinagem.....	46
Figura 10 - Características construtivas principais do processo de torneamento .....	46
Figura 11 - Principais operações de torneamento .....	47
Figura 12 - Características construtivas principais do processo de furação ...	48
Figura 13 - Principais operações de furação .....	49
Figura 14 - Características construtivas principais do processo de fresamento .....	50
Figura 15 – Principais operações de fresamento .....	51
Figura 16 - Sistema integrado de usinagem .....	52
Figura 17 - Principais influências das entradas de processo de usinagem nas saídas em relação ao nível macro e micro .....	53
Figura 18 - Processo de seleção de ferramentas de corte .....	57
Figura 19 - Intervalo de velocidades de corte para máxima eficiência em processos de usinagem .....	62
Figura 20 – Elementos de perfil para análise de rugosidade de superfícies .....	63
Figura 21 - Critérios e macros variáveis de sustentabilidade dos processos de usinagem.....	65
Figura 22 - Modelo hierárquico de seis níveis para classificação da energia de usinagem.....	66
Figura 23 – Classificação dos métodos de refrigeração nos processos de usinagem em relação aos aspectos ambientais.....	68
Figura 24 - Relação entre parâmetros de usinagem e os tipos de modelagem para otimização .....	72
Figura 25 - Diagrama em blocos da relação entre parâmetros de usinagem....	73
Figura 26 - Tipos de relacionamento com fornecedores no PDP, em destaque as características do segmento considerado na pesquisa .....	75
Figura 27 - Pirâmide da Usinagem.....	75
Figura 28 - Atividades de planejamento de processos realizadas no projeto detalhado de DP .....	78
Figura 29 - Atividades de planejamento de produção do PDP .....	78
Figura 30 – Categorias de atividades realizadas na gestão do desenvolvimento de produtos usinados .....	81
Figura 31 – Etapas de desenvolvimento de produtos usinados. ....	82

Figura 32 – Etapas do processo de desenvolvimento de projeto de torneamento.....	84
Figura 33 – Etapas do processo de desenvolvimento do projeto de furação....	85
Figura 34 – Aplicações do PPAC (CAPP) no ciclo de manufatura.....	86
Figura 35 – Classes de métodos para planejamento de operações de usinagem .....	87
Figura 36 – Abordagem dos sistemas Cyber Físicos .....	87
Figura 37 - Representação da forma de uma distribuição normal de dados .....	89
Figura 38 - Síntese de equações para cálculo de limites de controle estatístico para gráficos de variáveis .....	91
Figura 39 – Macro etapas da metodologia da pesquisa .....	94
Figura 40 - Síntese sobre as fases realizadas para construção da revisão teórica sobre DFSS .....	96
Figura 41 - <i>Word Cloud</i> obtida pelo <i>Biblioshiny</i> , considerando as palavras-chave mais citadas no banco de dados analisado sobre DFSS .....	98
Figura 42 - Fases da revisão teórica sobre usinagem .....	99
Figura 43 – Definição do CTQ para DFSS de usinagem.....	104
Figura 44 - Detalhamento da amostra considerada na pesquisa.....	108
Figura 45 - Modelo genérico de DFSS .....	119
Figura 46 - Conjunto de ferramentas de cada fase DIDOV do modelo genérico DFSS.....	120
Figura 47 – Relação entre as fases de codesenvolvimento entre cliente e fornecedor e o DFSS de Usinagem.....	127
Figura 48 – Modelo DFSS para usinagem .....	128
Figura 49 – Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase <i>Define e Identify</i> do DFSS de usinagem.....	129
Figura 50 - Fluxograma das etapas para determinação do índice CTQ do DFSS para usinagem .....	134
Figura 51 - Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase <i>Design</i> do DFSS de usinagem .....	136
Figura 52 – Índice CTQ das fases finais do DFSS para usinagem visando entradas, operação e saídas dos processos .....	136
Figura 53 - Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase <i>Optimise</i> do DFSS de usinagem .....	139
Figura 54 - Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase <i>Verify</i> do DFSS de usinagem.....	141
Figura 55 - Indicadores para acompanhamento de produção corrente de produtos usinados desenvolvidos empregando o DFSS para usinagem .....	142
Figura 56 - Gráficos <i>Fuzzy</i> , grupo com 50 dados (COTA A) e amostra (n = 50, m = 25).....	153
Figura 57 - Gráficos <i>Fuzzy</i> , grupo com 50 dados (COTA B) e amostra (n = 50, m = 27).....	154
Figura 58 – (Grupo de dados m = 100) Curvas das funções densidade das amostras (m = 29) cotas A e B, (m= 60 e 72) cotas A e B respectivamente .....	155
Figura 59 - Gráficos <i>Fuzzy</i> , grupo com 100 dados (COTA A), e amostra (n = 100, m = 29).....	156
Figura 60 - Gráficos <i>Fuzzy</i> , grupo com 100 dados (COTA B), e amostra (n = 100, m = 29).....	156
Figura 61 - Gráficos <i>Fuzzy</i> , grupo com 100 dados (COTA A), e amostra (n = 100, m = 60).....	157

Figura 62 - Gráficos <i>Fuzzy</i> , grupo com 100 dados (COTA B), e amostra (n = 100, m = 72).....	157
Figura 63 – Gráficos da função densidade dos dados reais referentes às amostras do Lote 2 e 3, Cotas A e B .....	160
Figura 64 - Síntese dos gráficos obtidos para valores <i>Fuzzy</i> com dados reais (Cota A) .....	162
Figura 65 - Síntese dos gráficos obtidos para valores <i>Fuzzy</i> com dados reais (Cota B) .....	163
Figura 66 – Planilha Excel com dados gerados para simulação (população de 50, 100, 500 e 1000) .....	166
Figura 67 – Planilha com os dados reais considerados para análise .....	167
Figura 68 - Janela para inserção de dados para simulação de Monte Carlo ...	167
Figura 69 – Exemplo de planilhas geradas com a amostra obtida na simulação de Monte Carlo .....	168
Figura 70 - Exemplo das planilhas geradas com a remoção de dados com medidas fora da especificação (obtidos na simulação de Monte Carlo).....	168
Figura 71 – Exemplo da planilha de cálculo construída para CTQ para os dados simulados.....	169
Figura 72 – Exemplo da planilha de síntese dos dados <i>Fuzzy</i> calculados para dados simulados .....	169
Figura 73 - Representação da pasta de trabalho com as planilhas geradas com os dados reais aplicados no cálculo de CTQ .....	170
Figura 74 - Imagem da página inicial da web elaborada para o DFSS genérico e DFSS para usinagem .....	170

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 – (COTA A) Curva da função densidade da amostra com 25 medidas (n = 50; m=25) .....</b>	<b>151</b>
<b>Gráfico 2 - (COTA B) Curva da função densidade da amostra com 27 medidas (n = 50; m=27) .....</b>	<b>152</b>
<b>Gráfico 3 – Curva da função distribuição de probabilidade referente aos dados reais (Lote 1), Cota A .....</b>	<b>159</b>
<b>Gráfico 4 - Curva da função distribuição de probabilidade referente aos dados reais (Lote 1), Cota B .....</b>	<b>159</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese de definições sobre DFSS encontradas na literatura científica no período entre os anos de 2009 e 2019 .....	35
Quadro 2 - DFSS consideradas em artigos científicos atuais .....	36
Quadro 3 - Classificação das principais atividades de DFSS de acordo com três estágios de DP .....	39
Quadro 4 - Classificação dos principais processos de fabricação segundo diversos autores .....	43
Quadro 5 - Fatores de análise de usinabilidade de materiais .....	54
Quadro 6 - Os 5 principais metais processados por meio da usinagem .....	55
Quadro 7 - Guia para seleção de fluídos de corte .....	58
Quadro 8 - Recomendações de fluídos de corte em relação ao tipo de material .....	59
Quadro 9 - Equações para cálculo de valores teóricos dos parâmetros $R_a$ e $R_t$ de rugosidade .....	64
Quadro 10 - Fatores que influenciam a rugosidade de superfícies em peças produzidas nos processos de usinagem .....	65
Quadro 11 - Síntese dos estudos sobre otimização de parâmetros de saída de processos de usinagem .....	70
Quadro 12 - Indicadores auxiliares na gestão de processos de usinagem .....	76
Quadro 13 - Etapas consideradas no plano de processos de usinagem .....	82
Quadro 14 - Valores de referência para o $C_p$ .....	90
Quadro 15 - Síntese das etapas da RBS sobre DFSS .....	96
Quadro 16 - Síntese dos parâmetros da RBS sobre os subtemas relacionados a usinagem .....	100
Quadro 17 - Etapas para elaboração do DFSS para usinagem .....	101
Quadro 18 - Roteiro para coleta de dados nas entrevistas com os profissionais do segmento de usinagem .....	110
Quadro 19 - Etapas empregadas para avaliação do comportamento do índice CTQ .....	113
Quadro 20 - Detalhamento da fase <i>Define</i> do DFSS genérico .....	120
Quadro 21 - Detalhamento da fase <i>Identify</i> do DFSS genérico .....	121
Quadro 22 - Detalhamento da fase <i>Design</i> do DFSS genérico .....	122
Quadro 23 - Detalhamento da fase <i>Optimise</i> do DFSS genérico .....	123
Quadro 24 - Detalhamento da fase <i>Verify</i> do DFSS genérico .....	123
Quadro 25 - Fase 1 ( <i>Define</i> - Definir) do DFSS para Usinagem .....	130
Quadro 26 - Fase 2 ( <i>Identify</i> - Identificar) do DFSS para usinagem .....	132
Quadro 27 - Fase 3 ( <i>Design</i> - Projetar) do DFSS para usinagem .....	137
Quadro 28 - Fase 4 ( <i>Optimise</i> - Otimizar) do DFSS para usinagem .....	140
Quadro 29 - Fase 5 ( <i>Verify</i> - Verificar) do DFSS para usinagem .....	143
Quadro 30 - Síntese das respostas obtidas (empresas fornecedoras) em relação a estrutura do DP e o respectivo impacto na primeira proposta do DFSS para usinagem .....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre tamanho populacional e quantidades de amostras com tamanhos distintos .....	114
Tabela 2 – Síntese dos dados sobre média, desvio-padrão, Cp e Cpk para grupo de dados com $n = 50$ .....	152
Tabela 3 - Síntese dos dados sobre média, desvio-padrão, Cp e Cpk para grupo de dados com $n = 100$ .....	155
Tabela 4 – Síntese dos dados <i>Fuzzy</i> obtidos por meio das amostras de dados reais (média, desvio padrão, Cp e Cpk) .....	161

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5W2H	<i>Who, What, Where, When, Why, How and How Much</i> – Quem, O que, Onde, Quando, Por que, Como e Quanto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> – Processo Hierárquico Analítico
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> – Instituto Americano de Ferro e Aço
ANOVA	Análise de Variância
APQP	<i>Advanced Product Quality Planning</i> - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Sociedade Americana de Testes e Materiais
B2B	<i>Business to Business</i> (rede de vendas realizadas entre empresas – não configura como cliente final)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> – Engenharia Auxiliada por Computador
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Projeto Auxiliado por Computador
CEP	Controle Estatístico de Processos
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CTQ	<i>Critical to Quality</i> – Crítico para Qualidade
DCOV	<i>Define – Characterize – Optimize – Verify</i> (Definir – Caracterizar – Otimizar – Verificar)
DFSS	<i>Design for Six Sigma</i> – Projeto para Seis Sigma
DFMEA	<i>Design Failure Modes and Effects Analysis</i> - Análise dos Efeitos e Modos de Falha do Projeto
DFX	<i>Design for X</i> – Projeto para X
DIDOV	<i>Define – Identify – Design – Optimize – Verify</i> (Definir – Identificar - Projetar – Otimizar – Verificar)
DIDOVM	<i>Define – Identify – Design – Optimize – Verify – Monitoring</i> (Definir – Identificar - Projetar – Otimizar – Verificar – Monitorar)

DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> – Instituto Alemão de Normatização
DMADV	<i>Define – Measure – Analyse – Design – Verify</i> (Definir – Mensurar – Analisar – Projetar – Verificar)
DMAIC	<i>Define – Measure – Analyse – Improve – Control</i> (Definir – Mensurar – Analisar – Melhorar – Controlar)
DNP	Desenvolvimento de Novos Produtos
DOE	<i>Design of Experiments</i> – Projeto de Experimentos
DP	Desenvolvimento de Produtos
ERIC	<i>Eliminate, Reduce, Increase, Create</i> - Eliminar, Reduzir, Melhorar e Criar
EVOP	<i>Evolutionary Operations</i> – Operações Evolutivas
FFE	<i>Fuzzy Front End</i> - Considerada como uma fase de pré desenvolvimento no desenvolvimento de produtos
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> - Análise de Modos de Falhas e Efeitos
IATF	<i>International Automotive Task Force</i> - Força tarefa da Indústria Automotiva
ICOV	<i>Identify – Characterize – Optimize – Verify</i> (Identificar – Caracterizar – Otimizar – Verificar)
IDOV	<i>Identify – Define – Optimize – Verify</i> (Identificar – Definir – Otimizar – Verificar)
IDDOV	<i>Identify – Define – Design – Optimize – Verify</i> (Identificar – Definir – Projetar – Otimizar – Verificar)
KPC	<i>Key Process Characteristic</i> – Características Chave do Processo
MSA	<i>Measurement System Analysis</i> – Análise do Sistema de Medição
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
PCD	Policristalino de Diamante
PDCA	<i>Plan – Do – Check – Act</i> (etapas do ciclo de Deming, Planejar – Executar – Verificar e Agir)
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PERT/CPM	<i>Program Evaluation and Review Technique/ Critical Path Method</i> – Método do caminho crítico em gestão de projetos



PFMEA	<i>Process of Failure Mode and Effects Analysis</i> - Análise dos Efeitos e Modos de Falha do Processo
PIB	Produto Interno Bruto
PIDOV	<i>Plan – Identify – Design – Optimize – Validate</i> (Planejar – Identificar – Projetar – Otimizar – Validar)
PP	Plano de Processo
PPAC	Plano de Processo Assistido por Computador
PPAP	<i>Production Part Approval Process</i> - Processo de Aprovação da Peça de Produção
PPM	Partes por Milhão
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> – Desdobramento da Função Qualidade
RACI	<i>Responsible, Accountable, Consulted and Informed</i> (Responsável, Verificado, Consultado e Informado)
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
SAE	<i>Society of Automobile Engineers</i> – Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SIPOC	<i>Suppliers – Inputs – Process – Outputs – Customers</i> (Fornecedores – Entradas – Processo – Saídas – Clientes)
SS	Seis Sigma
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i> – Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças
TFN	<i>Triangular Fuzzy Numbers</i> – Números Fuzzy de base triangular
TRIZ	<i>Teória Rechénia Izobretátelskih Zadátchi</i> - Teoria da Solução Inventiva de Problemas
VOC	<i>Voice of Customer</i> – Voz do Cliente

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v_0$	Velocidade econômica de corte
$C_2$	Parcela de custos referente a execução do processo de usinagem
$k$	Constante referente a vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1m/min
$x$	Coeficiente angular da reta de representação da vida útil da ferramenta em relação a velocidade (diagrama logarítmico)
$C_3$	Parcela de custos referente a ferramenta de corte
$S_h$	Custo de mão de obra (processo de usinagem)
$S_{mq}$	Custo de máquina (usinagem)
$C_{tf}$	Custo de uma troca de ferramenta de usinagem
$t_{tf}$	Tempo de troca de ferramenta de usinagem
$V_{mxp}$	Velocidade de máxima produção em processos de usinagem
$R_a$	Desvio aritmético médio (parâmetros de rugosidade de superfície)
$R_q$	Desvio médio quadrático (parâmetros de rugosidade de superfície)
$R_t$	Altura total de perfil (parâmetros de rugosidade de superfície)
$R_z$	Altura máxima de perfil (parâmetros de rugosidade de superfície)
$R_{Sk}$	Fator de assimetria do perfil (parâmetros de rugosidade de superfície)
$R_{ku}$	Fator de achatamento do perfil (parâmetros de rugosidade de superfície)
$f$	Avanço de ferramenta de corte
$f_z$	Avanço por aresta
$R$	Raio da fresa
$r_\epsilon$	Raio de ponta da ferramenta
$\theta$	Referente ao ângulo de entrada e saída da ferramenta na superfície de corte
$C$	Ângulo de posição (ferramenta de corte de usinagem)
$D$	Ângulo de ataque (ferramenta de corte de usinagem)
$E_{corte}$	Energia consumida para corte em usinagem

$P_{corte}$	Potência de corte em usinagem
$t_c$	Tempo de corte em usinagem
$F$	Força de corte em usinagem
$v_c$	Velocidade de corte em usinagem
$C_p$	Índice $C_p$ de capacidade de processos
$LSC$	Limite superior de controle – controle de capacidade de processos
$LIC$	Limite inferior de controle – controle de capacidade de processos
$\sigma$	Desvio padrão
$C_{pk}$	Índice $C_{pk}$ de capacidade de processos
$\mu$	Média populacional de dados
$\tilde{\mu}$	Média populacional de dados – números Fuzzy
$\tilde{\sigma}^2$	Variância – números Fuzzy
$n$	Tamanho da população de dados
$m$	Tamanho da amostra de dados
$s^2$	Variância populacional
$[1 - \alpha]F_{D; 0,005}$	Representa o lado direito da função densidade
$[1 - \alpha]F_{E; 0,005}$	Representa o lado esquerdo da função densidade
$\mu_{e,\tilde{\sigma}}(\alpha)$	Lado esquerdo da estimativa Fuzzy de média de dados
$\mu_{d,\tilde{\sigma}}(\alpha)$	Lado direito da estimativa Fuzzy de média de dados
$\bar{x}$	Média amostral
$Z_{\alpha/2}$	Distribuição de probabilidade (distribuição normal)
$LI\tilde{C}(\alpha)$	Limite inferior de especificação – números Fuzzy
$LS\tilde{C}(\alpha)$	Limite superior de especificação – números Fuzzy
$\tilde{C}_p(\alpha)$	Índice $C_p$ - números Fuzzy

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>24</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>25</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4</b>	<b>Delimitação do Tema.....</b>	<b>28</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura da Pesquisa.....</b>	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Desenvolvimento de Produtos e o DFSS .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>DFSS: definições e objetivos, atividades e ferramentas .....</b>	<b>34</b>
2.2.1	Fases de desenvolvimento do DFSS .....	36
2.2.2	Atividades do DFSS .....	38
2.2.3	Ferramentas empregadas no DFSS.....	40
<b>2.3</b>	<b>Aspectos gerais sobre os processos de usinagem .....</b>	<b>43</b>
2.3.1	Operações de torneamento.....	46
2.3.2	Operações de furação .....	48
2.3.3	Operações de fresamento .....	49
2.3.4	Entradas dos processos de usinagem.....	51
2.3.5	Saídas dos processos de usinagem convencional .....	60
2.3.6	Otimização em processos de usinagem.....	69
<b>2.4</b>	<b>Desenvolvimento de produtos usinados .....</b>	<b>74</b>
2.4.1	Planejamento de Processos de Usinagem.....	77
<b>2.5</b>	<b>Análise sobre a capacidade de processos .....</b>	<b>88</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>94</b>
<b>3.1</b>	<b>Revisão teórica sobre DFSS.....</b>	<b>95</b>
<b>3.2</b>	<b>Revisão teórica sobre usinagem.....</b>	<b>98</b>
3.2.1	Fase 1: entradas, operações, saídas e otimização de processos .....	99
3.2.2	Fase 2: Planejamento dos processos de usinagem .....	100
<b>3.3</b>	<b>Proposta de DFSS para produtos usinados.....</b>	<b>101</b>
3.3.1	Definição de CTQ para DFSS de produtos usinados .....	102
<b>3.4</b>	<b>Validação do modelo proposto .....</b>	<b>106</b>
3.4.1	Descrição do segmento e profissionais consultados na pesquisa.....	106
3.4.2	Entrevista com profissionais de desenvolvimento de processos de usinagem.....	109

3.4.3	Avaliação sobre o CTQ das fases iniciais para DFSS para Usinagem...	111
3.4.4	Análise do modelo por meio de dados reais.....	114
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>116</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo DFSS genérico</b> .....	<b>116</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelo DFSS para processos de usinagem</b> .....	<b>125</b>
4.2.1	Fase 1: <i>Define</i> para Usinagem .....	128
4.2.2	Fase 2: <i>Identify</i> para a usinagem .....	131
<u>4.2.2.1</u>	<u>Proposta de CTQ em fases iniciais do DFSS para usinagem</u> .....	<u>133</u>
4.2.3	Fase 3: <i>Design</i> para usinagem.....	135
4.2.4	Fase 4: <i>Optimise</i> para usinagem.....	139
4.2.5	Fase 5: <i>Verify</i> para usinagem.....	140
<b>4.3</b>	<b>Avaliação do modelo de DFSS para usinagem: opinião de profissionais de DP</b> .....	<b>144</b>
<b>4.4</b>	<b>Avaliação do índice CTQ (Cp e Cpk) para fases iniciais do DFSS para usinagem</b> .....	<b>150</b>
4.4.1	Avaliação do CTQ de fases iniciais: análise com dados reais.....	158
4.4.2	Planilhas empregadas no estudo de CTQ para fases iniciais do DFSS .	166
<b>4.5</b>	<b>Página web com os modelos propostos</b> .....	<b>170</b>
<b>4.6</b>	<b>Discussões gerais sobre os resultados</b> .....	<b>171</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>174</b>
<b>5.1</b>	<b>Limitações da pesquisa</b> .....	<b>175</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestão para estudos futuros</b> .....	<b>175</b>
<b>5.3</b>	<b>Publicação resultante da pesquisa</b> .....	<b>176</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE A - Listas com os resultados das RBS realizadas na pesquisa</b> .....	<b>189</b>
	<b>APÊNDICE B - Lista de atividades, classificadas por fase de DFSS, levantadas na RBS</b> .....	<b>202</b>
	<b>APÊNDICE C - Ferramentas aplicadas no DFSS, classificadas por fase, resultantes da RBS</b> .....	<b>211</b>
	<b>APÊNDICE D - Parâmetros de entrada dos processos de usinagem - Adaptado dos textos de Machado et al. (2015) e NBR 6162 (1989)</b> ..	<b>219</b>
	<b>APÊNDICE E - Atividades de planejamento de processos de usinagem - Adaptado do texto de Melo (2003)</b> .....	<b>224</b>
	<b>APÊNDICE F - Questionário enviado aos profissionais (segmento de usinagem)</b> .....	<b>228</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que utiliza uma ferramenta de corte para remoção de material, objetivando a produção de uma peça/produto com uma geometria específica. É considerado um dos processos de fabricação mecânica mais importantes devido à variedade de materiais processados, formas e características geométricas obtidas, precisão dimensional e bons acabamentos superficiais (GROOVER, 2016).

Youssef e Hofy (2008) classificam os processos de usinagem em processos tradicionais (convencionais) e não tradicionais (não convencionais). Os processos tradicionais englobam processos amplamente utilizados na produção industrial de produtos metálicos, sendo mais comuns o torneamento, fresamento e furação. A remoção de material por meio de abrasão também se enquadra como um processo tradicional, entretanto, se diferencia em relação ao tipo de ferramenta de corte utilizada e métodos operacionais.

A indústria da usinagem constitui um vasto conjunto de empresas especializadas (máquinas de usinagem, ferramentas e fluídos de corte, assim como as prestadoras do serviço de usinagem, entre outras). Segundo Tarvin (2016), é um dos segmentos de processamento que mais evoluiu desde sua criação, apresentando uma grande quantidade de processos, atendendo a uma infinidade de especificações e provendo cada vez mais velocidade de entrega de produtos, altos volumes de produção e qualidade em todos os aspectos, seja em precisão dimensional ou aspectos superficiais. A evolução constante do segmento acarreta às empresas envolvidas uma corrida competitiva, e quanto mais eficientes estas empresas trabalham, mais fortemente impactam o mercado.

A execução dos processos de usinagem pode apresentar níveis baixos ou consideráveis de inovação e tecnologia, abrangendo desde máquinas simples com operação exclusivamente manual, até avançados centros de usinagem com operação numérica computadorizada. A indústria 4.0 tem exigido adaptações deste segmento, onde cada vez mais objetiva-se a independência do processamento e tomada de decisão por meio de inteligência artificial, utilizando a troca de dados simultânea entre máquinas.

Os processos de usinagem tradicionais podem ser classificados em função da relação nível de automação empregada versus volume de produção. A usinagem

tradicional, com uso de tornos ou fresas mecânicas, sem o emprego de automação, é comumente empregada para fabricação, ou ajustes, de produtos produzidos em pequenas escalas, ou até mesmo, personalizados. Requer mão de obra especializada, ou experiente, para a operação do equipamento, sendo o tempo de processamento alto comparado com os processos automatizados.

Devido a maior eficiência, os processos automatizados atendem grandes volumes de produção, e/ou produtos com tolerância dimensional restrita. Estes processos incorrem em altos custos, tanto com equipamentos quanto operacionais, tendo em vista que requisitam mão de obra especializada não apenas para operação, mas inclusive, para programação de comandos computacionais para as operações e manutenção das máquinas-ferramenta. Devido a esta característica, a indústria da usinagem é composta por muitas empresas que investem em equipamentos e mão de obra qualificada, e ofertam para o mercado a manufatura de produtos. Estas empresas atendem, em sua grande maioria, médios ou altos volumes de produção.

Portanto, são empresas com um elevado nível tecnológico de manufatura, mas que não desenvolvem, desde a ideação, uma nova proposta de produto (na grande maioria das empresas). Este segmento, caracterizado quase em sua totalidade como B2B (*Business-to-business*), oferta o desenvolvimento e execução da manufatura dos projetos de produtos criados por outras organizações. Portanto, o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), que considera desde a fase de ideação de um novo produto, até a pós entrega, não se aplica para essa parte do segmento. Neste caso, o Desenvolvimento do Produto (DP) objetiva a manufatura, o que requer o desenvolvimento conjunto com o cliente. Este segmento não aposta em inovação de produtos, mas é dependente da inovação em processos. Esta particularidade, em relação ao DP realizado por empresas de usinagem, foi a primeira lacuna de pesquisa levantada. Partindo desta premissa, outra temática introdutória faz-se necessária: os modelos de PDP.

Os modelos de PDP, ou de Desenvolvimento de Novos Produtos (DNP), são metodologias estruturadas que descrevem as etapas e ações principais a serem executadas no desenvolvimento de produtos. Na presente pesquisa, quando o PDP é citado, considera-se tanto produtos, quanto processos e serviços. Watson e DeYong (2010) definem claramente a linha evolutiva dos principais modelos de DNP que surgiram desde a década de 1980, sendo o *Design for Six Sigma* (DFSS) considerado como a próxima evolução no desenvolvimento de produtos.

O DFSS é uma ramificação da metodologia Seis Sigma ( $6\sigma$ ) - *Six Sigma* (SS). O SS foi desenvolvido pela Motorola na década de 1980, que se popularizou em 1995 quando foi aplicado de maneira intensificada e com resultados significativos pela *General Electric*. É uma metodologia de implementação rigorosa, focada e altamente eficaz de princípios e técnicas de qualidade, objetivando o desempenho comercial livre de erros. O Sigma (letra grega “ $\sigma$ ”) indica a variabilidade em estatística de processos, na metodologia SS indica o padrão de desempenho com 3,4 problemas por milhão de oportunidades, um padrão de alta qualidade com baixa incidência de erros (PEPPER; SPEDDING, 2010, PYZDEK; KELLER, 2014, MUNRO; RAMU; ZRYMIK, 2015).

Uma das razões da metodologia ter atingido grande sucesso é a relativa facilidade da sua adoção pelas organizações quando comparada aos benefícios possíveis, apesar do grande conjunto de ferramentas e métodos estatísticos requeridos. A metodologia SS organiza-se em um processo simples que compreende as fases (DMAIC): *Define* (Definir) – *Measure* (Mensurar) – *Analyze* (Analisar) – *Improve* (Melhorar) – *Control* (Controlar). Outras definições sobre SS podem ser encontradas em Muralidhalan (2015), e exemplos da aplicação são listados em Pepper e Spedding (2010).

Segundo Yang e El-Haik (2003), apesar da metodologia SS ser abrangente, o enfoque principal é sobre a melhoria contínua de produtos e processos já existentes em uma organização. O DFSS surgiu da necessidade observada em função de muitos projetos serem gravemente comprometidos em suas fases avançadas de desenvolvimento, em função de erros nas fases iniciais, elevando consideravelmente os custos para a organização. Watson e DeYong (2010) definem: “O DFSS é um processo para definir, projetar e entregar produtos inovadores que agregam valor competitivo aos clientes atendendo as características críticas da qualidade, de todas as funções significativas.”

Visando relacionar o PDP com empresas de usinagem, por meio do DFSS, realizou-se um levantamento bibliográfico prévio, sobre DFSS, onde foi observado que o enfoque é comumente sobre ferramentas de apoio específicas utilizadas em cada fase da metodologia, revisões bibliográficas sobre a estrutura, ou sobre o relato de desenvolvimento de um produto específico utilizando conceitos do DFSS. Hu *et al.* (2019), por exemplo, utilizam a estrutura DFSS no desenvolvimento do processo de fabricação de engrenagens cônicas em espiral, detalhando as ferramentas aplicadas



em cada fase do desenvolvimento. De Mast, Diepstraten e Does (2011) aplicam as ferramentas da metodologia de DFSS com foco na melhoria do processo de soldagem de placas eletrônicas, semelhante ao estudo de Ferreira *et al.* (2014) no desenvolvimento de moldes para injeção de polímeros.

Os estudos sobre DFSS direcionados a usinagem não contemplam uma proposta clara sobre uma estrutura de DFSS para este segmento. Também se observa na literatura científica atual, que este modelo de DP não apresenta uniformidade de estrutura. Não são encontrados modelos genéricos de referência que possam ser adaptados a segmentos e produtos distintos, como os modelos de PDP (*Stage Gate*® de Cooper, 2008) por exemplo. Esta constatação caracteriza a segunda lacuna de pesquisa considerada.

Percebe-se que com a evolução dos modelos sistemáticos de DNP, estudos sobre abordagens genéricas foram sendo publicadas, principalmente com o direcionamento a segmentos específicos, como Bobrowski (2000), onde são descritas as características do desenvolvimento de produtos na indústria médica, Nwabueze e Law (2001) citam o desenvolvimento de produtos na indústria cervejeira, Shinno *et al.* (2002) relatam os fatores de sucesso para o desenvolvimento de máquinas ferramenta, Gmelin e Seuring (2014) propõe um framework sobre o desenvolvimento de produtos sustentáveis, De Massis *et al.* (2016) descrevem o desenvolvimento de produtos em empresas familiares e Sari e Asad (2019) descrevem o desenvolvimento de produtos na indústria da moda, entre outros.

Entende-se que o DFSS é uma evolução do PDP, uma abordagem recente, e que requer uma base genérica a ser empregada em diversos segmentos. Nesta pesquisa, portanto, as duas lacunas de pesquisa descritas anteriormente direcionam o um único problema de partida: a necessidade de, a partir de um modelo recente de PDP (o DFSS), estabelecer o processo de desenvolvimento de produtos metálicos usinados, realizado por empresas de usinagem com fornecimento de grandes volumes de produção. Considerando este problema de partida, no próximo tópico listam-se os objetivos geral e específicos da pesquisa.

## **1.1 Objetivo Geral**

Propor um modelo DFSS genérico para o desenvolvimento de processos de usinagem convencional, voltado para o planejamento e desenvolvimento de produtos metálicos com médio e alto volume de produção.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as estruturas existentes na literatura sobre a metodologia DFSS;
- Identificar as definições, objetivos, fases e respectivas atividades e ferramentas empregadas na metodologia DFSS;
- Elaborar teoricamente a estrutura de DFSS para usinagem;
- Analisar matematicamente o comportamento das relações estatísticas propostas para o modelo por meio de amostras simuladas;
- Analisar as relações estatísticas do modelo proposto utilizando dados de processos reais de usinagem;
- Validar o modelo teórico de DFSS para usinagem por meio da avaliação de profissionais com atuação direta no segmento;

## 1.3 Justificativa

A presente pesquisa contribui de maneira significativa para o desenvolvimento científico da área de Engenharia de Produção visto que, por meio de um vasto e sistematizado levantamento teórico, atrelado a pesquisa aplicada em um segmento industrial de relevância, propõe não somente uma melhoria conceitual sobre o tema, mas um método que contribui para a prática profissional da Engenharia de Produção, principalmente no desenvolvimento de novos produtos e processos de manufatura.

As duas grandes áreas consideradas nesta pesquisa, o desenvolvimento de produtos e a indústria da usinagem, apresentam notória importância na produção industrial. Bryson, Clark e Vanchan (2015) destacam a importância mundial da manufatura geral devido ao significativo crescimento econômico que muitos países têm alcançado por meio dela. Neste segmento, a indústria da usinagem está inserida, e segundo os autores, apesar do pequeno número de indústrias produtoras de máquina ferramenta e outros insumos diretos de usinagem, em comparação com as demais indústrias manufatureiras, é visível a aplicabilidade destas máquinas no setor de produção industrial, principalmente no segmento metalmeccânico.

No Brasil, segundo os dados estatísticos disponibilizados pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) (2020), a produção industrial corresponde a 21,2% do Produto Interno Bruto (PIB), ficando atrás apenas da prestação de serviços (52,4%). Os processos de usinagem de metais pertencem ao segmento metalúrgico, estando

entre os 10 segmentos mais representativos da indústria de transformação brasileira. A representatividade da usinagem e da importância do DNP neste segmento contemplam uma das justificativas da presente pesquisa.

A indústria da usinagem possui destaque entre as indústrias de fabricação no segmento mecânico, principalmente pelo avanço tecnológico alcançado em todas as suas vertentes (máquinas ferramenta, materiais para ferramentas de corte, fluídos de corte, precisão de processamento, variáveis de processo, etc.). Sendo assim, um dos maiores desafios do setor é o elevado número de variáveis que afetam o processo e, conseqüentemente, o controle e ajuste de maneira otimizada destes parâmetros. Esta pesquisa, portanto, contribui com a oferta de uma análise ampla destes parâmetros, sendo proposto um meio que favorece a elaboração e controle de soluções otimizadas.

Os estudos científicos direcionados a usinagem de produtos metálicos são, em sua grande maioria, realizados com elevada especificidade técnica em uma das vertentes do processo, ou do produto usinado, e não sobre características de gestão e controle de ações sobre o desenvolvimento do projeto de produto (processo). Na busca por artigos publicados sobre usinagem, quando se limita o resultado à área de gestão, a maioria dos estudos visa a análise dos impactos ambientais, assim como a eficiência energética do processamento, mas não sobre métodos de desenvolvimento do produto, ou do processo. Além da temática da presente tese e a abordagem ser inédita, pode ainda ser subsídio a estudos futuros relacionados a outras áreas já publicadas, como sustentabilidade, gestão de custos, modelagem e otimização de processos de manufatura.

Nota-se a escassez de estudos com viés em três aspectos principais: padronização na estrutura do DFSS (em relação às suas fases) e suas ferramentas na literatura, clareza sobre o direcionamento do DFSS para o segmento de usinagem de maneira generalizada, e o enfoque no DFSS como uma metodologia de DP que possui vínculo direto com o controle de qualidade.

São incontáveis os modelos que apresentam diferentes fases de desenvolvimento, e com um vasto grupo de ferramentas, o que torna complexa a busca por um padrão que melhor atenda o objetivo de cada projeto de produto, processo ou serviço. Neste mesmo contexto, percebe-se que a maioria dos estudos sobre DFSS são apresentados com enfoque nas características específicas de um

determinado produto, o que dificulta a tentativa de reaplicação do modelo em produtos semelhantes.

Um modelo que apresenta as generalidades utilizadas no DFSS pode ser efetivo como referência na implementação da metodologia por outras organizações. Desta maneira, a proposta de um modelo genérico voltado a um segmento, e não às especificidades de um único produto, e a conseqüente amplitude de alcance desta proposta, representam mais uma justificativa da pesquisa. Justifica-se, também, a importância da presente pesquisa em relação a tratativa do DFSS como uma metodologia de DNP ampla, que apresenta relação direta com o controle de qualidade, não somente em relação a característica final do produto, mas principalmente ao processo de desenvolvimento e sua gestão empregando índices de controle de qualidade.

A necessidade, tanto da área acadêmica como empresarial, de meios que simplifiquem a adoção de ferramentas de gestão que comprovadamente foram efetivas em grandes organizações representam mais um fator de justificativa desta pesquisa. Propostas como esta podem, inclusive, gerar novos meios de controle e gerenciamento não somente para o segmento em análise, como em segmentos correlatos. É importante ressaltar que a área principal de pesquisa abrangida é a de Engenharia de Produção, sendo assim, julgou-se relevante detalhar alguns elementos principais sobre o processo de usinagem que não seriam utilizados de maneira direta no resultado da pesquisa. Entende-se que a proposta é direcionada a um processo de fabricação específico, e apesar de muitas de suas características não impactarem diretamente no modelo de DP, afetam indiretamente e devem estar presentes no embasamento teórico por não se tratarem de temas comuns a área central do tema.

Outro ponto que reforça a justificativa do estudo, refere-se a importância da pesquisa em relação aos dados que foram buscados junto a organizações que compõe o segundo maior polo metal mecânico do Brasil, situado no estado do Rio Grande do Sul. Ficou evidente na fala dos entrevistados a importância de estudos que contribuam, de maneira simples, na estimativa de resultados que envolvem o desenvolvimento de novos produtos. De maneira unanime, os entrevistados indicaram que o maior índice de problemas é decorrente da não concordância entre plano e execução dos processos de usinagem, e a não previsibilidade de problemas de qualidade resultantes de variações aleatórias ao processo.

Por fim, identifica-se na proposta da pesquisa, potencialidades que contribuem no desenvolvimento de ferramentas inteligentes autônomas inéditas para a Indústria 4.0, direcionadas para o planejamento de processos assistido por computador, sendo estas apresentadas nas sugestões de estudos futuros.

Assim como a proposta da pesquisa apresenta abrangência em relação às suas contribuições, apresenta também fatores limitantes, os quais são apresentados na delimitação do tema no tópico a seguir.

#### **1.4 Delimitação do Tema**

A temática é concentrada no desenvolvimento de produtos usinados, com produção de médios a elevados volumes. Este tipo de desenvolvimento compõe o que Rozenfeld *et al.* (2010) define como Desenvolvimento Colaborativo de Produtos. O desenvolvimento colaborativo ocorre com a participação de clientes e/ou fornecedores no projeto de produto, englobando diversos níveis da cadeia de suprimentos.

O desenvolvimento de produtos usinados considerado nesta pesquisa é direcionado para fornecedores de serviços de usinagem, que em sua grande maioria, são fornecedores de segundo nível da cadeia de suprimentos. Segundo a classificação de Rozenfeld *et al.* (2010):

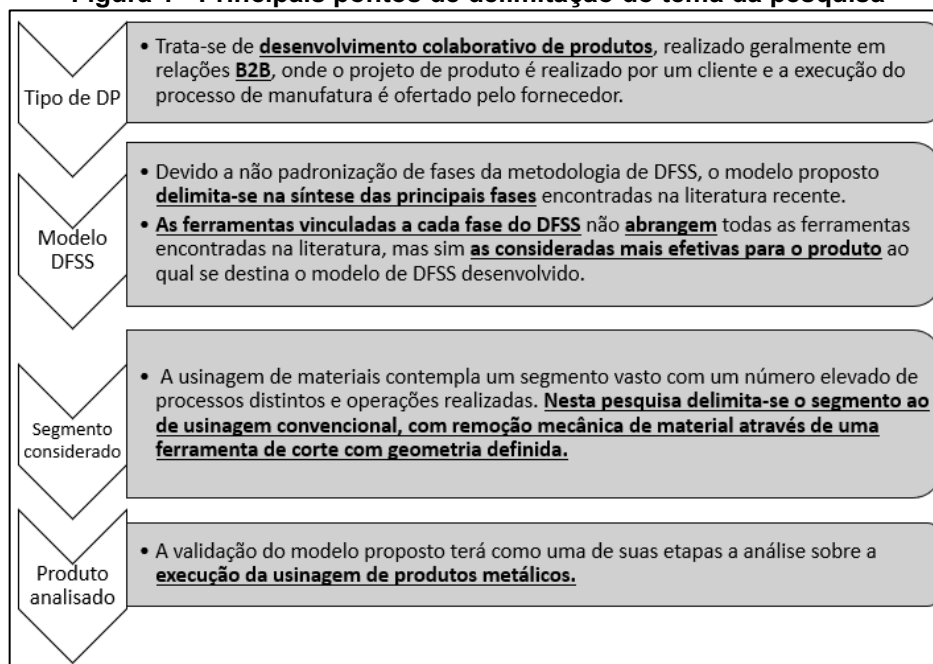
- Fornecedores de segundo nível: responsáveis pelo fornecimento de subsistemas ou componentes que compõe produtos de fornecedores de primeiro nível.
- Fornecedor de serviços: há prestadores de serviços de desenvolvimento e de serviços de manufatura, estando relacionados a este último caso, os serviços de usinagem.

Ainda segundo Rozenfeld *et al.* (2010), um fornecedor de serviços apresenta um alto nível de capacitação técnica, entretanto, possui uma relação limitada no processo de desenvolvimento do produto. Ou seja, os requisitos de produto são definidos pelo contratante do serviço, sendo desenvolvida a solução, podendo ou não, o fornecedor do serviço propor alterações visando principalmente a manufaturabilidade do produto.

Portanto, esta pesquisa se delimita em relação ao tipo de desenvolvimento de produto, ao segmento considerado, e ao tipo de modelo de DFSS proposto (Figura 1). Trata-se de uma proposta exclusiva a produtos metálicos usinados, decorrentes de

processos de usinagem convencional (com ferramentas de corte com geometria definida). Ainda sobre o processo de usinagem, foram consideradas para a fundamentação do estudo apenas as principais operações de usinagem (torneamento, fresamento e furação).

**Figura 1 - Principais pontos de delimitação do tema da pesquisa**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Também se ressalta que o modelo proposto foi avaliado e validado por meio da opinião de profissionais que atuam diretamente no desenvolvimento de produtos usinados, entretanto, não foi aplicado diretamente no desenvolvimento de um produto. A aplicabilidade direta em um desenvolvimento real foi inviabilizada visto a dependência da análise sobre a relação entre cliente e fornecedor que ocorre no desenvolvimento colaborativo de produtos do segmento considerado. Este tipo de relação é, na maioria das vezes, condicionada a segredo industrial entre os envolvidos, o que dificulta a abertura para pesquisas e divulgação destes dados. Além disso, na grande maioria dos desenvolvimentos colaborativos, são necessários longos períodos de desenvolvimento, o que poderia comprometer o prazo formal exigido para execução e finalização da presente pesquisa.

Entende-se, também, como uma limitação da pesquisa, o pequeno conjunto de profissionais que efetivamente participaram. Esta etapa ficou comprometida visto que ocorreu, quase que em sua totalidade, durante o período pandêmico ocasionado pela Covid-19. Muitas organizações enfrentaram momentos críticos em suas atividades e muitos profissionais sinalizaram como não sendo propícia a abertura

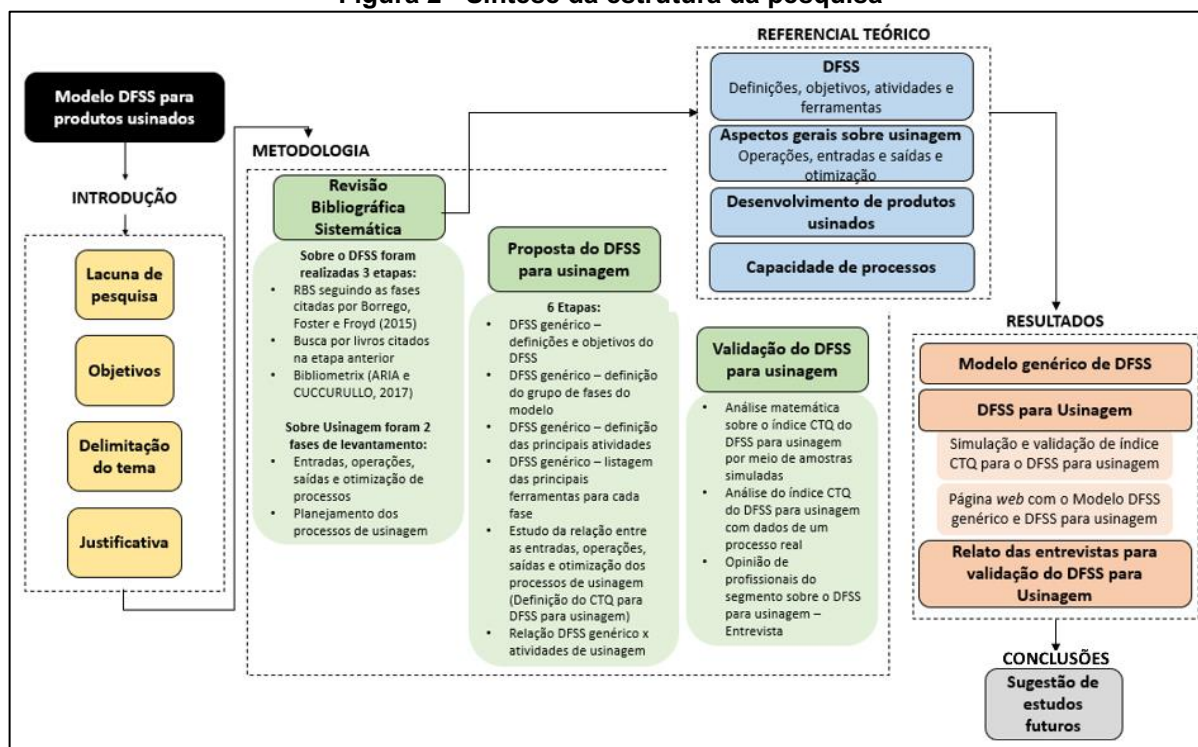
sobre informações internas devido à dificuldade enfrentada, e em muitos casos, a não operação da maior parte das atividades.

Considerando as delimitações expostas, a estrutura da pesquisa é apresentada, assim como a estrutura da tese, no próximo item.

## 1.5 Estrutura da Pesquisa

Objetivando fornecer uma visão ampla sobre os capítulos e os tópicos elaborados e a relação entre eles, a Figura 2 ilustra o mapa conceitual que sintetiza a estrutura da pesquisa. No Capítulo 1 são apresentadas a introdução e o problema de pesquisa, objetivos, justificativa e delimitação do tema. O Capítulo 2 abrange o referencial teórico da pesquisa, contanto com os principais assuntos que contemplam o tema (DFSS, Usinagem de metais, Desenvolvimento de Produtos Usinados e Capacidade de Processos), no Capítulo 3 é descrita a metodologia de pesquisa, Capítulo 4 são relatados os resultados e discussões da pesquisa, por fim no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas, assim como as propostas de estudos futuros relacionados ao tema. Referências e Apêndices são dispostos ao final do documento.

Figura 2 - Síntese da estrutura da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

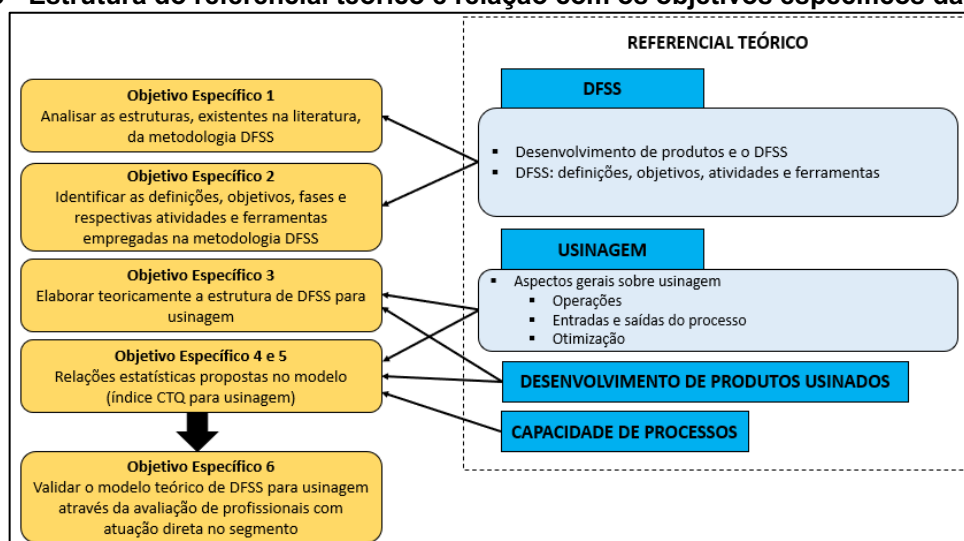
O referencial teórico elaborado foi obtido por meio de uma metodologia específica de busca, análise e síntese de resultados, a qual encontra-se detalhada no capítulo 3 sobre a metodologia.

São abordadas duas temáticas principais: DFSS e Usinagem. Primeiramente é descrita a relação entre o conceito de DFSS e o DNP objetivando identificar onde está situada a metodologia DFSS no contexto global de DP, assim como as similaridades e diferenças com os modelos conceituais sistêmicos. Este primeiro levantamento teórico foi publicado no artigo Dzulinski, Braghini e Chirolí (2022). Na sequência são abordadas as definições e objetivos, as fases estruturantes, atividades e as ferramentas aplicadas no DFSS.

Posteriormente, o tema usinagem é abordado considerando aspectos teóricos gerais sobre este tipo de processo de fabricação. Relatam-se os fatores que compõem as entradas, atividades de processo e saídas esperadas que possuem relação direta com o projeto de produtos usinados. A otimização nestes processos também é apresentada. Na sequência destina-se um tópico exclusivo ao desenvolvimento de produtos usinados, finalizando a revisão teórica com um tópico específico sobre capacidade de processos, visto que esta temática foi empregada para o desenvolvimento do modelo de DFSS.

A Figura 3 ilustra a relação da estrutura do referencial teórico com os objetivos específicos da pesquisa.

**Figura 3 - Estrutura do referencial teórico e relação com os objetivos específicos da pesquisa**



Fonte: Autoria própria (2022)



## 2.1 Desenvolvimento de Produtos e o DFSS

O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) ou, Desenvolvimento de Novos Produtos (DNP), é um conjunto de ações que ao longo dos anos se formalizou e tornou mais efetiva as atividades de desenvolvimento de novos produtos, serviços e processos por organizações de todos os segmentos. Pandey, Patwardhan e Rao (2019) realizaram um levantamento sobre os estudos em torno do DNP no período entre 1970 e 2010, e destacam que as pesquisas têm sugerido novas práticas, com técnicas e novos métodos direcionados aos novos produtos. A grande maioria das pesquisas foi realizada a partir da década de 1990, sendo destacado pelos autores que este aumento condizia com a procura das organizações por métodos que auxiliassem nas atividades de DNP com o início da referida década.

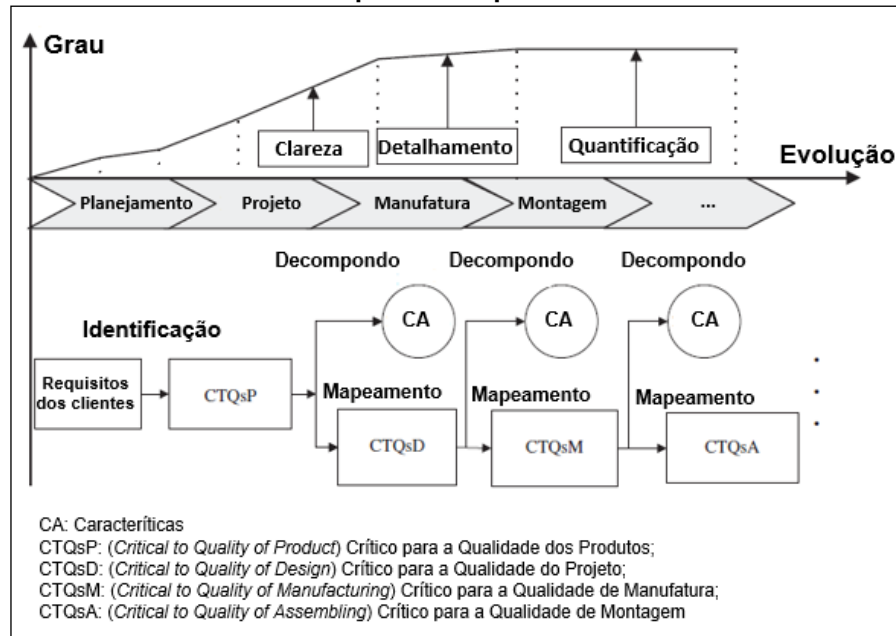
Baseando-se nas classes de modelos de DP descritos por Hasenkamp (2010), os modelos lineares convencionais de desenvolvimento, *Stage-Gate*® de Cooper (2008) por exemplo, (outros modelos teóricos são listados por Pandey, Patwardhan e Rao, 2019), enquadram-se como modelos descritivos e prescritivos baseados em um processo. Estes modelos, muito citados desde os anos 2000, possuem como característica etapas específicas de desenvolvimento de projetos de produto/serviços/processos, com um padrão de atividades a serem desenvolvidas em cada fase, necessitando ações de tomada de decisão na passagem de uma fase para outra (os *gates* citados no modelo *Stage-Gate*®, por exemplo).

O DFSS possui como diferencial a ênfase em um modelo prescritivo baseado em atributos que comumente faz uso de modelos computacionais para analisar as variações relacionadas aos parâmetros críticos de produto que afetam o desenvolvimento como um todo. Soma-se a estas características a análise estatística em torno do nível  $6\sigma$  de qualidade e suas variações. Sobre a abordagem do DFSS, Rozenfeld *et al.* (2010) afirma que o embasamento da metodologia se dá sobre a aplicação de ferramentas e métodos estatísticos avançados em relação a parâmetros críticos de projeto do produto e processo.

He, Tang e Chang (2010) diferenciam o processo de desenvolvimento convencional de produtos do DFSS em relação a definição, quantificação e controle dos requisitos envolvidos no desenvolvimento. Segundo os autores, o desenvolvimento de produtos/serviços envolve uma hierarquia de requisitos que interferem na qualidade final. Os requisitos dos clientes geram os requisitos dos

produtos/serviços, que levam a definição de requisitos de projeto os quais direcionam os requisitos de manufatura, montagem e execução. A Figura 4 ilustra esta diferença.

**Figura 4 - Comparação entre o processo convencional do PDP e o DFSS em relação aos requisitos de produto**



Fonte: He, Tang e Chan (2010)

De acordo com a modelagem de He, Tang e Chang (2010), a definição dos requisitos com a mensuração e controle do processo de desenvolvimento considerando-os desde as fases iniciais, garante maior confiabilidade no desenvolvimento. O processo convencional considera os parâmetros em sua totalidade em fases de detalhamento e não de planejamento, o que pode incorrer em altos custos para alterações de projeto decorrentes da identificação de erros tardiamente.

Outra importante diferença entre os processos convencionais e o DFSS é o fato de os requisitos de produto serem abordados de maneira a determinar os requisitos críticos ao desenvolvimento (no DFSS), essa medida faz com que as maiores ameaças sejam eliminadas, o que é impossível fazer se todos os requisitos forem considerados, ou se não houver uma análise coerente sobre os requisitos críticos ao produto e processo de desenvolvimento.

De Mast, Diepstraten e Does (2011) diferenciam o DFSS de um PDP regular em relação a maior ênfase na “manufaturabilidade”, confiabilidade e manutentabilidade. Para isso, possui como padrão o projeto robusto, tentativa de reduzir a complexidade para produtos e processos (o que reduz a probabilidade de

erros), maior enfoque na prevenção dos erros nas fases iniciais de projeto, e a grande importância atribuída aos estudos de viabilidade, revisões do projeto por especialistas, testes com protótipos, teste de confiabilidade e vida útil, estudos de capacidade (capabilidade) e de fluxo.

O DFSS, portanto, é uma metodologia direcionada ao desenvolvimento de novos produtos, serviços e processos, em que o principal diferencial está na busca do menor custo e maior qualidade, tratando de maneira preventiva eventos que prejudicam o desenvolvimento do projeto. É considerada uma abordagem sistemática que visa melhorar o projeto em termos de valor, qualidade, confiabilidade e custo para o cliente (YANG; EL-HAIK, 2003; JOU *et al.* 2010; AGUSTIADY, CUDNEY, 2016). Segundo Yang e El-Haik (2003) o principal objetivo do DFSS é projetar corretamente uma única vez, de maneira que sejam evitados erros e perdas no decorrer do desenvolvimento do projeto. O termo “seis sigma” vinculado o desenvolvimento de produtos refere-se ao nível no qual as vulnerabilidades de projeto não são efetivas ou são mínimas. O próximo tópico aborda detalhadamente essa metodologia, descrevendo suas definições e objetivos, os conjuntos de fases, atividades e ferramentas empregadas.

## **2.2 DFSS: definições e objetivos, atividades e ferramentas**

Esse tópico foi construído apoiado pelos resultados obtidos por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). A metodologia da RBS é descrita no capítulo 3, referente a metodologia, sendo a lista com os resultados da RBS disposta no Apêndice A.

Primeiramente, foram listadas as definições presentes na literatura e/ou os objetivos do DFSS. O Quadro 1 sintetiza as definições e objetivos encontrados. Foram listados apenas os resultados onde constatou-se uma definição explícita sobre DFSS, ou uma definição clara sobre o objetivo desta metodologia. Demais resultados fizeram uso do DFSS mas não o definiram, ou não descreveram o objetivo, tratando detalhadamente somente as etapas, ferramentas ou métodos vinculados (matemáticos, estatísticos, etc.).

**Quadro 1 - Síntese de definições sobre DFSS encontradas na literatura científica no período entre os anos de 2009 e 2019**

Referência	Definição ou objetivo do DFSS
Awad <i>et al.</i> (2009)	É a tradução da voz do cliente empregando métricas de engenharia. Por meio destas métricas os projetos são otimizados utilizando ferramentas estatísticas. A otimização é realizada considerando metas e reduzindo as variações em torno do cumprimento destas.
Aggogeri, Mazzola e O'Kane (2009)	O DFSS visa a obtenção de uma saída (produto/serviço) que atenda exatamente o desejo do cliente, removendo todas as fontes de potenciais defeitos, reduzindo atividades no processo que não agregam valor. "Desenvolver de maneira certa, logo na primeira vez". O foco do DFSS é criar um novo valor onde são consideradas as necessidades dos clientes, fornecedores e da organização.
Hasenkamp (2010)	O objetivo do DFSS é melhorar o desempenho e o resultado do desenvolvimento de produtos.
He, Tang e Chang (2010)	O DFSS é uma integração de métodos preventivos aplicados nos estágios iniciais de planejamento de projetos de produtos, processos e serviços.
Watson, DeYong (2010)	É um processo para definir, projetar e entregar produtos inovadores que forneçam de maneira competitiva valor aos clientes de uma maneira que atinja as características críticas à qualidade de todas as funções significativas.
Baril, Yacout e Clément (2011)	É uma abordagem poderosa para projetar produtos, processos e serviços de uma maneira econômica e simples atendendo às necessidades e expectativas do cliente. Os dois objetivos do DFSS referem-se a ações para manter o desempenho dentro de limites aceitáveis, consistentemente (confiabilidade) e a busca pela redução da variação de desempenho aumentando a robustez.
Meng <i>et al.</i> (2011)	O DFSS é um método efetivo de melhoria de qualidade em projetos e redução da incerteza na qualidade do produto.
De Mast, Diepstraten e Does (2011)	O DFSS é definido como a adaptação da metodologia SS, considerada como uma ferramenta de planejamento de qualidade, para o desenvolvimento de produtos e processos.
Koziołek e Derlukiewicz (2012)	O DFSS é um mecanismo poderoso e complexo que pode ajudar a maximizar o sucesso no mercado de um novo produto ou tecnologia. Adota uma abordagem analítica ao projeto do produto, empregando ferramentas estatísticas para analisar parâmetros críticos.
Bertelli e Loureiro (2015)	É um método de DP que atinge o nível de qualidade desejado pelo cliente utilizando a identificação e otimização de parâmetros críticos do projeto. O objetivo do DFSS é viabilizar a redução e otimização dos custos, e projetar um produto em níveis Seis Sigma.
Ericsson, Gingnell e Lilliesköld (2015)	O objetivo da adoção do conceito de DFSS é implementar um processo de DP inovativo para desenvolver os produtos que o cliente deseja, podendo ser reutilizadas soluções técnicas.
Ericsson <i>et al.</i> (2015)	O DFSS tem como objetivo verificar a robustez dos produtos recém-desenvolvidos para atingir um nível de seis sigma na produção, mantendo um forte foco no cliente.
Wang, Yeh e Chu (2016)	O DFSS é usado para converter as expectativas do cliente em requisitos de projeto, selecionar e implementar as alternativas mais eficazes de projeto e verificar se os novos produtos atendem aos padrões do ambiente para o qual foram projetados.
Awad e Shanshal (2017)	A metodologia DFSS é uma abordagem científica para traduzir a voz do cliente em métricas de engenharia. Essas métricas de engenharia são atendidas utilizando ferramentas estatísticas, desta forma fornecendo projetos otimizados.

Liverani <i>et al.</i> (2019)	O DFSS visa atender melhor às demandas e expectativas dos clientes, minimizando os defeitos e contradições encontrados nos produtos e no mercado, concentrando-se no entendimento completo das necessidades dos clientes, para obter um novo produto que seja mais satisfatório e inovador.
Shojaie e Kahedi (2019)	O DFSS é um método poderoso de desenvolvimento de produtos, processos e serviços, com objetivo de atender as necessidades e expectativas dos clientes, reduzindo de maneira significativa os custos. Para isso, faz uso de ferramentas estatísticas para prever os arranjos necessários, simplificando o projeto com a eliminação de etapas inúteis ou inadequadas.
Hu <i>et al.</i> (2019)	O DFSS é uma metodologia de melhores práticas em projeto que permite a identificação e mitigação precoce dos riscos no processo de desenvolvimento do produto.

Fonte: Autoria própria (2022)

Com base nas definições apresentadas, nesta pesquisa sugere-se o conceito e o objetivo do DFSS como: Uma metodologia com enfoque no desenvolvimento otimizado de produtos, processos e serviços, que considera de maneira sistematizada e quantificada, utilizando ferramentas matemáticas e de qualidade, os requisitos críticos de projeto fundamentados nas expectativas dos clientes.

O DFSS, assim como o SS, possui fases claramente definidas de execução. Agustiady e Cudney (2016) citam 6 fases (DIDOVIM). Entretanto, na literatura não há uniformidade em relação as fases, Brue e Launsby (2003) por exemplo, citam duas versões, a primeira denominada PIDOV e a segunda DMADV. Watson e DeYong (2010) expõem as definições sobre DFSS presentes em estudos no período entre os anos de 2000 e 2008, onde destaca a não padronização das fases de execução. Apesar desta inconsistência em relação ao padrão de nomenclatura, nota-se que as ações executadas em todo o ciclo de desenvolvimento seguem uma sequência de atividades que objetivam atender as métricas de CTQ (*Critical to Quality* – Crítico para Qualidade), no próximo tópico estas fases são apresentadas.

### 2.2.1 Fases de desenvolvimento do DFSS

Tendo em vista a variabilidade em relação as fases consideradas no desenvolvimento do DFSS, buscou-se por meio dos resultados obtidos na RBS, listá-las (Quadro 2).

**Quadro 2 - DFSS consideradas em artigos científicos atuais**

Fases Consideradas no DFSS	Referências	Frequência
DMADV: <i>Define</i> (Definir), <i>Measure</i> (Mensurar), <i>Analyse</i> (Analisar), <i>Design</i> (Projetar) and <i>Verify</i> (Verificar)	Aggogeri, Mazzola e O'Kane (2009); Wang, Yeh e Chu (2016); Hu <i>et al.</i> (2019); Liverani <i>et al.</i> (2019); Frizziero, Liverani e Nannini (2019)	4

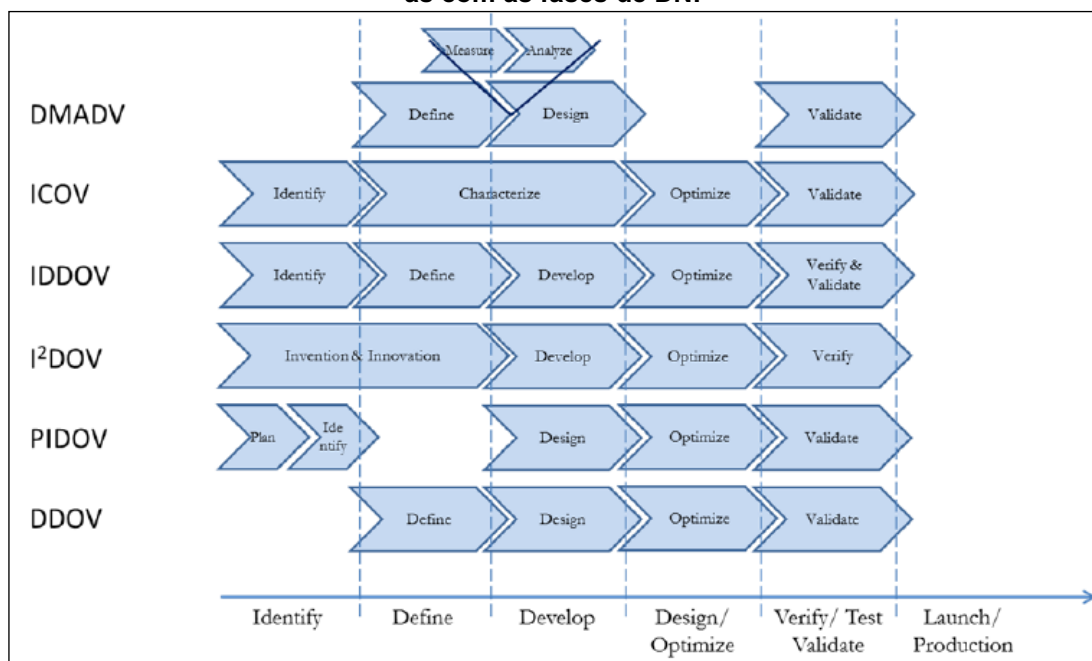
IDOV: <i>Identify</i> (Identificar); <i>Define</i> (Definir), <i>Optimise</i> (Otimizar), <i>Verify</i> (Verificar)	He, Tang e Chang (2010); Baril, Yacout e Clément (2011); Kim <i>et al.</i> (2012); Jahanzaib, Jamil e Akhtar (2013);	4
DCOV: <i>Define</i> (Definir), <i>Characterize</i> (Caracterizar), <i>Optimise</i> (Otimizar), <i>Verify</i> (Verificar)	Awad <i>et al.</i> (2009); Awad e Shanshal (2017)	2
IDDOV: <i>Identify</i> (Identificar); <i>Define</i> (Definir), <i>Design</i> (Projetar); <i>Optimise</i> (Otimizar), <i>Verify</i> (Verificar)	Wu <i>et al.</i> (2011); Wang e Hwang (2019)	2
ICOV: <i>Identify</i> (Identificar), <i>Characterize</i> (Caracterizar), <i>Optimise</i> (Otimizar), <i>Verify</i> (Verificar)	Koziołek e Derlukiewicz (2012); Shojaie e Kahedi (2019)	2
DMAIC: <i>Define</i> (Definir), <i>Measure</i> (Mensurar), <i>Analysis</i> (Analisar), <i>Improve</i> (Melhorar), <i>Control</i> (Controlar) – etapas do SS adaptadas ao DP	Meng <i>et al.</i> (2011)	1
DIDOV: <i>Define</i> (Definir); <i>Identify</i> (Identificar); <i>Design</i> (Projetar); <i>Optimise</i> (Otimizar), <i>Verify</i> (Verificar)	De Mast, Diepstraten e Does (2011)	1
Fases de PDP convencionais adaptadas às ferramentas de DFSS: Planejamento, Projeto Conceitual e Projeto Detalhado	Hasenkamp (2010)	1
Os autores citam que o DFSS se aplica nas fases de Pesquisa e Desenvolvimento de novos produtos, sendo que as principais atividades executadas são: Criar medidas específicas de controle dos novos produtos; entender a funcionalidade do sistema; identificar os requisitos de projeto e variação de parâmetros; prever e otimizar, analisar as ferramentas de qualidade que melhor otimizam o projeto.	Bertelli e Loureiro (2015)	1

Fonte: Autoria própria (2022)

No artigo de Watson e DeYong (2010) são listadas definições de DFSS e a estrutura de fases de outros estudos, anteriores aos considerados na presente pesquisa (publicações anteriores a 2008). Destaca-se a relação que os autores fazem entre o DP e a ferramenta de qualidade, Ciclo de Deming ou Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act* – Planejar, Executar, Verificar e Agir).

Ericsson (2013) apresenta uma análise das diferentes estruturas de DFSS e as compara com estruturas de DNP (Figura 5). A autora conclui, apoiando-se nos resultados de uma consulta a empresas de diferentes segmentos, que o DFSS é adaptado a realidade e necessidade de cada organização, não sendo viável um padrão único de estrutura, e sim um modelo genérico que possa ser reestruturado.

**Figura 5 - Diagrama representativo para análise de diversas estruturas de DFSS comparando-as com as fases de DNP**



Fonte: Ericsson (2013)

Cada fase do DFSS, independente do conjunto de fases empregado, apresenta um conjunto específico de atividades. O próximo tópico destina-se a descrição das principais atividades do DFSS.

### 2.2.2 Atividades do DFSS

Devido a não uniformidade entre as fases do DFSS e as respectivas atividades realizadas encontradas nos estudos, buscou-se primeiramente listar as principais atividades de DFSS utilizando três classificações em função de estágios de desenvolvimento de produtos, embasado na classificação de Ericsson (2013): atividades de início, atividades intermediárias e atividades finais. As atividades principais foram classificadas por meio de análise crítica, visto que ao todo foram levantadas 135 atividades, descritas em totalidade no Apêndice B.

As atividades de início consideram a definição de requisitos sobre o projeto. Comparando a metodologia DFSS com o PDP, é a fase em que o projeto passa da fase de “*Fuzzy Front End (FFE)*” e começa a ter recursos empregados para o efetivo desenvolvimento do projeto. O principal recurso empregado refere-se à disponibilização de mão-de-obra a qual formará a equipe responsável por todo o desenvolvimento. O estudo de mercado amplo, planejamento estratégico do projeto,

definição dos objetivos principais, e o mapeamento das etapas do projeto também são consideradas.

Incluem-se atividades destinadas a identificação das expectativas do público-alvo e a determinação dos requisitos de cliente, e com base nestes fatores definem-se os requisitos técnicos necessários. A quantidade de requisitos de cliente e técnicos pode ser elevada, exigindo a identificação dos requisitos críticos, ou seja, os CTQ, atividade diferencial no DFSS em relação aos modelos sistêmicos de PDP.

As atividades de DFSS consideradas como intermediárias em relação ao DP incluem a estruturação técnica do produto, processo ou serviço de acordo com os requisitos levantados na etapa inicial. Relacionando as atividades desta fase com as atividades de modelos de PDP convencionais, nesta etapa considera-se a execução do projeto detalhado. As diferenças observadas nos variados modelos de DFSS referem-se a amplitude de execução e testes do projeto. Nesta etapa também são realizadas as previsões de capacidade do processo de produção. Também são analisadas se as configurações do projeto favorecem o atendimento do nível sigma desejado. A variabilidade do processo é verificada, objetivando diminuí-la e assim direcionar o projeto para a característica robusta de desenvolvimento.

As atividades de DFSS, relacionadas a etapa final do DP, compreendem a análise, empregando testes físicos e com protótipos, se o que foi desenvolvido atende o que foi definido pela VOC (*Voice of Customer* – Voz do Cliente), e validar. É nesta etapa que o plano de implementação e o *ramp-up* de produção são executados, sendo entregue a equipe de produção a responsabilidade para execução do produto. A síntese das atividades em função de cada estágio é apresentada no Quadro 3.

**Quadro 3 - Classificação das principais atividades de DFSS de acordo com três estágios de DP**

<b>Estágios</b>	<b>Atividades de DFSS</b>
Atividades Iniciais	Definição da equipe de projeto
	Comprometimento da equipe e alta gerência
	Seleção do projeto
	Plano de comunicação sobre o projeto;
	Identificação dos <i>stakeholders</i>
	Treinamentos
	Definição do sistema de gerenciamento do projeto
	Plano de vários níveis (organizacional)
	Identificar mercado potencial e mercado alvo;
	Análise de concorrência
	Análise do histórico de projetos semelhantes
	<i>Benchmarking</i>
	Definição de metas e cronogramas
	Definir estrutura de projeto



	Levantar recursos
	Estudo de viabilidade técnica e econômica
	Elaborar o <i>Project Charter</i> , mapeamento do processo de desenvolvimento do projeto
	Estimar riscos
	Definir controles do projeto
	Identificar, entender e priorizar os requisitos de clientes
	Identificar requisitos da organização, ambientais, regulamentadores, etc.
	Estabelecer os CTQ
	Criar indicadores
	Projeto preliminar de compras e manufatura
	Definir os pontos críticos de produtos baseado em falhas previstas
	Determinar o nível sigma pretendido
	Selecionar o projeto conceitual
	Atividades Intermediárias
Quantificar as funções transferência que envolvem os requisitos	
Estabelecer os limites de controle e tolerâncias	
Prever as possíveis falhas (ruídos) do processo	
Realizar o projeto detalhado da produção	
Prever a performance do processo	
Refinar a capacidade de processo	
Desenvolver o plano de controle	
Definir os indicadores de desempenho	
Projetar os testes e protótipos	
Elaborar instruções de trabalho	
Projetar instalações	
Análise das especificações	
Especificar o projeto nominal	
Desenvolvimento do projeto robusto, com minimização da sensibilidade	
Aplicar EVOP	
Atualizar os CTQ	
Atualizar o MSA e os parâmetros de capacidade	
Atualizar os indicadores	
Atividades Finais	Levantar e ranquear as principais variações encontradas
	Validação do produto, processo, serviço
	Condução do MSA
	Implementação do CEP
	Definição e implementação do plano de controle
	Desenvolvimento de planos de manutenção
	Desenvolvimento de "Provas de Erros"
Gerenciamento de riscos	

**Fonte: Autoria própria (2022)**

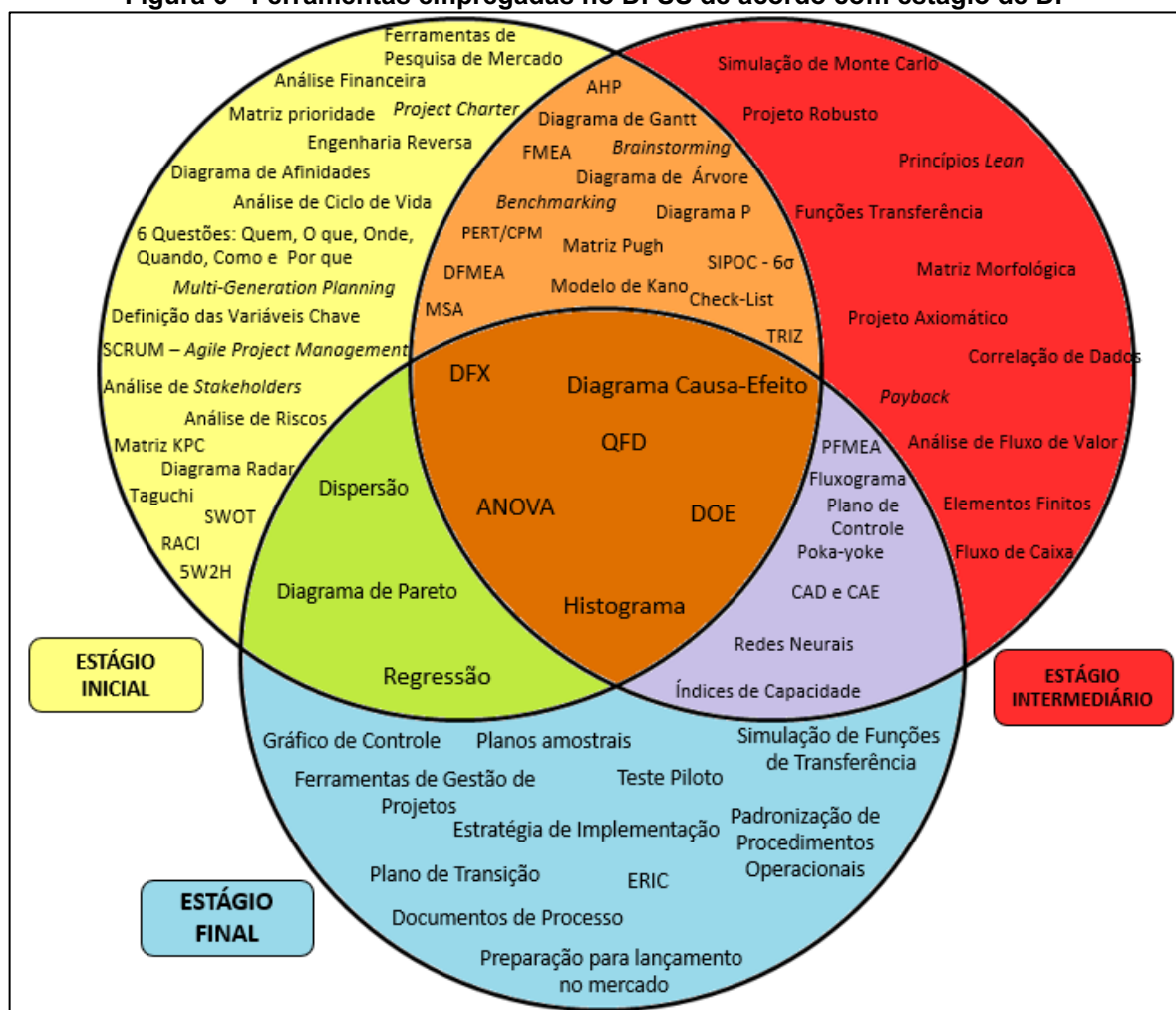
Após a listagem completa das atividades, foram analisadas as ferramentas empregadas no DFSS.

### 2.2.3 Ferramentas empregadas no DFSS

Assim como no levantamento das atividades, as ferramentas aplicadas no DFSS foram identificadas e classificadas inicialmente em relação ao estágio de desenvolvimento do produto em que foram aplicadas. Ao todo foram identificadas 72 ferramentas, sendo que em muitos casos uma mesma ferramenta é aplicada em mais

de um estágio de desenvolvimento. O diagrama da Figura 6 apresenta o conjunto completo de ferramentas aplicadas no DFSS, classificadas em função dos estágios de DP, destacando àquelas que estavam vinculadas a mais de um estágio.

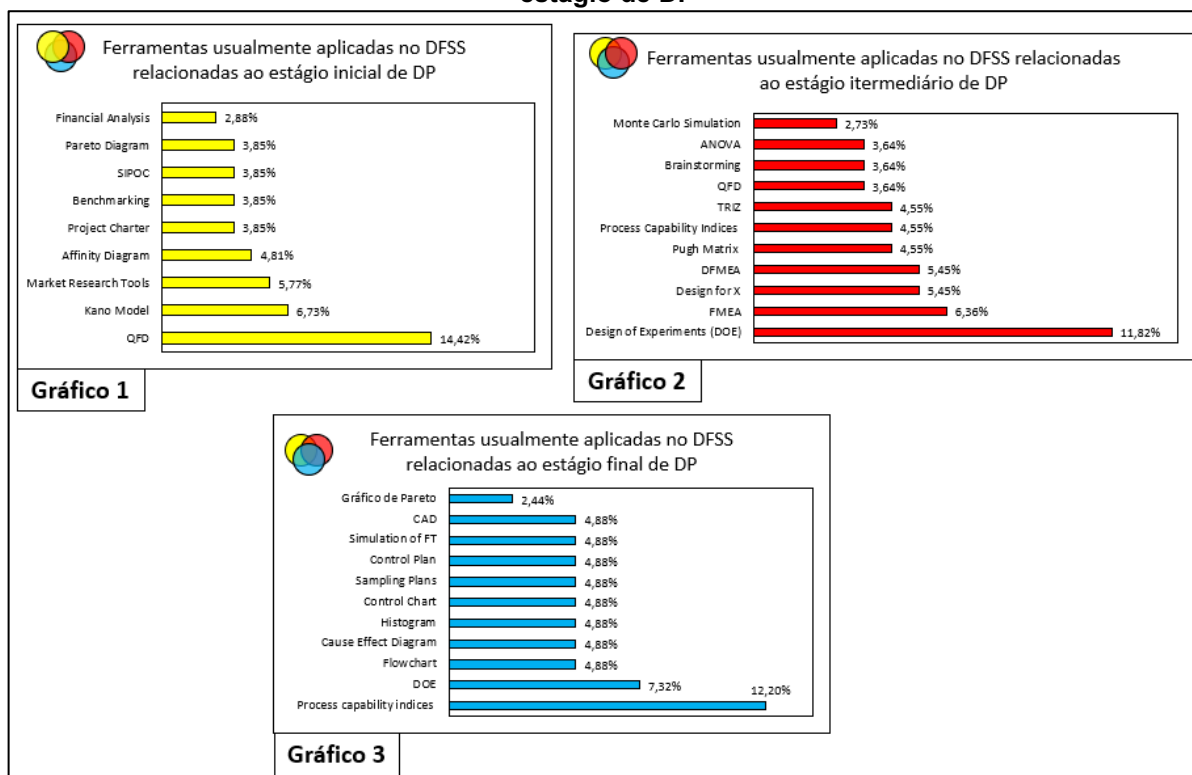
**Figura 6 - Ferramentas empregadas no DFSS de acordo com estágio de DP**



Fonte: Autoria própria (2022)

Foram analisadas quais eram as ferramentas mais empregadas em cada estágio do DP, sendo a frequência representada pelos gráficos 1, 2 e 3 (Figura 7). A lista completa com todas as ferramentas direcionadas a cada fase do DFSS é apresentada no Apêndice C. Dentre todas as ferramentas, as que apresentaram maior frequência de citação foram o QFD, DOE e FMEA.

**Figura 7 - Percentual de citações das ferramentas empregadas no DFSS de acordo com o estágio de DP**



Fonte: Autoria própria (2022)

É importante citar o estudo de revisão publicado por Francisco, Canciglieri Junior e Sant'Anna (2020), onde os autores também apresentam uma vasta revisão sobre o DFSS, contemplando uma análise sobre as atividades e ferramentas empregadas. Entretanto, não foi utilizado na revisão desta pesquisa visto que sua publicação é posterior ao período de levantamento das referências consideradas. Todavia, após analisar os dados apresentados pelos autores, nota-se que há congruência sobre os apontamentos entre esta e a citada pesquisa, podendo considerar os estudos complementares em relação a diferença na proposta de um modelo genérico de DFSS e algumas discussões apresentadas. Além disso, o método empregado pelos autores resultou em dados diferentes (contando com muitos dados em comum) aos que foram abordados na presente pesquisa, e assim, constituem também conclusões com particularidades.

Findado o embasamento teórico sobre o DFSS, suas principais atividades e ferramentas, buscou-se a construção teórica sobre os processos de usinagem, tema do próximo tópico.

### 2.3 Aspectos gerais sobre os processos de usinagem

Os processos de fabricação fazem parte do contexto geral da manufatura de produtos. Segundo Groover (2016) a manufatura pode ser definida com conotações tecnológica e econômica. Segundo Singh (2006), a manufatura envolve o estudo dos processos necessários para fabricação de peças e montagem de conjuntos, analisando e otimizando parâmetros para aumentar a produção e melhorar sua eficiência. Para o autor, os processos de fabricação englobam a modificação de materiais e produtos, não incluindo transporte, manuseio, ou armazenamento dos produtos.

Em função das inúmeras mudanças necessárias e requeridas em materiais diversos (polímeros, metais, cerâmicos e madeira) para a produção de produtos, é vasta a quantidade de processos disponíveis. No Quadro 4 lista-se a classificação dos principais processos de fabricação, estando inclusa a usinagem.

**Quadro 4 - Classificação dos principais processos de fabricação segundo diversos autores**

Tipo de Operação		Processo de Fabricação
Segundo Singh (2006)		
Processos Primários		Fundição
		Metalurgia do Pó
		Tecnologia de plásticos
		Corte a gás
		Processos de corte
		Forjamento
Processos secundários		Operações de usinagem convencional: Torneamento, Rosqueamento, Fresamento, Furação, Entalhe, Serrar, Brochagem, Retificação, Corte de engrenagens, Corte de rosca.
		Processos de usinagem não convencionais: usinagem com máquinas-ferramentas de Controle Numérico (CN) ou Controle Numérico Computadorizado (CNC) e processos de eletroerosão, corte a laser, usinagem com ferramentas sem geometria definida, etc.
Segundo Swift e Booker (2014)		
Processos Primários	Fundição e Moldagem	Molde permanente
		Modelo permanente
		Molde e modelo descartável
	Conformação	Chapa
		Volume
		Processamento com pó
Processos secundários	Tratamentos de massa quente	Tratamentos de volume (amolecimento, endurecimento e estabilização)

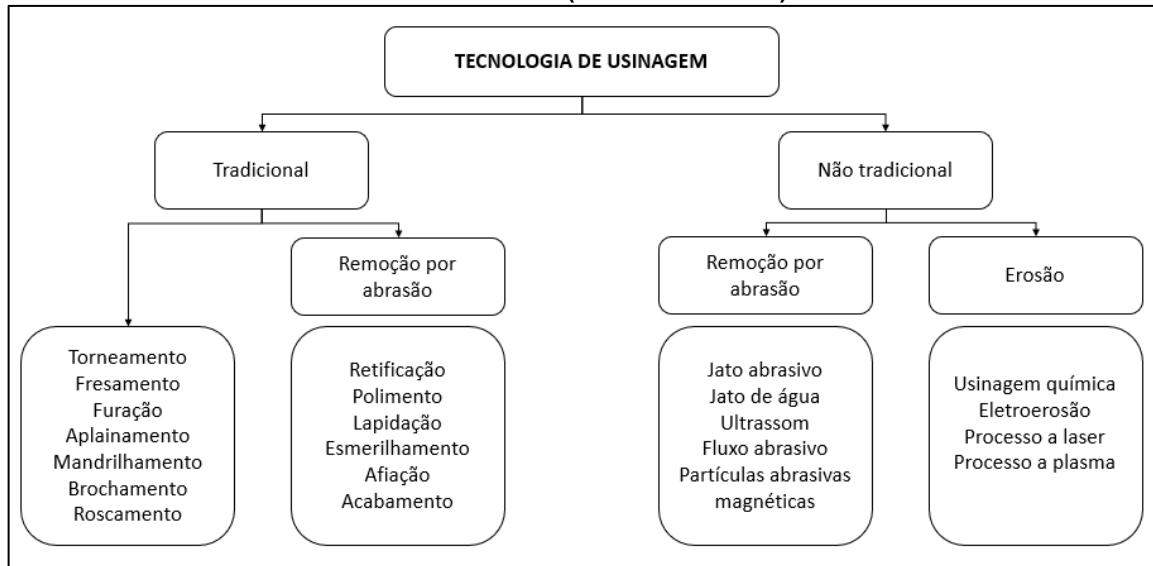
Tipo de Operação		Processo de Fabricação
	Processos de remoção de materiais	Jato (água e abrasivos)
		Elétrica e química
		Usinagem convencional (geometria definida, não definida, retificação, lapidação)
		Por feixe de alta energia (laser e plasma)
		Usinagem ultrassônica
	Tratamento de superfícies	Revestimentos
		Tratamentos mecânicos
		Termoquímicos
Térmicos		
Processos de montagem/teste	Processos de União	Soldagem
		Soldagem fraca e brasagem
		Fixação mecânica
		Fixação adesiva
	Sistemas de montagem	Sistema manual
		Sistema flexível
		Sistema dedicado
	Processos de teste	Medição
		Inspeção
		Teste funcional
Segundo Groover (2016)		
Processamento de materiais	Mudança de forma	Processos de solidificação – Fundição
		Processamento de particulados
		Processos de conformação
		Processos de remoção de materiais - Usinagem
	Aprimoramento de propriedades	Processos de tratamento térmico
Modificação de superfícies	Processos de limpeza e tratamento de superfícies	
	Processos de deposição e revestimento	
Operações de montagem	União permanente	Soldagem
		Brasagem
		União adesiva
	União por fixação mecânica	União por parafusos
		União por fixação mecânica permanente

**Fonte: Autoria própria (2022)**

O processo de usinagem é, portanto, um processo de remoção de material, considerado um processo secundário de manufatura, o qual realiza as modificações em um material que passou por um processamento primário (fundição, conformação, etc.). A usinagem pode ser subclassificada em função do tipo de processamento de remoção do material (processos convencionais e não convencionais, (Figura 8) ou em

relação ao tipo de ferramenta que executa a remoção do material (ferramentas com geometria definida e não definida).

**Figura 8 - Classificação dos processos de usinagem convencionais (tradicionais) e não convencionais (não tradicionais)**



Fonte: Adaptado de Youssef e Hofy (2008)

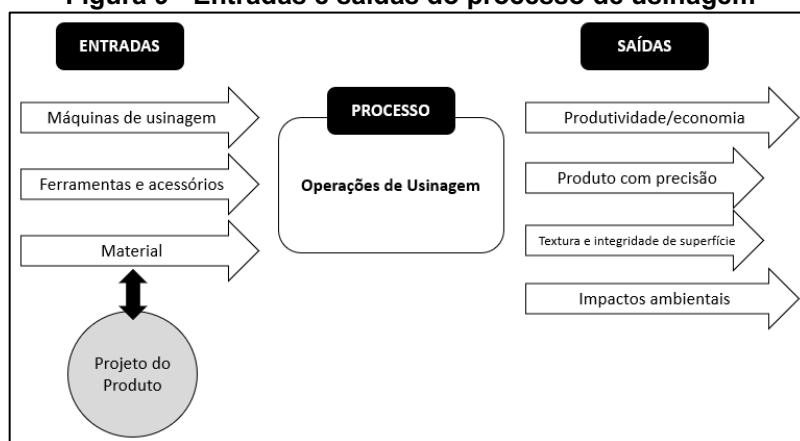
O foco desta pesquisa são os processos tradicionais de usinagem que apresentam remoção mecânica de material utilizando ferramentas de corte com geometria definida. O estudo destes processos, segundo Crowson (2006), abrangem 6 elementos principais:

- a) Características da peça: material, geometria, dureza, etc.;
- b) Ferramentas de corte: material, geometria;
- c) Características de corte: velocidade de corte, avanço, etc.;
- d) Elementos de fixação da peça e ferramenta de corte;
- e) Fluidos de corte;
- f) Características de máquina.

Os processos de usinagem, assim como todo processo, podem ser analisados em relação a entradas e saídas esperadas. Youssef e Hofy (2008) relacionam estas entradas e saídas dos processos de usinagem de acordo com a Figura 9.

As entradas dos processos impactam nas operações de usinagem realizadas. São enfatizadas nesta pesquisa as três principais operações de usinagem convencional (torneamento, furação e fresamento), as quais são caracterizadas no próximo tópico.

**Figura 9 - Entradas e saídas do processo de usinagem**



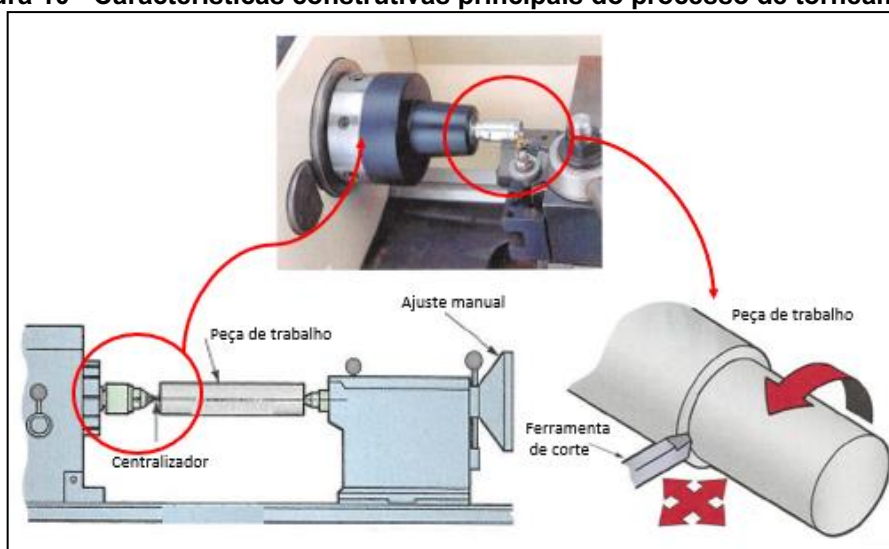
Fonte: Adaptado de Youssef e Hofy (2008)

### 2.3.1 Operações de torneamento

Operações de torneamento são executadas por tornos onde a peça executa movimento de giro em torno de seu próprio eixo, enquanto a ferramenta de corte executa movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal. O torneamento pode ser cilíndrico externo e interno, cônico externo e interno, faceamento, perfilamento, sangramento e recartilhamento (MACHADO *et al.*, 2015).

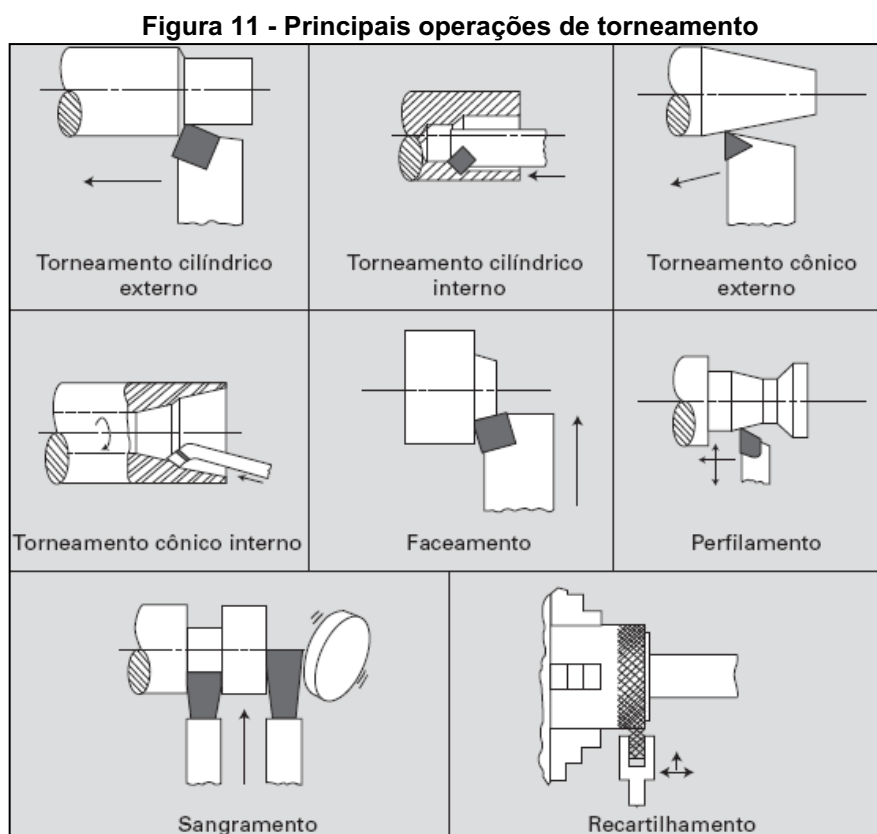
O torneamento pode ser realizado por diversos tipos de máquinas ferramenta, entretanto, o princípio básico do processo é comum independentemente do tipo de máquina. A estrutura para o processo conta com o suporte de fixação da peça, o porta ferramentas, a ferramenta de corte, e o sistema de movimentação da ferramenta, sendo que a peça é rotacionada em velocidades reguláveis (Figura 10).

**Figura 10 - Características construtivas principais do processo de torneamento**



Fonte: Adaptado de Walker e Dixon (2019)

As operações de usinagem referem-se ao tipo e objetivo do movimento executado pela ferramenta de corte, ou peça, ou ambos. Segundo Machado *et al.* (2015), todas as operações de usinagem podem ser subdivididas em operações de desbaste ou de acabamento. Em operações de desbaste há uma elevada taxa de remoção de material, no acabamento o objetivo é obter qualidade superficial na peça usinada. As principais operações de torneamento são representadas na Figura 11.



Fonte: Machado *et al.* (2015)

A sequência de operações é definida de acordo com o projeto do processo de usinagem e é fator de grande impacto na otimização do processo, devido ao tempo relacionado não somente a execução de cada operação, mas principalmente em função das trocas de ferramental.

De acordo com Davim (2011) operações de torneamento possuem dois movimentos básicos: o movimento primário de rotação da peça de trabalho em torno do eixo, e o movimento secundário translacional da ferramenta (movimento de avanço). As operações de torneamento podem ser realizadas internamente na abertura de furos (torneamento interno). Estas operações geralmente iniciam por um



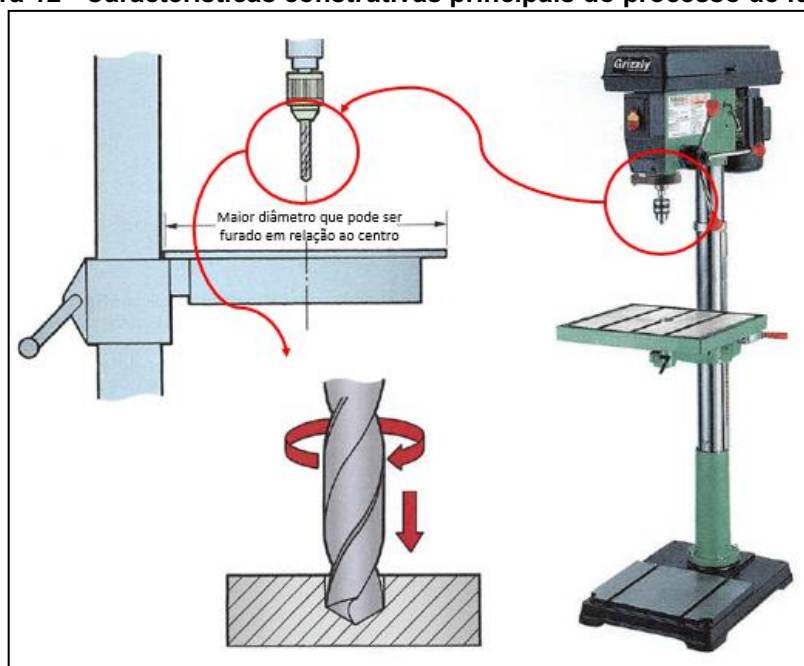
furo realizado com broca e posteriormente se usa o furo para melhorar suas características geométricas e superficiais.

### 2.3.2 Operações de furação

Operações de furação podem ser realizadas por furadeiras, ou inseridas em outros processos (torneamento, fresamento). A ferramenta de corte gira em torno de seu próprio eixo e realiza movimento de avanço em operações realizadas por furadeiras, ou podem ocorrer com a ferramenta estática com rotação da peça de trabalho (operações em torno). As operações de furação incluem furação com pré-furo, escalonada, de centro, alargamento cilíndrico e cônico, rebaixamento e trepanação (MACHADO, *et al.* 2015).

O processo de furação é executado utilizando uma ferramenta de corte denominada broca, a qual executa movimento de rotação em relação ao próprio eixo produzindo furos por meio desta rotação e o emprego de pressão entre broca e peça de trabalho. Assim como no processo de torneamento, a furação possui uma vasta gama de máquinas ferramentas disponíveis, mas todas seguem as principais características construtivas (Figura 12).

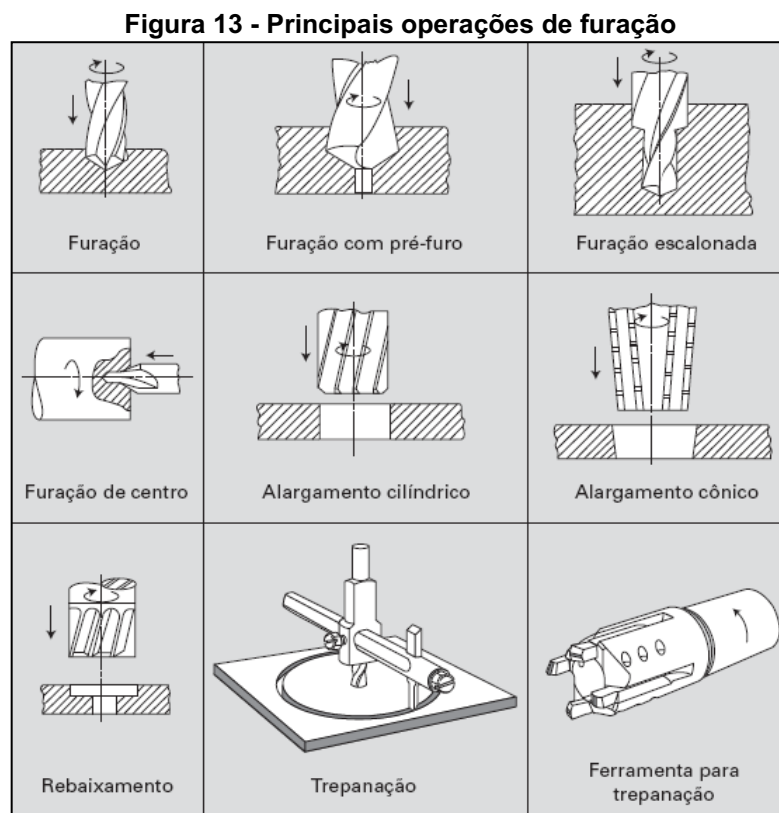
**Figura 12 - Características construtivas principais do processo de furação**



Fonte: Adaptado de Walker e Dixon (2019)

Caracterizam-se pela rotação da ferramenta de corte (broca) e avanço sobre a peça. Segundo Machado *et al.* (2015) quando a qualidade de furo é superior

necessita-se da operação de alargamento. A Figura 13 ilustra as principais operações de furação.



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2015)

A broca é a ferramenta de corte utilizada para realizar operações de furação, podendo contar com uma ou mais arestas de corte, e com um ou mais canais de remoção de cavacos. O corte é executado por meio da rotação aplicada a broca ou a peça de trabalho, ou em ambos, sendo o avanço aplicado ao longo do eixo longitudinal da broca. Uma grande variedade de brocas é aplicada na indústria, podendo ser classificadas em função: do tipo construtivo, tipo de haste, diâmetro, número de canais, tipo de sistema de arrefecimento, no tipo de equilíbrio de forças, no tipo de função e aplicação, e para materiais especiais (DAVIM, 2011).

### 2.3.3 Operações de fresamento

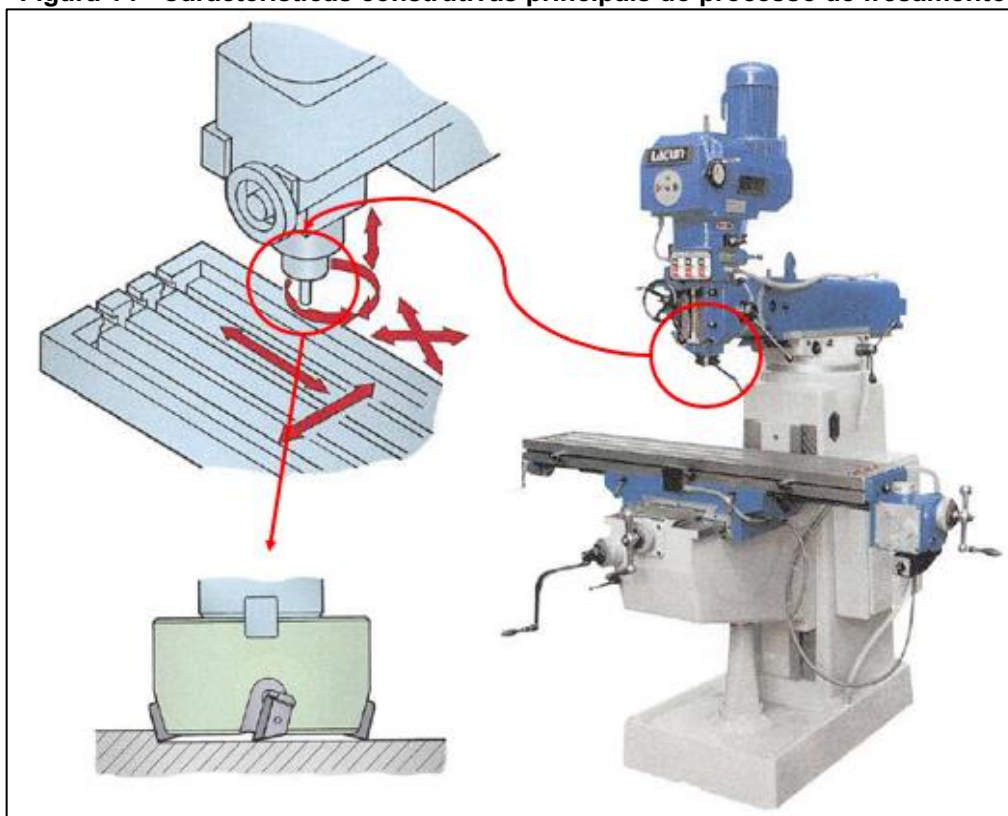
Operações de fresamento são executadas por ferramentas com múltiplas arestas de corte, onde a ferramenta gira em torno de seu próprio eixo enquanto a peça permanece fixada a uma base, ou mesa, sendo que esta executa movimentos de avanço longitudinal e transversal. Há possibilidade em algumas máquinas de somente a ferramenta executar os movimentos da operação. As operações abrangem

fresamento tangencial (concordante e discordante), fresamento tangencial de canais ou de perfis, fresamento de topo, frontal, fresamento com fresa de topo esférica, fresamento de cavidades, fresamento de engrenagens (MACHADO, *et al.* 2015).

Segundo Walker e Dixon (2019) as máquinas fresadoras compreendem a maior variedade de máquinas no contexto da usinagem. As ferramentas de corte utilizadas no fresamento, assim como nos processos de torneamento e furação, possuem diversos grupos abrangendo características variadas, a Figura 14 ilustra as características construtivas principais do processo de fresamento.

Machado *et al.* (2015) definem as operações de fresamento como àquelas onde a ferramenta de corte gira e a peça, presa a uma mesa, oferece o avanço longitudinal ou transversal. Em algumas situações a peça pode permanecer estática contando com os movimentos somente da ferramenta de corte.

**Figura 14 - Características construtivas principais do processo de fresamento**



Fonte: Adaptado de Walker e Dixon (2019)

Machado *et al.* (2015) ainda subclassificam as operações de fresamento (concordantes ou discordantes) em: tangencial, tangencial de canais ou de perfis, fresamento de topo, frontal, com fresa de topo esférica e fresamento de cavidades. A Figura 15 ilustra as principais características destas operações.

**Figura 15 – Principais operações de fresamento**



Fonte: Machado *et al.* (2015)

Partindo das informações básicas sobre as características principais das operações de torneamento, furação e fresamento, no próximo tópico são descritas as características de entrada e saída dos processos de usinagem.

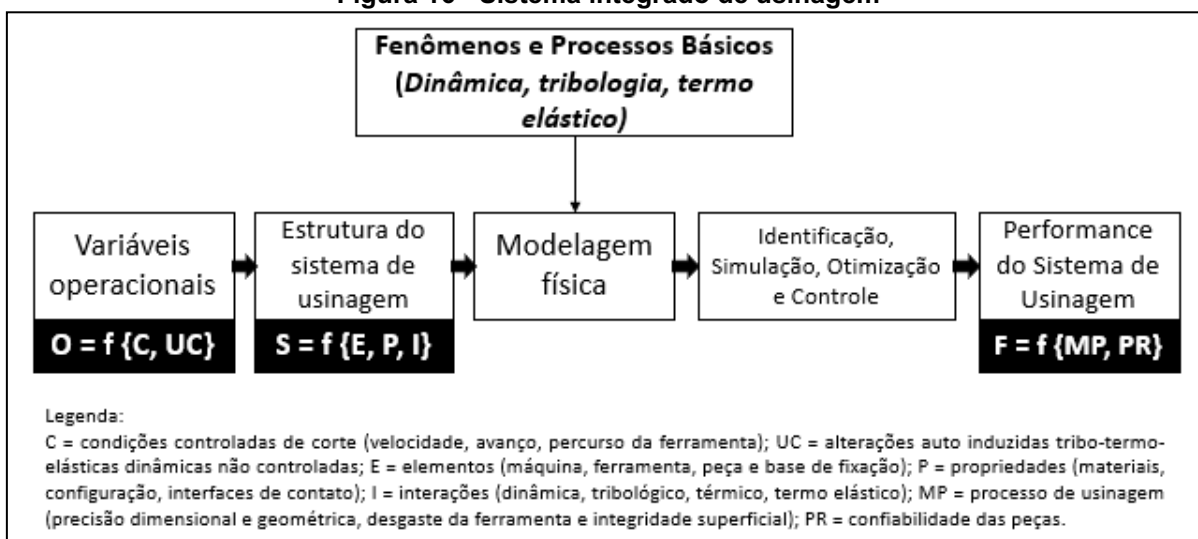
#### 2.3.4 Entradas dos processos de usinagem

A evolução dos processos de usinagem é observada em relação a produção de produtos com características dimensionais cada vez mais precisas, qualidade superficial cada vez mais refinada, além do aumento expressivo de produtividade. Estas melhorias estão diretamente vinculadas a combinação correta de parâmetros de processo que o tornem eficiente, com produtos dentro dos requisitos esperados, além do atendimento às necessidades das organizações, como redução nos custos

de produção, redução de impactos ambientais e melhoria de produtividade (GRZESIK, 2017).

Shi e Attia (2010) sintetizam as variáveis que compõe os processos de usinagem de acordo com o esquema ilustrado na Figura 16. Segundo os autores o desempenho é dependente da estrutura do sistema de usinagem, assim como das variáveis operacionais. A complexidade deste sistema está relacionada às inúmeras interferências em casa fase.

**Figura 16 - Sistema integrado de usinagem**

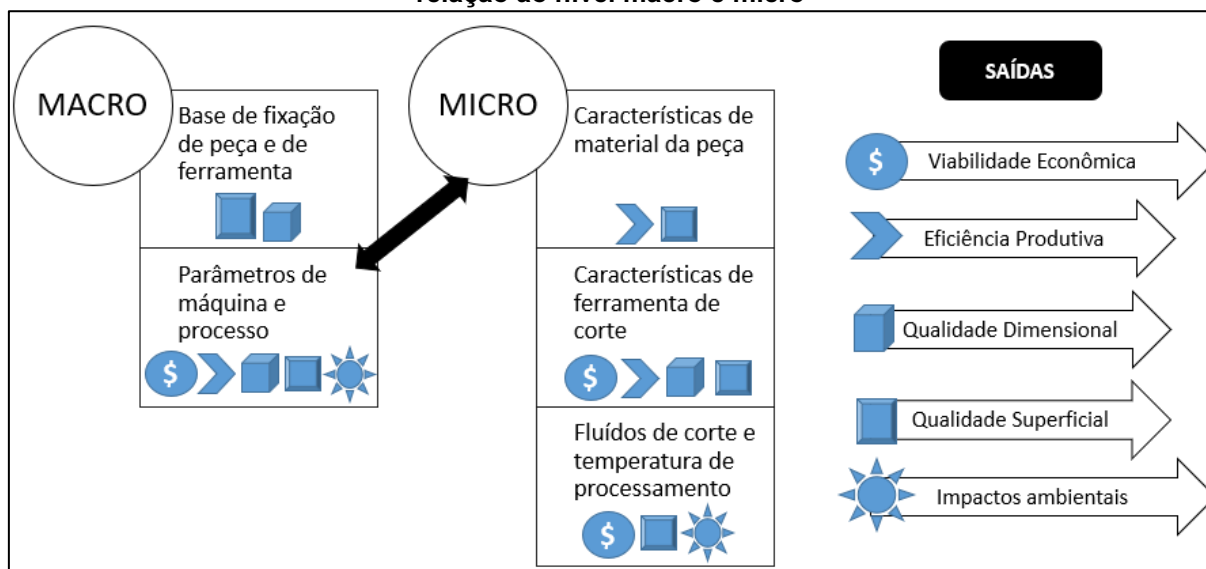


**Fonte: Adaptado de Shi e Attia (2010)**

Entende-se por meio deste modelo que a influência no resultado dos processos de usinagem apresenta nível macro e micro de variáveis. Em nível macro consideram-se parâmetros passíveis de controle direto, como os controles diretos de máquina ferramenta e fluídos de corte. Em nível micro encontram-se as variáveis de interferência indireta, como as interações entre material de ferramenta e o material da peça, e as consequências destas interações. Em relação as saídas do processo de usinagem, estas influências podem afetar mais umas do que outras, como ilustrado no diagrama da Figura 17.

A partir desta visão abrangente sobre as entradas do processo de usinagem, e das suas principais influências nas saídas do processo, serão abordados alguns aspectos fundamentais sobre as bases de fixação de peça e ferramentas de usinagem, material da peça usinada, ferramentas e fluídos de corte e por fim, os parâmetros de máquina.

**Figura 17 - Principais influências das entradas de processo de usinagem nas saídas em relação ao nível macro e micro**



Fonte: Autoria própria (2022)

As bases de fixação de peças correspondem entre 10 e 20% dos custos com usinagem (BOYLE; RONG; BROWN, 2011). Este elemento é projetado e construído como um elemento a parte de qualquer peça que será usinada na sequência. A fixação de peças e ferramentas possui impacto direto no resultado do processo, visto que qualquer folga nesta fixação pode resultar em deslocamento de peça, ou ferramenta, causando falhas dimensionais na peça produzida e danificando a ferramenta de corte.

Em relação a fixação de ferramentas de corte, Cormier e Walsh (2005) citam que estes elementos influenciam na estabilidade e precisão dimensional, na eficiência de produção, na praticidade e na segurança de operações. Segundo os autores, os altos custos com elementos de fixação se dão em função da complexidade do projeto, muitas vezes sendo mais complexo que o projeto da própria peça a que se destina. Segundo Walker e Dixon (2019) bases de fixação e gabaritos auxiliam na eliminação de erros, sendo que em operações de torneamento, podem auxiliar a reduzir custos de manufatura. A diferença entre bases de fixação e gabaritos está no direcionamento, como guia, presente em gabaritos somente.

Sobre o material a ser usinado, os metais são os materiais de engenharia mais importantes no grupo que contempla cerâmicos, polímeros, compósitos e metais. A importância tecnológica e comercial deste material se deve as propriedades de alta rigidez e resistência mecânica, tenacidade, boa condutividade elétrica e térmica. São utilizados, normalmente em ligas compostas de dois ou mais elementos, sendo ao menos um destes elementos de natureza metálica. Metais e ligas podem ser divididos

em dois grupos básicos: ferrosos e não ferrosos. Metais ferrosos são ligas que contêm como elemento base o ferro, neste grupo estão inclusos os aços e ferro fundido. Metais não ferrosos incluem outros elementos metálicos e suas ligas (GROOVER, 2016).

Davim (2014) cita que nas avaliações e otimização de processos usinagem, assim como a busca pela eficiência destes processos, o estudo sobre a usinabilidade envolvida é relevante. Grzesik (2017) lista os fatores que afetam a usinabilidade dos materiais considerando a interferência direta, indireta e os parâmetros de mensuração de processo (Quadro 5). De acordo com o mesmo autor esses fatores são controlados e otimizados para que seja alcançado o resultado esperado de qualidade de peça com a eficiência necessária.

**Quadro 5 - Fatores de análise de usinabilidade de materiais**

	<b>Material usinado ou material da ferramenta</b>	<b>Condições de corte</b>	<b>Máquina, ferramenta de corte e elemento de fixação</b>
Fatores que afetam a usinabilidade indiretamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriedades mecânicas</li> <li>• Microestrutura</li> <li>• Propriedades físicas e químicas</li> <li>• Composição</li> <li>• Inclusão</li> <li>• Tratamento térmico</li> <li>• Tamanho de grão da ferramenta</li> <li>• Acabamento da superfície da ferramenta</li> <li>• Revestimento da ferramenta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte</li> <li>• Profundidade de corte</li> <li>• Avanço</li> <li>• Taxa de remoção</li> <li>• Fluido de corte e refrigeração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de Operação</li> <li>• Vibração</li> <li>• Rigidez</li> <li>• Fixação da peça</li> <li>• Dispositivo</li> <li>• Potência</li> <li>• Geometria da ferramenta</li> <li>• Desgaste da ferramenta</li> </ul>
Fatores que afetam a usinabilidade diretamente	Mecanismo de corte	Forças de corte	Temperatura de corte
Parâmetros para medição de usinagem	Vida útil de ferramenta <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste de cratera</li> <li>• Desgaste de flanco</li> <li>• Outro tipo de desgaste</li> </ul>	Eficiência de remoção de cavaco <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potência requerida</li> <li>• Forças de corte</li> <li>• Formação de cavaco</li> </ul>	Qualidade final de peça <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabamento de superfície</li> <li>• Integridade da superfície</li> <li>• Precisão dimensional</li> </ul>

**Fonte: Adaptado de Grzesik (2017)**

Cormier e Walsh (2005) afirmam que as características mais importantes dos materiais em relação ao projeto de manufatura de peças referem-se a propriedades

físicas e químicas e as aplicações do material. Em produtos usinados, os materiais podem ser classificados como materiais de usinagem fácil (alumínio e ligas de cobre), aços comuns e ferros fundidos e materiais difíceis de usinar (SHAW; COOKSON, 2005). Trent e Wright (2000) citam o comportamento dos principais metais em relação a sua usinabilidade, a qual pode ser analisada em relação a vida útil da ferramenta de corte, taxa de remoção do material, forças de corte, acabamento superficial e forma do cavaco. O Quadro 6 sintetiza os 5 metais básicos usualmente processados com a usinagem, segundo Fitzpatrick (2013).

**Quadro 6 - Os 5 principais metais processados por meio da usinagem**

<b>Metal</b>	<b>Principais características</b>	<b>Características gerais que interferem na usinabilidade</b>
Alumínio	Metal relativamente leve;	Maior classificação de usinabilidade;
	Dentre os cinco metais que compõe esse quadro, o alumínio apresenta tonalidade mais esbranquiçada;	Usinado e cortado a elevadas taxas de remoção de material com baixo desgaste de ferramenta de corte;
	É possível o tratamento térmico de algumas ligas para alterar tenacidade e dureza;	O uso de refrigerante ou óleo sobre a ferramenta de corte pode melhorar as condições de usinagem, mas o processo pode ocorrer a seco. O refrigerante reduz o calor, ajuda na remoção de cavacos, melhora o acabamento e alonga a vida da ferramenta;
	Fornecido nas mais variadas formas: barras longas, blocos, chapas finas laminadas, fundidos, forjados e extrudados;	Ligas de alumínio mais moles têm a tendência de acumular e obstruir ferramentas de corte, (empastamento da ferramenta);
	Há uma família de ligas de alumínio-silício extremamente dura, cujo desgaste em ferramentas de corte ocorre mais rápido que na maioria dos aços. Essas superligas são frágeis, mas muito resistentes ao desgaste. Elas são usadas em aplicações automotivas;	A usinagem do alumínio gera longos cavacos, o que é um risco para o processamento e deve ser evitado sempre que possível;
Latões e outros materiais baseados em cobre (Latão – cobre e estanho; bronze – adicionado zinco e outros elementos)	O cobre é um metal extremamente mole e maleável;	A maioria dos latões apresenta boa usinabilidade, logo abaixo do alumínio;
	O latão é resistente, forte e durável sob forças mecânicas e atrito;	Refrigerantes são utilizados apenas para diminuição de calor e escoamento dos cavacos. O refrigerante não melhora o acabamento da usinagem ou a vida da ferramenta na maioria das ligas, exceto bronzes muito duros;
	Latão e bronze também são metais relativamente pesados, cerca de duas vezes o peso por volume do alumínio;	Uma vez que o latão pode ser usinado sem fluido refrigerante, é chamado de metal “seco”;
Ferro Fundido	Devido ao processo de fundição, pode formar uma crosta exterior muito dura e fina;	Fácil de usinar e tem uma classificação de alta usinabilidade, porém algumas poucas ligas sensíveis podem endurecer além da usinabilidade prática;



		É considerado um metal seco, não requer refrigeração durante a usinagem, exceto para escoamento dos cavacos e da poeira de carbono livre produzida, e para resfriar as ferramentas de corte;
		As ferramentas apresentam um tempo de vida médio-longo na usinagem de ferro fundido. A principal razão para o desgaste da ferramenta é o endurecimento e a crosta da superfície;
Ligas de aço	Podem ser subclassificadas em aços comuns e com elementos de liga que oferecem características específicas a cada liga;	A usinagem do aço melhora com a refrigeração;
	Há uma infinidade de ligas de aço com diferentes elementos ligados e percentuais de carbono, alterando as características mecânicas de cada liga;	A usinabilidade do aço varia de um pouco mais difícil do que o ferro fundido, para aços com baixo teor de carbono ou com elementos que favorecem a usinabilidade, até muito mais difícil, especializada e dura, tanto para o aço-ferramenta como o aço-liga;
Aços inoxidáveis	Os aços inoxidáveis são também ligas de ferro/aço, porém, com maior teor de níquel e cromo que os aços-ferramenta ou os aços-liga;	Usinabilidade difícil, requerendo controle absoluto da velocidade de corte;
	Aço resistente à corrosão;	Deve contar com fluxo constante de líquido refrigerante/fluidos de corte
	Há vários subgrupos de aços inoxidáveis para diferentes aplicações;	

Fonte: Adaptado do texto de Fitzpatrick (2013)

A usinabilidade de cada material apresenta características diferentes em função das propriedades físicas e químicas, sendo assim, todos os materiais de engenharia possuem especificações determinadas em normas internacionais disponibilizadas por diversas organizações como a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*), SAE (*Society of Automotive Engineers*), DIN (*Deutsches Institut für Normung*), AISI (*American Iron and Steel Institute*) etc.

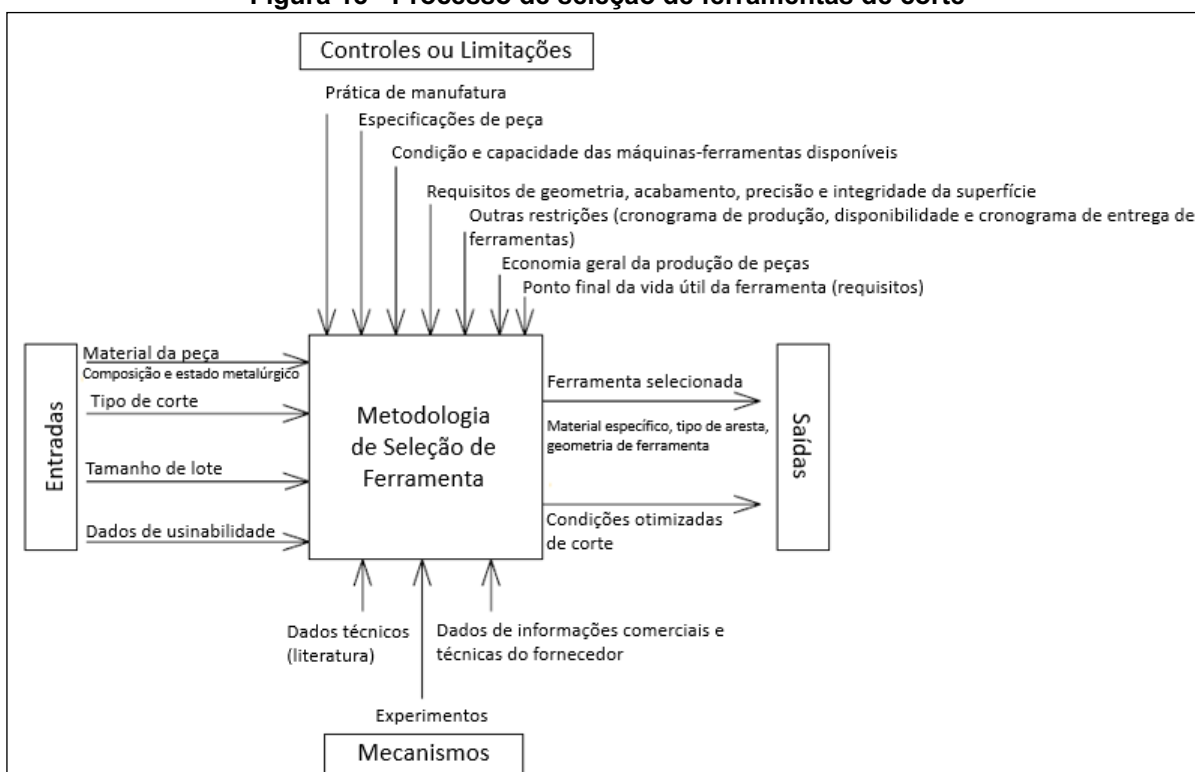
O material impacta diretamente na seleção das ferramentas de corte. A ferramenta de corte é responsável pelo corte efetivo do material, e suas características afetam em todos os aspectos os resultados esperados do processamento, seja este econômico, de qualidade, dimensional, etc.

Segundo Stephenson e Agapiou (2016), as ferramentas de corte em usinagem podem ser classificadas em função da quantidade de arestas de corte que possuem. Ferramentas com uma única aresta de corte são comumente utilizadas em operações de torneamento e mandrilhamento, enquanto ferramentas com mais de

uma aresta são aplicadas e operações de furação e fresagem. Outras classificações podem ser feitas em relação ao material, geometria da ferramenta e método de fixação. A seleção do material e geometria de uma ferramenta de corte é realizada considerando: volume de peças a serem processadas, material da peça processada, precisão dimensional requerida e os recursos das máquinas-ferramentas disponíveis.

As principais classes de materiais de ferramentas de corte são: aço carbono, aço semirrápido, aço rápido, aço super-rápido, ligas fundidas, metal duro, *cermets*, cerâmicas, ultraduros (PCBN e PCD) e diamante natural. Independentemente da classe da ferramenta de corte, de acordo com Stephenson e Agapiou (2016), os materiais do ferramental de usinagem devem possuir as seguintes propriedades: alta dureza de penetração a temperaturas elevadas; alta resistência à deformação; alta tenacidade à fratura; inércia química (baixa afinidade química) em relação ao material de trabalho; alta condutividade térmica; alta resistência à fadiga; alta resistência ao choque térmico; alta rigidez para manter a precisão e lubrificação adequada (baixa fricção) em relação ao material de trabalho. Considerando estas variáveis, os autores citam a estrutura metodológica para seleção de ferramentas, ilustrada no diagrama da Figura 18.

**Figura 18 - Processo de seleção de ferramentas de corte**



Fonte: Adaptado de Stephenson e Agapiou (2016)

Devido as variáveis do processo de usinagem, em relação aos parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, as ferramentas são submetidas a esforços e temperaturas que podem ser prejudiciais a sua vida útil. Para controle das temperaturas de processo utilizam-se, na maioria dos casos, fluidos de corte, que são substâncias formuladas para auxiliar no resfriamento das operações de usinagem de metais. São projetados para realizar as seguintes funções: resfriar ferramenta de corte, melhorar o acabamento da superfície usinada, reduzir o atrito e as forças de corte empregando a lubrificação e prolongando a vida útil da ferramenta, minimizar o acúmulo de material nas arestas de corte da ferramenta, proteger a superfície usinada contra a corrosão e auxiliar na remoção dos cavacos da superfície usinada (WALKER; DIXON, 2019).

Segundo Machado *et al.* (2015) as principais funções dos fluidos de corte é lubrificação a baixas velocidades, refrigeração em altas velocidades, remoção de cavacos na zona de corte e a proteção da máquina-ferramenta e da peça contra oxidação. Trent e Wright (2000) apresentam um guia genérico para seleção de fluidos de corte, descrito no Quadro 7.

**Quadro 7 – Guia para seleção de fluidos de corte**

Operação de Usinagem	Material da peça de trabalho			
	Aços baixo carbono	Aços médio carbono	Aços alto carbono e ligados	Aço inoxidável e aços tratados termicamente
Retificação	Emulsão, fluido para retificação semissintético ou químico			
Torneamento	De aplicação geral, emulsão, semissintético ou sintético		Emulsão semissintético ou sintético	
Fresamento	De aplicação geral, emulsão, semissintético ou sintético	Emulsões, semissintético ou sintético	Emulsões, semissintético ou sintético (podem ser necessários óleos de corte integrais)	
Furação	Oleosos ou com aditivos de extrema pressão, semissintético ou sintético			
Fabricação de engrenagens	Emulsões, semissintético ou sintético		São preferíveis óleos integrais	
Brochamento	Emulsões, semissintético ou sintético (podem ser necessários óleos de corte integrais)			
Rosqueamento	Óleo semissintético ou sintético (podem ser necessários óleos de corte integrais)		São preferíveis óleos integrais	

**Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000)**

A escolha do fluido depende não somente da operação realizada, mas do material da peça usinada e do material da ferramenta de corte empregada. O Quadro 8 apresenta um guia simples que pode ser complementar ao Quadro 7, com a recomendação de fluidos em função do material usinado.

**Quadro 8 - Recomendações de fluidos de corte em relação ao tipo de material**

<b>Material</b>	<b>Recomendações de Fluido de Corte</b>
Ferro fundido cinzento	Apresenta cavacos de ruptura e normalmente usina-se a seco.
Ferro fundido maleável	Quando utilizado, recomenda-se óleo integral ou emulsão.
Ferro fundido branco	Requer aditivos de extrema pressão.
Aços de corte fácil (contendo chumbo, enxofre ou bismuto)	Requer o uso de emulsões ou soluções preferencialmente com enxofre na forma de aditivo de extrema pressão.
Aços de baixo carbono	Recomendam-se o uso de emulsões e óleos com baixa viscosidade.
Aços com médio e alto teor de carbono e aços liga com a mesma concentração de carbono	Recomendam-se emulsões ou soluções (para altas taxas de remoção de material).
Aços inoxidáveis	São indicados óleos com aditivos de extrema pressão à base de cloro e enxofre, para altas velocidades emulsões contendo os mesmos aditivos devem ser empregadas.
Ligas de alumínio	Muitas vezes podem ser usinadas a seco, porém, quando conformadas (alto teor de cobre) requerem fluidos de corte com alta capacidade refrigerante. Quando há formação de cavacos longos, a área de contato é grande e exige-se lubrificação adequada (óleos leves). Ligas de alumínio-silício exigem boa lubrificação.
Ligas de magnésio	Normalmente usinadas a seco. Para altíssimas velocidades de corte utiliza-se óleo mineral ou misturas de óleo mineral com gorduras.
Ligas de cobre – de fácil usinagem (maioria dos latões e alguns bronzes)	Emulsões podem ser empregadas.
Ligas de cobre – média usinagem (latões sem chumbo, alguns bronzes ao fósforo e bronzes ao silício)	Geralmente utiliza-se emulsões com gordura.
Ligas de cobre de difícil usinagem (de chumbo, níquel-prata e bronzes ao fósforo)	Recomendam-se misturas concentradas de óleo mineral com gordura.
Ligas a base de níquel, titânio e cobalto	Depende da operação de corte e da tenacidade da ligam óleos leves contendo cloro como aditivo de extrema pressão normalmente são eficientes.

**Fonte: Adaptado do texto de Machado et al. (2015)**

Em relação às ferramentas de corte, de maneira geral, ferramentas de aço-carbono, aço-liga e aços rápidos devem ser utilizadas a baixas temperaturas o que requer refrigeração eficiente. Ferramentas de ligas fundidas, metais duros e *cermets* possuem dureza a quente mais elevada, geralmente são empregadas com taxa de remoção de material alta, e o uso de fluido refrigerante é necessário para prolongar a vida da ferramenta (geralmente emulsionáveis, mas depende da severidade da operação). As ferramentas cerâmicas exigem atenção, pois o uso de refrigerantes

pode ocasionar trincas superficiais, quando houver um fluido capaz de resfriar a ferramenta sem gerar trincas, será recomendado pois poderá prolongar a vida útil da ferramenta. Ferramentas à base de diamante e de PCBN são duras e resistentes o suficiente para suportar choques térmicos, portanto, o fluido de corte não influencia na vida útil da ferramenta, sendo recomendado para garantir a qualidade superficial da peça usinada (MACHADO *et al.* 2015).

Atualmente a otimização de processos de usinagem contam também com a otimização do uso de fluidos de corte, tanto por questões econômicas quanto sustentáveis.

Por fim, os parâmetros de ajuste de entrada no processo de usinagem são as variáveis que são controladas no processo, mais especificadamente, na operação da máquina ferramenta. Basicamente a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte são as variáveis principais. Estes parâmetros interferem diretamente na vida útil da ferramenta de corte, sofrendo maior influência pela velocidade de corte, seguido pelo avanço e a profundidade de corte. Características geométricas da ferramenta de corte também influenciam na vida útil, como ângulo de folga, raio de ponta, etc., além da temperatura de trabalho que também é fator de grande influência e que possui relação direta com as variáveis de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte (WALSH, 2001; MILLS, 2012).

Machado *et al.* (2015) apresentam as variáveis, denominadas grandezas físicas no processo de corte, em concordância com o que é exposto pela norma NBR 6162 (1989), incluindo os conceitos auxiliares relativos aos ângulos de corte. No Apêndice D são apresentadas todas essas grandezas, assim como as equações para cálculo de cada uma e suas representações gráficas. No próximo tópico são apresentados alguns aspectos sobre as saídas esperadas dos processos de usinagem convencional.

#### 2.3.5 Saídas dos processos de usinagem convencional

Os processos de usinagem apresentam 4 saídas básicas: viabilidade econômica, eficiência produtiva, qualidade da peça produzida e impactos ambientais. Primeiramente, serão descritos os modelos básicos de viabilidade econômica e eficiência produtiva em processos de usinagem. É importante ressaltar que há outras modelagens disponíveis na literatura, mas priorizou-se na presente pesquisa os

modelos básicos visando uma abordagem simples, direta e viável para a melhor compreensão e visualização em ambientes reais de usinagem.

A viabilidade econômica do processo de usinagem pode ser analisada empregando o modelo da velocidade econômica de corte ( $v_0$ ). Segundo Machado *et al.* (2015) e Ferraresi (2017) a velocidade econômica de corte em processos de usinagem pode ser calculada por meio da Equação 1.

$$v_0 = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{(x-1) \cdot C_3}} \quad [\text{m/min}] \quad (1)$$

Onde:

$C_2$  = parcela de custos referente a execução do processo (operador e máquina) – Equação 2 [R\$/hora];

$K$  = constante referente a vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1m/min;

$x$  = coeficiente angular de representação da vida útil da ferramenta em relação a velocidade (diagrama logarítmico);

$C_3$  = parcela de custos referente a ferramenta de corte – Equação 3 [R\$];

$$C_2 = (S_h + S_{mq}) \quad [\text{R$/hora}] \quad (2)$$

Onde:

$S_h$  = custo de mão de obra [R\$];

$S_{mq}$  = custo de máquina [R\$];

$$C_3 = \left[ C_{tf} \cdot \frac{t_{tf}}{60} (S_h + S_{mq}) \right] \quad [\text{R\$}] \quad (3)$$

Onde:

$C_{tf}$  = custo de uma troca de ferramenta [R\$];

$t_{tf}$  = tempo de troca de ferramenta [min];

A eficiência produtiva em processos de usinagem pode ser analisada em função da Velocidade de Máxima Produção ( $V_{m\text{xp}}$ ), representada na Equação 4.

$$V_{m\text{xp}} = \sqrt[x]{\frac{K}{t_{\text{tf}}(x-1)}} \quad [\text{m/min}] \quad (4)$$

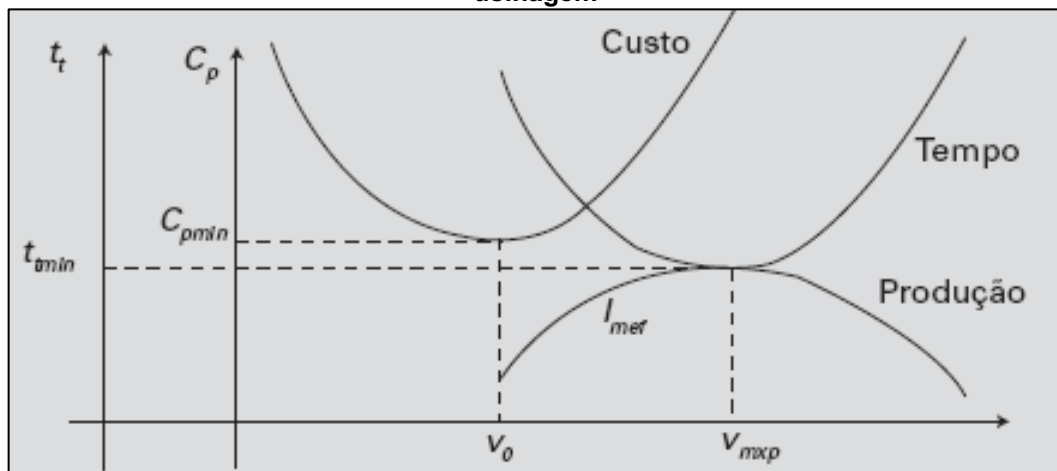
Onde:

$K$  = constante referente a vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1m/min;  
 $x$  = coeficiente angular de representação da vida útil da ferramenta em relação a velocidade (diagrama logarítmico);

$t_{\text{tf}}$  = tempo de troca de ferramenta [min];

Segundo Machado *et al.* (2015), o intervalo entre a velocidade econômica de corte e a velocidade máxima de produção, é o intervalo considerado como de máxima eficiência. Portanto, recomenda-se que os processos de usinagem apresentem a velocidade de corte neste intervalo. A Figura 19 apresenta o gráfico das relações entre o custo, tempo e produção do processo de usinagem em função do tempo e velocidade de corte.

**Figura 19 - Intervalo de velocidades de corte para máxima eficiência em processos de usinagem**



Legenda:  $t_t$  (tempo total),  $t_{\text{min}}$  (tempo mínimo),  $C_p$  (custo de produção),  $C_{\text{pmin}}$  (custo mínimo de produção),  $v_0$  (velocidade de corte para mínimo custo),  $v_{\text{m\text{xp}}}$  (velocidade para máxima produção) e  $I_{\text{mef}}$  (intervalo de máxima eficiência)

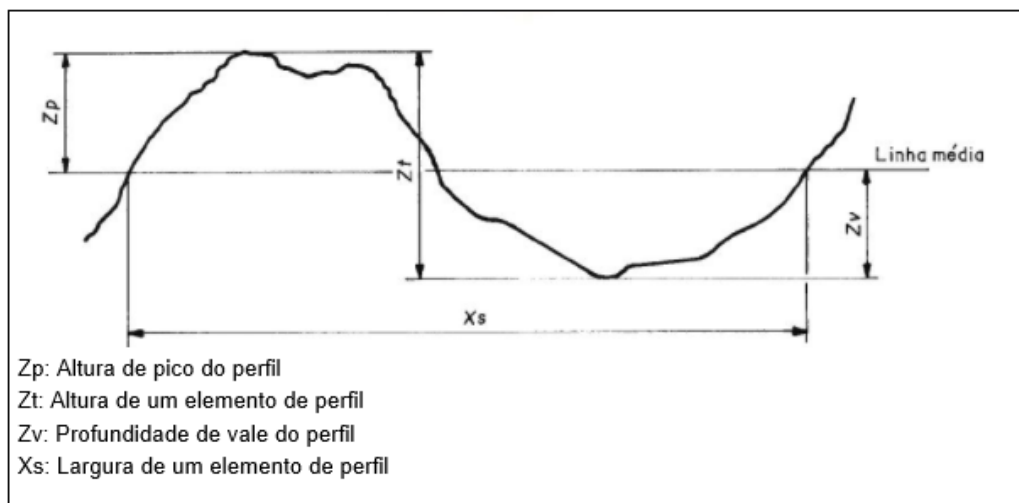
Fonte: Machado *et al.* (2015)

Em relação a qualidade da peça usinada, as saídas observadas do processo de usinagem referem-se às condições de integridade superficial. A integridade superficial é classificada em função das condições de acabamento e alterações subsuperficiais. O foco do presente estudo refere-se as condições de acabamento (ondulações, falhas e rugosidade) e de fatores mecânicos referentes às alterações subsuperficiais, tais quais: deformação plástica, rebarbas, micro e macrotrincas (MACHADO *et al.* 2015).

Demais fatores não serão tratados pois dependem de análises que, na maioria das vezes, não são executadas em ambiente de produção seriada devido a dependência de recursos específicos para análise, como laboratoriais. Além disso, fatores metalúrgicos e alguns fatores mecânicos, como alteração de microdureza e tensões residuais não costumam ser requisitos de controle direto de qualidade em ambiente produtivo, e sim, de estudo no projeto de concepção da peça.

De acordo com Groover (2016), os parâmetros de usinagem que determinam a geometria da superfície de uma peça usinagem incluem: o tipo de operação, a geometria da ferramenta de corte e o avanço da ferramenta. A avaliação da rugosidade pode ser realizada por meio de diversos parâmetros (Figura 20), classificados por Machado *et al.* (2015) em: amplitude (altura de picos, profundidade dos vales ou os dois), espaço (espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície) e parâmetros híbridos (combinação entre amplitude e espaço). A norma ISO 4287 de 2002 define as especificações geométricas referentes a rugosidade de superfícies.

**Figura 20 – Elementos de perfil para análise de rugosidade de superfícies**



Fonte: Adaptado de NBR ISO 4287

Os seguintes parâmetros de rugosidade podem ser empregados para analisar o processo de usinagem (Machado *et al.* 2015):

- Desvio aritmético médio ( $R_a$ ): parâmetro de amplitude empregado como parâmetro de controle de processo (desgaste de ferramenta);
- Desvio médio quadrático ( $R_{a_q}$ ): amplia os valores dos picos e vales, evidenciando defeitos ou marcas em superfícies bem-acabadas. Representa o desvio-padrão da distribuição das alturas do perfil;



- Altura total do perfil ( $R_t$ ) e Altura máxima do perfil ( $R_z$ ): quando se faz necessário especificar a altura máxima de rugosidade;
- Fator de assimetria do perfil ( $R_{sk}$ ): de natureza estatística, representa a assimetria de um perfil, indicando se as irregularidades da superfície são, na maioria, picos ou vales;
- Fator de achatamento do perfil ( $R_{ku}$ ): de natureza estatística, representa o achatamento do perfil.

É possível estimar os valores teóricos dos parâmetros  $R_a$  e  $R_t$ , embora os valores sejam apenas indicativos, visto que diversos outros fatores podem afetar o valor real. O Quadro 9 apresenta as equações para as operações de torneamento e fresamento.

**Quadro 9 – Equações para cálculo de valores teóricos dos parâmetros  $R_a$  e  $R_t$  de rugosidade**

Operação	Equações	Legenda
Torneamento (quando o avanço é menor que o raio de ponta da ferramenta)	$R_a = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_\epsilon}$ (5)	$R_a$ = Desvio aritmético médio $R_t$ = Altura total do perfil $f$ = avanço da ferramenta de corte $f_z$ = Avanço por aresta $R$ = Raio da fresa $r_\epsilon$ = raio de ponta da ferramenta $\Theta$ = Referente ao ângulo de entrada e saída da ferramenta na superfície de corte $C$ = ângulo de posição $D$ = ângulo de ataque
	$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon}$ (6)	
Torneamento (quando a ferramenta não apresenta raio de ponta, ou é muito pequeno)	$R_a = \frac{f}{4(\tan \theta_s + \cot \theta_e)}$ (7)	
	$R_t = \frac{f}{(\tan \theta_s + \cot \theta_e)}$ (8)	
Fresamento tangencial	$R_a = \frac{f_z^2}{18 \cdot \sqrt{3R}}$ (9)	
	$R_t = \frac{f_z^2}{8 \cdot R}$ (10)	
Fresamento frontal	$R_a = \frac{r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2}$ (11)	
	$R_t = \frac{f_z}{\tan C + \cot D}$ (12)	

Fonte: Adaptado do texto de Machado (2015) e Groover (2016)

Segundo Scandiffio (2016) a rugosidade média ( $R_a$ ) é o parâmetro mais utilizado para determinação da rugosidade. Segundo o autor, características como resistência ao desgaste por atrito, transmissão de calor, capacidade de distribuição e retenção de lubrificantes, capacidade de adesão a camadas protetoras e, resistência a fadiga, são influenciadas por essa característica. O Quadro 10 apresenta os fatores de processo de usinagem que influenciam na rugosidade segundo Çolak, Kurbanoglu e Kayacan (2007).

**Quadro 10 - Fatores que influenciam a rugosidade de superfícies em peças produzidas nos processos de usinagem**

Classe de fatores	Tipo
Propriedades das ferramentas de corte	Material da ferramenta Forma geométrica Raio de ponta Resistência ao desgaste
Parâmetros de processo	Cinemática Penetração de trabalho Profundidade de corte Avanço Velocidade de corte Ângulo de ferramenta Fluídos de corte
Propriedades do material	Dureza Usinabilidade
Fenômenos de corte	Aceleração Forma do cavaco Vibrações Contato da ferramenta/peça Variação da força de corte
Equipamento	Rigidez da máquina Rigidez de fixação da peça Rigidez de fixação da ferramenta

Fonte: Adaptado de Çolak, Kurbanoğlu e Kayacan (2007)

Em relação a saída dos processos de usinagem, sob a perspectiva dos impactos ambientais, Álvarez, Bárcena e González (2017) apresentam a abordagem do *Triple Bottom Line* (3E), direcionando os fatores dos processos de usinagem para os pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental e social. Nesta perspectiva, os autores apresentam quatro grupos de critérios sustentáveis: (I) Prevenção e controle de poluição; (II) Danos ambientais e humanos; (III) Eficiência de processos e recursos e (IV) Inovação e desenvolvimento. A Figura 21 apresenta o diagrama das macros variáveis relacionadas a cada um dos critérios.

**Figura 21 - Critérios e macros variáveis de sustentabilidade dos processos de usinagem**

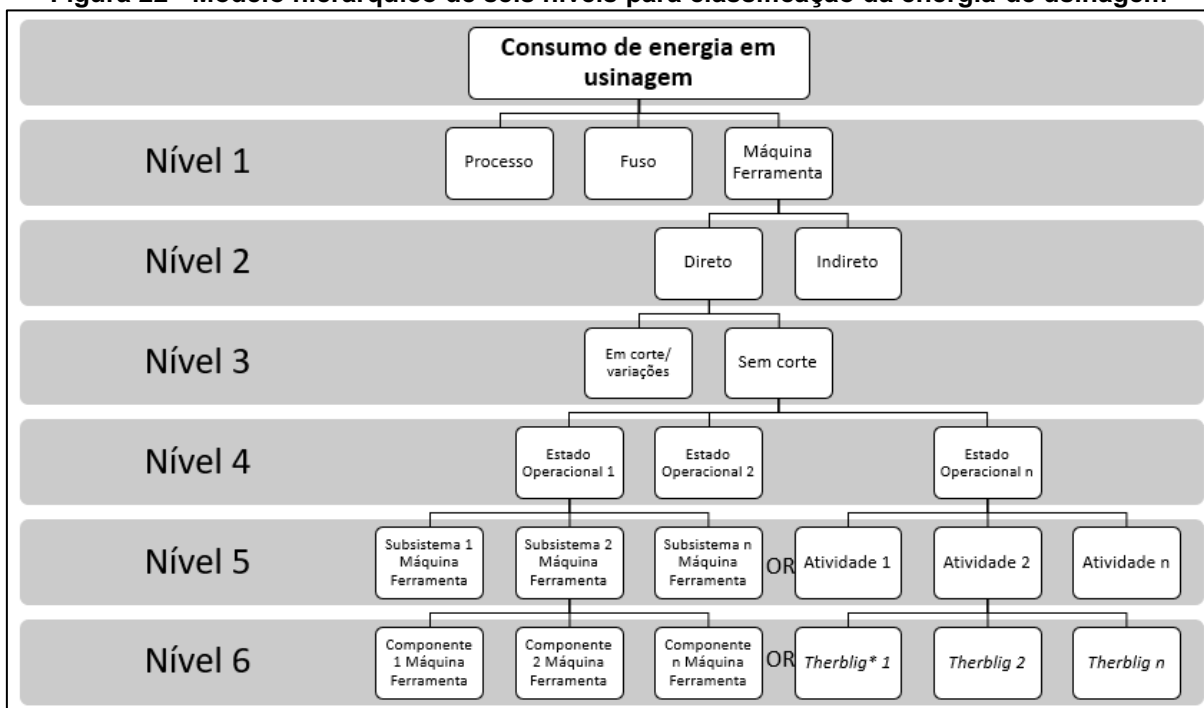
Prevenção e Controle de Poluição	Danos Ambientais e Humanos	Eficiência de Processos e Recursos	Inovação e Desenvolvimento
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução e reuso</li> <li>• Tratamento e eliminação</li> <li>• Segregação e disposição</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saúde</li> <li>• Segurança</li> <li>• Qualidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia</li> <li>• Água/Fluídos</li> <li>• Materiais processados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mudanças tecnológicas</li> <li>• Produção útil: produtos e para produtos</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Álvarez, Bárcena e González (2017)

Considerando o objetivo da presente pesquisa, foram priorizadas as variáveis de sustentabilidade com relação direta no processo de usinagem, portanto, o foco principal de análise refere-se à Eficiência de Processos e Recursos (consumo de energia, água e materiais de processamento). Fernando, Karunathilake e Gamage (2021), fundamentados em pesquisas atuais, destacam que destas, 34% e 37% respectivamente, indicam energia e fluídos como as principais fontes de impacto ambiental.

Em relação ao consumo de energia, Sihag e Sangwan (2020) por meio de uma vasta revisão de literatura atual, definiram um modelo hierárquico para classificação da energia consumida em processos de usinagem (Figura 22).

**Figura 22 - Modelo hierárquico de seis níveis para classificação da energia de usinagem**



\* *Therblig*: termo originário do estudo de tempos e movimentos (Fank e Lilian Gilbreth), refere-se a movimentos fundamentais para executar uma operação.

**Fonte: Traduzido de Sihag e Sangwan (2020)**

Sihag e Sangwan (2020) também classificam os modelos de consumo de energia em processos de usinagem em: (a) modelos direcionados a máquina ferramenta; (b) modelos direcionado ao corte; (c) modelos baseados nos estados operacionais; (d) modelos baseados em componentes e (e) modelos baseados em movimentos fundamentais de máquina ferramenta. Além da classificação apresentada, uma contribuição muito significativa na revisão realizada pelos autores refere-se às estratégias de eficiência energética na fase de planejamento dos

processos de usinagem, onde são listados os estudos e as respectivas variáveis consideradas para o planejamento dos processos visando a otimização de consumo energético. Analisando o estudo de Sihag e Sangwan (2020), foi possível perceber a complexidade de se considerar muitas variáveis de maneira simultânea, podendo inclusive ser considerado inviável.

A previsibilidade do consumo energético de um processo de usinagem está atrelado ao comportamento da máquina ferramenta. Peng e Xu (2014) apresentam as noções básicas para cálculo do consumo de energia (Equação 13 e 14).

$$E_{corte} = P_{corte} * t_c \quad [\text{Kwh}] \quad (13)$$

Sabendo que:

$E_{corte}$  = Energia consumida para corte [Kwh]

$P_{corte}$  = Potência de corte [Kw]

$t_c$  = tempo de corte [h]

Onde a potência de corte pode ser estimada pela Equação 14.

$$P_{corte} = F * \frac{V_c}{60} \quad [\text{W}] \quad (14)$$

Em que:

$F$  = Força de corte [N]

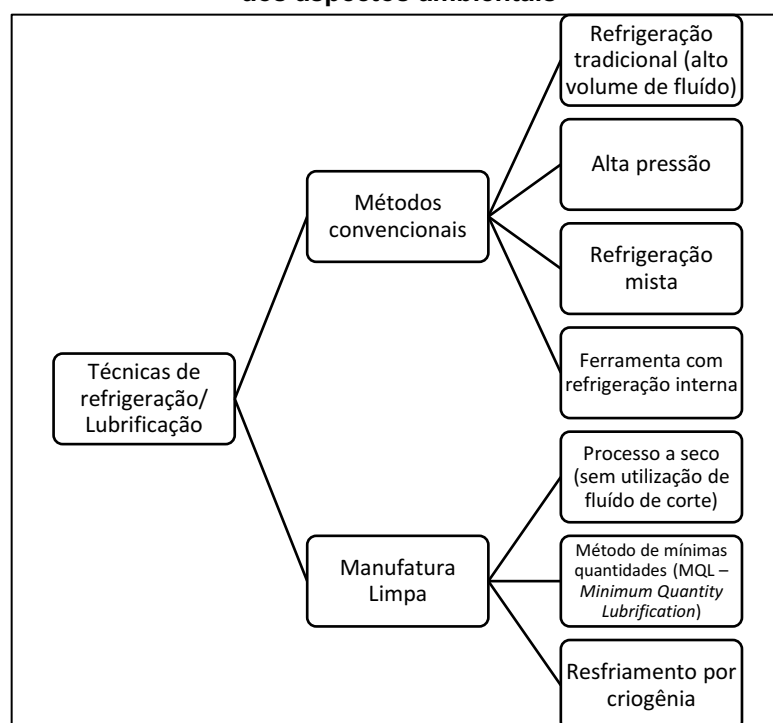
$v_c$  = Velocidade de corte [m/min]

Peng e Xu (2014) também citam a estimativa de consumo de energia em função do volume de material usinado, entretanto, visando o desenvolvimento da presente pesquisa, foi considerado apenas o modelo que abrange a velocidade e força de corte como variáveis principais. Um conjunto mais vasto de estudos sobre previsão e redução do consumo de energia em processos de usinagem pode ser consultado em Pelegrino (2018).

Conforme a Figura 21 apresentada anteriormente, os fluídos de corte empregados nos processos de usinagem são considerados outra variável de impacto ambiental. Os fluídos de corte auxiliam na redução das forças de corte, aumento da velocidade e redução da temperatura de trabalho, o que promove um aumento na vida útil da ferramenta. Portanto, consegue-se velocidades mais altas, redução do tempo de usinagem e um aumento na taxa de produção (HAMRAN, *et al.* 2020).

O método mais comum de aplicação de fluido de corte em processos de usinagem utiliza uma quantidade significativa de fluido e que resulta em impactos econômicos, ambientais e de saúde. Neste sentido, muitos estudos visam a otimização do uso deste recurso, ou ainda outras soluções para redução destes impactos. Hamran *et al.* (2020) classifica as técnicas de resfriamento nos processos de usinagem, em relação ao impacto ambiental de acordo com a Figura 23, uma classificação mais detalhada em função dos tipos de lubrificantes e refrigerantes é apresentada por Krolczyk *et al.* (2019).

**Figura 23 – Classificação dos métodos de refrigeração nos processos de usinagem em relação aos aspectos ambientais**



Fonte: Traduzido de Hamran *et al.* (2020)

A minimização de impacto ambiental, em relação ao uso de fluidos de corte é diretamente dependente do tipo de sistema de lubrificação. Ao contrário da energia consumida, que possui dependência da operação realizada, o fluido de corte não possui relação direta apenas com a operação. Portanto, a decisão sobre a substituição do tipo de resfriamento/lubrificação vai depender de alterações de recursos de processo, o que torna essa decisão mais complexa.

Por fim, a variável de impacto ambiental referente a quantidade de material processado está relacionada, principalmente, a quantidade de material descartado no processo. Ou seja, o cavaco produzido nas operações de usinagem é considerado um resíduo e precisa ser tratado. A quantidade de cavaco produzido no processo de

usinagem depende da relação entre as dimensões da peça de trabalho e as dimensões finais após o processamento. Essa característica é, portanto, determinada no projeto da peça usinada e entende-se que, do ponto de vista econômico, o objetivo será sempre reduzir ao máximo a quantidade de material que precisa ser processado.

Considerando o objetivo da presente pesquisa, entende-se que essa variável, (considerando a quantidade resultante de cada processamento) não pode ser controlada. Isso se deve ao fato de que o material a ser processado e o projeto de peça acabada não são de responsabilidade da organização que realiza o processo de usinagem. Cabe a organização responsável pelo processo, o tratamento do cavaco produzido (destinação adequada, disposição em locais adequados, tratamento para remoção de fluídos e elementos contaminantes contidos no cavaco, etc.), sendo indiretamente responsável pela quantidade produzida. Entende-se que, o único controle referente a quantidade resultante de cavaco que pode ser controlada, é a quantidade de material processado útil, ou seja, a quantidade resultante de processos que não apresentam erros de produção. Os ajustes de processo e testes também resultam em material processado, e nestes casos, podem impactar na produção de cavaco e material para descarte sendo, portanto, minimizado ao limite possível.

Conforme exposto até o momento, as saídas dos processos de usinagem resultam da combinação das suas variáveis de processo. Desta forma, métodos de otimização destas variáveis, com objetivos diversos, são comumente desenvolvidos visando a eficiência seja esta econômica, ambiental ou produtiva. O próximo tópico visa explorar estes métodos.

### 2.3.6 Otimização em processos de usinagem

Visando a construção do DFSS dos processos de usinagem, o estudo sobre as saídas do processo concentra-se na busca por modelos existentes de otimização que considerem todas, ou a maioria, das saídas citadas, ou de estudos de revisão que compreendem análise e comparação de modelos de otimização distintos. O Quadro 11 lista os principais pontos dos estudos que foram encontrados por meio da busca sistemática, onde objetivou-se o levantamento de pesquisas com abordagem ampla sobre a otimização de parâmetros de saída, e não o detalhamento sobre métodos específicos (devido ao número elevado de estudos nesta área).

**Quadro 11 - Síntese dos estudos sobre otimização de parâmetros de saída de processos de usinagem**

Referência	Objetivo	Principais características do modelo sugerido/analísado
Desale e Jahagirdar (2011)	Análise da aplicação do sistema de inferência neuro-difusa adaptável para previsão de variáveis de saída em processos de fresamento e torneamento.	O modelo de previsão das saídas do processo considera as variáveis: usinabilidade do material (tempo de processamento, custo, vida útil de ferramental, acabamento superficial)
Yusup, Zain e Hashim (2012)	Avaliação e comparação de pesquisas que utilizaram técnicas de otimização em parâmetros de usinagem (métodos convencionais e não convencionais). São analisados: algoritmo genético (AG), <i>simulated annealing</i> (SA), <i>particle swarm optimization</i> (PSO), <i>ant colony optimization</i> (ACO) e <i>artificial bee colony algorithm</i> (ABC).	O artigo conta com uma vasta lista de referências e a indicação dos métodos de otimização considerados em cada estudo. Os autores destacam que algoritmo genético é o método mais citado, e as variáveis mais utilizadas na otimização dos estudos levantados são a rugosidade da superfície, seguida pelos custos de usinagem/produção e taxa de remoção de material.
Arrazola <i>et al.</i> (2013)	Revisão sobre modelos preditivos direcionados para usinagem. São analisados modelos analíticos, modelos numéricos, modelos híbridos, modelos empíricos e outros.	Vasta revisão sobre as classes de modelos preditivos considerando um grande número de variáveis do processo de usinagem. As variáveis são descritas, assim como os modelos considerados.
Dureja <i>et al.</i> (2017)	Avaliação da aplicabilidade de vários modelos empíricos e de otimização (Regressão linear, redes polinomiais, Metodologia da superfície de resposta, Modelagem em <i>Fuzzy</i> , Matriz ortogonal de Taguchi, Metodologia da superfície de resposta, Algoritmo genético, em operações de torneamento.	Modelos empíricos e métodos de otimização são amplamente discutidos objetivando comparar a aplicação e adequação destas técnicas aplicadas em problemas de usinagem.
Awad e Hassan (2018)	Proposta de um modelo de otimização focado na redução de perdas devido ao impacto ambiental e o custo para produção de um mix de produtos usinados (torneamento).	O modelo matemático calcula a quantidade ideal de produção em função de parâmetros de usinagem que maximizam o lucro esperado. A rugosidade superficial é utilizada como métrica para avaliar a qualidade desejada da peça final e também para estimar o custo de retrabalho em função dos limites toleráveis. Em relação aos aspectos ambientais, considera-se o consumo de energia e as emissões de CO <sub>2</sub> estimados através da abordagem de análise de ciclo de vida, de maneira a quantificar o custo ambiental.
Hernandez <i>et al.</i> (2019)	Proposta de um método de avaliação baseado em 6R para manufatura sustentável.	O método baseia-se em 6 principais grupos de métricas: impacto ambiental, consumo de energia, gerenciamento de resíduos, custo, utilização de recursos e sociedade / saúde do pessoal / segurança operacional. A metodologia é voltada para processos de fabricação, inclusive a usinagem. O estudo

		apresenta um estudo de caso direcionado para usinagem.
--	--	--

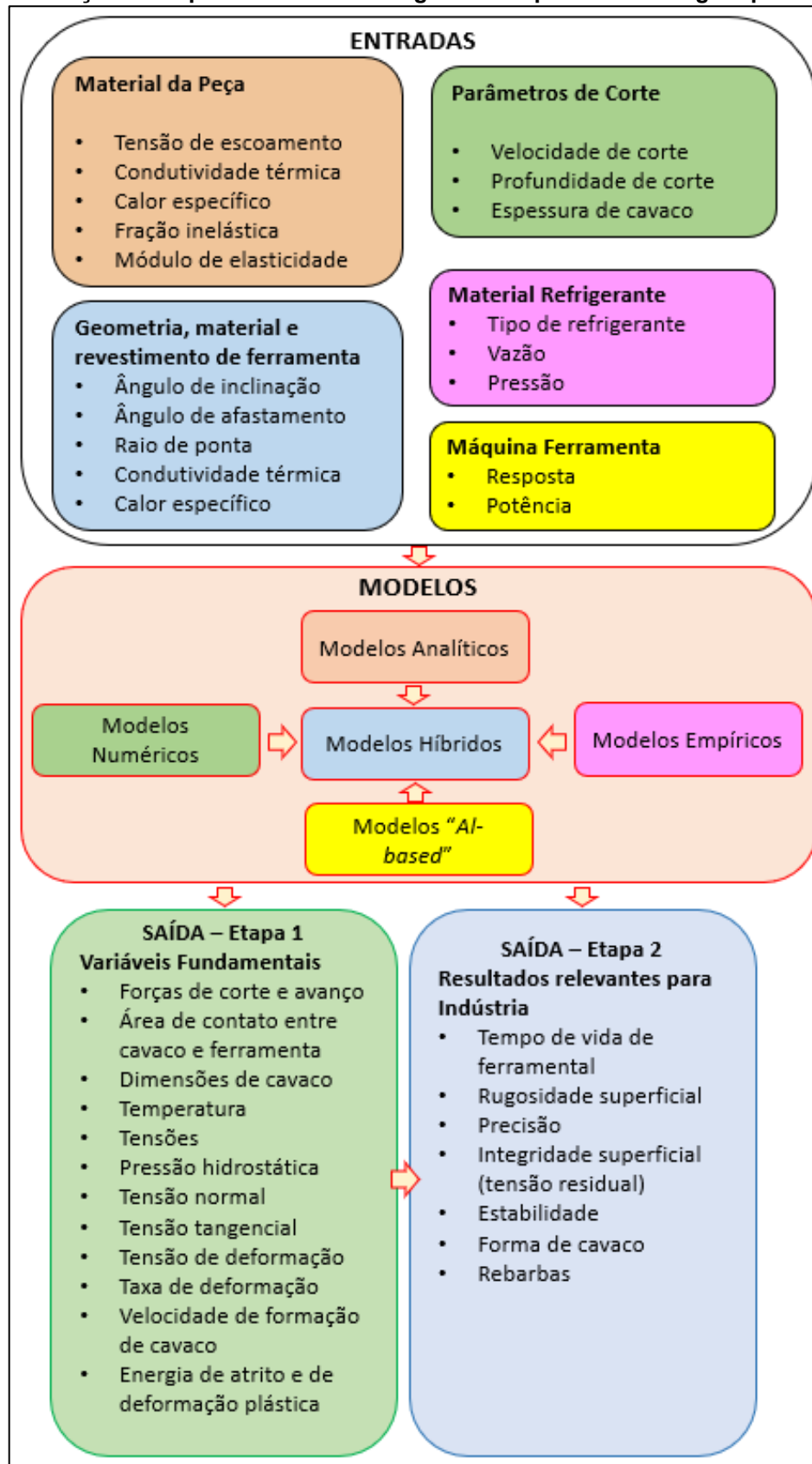
Fonte: Autoria própria (2022)

Observando algumas obras específicas sobre usinagem e suas operações (CHILDS *et al.* 2000, TRENT; WRIGHT, 2000, SHAW; COOKSON, 2005, MILLS, 2012, STEPHENSON; AGAPIOU, 2016, GRZESIK, 2017) que são citadas com frequência nos artigos científicos publicados, a otimização de parâmetros de usinagem é vinculada aos seguintes temas: Framework para coleta de informações no processo de otimização; Economia de usinagem; Otimização de sistemas de usinagem (fatores básicos): material da peça, seleção de máquinas e ferramentas de corte, fixação da ferramenta de corte, seleção dos fluídos de corte, seleção dos parâmetros de corte; Otimização de parâmetros de usinagem (velocidade, avanço e profundidade de corte); Otimização de tempos de usinagem; Técnicas para otimização: operações com passe único, operações com múltiplos passes, sistema multifuncional com estação única, sistema de usinagem de vários estágios, estratégias de substituição de ferramentas de corte, estratégias de ferramentas de corte para configurações de peças multifuncionais; Otimização de função objetivo; Otimização difusa; Modelo empírico – Equação de Taylor; Modelagem analítica fechada – modelo de Merchant; Modelagem mecanicista tipificada pela análise de forças de Devor ou pela espessura de cavacos; Modelagem com elementos finitos.

A Figura 24 ilustra a relação resumida entre as classes de modelagem (empíricos, analíticos, numéricos, mecanicista, híbridos e gerais) e os parâmetros relacionados segundo Arrazola *et al.* (2013).



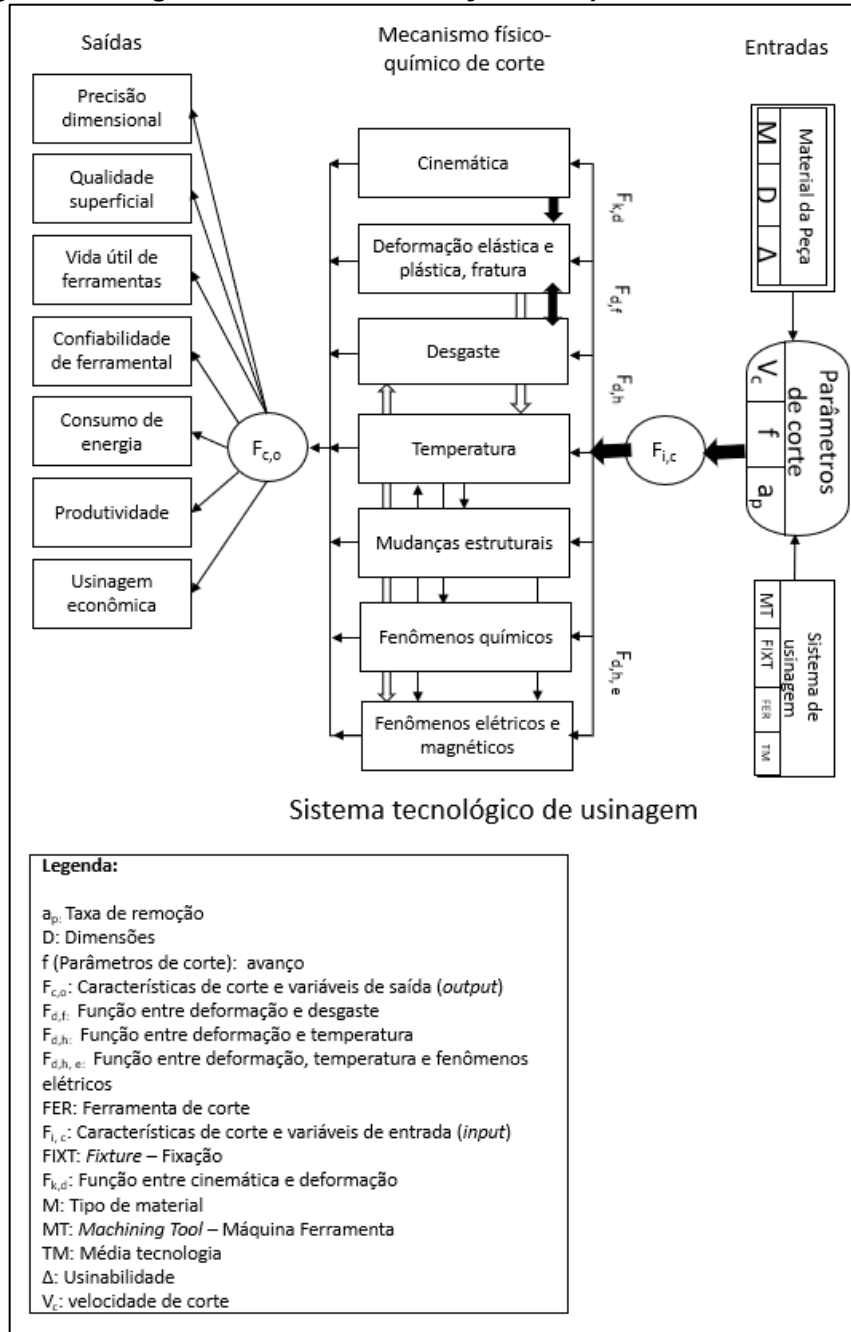
Figura 24 - Relação entre parâmetros de usinagem e os tipos de modelagem para otimização



Fonte: Adaptado de Arrazola *et al.* (2013)

Grzesik (2017) apresenta uma relação entre parâmetros de usinagem semelhante de Arrazola *et al.* (2013), sintetizado no diagrama em blocos da Figura 25.

**Figura 25 - Diagrama em blocos da relação entre parâmetros de usinagem**



Fonte: Grzesik (2017)

Para complementar o embasamento teórico necessário para o atendimento do objetivo da presente pesquisa, o próximo tópico aborda questões relacionadas ao processo de desenvolvimento de produtos usinados com vistas as atividades macro de gestão do desenvolvimento deste tipo de produto.

## 2.4 Desenvolvimento de produtos usinados

A indústria da usinagem é vasta e heterogênea abrangendo desde pequenas empresas até as de grande porte. Devido a variedade de operações, máquinas, e a possibilidade de processamento de diversos materiais, os processos de usinagem atendem a uma infinidade de tipos de produtos e segmentos da indústria. Empresas especializadas em processos de usinagem atuam de maneira a oferecer o serviço de manufatura, agregando valor aos produtos por meio do processamento, atendendo a projetos pré-estabelecidos.

Tarvin (2016) afirma que as empresas que oferecem os serviços de usinagem buscam por clientes considerando não apenas o modelo de negócio que seguem, mas principalmente as habilidades e recursos que possuem. O mesmo autor reforça a importância do bom atendimento ao cliente que essas empresas precisam alcançar para que projetos futuros possam ser negociados. Além disso, a grande maioria dos clientes atendidos por empresas de usinagem pertencem a uma vasta cadeia de suprimentos, havendo possibilidade de outros projetos serem desenvolvidos pela indicação de parceiros.

O foco desta pesquisa é o processo de desenvolvimento de produtos usinados, em material metálico, onde a empresa atende projetos externos de produtos, não havendo as fases iniciais relacionadas a criação e ideação de projetos de produtos. Trata-se, como já foi citado, de um prestador de serviços que compõe, geralmente, uma cadeia de suprimentos. Esta característica é imprescindível na caracterização do PDP destas organizações. A Figura 26 apresenta os tipos de relacionamento com fornecedores no PDP de acordo com Rozenfeld *et al.* (2010), onde são destacadas as características das organizações que apresentam os processos de usinagem.

Empresas que atuam na usinagem de metais, segundo a Associação Europeia das Indústrias de Máquina Ferramentas e Tecnologias de Manufatura Relacionadas (*European Association of the Machine Tool Industries and Related Manufacturing Technologies*), possuem como principais clientes as indústrias automotiva, aeroespacial, de maquinário, produtos metálicos em geral, elétrica, de precisão e de instrumentos óticos (GEERTS, 2019).

Figura 26 - Tipos de relacionamento com fornecedores no PDP, em destaque as características do segmento considerado na pesquisa

	Tipo de Relacionamento		Tipo de Peça Fornecida		Planejamento do Produto		Envolvimento com o Desenvolvimento das Especificações				Envolvimento com a Preparação para a Produção						
	Contrato de Longo Prazo	Contrato de Curto Prazo	Sistemas/ Módulos Complexos	Peças/ Módulo Simples	Avalia/Des. Tecnologias	Auxilia na definição de Estratégia	Define Requisitos do Produto	Define Requisito de Peça	Participa do DP (membro do time)	Sugere Alterações no Produto	Desenvolvimento da Peça	Aux. no Teste do Produto	Desenvolve o Processo da Peça	Participa do Teste da Manufatura	Comercialização do Produto	Produção da Peça	Venda de Peça por Catálogo
Parceiro de risco	●		●		●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	
Parceiro de tecnologia	●				●		○	○									
Co-desenvolvedor (parceiro)	●		●				●	●	●	●	●	●	●			○	
Co-desenvolvedor	●	○	●	○				●		●	●	●	●			○	
Fornecedor de serviços (eng.)	○	●	○	●					○	●		●				●	
Fornecedor de serviços (man.)	○	●										●	●				
Fornecedor de peças-padrão		●	●							●						●	●

↓ Indica as características do segmento de empresas de usinagem consideradas  
 ○ Pode fazer  
 ● Faz necessariamente

Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2010)

Tarvin (2016) fundamenta o sistema de gestão das empresas de usinagem empregando o que o autor denomina de: “Pirâmide de Usinagem” (Figura 27).

Figura 27 - Pirâmide da Usinagem



Fonte: Adaptado de Tarvin (2016)

O princípio norteador da pirâmide é a ideia de que toda pirâmide depende de uma base sólida para que a estrutura seja sustentada. Na base de qualquer sistema de gerenciamento das atividades de usinagem estão as pessoas e a liderança, o sistema de qualidade que guiará as atividades, os equipamentos e a tecnologia de informação vinculada. Os equipamentos são considerados base da pirâmide visto que são fatores de limitação na obtenção de novos negócios. Na usinagem, de maneira geral, os equipamentos requerem altos investimentos o que inviabiliza adaptações ou compras específicas para atendimento a clientes.

O segundo nível da pirâmide compreende sistemas padronizados que possam garantir o registro e continuidade de atividades, com histórico e fluxo de informações adequado. A camada de “habilidade” da pirâmide favorece a criação de processos robustos, sendo no próximo nível a execução colocada em prática. Quando as camadas de base são bem estruturadas, os resultados obtidos nas camadas 3, 4 e 5 tendem a estar dentro do esperado, com baixo índice de refugo, entregas dentro do prazo e retorno lucrativo vista a gestão eficiente (de capacidade, programação, operações e cadeia de suprimentos) (TARVIN, 2016).

Tarvin (2016) também destaca os principais indicadores de acompanhamento da gestão dos processos de usinagem (Quadro 12).

**Quadro 12 – Indicadores auxiliares na gestão de processos de usinagem**

<b>Áreas</b>	<b>Indicadores recomendados</b>
Segurança	Dias da ocorrência do último acidente
	Número de acidentes
	Número de quase acidentes
	Danos a cada 100.000 horas
Entregas	Entregas no prazo (valor monetário)
	Entregas no prazo (número de peças)
	Entregas no prazo por linha de produção
	Média de dias de atrasos
Qualidade	Defeitos por milhão de peças produzidas (PPM)
	Retrabalho e peças perdidas (valor monetário)
	Retrabalho e peças perdidas (percentual de valor adicionado)
	Custo total de qualidade
	Número de não-conformidades por pedido
	Número de não-conformidades por mês
Lucros	Percentual de não conformidades em inspeção final
	Margem bruta
	Margem por família de produtos
	Lucros com novos produtos
	Lucro por empregados
	Retorno de investimentos próprios
	Retorno sobre os ativos
Margem de lucro líquido	
Mão de obra	Rendimento (eficiência)

	Horas indiretas por tipo de peça
	Utilização de mão de obra
Cadeia de Suprimentos	Fornecedores com atendimento sem atrasos
	Percentual de defeitos
	Tempo de ciclo por fornecedor
Inventário/ Estoques	Giro de estoque
	Estoque em processo ( <i>Work in Process</i> )
	Valor monetário de estoque
	Precisão de inventário
	Estoque obsoleto (valor monetário)
Outros	Controle da vida útil por ferramentas
	Valor monetário referente a desgaste de ferramentas de corte

Fonte: Adaptado do texto de Tarvim (2012)

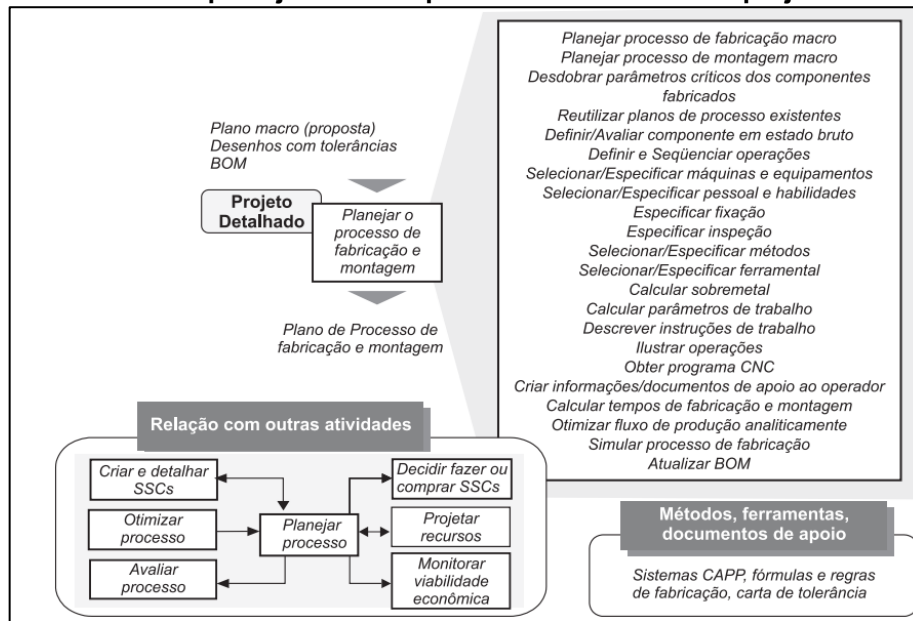
A pirâmide da usinagem representa a hierarquia das principais atividades relacionadas ao processo de usinagem. Visando um detalhamento destas atividades, o próximo tópico refere-se ao planejamento dos processos de usinagem.

#### 2.4.1 Planejamento de Processos de Usinagem

No desenvolvimento da presente pesquisa, apesar do conhecimento da pesquisadora sobre as etapas habituais geralmente empregadas nos processos de usinagem, buscou-se na literatura pela definição teórica destas etapas. O foco sobre as etapas é direcionado não apenas ao processamento de um produto usinado, mas principalmente sobre as atividades pré e pós processo, ou ainda, a gestão deste processo. Ou seja, o objetivo era analisar as publicações sobre o desenvolvimento completo da manufatura de um produto usinado, iniciando pelo projeto do produto até o controle final de suas características pós processamento.

Rozenfeld *et al.* (2010) apresentam um PDP genérico onde a fase de projeto detalhado e planejamento para produção são compostas por atividades relacionadas a processos de manufatura do segmento mecânico. Portanto, é possível identificar uma relação muito clara entre a proposta dos autores e as etapas necessárias para o processo de usinagem (Figura 28).

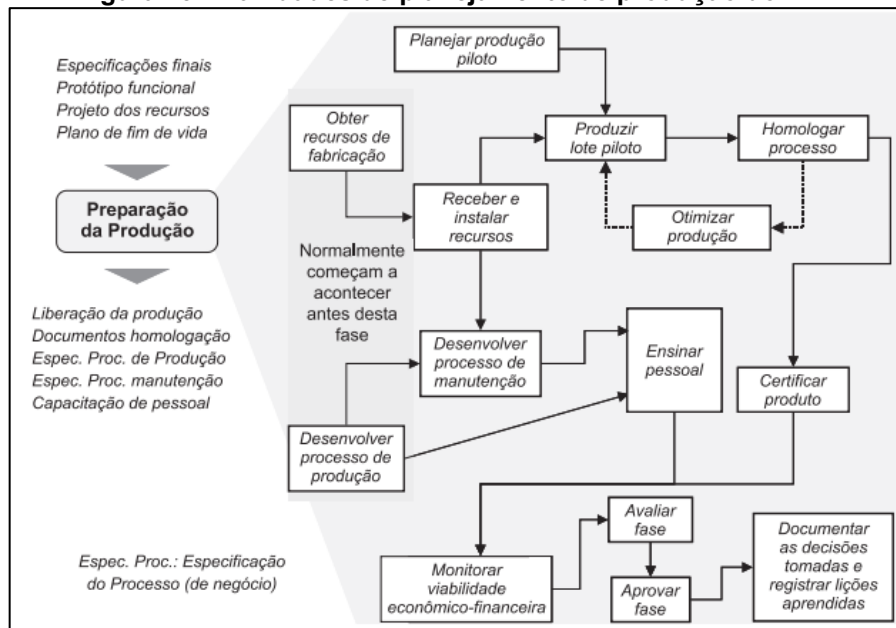
**Figura 28 - Atividades de planejamento de processos realizadas no projeto detalhado de DP**



Fonte: Rozenfeld et al. (2010)

Ainda segundo Rozenfeld et al. (2010), é possível identificar que a fase de planejamento de produção engloba atividades características ao segmento de usinagem, como a aprovação de lote piloto de produção e ações de otimização do processo. O diagrama da Figura 29 sintetiza as atividades de planejamento de produção segundo os autores.

**Figura 29 - Atividades de planejamento de produção do PDP**



Fonte: Rozenfeld et al. (2010)

Assim como o modelo de PDP de Rozenfeld *et al.* (2010), o qual não é direcionado especificadamente para processos de usinagem, mas pode ser facilmente empregado pelo segmento, também se faz necessário citar o Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP - *Advanced Product Quality Planning*).

O APQP é um processo de gestão do desenvolvimento de fornecimento de peças de produção, o qual é exigido no segmento automotivo por meio da norma IATF 16949 - *International Automotive Task Force* (INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA, 2021a). A referida norma não possui detalhamento sobre as atividades de desenvolvimento para produtos usinados especificamente, mas é empregada vastamente por organizações que oferecem estes serviços, tendo em vista que muitos componentes automotivos são usinados.

O APQP é composto por 5 fases: definição e planejamento do programa, desenvolvimento e projeto do produto, desenvolvimento e projeto do processo, validação do produto e processo, avaliação e melhoria contínua. Por se tratar de uma norma, o APQP é composto por 5 manuais que apresentam os requisitos detalhados, além da norma IATF 16949. Para a presente pesquisa o foco é direcionado a um dos manuais, o qual trata o Processo de Aprovação de Peça de Produção (PPAP), sendo que este contempla as ações de planejamento do processo de fabricação, testes e coleta e análise de dados, objetivando o atendimento das especificações de produto advindas de montadoras ou demais organizações que compõe a cadeia de abastecimento automotiva (INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA, 2021b).

O PPAP é composto por 18 elementos, sendo eles:

- Histórico do Desenho;
- Documento de Mudança de Engenharia Autorizada;
- Aprovação de Engenharia;
- DFMEA;
- Diagrama de Fluxo de Processo;
- PFMEA;
- Plano de Controle;
- Estudos da Análise do Sistema de Medidas (MSA);
- Resultados Dimensionais;
- Registros de Material / Teste de Performance;
- Estudos do Processo Inicial;



- Documentação dos Laboratórios Seleccionados;
- Relatório de Aprovação de Aparência;
- Amostra das Partes de Produção;
- Amostra mestra;
- Verificações Adicionais (dispositivo automático de entrada);
- Exigências Específicas do Cliente.

Apesar do modelo de PDP de Rozenfeld *et al.* (2010) detalhar de maneira abrangente as etapas de um processo de manufatura, e este ser viável ao processo de usinagem, foram buscados em periódicos científicos outros resultados sobre planos de processo de usinagem. Com isso, observou-se que as etapas destes processos, geralmente, são abordadas na temática sobre Planos de Processo (PP).

Fitzpatrick (2013), define o planejamento de processos de usinagem como: “Série de passos lógicos de uma ordem de serviço, escolhida para guiar um trabalho com segurança e eficiência.” Xia *et al.* (2018) afirma que o planejamento do processo é uma atividade voltada para transformar o projeto do produto em processos de manufatura, e determina as sequências de operação ideais para a produção.

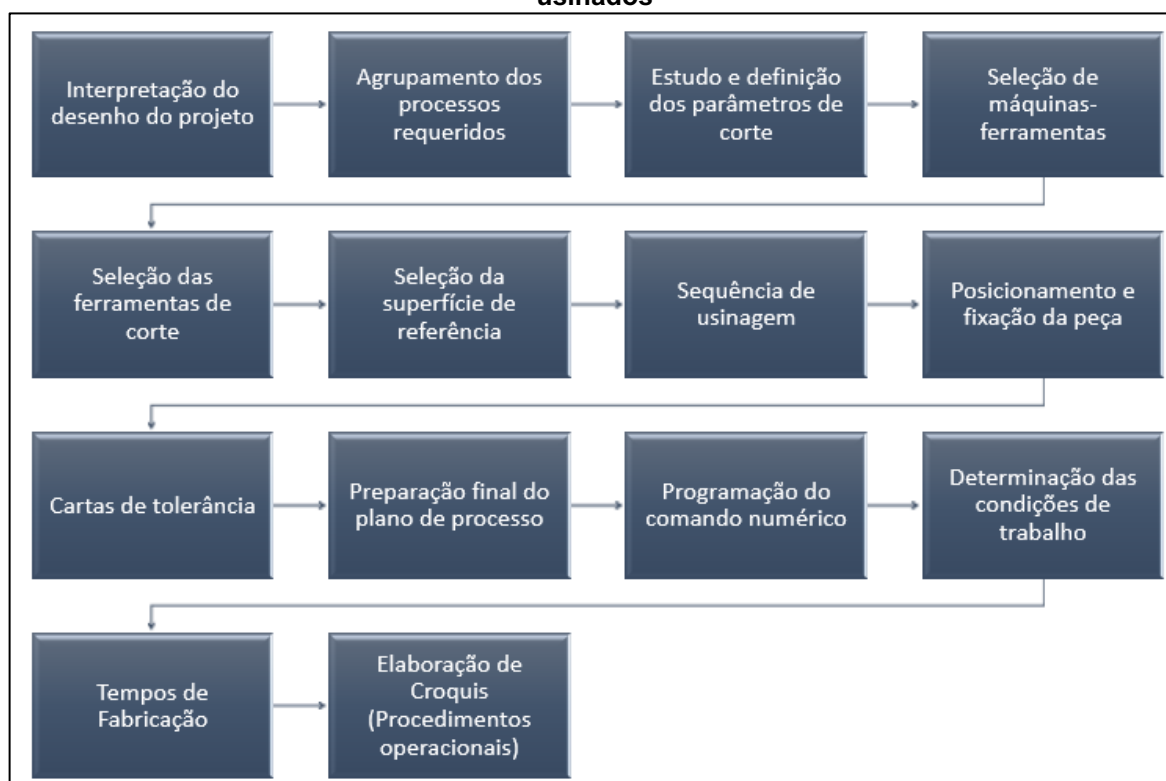
A partir desta constatação, foi realizada uma nova RBS (detalhamento sobre a metodologia empregada no capítulo 3), visando publicações sobre *Machining Process Planning* (Planejamento de Processos de Usinagem). Neste sentido, as pesquisas científicas sobre o desenvolvimento de produtos usinados recai, na grande maioria das vezes, apenas ao processo de planejamento das operações executadas, as otimizações requeridas e a consequente automação que vem sendo desenvolvida para minimizar o tempo de planejamento de operações. Observam-se que os principais fatores que impulsionam essas pesquisas são: produtos cada vez mais heterogêneos, ciclo de vida cada vez menores de produtos, atualizações constantes em relação a tecnologia de materiais, além da necessidade do atendimento a padrões de qualidade cada vez mais restritos.

Outro fator que impacta consideravelmente o segmento da usinagem de larga escala, é o formato da relação B2B, onde a grande maioria do setor encontra-se inserida (HELGOSON; KALHORI, 2012). Nessa relação, primeiramente avalia-se a possibilidade de atendimento ao projeto e às condições de fornecimento, sendo que a resposta deve ser ágil e condizente com o que poderá ser ofertado caso seja estabelecida a relação entre o cliente e fornecedor.

Neste sentido, Melo (2003) categoriza as atividades referentes ao planejamento de processo de usinagem em plano macro e de detalhamento das operações. O plano macro considera a rota de produção de um produto, sendo a base para o planejamento e controle da produção. O detalhamento de operações refere-se às informações utilizadas pela área de manufatura para auxiliar na fabricação do produto.

Na Figura 30 são apresentadas as categorias de atividades de gestão do desenvolvimento de produtos usinados segundo Melo (2003), o detalhamento destas atividades é apresentado no Apêndice E.

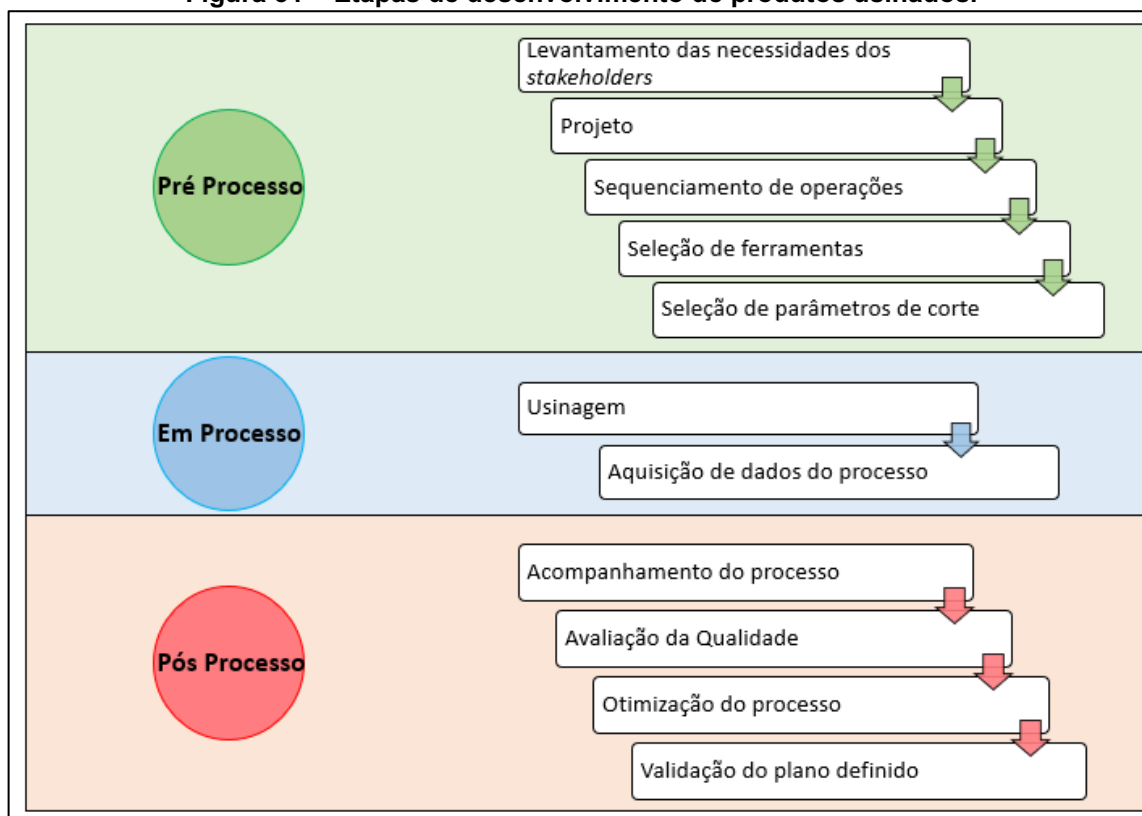
**Figura 30 – Categorias de atividades realizadas na gestão do desenvolvimento de produtos usinados**



Fonte: Adaptado do texto de Melo (2003)

Melo (2003) lista as categorias considerando o desenvolvimento de um produto desde a concepção da ideia. Como este estudo considera apenas o desenvolvimento do projeto de manufatura de produtos, algumas categorias foram adaptadas de acordo com esse tipo de planejamento. Helguson e Kalhori (2012) classificam as atividades do desenvolvimento de produtos usinados, em três fases: pré-processo, em processo e pós processo. A Figura 31 sintetiza estas fases e suas respectivas atividades.

**Figura 31 – Etapas de desenvolvimento de produtos usinados.**



Fonte: Traduzido de Helguson e Kalhori (2012)

Considerando os artigos resultantes da RBS, o Quadro 13 sintetiza as principais atividades vinculadas ao PP de usinagem.

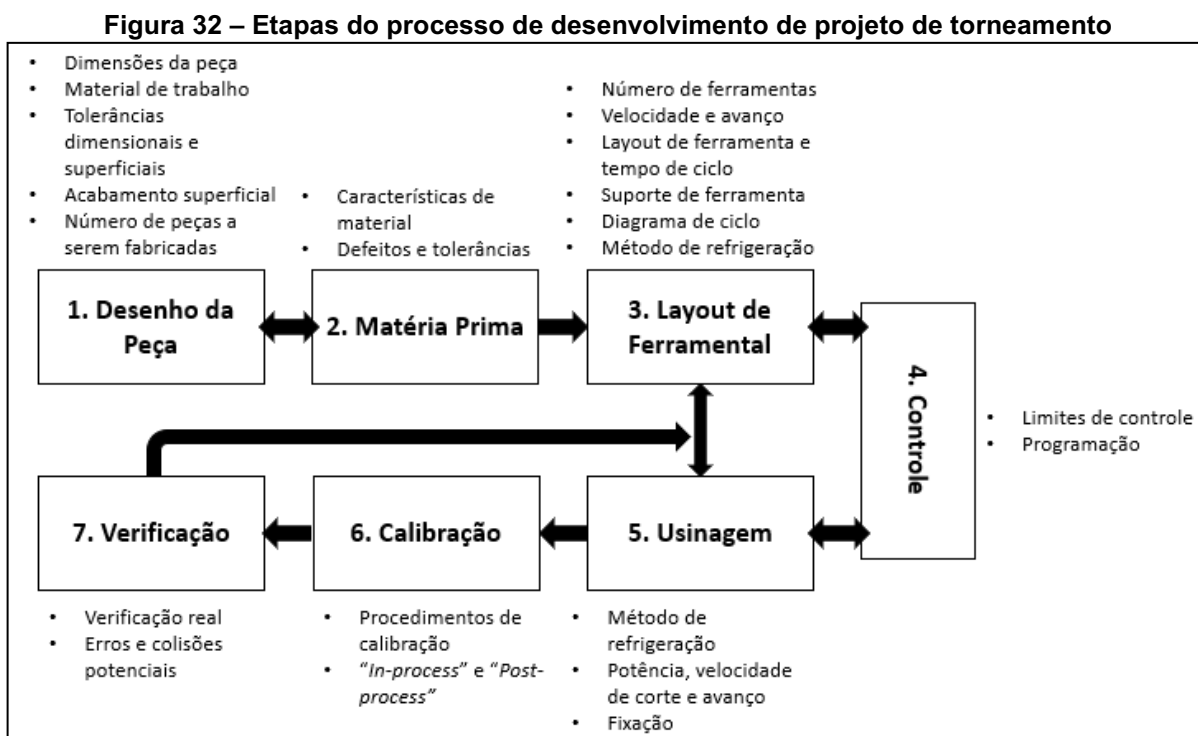
**Quadro 13 – Etapas consideradas no plano de processos de usinagem**

Referência	Etapas Consideradas no Planejamento do Processos de Usinagem
Butdee e Kunhirunbawon, 2020	Planejamento de seqüências de usinagem: tipo de operação, tipos de ferramentas e restrições relacionadas principalmente à recursos baseados na geometria.
Wang (2013)	Sequenciamento do processo, seleção de recursos (máquina e ferramenta de corte), atribuição dos parâmetros de corte, planejamento de operações de usinagem, otimização da operação e geração de código em comando numérico.
Xia <i>et al.</i> (2018)	O plano de processo de usinagem é composto pelos elementos: tipo de processo, operações realizadas, recursos e parâmetros relevantes.
Chang <i>et al.</i> (2000)	O plano de processo considerado pelos autores é direcionado ao levantamento dos aspectos dimensionais, análise sobre a dureza e resistência à temperatura do material usinado e a característica de superfície requerida da peça. A tolerância também é um fator considerado.
Helguson e Kalhori (2012)	Atividades de pré-processo: levantamento sobre os requisitos do cliente, projeto do produto, sequenciamento de operações, seleção de ferramentas, seleção dos parâmetros sobre o corte. Atividades denominadas como em processo: usinagem e coleta de dados do processo. Atividades pós-processo: verificação do processo, análise da qualidade, otimização do processo, validação do modelo.

Duda e Pobozniak (2017)	Estágio I) definição da estrutura generalizada do processo de fabricação fundamentada nas características geométricas e de fabricação do produto. Estágio II) esta etapa é composta pelo conjunto de ações: planejamento das formas intermediárias do produto; projeto da peça bruta (considera-se o tipo de peça a ser produzida, análise das características do material e de qualidade e as dimensões padrão de peças brutas para processamento). Com base nessas informações determinam-se os meios de fixação da peça. Estágio III) com os resultados do estágio II, e considerando as características de capacidade do processo, são definidas as etapas do plano de processo, em que são detalhadas as sequências de operação, <i>setups</i> , posições e ciclos de usinagem.
Gao, Mou e Peng (2016)	Características básicas (material, tamanho, características de formato da peça e tolerâncias); Parâmetros (centro de usinagem, ferramentas de corte, etapas de usinagem e estratégia de trocas de ferramentas); Processo (forças de corte, vibração, desgaste de ferramenta e limitações de máquina); Resultados (deformação de usinagem, qualidade superficial e tempo de usinagem).
Zhao e Xu (2010)	Este artigo apresenta a particularidade de considerar o planejamento de usinagem conjunto ao planejamento de inspeção da qualidade.
Wang, Givhchi e Wang (2017)	Sequenciamento do processo, seleção de máquina e ferramenta de corte, planejamento das etapas de usinagem, otimização da operação, geração do comando numérico, bem como planejamento sobre parâmetros e fixação.
Feng, Stouffer e Jurrens (2005)	Proposta de uma relação entre os dados que compõe o planejamento. Neste sentido, o planejamento de processo é relacionado a: parâmetros de processo, dados de capacidade para seleção de ferramentas de corte, dados sobre o material e sobre a ferramenta de corte, capacidade do processo e a programação do comando numérico da máquina.
Denkena <i>et al.</i> (2007)	Pedido e detalhes do projeto; seleção de matéria prima e “forma”; seleção da tecnologia do processo; sequenciamento de processos; preparo do plano de processamento. Neste plano, inclui-se: seleção das operações de usinagem, sequenciamento das operações, seleção das ferramentas de corte, determinação dos requisitos de processo, parâmetros de corte, seleção/ projeto de gabaritos e acessórios (fixação), planejamento de rota de corte, estimativa de custos e tempos de processamento. Programação de CNC e documentação do processo são gerados ao fim do planejamento do processo.
Meissner e Aurich (2019)	Utilizando o desenho da peça a ser processada, os processos são escolhidos; as máquinas, ferramentas e acessórios são escolhidos na sequência, assim como são determinados os parâmetros do processo. Com isso, programa-se a máquina para executar o processo assim como são definidos os planos de produção.
Zhang <i>et al.</i> (2019)	O planejamento de processos inteligente abrange três estágios chave (Tecnologia, Transformação e Decisão). Cada estágio chave apresenta as seguintes atividades: recebimento de pedidos de produção, interpretação do desenho da peça, análise detalhada dos requisitos da peça e proposta teórica do processo. Por meio da análise do ambiente real e virtual do processo, são verificados os parâmetros de máquina, ferramenta de corte e de processo. A decisão é embasada pela simulação de produção visando a otimização.
Kumar (2017)	Aborda os principais conjuntos de atividades realizadas, sendo elas: análise das condições de projeto (estudo sobre as características do material usinado, geometria da peça), seleção de ferramentas, definição sobre os parâmetros de corte, definição sobre as etapas de usinagem, definição sobre os controles de processo.

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Davim (2011) apresenta uma abordagem sobre as atividades de planejamento dos processos de usinagem direcionada especificamente para cada tipo de operação. Para operações de torneamento, segundo o autor, embora cada projeto de torneamento deva seguir um caminho único, os recursos básicos deste tipo de processo de usinagem são os mesmos, ilustrados na Figura 32.

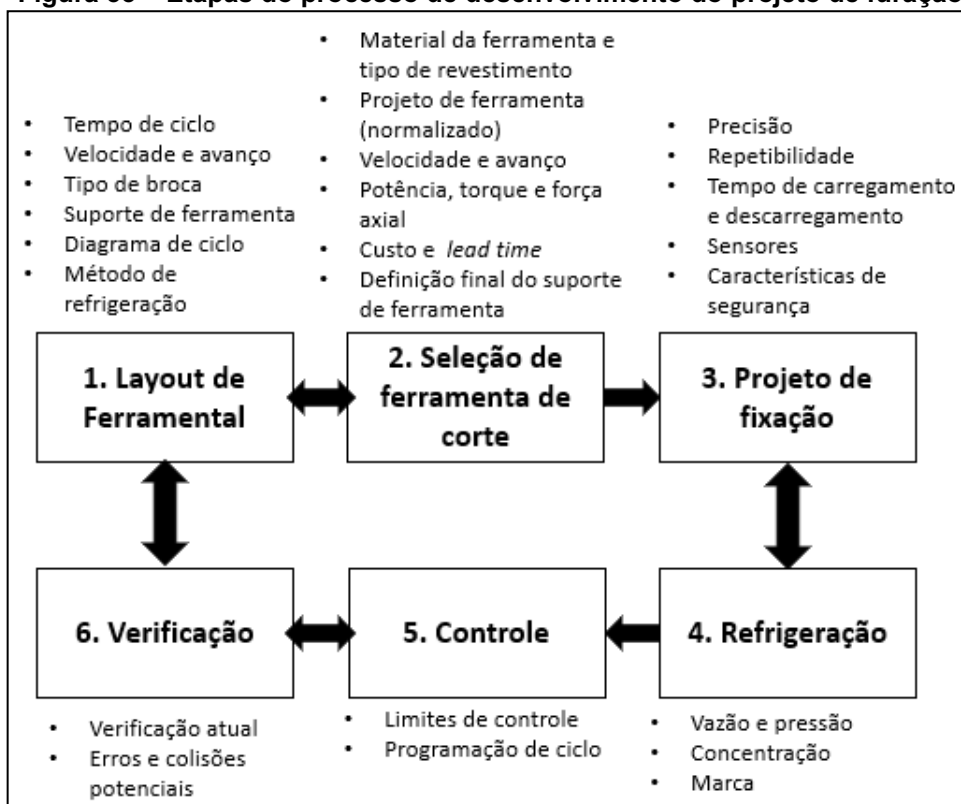


Fonte: Adaptado de Davim (2011)

O planejamento do processo de fresamento pode ser representado pelas mesmas etapas do processo de torneamento. Apesar de se tratar de processos com características finais de peça de trabalho e ferramentas de corte bastante distintas, as macro etapas do processo são similares, o que possibilita a utilização do modelo citado.

O projeto do processo de furação, segundo Davim (2011), é mais simples pois pode ser considerado um processo acessório aos demais. A operação de furação ocorre em peças de trabalho que geralmente são torneadas ou fresadas, o que acaba eliminando as etapas referentes a desenho da peça, definição de material, controle e calibração, pois são atividades executadas em outros processos de usinagem mais complexos. A Figura 33 ilustra as etapas do projeto do processo de furação.

**Figura 33 – Etapas do processo de desenvolvimento do projeto de furação**



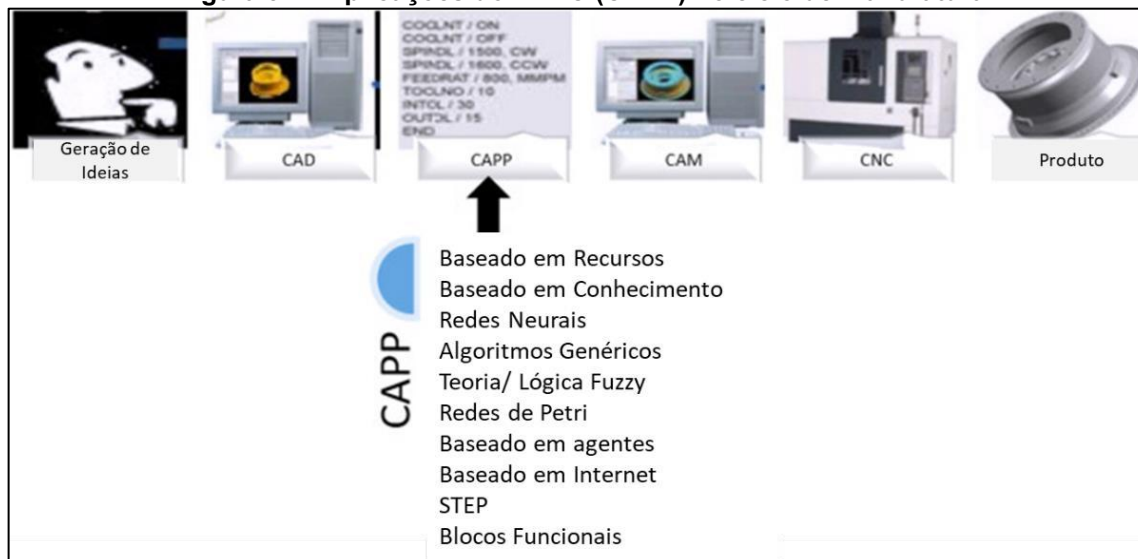
Fonte: Adaptado de Davim (2011)

Na atividade prática industrial, segundo Melo (2003), devido a elevada diversidade e volume de informações envolvidas, cada organização faz o plano de processo de acordo com a realidade atual em que se encontra. O autor refere-se aos planos de operação da usinagem, e não às atividades globais que antecedem e sucedem a operação, entretanto, observa-se que estas atividades de gestão do desenvolvimento também ocorrem de acordo com experiências e práticas de cada organização. Butdee e Kunhirunbawon (2020) afirmam que, na maioria das vezes, o planejamento do processo de usinagem é realizado baseado em experiências.

Evidentemente, desde a década de 2000 as pesquisas sobre PP de usinagem têm se concentrado em métodos que tornam as atividades desenvolvidas mais dinâmicas e ágeis, o que remete ao Planejamento de Processo Auxiliado por Computador (PPAC) – *Computer-Aided Process Planning*, (CAPP), Figura 34. Nota-se que, desde meados da década de 2000, inúmeros métodos visam a automação do PP. O objetivo principal destas propostas é diminuir a dependência única da experiência de um projetista sobre o projeto de processo de usinagem. Para isso, busca-se o uso de banco de dados com o histórico referente ao projeto e

processamento de produtos usinados, ou simulações que possam, de maneira ágil, oferecer dados suficientes para o PP.

**Figura 34 – Aplicações do PPAC (CAPP) no ciclo de manufatura**



**Fonte: Traduzido de Yusof e Latif (2014)**

Estas evidências vão de encontro com o levantamento realizado por Kumar (2017), o qual afirma que o PPAC possui abordagens variantes e generativas. A abordagem variante é baseada na similaridade com uma família de peças usando percepção de tecnologia de grupo. Já na abordagem generativa, o plano de processo é desenvolvido com informações de geometria da peça, lógica de decisão e algoritmos.

Wang (2013) apresenta uma vasta revisão teórica sobre o planejamento de processos de usinagem. Relata estudos direcionados ao PPAC, onde são citadas abordagens como algoritmo genérico, abordagem baseada em restrições e seleção de parâmetros de corte. Os autores afirmam que as abordagens existentes, até a realização do citado estudo, abrangiam problemas de tomada de decisão envolvidos no planejamento do processo, mas eram centralizadas na tomada de decisão, sendo estáticas e irrealistas sobre as condições de recursos e ambiente produtivo.

Berger *et al.* (2009) classifica os principais métodos empregados no planejamento de operações de usinagem, ilustrados no diagrama da Figura 35.

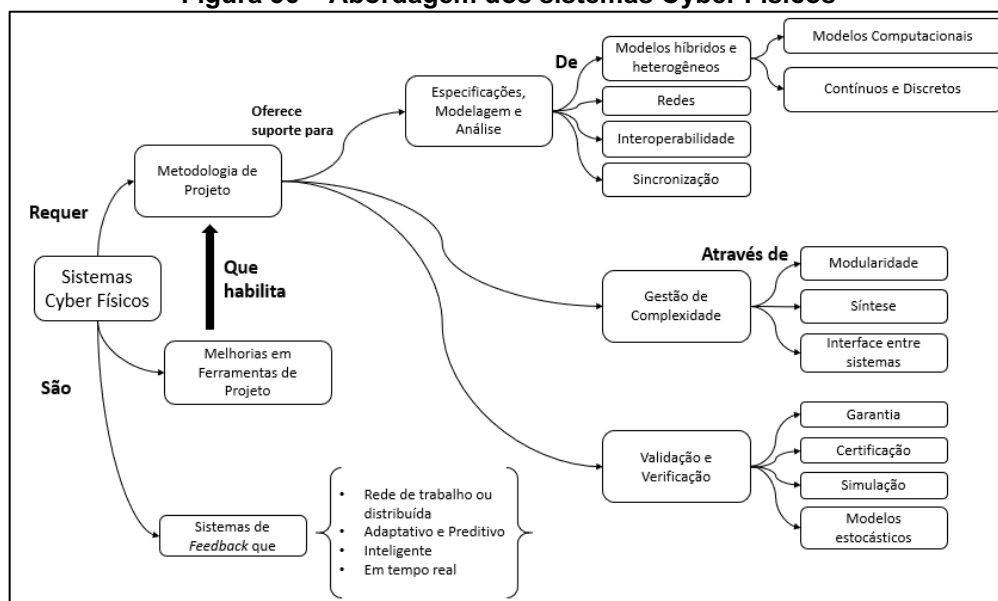
Figura 35 – Classes de métodos para planejamento de operações de usinagem



Fonte: Adaptado de Berger *et al.* (2009)

É evidente que as atividades de planejamento dos processos de usinagem não são abordadas de maneira isolada, com foco exclusivo na operacionalização. Atualmente o foco desta temática contempla metodologias ágeis sobre a tomada de decisão no desenvolvimento dos processos fortemente fundamentadas em dados. Wang, Törngren e Onori (2015) definem as abordagens dos sistemas cyber físicos, e o PPAC pode ser claramente incluso, conforme representação do diagrama da Figura 36.

Figura 36 – Abordagem dos sistemas Cyber Físicos



Fonte: Adaptado de Wang, Törngren e Onori (2015)



Portanto, os sistemas Cyber Físicos abrangem ações de validação e verificação, gestão da complexidade, além de outras atividades relacionadas a metodologia de projeto. Neste contexto, ações de controle de processos, principalmente os controles em tempo real, como por exemplo o controle de estabilidade dos processos por meio de índices estatísticos, podem ser relacionados. O controle estatístico de processos e a análise sobre a capacidade e estabilidade, são ferramentas muito empregadas e que podem ser migradas aos diversos métodos cyber físicos em desenvolvimento.

Pretende-se, portanto, no próximo tópico abordar o conceito sobre capacidade de processos visando a proposta do índice de controle para o modelo de DFSS para usinagem.

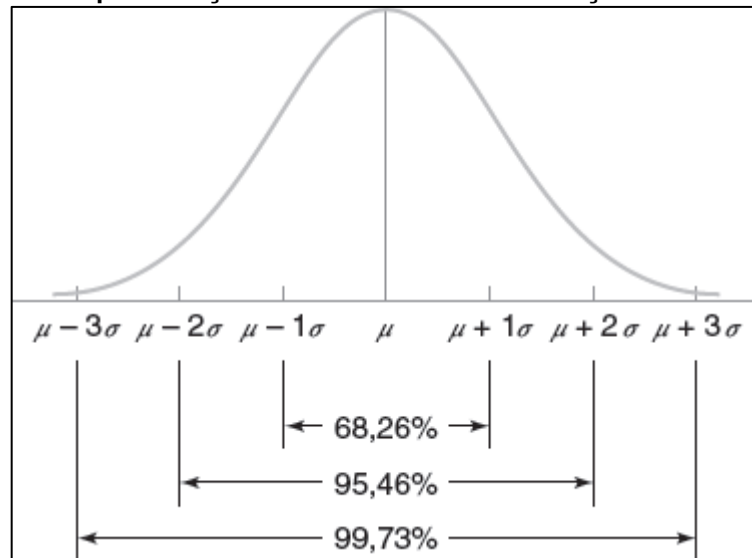
## **2.5 Análise sobre a capacidade de processos**

No DFSS, como já apresentado anteriormente, um dos principais diferenciais é o controle das características críticas (CTQ) desde as fases iniciais de desenvolvimento. No DFSS para usinagem proposto nesta pesquisa, a definição do CTQ nas fases iniciais do desenvolvimento está diretamente relacionada aos índices de capacidade do processo. Neste tópico, portanto, é descrito o método de análise de capacidade de processos que foi utilizado, proposto por Kaya e Kahraman (2011). Os critérios para seleção do método estão descritos no capítulo referente a metodologia. Os referidos autores propõem a análise de capacidade de processos considerando parâmetros *Fuzzy*, o que atende a proposta da presente pesquisa, visto que os dados considerados são baseados em histórico e, portanto, apresentam um grau de incerteza sobre o estado atual de capacidade de um processo.

O índice  $C_p$ , denominado índice de precisão, considera a relação entre a faixa de especificação (limite superior e inferior de especificações) e a dispersão de um processo (desvio padrão). A dispersão de um processo é obtida analisando as variações de saídas resultantes, em um processo de usinagem, a variação dimensional, ou do índice de rugosidade, de uma mesma característica produzida representa esta dispersão. O índice  $C_p$ , portanto, indica o quanto o processo é capaz de atender os limites de especificação, considerando um limite de variação que contemple a faixa  $6\sigma$  de desvio-padrão.

A distribuição normal de dados (Figura 37) é considerada uma das mais importantes tanto na teoria quanto na prática, e recebe denotação  $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ , onde  $x$  é normalmente distribuída com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . Interpreta-se que 68,26% dos valores populacionais estão no intervalo de limites da média mais ou menos um desvio-padrão ( $\mu \pm 1\sigma$ ); 95,46% dos valores estão no intervalo entre os limites da média e mais ou menos dois desvios-padrão ( $\mu \pm 2\sigma$ ); e 99,73% dos valores populacionais estão dentro dos limites definidos pela média mais ou menos três desvios-padrão ( $\mu \pm 3\sigma$ ) (MONTGOMERY, 2016). Quando a prática dos “6 $\sigma$ ” é citada, espera-se que os valores mensurados de representatividade de uma determinada característica de qualidade estejam entre os limites de mais ou menos 3 desvios, e por isso da indicação do 6 $\sigma$ .

**Figura 37 - Representação da forma de uma distribuição normal de dados**



**Fonte: Montgomery (2016)**

Portanto, o índice  $C_p$  pode ser encontrado por meio da relação apresentada na Equação 15.

$$C_p = \frac{LSC - LIC}{6\sigma} \quad (15)$$

Onde:

$LSC$  = Limite superior de controle;

$LIC$  = Limite inferior de controle;

$\sigma$  = desvio padrão;

O valor de  $C_p$  indica o desempenho do processo, entretanto, não leva em consideração a localização da média do processo em relação aos limites de especificação. O Quadro 14 indica 6 condições de qualidade fundamentadas no  $C_p$ .

**Quadro 14 - Valores de referência para o  $C_p$**

Condição de Qualidade	Valo de $C_p$
Muito excelente	$2,00 \leq C_p$
Excelente	$1,67 \leq C_p \leq 2,00$
Satisfatório	$1,33 \leq C_p \leq 1,67$
Capaz	$1,00 \leq C_p \leq 1,33$
Inadequado	$0,67 \leq C_p \leq 1,00$
Ruim	$C_p \leq 0,67$

Fonte: Tsai e Chen (2006)

Tendo em vista que o índice  $C_p$  está voltado unicamente a dispersão do processo, o índice  $C_{pk}$  surgiu para fornecer uma indicação da variabilidade, refletindo o quanto um processo pode se encaixar nos limites de especificação, levando em consideração a localização média do processo (KAYA e KAHRAMAN, 2011). O índice  $C_{pk}$  pode ser obtido aplicando-se a Equação 16.

$$C_{pk} = \min\left(\frac{\mu - LIC}{3\sigma}; \frac{LSC - \mu}{3\sigma}\right) \quad (16)$$

Onde:

$\mu$  = média populacional

$LSC$  = Limite superior de controle (especificação);

$LIC$  = Limite inferior de controle (especificação);

$\sigma$  = desvio padrão;

A Figura 38 sintetiza as equações que podem ser empregadas para determinar os limites de controle para gráficos de variáveis, segundo Montgomery (2016). É importante ressaltar que os limites de controle não se referem aos limites de tolerância de projeto, e sim aos limites confiáveis de variação do processo.

Quando  $C_p$  é igual ao  $C_{pk}$ , o processo está centrado no ponto médio das especificações, quando o índice  $C_p$  é superior a  $C_{pk}$ , o processo está descentrado. Quando o índice  $C_{pk}$  é negativo, a média do processo está fora dos limites de especificação (MONTGOMERY, 2016).

**Figura 38 - Síntese de equações para cálculo de limites de controle estatístico para gráficos de variáveis**

Quando há valores de referência		
Gráfico	Linha Central	Limites de Controle
$\bar{x}$ ( $\mu$ e $\sigma$ dados)	$\mu$	$\mu \pm A\sigma$
R ( $\sigma$ dado)	$d_2\sigma$	LSC = $D_2\sigma$ , LIC = $D_1\sigma$
s ( $\sigma$ dados)	$c_4\sigma$	LSC = $B_6\sigma$ , LIC = $B_5\sigma$

Quando não há valores de referência		
Gráfico	Linha Central	Limites de Controle
$\bar{x}$ (usando R)	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} \pm A_2\bar{R}$
$\bar{x}$ (usando s)	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} \pm A_3\bar{s}$
R	$\bar{\bar{R}}$	LSC = $D_4\bar{R}$ , LIC = $D_3\bar{R}$
s	$\bar{\bar{s}}$	LSC = $B_4\bar{s}$ , LIC = $B_3\bar{s}$

Valores tabelados em Montgomery (2016):  
d2, c4, D1, D2, D3, D4, A2

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}}$$

$$B_5 = c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}} \quad B_6 = c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}$$

$$A_3 = \frac{3}{c_4\sqrt{n}}$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4\sqrt{2(n-1)}} \quad B_4 = 1 + \frac{3}{c_4\sqrt{2(n-1)}}$$

Fonte: Adaptado do texto de Montgomery (2016)

Outros índices de controle foram propostos, como o índice  $C_{pm}$  (HSIANG; TAGUCHI, 1985), índice  $C_{pmk}$  (PEARN; KOTZ; JOHNSON, 1992) e o índice  $C_a$  (KAYA; KAHRAMAN, 2010). Entretanto, na presente pesquisa, a variação *Fuzzy* dos índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  atendem as características de dados estatísticos obtidos nos processos a que se destina o modelo proposto.

Kaya e Kahraman (2011) propõem os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ , onde a média e desvio padrão são considerados números *Fuzzy*, indicados por  $\tilde{\mu}$  e  $\tilde{\sigma}^2$  respectivamente. Os dados devem ser obtidos de uma população que possui função densidade de probabilidade  $N(\mu, \sigma^2)$ , sendo a amostra coletada de maneira adequada, em número e tamanho suficientemente confiável. Com isso, calcula-se  $\tilde{\mu}$  e  $\tilde{\sigma}^2$  de acordo com as Equações 17, 18 e 19.

$$\tilde{\sigma}^2(\alpha) = \left[ \frac{(n-1)s^2}{[1-\alpha]F_{D; 0,005}^2 + (n-1)\alpha}; \frac{(n-1)s^2}{[1-\alpha]F_{E; 0,005}^2 + (n-1)\alpha} \right]; 0,01 \leq \alpha \leq 1 \quad (17)$$

Sendo:

$n$  = tamanho da população de dados;

$s^2$  = variância populacional

$[1 - \alpha]F_{D; 0,005}$  = representa o lado direito da função densidade;

$[1 - \alpha]F_{E; 0,005}$  = representa o lado esquerdo da função densidade;

Sabendo que  $\mu_{\tilde{\sigma}}(\alpha) = [\mu_{e,\tilde{\sigma}}(\alpha) \mu_{d,\tilde{\sigma}}(\alpha)]$ , onde  $\mu_{e,\tilde{\sigma}}(\alpha)$  e  $\mu_{d,\tilde{\sigma}}(\alpha)$  representam os dois lados da estimativa *Fuzzy* de  $\mu$  (esquerdo e direito respectivamente), tem-se que:

$$\mu_{e,\tilde{\sigma}}(\alpha) = \min\left(\bar{x} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma_i(\alpha)}{\sqrt{n}}\right) \quad i = 1,2, \quad (18)$$

$$\mu_{d,\tilde{\sigma}}(\alpha) = \max\left(\bar{x} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma_i(\alpha)}{\sqrt{n}}\right) \quad i = 1,2, \quad (19)$$

Onde:

$\bar{x}$  = média amostral

$Z_{\alpha/2}$  = distribuição de probabilidade (distribuição normal)

$\sigma_i(\alpha)$  = lado direito e esquerdo da variância  $\tilde{\sigma}^2$

Em relação aos limites de especificação, considera-se números *Fuzzy* triangulares – *Triangular Fuzzy Numbers* (TFN), sabendo que o limite superior  $LS\tilde{C} = TFN(s_1, s_2, s_3)$ , e inferior  $LI\tilde{C} = TFN(i_1, i_2, i_3)$ , são obtidos utilizando as relações apresentadas na Equação 20 e 21:

$$LS\tilde{C}(\alpha) = [(s_2 - s_1)\alpha + s_1; (s_2 - s_3)\alpha + s_3] \quad (20)$$

$$LI\tilde{C}(\alpha) = [(i_2 - i_1)\alpha + i_1; (i_2 - i_3)\alpha + i_3] \quad (21)$$

Kaya e Kahraman (2011) definem os valores de  $s_1, s_2, s_3$  como sendo o valor mediano o valor da especificação incerta, por exemplo, uma determinada medida de limite inferior sendo 175,165 (mm) - denominada como aproximada - é representada em TFN como (175,164; 175,165; 175,166).

Com isso, é possível calcular o índice  $C_p$  de acordo com a Equação 22.

$$\tilde{C}_p(\alpha) = \frac{LS\tilde{C}(\alpha) - LI\tilde{C}(\alpha)}{6\sqrt{\tilde{\sigma}^2(\alpha)}} \quad (22)$$

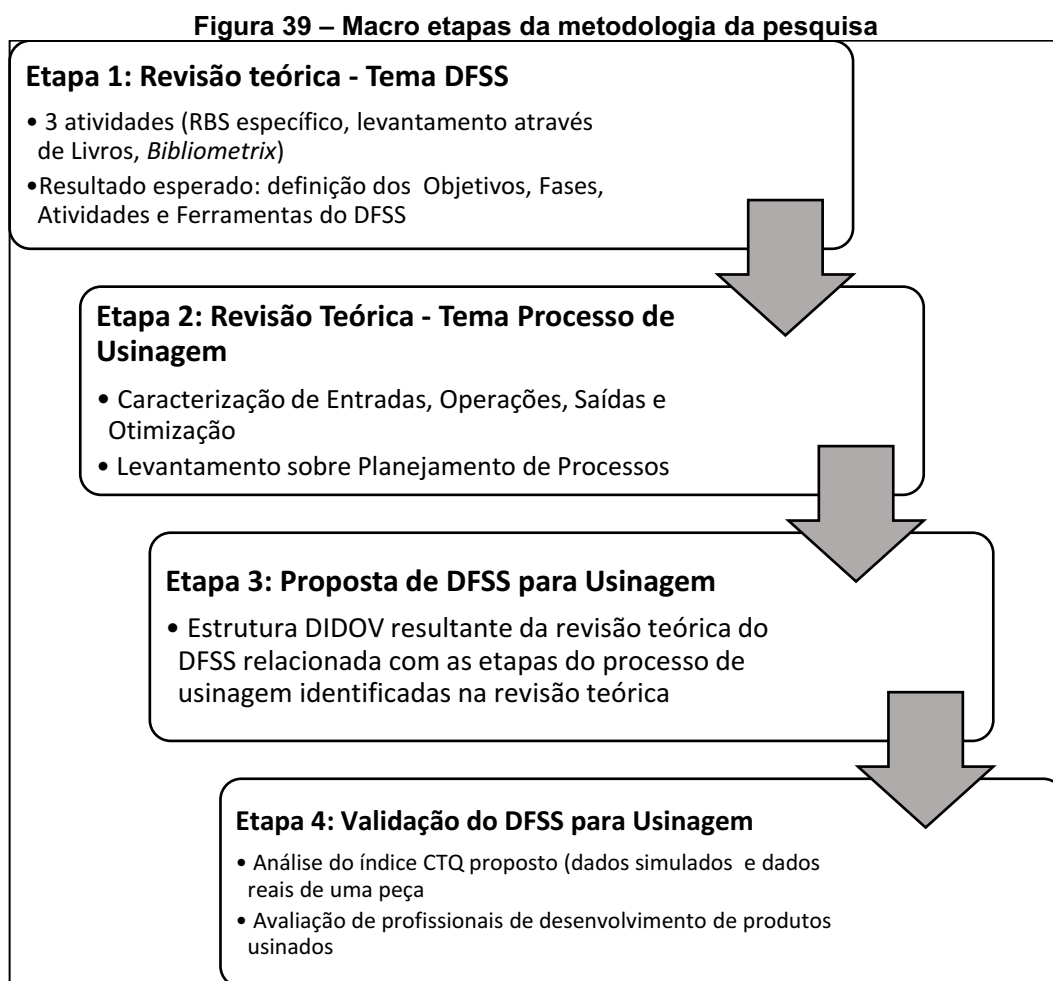
Em relação ao índice  $C_{pk}$ , segundo Kaya e Kahraman (2011), deve-se considerar  $C_{pk} = \min\{\tilde{C}_{pi}(\alpha); \tilde{C}_{ps}(\alpha)\}$ , onde:

$$\tilde{C}_{pi}(\alpha) = \left( \frac{\mu_{e,\tilde{\sigma}}(\alpha) - LIC_d(\alpha)}{3\sigma_d(\alpha)}; \frac{\mu_{d,\tilde{\sigma}}(\alpha) - LIC_e(\alpha)}{3\sigma_e(\alpha)} \right) \quad (23)$$

$$\tilde{C}_{ps}(\alpha) = \left( \frac{LSC_e(\alpha) - \mu_{d,\tilde{\sigma}}(\alpha)}{3\sigma_d(\alpha)}; \frac{LSC_d(\alpha) - \mu_{e,\tilde{\sigma}}(\alpha)}{3\sigma_e(\alpha)} \right) \quad (24)$$

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada apresenta as macro etapas sintetizadas na Figura 39.



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

O referencial teórico desta pesquisa foi construído empregando um método sistêmico de busca e filtragem de artigos científicos e livros referentes aos temas principais que norteiam o problema de pesquisa: DFSS e usinagem convencional de metais. Ambos os temas foram explorados em três bases de dados: *Scopus*, *ScienceDirect* e *Web of Science*. A metodologia de RBS utilizada segue as 4 etapas citadas por Borrego, Foster e Froyd (2015): pesquisa, seleção, qualificação e síntese dos resultados.

A busca referente a cada um dos temas foi distinta em função da diferença de especificidade de cada um, e da conseqüente quantidade de publicações resultantes. O DFSS é um tema recente, são poucas as variações encontradas de publicações sobre esta metodologia. Em contrapartida, o tema “Usinagem” apresenta uma infinidade de abordagens o que leva a um número elevado de resultados, mesmo

quando limitado o período de publicações a partir do ano de 2010. Desta forma, o detalhamento sobre a revisão teórica de cada temática será descrito separadamente nos próximos tópicos.

### 3.1 Revisão teórica sobre DFSS

A revisão teórica sobre DFSS foi realizada por meio de três macro fases:

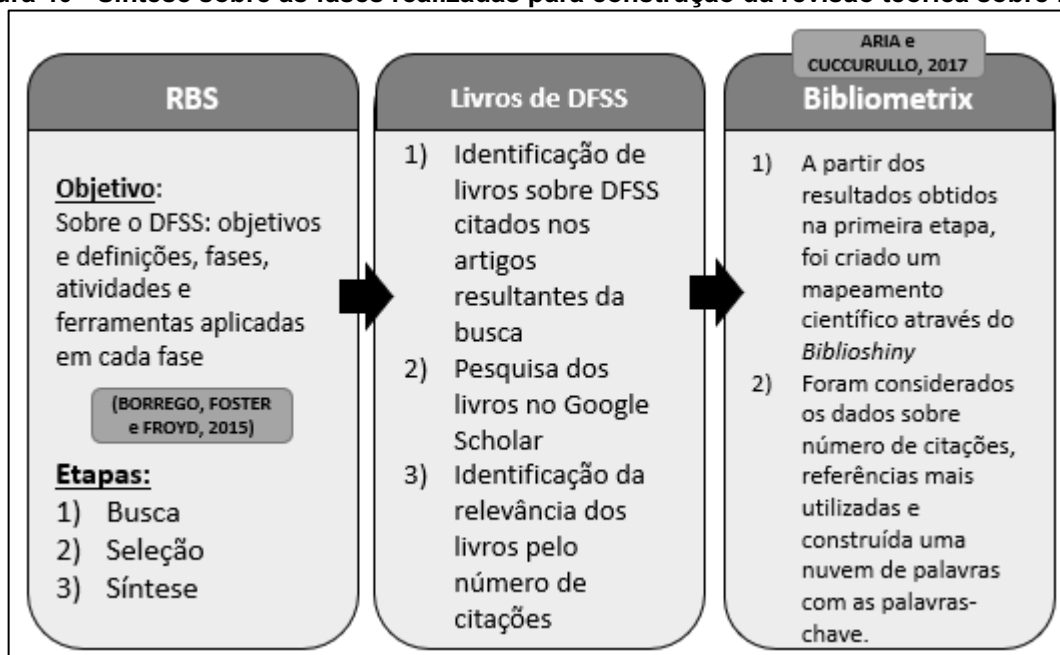
- Realização de uma RBS para o levantamento completo sobre DFSS seguindo as fases citadas por Borrego, Foster e Froyd (2015);
- Seleção, utilizando o Google Acadêmico, de livros específicos sobre DFSS, que foram citados nos estudos resultantes da RBS, ou livros com uma quantidade relevante de citações de acordo com a mesma plataforma;
- Aplicação da ferramenta de mapeamento científico *Bibliometrix* (ARIA e CUCCURULLO, 2017), com a versão para navegador de *web Biblioshiny*.

Considerando o resultado da RBS o objetivo foi listar, em relação ao DFSS: as definições e objetivos, os grupos de fases que o compõe, as principais atividades executadas na metodologia, assim como as ferramentas aplicadas em cada fase de desenvolvimento. A segunda fase foi estabelecida no decorrer da análise dos estudos levantados, quando se observou que uma definição mais ampla sobre as atividades e ferramentas seria obtida analisando livros específicos sobre DFSS, pois os artigos, em sua maioria, relatavam as atividades ou ferramentas mais apropriadas ao objetivo do artigo.

Por fim, com o intuito de uma análise bibliométrica mais aprofundada dos resultados da RBS, assim como a relação entre os livros e os estudos levantados, definiu-se a terceira fase em que os resultados de duas bases de dados foram analisados utilizando o *Bibliometrix*, na versão *Biblioshiny*. A Figura 40 apresenta o diagrama que sintetiza as principais atividades realizadas objetivando a revisão teórica.



Figura 40 - Síntese sobre as fases realizadas para construção da revisão teórica sobre DFSS



Fonte: Autoria própria (2022)

O Quadro 15 sintetiza as etapas de execução da RBS, visando determinar os objetivos e definições, fases, atividades e ferramentas aplicadas em cada fase do DFSS.

Quadro 15 – Síntese das etapas da RBS sobre DFSS

Etapa	Ações realizadas	Resultados esperados
Pesquisa	Definição das bases de dados para busca: <i>Web of Science</i> , <i>ScienceDirect</i> e <i>Scopus</i> .	Um conjunto vasto de artigos, capítulos de livros, e demais materiais disponíveis nas bases de dados, todos relacionados a DFSS.
	Termos utilizados para busca: “ <i>Design for Six Sigma</i> ”; “DFSS”	
	Operadores booleanos: (AND) – Tendo em vista que alguns artigos podem trazer apenas a sigla em título, resumo ou palavras chaves, foi condicionada a busca para encontrar não somente o termo por extenso, mas também sua correspondência em sigla.	
Seleção	Considerados apenas artigos de periódicos	Apenas artigos de periódicos e referentes ao período a do ano de 2008 a 2020, o que filtra consideravelmente os resultados. A ordenação dos resultados em função da relevância facilita a análise e seleção de artigos com maior destaque científico (o que não exclui a análise de artigos considerados com pouca relevância pela base de dados).
	Período de publicação: 2008 até o momento da realização desta etapa da pesquisa (início de 2020)	
	Áreas de concentração: <i>Manufacturing Engineering</i> , <i>Industrial Engineering and Industrial Management</i>	
	Ordem de exibição dos resultados: pela relevância do artigo (decrecente)	
	Selecionados os artigos com acesso disponível aos autores da pesquisa	
Qualificação dos resultados	Nesta etapa da RBS foi percebido um número pequeno de resultados após a realização da etapa de seleção. Logo, optou-se na leitura de todos os resultados obtidos até esta fase, para seleção dos artigos que pudessem	Seleção final de artigos considerados na revisão teórica.

	contribuir significativamente com o objetivo da RBS.	
Síntese	Para a síntese, observou-se em cada um dos artigos resultantes da etapa anterior: - Há uma definição clara da metodologia? - São descritos os objetivos da aplicação da metodologia? - Quais são as fases de DFSS consideradas pelo artigo? - Quais são as atividades de DFSS consideradas? - Quais foram as ferramentas aplicadas em cada fase do DFSS?	Um conjunto de informações abrangente que subsidia o objetivo de sintetizar todas as características da metodologia em um único modelo teórico.

**Fonte: A autoria própria (2022)**

A busca por livros sobre DFSS foi realizada devido a necessidade observada de um conjunto mais amplo e completo de atividades e ferramentas do DFSS, além dos que foram encontrados no resultado da RBS. Com a leitura dos artigos, foi constatado que a maioria relatava apenas atividades e ferramentas que eram mais adequadas ao produto que estava sendo desenvolvido, ou analisado, em cada artigo.

Primeiramente, foram identificados quais livros foram citados, sendo considerados apenas os específicos sobre o tema DFSS. Os livros foram pesquisados no Google Scholar, com o objetivo de identificar a relevância destes títulos em relação ao número de citações. Alguns títulos adicionais foram incluídos na pesquisa, pois foram encontrados através por meio desta ferramenta como sendo livros de grande relevância e que não haviam sido citados nos artigos resultantes da RBS. Por fim, foi verificada a disponibilidade de acesso aos títulos listados, e considerados os que foi possível ter acesso integral. A lista completa dos livros resultantes é disponibilizada no Apêndice A.

Para analisar o mapeamento científico dos resultados obtidos na RBS, optou-se pela ferramenta *Biblioshiny* que é uma versão para web do *Bibliometrix* de Aria e Cuccurullo (2017). Foram encontradas duas limitações para análise por meio desta ferramenta. A primeira refere-se a análise conjunta de dados resultantes de duas bases de dados distintas, no caso deste artigo em específico, as bases *Scopus* e *Web of Science*. A segunda limitação refere-se a não haver a possibilidade, na ferramenta, de inclusão dos dados resultantes da base de dados do *ScienceDirect*, entretanto, foi possível encontrar os artigos desta base em outras.

Com a ferramenta foram coletados os dados dos artigos, em relação ao impacto de acordo com o número de citações (dados apresentados no Apêndice A) e as referências mais utilizadas nestes estudos. Ao todo, foram indicadas 722

referências, entretanto, a contabilização não descarta resultados replicados. As 10 principais referências utilizadas em comum pelos artigos são:

- Antis, Slusky e Creveling (2003) e Yang e El-Haik (2003) – 9 vezes citados nas referências;
- Tennant (2002) - 6 vezes citado nas referências;
- Koch, Yang e Gu (2004), Mader (2002), Brue e Launsby (2003), Shahin (2008) - 5 vezes citados nas referências;
- Hasenkamp e Olme (2008) – 3 vezes citados nas referências;
- Gremyr (2005) e Mader (2003) – 2 vezes citados nas referências.

Para verificar a convergência e relevância dos temas abordados entre os estudos, foi obtida a *Word Cloud* com as palavras chaves dos artigos (Figura 41).

Figura 41 - *Word Cloud* obtida pelo *Biblioshiny*, considerando as palavras-chave mais citadas no banco de dados analisado sobre DFSS



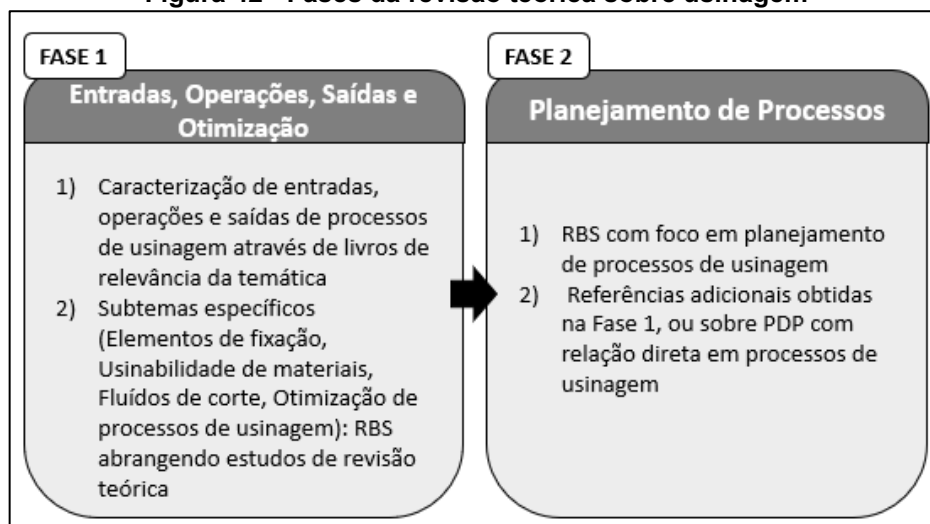
Fonte: Figura obtida pela autora empregando o *Biblioshiny* – *Bibliometrix* (2019)

A metodologia de levantamento teórico sobre usinagem é apresentada no próximo tópico.

### 3.2 Revisão teórica sobre usinagem

A revisão teórica sobre usinagem foi realizada em duas fases distintas (Figura 42). A primeira fase foi direcionada ao estudo teórico sobre entradas, operações, saídas e otimização do processo. A segunda fase teve como objetivo o estudo sobre o planejamento de processos de usinagem.

**Figura 42 - Fases da revisão teórica sobre usinagem**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Visando um melhor entendimento, as duas fases serão tratadas separadamente nos tópicos seguintes.

### 3.2.1 Fase 1: entradas, operações, saídas e otimização de processos

A revisão teórica sobre usinagem teve como ponto de partida uma busca preliminar nas bases de dados, utilizando termos de busca como: “*Machining Process*” e “*Cutting Process*”. A abrangência destes termos resultava em milhares de resultados, e mesmo definindo filtros de pesquisa, o número de resultados era exorbitante e a análise tornava-se inviável. O principal objetivo da revisão teórica era definir as etapas que envolvem o projeto de um produto usinado, principalmente em relação a manufatura, o que não é facilmente encontrado nos artigos científicos da área. Entretanto, nota-se um padrão comum nestes artigos, onde a tratativa dos processos é, na maioria das vezes, orientada para a análise de entradas, operação e saídas dos processos.

Com isso, foi definido que a revisão teórica seria direcionada às entradas, operações e saídas dos processos convencionais de usinagem (com ferramenta de geometria definida). É importante destacar que em virtude do estudo sobre as saídas dos processos, viu-se a importância da abordagem sobre a otimização do processo por duas razões: primeiramente, pelo vasto número de pesquisas que objetivam a melhoria nos processos de usinagem, e para isso realizam estudos de otimização e; observada a relação direta entre a proposta da presente pesquisa e a temática (o

DFSS é uma metodologia de desenvolvimento de produtos que considera a otimização de variáveis para um PDP eficiente).

A definição sobre quais são as entradas, operações e saídas foi realizada fundamentando-se em obras de relevância na temática, como Trent e Wright (2000), Youssef e Hofy (2008), Davim (2011), Stephenson e Agapiou (2016) e Ferraresi (2017). Após a definição clara destes fatores, no decorrer da pesquisa foram realizadas buscas em bases de dados sobre temáticas pontuais, sendo empregados operadores booleanos e filtros distintos de acordo com cada subtema. O Quadro 16 sintetiza os parâmetros destas buscas. Foram considerados os artigos de revisão sobre os temas, pois contemplam um conjunto maior de definições teóricas, do que estudos específicos dentro de cada subtema. As referências foram utilizadas, de maneira direta ou indiretamente (direcionando a outros estudos), na composição do referencial teórico apresentado no Capítulo 2.

**Quadro 16 – Síntese dos parâmetros da RBS sobre os subtemas relacionados a usinagem**

<b>Subtema pesquisado</b>	<b>Palavras de busca e operadores booleanos</b>	<b>Filtros utilizados</b>	<b>Artigos selecionados</b>
Elementos de fixação	("Jig" OR "Fixture") AND "Machining process"	Área de pesquisa: engenharias e gestão	1
Usinabilidade de metais	"Machinability" AND "Metals"	Não foram aplicados filtros	5
Fluidos de corte	"Cutting fluids" AND "Machining Process"	Área de pesquisa: engenharias e gestão	3
Otimização em processos de usinagem	("Machining Process" AND "Modelling") OR "Optimization"	Área de pesquisa: engenharias, gestão, otimização, decisão	20

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Foram selecionados, portanto, 29 artigos que contemplam os subtemas referentes a usinagem que não são amplamente tratados em livros (lista completa disponibilizada no Apêndice A). Demais temas, como os tipos de operações de usinagem, parâmetros de usinagem e ferramentas de corte, foram analisados considerando obras que são frequentemente citadas com base no Google Acadêmico. Estas mesmas obras também foram consultadas para os demais subtemas, quando disponível o conteúdo, de maneira a complementar o que foi adicionado com base nos artigos.

### 3.2.2 Fase 2: Planejamento dos processos de usinagem

Objetivando uma caracterização vasta sobre as atividades que compõe, e como compõe, o planejamento de processos de usinagem, foi realizada uma busca

bibliográfica sistemática, com o termo de busca “*machining process planning*”. Foram considerados os estudos publicados desde o ano de 2000 até o momento da realização da presente pesquisa, inclusos os artigos de pesquisa e revisão, assim como capítulos de livros indexados na base de dados do *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*.

A busca inicial resultou em apenas 201 resultados (removidos artigos comuns em mais de uma base de dados), mesmo sendo considerado um período de mais de vinte anos de publicações. O período amplo para análise se deu pela contestação de que a grande maioria de estudos sobre a modernização dos métodos de planejamento de usinagem tiveram início, sendo que muitos são largamente empregados até a realização desta pesquisa, entre os anos de 2000 e 2010. Além dos estudos resultantes desta busca, também foram consideradas referências bibliográficas identificadas na Fase 1, assim como referências sobre PDP que havia relação direta com o processo de usinagem. O resultado desta busca está sintetizado no Quadro 13, no tópico referente ao Plano de Processos no Capítulo 2, visto que resume as principais etapas de processo que foram identificadas nos artigos.

Tomando os resultados do levantamento teórico, iniciou-se a análise e estruturação da proposta teórica do modelo de DFSS para produtos usinados.

### 3.3 Proposta de DFSS para produtos usinados

A proposta de DFSS para produtos usinados foi elaborada seguindo as etapas listadas no Quadro 17.

**Quadro 17 - Etapas para elaboração do DFSS para usinagem**

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>	<b>Resultados Esperados</b>
1 – DFSS Genérico (Objetivo do modelo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Listagem de todos os objetivos de aplicação/análise do DFSS observados no referencial teórico;</li> <li>• Destaque as convergências dos objetivos listados;</li> <li>• Análise das divergências;</li> </ul>	Um objetivo síntese do uso do DFSS tornando clara sua aplicabilidade.
2 – DFSS Genérico (Grupo de fases)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Listagem de todos os grupos de fases identificados no referencial teórico;</li> <li>• Análise do objetivo principal de cada fase;</li> <li>• Identificação de fases com denominação diferente, mas com objetivos iguais;</li> <li>• Definição de fases genéricas com abordagem de todos os objetivos identificados;</li> </ul>	Definição de um único agrupamento de fases genéricas com abordagem ampla considerando todos os objetivos identificados no referencial teórico.

3 – DFSS Genérico (Principais atividades executadas em cada fase)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrupamento de todas as atividades identificadas, direcionadas às fases genéricas definidas na fase 2;</li> </ul>	Listagem, para cada fase definida na fase 2, de todas as atividades identificadas no referencial teórico.
4 – DFSS Genérico (Ferramentas empregadas em cada fase)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Listagem de todas as ferramentas;</li> <li>• Identificadas as ferramentas mais citadas;</li> <li>• Agrupamento em: ferramentas empregadas no estágio inicial de desenvolvimento, estágio intermediário e final, identificadas as ferramentas empregadas em mais de um estágio;</li> <li>• Direcionamento das ferramentas identificadas às fases genéricas definidas na fase 2;</li> </ul>	Indicação de um vasto conjunto de ferramentas que podem ser empregadas em cada fase do DFSS.
5 – Estudo da relação entre as entradas, operações, saídas e otimização dos processos de usinagem e a relação com o DFSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação das principais variáveis do processo de usinagem;</li> <li>• Levantamento sobre as etapas do DP onde as variáveis do processo são definidas;</li> <li>• Identificação da relação entre as variáveis e as saídas dos processos de usinagem;</li> <li>• Identificação da criticidade de cada variável;</li> <li>• Definição dos índices de CTQ com base nas variáveis críticas identificadas.</li> </ul>	Determinação de variáveis críticas a serem empregadas como índices de CTQ para o DFSS.
6 – Relação entre as fases do DFSS Genérico obtido após a execução das fases 1 a 4 com as atividades de planejamento de processos de usinagem	Relação entre atividades utilizando como referência os modelos de Tarvin (2016), Rozenfeld <i>et al.</i> (2010) e o modelo de PPAP. Modelos escolhidos ou por que são direcionados ao segmento de usinagem (TARVIN, 2016), ou por serem direcionados a segmentos semelhantes.	DFSS com objetivos para cada fase, atividades e ferramentas direcionadas ao desenvolvimento de produtos usinados.

**Fonte: Autoria própria (2022)**

As etapas 1 a 4 resultaram no apanhado teórico apresentado no referencial teórico, sendo a proposta do modelo genérico de DFSS apresentado como um dos resultados desta pesquisa, o qual foi publicado em Dzulinski, Braghini e Chiroli (2022). A etapa 5 necessita maior detalhamento metodológico, sendo apresentada no próximo tópico.

### 3.3.1 Definição de CTQ para DFSS de produtos usinados

O CTQ no DFSS para usinagem é empregado em duas fases e apresenta abordagens distintas. O primeiro CTQ é empregado como índice de apoio à decisão nas fases iniciais de desenvolvimento, o segundo é direcionado para a otimização nas fases de otimização e verificação. O CTQ de início de desenvolvimento está

diretamente relacionado a identificação do nível de risco de desenvolvimento do projeto, sendo atualizado nas fases finais para apoiar o controle da qualidade de processo, enquanto o CTQ nas fases finais é empregado para melhoria do processo e produto.

A definição dos índices de CTQ, tanto o de fases iniciais quanto o de fases finais do DFSS para usinagem, utilizou como ponto de partida as principais saídas controladas de um processo de usinagem, as quais foram definidas no levantamento teórico inicial, sendo elas:

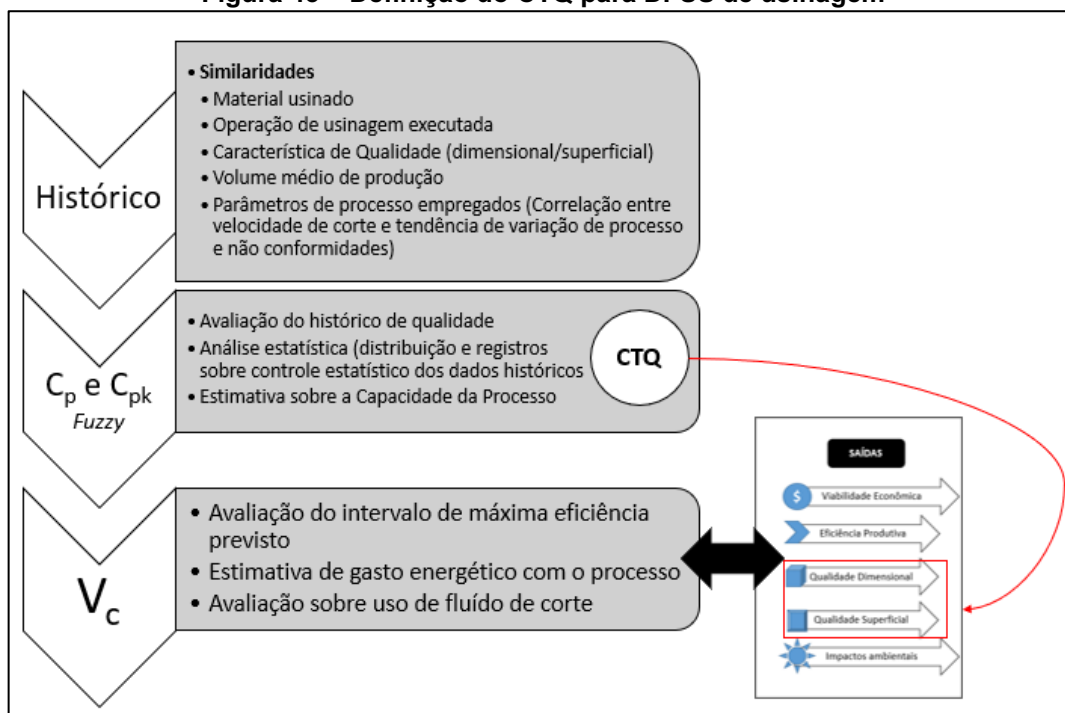
- a) Viabilidade Econômica – análise da velocidade econômica de corte;
- b) Eficiência produtiva – análise da velocidade de máxima produção;
- c) Qualidade de peça produzida – consideram-se os aspectos dimensionais e superficiais;
- d) Impactos ambientais – consumo de energia para usinagem e uso de fluídos de corte;

Analisando cada uma das saídas e considerando as relações básicas entre as variáveis que as compõem, buscou-se identificar aquelas que pudessem ser relacionadas a todas as saídas, de maneira direta ou indireta. Tendo em vista que os índices CTQ são voltados para a garantia de qualidade de acordo com a metodologia do DFSS, a saída referente a qualidade de peça produzida foi considerada como ponto chave para estabelecer as relações entre as variáveis de todas as saídas consideradas. A Figura 43 apresenta o diagrama síntese da relação entre entradas, operações e saídas do processo e a definição de CTQ para o DFSS de usinagem.

As características de qualidade dos processos de usinagem são observadas, principalmente, em relação ao atendimento de cotas dimensionais (e suas tolerâncias) e a qualidade superficial. A qualidade superficial que possui elevada dependência dos parâmetros de processo é a rugosidade. Sabendo disso, e tomando como fundamentação o estudo prévio sobre o controle e garantia de qualidade destas características, foi definido que a análise sobre a Capacidade de Processos seria o método adequado para relacionar as variáveis que afetam as saídas do DFSS para usinagem. A velocidade de corte é o parâmetro de processo que foi identificado como parâmetro comum para avaliar saídas críticas de processo, além da qualidade.



**Figura 43 – Definição do CTQ para DFSS de usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

Portanto, o CTQ de início de desenvolvimento foi direcionado para a análise da capacidade de um processo potencial a ser desenvolvido, e o CTQ das fases finais, visa a análise da eficiência produtiva do processo e o consequente impacto nas outras saídas do processo.

Para determinar o método mais coerente de capacidade de processos que poderia ser empregado, primeiramente foram determinadas as seguintes condições:

- Os índices de capacidade mais empregados na indústria deveriam ser priorizados, índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ , para facilitar a implementação da proposta do DFSS;
- Os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  somente são viáveis quando o processo apresenta controle estatístico, sendo consideradas as condições de distribuição normal de dados. Portanto, a condição de normalidade precisa ser atendida;
- Os dados utilizados para cálculo referem-se a dados históricos de processos (por equipamento), e com isso geram um grau de incerteza sobre sua repetibilidade nas condições atuais de processo;
- Devido à incerteza sobre os dados, as características estatísticas deveriam considerar essa mesma natureza;

Com base nestas características, foram encontrados na literatura métodos para cálculo dos índices de capacidade de processos que consideram a incerteza de dados, empregando *Fuzzy*, de Kaya e Kahraman (2011). Os modelos encontram-se descritos detalhadamente no Capítulo 2. Sabendo que os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  são complementares, ambos serão considerados como um único CTQ.

Para o CTQ voltado para a eficiência do processo de usinagem em desenvolvimento, definiu-se como parâmetro viável a análise do intervalo de máxima eficiência de usinagem, o qual considera o intervalo ideal de velocidades de corte (velocidade econômica de corte e de máxima produção). A velocidade de corte possui relação direta com as saídas do processo, além da qualidade que deve ser observada por meio da atualização dos índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ . O intervalo de máxima eficiência foi determinado como ideal tendo em vista a simplicidade de cálculo e de análise.

Além disso, buscou-se na definição do CTQ uma forma de atender aspectos que possam contribuir para a unificação entre o modelo de DFSS para usinagem proposto com as técnicas de planejamento de processo auxiliado por computador. Tais aspectos são: (a) um CTQ que não dependa diretamente da experiência de um projetista; (b) inserir características diretas sobre o comportamento da máquina ferramenta no plano de processos de usinagem, e não apenas variáveis de projeto e de operação; (c) o CTQ torna o DFSS para usinagem uma abordagem variante e generativa (KUMAR, 2017); (d) a decisão envolta no DFSS seja dinâmica e que (e) o DFSS para usinagem possa ser considerado uma metodologia passível de um sistema cyber físico. Estes aspectos também foram apresentados para a validação do DFSS para usinagem, o qual é descrito no próximo tópico.

Entende-se que o índice CTQ das fases iniciais é uma abordagem metodológica inédita sobre a aplicação dos índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ , (*Fuzzy*) e, portanto, é detalhadamente descrita. O CTQ das fases finais, entretanto, refere-se a análise de duas variáveis que são usuais em relação a proposta de cálculo e interpretação (velocidade máxima e velocidade econômica de corte na usinagem), não requerendo um detalhamento metodológico além do que foi exposto no capítulo 2 (tópico 2.3.5). A aplicabilidade e interpretação do índice são discutidas no capítulo de resultados e discussões (capítulo 4).

### 3.4 Validação do modelo proposto

A validação do modelo proposto foi direcionada a 3 objetivos:

- Validação sobre as etapas de desenvolvimento de produtos usinados que ocorrem na prática das atividades industriais;
- Avaliação da proposta matemática (simulação e teste com dados de processo e produto real) de índice de CTQ das fases iniciais;
- Validação do modelo completo considerando a análise de profissionais que atuam no desenvolvimento de produtos usinados.

Primeiramente é descrita a amostra do segmento e os respectivos profissionais que foram consultados para a validação das etapas de desenvolvimento dos produtos usinados e do modelo de DFSS para usinagem. Na sequência são descritos os meios empregados para a validação.

Tanto a validação sobre as etapas de desenvolvimento de produtos que ocorrem na prática das atividades industriais, quanto a validação da proposta do DFSS para usinagem, foram realizadas conjuntamente por meio de uma única entrevista (com cada participante). Fez-se necessário reduzir os contatos com as organizações devido às limitações impostas pela pandemia da Covid-19, e por suas consequências, como a redução de produção e o receio das empresas em abrir os dados sobre sua realidade. Em paralelo, foi realizada a avaliação sobre o comportamento matemático do índice CTQ de fases iniciais proposto para o modelo de DFSS para usinagem, e seus impactos.

#### 3.4.1 Descrição do segmento e profissionais consultados na pesquisa

Inicialmente foram buscadas as organizações que possuem processos de usinagem com produção de média e larga escala. Entende-se como volume médio e alto àqueles onde a máquina ferramenta possui parcela da carga-máquina mensal dedicada a fabricação de produtos específicos, com volume pré-estabelecido por meio de contratos a médio e longo prazo.

Devido a localidade da pesquisadora, e considerando as restrições impostas pela pandemia do Covid-19 no decorrer da realização da pesquisa, as organizações consideradas para validação situam-se no polo metal mecânico da região denominada como região da serra no estado do Rio Grande do Sul, sendo este considerado o 2º maior polo metal mecânico do país, ficando atrás apenas do estado de São Paulo. A

região conta com empresas de grande representatividade nacional, principalmente no segmento de caminhões e ônibus, e no segmento de máquinas agrícolas.

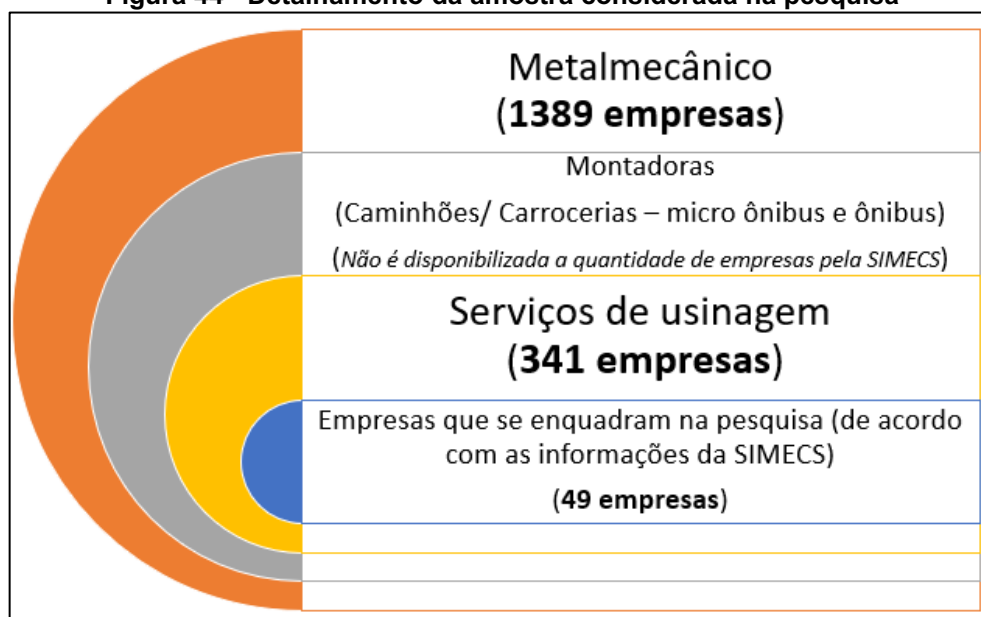
No Rio Grande do Sul, a indústria metalúrgica no ano de 2019 contava com 276 estabelecimentos e 8327 pessoas empregadas. A cidade de Caxias do Sul, a maior cidade da região da serra (2º maior PIB do estado), concentrava 18% dos estabelecimentos. Destaca-se a representatividade desta região na produção de veículos automotores, reboques e carrocerias, que em 2019 apresentava 21% dos estabelecimentos do estado (657 estabelecimentos) e 46% dos empregados do segmento, no estado do Rio Grande do Sul (GOVERNO DO RIO GRANDE DO SUL, 2020).

Apesar do setor de primeiro nível da cadeia de suprimentos (montadoras, por exemplo) movimentar de maneira significativa a economia regional, destaca-se os demais níveis que abastecem o segmento automotivo. Portanto, no setor metalmeccânico, a grande maioria das empresas da região possuem parte de sua produção direcionada a essas grandes empresas, de maneira direta ou indireta. Outros segmentos também apresentam destaque neste sentido, como o de polímeros, produção de ferramentas e máquinas.

Segundo Beroe (2021), cerca de 30% dos processos de usinagem no mundo são destinados a indústria de equipamentos pesados, componentes de engenharia e subconjuntos. Entende-se, portanto, que devido a alta produção do segmento automotivo, e de máquinas, na região da serra gaúcha, a cadeia de fornecedores abrange um grupo relevante de prestadores de serviços de usinagem com médio e alto volume de produção.

Para obter um panorama das empresas deste segmento na região, foram consultados os dados da SIMECS (Sindicato das Indústrias Metalúrgicas, Mecânicas e de Material Elétrico de Caxias do Sul e Região). A SIMECS disponibiliza, de maneira online (SIMECS, 2021), o cadastro de todas as empresas associadas sendo possível filtrar os dados de diversas maneiras. Apenas em Caxias do Sul e região, são cadastradas 1.389 empresas do segmento metalmeccânico, sendo 341 indicadas como prestadoras de serviços de usinagem (Figura 44).

**Figura 44 - Detalhamento da amostra considerada na pesquisa**



Fonte: Autoria própria (2022)

Após o levantamento dos dados disponibilizados pela SIMECS, foram consultadas, por meio de páginas na internet e contato telefônico, as 341 empresas identificadas, visando selecionar apenas as empresas que atendessem as seguintes características: (a) empresas de usinagem que empregam equipamentos com operação CNC, sendo estes equipamentos com usinagem realizada por meio de ferramentas de corte com geometria definida, (b) empresas com médios e altos volumes de produção e (c) processos direcionados para material metálico.

No decorrer da análise das empresas da região, identificou-se que muitas que oferecem o serviço de usinagem não atuam unicamente com esse processo de produção. É comum que empresas de fundição e conformação possuam internamente uma segmentação com operações de usinagem, e assim, conseguem produzir o produto desde o processo primário requerido pelo cliente. Empresas que atuam no fornecimento de sistemas montados também contam com processos de usinagem interna para fabricação de componentes utilizados nos sistemas, e muitas vezes oferecem o processo para empresas externas, devido a capacidade ociosa das máquinas de usinagem.

Considerando os dados disponibilizados pela SIMECS, foram identificadas de maneira direta 49 empresas que oferecem os serviços de usinagem e que correspondem ao foco principal desta pesquisa. Entretanto, entende-se que o número pode ser maior em decorrência do tipo de cadastro das empresas da região, pois empresas que contam com os processos de usinagem apenas como apoio, ou que

não é considerado o processo principal, podem ser classificadas em outros segmentos não sendo possível, apenas pelo cadastro, identificá-las. Foi realizada uma busca pelo cadastro de empresas de fundição, com intuito de entrar em contato e verificar se estas empresas também contam internamente com processos de usinagem, mas nos dados da SIMECS não há cadastro de empresas de fundição (não nesta categoria específica).

Por esse motivo, foi realizada uma pesquisa no Google, e por indicações de profissionais que atuam em empresas metalúrgicas, sobre as empresas de fundição na região que contam com processos de usinagem, resultando em 5 empresas. Portanto, objetivou-se contatar todas as 54 empresas identificadas visando identificar como ocorre o processo de desenvolvimento de produtos usinados nessas empresas e, apresentar a proposta de DFSS de usinagem e obter a avaliação dos profissionais envolvidos no DP.

Sabendo que o DP usinado ocorre, na maioria das vezes, com um projeto externo do cliente, foi identificada a necessidade de se obter informações sobre o PDP por parte das empresas que contratam os serviços de usinagem. Para isso, foram identificadas as maiores empresas situadas em Caxias do Sul que atuam com o desenvolvimento de fornecedores de produtos usinados. Foi possível obter a participação de 4 grandes grupos, entre montadoras e empresas sistemistas.

Todas as empresas envolvidas nesta pesquisa possuem processos de desenvolvimento protegidos por segredo industrial, seja em relação ao produto ou ao processo utilizado, ou sinalizaram a necessidade de sigilo sobre suas atividades. Portanto, não são identificadas as empresas e os profissionais entrevistados visando a proteção legal de informações relacionadas ao segredo industrial dos participantes. As respostas obtidas destas empresas foram editadas de forma a não ser possível identificar a empresa e respondente.

#### 3.4.2 Entrevista com profissionais de desenvolvimento de processos de usinagem

Foram consultados profissionais que atuam diretamente no desenvolvimento dos produtos como fornecedores, e com profissionais que realizam o desenvolvimento destes fornecedores (os clientes e detentores dos projetos). As consultas foram realizadas por meio de visitas às empresas, visando não somente o levantamento das informações, mas também a visualização dos processos, sempre que possível. Houve casos em que a visita presencial foi impedida em decorrência das exigências

sanitárias empregadas para minimizar potenciais riscos de transmissão da Covid-19, ocorrendo via vídeo conferência. Em alguns casos, por solicitação dos participantes, as perguntas foram enviadas via aplicativo de mensagens (Questionário disposto no Apêndice F), sendo respondidas por gravação de áudio, sendo transcritas com as demais respostas das entrevistas em Dzulinski (2022c).

A coleta de informações seguiu o roteiro apresentado no Quadro 18. Objetivou-se dois momentos distintos, sendo o primeiro direcionado ao levantamento sobre as características atuais de desenvolvimento por parte da empresa, e o segundo para avaliação da proposta de DFSS de usinagem. Com isso buscou-se relacionar qualitativamente os dados da avaliação do modelo de DFSS de usinagem com os dados de características atuais visando verificar se não houve tendência na avaliação do modelo, por parte dos respondentes, considerando o que cada organização realiza efetivamente.

**Quadro 18 – Roteiro para coleta de dados nas entrevistas com os profissionais do segmento de usinagem**

<b>Momento da entrevista</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Descritivo do relato</b>
Momento 1: identificação da realidade sobre DP na organização	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar o padrão de gestão no DP das organizações;</li> <li>- Identificar a relação entre projeto e execução de produtos;</li> <li>- Identificar as áreas envolvidas no desenvolvimento de produtos;</li> <li>- Verificar o uso de um modelo (formal ou informal) de DP;</li> <li>- Identificar as variações de desenvolvimento entre produtos (usados e não usados).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Há um modelo de gestão de desenvolvimento implementado?</li> <li>- Etapas principais realizadas;</li> <li>- Pontos fortes e fracos indicados pelo profissional.</li> </ul>
Momento 2: opinião dos especialistas sobre a proposta de DFSS para usinagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validar as etapas do modelo proposto, assim como as principais atividades em cada etapa;</li> <li>- Identificar pontos de melhoria no modelo;</li> <li>- Identificar a contribuição prática da proposta de modelo;</li> <li>- Identificar a potencialidade de aplicação do modelo em ferramentas cyber físicas de planejamento de processos de usinagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As etapas e atividades apresentadas atendem a realidade no DP?</li> <li>- O modelo pode auxiliar nas principais dificuldades enfrentadas?</li> <li>- Como essa proposta de modelo pode ser melhorada?</li> </ul>

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Tendo em vista as limitações comentadas, e a consequente dificuldade de contato com as organizações, buscou-se unificar o levantamento das informações em uma única entrevista. Portanto, a proposta teórica foi construída antes do levantamento das características das organizações, entretanto, após a coleta dos

dados, o modelo foi revisto e adaptado. As análises e discussões sobre as adaptações identificadas são relatadas no Capítulo 4.

Os próximos tópicos referem-se as análises que foram realizadas paralelamente à validação da proposta do modelo completo de DFSS para usinagem, abrangendo o estudo matemático sobre o índice CTQ proposto para as fases iniciais. A avaliação da proposta do índice não impacta na validação do modelo por parte dos profissionais da indústria, visto que se buscou analisar a sua aplicabilidade em relação a representatividade prática nas tomadas de decisão e para viabilizar o uso do modelo em sistemas cyber físicos, e não sobre sua estrutura matemática, que poderia ser revista e adaptada conforme necessário.

### 3.4.3 Avaliação sobre o CTQ das fases iniciais para DFSS para Usinagem

O índice CTQ das fases iniciais refere-se à estimativa de  $C_p$  e  $C_{pk}$  considerando os dados históricos de processos, para apoiar a tomada de decisão no desenvolvimento de novos produtos usinados, ou ainda, de novos planos de processo de usinagem. Conforme exposto anteriormente, estes dois índices são analisados considerando características da qualidade do produto, e que para o DFSS para usinagem, priorizam-se as características críticas identificadas no projeto de produto. Portanto, para a avaliação foi realizada uma simulação onde foram gerados dados aleatórios que se assemelham a distribuição dos dados populacionais de medidas dimensionais de produtos usinados (quantidade produzida por lote de produção), ou de característica de qualidade superficial (rugosidade).

O objetivo da simulação é observar o comportamento da proposta matemática do índice CTQ para conjuntos de dados que correspondem a médios e altos volumes de produção, observando a sensibilidade, robustez e comportamento do modelo. Para cada conjunto de dados populacionais gerados, utilizando a simulação de Monte Carlo, foram obtidos dados amostrais. Segundo Barreto e Howland (2006), este tipo de simulação é um método de análise baseado na recriação artificial de um processo aleatório, executando-o repetidamente objetivando a análise dos resultados. Este tipo de simulação é recomendado para entender comportamentos estatísticos.

Ainda sobre as características dos dados reais e de simulação, é importante destacar a relação entre o volume efetivo de produção e a quantidade de itens não conformes que são produzidos. De acordo com o que foi exposto no Capítulo 2, sobre



a capacidade de processos, este tipo de análise somente pode ser realizado para os processos que estão sob controle estatístico. Portanto, a população de dados para análise do CTQ apresenta somente os itens conformes (em relação a característica da qualidade analisada), pois itens não conformes em processos sob controle estatístico, são provenientes de causas atribuíveis, ou seja, causas que requerem correção imediata no processo. Desta maneira, itens não-conformes não devem ser contabilizados para o estudo de CTQ do modelo proposto, sendo o volume de produção efetivo o volume total produzido subtraído o número de não conformidades de causas atribuíveis.

O conjunto de dados utilizados para estimativa de CTQ referem-se a amostras retiradas de um determinado volume efetivo de produção. A variância destes dados amostrais refere-se ao volume de produção do lote de onde foram retiradas as amostras, e esse dado deve ser considerado. Logo, é imprescindível que sejam mantidos os registros de tamanhos de lotes de produção de onde foram extraídas as amostragens.

Sabe-se que, quanto maior é o tamanho de uma amostra de dados, menor é o erro estatístico de estimativa. Portanto, para uma melhor estimativa do comportamento do processo de produção analisando o CTQ, faz-se necessário que sejam (sempre que possível) observados dados históricos provenientes de tamanhos de lotes distintos. Recomenda-se, portanto, que para cada máquina ferramenta sejam armazenadas as informações da relação material usinado, ferramenta empregada, parâmetros empregados, característica de qualidade produzida, volume por lote de produção e tamanho de amostra analisada. Havendo um número significativo de variações de volume, é possível correlacionar os dados de CTQ com o volume e observar possíveis tendências. Essa comparação é relevante para identificar possíveis causas aleatórias de variabilidade do processo de usinagem (ruídos) que são relacionadas ao aumento de volume de produção, e assim, ajustar as variáveis de maneira eficiente no desenvolvimento de novos projetos de processos de usinagem.

No Quadro 19 são descritas as etapas seguidas para a simulação dos dados, e a respectiva relação com o uso de dados reais de processos de usinagem para teste da proposta de CTQ. Também são indicadas as ferramentas de apoio utilizadas para cada etapa. Para simulação foi empregado o Microsoft Excel (2019), sendo que a simulação de Monte Carlo foi realizada com apoio da extensão disponibilizada por

Barreto e Howland (2006). A planilha desenvolvida para a simulação é apresentada no Capítulo 4 como um dos resultados da pesquisa.

Os limites mínimos e máximos utilizados como intervalo para gerar a população de dados para a simulação foram definidos de acordo com os limites de especificação de duas características de qualidade críticas de um produto real. O produto considerado trata-se de uma peça do segmento automotivo produzida por uma das empresas consultadas na presente pesquisa. Os dados fornecidos também foram utilizados para avaliar o comportamento do modelo de CTQ de fases iniciais do DFSS, detalhado no próximo tópico.

**Quadro 19 – Etapas empregadas para avaliação do comportamento do índice CTQ**

Etapa	Descrição – Simulação de Dados	Descrição – Aplicação com dados Reais	Ferramenta de apoio
1	POPULAÇÃO ESTATÍSTICA ( $n$ ) Gerar dados com valor mínimo e máximo de acordo com valores de especificação como referência. Dos dados gerados são obtidos a média e o desvio-padrão.	POPULAÇÃO ESTATÍSTICA ( $n$ ) Definição do conjunto de dados – histórico de dados referentes às características críticas que impactam no processo da máquina (variáveis de qualidade) e parâmetros do processo de usinagem	Para gerar dados de uma população: Microsoft Excel (Matriz de dados gerados com um limite máximo e mínimo)
2	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO  *Dados gerados seguindo normalidade		Simulação de Monte Carlo - Barreto e Howland (2006);
3	MÉDIA ( $\mu$ ) E VARIÂNCIA POPULACIONAL ( $s^2$ )		Microsoft Excel
4	FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE DADOS – Determinar ponto mínimo e máximo		
5	Determinação do DESVIO PADRÃO (FUZZY DE BASE TRIANGULAR – TFN) ( $\tilde{\sigma}^2$ )		
6	Determinação da MÉDIA (FUZZY DE BASE TRIANGULAR – TFN) ( $\mu_{\tilde{\sigma}}$ )		
7	Identificação/determinação dos LIMITES DE CONTROLE (LIC; LSC)		
8	Transformação dos LIMITES DE CONTROLE FUZZY		
9	Cálculo do Índice Cp FUZZY		
10	Para cálculo do Índice Cpk FUZZY, utilizando a MÉDIA e o DESVIO PADRÃO FUZZY:		

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Foram simulados 4 conjuntos de dados, representando volumes de produção (lotes de produção) de 50, 100, 500 e 1000 unidades ( $n = 50, 100, 500, 1000$ ). Sabe-se que quanto maior o tamanho da amostra ( $m$ ), melhor se torna a inferência estatística. Na prática, a recomendação é utilizar o maior número de registros históricos para análise do CTQ, neste estudo foram considerados tamanhos amostrais

distintos, retirados de cada conjunto de dados, objetivando analisar as possíveis variações existentes de sensibilidade do modelo em função do tamanho amostral.

**Tabela 1 – Relação entre tamanho populacional e quantidades de amostras com tamanhos distintos**

<b>População (Volume de produção simulado)</b>	<b>Amostras com tamanhos distintos</b>
50	1 ( $m \cong 30$ )
100	2 ( $m \cong 30; 75$ )
500	2 ( $m \cong 30; 100$ )
1000	2 ( $m \cong 30; 100$ )

**Fonte: A autoria própria (2022)**

Não foram simuladas amostras de tamanho inferior a  $m=30$  pois entende-se que para considerar os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  o processo é previamente acompanhado em relação a sua estabilidade, e para isso, já foram consideradas amostras minimamente significativas. Não foram consideradas amostras superiores a  $m=100$ , pois entende-se que quando mantidos os parâmetros de intervalo de confiança e desvio padrão (para os tamanhos de população considerados), amostras com distribuição normal de dados, deste tamanho, representam um erro de estimativa consideravelmente baixo, se comparados com amostras de tamanhos superiores.

Os limites de controle, necessários para o cálculo de  $C_p$  e  $C_{pk}$ , em processos reais, são determinados previamente para o controle estatístico, geralmente como requisito do cliente. Na simulação realizada foi necessário estimar - de acordo com Montgomery (2016) - estes limites com base nos dados gerados.

Após a simulação do modelo de CTQ de fases iniciais do DFSS com dados gerados artificialmente, buscou-se a análise do comportamento do modelo com dados de um processo real. Os detalhes sobre os dados e as ações adicionais às descritas até aqui estão dispostas no tópico seguinte.

#### 3.4.4 Análise do modelo por meio de dados reais

Os dados reais para avaliação do modelo de índice CTQ para fases iniciais de DFSS foram disponibilizados por uma das empresas participantes na pesquisa. O detalhamento sobre os dados é disposto no Capítulo 4. Foram solicitados os dados históricos de produção de uma máquina ferramenta referentes a duas cotas críticas. Os dados solicitados referem-se a: volume do lote produzido, ferramentas de corte empregadas, material usinado, parâmetros do processo empregados, uso de fluídos

de corte, energia consumida, dados amostrais de acompanhamento das características de qualidade.

Para os dados reais, os limites de controle utilizados foram os mesmos do controle estatístico realizado com as amostras do histórico. É importante ressaltar que a estimativa de CTQ deve ser obtida fundamentada no estado de onde foram levantados os dados, e não do projeto em desenvolvimento e que se fundamenta no CTQ para tomada de decisão. Após realizada a análise do CTQ com os dados reais, buscou-se avaliar junto a empresa que concedeu os dados a interpretação dos resultados, sendo registrada a avaliação sobre a aplicabilidade da proposta na prática por parte do profissional responsável. O registro direcionou a algumas alterações na proposta do modelo de DFSS para usinagem, o qual é apresentado no próximo capítulo, juntamente com os demais resultados da pesquisa.

## 4 RESULTADOS

Os resultados obtidos são agrupados em:

- a) Proposta teórica sobre um modelo genérico de DFSS;
- b) Proposta teórica do modelo DFSS para usinagem;
- c) Validação do modelo DFSS de usinagem considerando a opinião de especialistas da área;
  - (i) Avaliação da proposta matemática do índice CTQ de fases iniciais, através de simulação de dados amostrais;
  - (ii) Exposição das planilhas geradas para simulação;
- d) Página da web com os modelos de DFSS genérico e DFSS para usinagem.

As discussões que relacionam os resultados, e os direcionamentos que levam a conclusão da pesquisa são apresentados ao final do capítulo.

### 4.1 Modelo DFSS genérico

Considerando a fundamentação teórica define-se, neste estudo, DFSS como: “É uma metodologia com enfoque no desenvolvimento otimizado de produtos, processos e serviços, que considera de maneira sistematizada e quantificada, utilizando ferramentas matemáticas e de qualidade, os requisitos críticos de projeto fundamentados nas expectativas dos clientes.”

As fases para estruturação e execução do DFSS foram definidas considerando duas perspectivas: o que é relatado na literatura consultada como sequência de execução que obteve bons resultados e; as fases conceitualmente consideradas em PDP. É importante destacar que o conjunto de fases definido não é exclusivo desta pesquisa. A metodologia do DFSS, como foi destacado anteriormente, possui um conjunto vasto de definições e etapas sugeridas, sendo o conjunto DIDOV sugerido por diversos autores. Entretanto, nesta pesquisa objetivou-se analisar as variações da metodologia, e observando a relação com as fases de modelos de PDP, obter uma proposta genérica de DFSS.

Após essa análise, o conjunto definido é composto pelas fases DIDOV (*Define, Identify, Design, Optimise, Verify*), que resulta das seguintes análises:

- a) A fase “Definir” (*Define*), considerada como a primeira fase em alguns modelos, refere-se a decisões sobre o início de um novo projeto, e o

que uma organização espera em relação aos investimentos, retornos, anseios e receios sobre a intensão de um novo projeto. Neste ponto não são discutidos aspectos específicos do produto/processo/serviço. Nota-se que os estudos que não citam esta fase, assim o fazem devido a pesquisa tratar de aspectos específicos do desenvolvimento do produto, e não questões decisórias prévias ao desenvolvimento do projeto.

- b) A fase “Definir” no modelo IDDOV trata-se da atividade de definição de requisitos, que nos demais modelos está vinculada a fase “Identificar” (*Identify*). A fase “Identificar” trata essencialmente a identificação de requisitos. Em alguns estudos esta fase é subdividida, visto que os requisitos podem ser vinculados a requisitos de clientes, organizacional e técnicos (requisitos específicos do funcionamento do produto). Fase “Mensurar” (*Measure*) no modelo DMADV refere-se também a definição dos requisitos que são utilizados para otimizar o desenvolvimento do produto.
- c) A fase “Caracterizar” (*Characterize*) refere-se a definição do projeto a ser desenvolvido após o levantamento de todos os requisitos. Esta fase, em relação aos outros modelos, relaciona-se com as fases “Analisar”, “Projetar” e “Definir”. Nesta fase os requisitos identificados são transformados em métricas (CTQ).
- d) A fase referente a “Otimizar” (*Optimize*) apresenta atividades de definição dos parâmetros para os requisitos definidos. Neste ponto do desenvolvimento são definidos os limites de variação de cada requisito de maneira a manter uma solução otimizada de produto. Estas atividades também podem ser executadas em outros modelos na fase de projeto (“Projetar” - *Design*).
- e) A etapa de verificação (*Verify*) inclui os testes dos parâmetros otimizados, além da validação do projeto. Refere-se a etapa final do desenvolvimento, antes do lançamento efetivo do produto ao mercado. Em alguns modelos, o lançamento e avaliação de performance do produto também são considerados nesta fase.

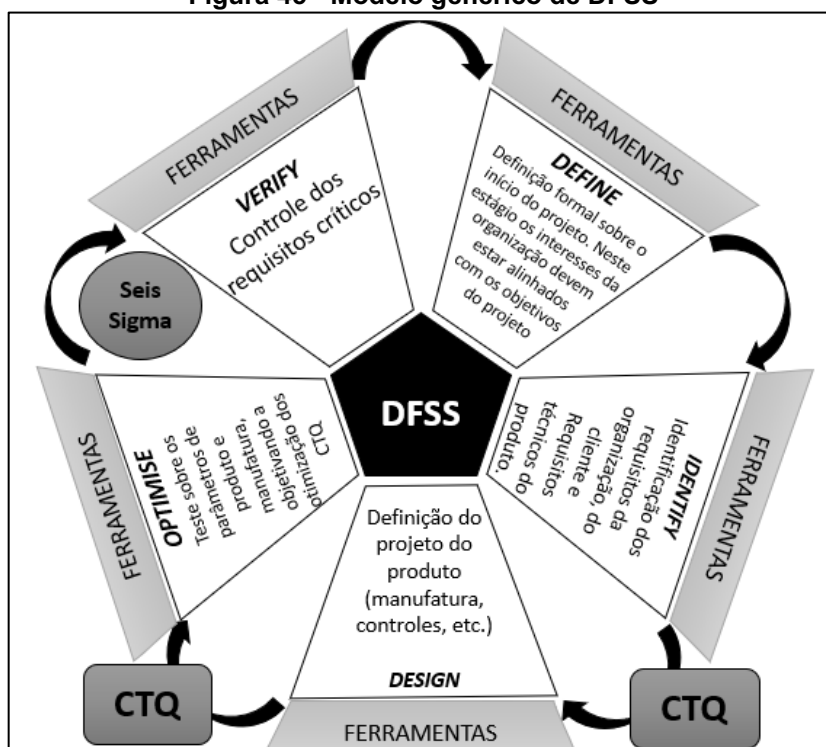
Portanto, o modelo genérico DIDOV apresenta na primeira fase (*Define*) a definição inicial do projeto, onde entende-se que esta fase é necessária devido aos

requisitos internos da organização e interferência destes em requisitos de clientes e de projeto. Uma característica observada nos estudos sobre DFSS é o fato das atividades desta fase não possuírem interferência direta no processo de desenvolvimento. Os estudos que relatam a implementação da metodologia fazem a descrição somente de atividades relacionadas ao desenvolvimento específico do produto, sem citar os fatores de planejamento estratégico inicial que interferiram na execução.

A segunda fase (*Identify*) refere-se a etapa de identificação e priorização de requisitos de produto de maneira a atender de maneira mais eficiente possível os desejos dos *stakeholders*. A identificação e priorização de requisitos não implica na definição do projeto que será executado, mas sim em um conjunto de possibilidades que consideram os requisitos levantados. Nesta fase, portanto, são listadas opções de projetos e realiza-se a seleção daquele que melhor atende aos objetivos de todos os *stakeholders*.

A terceira fase (*Design*) refere-se à definição formal do projeto do produto que foi selecionado na fase anterior, onde se estabelecem as funções que representam as relações de CTQ, sendo que na quarta fase (*Optimise*) são realizadas as ações de otimização das relações anteriormente estabelecidas. A fase final (*Verify*) conta com o teste do projeto definido e o levantamento de possíveis melhorias relacionadas aos ruídos identificados em cada função estabelecida. A Figura 45 apresenta o diagrama com as 5 fases de DFSS do modelo genérico proposto, onde destaca-se a constante relação dos CTQ assim como o nível sigma pretendido, sendo este aplicado na fase 4 (*Optimise*).

Figura 45 - Modelo genérico de DFSS



Fonte: Autoria Própria (2022)

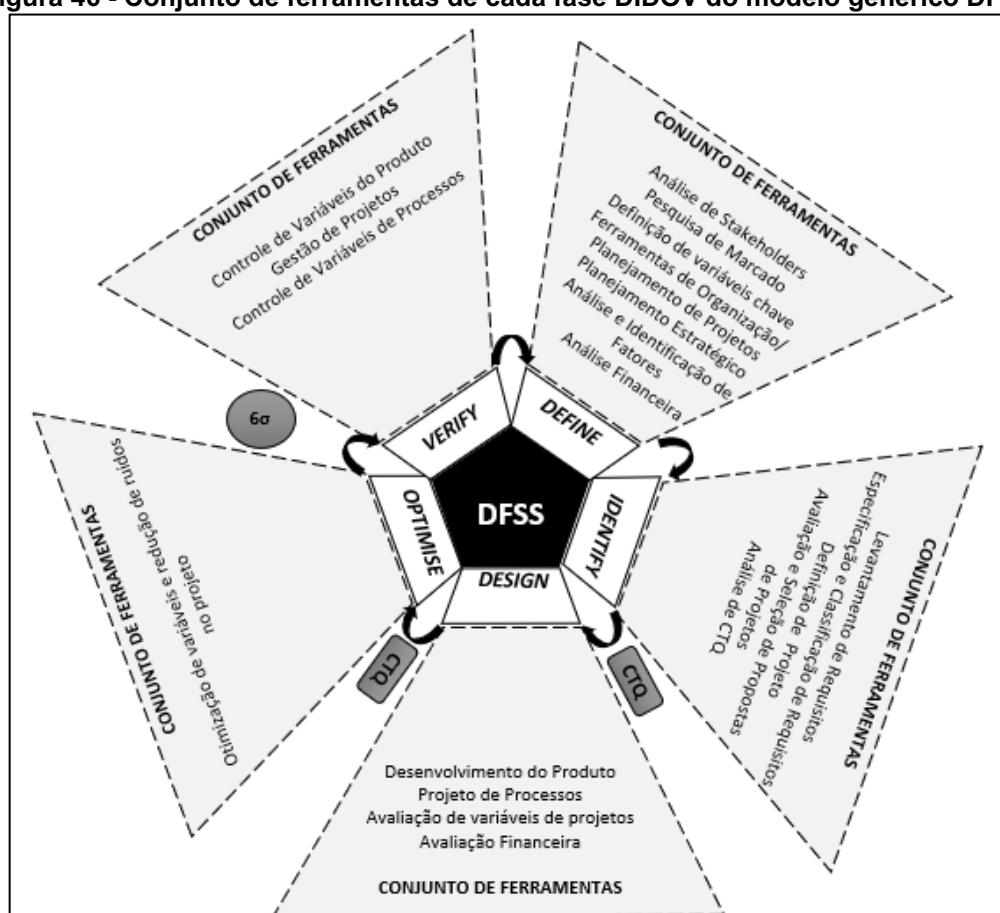
Para cada fase, de acordo com as atividades vinculadas, as ferramentas foram alocadas em grupos específicos (Figura 46). Na fase *Define* as 23 ferramentas foram agrupadas em: análise de *stakeholders*, pesquisa de mercado, definição de variáveis chave, organização/planejamento de projetos, planejamento estratégico, análise e identificação de fatores gerais, e análise financeira.

Na fase *Identify*, as 32 ferramentas foram agrupadas em função das atividades de: levantamento, especificação, classificação dos requisitos, definição dos projetos, avaliação e seleção das propostas de projetos.

Na fase *Design*, as 37 ferramentas agrupam-se em: desenvolvimento do produto, projeto de processos, avaliação de variáveis do projeto e avaliação financeira. Na fase *Optimize* as 12 ferramentas são direcionadas para otimização, identificação e eliminação dos ruídos identificados, sendo a fase final, *Verify*, com 27 ferramentas agrupadas em: controle de variáveis de produto, gestão de projetos, e controle de variáveis de processos.



Figura 46 - Conjunto de ferramentas de cada fase DIDOV do modelo genérico DFSS



Fonte: Autoria própria (2022)

Do Quadro 20 ao 24 são apresentadas as descrições de cada fase do modelo genérico DIDOV, abrangendo o objetivo, atividades principais e ferramentas.

Quadro 20 – Detalhamento da fase *Define* do DFSS genérico

Fase: <i>Define</i> - Definir	
Objetivo: Definição formal do início de projeto. Nesta fase os interesses da organização devem ser alinhados com os objetivos do projeto	
Atividades	Ferramentas
(1) Definição da equipe de projeto; (2) Comprometimento da equipe e alta gerência; (3) Seleção do projeto; (4) Identificação dos <i>stakeholders</i> ; (5) Treinamentos; (6) Definição do sistema de gerenciamento do projeto; (7) Plano de vários níveis (organizacional); (8) Identificar mercado potencial e mercado alvo; (9) Análise de concorrência; (10) Análise do histórico de projetos semelhantes; (11) Benchmarking; (12) Definição de metas e cronogramas;	(1) Ferramentas para análise de <i>Stakeholders</i> (2) Ferramentas de pesquisa de mercado (3) Definição de variáveis chave (4) Ferramentas de Organização/Planejamento de Projetos: a. Project Charter; b. <i>Multi-generation planning</i> (MGP); c. SIPOC; d. Diagrama de Gantt; e. SCRUM – <i>Agile Project Management</i> ; f. Diagrama P; g. PERT/COM; h. RACI;

<p>(13) Definir estrutura de projeto;  (14) Levantar recursos;  (15) Estudo de viabilidade técnica e econômica;  (16) Elaborar o <i>Project Charter</i>, mapeamento do processo de desenvolvimento do projeto;  (17) Estimar riscos;  (18) Definir controles do projeto;  (19) Plano de comunicação sobre o projeto;</p>	<p>(5) Ferramentas para planejamento estratégico:  a. SWOT;  b. Análise de Risco;  c. Matriz de Priorização;  d. Gráfico de Pareto;  (6) Ferramentas de análise e identificação de fatores:  a. <i>Benchmarking</i>;  b. <i>Brainstorming</i>;  c. 5W2H;  d. Diagrama de afinidades;  e. Diagrama de Árvore;  f. Diagrama de causa e efeito;  g. DFMEA  (7) Ferramentas para análise financeira</p>
--	---

Fonte: Autoria própria (2022)

**Quadro 21 - Detalhamento da fase *Identify* do DFSS genérico**

<b>Fase: <i>Identify</i> - Identificar</b>	
Objetivos: Nesta fase requisitos de clientes, técnicos e organizacionais são identificados e estabelecidos para o projeto. CTQ também são identificados, opções de projeto são geradas e por meio da avaliação seleciona-se o projeto viável.	
<b>Atividades</b>	<b>Ferramentas</b>
<p>(1) Identificar, entender e priorizar os requisitos de clientes;  (2) Identificar requisitos da organização, ambientais, regulamentadores etc.;  (3) Estabelecer os CTQ;  (4) Criar indicadores;  (5) Projeto preliminar de compras e manufatura;  (6) Definir os pontos críticos de produtos baseado em falhas previstas;  (7) Determinar o nível sigma pretendido;  (8) Realizar <i>benchmarking</i>;  (9) Selecionar o projeto conceitual;</p>	<p>(1) Ferramentas para levantamento de requisitos:  a. <i>Benchmarking</i>;  b. <i>Brainstorming</i>;  c. Diagrama de afinidades;  (2) Ferramentas para especificação e classificação de requisitos:  a. QFD;  b. Modelo de Kano;  c. Matriz KPC;  d. Diagrama de árvore;  (3) Ferramentas para definição de projeto:  a. FMEA;  b. DFMEA;  c. TRIZ;  d. SIPOC;  e. Diagrama P;  f. DOE;  g. Design for X (DFX);  h. Engenharia reversa;  i. Diagrama de causa e efeito;  h. Responder a 6 questões: Quem, O que, Onde, Quando, Como e Por quê;  i. 5H 2H;  j. ACV;</p>

	<p>(4) Ferramentas para avaliação e seleção de propostas de projetos e análise de CTQ:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Diagrama de Pareto;</li> <li>b. Matriz de Pugh;</li> <li>c. Análise de risco;</li> <li>d. Gráfico radar;</li> <li>e. Histograma;</li> <li>f. ANOVA;</li> <li>g. Dispersão;</li> <li>h. Regressão;</li> <li>i. <i>Check List</i>;</li> <li>j. Taguchi;</li> <li>k. MSA;</li> <li>l. AHP</li> </ol>
--	--

Fonte: Autoria própria (2022)

**Quadro 22 - Detalhamento da fase *Design* do DFSS genérico**

<b>Fase: <i>Design</i> - Projetar</b>	
Objetivo: Definição das características técnicas do projeto a ser desenvolvido	
<b>Atividades</b>	<b>Ferramentas</b>
<p>(1) Definir o controle dos CTQ;</p> <p>(2) Quantificar as funções transferência que envolvem os requisitos;</p> <p>(3) Estabelecer os limites de controle e tolerâncias;</p> <p>(4) Prever as possíveis falhas (ruídos) do processo;</p> <p>(5) Realizar o projeto detalhado da produção;</p> <p>(6) Prever a performance do processo;</p> <p>(7) Refinar a capacidade de processo;</p> <p>(8) Desenvolver o plano de controle;</p> <p>(9) Definir os indicadores de desempenho;</p> <p>(10) Projetar os testes e protótipos;</p> <p>(11) Elaborar instruções de trabalho;</p> <p>(12) Projetar instalações;</p> <p>(13) Análise das especificações;</p>	<p>(1) Ferramentas para desenvolvimento do produto:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. FMEA;</li> <li>b. TRIZ;</li> <li>c. QFD;</li> <li>d. DFMEA; PFMEA;</li> <li>e. Método de Pugh;</li> <li>f. CAD/CAE</li> <li>g. Diagrama de causa-efeito;</li> <li>h. Projeto robusto;</li> <li>i. Diagrama de árvore;</li> <li>j. Diagrama P;</li> <li>k. Matriz Morfológica;</li> <li>l. Projeto Axiomático;</li> <li>m. Checklists;</li> <li>n. Modelo de Kano;</li> <li>o. SIPOC;</li> <li>p. DOE;</li> <li>q. Design for X;</li> <li>r. <i>Brainstorming</i>;</li> <li>s. <i>Benchmarking</i>;</li> <li>t. Diagrama de Gantt)</li> </ol> <p>(2) Ferramentas para projeto de processos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Princípios Lean;</li> <li>b. PERT/CPM;</li> <li>c. Fluxograma</li> </ol> <p>(3) Ferramentas para avaliação de variáveis de projetos:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Índices de capacidade de processos (Cp, Cpk, Cr, Ppk, Pp e Pr);</li> <li>b. Funções transferência;</li> <li>c. Poka Yoke;</li> <li>d. Análise de fluxo de valor (VSM);</li> <li>e. Planos de Controle;</li> <li>f. Correlação de dados;</li> <li>g. Histograma;</li> <li>h. MSA;</li> <li>i. Elementos finitos;</li> <li>j. Simulação de Monte Carlo;</li> <li>k. ANOVA</li> </ul> <p>(4) Avaliação financeira dos projetos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Fluxo de caixa;</li> <li>b. <i>Payback</i>;</li> </ul>
--	---

Fonte: Autoria própria (2022)

### Quadro 23 - Detalhamento da fase *Optimize* do DFSS genérico

#### Fase: *Optimese* - Otimizar

Objetivo: Testar parâmetros do produto, fabricação, visando a otimização dos CTQ

Atividades	Ferramentas
<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Especificar o projeto nominal;</li> <li>(2) Desenvolvimento do projeto robusto, com minimização da sensibilidade;</li> <li>(3) Aplicar EVOP (<i>Evolutionary Operations</i>);</li> <li>(4) Atualizar os CTQ;</li> <li>(5) Atualizar o MSA e os parâmetros de capacidade;</li> <li>(6) Atualizar os indicadores;</li> <li>(7) Levantar e ranquear as principais variações encontradas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(5) Ferramentas para otimização de variáveis e redução de ruídos no projeto: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. DOE;</li> <li>b. DFMEA;</li> <li>c. Método de Taguchi;</li> <li>d. FMEA;</li> <li>e. Projeto baseado em confiabilidade;</li> <li>f. Correlação;</li> <li>g. ANOVA;</li> <li>h. <i>Artificial Neural Network Optimize</i>;</li> <li>i. Funções transferência;</li> <li>j. Projeto robusto;</li> <li>k. Projeto de tolerâncias;</li> <li>l. AHP;</li> </ul> </li> </ul>

Fonte: Autoria própria (2022)

### Quadro 24 - Detalhamento da fase *Verify* do DFSS genérico

#### Fase: *Verify* - Verificar

Objetivo: Controle dos parâmetros críticos (CTQ)

Atividades	Ferramentas
<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Validação do produto, processo, serviço;</li> <li>(2) Condução do MSA;</li> <li>(3) Implementação do Controle Estatístico do Processo (CEP);</li> <li>(4) Definição e implementação do plano de controle;</li> <li>(5) Desenvolvimento de planos de manutenção;</li> <li>(6) Desenvolvimento de "Provas de Erros";</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de controle de variáveis do produto: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. DOE;</li> <li>b. Diagrama de causa-efeito;</li> <li>c. PFMEA;</li> <li>d. CAD;</li> </ul> </li> <li>• Ferramentas de gestão de projetos: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. <i>Artificial Neural Network Optimize</i>;</li> </ul> </li> </ul>

(7) Gerenciamento de riscos;	<ul style="list-style-type: none"> <li>b. QFD;</li> <li>c. Estratégia de implementação;</li> <li>d. Preparação de follow-up de mercado;</li> <li>e. ERIC Square – <i>Eliminate, Reduce, Increase, Create</i>;</li> <li>• Ferramentas de controle de variáveis de processos: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Estudos de capacidade de processos;</li> <li>b. Fluxogramas;</li> <li>c. DFX;</li> <li>d. Gráfico de Pareto;</li> <li>e. Histogramas de frequência;</li> <li>f. Cartas de controle;</li> <li>g. Planos de amostragem;</li> <li>h. Plano de controle dos processos;</li> <li>i. Simulações computacionais;</li> <li>j. Diagramas de dispersão;</li> <li>k. <i>Poka Yoke</i>;</li> <li>l. Teste piloto;</li> <li>m. ANOVA, Análise de regressão;</li> <li>n. Documentação do processo;</li> <li>o. Plano de transição;</li> <li>p. Procedimentos de operação padrão;</li> </ul> </li> </ul>
------------------------------	---

**Fonte: Autoria própria (2022)**

O conjunto de ferramentas é indicado para ser avaliado e selecionadas as ferramentas que melhor atendem as necessidades, objetivos e limitações de cada organização no desenvolvimento de seus produtos. Ressalta-se que os grupos de ferramentas apresentados foram obtidos baseando-se no que estava presente na literatura até o momento da realização da pesquisa, não estando limitado o uso somente das ferramentas relatadas.

A seleção de ferramentas que melhor atendem as atividades do DFSS também é dependente do tipo de desenvolvimento. Nota-se que o vasto conjunto de ferramentas nesta pesquisa é decorrência da variedade de produtos relatados nos estudos de caso considerados, e pelas abordagens distintas apresentadas nos artigos de revisão.

Apesar da clara variação entre a aplicabilidade das ferramentas, as atividades a serem executadas não possuem especificidade, não exigindo a seleção de acordo com cada desenvolvimento. Essa característica é resultado de um dos objetivos específicos da pesquisa, de construção de um modelo DFSS com abordagem genérica. Considerando o DFSS um processo, a forma apresentada é destinada a

inúmeras aplicações sendo passível a todos os tipos de variáveis de entrada que produtos, processos e serviços distintos apresentam.

Definido o modelo genérico de DFSS, buscou-se integrar a este as atividades de DP usinados. Com isso, foi obtida a proposta teórica sobre as fases, atividades e ferramentas do DFSS para usinagem, descritos no próximo tópico.

## **4.2 Modelo DFSS para processos de usinagem**

Antes de detalhar o modelo de DFSS para usinagem, é necessária a definição teórica da terminologia que será frequente sobre a Capacidade de Produção e de Processo. Capacidade de Produção refere-se à disponibilidade de recursos (hora-máquina), mão de obra, etc. A Capacidade de Processo empregada nesta pesquisa corrobora com a definição de Montgomery (2016), a qual define como o estudo sobre a uniformidade de um processo em relação às exigências ou especificações do produto, o que auxilia no desenvolvimento e na fabricação, buscando a eliminação ou redução dessa variabilidade.

O desenvolvimento de produtos é uma atividade de gestão multisetorial de uma organização, que deve considerar aspectos de planejamento estratégico e gestão de equipes, além do desenvolvimento técnico do produto. O PDP é uma ação estratégica e, portanto, não pode ter como foco exclusivo as características técnicas de desenvolvimento de produtos, ou apenas os retornos financeiros desejados.

Sendo assim, antes de serem detalhadas as atividades de DFSS para usinagem, é necessário que sejam contextualizadas as características gerais das organizações que compõe esse segmento. Considerando a abordagem de Rozenfeld *et al.* (2010) sobre os tipos de relacionamentos no DP, as organizações que executam os processos de usinagem caracterizam-se como organizações que participam de cadeias de suprimentos por meio de contratos de médio e longo prazo, contando com médios e altos volumes de produção, com parcerias que envolvem um risco considerável, apresentam um grau médio/alto de tecnologia envolvida e o cliente possui participação de codesenvolvimento dos processos produtivos.

O que se comercializa é o processamento de uma peça, sendo assim, trata-se de um prestador de serviço que depende de um projeto de produto que é elaborado pelo cliente. No PDP onde o produto é projetado e manufaturado pela mesma organização, geralmente, o desenvolvimento parte da análise sobre a capacidade que a organização apresenta para poder desenvolver o novo produto. Ou seja, os

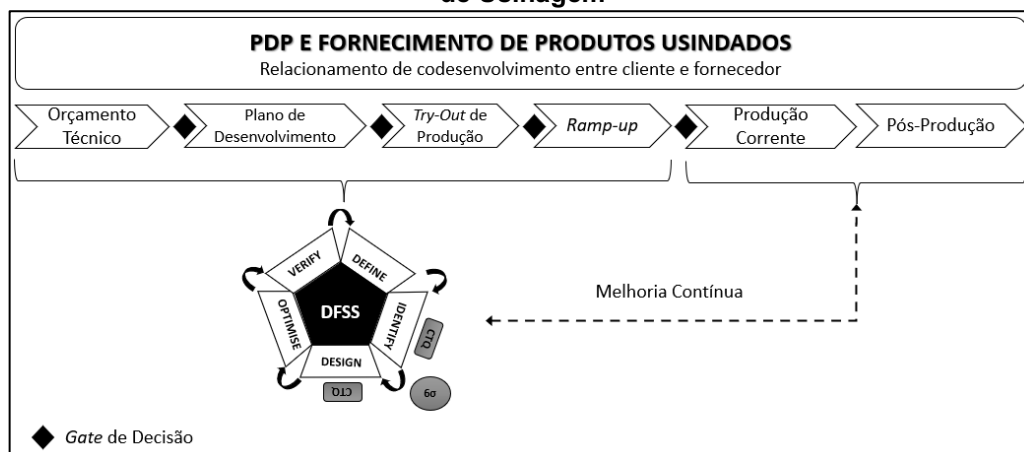
processos e recursos disponíveis determinam qual é o grau de desenvolvimento possível para o novo projeto. Tratando-se das organizações que oferecem o serviço de usinagem, o que se nota é a adaptação do processo existente para atender um projeto de produto, o que seria um processo inverso ao habitual, conseqüentemente apresenta um alto risco. O cliente, responsável pelo projeto do produto usinado, apresenta uma relação intensa no processo de desenvolvimento de manufatura, atuando constantemente nas ações, até a descontinuidade da produção e até mesmo no pós-vendas.

A relação entre fornecedor e cliente é formalizada em contrato para prestação de serviço. Os contratos geralmente são firmados para quantidades médias previstas ou tempo de fornecimento, dependendo da característica do produto e do segmento onde está inserido o cliente. Entretanto, independentemente do segmento, os contratos sempre estão relacionados a volumes médios a altos de produção e tempos longos de fornecimento. Essa característica torna a relação entre fornecedor e cliente crítica, pois para qualquer problema de fornecimento as perdas são impactantes para ambos, tendo em vista que, geralmente, o fornecimento do item é exclusivo. Ou seja, havendo contratos de desenvolvimento firmados, o fornecedor é fonte única do recurso para o cliente.

Um contrato de fornecimento em uma relação de codesenvolvimento condiciona a aprovação do processo de produção e do item produzido pelo fornecedor. Ou seja, a aceitação de um orçamento não implica no aceite de produção e comercialização das peças finais. Primeiramente deve ser desenvolvido o Plano de Desenvolvimento de Produto, compreendendo a aprovação de Processo e Peças Teste para posterior entrega do processo para a produção corrente. De maneira resumida, primeiramente são executados os *Try Outs* de produção (teste de produção), os itens produzidos e as características do processo são aprovados pelo cliente, para posterior *ramp-up* (início e progressão do volume de produção corrente).

Portanto, pode-se afirmar que o DFSS de usinagem é empregado em totalidade, até o momento de *ramp-up* de produção (Figura 47). Sendo estabelecida a produção corrente do produto, algumas ações do DFSS são executadas individualmente visando melhorias pontuais e contínuas, principalmente no que diz respeito a verificação e ajuste de possíveis erros, ou tendência de erros, identificados no decorrer do fornecimento.

**Figura 47 – Relação entre as fases de codesevolvimento entre cliente e fornecedor e o DFSS de Usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

Visando a gestão do PDP de processos de usinagem, o DFSS proposto fundamenta-se na pirâmide de usinagem de Tarvin (2016). Esta pirâmide é uma das poucas, se não única, referência atual que aborda os conceitos de gerenciamento das atividades relacionadas a usinagem. Adotam-se, também, no modelo proposto, os *gates* de decisão entre as fases, o que não é usualmente citado no modelo de DFSS, e com isso o conceito de variáveis de entrada e saída de cada fase de desenvolvimento fica evidente.

Estando definidas essas características gerais, também se faz necessário considerar que os processos de usinagem apresentam inúmeras variações do ponto de vista técnico, o que resulta nas diversas classificações destes processos que foram apresentadas nos tópicos iniciais desta pesquisa. O modelo DFSS para usinagem desenvolvido é indicado para processos de usinagem convencional, com ferramentas de corte que apresentam geometria definida e que são realizados por máquinas ferramenta com comando numérico computadorizado (convencionalmente chamados de processos de usinagem CNC).

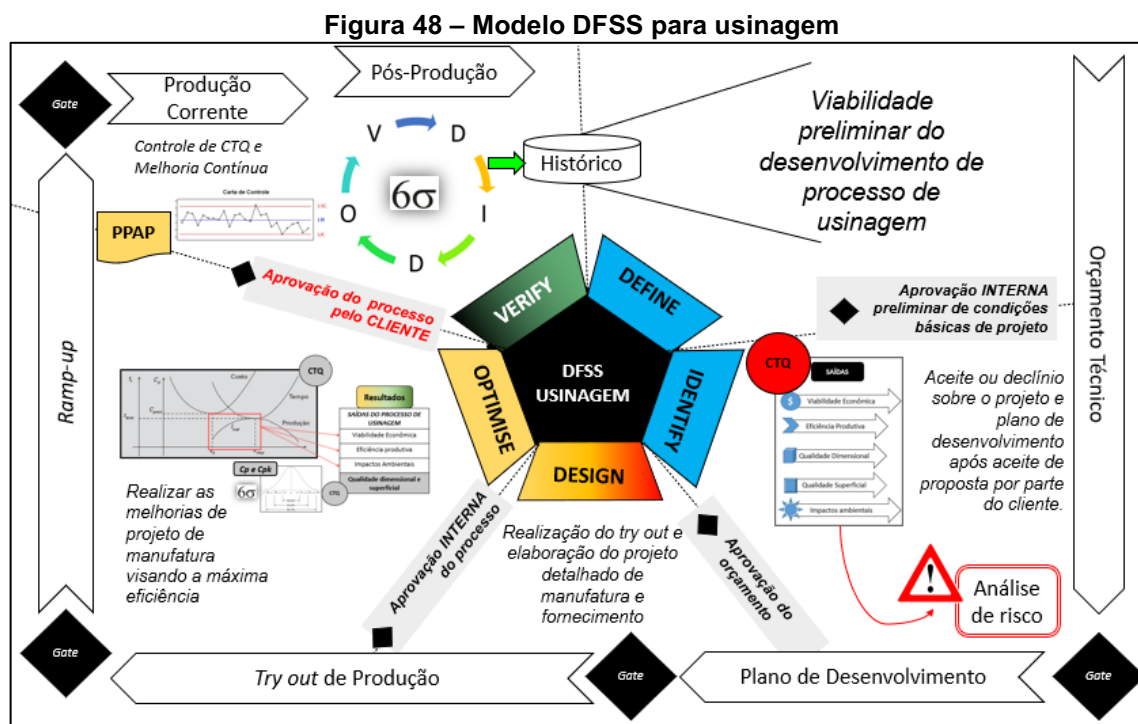
A apresentação de cada fase do DFSS para usinagem explicita os seguintes elementos:

- Áreas organizacionais envolvidas nas atividades principais;
- Objetivo fundamental da fase;
- Principais entradas;
- Principais saídas;
- Gate de decisão;
- As atividades principais a serem desenvolvidas;



- Recomendação de ferramentas que podem ser empregadas no desenvolvimento das atividades listadas.

A Figura 48 ilustra a síntese do modelo DFSS para produtos usinados, sendo as fases detalhadas nos próximos tópicos.



#### 4.2.1 Fase 1: *Define* para Usinagem

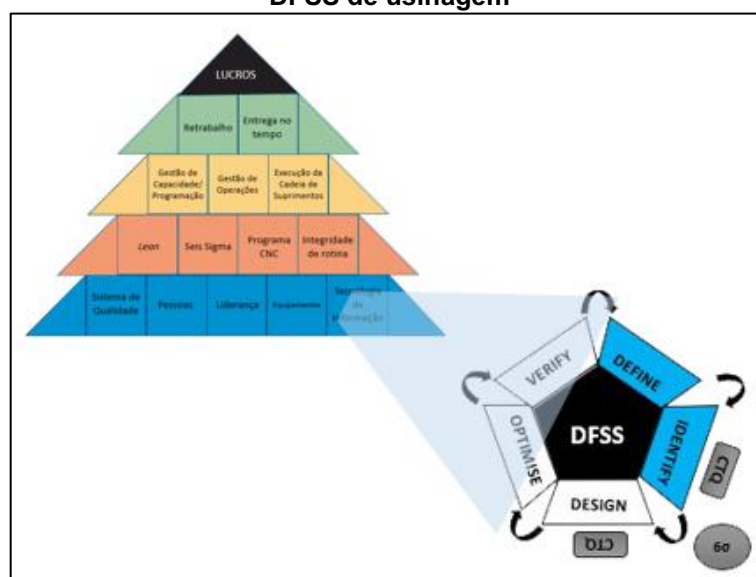
As organizações que oferecem o serviço de usinagem possuem algumas particularidades em relação a primeira fase de desenvolvimento de produtos. Primeiramente, essas organizações não dependem apenas da intenção de desenvolver novos produtos, mas sim de clientes que desejam adquirir o serviço de usinagem.

O processo começa, portanto, com a intenção de desenvolvimento de um possível cliente. A primeira atividade, quando há essa intenção, é o envio do projeto da peça para análise e orçamento. Entretanto, entende-se que a organização que deseja novos contratos deve ter o controle sobre a real capacidade disponível de recursos para novos produtos. A organização deve manter atualizados os dados sobre a sua capacidade produtiva, estando relacionada não somente a disponibilidade de equipamentos e recursos de apoio, mas inclusive a mão-de-obra disponível para planejamento e a operacionalização dos processos.

Portanto, entende-se que quando é recebida a intenção de desenvolvimento de um novo produto, a decisão e efetividade sobre este desenvolvimento depende de uma análise prévia geral e uma posterior detalhada, sobre a capacidade de produção. A capacidade prévia geral refere-se a uma análise preliminar do projeto, onde são analisadas as dimensões do produto, operações básicas necessárias, volume de produção pretendido, controle de qualidade requerido, além de condições logísticas e das formas de contratação do serviço. Se as condições avaliadas na análise preliminar não forem atendidas, não se faz necessária a análise detalhada, pois não é possível atender a condições mínimas de fornecimento. Cabe a organização avaliar a possibilidade e viabilidade de adaptação para o atendimento, ou a recusa de desenvolvimento.

Entende-se, portanto, que as atividades de análise prévia, e análise detalhada, são separadas por um *gate* decisório do desenvolvimento. Logo, a Fase 1 do DFSS considera apenas as ações vinculadas a análise prévia de projeto, seguindo para a próxima fase apenas os projetos onde é possível atender requisitos básicos de desenvolvimento. A Fase 1 do DFSS de usinagem é direcionada para as atividades da base da pirâmide de Tarvin (2016) e, portanto, depende de ações contínuas da organização. A Figura 49 apresenta o diagrama de representação da Fase 1 do DFSS para usinagem relacionada a pirâmide de Tarvin (2016).

**Figura 49 – Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase *Define e Identify* do DFSS de usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

As principais áreas envolvidas nesta etapa de desenvolvimento, considerando as atividades principais que compõe a fase, são as equipes vinculadas ao planejamento estratégico da empresa (geralmente envolvendo a alta administração), equipe de planejamento e controle de produção para fornecer os dados sobre a capacidade disponível, equipe comercial que estabelece o contato direto com o cliente, equipe de engenharia de desenvolvimento de produto/processo em conjunto com a área de qualidade para análise preliminar de requisitos básicos do projeto. Apesar do envolvimento direto apenas destas áreas, não devem ser negligenciadas as informações adicionais de áreas auxiliares.

No Quadro 25 são descritos o objetivo da Fase 1, *gate* de decisão, entradas e saídas da fase, as principais atividades e ferramentas recomendadas.

**Quadro 25 – Fase 1 (*Define – Definir*) do DFSS para Usinagem**

<b>Fase: <i>Define – Definir</i></b>	
<b>Objetivo:</b> Definir a viabilidade preliminar do desenvolvimento de processo de usinagem baseado no projeto do cliente.	
<b>Gate de decisão:</b> Atendimento de requisitos preliminares de projeto de cliente.	
<b>Entradas da Fase 1:</b> - Intenção de desenvolvimento de produto de cliente (solicitação de orçamento); - Capacidade de produção disponível (hora-máquina disponível e recursos) para novos projetos;	
<b>Saídas da Fase 1:</b> Aprovação preliminar de condições básicas de projeto	
<b>Atividades</b>	<b>Ferramentas</b>
(1) Desenvolvimento de Cultura para Qualidade e treinamentos; ( <i>Atividade contínua</i> ) (2) Comprometimento da equipe e alta gerência; ( <i>Atividade contínua</i> ) (3) Planejamento de vários níveis; ( <i>Atividade contínua</i> ) (4) Mapeamento sobre a capacidade de produção disponível (Histórico de dados de processo) – indispensável os dados por equipamentos; ( <i>Atividade contínua</i> ) (5) Gestão da busca e recebimento de intenção para desenvolvimento de novos projetos – gestão da cadeia de suprimentos; (6) Análise de requisitos preliminares de projetos (equipe multifuncional): a. Dimensões de peça; b. Operações requeridas; c. Volume de produção requerido; d. Controle de qualidade necessário; e. Aspectos contratuais (financeiros, logísticos, serviços adicionais, etc.) f. Identificação da necessidade de terceirização;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de gestão e controle de sistemas formais de qualidade;</li> <li>• Gerenciamento dos indicadores de Tarvin (2016) e demais indicadores que contribuem para a análise de capacidade produtiva;</li> <li>• Gestão do banco de dados – controle de histórico de informações por equipamento/máquina ferramenta;</li> <li>• Ferramentas para planejamento estratégico:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. SWOT;</li> <li>b. Análise de Risco;</li> <li>c. Matriz de Priorização;</li> </ol> </li> <li>• Cronograma para análise de requisitos preliminares;</li> <li>• Ferramentas para análise financeira e definição sobre investimentos, quando necessário;</li> <li>• Documento formal de registro sobre análise preliminar, contendo decisão e justificativa sobre aceite ou declínio de projeto;</li> </ul>

**Fonte: Autoria própria (2022)**

No próximo tópico é apresentada a Fase 2 do modelo de DFSS para usinagem.

#### 4.2.2 Fase 2: *Identify* para a usinagem

Para que seja iniciada a Fase 2 do DFSS para usinagem, é necessário que a organização avalie a viabilidade preliminar sobre o desenvolvimento. Nessa fase ainda não há formalização de contratos com o cliente, tratando-se de uma atividade unicamente interna à organização, portanto, também é relacionada ao nível 1 da pirâmide de Tarvin (2016), conforme ilustra a Figura 49 apresentada anteriormente. Há, entretanto, a recomendação de contato com o cliente para o esclarecimento de aspectos de projeto. É importante que todas as informações técnicas estejam claras nessa etapa, tendo em vista que é uma fase de alta criticidade. Finaliza-se com a decisão interna sobre a viabilidade de desenvolvimento do projeto e a posterior aprovação de orçamento por parte do cliente.

O grande diferencial proposto no modelo DFSS para usinagem é a avaliação, por parte do fornecedor, da perspectiva de capacidade de processo para o novo projeto. A decisão sobre executar um novo desenvolvimento, quando não avaliada corretamente, pode trazer sérios prejuízos ao fornecedor devido o compromisso contratual. O objetivo, portanto, é analisar as possibilidades futuras relacionadas a um novo desenvolvimento levando em consideração o histórico da capacidade de processo e o nível de risco relacionado. Para isso, é proposta uma previsão de índice de capacidade de processos considerando as características críticas do projeto a ser desenvolvido, vinculado ao conceito de CTQ. Nesse ponto há uma diferença em relação ao modelo genérico de DFSS proposto inicialmente, pois a definição do nível sigma era proposta apenas para otimizar e verificar o processo. No DP usinados, a definição do nível sigma é requerido nas fases iniciais, juntamente com o CTQ, para tomada de decisão sobre as propostas de orçamento de novos projetos.

Nesta fase, portanto, não são apenas identificados parte dos parâmetros de CTQ do DFSS por meio da análise detalhada do projeto, sendo estes, também, utilizados para tomada de decisão. Com a análise de capacidade o fornecedor pode estimar se seus processos atuais atendem a mínima qualidade requisitada, ou se há indícios de problemas no decorrer do fornecimento. Entende-se que, mesmo quando a análise da capacidade resulta em condições não ideais, a organização pode, de maneira antecipada, prever ações para melhoria do processo e aceitar o risco do

desenvolvimento. Prever uma capacidade de processo não ideal ao atendimento de um projeto não induz necessariamente ao declínio deste, mas deve conduzir obrigatoriamente a um plano de ação para melhoria do processo.

O Plano de Desenvolvimento do Produto é um plano macro de gestão que contém o cronograma de atividades, áreas envolvidas e responsáveis. Não se deve confundir este plano com o Plano Detalhado de Processo do Produto, onde as características técnicas do processo são projetadas. Nesta fase, as principais áreas envolvidas são a engenharia de produto/processos, área da qualidade e comercial. O Quadro 26 apresenta os detalhes da referida fase.

**Quadro 26 – Fase 2 (*Identify* – Identificar) do DFSS para usinagem**

<b>Fase 2: <i>Identify</i> - Identificar</b>	
<b>Objetivos:</b> Aceite ou declínio sobre o projeto e plano de desenvolvimento após aceite de proposta por parte do cliente.	
<b>Gate de decisão:</b> <i>Decisão interna:</i> Aceitar o desenvolvimento do projeto após análise detalhada; <i>Decisão externa (cliente):</i> Aceitar proposta de orçamento.	
<b>Entradas da Fase 2:</b> - Planos organizacionais; - Resultado da análise preliminar de projeto, com indicação sobre os recursos recomendados (equipamentos);	
<b>Saídas da Fase 2:</b> Plano de desenvolvimento do projeto de produto.	
<b>Atividades</b>	<b>Ferramentas</b>
(1) Identificação dos <i>stakeholders</i> ; (2) Busca dos dados históricos de processos realizados nos equipamentos predeterminados na Fase 1; (3) Análise detalhada do desenho; (4) Avaliação sobre a necessidade de serviços/processos terceirizados; (5) Determinar o nível sigma pretendido; (6) Identificação de parâmetros críticos de projeto - CTQ; a. Agrupamento dos processos/operações; b. Identificação de parâmetros de corte; c. Seleção das ferramentas de corte; d. Estimativa de capacidade de processo para CTQ identificados considerando as máquinas ferramentas pré-determinadas. (7) Identificação de parâmetros críticos da organização – CTQ; e. Estimativa de eficiência produtiva; f. Estimativa da viabilidade econômica do processo; g. Análise prévia sobre impactos ambientais (energia consumida e fluídos de corte).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestão do banco de dados – controle de histórico de informações por equipamento/máquina ferramenta;               <ul style="list-style-type: none"> <li>a. <i>Benchmarking</i>;</li> <li>b. <i>Brainstorming</i>;</li> <li>c. Diagrama de afinidades;</li> </ul> </li> <li>• Gerenciamento dos indicadores de Tarvin (2016) e demais indicadores referentes aos equipamentos pré-selecionados;</li> <li>• Registros sobre o controle estatístico de processo por equipamento;</li> <li>• Análise sobre a distribuição estatística de dados:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Teste de normalidade;</li> <li>b. Cálculo da média e desvio padrão difusos (<i>Fuzzy</i>);</li> <li>c. Cálculo de estimativa de índices <math>C_p</math> e <math>C_{pk}</math> para o novo projeto;</li> </ul> </li> <li>• Simulações (CAD/CAM) para análise preliminar sobre as variáveis de processo;</li> <li>• Correlação entre dados de equipamentos com os parâmetros críticos para a organização;</li> </ul>

<p>(8) Seleção dos recursos viáveis com base nas estimativas prévias;</p> <p>(9) Elaboração e envio do orçamento para o cliente;</p> <p>(10) Negociação e ajustes de detalhes de orçamento quando solicitados.</p> <p>(11) Elaboração do Plano de Desenvolvimento de Produto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas para o Plano de Desenvolvimento de Produto: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. TRIZ;</li> <li>b. SIPOC;</li> <li>c. Diagrama P;</li> <li>d. DOE;</li> <li>e. Design for X (DFX);</li> <li>j. Engenharia reversa;</li> <li>f. 5W2H;</li> <li>g. ACV;</li> </ul> </li> </ul>
--	--

**Fonte: Autoria própria (2022)**

No modelo proposto na presente pesquisa o CTQ apresenta uma abordagem diferenciada ao que se encontra na literatura sobre DFSS. Portanto, no próximo tópico é apresentada esta abordagem em detalhes.

#### 4.2.2.1 Proposta de CTQ em fases iniciais do DFSS para usinagem

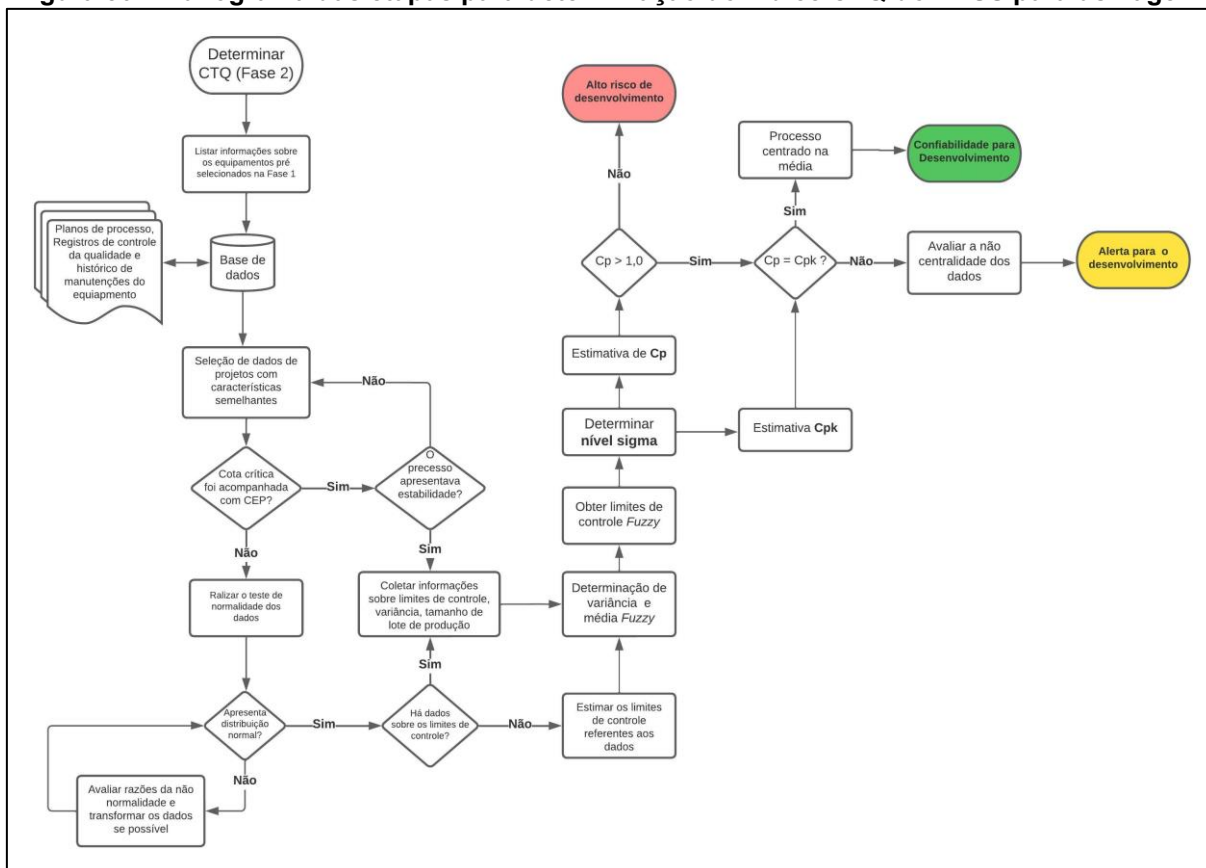
Um dos diferenciais do DFSS em relação aos modelos convencionais de PDP, é a identificação e controle de CTQ. Portanto, na presente pesquisa buscou-se analisar e detalhar uma abordagem de CTQ específica para os processos de usinagem. Os índices foram definidos observadas as principais variáveis do processo, e um parâmetro que pudesse ser relacionado a todas elas.

No desenvolvimento da pesquisa, foi identificado que para aproximar o modelo de DFSS para usinagem da prática das organizações, era fundamental explorar o conceito de sistemas cyber físicos e os pilares fundamentais da Indústria 4.0, visto que alguns profissionais sinalizaram a importância das ferramentas que contribuem para a modernização de seus processos, principalmente no que diz respeito a tomada de decisão. Apesar de não ser uma realidade para todas as organizações, muitas delas estão buscando meios para modernização de seus processos produtivos, visando alguns pilares da indústria 4.0 (gestão de banco de dados, tomada de decisão autônoma, conectividade entre equipamentos).

Com esse objetivo, nas fases iniciais do DFSS para usinagem utilizam-se os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ , que são determinados considerando as características de qualidade críticas definidas em projeto, sendo estas relacionadas a aspectos dimensionais e rugosidade média da superfície. Os dois índices fornecem uma única interpretação sobre o comportamento de um processo e, portanto, ambos formam conjuntamente um único índice CTQ para apoio na tomada de decisão. Para isso, são considerados

dados históricos de equipamentos, referentes ao processamento de peças com o mesmo material, com dimensões iguais ou aproximadas ou com limites de especificação iguais ou aproximados. Para ilustrar o passo-a-passo necessário para estabelecer e analisar este CTQ, é apresentado na Figura 50 o fluxograma com todas as etapas.

**Figura 50 - Fluxograma das etapas para determinação do índice CTQ do DFSS para usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

O índice CTQ fornece uma perspectiva de risco referente ao desenvolvimento de um projeto, considerando suas características críticas e a capacidade dos processos produtivos em atender características  $C_p$  semelhantes baseando-se no histórico de processo. A representação foi realizada por meio do fluxograma visando facilitar a futura construção de um algoritmo para utilização da proposta do CTQ em sistemas cyber físicos empregados em PPAC (proposta de estudo futuro desta pesquisa).

O nível sigma impacta diretamente na análise do CTQ. Geralmente, o nível sigma estabelecido é uma exigência do cliente sobre a capacidade do processo do fornecedor. Entretanto, entende-se que em algumas situações o fornecedor assume

o risco de produzir em um nível inferior, assumindo possíveis custos com peças não conformes e a necessidade de ajustes constante no processo. O índice proposto possibilita que se avalie o quanto a variação estimada do processo pode impactar o risco de desenvolvimento.

Em situações em que o risco é moderado e alto, recomenda-se que sejam correlacionados os resultados sobre  $C_p$  e  $C_{pk}$  com o registro de não conformidades dos lotes produzidos. Com isso é possível identificar possíveis causas aleatórias que podem ser evitadas no novo produto.

A Fase 2 é concluída com o Plano de Desenvolvimento do Produto, onde todos os fatores de risco são previstos e medidas de contenção são estipuladas. Com isso é possível seguir para a Fase 3, a qual é descrita no próximo tópico.

#### 4.2.3 Fase 3: *Design* para usinagem

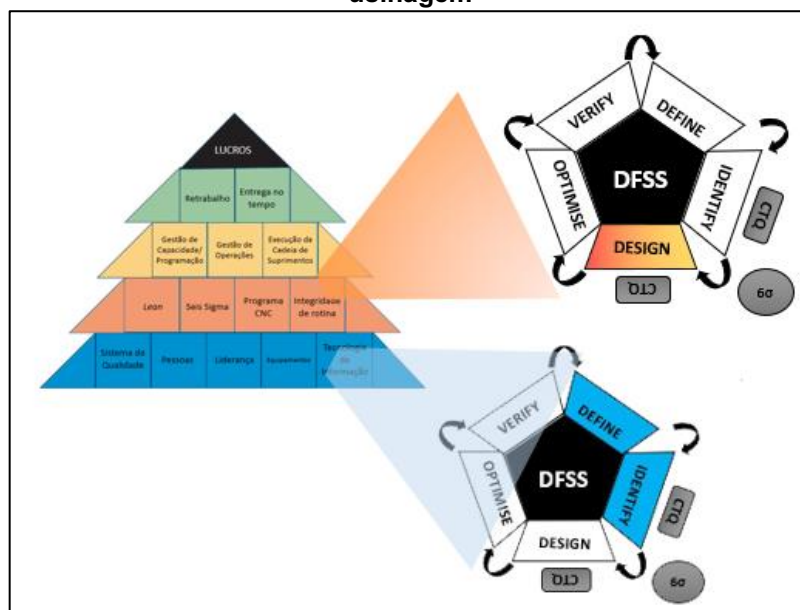
A Fase 3 do DFSS para usinagem apresenta como objetivo principal realizar o *try out* de processo e avaliar a eficiência, identificando as necessidades de melhoria. Nessa fase ações paralelas à manufatura são definidas, como a validação de fornecedores e o detalhamento de atividades de apoio (ferramentaria, qualidade e logística).

O objetivo principal da fase corresponde às ações do segundo e terceiro nível da pirâmide de Tarvin (2016), visto que apesar do processo de produção ter início, ainda apresenta objetivo de teste requerendo validação e possíveis ajustes (Figura 51).

O controle de CTQ é um dos pontos chave dessa fase, induzindo às ações posteriores de otimização. O CTQ nas fases iniciais visa a análise de risco e o apoio a tomada de decisão, e mesmo se tratando de índices que nas fases posteriores são atualizados para a otimização, recomenda-se o uso de outras características críticas referentes às variáveis de entrada, operação e saídas dos processos de usinagem. A Figura 52 sintetiza a proposta dos CTQ do DFSS para usinagem que devem ser considerados a partir da fase 3 do modelo.

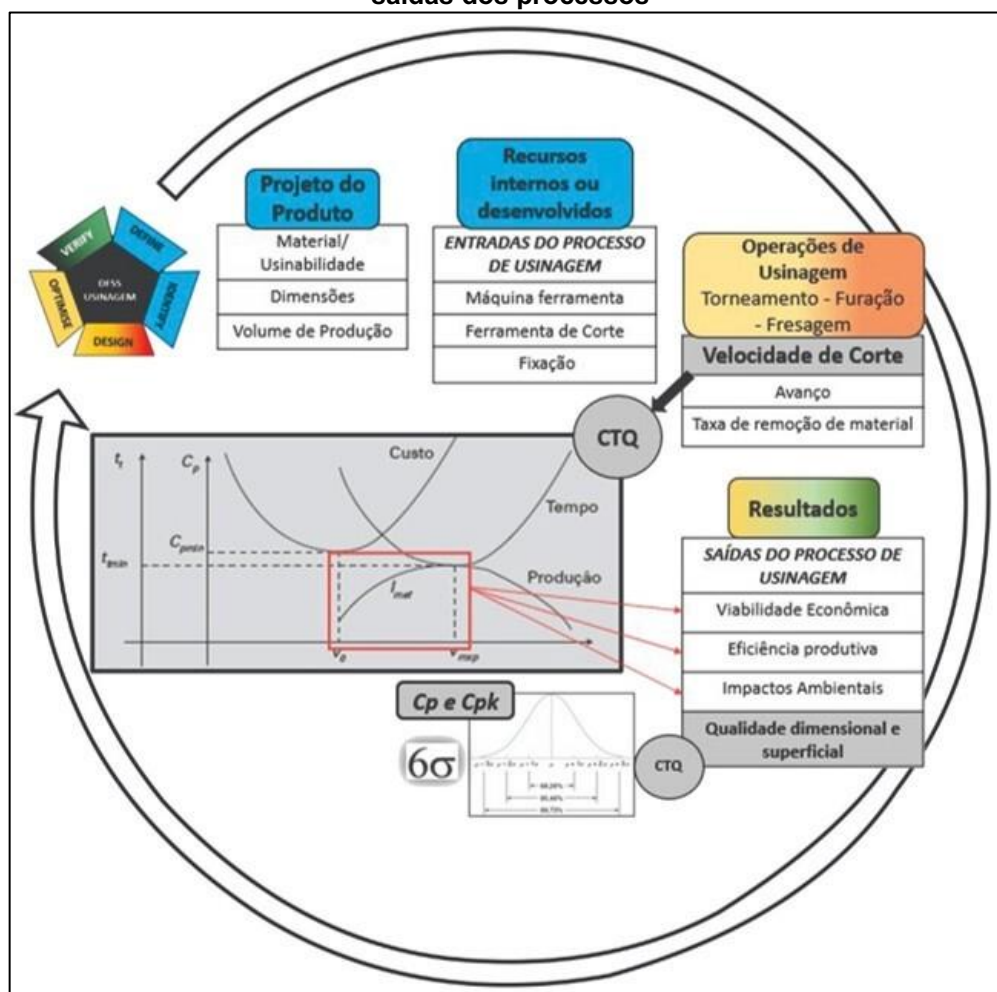


Figura 51 - Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase *Design* do DFSS de usinagem



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 52 – Índice CTQ das fases finais do DFSS para usinagem visando entradas, operação e saídas dos processos



Fonte: Figura elaborada pela autora, com gráfico sobre intervalo de máxima eficiência de usinagem retirado de Machado *et al.* (2015)

Entende-se que a análise de parâmetros simples sobre a velocidade econômica e a velocidade de máxima produção podem gerar importantes conclusões e induzir a direcionamentos importantes sobre as saídas esperadas do processo. Considerando estas duas variáveis a organização recai sobre a análise do custo direto envolvido no processo (custos com máquina, ferramenta de corte, operação de máquina e demais custos diretos, conforme exposto no capítulo 2), é capaz de levantar de maneira simples a relação entre o tempo de produção dos lotes e a capacidade de produção envolvida, e ainda, pode estimar a quantidade de fluido de corte mínima necessária, e assim analisar os impactos ambientais envolvidos de maneira indireta. O consumo energético também é uma variável que possui relação direta com a velocidade de corte envolvida no processo, e mesmo sendo necessárias análises mais complexas sobre essa saída, é possível estimar uma faixa de consumo relacionada a velocidade de corte empregada no processo.

Sugere-se o CTQ das fases finais direcionado a velocidade de corte do processo, ao menos para as cotas principais de um projeto, visando a ampla abordagem dessa variável com as demais saídas do processo. Se a organização definir no desenvolvimento do DFSS para usinagem, que fará a análise sobre o intervalo de máxima eficiência de produção (intervalo de velocidades entre a velocidade econômica de corte e de máxima produção) e os impactos dos valores considerados nas saídas referentes à qualidade de produto, aspectos ambientais e econômicos, já poderá identificar potenciais riscos, os quais não seriam claros se o projeto de processo vislumbrasse apenas aspectos técnicos sobre as etapas de operações, ferramentas requeridas e tempo resultante.

Desta maneira, o DFSS para usinagem apresenta de maneira explícita as principais atividades relacionadas ao planejamento deste processo de manufatura considerando CTQ voltado ao controle e análise sobre a velocidade de corte do processo e aos índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  do processo em desenvolvimento. As atividades e ferramentas sugeridas como apoio, são descritas no Quadro 27.

**Quadro 27 - Fase 3 (Design – Projetar) do DFSS para usinagem**

<b>Fase: Design - Projetar</b>
<b>Objetivo:</b> Realização do <i>try out</i> e elaboração do projeto detalhado de manufatura e fornecimento
<b>Gate de decisão:</b> <i>Decisão interna:</i> Aprovação interna e de fornecedores da qualidade de produto e validação de critérios mínimos de processo; <i>Decisão externa (cliente):</i> Aprovação de subfornecedores (quando requerido).
<b>Entradas da Fase 3:</b> Plano de desenvolvimento de projeto do produto

Saídas da Fase 3: Elementos críticos para otimização (Plano de otimização de processo) e projeto detalhado de manufatura e fornecimento	
Atividades	Ferramentas
(1) Desdobramento de parâmetros críticos (fundamentado na análise de CTQ e outros fatores críticos de projeto); (2) Definição do plano para serviços/processos terceirizados e aprovação de fornecimento; (3) Reutilização de planos de processo existentes; (4) Definir sequência de operações; (5) Especificação das máquinas e equipamentos; (6) Seleção e especificação de pessoal e habilidades; (7) Especificar fixação; (8) Especificar a inspeção; (9) Especificar os métodos de processo; (10) Especificar parâmetros de trabalho; (11) Elaborar procedimentos e instruções de trabalho; (12) Obter a programação em CNC; (13) Determinação dos tempos de produção; (14) Definir o controle dos CTQ; (15) Quantificar as funções transferência que envolvem os requisitos; (16) Estabelecer os limites de controle e tolerâncias; (17) Prever as possíveis falhas (ruídos) do processo; (18) Prever a performance do processo; (19) Refinar a capacidade de processo; (20) Desenvolver o plano de controle; (21) Definir os indicadores de desempenho; (22) Projetar instalações; (23) Produção de lote piloto – <i>Try out</i> de produção (24) Plano de otimização de processo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas focadas nas características de produto para planejamento de projeto de produção:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. CAD/CAE;</li> <li>b. DOE;</li> <li>c. Projeto robusto;</li> <li>d. Design for X;</li> <li>e. Diagrama P;</li> <li>f. As 7 ferramentas da qualidade;</li> <li>g. FMEA/ DFMEA;</li> <li>h. SIPOC;</li> </ol> </li> <li>• Ferramentas para projeto de processos:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. PFMEA;</li> <li>b. CAM;</li> <li>c. Princípios Lean;</li> <li>d. PERT/CPM;</li> <li>e. Ferramentas para análise de processos;</li> </ol> </li> <li>• Ferramentas para avaliação de variáveis de projetos:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Índices de capacidade de processos (Cp, Cpk, Cr, Ppk, Pp e Pr);</li> <li>b. Funções transferência;</li> <li>c. Análise de fluxo de valor (VSM), Poka Yoke, e demais ferramentas do Lean Manufacturing;</li> <li>d. Planos de Controle;</li> <li>e. Métodos estatísticos para análise de dados (análise de variância, correlação, histograma, etc.);</li> <li>f. MSA;</li> <li>g. Elementos finitos;</li> <li>h. Simulação de Monte Carlo;</li> </ol> </li> </ul>

Fonte: Autoria própria (2022)

Na Fase 3, o risco de desenvolvimento identificado na análise de CTQ nas fases iniciais direciona o planejamento e execução do *try out*. Se há um risco eminente de desenvolvimento, devem ser identificados os pontos críticos e definidas as ações de contenção para qualquer problema. Pode-se afirmar ainda que a função do *try out* é minimizar o risco de desenvolvimento que foi identificado por meio do CTQ, e definir como será o controle contínuo das características vinculadas a esses CTQ.

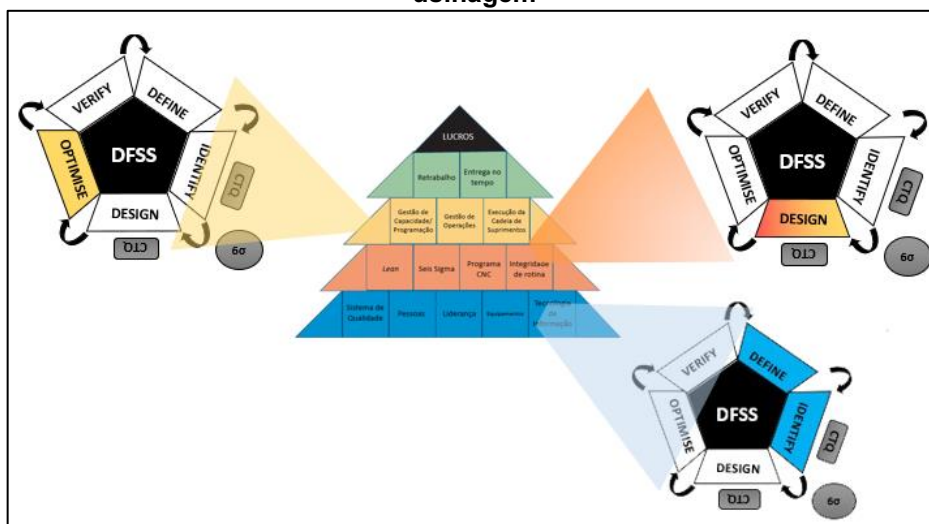
O projeto detalhado da manufatura é definido após identificadas todas as melhorias e possíveis correções do plano de manufatura. Estando o processo definido

e avaliado, torna-se viável elaborar o plano de otimização, visando a melhoria contínua de eficiência. A otimização do processo de usinagem visa reduzir ou eliminar os ruídos no processo (processo robusto), ou seja, considera-se nesta fase de desenvolvimento que todas as causas atribuíveis de variação do processo foram identificadas e eliminadas no *try out* e restam apenas as causas aleatórias de variabilidade, as quais não são facilmente identificadas e requerem ações de longo prazo. Com esse objetivo principal, apresenta-se no próximo tópico a Fase 4 do DFSS para usinagem.

#### 4.2.4 Fase 4: *Optimise* para usinagem

A fase 4 do DFSS de usinagem tem como objetivo principal o desenvolvimento das ações de melhoria identificadas no *try out*. O terceiro nível da pirâmide de Tarvin (2016) apresenta as ações relacionadas a esta fase (Figura 53), visto que as ações de melhoria se efetivam com a gestão de capacidade e operações. Esta fase é direcionada a ajustes de processo, e deve ser iniciada somente quando todas as características de projeto já estiverem definidas e devidamente testadas e avaliadas.

**Figura 53 - Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase *Optimise* do DFSS de usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

Como as ações de otimização são referentes ao refinamento do processo, pois as características mínimas já foram testadas e aprovadas na Fase 3, nesta fase o processo e o produto são aprovados pelo cliente, sendo possível estabelecer o plano de produção de o *ramp-up*. O plano de produção depende diretamente das características do processo referentes a capacidade de produção, como o tempo de

ciclo de produção unitária, tempo necessário para *set up* de máquina, tempo de inspeção e liberação de peças da produção e, portanto, só é concluído nesta fase de desenvolvimento. O Quadro 28 sintetiza as atividades recomendadas para a fase de otimização e as ferramentas que podem ser empregadas.

<b>Quadro 28 - Fase 4 (<i>Optimise</i> – Otimizar) do DFSS para usinagem</b>	
<b>Fase: <i>Optimise</i> - Otimizar</b>	
<b>Objetivo:</b> Realizar as melhorias de projeto de manufatura visando a máxima eficiência e aprovação do cliente do processo e produto	
<b>Gate de decisão:</b> <i>Decisão interna:</i> Liberação de processo para <i>ramp up</i> de produção; <i>Decisão externa (cliente):</i> Aprovação de processo e produto.	
<b>Entradas da Fase 4:</b> Plano de otimização de processo	
<b>Saídas da Fase 4:</b> Plano de <i>ramp up</i> de produção	
<b>Atividades</b>	<b>Ferramentas</b>
(1) Definição do plano de ação de melhorias; (2) Desenvolvimento do projeto robusto, com minimização da sensibilidade; (3) Atualizar os CTQ; (4) Atualizar o MSA e os parâmetros de capacidade; (5) Atualizar os indicadores; (6) Aprovação de Produto e Processo – início do <i>ramp up</i> de produção	(1) Ferramentas para otimização de variáveis e redução de ruídos no projeto: a. DOE; b. DFMEA; c. Método de Taguchi; d. FMEA; e. Projeto baseado em confiabilidade; f. Correlação; g. EVOP – otimização de processos h. ANOVA; i. Artificial Neural Network Optimize; j. Funções transferência; k. Projeto robusto; l. Projeto de tolerâncias; m. AHP;

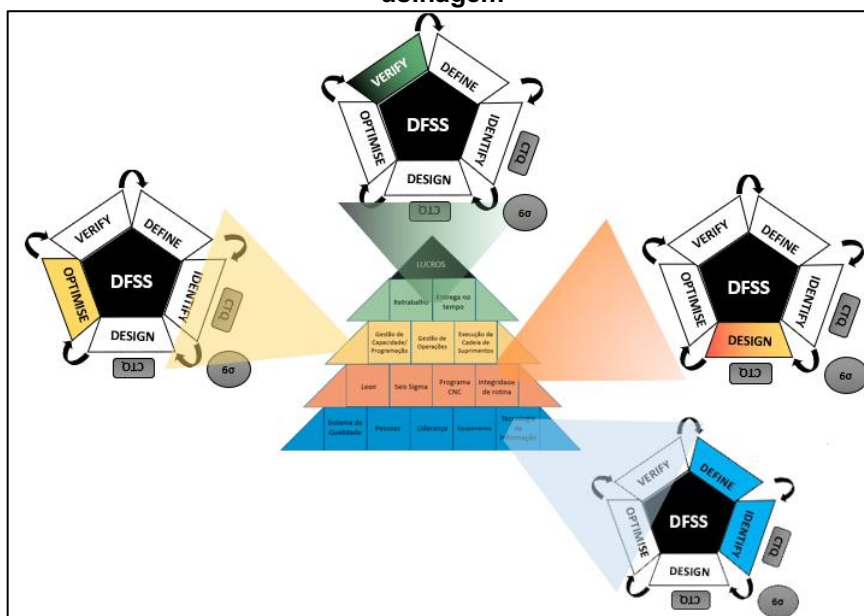
**Fonte: Autoria própria (2022)**

Estando o processo liberado para produção corrente, as ações de desenvolvimento de produto e processo, de acordo com a proposta do DFSS, seguem com o propósito de verificação e melhorias. O próximo tópico detalha essas atividades, que também são consideradas como um diferencial significativo da metodologia DFSS em comparação com modelos lineares de PDP.

#### 4.2.5 Fase 5: *Verify* para usinagem

A última fase do DFSS para usinagem possui relação direta com os últimos níveis da pirâmide de Tarvin (2016), os quais se referem aos resultados internos e externos à organização e o desenvolvimento de produto e processo realizados (Figura 54).

**Figura 54 - Relação entre a pirâmide de Tarvin e as atividades da fase *Verify* do DFSS de usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

A grande maioria dos modelos de PDP enfatizam o controle e atividades de pós desenvolvimento relacionados apenas aos resultados esperados pela organização. Portanto, são observados os *feedbacks* de clientes, os principais problemas identificados na relação, e os respectivos impactos no retorno esperado de cada produto desenvolvido. O DFSS vai além da análise do resultado financeiro e de satisfação do cliente após o fornecimento, e vincula o retorno esperado ao comportamento dos processos envolvidos para a entrega do produto.

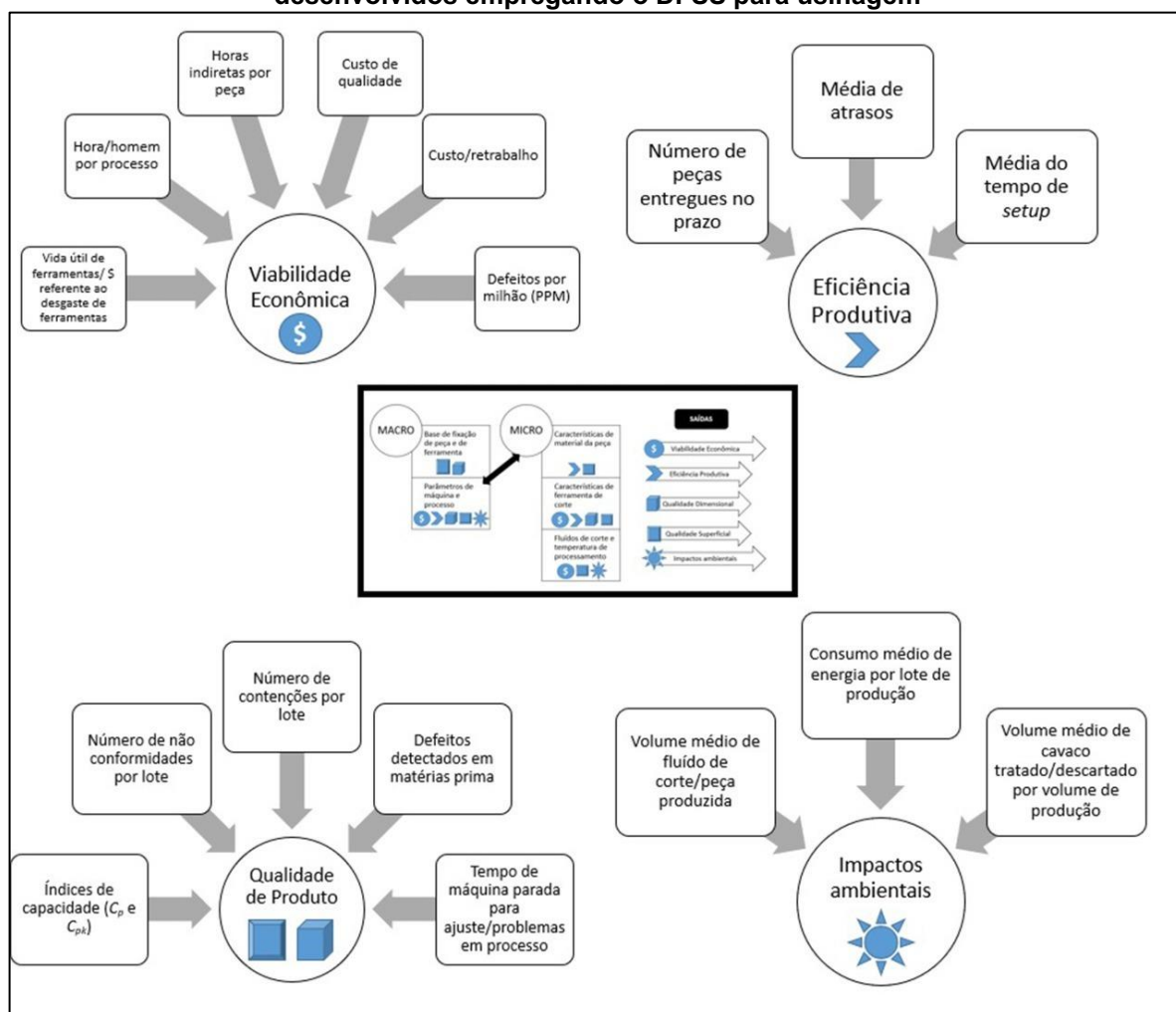
Entende-se que a eficiência do PDP aliado ao comportamento do processo de produção de um produto, apresentam relação direta com o retorno pretendido. Entretanto, em modelos convencionais do PDP não são mencionadas as maneiras de se mensurar essa relação. Quando são determinados os pontos críticos do processo, e analisa-se o risco de desenvolvimento a partir destes pontos (os CTQ), os problemas de desenvolvimento são minimizados desde as etapas iniciais, e como é constatado na maioria das referências teóricas sobre o assunto, quanto antes identificados os possíveis erros de desenvolvimento, menor é o custo e o impacto.

A última fase do DFSS para usinagem objetiva, portanto, controlar os CTQ (tanto de fases iniciais quanto os de fases finais) tendo em vista o risco que eles apresentam e buscar sempre a melhoria contínua do processo. Em relação ao CTQ definido para o DFSS para usinagem direcionado para a previsibilidade de capacidade de processo baseada nos índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ , após o desenvolvimento e liberação do

processo para *ramp-up*, a previsibilidade é substituída pelo controle real do processo desenvolvido, portanto, o controle não considera mais os dados históricos mas sim, do processo atual. O controle destes índices pode indicar, conforme apresentado anteriormente na definição da proposta do CTQ, quais entradas do processo de usinagem apresentam variações que levam a instabilidade e incapacidade do processo e, portanto, direcionam às ações necessárias de melhoria.

O CTQ de fases finais auxilia na definição de metas ideais para o processo, e na Fase 5, empregando os indicadores de saída de processo (Figura 55), é possível analisar o quanto a produção corrente do produto está atendendo as definições do plano de processo. Os indicadores sugeridos são adaptados de Tarvin (2016).

**Figura 55 - Indicadores para acompanhamento de produção corrente de produtos usinados desenvolvidos empregando o DFSS para usinagem**



Fonte: Autoria própria (2022)

Por fim, o Quadro 29 sintetiza as atividades e ferramentas visando as ações de verificação e constante melhoria no processo desenvolvido.

**Quadro 29 - Fase 5 (Verify – Verificar) do DFSS para usinagem**

<b>Fase: Verify - Verificar</b>	
Objetivo: Controle dos parâmetros críticos (CTQ)	
<b>Gate de decisão:</b> <i>Decisão interna:</i> Melhorias identificadas no processo de produção e entrega dos produtos <i>Decisão externa (cliente):</i> Interferência no processo em decorrência de problemas de produto ou de entrega	
<b>Entradas da Fase 4:</b> Plano de <i>ramp up</i> de produção	
<b>Saídas da Fase 4:</b> Variáveis de entrada do processo que precisam de alteração no plano de manufatura visando a melhoria contínua	
<b>Atividades</b>	<b>Ferramentas</b>
(1) Condução do MSA; (2) Implementação do Controle Estatístico do Processo (CEP); (3) Definição e implementação do plano de controle; (4) Desenvolvimento de planos de manutenção; (5) Desenvolvimento de “Provas de Erros”; (6) Gerenciamento de riscos;	(1) Ferramentas de controle de variáveis do produto: a. DOE; b. Diagrama de causa-efeito; c. PFMEA; d. CAD; (2) Ferramentas de gestão de projetos: a. <i>Artificial Neural Network Optimize</i> ; b. QFD; c. Estratégia de implementação; d. Preparação de follow-up de mercado; e. ERIC Square – <i>Eliminate, Reduce, Increase, Create</i> ; (3) Ferramentas de controle de variáveis de processos: a. Estudos de capacidade de processos; b. Fluxogramas; c. DFX; d. Gráfico de Pareto; e. Histogramas de frequência; f. Cartas de controle; g. Planos de amostragem; h. Plano de controle dos processos; i. Simulações computacionais; j. Diagramas de dispersão; k. <i>Poka Yoke</i> ; l. Teste piloto; m. ANOVA, Análise de regressão; n. Documentação do processo; o. Plano de transição; p. Procedimentos de operação padrão;

Fonte: Autoria própria (2022)



O próximo tópico apresenta as análises sobre o modelo proposto, considerando a opinião dos profissionais que atuam com o desenvolvimento de produtos usinados, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3.

#### **4.3 Avaliação do modelo de DFSS para usinagem: opinião de profissionais de DP**

São dois grupos distintos consultados para a avaliação do modelo proposto. Um é composto por empresas fornecedoras da cadeia de suprimentos, e o outro, por empresas de primeiro nível, ou as empresas detentoras dos projetos de produto e que desenvolvem fornecedores de usinagem.

Do conjunto de 54 empresas fornecedoras consultadas, foram obtidas avaliações significativas de 12 empresas. Deste conjunto, 7 empresas participaram por meio de visita à organização ou entrevista via videoconferência. As demais organizações, foi realizado o contato com os profissionais de desenvolvimento de produtos e processos, via e-mail ou *WhatsApp* por meio de questionário (Apêndice F). Das empresas que realizam o desenvolvimento do fornecedor do serviço de usinagem, foram obtidas avaliações de 4 grandes grupos por meio de entrevistas.

Dentre as 12 empresas, apenas 5 atuam com volumes médios e altos para um mix variado de produtos. As demais empresas indicaram a produção de médio e alto volume para itens específicos, apresentando processos de usinagem que geralmente atendem a volumes baixos, ou para volumes altos de produção, mas para atendimento próprio de necessidades.

Sobre os profissionais consultados, a média de tempo na prática de desenvolvimento de produtos e processos de usinagem é de 9 anos. A formação acadêmica destes profissionais abrange as áreas de Engenharia de Produção, Engenharia Mecânica, Engenharia Metalúrgica, Engenharia de Materiais, Automação Industrial, e Administração. A maioria dos profissionais consultados passaram por experiência na área, ou relacionada, em outras empresas.

Conforme exposto na metodologia, primeiramente foram levantadas as informações sobre a caracterização do desenvolvimento dos produtos usinados em cada uma das organizações (fornecedoras dos processos de usinagem) e depois foi apresentado o modelo DFSS para usinagem (o qual já estava estruturado com uma primeira proposta). Com os resultados do levantamento alguns pontos foram atualizados, sendo o comparativo da primeira proposta com as atualizações após as

entrevistas e recebimento dos questionários, expostas no Quadro 30. Todas as respostas obtidas são apresentadas em Dzulinski (2022c). Foram ocultadas as informações que tornassem possível identificar as empresas à pedido das mesmas.

**Quadro 30 - Síntese das respostas obtidas (empresas fornecedoras) em relação a estrutura do DP e o respectivo impacto na primeira proposta do DFSS para usinagem**

<b>Objetivo:</b> Padrão de gestão das empresas consultadas:
<p>A gestão inicia pelo departamento comercial, onde a primeira proposta de processo é realizada. Geralmente quem realiza a proposta de orçamento possui vasta experiência. Um dos fatores mais complexos é o <i>deadline</i> para cotação. Aprovado o orçamento, o setor de Engenharia de Processos/ Controle de Processos assume as atividades de desenvolvimento. O mesmo setor desenvolve itens novos e realiza o acompanhamento dos processos correntes. Algumas empresas contam com um departamento de melhorias, onde o processo a ser desenvolvido é apoiado por análise deste departamento. Dois setores participam de todas as ações de desenvolvimento: programação de produção e controle de qualidade de produtos. Todos os entrevistados comentaram que boa parte das decisões sobre o desenvolvimento partem de experiências anteriores e produtos similares. Nenhuma das empresas consultadas possui plano de processos de usinagem auxiliado por computador, entretanto, utilizam outros recursos de apoio como softwares de simulação. Todas as empresas citam que o principal recurso empregado para plano de processos de usinagem é a experiência de algum profissional.</p>
<b>Proposta inicial do DFSS para usinagem x Adaptação após entrevistas</b>
<p>A proposta inicial previa uma análise detalhada de projeto para orçamento. Entretanto, o deadline de cotação geralmente é inferior a 10 dias, o que impede atividades que requerem um período longo de análise.</p> <p>A primeira proposta não considerava o desenvolvimento de ferramental, sendo que boa parte dos profissionais ressalta que o desenvolvimento e controle de ferramental é atividade crítica e que impacta no desenvolvimento do produto.</p>
<b>Objetivo:</b> Áreas envolvidas
<p>Comercial/ Comercial técnico Qualidade Engenharia de Processos Ferramentaria Planejamento e Controle de Produção</p>
<b>Proposta inicial do DFSS para usinagem x Adaptação após entrevistas</b>
<p>As empresas de maior porte (acima de 100 funcionários) citam um departamento específico de melhoria contínua que apoia no desenvolvimento de produtos. Este departamento não havia sido considerado na primeira proposta de DFSS para usinagem.</p>
<b>Objetivo da entrevista:</b> Relação entre o projeto e a execução de produtos
<p>A grande maioria dos projetos são avaliados comparando-se a projetos anteriores. Segundo os respondentes, dificilmente existem variações significativas de produtos cotados que impactam no desenvolvimento. Os problemas que ocorrem, geralmente, possuem causas específicas e não correlacionadas a problemas de produtos semelhantes. O maior desafio são causas de problemas que não dependem de controle de processo, como material, ferramentas de corte, elementos de fixação, problemas em processos precedentes.</p>
<b>Proposta inicial do DFSS para usinagem x Adaptação após entrevistas</b>
<p>A primeira proposta de DFSS para usinagem considerava que os maiores problemas do processo se referiam a características do próprio processo. Entretanto, os profissionais afirmam que a maioria dos problemas com o desenvolvimento de novos produtos estão relacionados a outras variáveis, como material ou ainda, o processamento anterior. Segundo os profissionais, o alinhamento entre um processo anterior e o processo de usinagem é fundamental, e em muitos casos esse alinhamento não ocorre.</p>
<b>Objetivo da entrevista:</b> Verificar o uso de um modelo (formal ou informal) de DP

A grande maioria segue PPAP (pois são fornecedores do segmento automotivo), ou não observa a existência de um modelo formal. A maioria dos projetos são adaptados de acordo com a realidade do momento da organização.
<b>Proposta inicial do DFSS para usinagem x Adaptação após entrevistas</b>
A primeira proposta de DFSS para usinagem não considerava as etapas do PPAP em consonância com as etapas do DFSS. Entretanto, é mandatório aos fornecedores do segmento automotivo o atendimento aos requisitos de PPAP. Logo, buscou-se a relação entre as etapas.
<b>Objetivo da entrevista:</b> Identificar as variações de desenvolvimento entre produtos (usinados e não usinados)
A maioria das empresas consultadas não realizam apenas o processo de usinagem. Aquelas que realizam a usinagem de produtos que possuem processos precedentes realizados por elas mesmas, afirmam que é mais eficiente o desenvolvimento conjunto de um processo primário e a usinagem. Isso ocorre porque é possível ajustar os processos para melhorar eficiência um em função do outro.
<b>Proposta inicial do DFSS para usinagem x Adaptação após entrevistas</b>
Neste aspecto não houve alterações necessárias na primeira proposta de DFSS para usinagem.

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Quando os profissionais foram questionados sobre os pontos fortes e fracos da forma como são desenvolvidos os produtos usinados, se destacam os seguintes elementos: devido a experiência da empresa (como um todo, e não apenas a um profissional) entre o recebimento de um novo projeto e sua efetiva execução, o tempo tem sido cada vez menor. Acaba-se priorizando a experiência profissional da equipe envolvida, e desta forma há uma grande valorização destes profissionais dentro da empresa. Mas, isso ocorre pela dificuldade de se encontrar no mercado profissionais especialistas na área, e com experiência. Poucas foram as empresas que destacaram como ponto positivo em seu desenvolvimento, ferramentas específicas para gestão e controle sobre o desenvolvimento.

Sobre os pontos fracos, houve uma unanimidade em relação a falhas não previstas no projeto do processo, mas que poderiam ser evitadas. Todos os entrevistados relatam que muitos projetos quando são orçados, devido a um *deadline* curto, acabam não sendo detalhados o suficiente para identificar riscos. O grande problema disso é que quando não há previsão, no momento do orçamento, esses problemas impactam em fatores como prazo e recursos necessários informados ao cliente no momento do orçamento do processo.

Em relação ao levantamento sobre como ocorre o DP por parte das empresas de primeiro nível da cadeia de suprimentos, ou as detentoras dos projetos do produto, destacam-se as seguintes características:

- Neste conjunto de empresas foi possível observar que o segmento de ônibus e alguns sistemas e subsistemas relacionados a implementos rodoviários, máquinas agrícolas e caminhões, apresentam elevado grau de

personalização. Por essa razão, estas empresas priorizam o desenvolvimento de empresas sistemistas e não de fornecedores de peças unitárias;

- Havendo a parceria de sistemistas, o projeto de produto pode, ou não, ser desenvolvido pela empresa de primeiro nível da cadeia de suprimentos. Geralmente, o sistema é projetado conjuntamente e a gestão de projetos das peças que compõe o sistema é realizado pela empresa sistemista.

Estas características impactam diretamente no desenvolvimento de produtos usinados. Primeiramente, porque a personalização pode gerar dois tipos de produtos usinados: produtos empregados em diferentes sistemas (modularização) ou produtos de baixo volume de produção. Produtos com baixo volume de produção apresentam características de desenvolvimento e controle distintas à proposta desta pesquisa, principalmente em relação as etapas iniciais de desenvolvimento. Em contrapartida, produtos que são empregados em sistemas modulares (sendo aplicadas em sistemas diferentes) apresentam um volume significativo de produção, mas devido a variação de aplicabilidade, o comportamento do produto após montagem pode requerer alterações de projeto.

Sobre a avaliação específica do modelo de DFSS para usinagem proposto nesta pesquisa, as empresas fornecedoras, em sua maioria, acreditam que pode ser uma ferramenta útil e eficiente para melhoria do processo atual, entretanto, destacam que a aplicabilidade desse tipo de modelo de gestão é muito dependente de uma mudança cultural. Segundo os entrevistados, adotar um modelo amplo, como o proposto, deve partir da iniciativa dos maiores níveis de gestão da empresa, pois a característica atual do processo de desenvolvimento é fortemente impactada pelo interesse da alta gestão em atender um *deadline* curto de orçamentos e captar novos projetos atendendo o tempo de desenvolvimento solicitado pelo cliente, e que na maioria das vezes também apresenta um prazo limitado.

Uma característica de destaque observada durante a pesquisa, é que a maioria dos profissionais reforça o interesse em adotar medidas de melhoria nos processos desenvolvidos, sendo que em todas essas empresas foram citadas ao menos uma ação atual significativa visando a melhoria de eficiência no desenvolvimento dos processos. Os profissionais entrevistados citam a busca por ferramentas de automação que contribuam na agilidade da captura de dados e tomada de decisão. Uma das razões para essa ascendente procura por automação e

melhoria na eficiência entre o fluxo de dados dos processos é a capacitação dos envolvidos (todos os entrevistados têm ao menos um membro da equipe de desenvolvimento de processos que recentemente passou, ou está passando, por capacitação por meio de cursos específicos, graduação ou pós-graduação vinculada a área de atuação).

A proposta de um plano de processo automatizado e o uso de banco de dados para tomada de decisão é algo considerado como muito relevante pelas empresas consultadas, entretanto, é visível a preocupação em torno do quanto isso impacta em custo, e principalmente em relação a dedicação de tempo para realização. Um dos entrevistados, o qual realizou pesquisa de mestrado sobre o desenvolvimento de processos, comenta que apesar de ele ter total conhecimento sobre os benefícios de ferramentas desse tipo, ele não consegue observar como implementar e colocar em prática esse tipo de ação em empresas com o fluxo e dinâmica como são as pequenas e médias empresas de fundição e usinagem do Brasil. Segundo esse mesmo profissional, as grandes empresas que contratam os serviços de usinagem “parecem não se alinhar a realidade das pequenas e médias empresas”, exigindo uma resposta ágil sem contar com o tempo necessário de análise e proposta das melhorias necessárias para o processo.

Por outro lado, as empresas de porte menor que participaram da pesquisa, demonstraram um grande interesse em ferramentas de melhoria, destacando que entendem que somente conseguirão conquistar espaço perante as grandes empresas se estiverem a frente em suas práticas de desenvolvimento de produtos e processos. Uma das empresas, a qual apresenta apenas 4 centros de usinagem e atua com outros processos de fabricação (conformação e soldagem) demonstrou grande interesse em participar da presente pesquisa, pois tem interesse em melhorar suas atividades de desenvolvimento e sinalizou que vem buscando métodos ágeis de planejamento, visto que está em expansão e possui perspectiva para novos projetos.

As empresas que já adotam softwares para planejamento e controle dos projetos afirmam que a proposta de uma ferramenta que considera dados históricos para indicar o risco de desenvolvimento de novos projetos é algo de extrema importância. Uma das empresas comentou que o risco de desenvolvimento atual é subjetivo e baseado na experiência dos responsáveis por novos orçamentos. De certa forma a perspectiva do novo desenvolvimento é coerente, entretanto, muitos detalhes somente são detectados durante o desenvolvimento. Estas empresas também

afirmam que o fato de ser necessário apenas o banco de dados com o histórico é um ponto positivo, pois essa já é uma realidade. O histórico existe, mas a tomada de decisão dificilmente considera com exatidão esses dados, ocorrendo sempre análises subjetivas. Além disso, alguns profissionais afirmaram que os dados históricos já poderiam ser empregados na tomada de decisões, mas isso não ocorre pois não há uma gestão adequada sobre estas informações.

Um ponto de convergência entre todos os entrevistados é o comentário sobre a “praticidade” e “facilidade” de uso de dados. Eles perguntaram sobre, e alguns deles sugeriram, a possibilidade de aplicativos ou de softwares com poucos recursos, que pudessem fornecer as informações necessárias sem a necessidade de ter uma pessoa dedicada a esta atividade. Quando apresentado o modelo proposto nesta pesquisa, e o uso do índice CTQ de fases iniciais, a maioria dos entrevistados perguntou como seria operacionalizado o índice, visto que consideram inviável qualquer proposta onde seja necessário dedicar tempo e análises aprofundadas. Neste mesmo sentido, dois entrevistados sugeriram a integração do índice aos softwares utilizados para orçamento e simulação de processos.

Um ponto que despertou interesse das empresas consideradas foi a metodologia seis sigma integrada ao desenvolvimento de produtos. Todos afirmaram que sabiam da existência da metodologia, mas não tinham conhecimento sobre a operacionalização e como poderia ser a prática da proposta. Com exceção de 3 profissionais, todos concordaram com as fases propostas e com as ferramentas de apoio sugeridas. Entretanto, todos afirmaram não conhecer parte destas ferramentas e não saber como seriam utilizadas.

Os 3 profissionais que não concordaram com as fases propostas, alegaram os seguintes pontos, e sugeriram revisão:

- A otimização e a verificação constante devem ser ações conjuntas e não separadas;
- O conjunto de ferramentas sugerido é interessante, mas seria mais útil a indicação de apenas algumas sendo direcionadas às atividades e não as fases;
- Falta no modelo um detalhamento sobre as atividades de desenvolvimento de meios de controle de qualidade, bases de fixação, e ferramentas acessórias aos processos de usinagem. Muitos

problemas referem-se ao projeto e desenvolvimento destes itens e não do desenvolvimento da peça;

- O modelo pode ser melhor visto pela alta gestão das empresas se considerar de maneira evidente o impacto financeiro em relação ao risco assumido no desenvolvimento;
- Como o modelo depende fortemente de um histórico bem estruturado e gerenciado, seria viável a proposta de uma preparação para o DFSS. Assim como as empresas se preparam para a implementação do seis sigma, talvez seja importante fazer o mesmo para o DFSS.

Parte das sugestões sobre o modelo foram consideradas e utilizadas. Algumas não foram consideradas pois notou-se que a sugestão era fundamentada no que atualmente é realizado pela empresa do respondente, não pensando na adaptação e melhoria possível, mas sim, uma adequação do modelo a condição atual, o que não é o objetivo da pesquisa.

Parte das recomendações, principalmente as que surgiram de profissionais que não concordaram em parte com o modelo, direcionam a extensões do modelo e, portanto, serão tratadas como propostas para estudos futuros, no Capítulo 5. No próximo tópico são listados os resultados referentes a simulação e avaliação do comportamento matemático da proposta de CTQ de fases iniciais do DFSS para usinagem.

#### **4.4 Avaliação do índice CTQ ( $C_p$ e $C_{pk}$ ) para fases iniciais do DFSS para usinagem**

Neste tópico são descritos os resultados e discussões sobre a avaliação do CTQ para fases iniciais do DFSS com dados gerados e análise do índice utilizando dados reais de um processo de usinagem. De maneira a facilitar a leitura e melhor organizar o texto, a exposição das planilhas construídas para a simulação são expostas no subtópico final deste item (4.4.2).

Foram geradas, por meio de planilhas eletrônicas (Microsoft Excel), matrizes com grupos de dados de tamanhos ( $n$ ) 50, 100, 500 e 1000. Para gerar as matrizes foi necessário estabelecer limite mínimo e máximo de números aleatórios. Para isso, foram utilizadas as cotas e tolerâncias da peça real que foi considerada na presente pesquisa. São duas cotas críticas, sendo uma de 133,08 milímetros com tolerância de -0,03 milímetros (denominada Cota A) e outra de 3,5 milímetros com tolerância  $\pm 0,1$

milímetro (denominada Cota B). Portanto, os grupos de dados gerados foram limitados em: (133,05 a 133,08 mm) e (3,4 a 3,6 mm).

De cada matriz foram obtidos os valores de média e desvio padrão, sendo estes valores necessários para realizar a simulação de Monte Carlo. Primeiramente será descrita a análise do grupo com 50 dados gerados simulando a situação em que uma determinada máquina ferramenta está sendo avaliada sobre a possibilidade de desenvolvimento de um novo produto, sendo que uma determinada cota de interesse foi previamente usinada (com condições semelhantes), e há um registro de 50 peças produzidas. Destas peças, houve o controle dimensional, sabe-se os parâmetros de processo utilizados, sendo obtida a média e desvio padrão das cotas de interesse.

Foram geradas 50 medidas referentes a Cota A e Cota B. A média obtida e o desvio padrão destes dados foram, respectivamente: (133,0647; 3,5044) e (0,00007; 0,00398). A simulação de Monte Carlo gera amostras aleatórias, sendo estabelecido para o grupo com 50 medidas amostras de tamanho 30 ( $n = 50; m = 30$ ), tendo em vista que é o tamanho mínimo significativo para distribuição normal. Após a simulação da amostra, notou-se que alguns dados estavam fora do que seria a especificação considerada, e por isso, esses dados foram retirados. Para a Cota A, foram consideradas 25 medidas, e para a Cota B, 27 medidas. Como os dados foram removidos, o desvio padrão amostral foi alterado (0,00006; 0,00179) para Cota A e Cota B, respectivamente. O Gráfico 1 é a curva densidade gerada da amostra da Cota A e o Gráfico 2 é a curva densidade da amostra da Cota B.

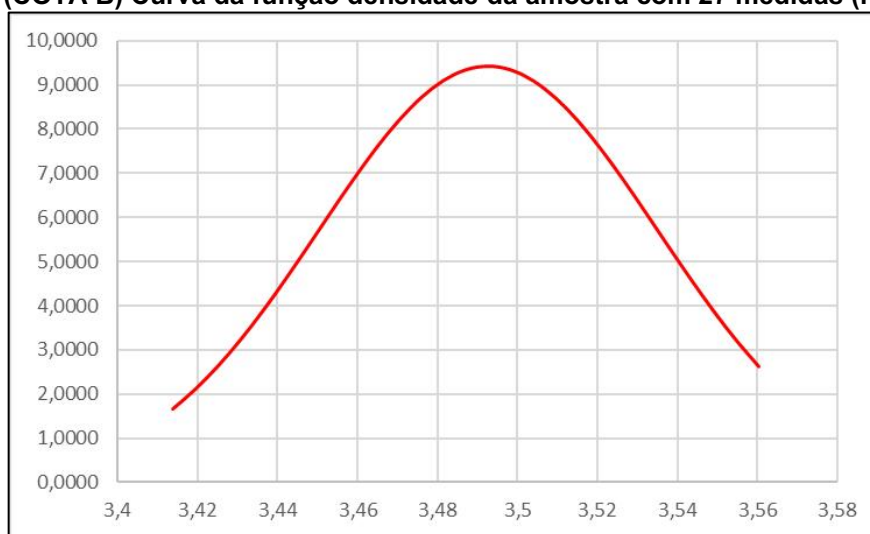
**Gráfico 1 – (COTA A) Curva da função densidade da amostra com 25 medidas ( $n = 50; m=25$ )**



Fonte: Autoria própria (2022)



Gráfico 2 - (COTA B) Curva da função densidade da amostra com 27 medidas (n = 50; m=27)



Fonte: Autoria própria (2022)

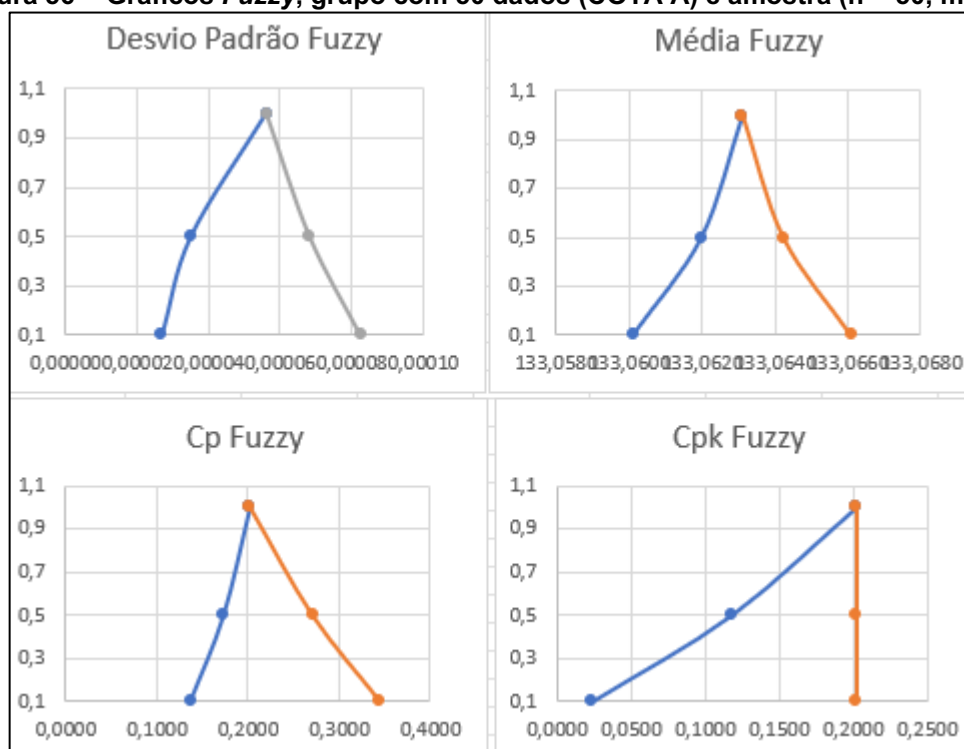
Após análise da curva dos dados, buscou-se a transformação para *Fuzzy* da média e desvio padrão, sendo estes dados imprescindíveis para cálculo de  $C_p$  e  $C_{pk}$ . É importante ressaltar a definição dos seguintes índices empregados nos cálculos:  $\alpha$  (0,1; 0,5; 1,0) é a variação necessária para criar base triangular *Fuzzy*; variação do índice Z da distribuição normal em função de  $\alpha$ , sendo respectivamente (1,65; 0,68; 0); os limites de controle (Limite Superior e Inferior de Controle) foram calculados de acordo com os dados obtidos das amostras segundo Montgomery (2016). A Tabela 2 sintetiza os resultados, e a Figura 56 e 57 resumem os gráficos *Fuzzy* encontrados.

Tabela 2 – Síntese dos dados sobre média, desvio-padrão,  $C_p$  e  $C_{pk}$  para grupo de dados com n = 50

Amostra	Média Crisp	Média Fuzzy	Desvio Crisp	Desvio Fuzzy	$C_p$ Fuzzy	$C_{pk}$ Fuzzy
Cota A (m=25)	133,0647	(133,0601; 133,0631; 133,0661)	0,00006	(0,00003; 0,00006; 0,00008)	(0,1371; 0,2021; 0,3450)	(0,0238; 0,2021; 0,2021)
Cota B (m=27)	3,5044	(3,4588; 3,4927; 3,5266)	0,00179	(0,0042; 0,00179; 0,114)	(0,0518; 0,1943; 0,1686)	(-0,0569; 0,1943; 0,1943)

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 56 - Gráficos *Fuzzy*, grupo com 50 dados (COTA A) e amostra (n = 50, m = 25)



Fonte: Autoria própria (2022)

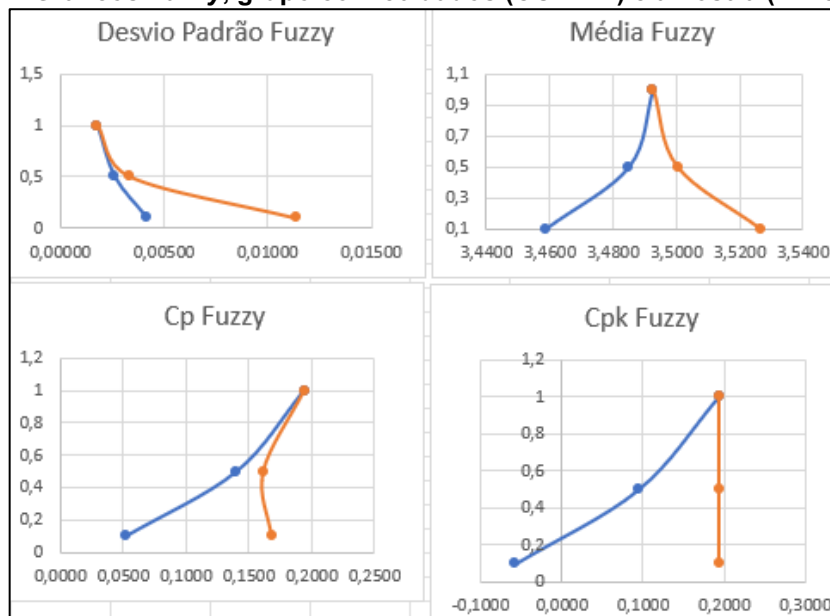
O índice de capacidade  $C_p$  calculado indica uma capacidade ruim, visto que ficou abaixo de 0,67. Entretanto, sabendo que os dados são simulados, o foco da análise será em torno do quanto o índice varia para as amostras diferentes, e a relação com  $C_{pk}$ , desvio padrão e a média. Como os limites de controle considerados também foram calculados considerando os dados gerados entende-se que a interpretação sobre ser ou não ser estável não apresenta conclusões significativas.

Avaliando o índice  $C_{pk}$ , nota-se que os dados simulados denotam uma distribuição centrada na média, visto que a simulação de Monte Carlo realiza esta distribuição. Porém, quando analisadas as variações das medidas obtidas com a base triangular *Fuzzy*, nota-se que caso os dados variassem em relação ao  $C_p$ , existe a possibilidade de dados não centrados na média de distribuição, sendo esse fator um problema caso a média esteja próxima da medida de tolerância de especificação da peça produzida.

Na prática, a análise dos índices indicaria um projeto de risco, porém, a recomendação é o uso de amostras maiores. O projeto poderia ser considerado de médio risco caso ao menos os pontos médio e direito do gráfico fossem próximos a 1,0. O impacto de amostras maiores será avaliado após a demonstração de todos os

conjuntos de dados simulados. Em relação a Cota B, note-se uma diferença no comportamento dos dados (Figura 57).

**Figura 57 - Gráficos *Fuzzy*, grupo com 50 dados (COTA B) e amostra ( $n = 50$ ,  $m = 27$ )**



Fonte: Autoria própria (2022)

Na bibliografia não há uma recomendação sobre possíveis variações da curva obtida resultante da base triangular *Fuzzy*. Para manter a metodologia que foi considerada como base na proposta do CTQ desta pesquisa, foi mantido como ponto médio da base triangular o  $\alpha = 0,5$ . Com isso, o ponto apresenta localização superior quando  $\alpha = 0,1$ . O mesmo ocorre com  $C_p$ , mas ao extremo direito do gráfico sendo a localização inferior. O índice  $C_{pk}$  indica o ponto mínimo da base triangular como negativo, ou seja, uma possível variação dos dados poderia levar a um ponto médio fora dos limites de especificação. Comparando as duas cotas simuladas, a cota B apresenta um desvio padrão maior e isso pode levar a variações significativas em relação a  $C_p$  e  $C_{pk}$ .

Em relação a uma população simulada ( $n = 100$ ) sendo geradas duas simulações de Monte Carlo com amostras ( $m = 30$  e  $m = 75$ ) foi possível identificar que conforme o tamanho da amostra aumenta a tendência é de que os pontos da base triangular *Fuzzy* reduzam o intervalo em torno do ponto médio (Tabela 3). Esse comportamento ocorre visto que o modelo *Fuzzy* aumenta o intervalo de dados para cobrir a incerteza sobre as variáveis. Ou seja, conforme aumentam os dados que compõe a estatística de distribuição das variáveis em análise, ainda há incerteza

sobre os dados, mas é menor pois a amostra é mais significativa em relação a população considerada.

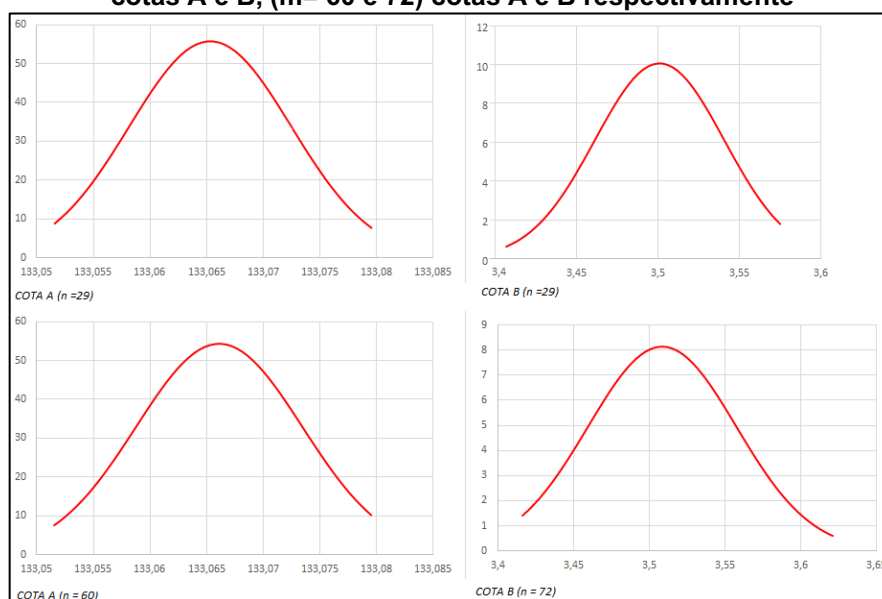
**Tabela 3 - Síntese dos dados sobre média, desvio-padrão, Cp e Cpk para grupo de dados com n = 100**

	<b>Média Crisp</b>	<b>Média Fuzzy</b>	<b>Desvio Crisp</b>	<b>Desvio Fuzzy</b>	<b>Cp Fuzzy</b>	<b>Cpk Fuzzy</b>
Cota A (m=29)	133,065	(133,0759; 133,0796; 133,0834)	0,00005	(0,00003; 0,00005; 0,00015)	(0,0877; 0,1874; 0,3092)	(-0,0169; 0,1874; 0,1874)
Cota B (m=29)	3,501	(3,4571; 3,4969; 3,5367)	0,00202	(0,00476; 0,00202; 0,01688)	(0,00440; 0,1874; 0,1611)	(-0,0604; 0,0892; 0,1874)
Cota A (m = 60)	133,0661	(133,0628; 133,0661; 133,0695)	0,00005	(0,00006; 0,00005; 0,00025)	(0,0431; 0,1296; 0,1605)	(-0,0298; 0,1296; 0,0298)
Cota B (m = 72)	3,5086	(3,4794; 3,5086; 3,5377)	0,00241	(0,01186; 0,000241; 0,02243)	(0,0207; 0,1183; 0,0781)	(-0,0461; 0,1183; 0,0461)

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 58 sintetiza os gráficos da curva da função densidade das distribuições das amostras referentes as Cotas A e B, removidas as medidas fora de especificação.

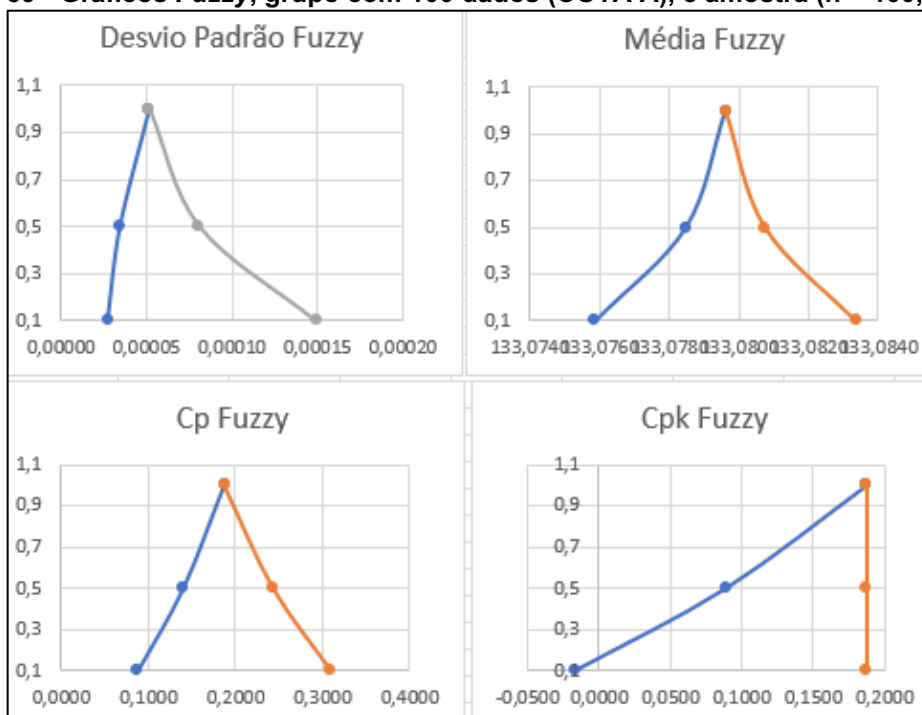
**Figura 58 – (Grupo de dados m = 100) Curvas das funções densidade das amostras (m = 29) cotas A e B, (m = 60 e 72) cotas A e B respectivamente**



Fonte: Autoria própria (2022)

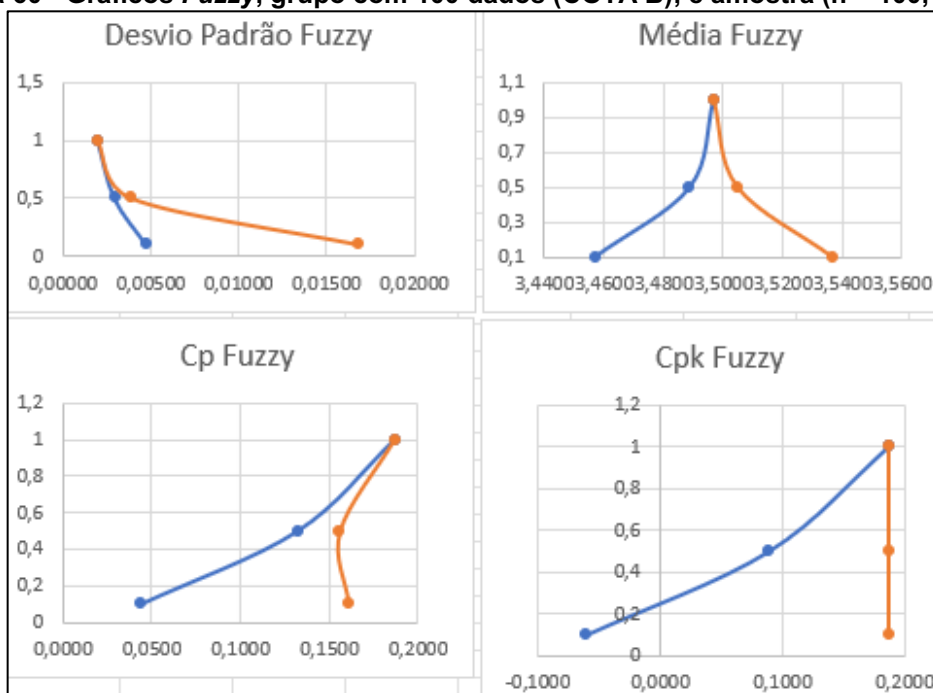
Da Figura 59 a 62 é possível observar a variação do intervalo das variáveis *Fuzzy* obtidas. Observa-se a tendência do desvio padrão para apenas um sentido do gráfico, assim como do índice  $C_p$ .

Figura 59 - Gráficos *Fuzzy*, grupo com 100 dados (COTA A), e amostra ( $n = 100$ ,  $m = 29$ )



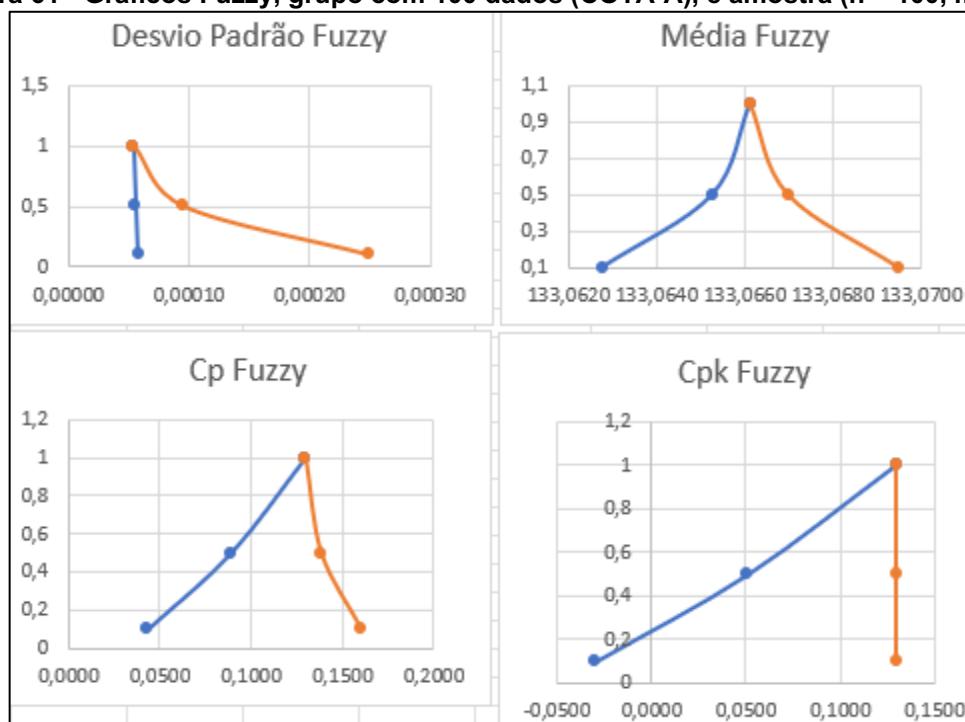
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 60 - Gráficos *Fuzzy*, grupo com 100 dados (COTA B), e amostra ( $n = 100$ ,  $m = 29$ )



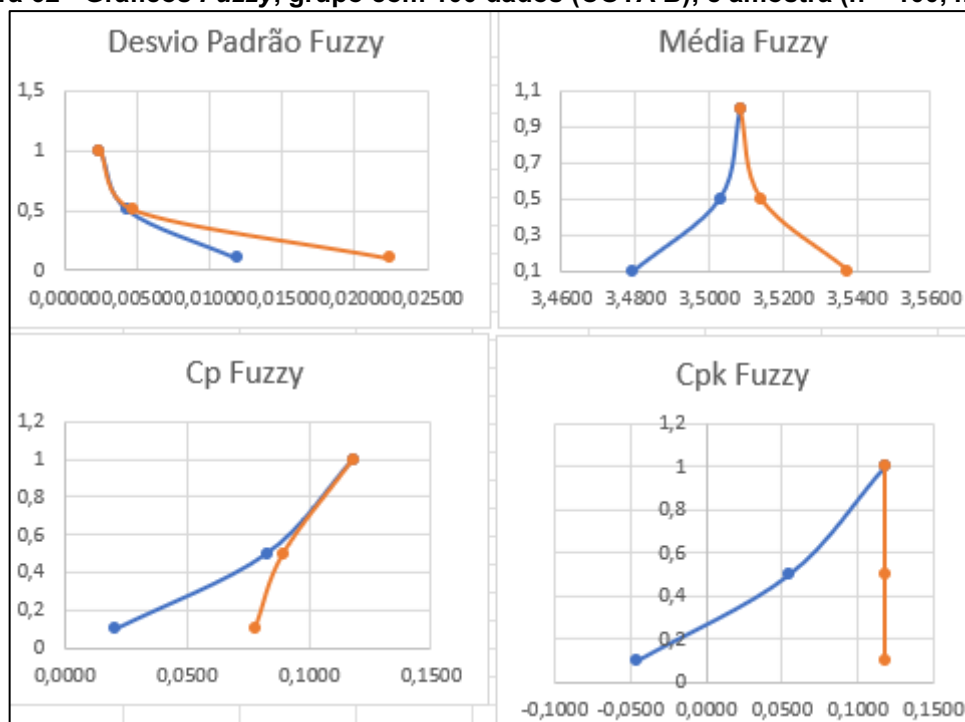
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 61 - Gráficos Fuzzy, grupo com 100 dados (COTA A), e amostra ( $n = 100$ ,  $m = 60$ )



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 62 - Gráficos Fuzzy, grupo com 100 dados (COTA B), e amostra ( $n = 100$ ,  $m = 72$ )



Fonte: Autoria própria (2022)

Observando os dados para as amostras retiradas dos conjuntos com 500 e 1000 (Dzulinski, 2022a), o padrão é mantido. Conforme aumenta o tamanho das

amostras, o intervalo *Fuzzy* é reduzido em relação ao ponto central. Visando uma análise mais significativa. No próximo tópico são apresentados os resultados e discussões referentes a análise do CTQ aplicado em dados reais de um produto.

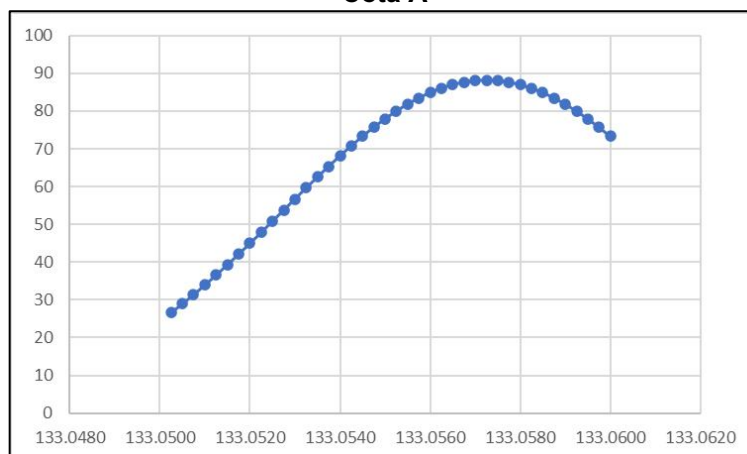
#### 4.4.1 Avaliação do CTQ de fases iniciais: análise com dados reais

Os dados reais considerados foram disponibilizados por uma das empresas que participaram da pesquisa, e são descritos na sequência de acordo com o que foi concedido a pesquisa e autorizado relatar. Conforme descrito no capítulo 3, os dados referem-se a duas cotas críticas de um produto usinado (Cota A 133,08 – 0,03 mm; Cota B  $3,5 \pm 0,1$  mm), a partir da matéria prima em tubo de aço (VMEC 134-AP). O volume médio anual de processamento desse produto é de aproximadamente 5.500 unidades, sendo utilizado um centro de usinagem do modelo Romi D600. A ferramenta de corte utilizada refere-se a uma pastilha com raio 0,8 (TNMG) e suporte (S32 U PTFNR 16W R0,8). Os parâmetros de máquina empregados são: rotação de 1000 (rpm); avanço de 0,23 (mm/rot) no primeiro passe e 0,15 (mm/rot) para acabamento; profundidade 1,5mm no primeiro passe e 0,5mm para acabamento. É utilizado fluído de corte (não foi especificado pela empresa qual tipo) e não é feito nenhum tipo de controle ou acompanhamento referente ao consumo de energia do processo.

O controle de qualidade exigido pelo cliente requisita a inspeção de 1 a cada 5 peças produzidas em todos os lotes de produção. O registro das medições é mantido, sendo que foram disponibilizados para a pesquisa os dados referentes a três lotes de produção com 200 peças cada. Os limites de controle pré-estabelecidos para a Cota A é (133,055 e 133,072), e para Cota B é (3,32 e 3,52).

Primeiramente os dados foram analisados, sendo verificados possíveis registros de cotas fora da especificação. O responsável pelo processo da empresa afirmou que devido a exigência do cliente, é realizado o controle de estabilidade do processo. Entretanto, quando construída a curva referente a função de distribuição dos dados, o Lote 01 não apresentou curva característica de distribuição normal de dados (Gráfico 3).

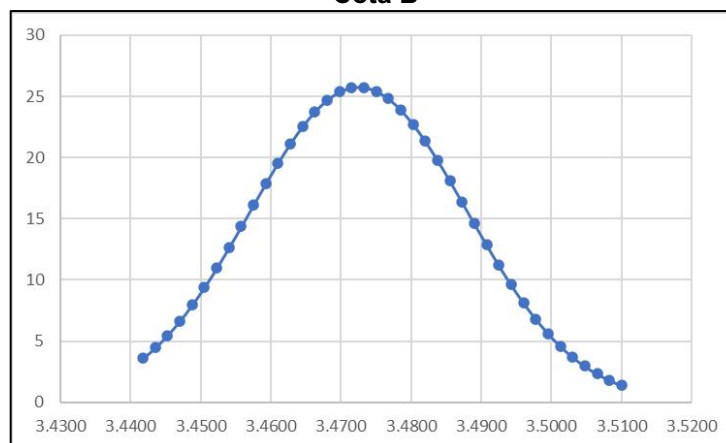
**Gráfico 3 – Curva da função distribuição de probabilidade referente aos dados reais (Lote 1), Cota A**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Entretanto, a Cota B referente ao mesmo lote de produção (mesmas peças inspecionadas) apresentou curva característica de distribuição normal de dados (Gráfico 4). Foram analisadas as amostras do Lote 2 e 3, e constatou-se que apenas a Cota A do Lote 1 apresentou essa característica na distribuição dos dados. Segundo o profissional responsável pelo registro e controle do processo referente a esses dados, é comum que sejam necessárias mais amostras referentes a Cota A para observar a normalidade dos dados, visto a característica da especificação da cota. É comum a média dos dados estar centralizada muito próximo do limite superior de especificação, pois a regulagem do processo considera o intervalo 133,05 – 133,08, sendo a maior medida possível o limite dimensional de peça bruta, portanto, a dimensão controlada não depende exclusivamente do processamento de usinagem.

**Gráfico 4 - Curva da função distribuição de probabilidade referente aos dados reais (Lote 1), Cota B**

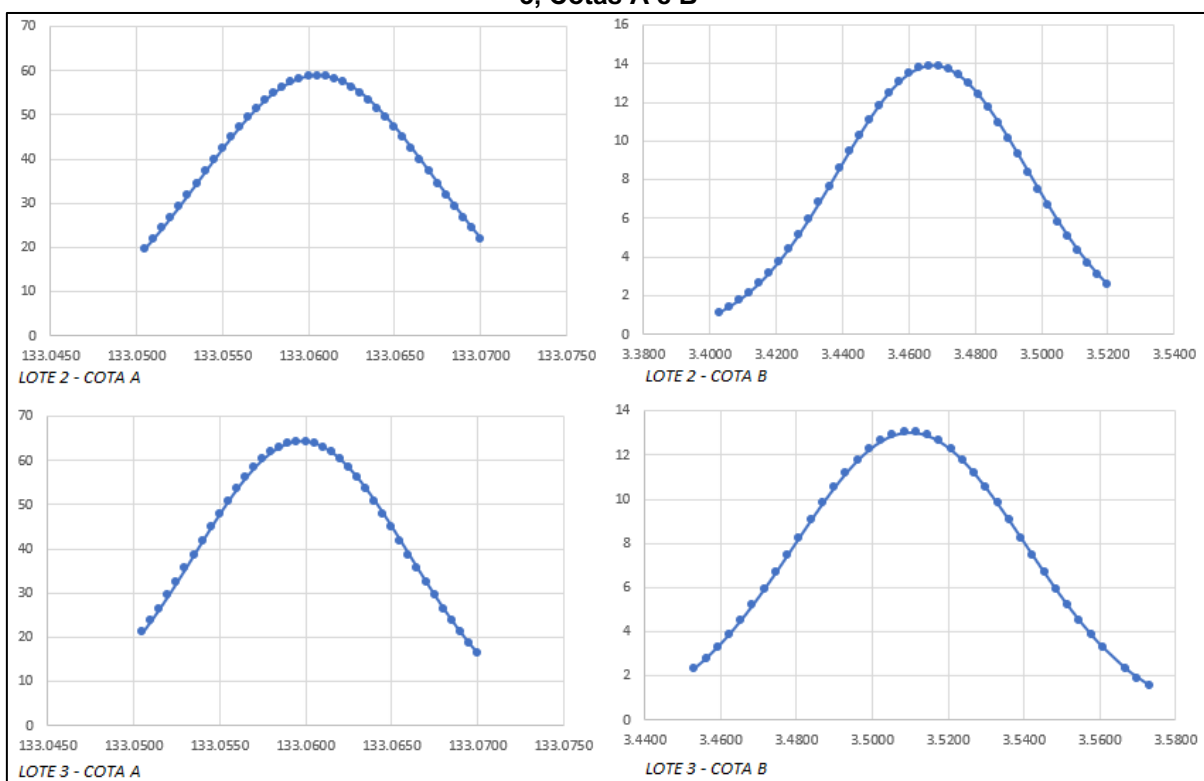


**Fonte: Autoria própria (2022)**



A Figura 63 apresenta os demais gráficos obtidos com a curva de distribuição das amostras dos Lotes 2 e 3. O lote 3, em relação a Cota B, apresentou uma medida fora dos limites de especificação, e por conta disso, foi removido dos dados. Conforme já citado anteriormente, entende-se que medidas pontuais fora dos limites de especificação representam causas atribuíveis de variação e desta forma não representam, na maioria dos casos, uma variação do processo significativa e sim uma causa de falha que pode ser facilmente detectada e corrigida, ou até mesmo uma falha na medição.

**Figura 63 – Gráficos da função densidade dos dados reais referentes às amostras do Lote 2 e 3, Cotas A e B**



Fonte: Autoria própria (2022)

Sabendo que a análise de  $C_p$  e  $C_{pk}$  não é válida quando a distribuição de dados não apresenta distribuição normal, os dados referentes a Cota A do Lote 1 não foram considerados. A Tabela 4 sintetiza os dados *Fuzzy* obtidos de desvio padrão, média, e os índices supracitados. Com estes dados foi possível observar que a operação de usinagem relacionada a Cota A apresenta sinais de instabilidade de processo. O cálculo de  $C_p$  permaneceu abaixo do mínimo recomendado, e o índice  $C_{pk}$  indica um processo decentralizado. A Cota B, entretanto, apresentou índice de capacidade para todos os lotes.

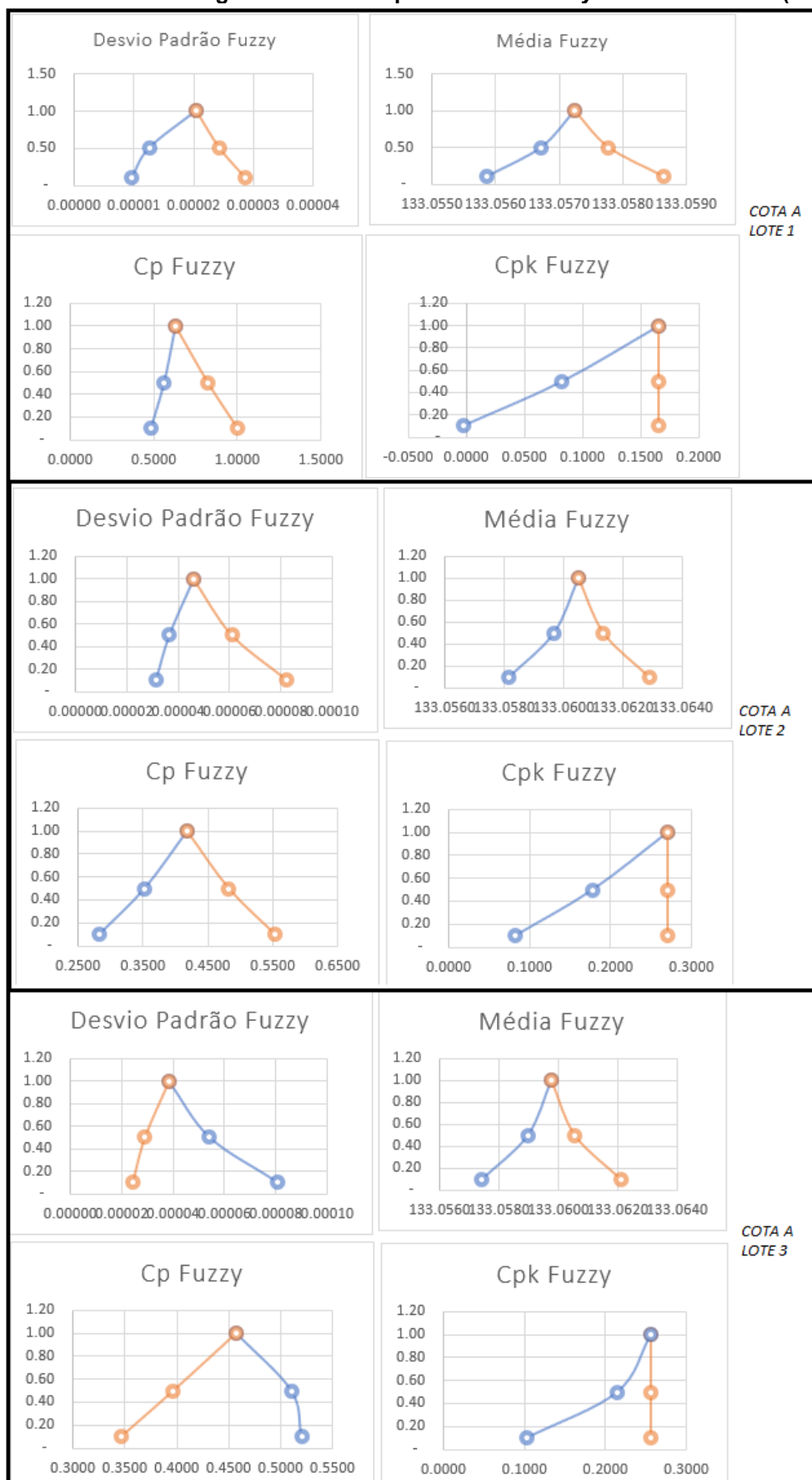
**Tabela 4 – Síntese dos dados *Fuzzy* obtidos por meio das amostras de dados reais (média, desvio padrão, Cp e Cpk)**

<b>LOTE 1</b>	<b>Média <i>Crisp</i></b>	<b>Média <i>Fuzzy</i></b>	<b>Desvio <i>Crisp</i></b>	<b>Desvio <i>Fuzzy</i></b>	<b>Cp <i>Fuzzy</i></b>	<b>Cpk <i>Fuzzy</i></b>
Cota B	3,4725	(3,4614; 3,4725; 3,4836)	0,00024	(0,00035; 0,00024; 0,00182)	(0,7180; 2,1533; 1,9390)	(1,0342; 1,0228; 0,2138)
<b>LOTE 2</b>						
Cota A	133,0605	(133,0581; 133,0605; 133,0629)	0,00004	(0,00003; 0,00005; 0,00008)	(0,2825; 0,4183; 0,5533)	(0,082; 0,2706; 0,3024)
Cota B	3,4673	(3,4462; 3,4673; 3,4883)	0,00082	(0,00194; 0,00082; 0,00649)	(0,3802; 1,1655; 0,8176)	(0,4849; 0,6848; 0,0940)
<b>LOTE 3</b>						
Cota A	133,0598	(133,0574; 133,0598; 133,0621)	0,00004	(0,00008; 0,00004; 0,00002)	(0,5204; 0,4570; 0,3462)	(0,1023; 0,2554; 0,6098)
Cota B	3,51	(3,4882; 3,51; 3,5318)	0,00094	(0,00684; 0,00094; 0,00229)	(0,6397; 1,0893; 0,4357)	(0,8902; 0,1089; 0,1451)

**Fonte: Autoria própria (2022)**

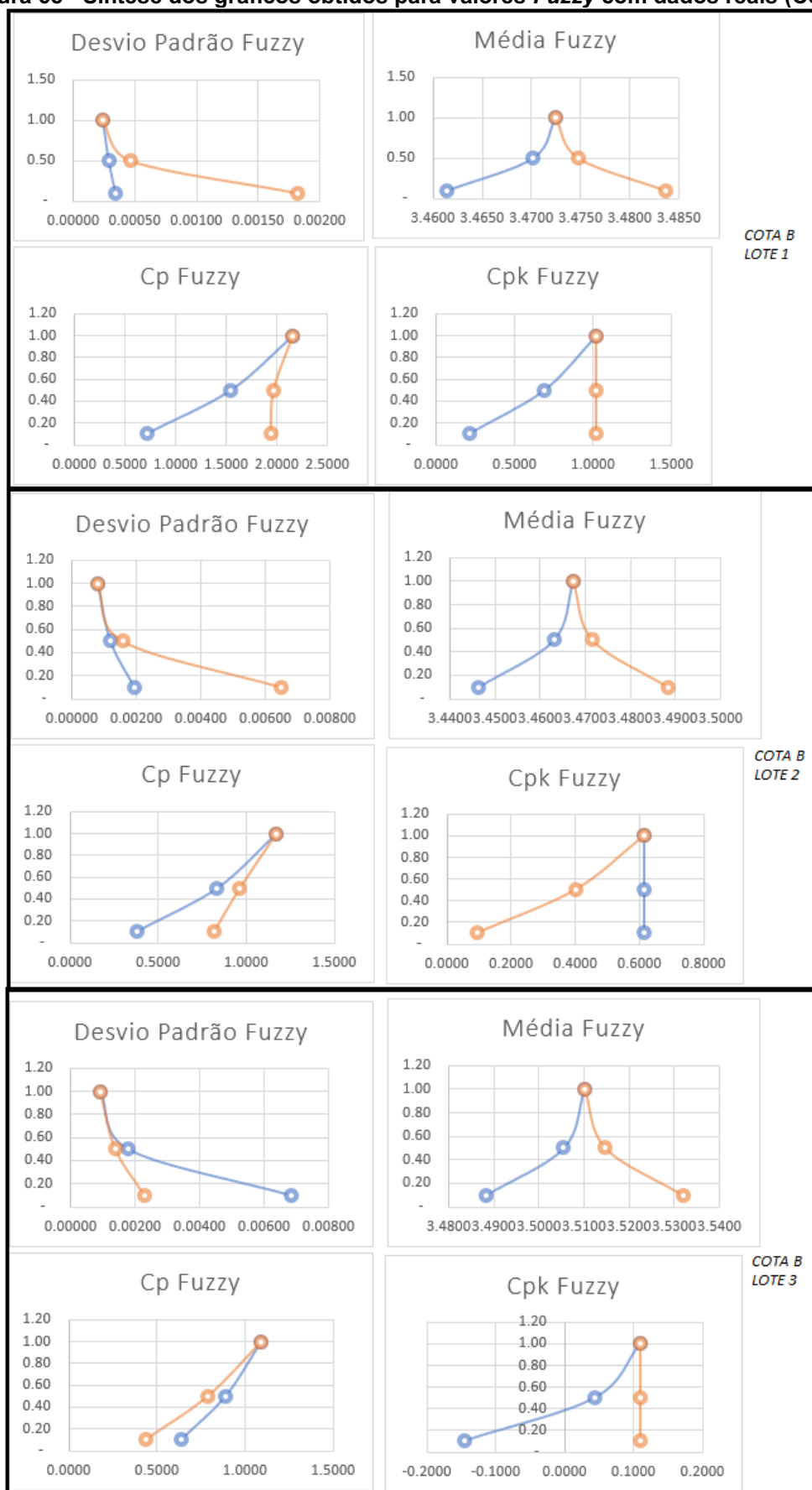
A Figura 64 apresenta os gráficos dos valores *Fuzzy* apresentados na Tabela 4 referentes a Cota A, e a Figura 65 a Cota B.

Figura 64 - Síntese dos gráficos obtidos para valores Fuzzy com dados reais (Cota A)



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 65 - Síntese dos gráficos obtidos para valores Fuzzy com dados reais (Cota B)



Fonte: Autoria própria (2022)

Visando uma perspectiva futura de operações semelhantes, e empregando o índice CTQ sugerido para fases iniciais, a interpretação de risco ocorre da seguinte forma:

- Considerando a Cota A, e a operação e características do processo envolvido, o risco é elevado para desenvolvimentos semelhantes. Entretanto, deve-se observar que a cota em questão apresenta como um dos pontos de referência uma extremidade não usinada. Portanto, a variação da medida não representa necessariamente a variação da usinagem e pode referir-se ao processo anterior. Neste caso, não se recomenda o uso do CTQ;
- Para a Cota B, o risco de desenvolvimento em condições semelhantes é médio visto que, apesar do índice  $C_p$  apresentar valor acima de 1,00 como ponto médio nos valores *Fuzzy*, o índice  $C_{pk}$  indica um processo descentrado (o que já era possível notar em função da característica da curva de distribuição dos dados – Gráfico 4 e Figura 63). Logo, observando que a faixa de  $C_p$  assumiu valores inferiores a 1,00, e no lote 3,  $C_{pk}$  apresentou valor negativo (o que indica a possibilidade de valores fora de especificação).

Se fossem considerados apenas os valores centrais de  $C_p$  e  $C_{pk}$ , a interpretação é de que o processo referente a cota B é capaz, apesar de estar descentralizado. Porém, quando se observa a variabilidade possível dos índices nota-se que a variação pode induzir a um processo abaixo do valor mínimo de capacidade ( $C_p = 1,00$ ). Cabe ao decisor, portanto, avaliar a variação dos dados e identificar o risco, ou ainda, que um sistema de tratamento e interpretação dos dados seja programado para avaliar essas variações relacionando a faixa de variação com os limites de interpretação dos índices.

Analisando os dados *Fuzzy* obtidos por meio da simulação e dos dados reais, foi possível delimitar o uso e interpretação do CTQ de fases iniciais:

- A normalidade da distribuição dos dados impacta diretamente no resultado e, portanto, deve ser fator limitante na aplicabilidade do CTQ proposto;

- Os limites de controle afetam diretamente os cálculos do CTQ, e precisam ser registrados com fidedignidade, assim como os dados de controle de qualidade;
- O CTQ de fases iniciais do DFSS é gerado por operações específicas que geram as características de qualidade controladas, portanto, não podem ser considerados para avaliar máquina-ferramenta em totalidade, além da combinação de outros fatores como ferramenta de corte e parâmetros de operação;
- $C_p$  e  $C_{pk}$  *Fuzzy* não determinam o nível de capacidade do processo a ser desenvolvido, mas possibilitam a avaliação do risco de desenvolvimento de produtos com cotas similares, para o processo considerado;
- Recomenda-se a avaliação do CTQ para dados históricos de vários lotes distintos, pois com isso é possível verificar a variabilidade entre lotes (como ocorreu na análise dos dados reais desta pesquisa).

O profissional responsável pelo processo de usinagem, o qual disponibilizou os dados para a pesquisa, afirmou que em outros lotes do mesmo produto constatou a tendência do processo para medidas próximas aos limites de controle, e que no momento da constatação o operador da máquina informou que a ferramenta de corte estava apresentando maior desgaste do que o esperado. Nestes casos, o próprio operador realizou os ajustes necessários, mas não fez apontamentos sobre o ocorrido, pois considera uma condição normal de processo. O responsável pelo processo afirma que atualmente a empresa não tem um controle “fino” sobre a eficiência econômica do processo de usinagem, pois os custos de cada máquina ferramenta, e os produtos produzidos, são estimados. O controle de custos é feito considerando apenas o custo de hora-máquina e vida útil da ferramenta de corte, e por conta disso, acredita que as variabilidades de processo não são corretamente analisadas tão pouco corrigidas, ou eliminadas, adequadamente.

O profissional afirmou que a peça a qual disponibilizou os dados para a pesquisa é a peça com maior criticidade na linha de usinagem da empresa, e que se houvesse o desenvolvimento de outro item com cotas semelhantes, com certeza os dados e a experiência com essa peça seriam ponto de partida para o novo desenvolvimento. Entretanto, ele não teria confiança em afirmar o risco de

desenvolvimento pois reconhece que a variabilidade do processo não é corretamente tratada. A análise de risco oferecida empregando um meio, como o proposto na pesquisa, seria uma ferramenta que, segundo o profissional, além de oferecer maior confiança na tomada de decisão, iria requerer um controle e gestão da capacidade dos processos mais efetiva. Ou seja, de certa forma a organização implementaria o controle efetivo da capacidade dos processos para melhorar a análise de risco para novos desenvolvimentos.

#### 4.4.2 Planilhas empregadas no estudo de CTQ para fases iniciais do DFSS

Foram construídas 3 pastas de trabalho no Microsoft Excel compostas por planilhas distintas para a simulação e análise do índice CTQ dos dados reais. A primeira pasta de trabalho conta com a planilha “Simulações de Pop”, onde foram geradas as populações com 50, 100, 500 e 1000 dados. A princípio, conforme pode ser evidenciado na Figura 66, um conjunto com 10.000 dados foi gerado, mas no desenvolvimento da pesquisa percebeu-se que não seria necessário analisar este conjunto em relação ao CTQ, pois não eram constatadas grandes alterações em relação ao conjunto de 1000 dados, quando variados os tamanhos das amostras.

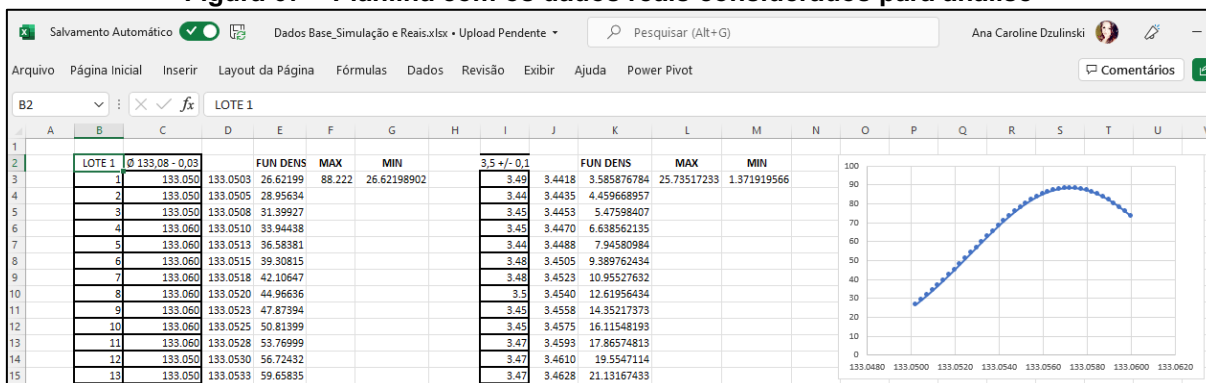
**Figura 66 – Planilha Excel com dados gerados para simulação (população de 50, 100, 500 e 1000)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1					SD												
2		A	B		n=50	n=100	n=500	n=1000	n=10000		n=50	n=100	n=500	n=1000	n=10000		
3		Especificações dos dados	Ø 133,08 - 0,03 3,5 +/- 0,1		0,0086	0,0088	0,0089	0,0086	0,0086		133,0647	133,0661	133,0649	133,0649	133,065		
4					0,0631	0,0540	0,0575	0,0565	0,058		3,5044	3,5093	3,5042	3,4982	3,5006		
5		n = 50															
6		133,051	133,068	133,077	133,054	133,060	133,071	133,066	133,061	133,055	133,055						
7		133,070	133,058	133,073	133,062	133,078	133,078	133,069	133,074	133,061	133,055	SD		0,0086			
8		133,062	133,059	133,065	133,064	133,069	133,061	133,066	133,051	133,060	133,073	MÉDIA		133,0647			
9		133,078	133,061	133,059	133,078	133,070	133,064	133,079	133,050	133,062	133,065	ERRO					
10		133,059	133,059	133,052	133,077	133,053	133,079	133,078	133,069	133,058	133,057						
11																	
12		3,5007	3,4447	3,5056	3,5206	3,4927	3,4845	3,5953	3,5535	3,5376	3,5690	SD		0,0631			
13		3,5942	3,4431	3,4341	3,4228	3,4253	3,5109	3,5114	3,5702	3,5760	3,5277	MÉDIA		3,5044			
14		3,5099	3,5790	3,5261	3,5651	3,4363	3,4911	3,4089	3,5872	3,4269	3,5251						
15		3,5179	3,4317	3,5463	3,5042	3,5603	3,4209	3,5654	3,4172	3,4057	3,4230						
16		3,5527	3,5637	3,5355	3,4207	3,5886	3,5886	3,5206	3,5717	3,4074	3,4027						
17																	
18																	
19		n = 100															0,0072
42																	
43		n=500															0,0073
145																	
146		n=1000															0,0075

Fonte: Autoria própria (2022)

Nesta mesma pasta de trabalho, na planilha “Dados Reais” (Figura 67), foram concentrados os dados reais e calculadas a média, desvio padrão e determinada a curva densidade dos dados.

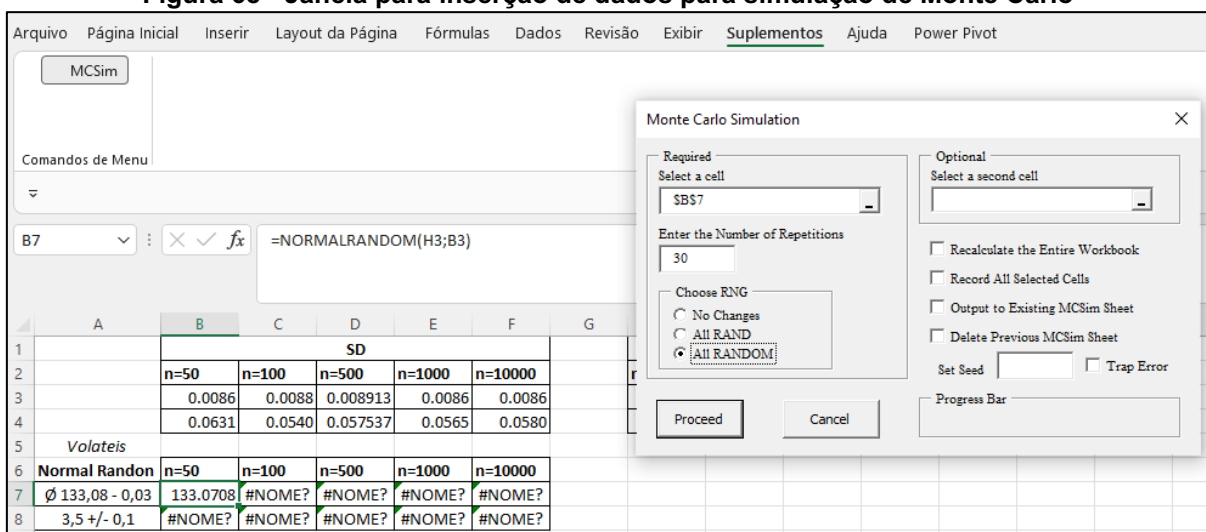
**Figura 67 – Planilha com os dados reais considerados para análise**



Fonte: Autoria própria (2022)

Na planilha “Ponto de Partida MCS” foram dispostos os valores de média e desvio padrão dos dados simulados e utilizando o suplemento de Barreto e Howland (2006) – Figura 68 - a simulação de Monte Carlo foi gerada.

**Figura 68 - Janela para inserção de dados para simulação de Monte Carlo**

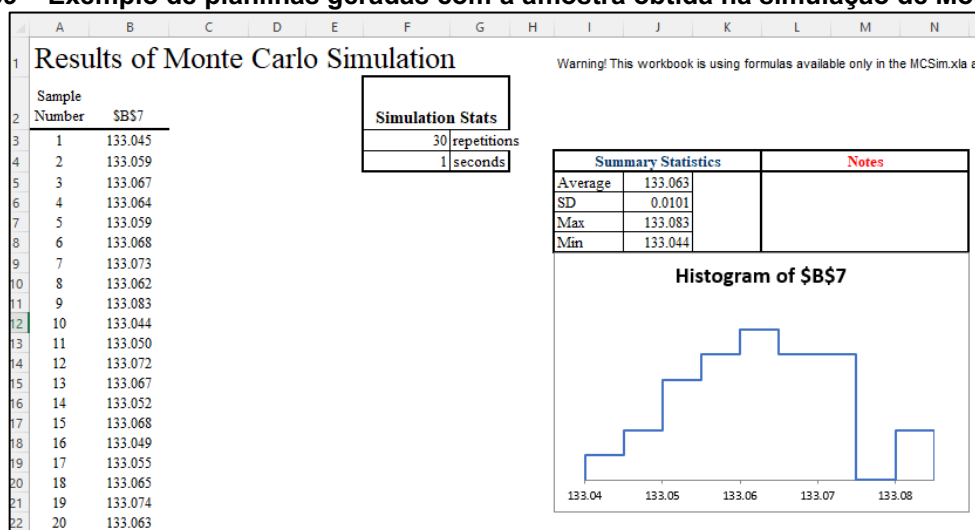


Fonte: Autoria própria (2022)

As simulações de Monte Carlo geram novas planilhas para cada tamanho de amostra determinado. Nestas, os dados amostrais são listados e o histograma da amostra é obtido (Figura 69).



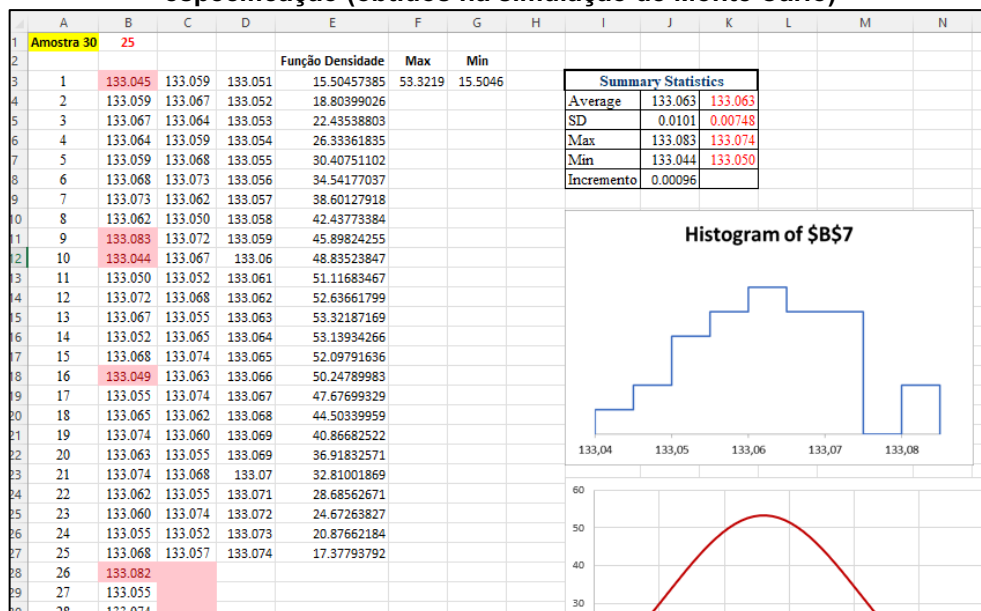
**Figura 69 – Exemplo de planilhas geradas com a amostra obtida na simulação de Monte Carlo**



Fonte: Autoria própria (2022)

Após as amostras serem geradas por meio de Monte Carlo, os resultados foram listados em novas planilhas (uma para cada população de dados). Foram observados que alguns dos dados gerados apresentavam medidas fora da especificação pré-definida, sendo estes removidos da amostra, e novos valores de média, desvio padrão e a nova curva densidade foram determinadas (Figura 70).

**Figura 70 - Exemplo das planilhas geradas com a remoção de dados com medidas fora da especificação (obtidos na simulação de Monte Carlo)**



Fonte: Autoria própria (2022)

Em relação aos dados gerados, foi criada uma nova pasta de trabalho específica para o cálculo de CTQ (Figura 71). Na pasta de CTQ foram calculados,



Figura 73 - Representação da pasta de trabalho com as planilhas geradas com os dados reais aplicados no cálculo de CTQ

18										
19										
20	LOTE 1	3,5 +/- 0,1								
21	População	200	Parcial Desvio	0.00935	23.161655	3.900	Cp Inferior	1.0342	3.2838071	3.09648618
22	Amostra	40			1.2347276		Cp Superior	0.2138	1.0228252	0.5284
23	SD	0.01548	Parcial Média	3.46765		3.4614				
24	Média	3.4725		3.47735		3.4836				
25	Esquerdo (FD)	1.3719196	LSC Fuzzy	3.51	3.52	3.53				
26	Direito (FD)	25.735172	LIC Fuzzy	3.31	3.32	3.33				
27	Alfa	0.1	Cp Parcial	0.1838	2.1533161	0.2162				
28	A3	0.477382301								
29	c4	0.993630573								
30	LSC	3.52	Desvio Fuzzy	0.00035	0.00024	0.0018				
31	LIC	3.32	Média Fuzzy	3.46137	3.4725	3.48363009				

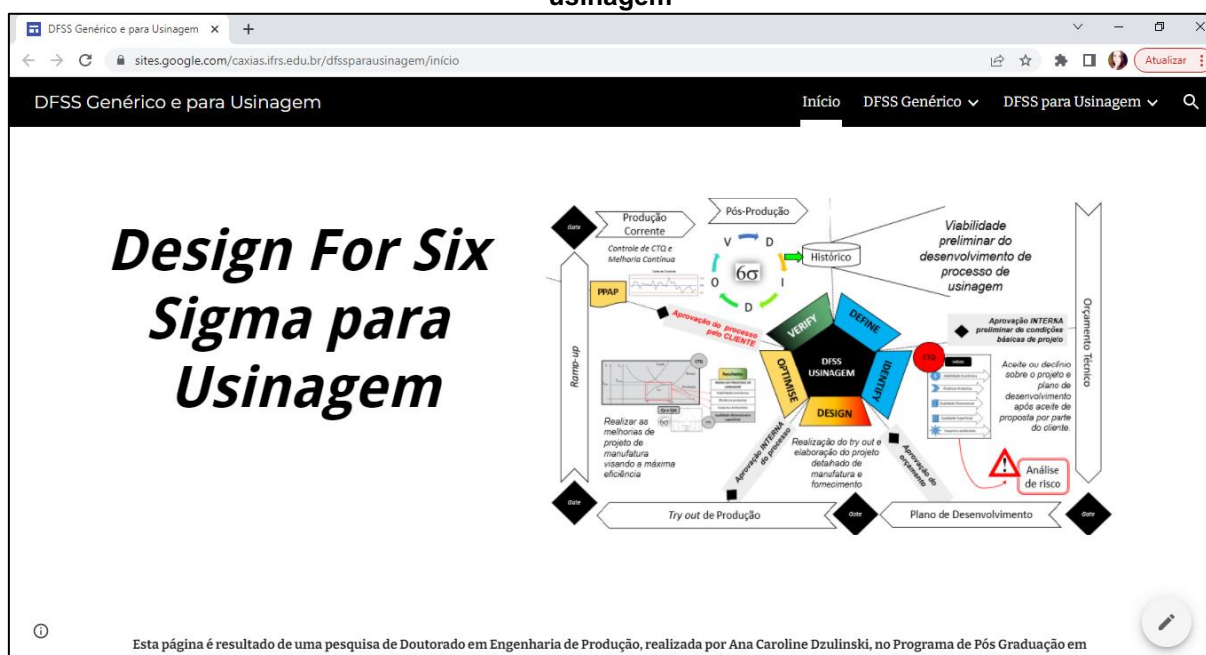
Fonte: Autoria própria (2022)

As planilhas completas encontram-se disponíveis em Dzulinski (2022a).

#### 4.5 Página web com os modelos propostos

O modelo genérico de DFSS e o modelo DFSS para usinagem compõe o conteúdo de uma página na web que foi criada visando a publicidade da pesquisa não somente em meio acadêmico, mas principalmente no meio profissional e empresarial do segmento de usinagem e correlatos. A página foi construída por meio do Google Sites e pode ser acessada em Dzulinski (2022b). A Figura 74 ilustra a página inicial.

Figura 74 - Imagem da página inicial da web elaborada para o DFSS genérico e DFSS para usinagem



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.6 Discussões gerais sobre os resultados

Por se tratar de um dos modelos mais recentes de DP, o DFSS foi definido como tema inicial da pesquisa. Conforme foram obtidos os resultados da revisão teórica, algumas características sobre o DFSS tornaram-se mais evidentes, como a definição e uso do CTQ, o que conduziu as abordagens posteriores da pesquisa.

O processo de usinagem, apesar de ser definido também como tema de partida, foi aprofundado teoricamente após concluído o levantamento sobre o DFSS, pois por meio de uma pesquisa preliminar sobre o desenvolvimento de produtos usinados, ficou claro que não há modelos específicos de PDP para esse segmento. Portanto, ficou definido o objetivo de propor um DFSS para usinagem, e para isso, primeiramente seria analisada a estrutura desta metodologia para posteriormente relacioná-la às características do processo de fabricação abordado.

Ficou evidente que o índice CTQ é um dos principais diferenciais em relação a este modelo de DP, sendo o índice relacionado às funções das entradas e saídas envolvidas no desenvolvimento, visando a previsibilidade e anulação de possíveis ruídos que impactam no resultado. Sabendo que os processos de usinagem são compostos por um número considerável de relações entre entradas e saídas, ficou claro que a proposta de um modelo de DP para este segmento, utilizando uma abordagem que considera estas relações, apresentaria relevância e maior proximidade com as atividades que ocorrem na prática das empresas do segmento.

No levantamento teórico sobre os processos de usinagem, priorizou-se uma abordagem ampla, focando nas relações básicas entre as entradas, operações e saídas dos processos, de maneira a otimizar a relação entre essas características e a proposta do DFSS, principalmente na definição do CTQ. A proposta do modelo de DFSS para usinagem visa, desde o início da pesquisa, uma operacionalização facilitada, de maneira a aproximar a proposta acadêmica científica, das atividades práticas das organizações do segmento.

Portanto, foram buscados na literatura modelos e práticas de gestão específicos para o desenvolvimento dos processos de usinagem. Com isso, ficou evidente a escassez de estudos aprofundados sobre o tema. No decorrer desta busca, foi identificada a prática dos planos de processos como uma das abordagens mais relacionadas ao segmento, no que diz respeito à gestão de DP e desenvolvimento dos processos. Com isso, o levantamento teórico sobre os planos de processos de

usinagem direcionou a pesquisa para às práticas emergentes relacionadas a automação da tomada de decisão e o desenvolvimento dos processos de usinagem no contexto da Indústria 4.0.

Com isso, buscou-se durante a construção da proposta do DFSS para usinagem, uma abordagem capaz de aproximar as especificidades teóricas sobre as relações entre entradas e saídas deste tipo de processo de fabricação, os direcionamentos ascendentes sobre a automação das decisões, e a realidade da prática do segmento. Para isso, foram consideradas as opiniões dos profissionais que atuam diretamente neste contexto, em ambiente empresarial e industrial local.

Nas entrevistas realizadas, ficaram evidentes duas dificuldades principais no DP do segmento: a ocorrência de erros na produção corrente de peças, sendo que estes erros poderiam ser evitados desde a fase de projeto, e a dinâmica do desenvolvimento de processo atrelado fielmente a experiência puramente prática de alguns profissionais. Observando as necessidades apontadas pelos profissionais, e em alguns casos a citação direta feita por eles sobre métodos ágeis e modernos de apoio no desenvolvimento de produtos e processos, é notória a relevância de se propor novas metodologias neste sentido, mas também a dificuldade de modernização e mudança na gestão que é realizada.

Constantemente os profissionais afirmavam que as ações de melhoria no processo de gestão e de tomada de decisão precisavam ser dinâmicas, e que muitas das propostas acadêmicas não atendem a essa necessidade. Essa constatação conduziu a uma ênfase maior na simplicidade da proposta do DFSS, mas que seja capaz de garantir resultados efetivos.

Neste sentido, foi proposta a análise de risco por meio de um índice embasado no CTQ, que pode integrar tecnologias de grupo (pois considera dados históricos de diferentes produtos, processos e variáveis envolvidas na usinagem) e conceitos de decisão ágil e autônoma em sistemas cyber físicos projetados para processos de usinagem. Desta maneira, por mais que uma organização não implemente métodos automatizados de decisão, o modelo de DFSS pode conduzir para práticas de gestão do DP estruturadas, com enfoque na perspectiva de médio e longo prazo não somente na relação entre produção e entrega de um produto, mas principalmente em relação aos resultados, e impactos, do projeto de manufatura e o impacto na produção corrente.

O índice CTQ de fases iniciais que é proposto visa a construção futura de métodos automatizados que possam auxiliar na tomada de decisão, e apesar de ser impraticável essa análise sem o uso de ferramentas específicas para o cálculo, entende-se que a organização pode, mesmo sem o resultado numérico exato do índice, analisar o histórico sobre as variáveis que compõe o índice, e assim melhor conduzir o PDP e, principalmente, atentar-se aos possíveis riscos.

Portanto, considerando essas características e discussões, no próximo capítulo apresentam-se as conclusões obtidas da pesquisa e as sugestões para estudos futuros.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo principal da pesquisa foi atingido, visto que foi possível propor um modelo de DFSS para o segmento de usinagem, visando os processos convencionais e que abrangem volumes médios e altos de produção. Para isso, foram analisadas as estruturas teóricas sobre o DFSS e identificada a necessidade de se definir uma abordagem genérica da metodologia, visto a grande variação existente sobre as definições, objetivos, fases e respectivas atividades e ferramentas que compõe o modelo.

Para direcionar o DFSS para a usinagem, foi necessário analisar as etapas de PDP do segmento, e com isso foi possível identificar a limitação em relação a otimização que é enfatizada por modelos de DFSS. A otimização em usinagem é complexa visto o grande número de variáveis envolvidas no processo, e principalmente, os ruídos que podem interferir na saída. É inviável propor um modelo abrangente para todas as possibilidades, assim como é inviável definir de maneira específica um único meio de otimização.

Considerando o contexto nacional das empresas que oferecem os serviços de usinagem, mesmo que de médios e altos volumes de produção, poucas apresentam métodos modernos de plano de processos e de apoio à decisão no desenvolvimento de produtos. Nota-se o investimento crescente em máquinas, equipamentos, ferramentas e materiais, mas não em metodologias de apoio à gestão. Portanto, a proposta do modelo de DFSS deveria considerar a tendência de modernização do processo, mas também a prática de gestão e de tomada de decisão que não conta com esse recurso. Portanto, quando definidos os meios que conduzem a otimização (definição e análise de CTQ), foram priorizadas as macro variáveis de processo. Entende-se que essa definição é viável para análises realizadas por um decisor, e podem ser exploradas e desmembradas em variáveis específicas quando possível o uso de meios computacionais e cyber físicos.

O modelo proposto foi construído e validado de acordo com a opinião de profissionais que atuam diretamente com as atividades de desenvolvimento, e por isso, entende-se que se aproxima de maneira satisfatória da realidade praticada pelo segmento. Visando o acesso facilitado ao modelo, o DFSS para usinagem foi disposto em página da web, pois segundo os entrevistados na pesquisa, há muita dificuldade

em acessar pesquisas acadêmicas utilizando os “moldes” formais de publicação. A publicidade por meio de site foi uma sugestão destes profissionais.

Apesar do atendimento ao objetivo principal proposto para a pesquisa, são destacadas limitações, sendo estas listadas no próximo tópico.

### **5.1 Limitações da pesquisa**

Durante o desenvolvimento da pesquisa os seguintes fatores limitaram os resultados obtidos, tais quais:

- A pandemia da Covid-19 teve início antes da coleta dos dados da pesquisa, sendo necessárias várias alterações da proposta inicial. A definição pela entrevista e questionário se deu pela necessidade de atendimento ao distanciamento imposto pela situação de saúde, o que limitou consideravelmente os dados considerados;
- O segmento depende em totalidade de projetos externos, com isso, muitas empresas limitaram sua participação na pesquisa não oferecendo contribuição suficiente (respostas limitadas ao questionário, ou na entrevista) alegando necessidade de sigilo de informações, mesmo o sigilo sendo garantido na pesquisa;
- Tanto o modelo genérico de DFSS, quanto para usinagem, requer aplicabilidade em produto e processo real, considerando todas as fases;
- A proposta de CTQ em fases iniciais requer desenvolvimento específico para sistemas cyber físicos (programação de softwares, método de coleta de dados, gestão de dados, sistemas de comunicação, etc.);
- O índice CTQ proposto utilizando *Fuzzy* de base triangular deve ser comparado com outros métodos matemáticos que consideram a incerteza de dados;

As limitações listadas induzem às sugestões para estudos futuros, descritos no próximo tópico.

### **5.2 Sugestão para estudos futuros**

São propostas para estudos futuros:



- A aplicabilidade do DFSS genérico em produtos e processos distintos para validação;
- Aplicabilidade do DFSS para usinagem no desenvolvimento completo de um produto usinado;
- Definição das ferramentas recomendadas para cada atividade do DFSS para usinagem
- Estudo e sugestão de novos CTQ para o DFSS para usinagem;
- Melhoria do índice CTQ de fases iniciais do DFSS para usinagem;
- Desenvolvimento e registro de software para coleta, análise e tratamento de dados de capacidade de processos de usinagem empregados para o CTQ de fases iniciais do DFSS para usinagem;
- Elaboração de estudo teórico sobre a integração entre modelos de PDP e de PPAC;
- Integração do DFSS para usinagem a PPAC;
- Novas propostas de DFSS para processos de manufatura abrangendo outros processos de fabricação (fundição, conformação, montagem);

### **5.3 Publicação resultante da pesquisa**

O modelo genérico de DFSS, primeiro resultado da pesquisa, foi tema de artigo científico publicado na revista internacional *Engineering Management Journal*: (DZULINSKI; BRAGHINI JUNIOR; CHIROLI, 2022).

## REFERÊNCIAS

- AGGOGERI, F.; MAZZOLA, M.; O'KANE, J. Implementing DFSS to increase the performance level of an extrusion process. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**, v. 5, n. 1, p. 10-28, 2009.
- AGUSTIADY, T.; CUDNEY, E. A. **Design for Six Sigma: A Practical Approach Through Innovation**. CRC Press, 2016.
- AHILAN, C. *et al.* Modeling and prediction of machining quality in CNC turning process using intelligent hybrid decision making tools. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 3, p. 1543-1551, 2013.
- AL-ZUBAIDI, S.; GHANI, J. A.; CHE HARON, C. H. Application of ANN in milling process: a review. **Modelling and Simulation in Engineering**, v. 2011, 2011.
- ALVAREZ, J. C. Lean design for Six Sigma: An integrated approach to achieving product reliability and low-cost manufacturing. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 8, p. 895-905, 2015.
- ÁLVAREZ, M. E. P.; BÁRCENA, M. M.; GONZÁLEZ, F. A. On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3890-3904, 2017.
- AMER, Y.; LUONG, L.; LEE, S. H. Case study: Optimizing order fulfillment in a global retail supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 127, n. 2, p. 278-291, 2010.
- ÅNMARK, N.; KARASEV, A.; JÖNSSON, P. G. The effect of different non-metallic inclusions on the machinability of steels. **Materials**, v. 8, n. 2, p. 751-783, 2015.
- ANTIS, D.; SLUSKY, L.; CREVELING, C. M. **Design for Six Sigma**. Pearson Education Inc, New Delhi, India, 2003.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.
- ARRAZOLA, P. J. *et al.* Recent advances in modelling of metal machining processes. **CIRP Annals**, v. 62, n. 2, p. 695-718, 2013.
- ARVANITIS, A. *et al.* Automobile Powertrain Sound Quality Development Using a Design for Six Sigma (DFSS) Approach. **SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems**, v. 8, n. 2015-01-2336, p. 1110-1119, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6162**: Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais - Rio de Janeiro, 1989.

AWAD, M. I. *et al.* Track roller and idler design improvement using DFSS. In: **IIE Annual Conference. Proceedings**. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), p. 2170. 2009.

AWAD, M. I.; HASSAN, N. M. Joint decisions of machining process parameters setting and lot-size determination with environmental and quality cost consideration. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 46, p. 79-92, 2018.

AWAD, M. I.; SHANSHAL, Y. A. Utilizing Kaizen process and DFSS methodology for new product development. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 34, n. 3, p. 378-394, 2017.

BARIL, C.; YACOUT, S.; CLÉMENT, B. Design for Six Sigma through collaborative multiobjective optimization. **Computers & Industrial Engineering**, v. 60, n. 1, p. 43-55, 2011.

BARRETO, H.; HOWLAND, F. **Introductory econometrics: using Monte Carlo simulation with Microsoft excel**. Cambridge University Press, 2006.

BHATTACHARYA, D. Machinability of steel. **JOM**, v. 39, n. 3, p. 32-35, 1987.

BELAIR, G.; O'NEILL, J. **Implementing Design for Six Sigma: A Leader's Guide: Getting the Most from Your Product Development Process**. ASQ Press, 2007.

BERGER, U., KRETZSCHMANN, R., APARICIO, A. V. V., REICHENBACH, M., ZÜRN, M. Development of a heuristic Process Planning Tool for Sequencing NC Machining Operations extended by the Potential Field Analysis. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 42, n. 4, p. 1221-1226, 2009.

BEROE. **Market trend**. Disponível em: < <https://www.beroeinc.com/category-intelligence/machining-market/> > Acesso em: 22 jun. 2021.

BERTELLI, C. R.; LOUREIRO, G. Quality Problems in Complex Systems even Considering the Application of Quality Initiatives during Product Development. Conference: **22nd ISPE-Inc International Conference on Concurrent Engineering** Netherlands, 2015.

BOBROWSKI, P. E. A framework for integrating external information into new product development: lessons from the medical technology industry. **The Journal of Technology Transfer**, v. 25, n. 2, p. 181-192, 2000.

BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 18, p. 1-9, 2017.

BORREGO, M.; FOSTER, M. J.; FROYD, J. E. What is the state of the Art of systematic review in engineering education?. **Journal of Engineering Education**, v. 104, n. 2, p. 212-242, 2015.

BOYLE, I.; RONG, Y.; BROWN, D. C. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 27, n. 1, p. 1-12, 2011.

BRUE, G.; LAUNSBY, R. G. **Design for six sigma**. McGraw-Hill, 2003.

BRYSON, J. R.; CLARK, J.; VANCHAN, V. (Ed.). **Handbook of manufacturing industries in the world economy**. Edward Elgar Publishing, 2015.

BUTDEE, S.; KUNHIRUNBAWON, S. Multi-criteria decision for machining process plan evaluation using fuzzy logic modeling and feature based method. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 1982-1987, 2020.

CARVALHO, M. S. *et al.* Definition of a collaborative working model to the logistics area using design for Six Sigma. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 33, n. 4, p. 465-475, 2016.

CHANG, H. C., DONG, L., LIU, F. X., LU, W. F. Indexing and retrieval in machining process planning using case-based reasoning. **Artificial Intelligence in Engineering**, v. 14, n. 1, p. 1-13, 2000.

CHILDS, T.H. C. *et al.* **Metal machining: theory and applications**. Butterworth-Heinemann, 2000.

CHUNG, Y. C.; HSU, Y. W. Research on the correlation between Design for Six Sigma implementation activity levels, new product development strategies and new product development performance in Taiwan's high-tech manufacturers. **Total Quality Management**, v. 21, n. 6, p. 603-616, 2010.

ÇOLAK, O.; KURBANOĞLU, C.; KAYACAN, M. C. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. **Materials & design**, v. 28, n. 2, p. 657-666, 2007.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Estatísticas**. Disponível em: < <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondagem-industrial/> > Acesso em: 03 fev. 2020.

COOPER, R. G. The Stage-Gate Idea-to-Launch Process—Update, What's New and NexGen Systems. **Journal Product Innovation Management**, v. 25, n. 3, p. 213-232, 2008.

CORMIER, D.; WALSH, R. A. **Machining and metalworking handbook**. McGraw-Hill Professional Publishing, 2005.

CROWSON, R. **Parts Fabrication: Principles and Process**. CRC Press, 2006.

CUDNEY, E. A.; FURTERER, S. L. **Design for six sigma in product and service development: Applications and case studies**. CRC Press, 2012.

D'ADDONA, D. M.; TETI, R. Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes. **Procedia Cirp**, v. 7, p. 323-328, 2013.

DAVIM, J. P. **Machinability of advanced materials**. John Wiley & Sons, 2014.

DAVIM, J. P. (Ed.). **Modern machining technology: A practical guide**. Elsevier, 2011.

DE MASSIS, A. *et al.* Family governance at work: Organizing for new product development in family SMEs. **Family Business Review**, v. 29, n. 2, p. 189-213, 2016.

DE MAST, J.; DIEPSTRATEN, G.; DOES, R. J.M.M. Quality quandaries: Design for six sigma: Method and application. **Quality Engineering**, v. 23, n. 2, p. 204-211, 2011.

DENKENA, B., SHPITALNI, M., KOWALSKI, P., MOLCHO, G., ZIPORI, Y. Knowledge management in process planning. **CIRP annals**, v. 56, n. 1, p. 175-180, 2007.

DESALE, P.S.; JAHAGIRDAR, R.S. Modeling of machining process using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict process output variables: a review. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)**, v.2, 178-182, 2011.

DUDA, J.; POBOZNIAK, J. The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 501-508, 2017.

DUREJA, J. S. *et al.* A review of empirical modeling techniques to optimize machining parameters for hard turning applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 3, p. 389-404, 2016.

DZULINSKI, A. C. **Planilhas CTQ**. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1nYLB9zEVFL2T0pXbBQ8I4yCu0BCJ9uT-?usp=sharing>> Acesso em: 05 mar. 2022a.

DZULINSKI, A. C. **DFSS Genérico e para Usinagem**. Disponível em: <https://sites.google.com/caxias.ifrs.edu.br/dfssparausinagem/in%C3%ADcio> Acesso em: 12 abril 2022b.

DZULINSKI, A. C. **Transcrição de entrevistas, e respostas obtidas através do questionário enviado aos profissionais de usinagem considerados na pesquisa**. Disponível em: [https://drive.google.com/drive/folders/1LNVcwp7B7Cm\\_d7UDx03iqfb5gtMMm4Yp?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1LNVcwp7B7Cm_d7UDx03iqfb5gtMMm4Yp?usp=sharing). Acesso em: 01 de maio de 2022c.

DZULINSKI, A.C.; BRAGHINI JUNIOR, A.; CHIROLI, D. M. G. Design for Six Sigma: A Review of the Definitions, Objectives, Activities, and Tools. **Engineering Management Journal**, 2022. DOI: 10.1080/10429247.2022.2041964

EHMANN, K. F.; KAPOOR, S. G.; DEVOR, R. E.; LAZOGLU, I. Machining process modeling: a review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Transactions of the ASME, v. 119, n. 4B, p. 655-663, 1997.

ERICSSON, E. Is there a need for a new process model in product development when implementing DFSS? **Technology Management in the IT-Driven Services (PICMET)**. IEEE, 2013.

ERICSSON, E. *et al.* Developing a design for six sigma framework for the analysis of product development processes. In: 2015 **Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)**. IEEE, 2015.

ERICSSON, E.; GINGNELL, L.; LILLIESKÖLD, J. Implementing Design for Six Sigma in large Swedish product developing organisations—an interview study. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 26, n. 5-6, p. 648-660, 2015.

- FENG, S. C.; STOUFFER, K. A.; JURRENS, K. K. Manufacturing planning and predictive process model integration using software agents. **Advanced Engineering Informatics**, v. 19, n. 2, p. 135-142, 2005.
- FERNANDO, W. L. R.; KARUNATHILAKE, H. P.; GAMAGE, J. R. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review. **Cleaner Engineering and Technology**, p. 100100, 2021.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora Blucher, ed. 17, 2017.
- FERREIRA, I. *et al.* A multidisciplinary framework to support the design of injection mold tools. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 49, n. 3, p. 501-521, 2014.
- FITZPATRICK, M. **Introdução à manufatura**. AMGH Editora, 2013.
- FRANCISCO, M. G.; CANCEGLIERI JUNIOR, O.; SANT'ANNA, A. M. O. Design for six sigma integrated product development reference model through systematic review. **International Journal of Lean Six Sigma**, 2020.
- FRIZZIERO, L.; LIVERANI, A.; NANNINI, L. Design for Six Sigma (DFSS) Applied to a New Eco-Motorbike. **Machines**, v. 7, n. 3, p. 52, 2019.
- GAO, X.; MOU, W.; PENG, Y. An intelligent process planning method based on feature-based history machining data for aircraft structural parts. **Procedia CIRP**, v. 56, p. 585-589, 2016.
- GARG, A.; BHALERAO, Y.; TAI, K. Review of empirical modelling techniques for modelling of turning process. **International Journal of Modelling, Identification and Control**, v. 20, n. 2, p. 121-129, 2013.
- GEERTS, F. **The european machine tool sector and the circular economy**. 2019. Disponível em: [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular\\_economy\\_report.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular_economy_report.pdf). Acesso em: 06 nov. 2020.
- GMELIN, H.; SEURING, S. Determinants of a sustainable new product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 1-9, 2014.
- GOH, T. N.; LAM, S. W. Problem-based learning approach to application of statistical experimentation. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, n. 4, p. 365-373, 2010.
- GOVERNO DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas socioeconômico do Rio Grande Do Sul**. 2020. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br>. Acesso em: 13 jun. 2021.
- GREMYR, I. **Robust Design Methodology: A framework and supportive methods**. Chalmers University of Technology, 2005.
- GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. Grupo Gen-LTC, 2016.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications**. Elsevier, 2<sup>o</sup> Ed., 2017.

HAMRAN, N.N. N.; GHANI, J. A.; RAMLI, R.; CHE HARON, C.H. A review on recent development of minimum quantity lubrication for sustainable machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122165, 2020.

HASENKAMP, T. Engineering Design for Six Sigma: a systematic approach. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, n. 4, p. 317-324, 2010.

HASENKAMP, T.; OLME, A. Introducing design for Six Sigma at SKF. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**, v. 4, n. 2, p. 172-189, 2008.

HE, Y.; TANG, X.; CHANG, W. Technical decomposition approach of critical to quality characteristics for product design for six sigma. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, n. 4, p. 325-339, 2010.

HELGOSON, M.; KALHORI, V. A conceptual model for knowledge integration in process planning. **Procedia Cirp**, v. 3, p. 573-578, 2012.

HERNÁNDEZ, A. E. B. *et al.* Process sustainability evaluation for manufacturing of a component with the 6R application. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 546, 2019.

HSIANG, T. C.; TAGUCHI, G. A tutorial on quality control and assurance-the Taguchi methods. In: **ASA Annual Meeting LA**. 1985.

HU, Z.; DING, H.; PENG, S.; TANG, J.; TANG, Y. A novel collaborative manufacturing model requiring both geometric and physical evaluations of spiral bevel gears by design for six sigma, **Mechanism and Machine Theory**, Volume 133, 2019.

INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP)**. Disponível em: <<http://apqp.com.br>> Acesso em: 3 mar. 2021a.

INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **Processo de Aprovação da Peça de Produção (PPAP)**. Disponível em: <<https://ppap.com.br/>> Acesso em: 3 mar. 2021b.

JAHANZAIB, S. A. M. M.; JAMIL, U.; AKHTAR, K. Product Design Variables Optimization using Design for Six Sigma (DFSS) Approach. **Life Science Journal**, v. 10, n. 1, 2013.

JAIN, N. K.; JAIN, V. K. Modeling of material removal in mechanical type advanced machining processes: a state-of-art review. **International journal of machine tools and manufacture**, v. 41, n. 11, p. 1573-1635, 2001.

JINGJING, Z. H. U., XIAOJUN, W. A. N. G., ZHANG, H., YUWEN, L. I., RUIXING, W. A. N. G., ZHIPING, Q. I. U. Six sigma robust design optimization for thermal protection system of hypersonic vehicles based on successive response surface method. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 32, n. 9, p. 2095-2108, 2019.

JOU, Y. T. *et al.* A study on the improvements of new product development procedure performance—an application of design for Six Sigma in a semi-conductor

equipment manufacturer. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 19, p. 5573-5591, 2010.

KAYA, İ.; KAHRAMAN, C. A new perspective on fuzzy process capability indices: Robustness. **Expert systems with applications**, v. 37, n. 6, p. 4593-4600, 2010.

KAYA, İ.; KAHRAMAN, C. Process capability analyses with fuzzy parameters. **Expert systems with applications**, v. 38, n. 9, p. 11918-11927, 2011.

KIM, J. H. *et al.* A Study on the Role of TRIZ in DFSS. **SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems**, v. 5, n. 2012-01-0068, p. 22-29, 2012.

KOCH, P. N.; YANG, R.J.; GU, L. Design for six sigma through robust optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 26, n. 3, p. 235-248, 2004.

KOMPALLY, S. K., RAMANATH, V., JEEVANANDAN, K., KUNNIL, M.. Recent Advances in Test vs Finite Element Correlations Through Design for Six Sigma Tools. In: **International Conference on Nuclear Engineering**. American Society of Mechanical Engineers, 2012. p. 83-90.

KOZIOŁEK, S.; DERLUKIEWICZ, D. Method of assessing the quality of the design process of construction equipment with the use of DFSS (design for Six Sigma). **Automation in Construction**, v. 22, p. 223-232, 2012.

KROLCZYK, G. M., MARUDA, R. W., KROLCZYK, J. B., WOJCIECHOWSKI, S., MIA, M., NIESLONY, P.; BUDZIK, G. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production—a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 601-615, 2019.

KUMAR, S. L. State of the art-intense review on artificial intelligence systems application in process planning and manufacturing. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 65, p. 294-329, 2017.

LAURO, C. H. *et al.* Monitoring and processing signal applied in machining processes—A review. **Measurement**, v. 58, p. 73-86, 2014.

LEI, G., WANG, T., ZHU, J., GUO, Y., WANG, S. System-level design optimization method for electrical drive systems—Robust approach. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 8, p. 4702-4713, 2015.

LEOPOLD, J. Approaches for modelling and simulation of metal machining—a critical review. **Manufacturing Review**, v. 1, p. 7, 2014.

LI, L. *et al.* A survey of feature modeling methods: Historical evolution and new development. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 61, p. 101851, 2020.

LIU, X. *et al.* Robust optimization in HTS cable based on design for six sigma. **IEEE Transactions on Magnetics**, 44, (6), 2008.

LISHU, L.V., DENG, Z., MENG, H., LIU, T., WAN, L. A multi-objective decision-making method for machining process plan and an application. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121072, 2020.



- LIVERANI, A. *et al.* Design for Six Sigma (DFSS) for additive manufacturing applied to an innovative multifunctional fan. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 13, n. 1, p. 309-330, 2019.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.
- MADER, D. P. Design for six sigma. **Quality progress**, v. 35, n. 7, p. 82-86, 2002.
- MADER, D. P. DFSS and your current design process. **Quality Progress**, v. 36, n. 7, p. 88-89, 2003.
- MARIMUTHU, P.; CHANDRASEKARAN, K. Machinability study on stainless steel and optimum setting of cutting parameters in turning process using Taguchi design of experiments. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 43, n. 1-4, p. 122-133, 2012.
- MELO, S. P. **Desenvolvimento e aplicação de um sistema de planejamento de processo auxiliado por computador em um ambiente de usinagem**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- MEISSNER, H.; AURICH, J. C. Implications of cyber-physical production systems on integrated process planning and scheduling. **Procedia manufacturing**, v. 28, p. 167-173, 2019.
- MENG, X. *et al.* Robust multilevel optimization of PMSM using design for six sigma. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 47, n. 10, p. 3248-3251, 2011.
- MILLS, B. **Machinability of engineering materials**. Springer Science & Business Media, 2012.
- MITCHELL, E. M.; KOVACH, J.V. Improving supply chain information sharing using Design for Six Sigma. **European Research on Management and Business Economics**, v. 22, n. 3, p. 147-154, 2016.
- MONDAL, S. C.; RAY, P. K.; MAITI, J. Modelling robustness for manufacturing processes: a critical review. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 2, p. 521-538, 2014.
- MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. 7ª edição. **Grupo Gen**, 2016.
- MUNRO, R. A.; RAMU, G.; ZRYMIK, D. J. **The certified Six sigma green belt handbook**. ASQ Quality Press, 2015.
- MURALIDHALAN, K. **Six Sigma for organizational excellence: a statistical approach**. Springer, 2015.
- NICOLAESCU, S. Ş., KIFOR, C. V., RECEU, I., LOBONȚ, L. Integrated model of knowledge management concepts and design for six sigma methodology-case study inside R&D center of automotive industry. **International Conference on Production Research**, 2016.

NWABUEZE, U.; LAW, Z. C. The journey for survival: the case of new product development in the brewery industry. **Journal of Product & Brand Management**, 2001.

PANDEY, N.; PATWARDHAN, A. A.; RAO, S. Four decades of new product development research: an integrative review. **International Journal of Product Development**, v. 23, n. 1, p. 1-14, 2019.

PARK, G.; BEMENT, M. T.; HARTMAN, D. A.; SMITH, R. E.; FARRAR, C. R. The use of active materials for machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 15, p. 2189-2206, 2007.

PEARN, W. L.; KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. Distributional and inferential properties of process capability indices. **Journal of Quality Technology**, v. 24, n. 4, p. 216-231, 1992.

PELEGRINO, D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas-ferramentas**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PENG, T., XU, X. Energy-efficient machining systems: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n.9-12, p. 1389-1406, 2014.

PEPPER, M. P. J.; SPEDDING, T. A. The evolution of lean Six Sigma. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 27, n. 2, p. 138-155, 2010.

PYZDEK, T.; KELLER, P. A. **The six sigma handbook**. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014.

RAHARJO, H. *et al.* On integrating Kano's model dynamics into QFD for multiple product design. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, n. 4, p. 351-363, 2010.

RILEY, B. W.; KOVACH, J. V.; CARDEN, L. Developing a policies and procedures manual for a consumer lending department: a design for Six Sigma case study. **Engineering Management Journal**, v. 25, n. 3, p. 3-15, 2013.

ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2010.

SANTOS, M. C.; MACHADO, A. R.; SALES, W. F.; BARROZO, M. A.; EZUGWU, E. O. Machining of aluminum alloys: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 9, p. 3067-3080, 2016.

SARI, R. P.; ASAD, N. New product development-processes in the fashion industry. **Journal of Islamic Marketing**, 2019.

SCANDIFFIO, I. **Interação aresta/peça no fresamento de perfis complexos: influência na força de usinagem, vida da ferramenta e rugosidade da peça**.

2016. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em:

<<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/320779>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

EL-SHARKAWY, A.; SALAHUDDIN, A.; KOMARISKY, B. Design for six sigma (DFSS) for optimization of automotive heat exchanger and underhood air temperature. **SAE International Journal of Materials and Manufacturing**, v. 7, n. 2, p. 256-261, 2014.

SHARMA, V. S.; DOGRA, M.; SURI, N. M. Cooling techniques for improved productivity in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 6, p. 435-453, 2009.

SHAW, M.C.; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

SHAHIN, A. Design for Six Sigma (DFSS): lessons learned from world-class companies. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**, v. 4, n. 1, p. 48-59, 2008.

SHERCLIFF, H. R.; LOVATT, A. M. Selection of manufacturing processes in design and the role of process modelling. **Progress in materials science**, v. 46, n. 3-4, p. 429-459, 2001.

SHI, B.; ATTIA, H. Current status and future direction in the numerical modeling and simulation of machining processes: a critical literature review. **Machining Science and Technology**, v. 14, n. 2, p. 149-188, 2010.

SICK, B. On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research. **Mechanical systems and signal processing**, v. 16, n. 4, p. 487-546, 2002.

SHINNO, H. *et al.* Product development methodology for machine tools. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, **Machine Elements and Manufacturing**, v. 45, n. 3, p. 815-820, 2002.

SHOJAIE, A. A.; KAHEDI, E. Auto parts manufacturing quality assessment using design for six sigma (DFSS), case study in ISACO company. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 10, n. 1, p. 35-43, 2019.

SIHAG, N.; SANGWAN, K. S. A systematic literature review on machine tool energy consumption. **Journal of Cleaner Production**, p. 123125, 2020.

SIMECS - Sindicato das Indústrias Metalúrgicas, Mecânicas e de Material Elétrico de Caxias do Sul e Região. **Empresas do SIMECS**. Disponível em: <<https://simecs.com.br/empresas-simecs>>. Acesso em: jun. de 2021.

SINGH, R. **Introduction to basic manufacturing processes and workshop technology**. New Age International Pvt. Ltd. 2006.

STAUDTER, C. *et al.* **Design for Six Sigma+ LeanToolset: Mindset for Successful Innovations**. Springer Science & Business Media, 2013.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal cutting theory and practice**. CRC press, 2016.

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. **Seleção de processos de manufatura**. Elsevier Brasil, 2015.

- TARVIN, P. **Leadership & Management of Machining**: How to integrate technology, robust processes, and people to win!. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.
- TENNANT, G. **Design for six sigma**: launching new products and services without failure. Gower Publishing, Ltd., 2002.
- TRENT, E.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.
- TSAI, C. C.; CHEN, C. C. Making decision to evaluate process capability index Cp with fuzzy numbers. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 30, n. 3-4, p. 334-339, 2006.
- URBIKAIN, G. et al. Prediction methods and experimental techniques for chatter avoidance in turning systems: A review. **Applied Sciences**, v. 9, n. 21, p. 4718, 2019.
- WALKER, J. R.; DIXON, B. **Machining Fundamentals**. The Goodheart-Willcox Company, 10<sup>th</sup> Ed., 2019.
- WALSH, R. A. **Handbook of machining and metalworking calculations**. New York: McGraw-Hill, 2001.
- WANG, L. Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 6, n. 4, p. 263-273, 2013.
- WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 517-527, 2015.
- WANG, F. K.; YEH, C. T.; CHU, T. P. Using the design for Six Sigma approach with TRIZ for new product development. **Computers & Industrial Engineering**, v. 98, p. 522-530, 2016.
- WANG, H. M.S.; WANG, S. P.; LEE, W. A case study for reducing client waiting time in a health evaluation center using design for Six Sigma. **Engineering Management Journal**, v. 26, n. 2, p. 62-73, 2014.
- WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 517-527, 2015.
- WANG, T. J.; HWANG, S. K. Combustion System Design of a Genset Diesel Engine by Using DFSS Methodology. **International Journal of Automotive Technology**, v. 20, n. 3, p. 539-547, 2019.
- WANG, X. V.; GIVEHCHI, M.; WANG, L. Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning. **Procedia Cirp**, v. 63, p. 39-45, 2017.
- WATSON, G. H.; DEYONG, C.F. Design for Six Sigma: caveat emptor. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 1, n. 1, p. 66-84, 2010.

WERKEMA, C. **Design for Six Sigma: Ferramentas Básicas Usadas Nas Etapas DEM Do DMADV**. Elsevier Editora, 2012.

WU, J. *et al.* Improve burnishing formation yield applying design for Six Sigma. In: **2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**. IEEE, 2011.

WU, J. J.; WAN, L. Q.; NIE, P. F. Kriging surrogate model for compliant mechanism Six Sigma robust optimization design. In: **2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. IEEE, 2015. p. 1377-1381.

XIA, Q., ETIENNE, A., DANTAN, J. Y., SIADAT, A. Reconfigurable machining process planning for part variety in new manufacturing paradigms: Definitions, models and framework. **Computers & Industrial Engineering**, v. 115, p. 206-219, 2018.

YAN, P.; RONG, Y.; WANG, G. The effect of cutting fluids applied in metal cutting process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 1, p. 19-37, 2016.

YANG, K.; EL-HAIK, K. Y. B. **Design for Six Sigma, a Roadmap for Product Development**. RR Donnelly, SAD, str, v. 21, 2003.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. **Machining technology: machine tools and operations**. CRC Press, 2008.

YUSOF, Y.; LATIF, K. Survey on computer-aided process planning. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 75, n. 1-4, p. 77-89, 2014.

YUN, E. K.; CHUN, K. M.. Critical to quality in telemedicine service management: application of DFSS (Design for Six Sigma) and SERVQUAL. **Nursing economics**, v. 26, n. 6, p. 384, 2008.

YUSUP, N.; ZAIN, A. M.; HASHIM, S. Z. M. Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011). **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 10, p. 9909-9927, 2012.

ZHANG, L., ZHOU, L., REN, L., LAILI, Y. Modeling and simulation in intelligent manufacturing. **Computers in Industry**, v. 112, p. 103123, 2019.

ZHAO, Y. F.; XU, X. Enabling cognitive manufacturing through automated on-machine measurement planning and feedback. **Advanced Engineering Informatics**, v. 24, n. 3, p. 269-284, 2010.

**APÊNDICE A - Listas com os resultados das RBS realizadas na pesquisa**

➤ **RBS sobre DFSS**

<b>Referência</b>	<b>Principais objetivos e resultados</b>	<b>Tipo de Artigo</b>	<b>Number de citações (Bibliometrix)</b>
Awad et al. (2009)	Trata-se de um estudo de caso com uma abordagem sistemática do DFSS, utilizada para melhorar a expectativa de vida de rolos e rodas-guia de uma máquina off-road. A abordagem utilizou CAE para construção de um produto em específico.	Estudo de Caso	3
Aggogeri, Mazzola e O'Kane (2009)	O artigo apresenta a implementação de um projeto DFSS em uma pequena empresa, com foco no processo de produção. São aplicadas ferramentas de gerenciamento de projetos, brainstorming e estatísticas (ANOVA, DOE). A análise econômica justifica a aplicação desse método para melhorar o nível de desempenho de um processo de fabricação.	Estudo de Caso	3
Hasenkamp (2010)	Foco no vínculo entre o DFSS e o processo sistemático de projetos de engenharia.	Revisão	15
He, Tang e Chang (2010)	O artigo apresenta uma nova abordagem técnica para decomposição de CTQs dos requisitos do cliente em parâmetros técnicos críticos com base na árvore relacional. A proposta é aplicada, e apresentada em detalhes, em um produto automotivo.	Estudo de Caso	21
Watson e DeYong (2010)	O artigo descreve a abordagem histórica da engenharia simultânea que resultou no gerenciamento da linha de produtos (PLM) e, em seguida, avalia os modelos teóricos que foram propostos para o DFSS, a fim de determinar qual modelo é capaz de fornecer a abordagem mais consistente com o desenvolvimento histórico do PLM.	Revisão	37
Wu et al. (2011)	O artigo apresenta um estudo do desenvolvimento do DFSS integrado com redes neurais objetivando a otimização de um processo de retificação.	Estudo de Caso	2
Meng et al. (2011)	Proposta de um método robusto de otimização baseado no DFSS, combinado à otimização, aplicando um algoritmo genético multinível.	Estudo de Caso	21
Mast, Diepstraten e Does (2011)	O artigo apresenta um framework com as principais atividades a serem executadas em cada uma das fases do DIDOV. No framework são citadas inúmeras ferramentas.	Revisão	11
Baril, Yacout e Clément (2011)	A metodologia DFSS apresentada no estudo considera três conceitos: otimização baseada em confiabilidade, design robusto e otimização multiobjetivo. Além disso, considera dois objetivos do design para a qualidade: manter a variação de desempenho dentro de limites aceitáveis (restrições) e reduzir a variação de desempenho.	Estudo de Caso	23
Koziołek e Derlukiewicz (2012)	Os autores citam as fases de DFSS – ICOV em um estudo de caso. Os autores citam diversas ferramentas que podem ser implementadas no desenvolvimento do DFSS. Um objetivo relevante refere-se na determinação de como os	Estudo de Caso	11

	defeitos afetam a qualidade do produto, com base nos critérios de conformidade.		
Kim et al. (2012)	O artigo relata o desenvolvimento de componentes automotivos utilizando DFSS e TRIZ e FMEA. Conclui-se que o TRIZ, na segunda fase do DFSS, possibilita a criação de novos conceitos a partir dos atuais, que podem ser otimizados e posteriormente verificados para atender aos requisitos nas fases de acompanhamento.	Estudo de Caso	2
Jahanzaib, Jamil e Akhtar (2013)	Este artigo explora as oportunidades de otimizar a abordagem DFSS no desenvolvimento de produtos, particularmente no estágio inicial de projeto de produtos. Um estudo de caso com um produto específico foi realizado para analisar e buscar os melhores valores de projeto. As variáveis de decisão utilizadas para otimização resultaram na melhoria dos índices do C-P e CPK do projeto proposto.	Estudo de Caso	1
Kompally et al. (2012)	No estudo é enfatizada a abordagem probabilística baseada em DFSS, desenvolvida com uma validação integrada para avaliar variáveis de elementos finitos combinando com testes de montagem. Há uma maior ênfase na descrição matemática.	Estudo de Caso	0
El-Sharkawy, Salahuddin e Komarisky (2014)	Refere-se a um estudo de caso no segmento automotivo utilizando DFSS e Método de Taguchi.	Estudo de Caso	13
Lei et al. (2015)	É apresentada uma abordagem robusta baseada na técnica de DFSS para a otimização do projeto objetivando melhorar a confiabilidade e a qualidade dos produtos na produção em lotes. Duas estruturas de otimização no nível do sistema são apresentadas para o método proposto: estruturas de nível único (somente no nível do sistema) e multiníveis.	Estudo de Caso	105
Ericsson, Gingnell e Lilliesköld (2015)	O artigo examina a estratégia de implementação do DFSS em quatro organizações com o objetivo de determinar quais partes do conceito DFSS estão sendo utilizadas pelas empresas. Os resultados mostram que várias das atividades mais complexas de Desenvolvimento de Produtos (DP) carecem de apoio concreto no DFSS. Por outro lado, muitas das ações claramente descritas do conceito já são métodos operacionais nas organizações atuais de desenvolvimento de produtos.	Estudo de Caso	0
Ericsson et al. (2015)	O artigo apresenta uma estrutura focada no desempenho do desenvolvimento de produtos, resumindo importantes estratégias organizacionais baseadas nos conceitos de DFSS.	Revisão	8
Wu, Wan e Nie (2015)	É apresentada uma nova abordagem baseada em DFSS, combinando <i>design of experiments</i> e o modelo de Kriging. Trata-se de um projeto de otimização que melhora a confiabilidade.	Estudo de Caso	1
Bertelli e Loureiro (2015)	O objetivo central do artigo é fornecer o entendimento das ferramentas da qualidade	Revisão	1



	durante o desenvolvimento do programa de desenvolvimento de produtos e direcionar sua aplicação (Design for Six Sigma, Design FMEA, QFD, TRIZ, Robust Engineering, DFM e DFA).		
Wang, Yeh e Chu (2016)	É apresentado o desenvolvimento de um dispositivo de rede utilizando o DFSS integrado com TRIZ (aplicado na fase de Análise). Para cada fase do DFSS - (5 fases DMADV), os autores citam algumas ferramentas, tais quais: (1) levantamento da VOC, análise de Khano, análise financeira e de risco; (2) Método de Pugh, QFD e DFMEA; (3) TRIZ, brainstorming, benchmarking; (4) Método Taguchi, projeto robusto, projeto de experimentos (DOE), análise de tolerância, simulação; (5) Teste de confiabilidade, plano de manutenção e de qualidade. Sete patentes foram desenvolvidas através deste projeto.	Estudo de Caso	26
Nicolaescu et al. (2016)	DFSS foi aplicado no desenvolvimento inicial do sistema sonoro do motor de veículos de alto desempenho, onde o principal foco era atender as expectativas do público alvo do produto. Para isso foram levantadas as opiniões de uma amostra de clientes potenciais e as características do produto desenvolvido foram definidas com base na análise da VOC.	Estudo de Caso	0
Awad Shanshal (2017)	Proposta de um framework com uma metodologia híbrida de DFSS e Kaizen.	Estudo de Caso	8
Hu et al. (2019)	Aplicação do DFSS (5 fases - DMADV) no desenvolvimento de engrenagens cônicas em espiral - a modelagem é feita considerando 3 problemas principais: modelagem que considere os ruídos do processo de fabricação (compensação do comando numérico); função multiobjetivo para controle de variável de CTQ; modificação de parâmetros de entrada de máquina aplicando análise de sensibilidade.	Estudo de Caso	4
Jingjing et al. (2019)	Para melhorar a confiabilidade e a robustez do projeto o artigo propõe um modelo de otimização que considera o nível seis sigma para realizar uma otimização probabilística para o TPS de veículos hipersônicos.	Estudo de Caso	0
Wang and Hwang (2019)	O artigo descreve o desenvolvimento de um motor a diesel utilizando metodologia DFSS. O desenvolvimento do motor objetivou a redução de emissão de Nox e ao limite de hardware da pressão de pico, elementos esses que parametrizaram o modelo de desenvolvimento.	Estudo de Caso	0
Liverani et al. (2019)	São discutidas e apresentadas todas as técnicas e tecnologias modernas que dão suporte ao desenvolvimento de produtos, aplicando-as no desenvolvimento de um ventilador. Um dos principais resultados é a redução significativa de custos com componentes projetados.	Estudo de Caso	9
Shojaie e Kahedi (2019)	É apresentado o desenvolvimento de uma estrutura para analisar a qualidade de um produto automotivo utilizando uma abordagem de DFSS.	Estudo de Caso	0

Frizziero, Liverani e Nannini (2019)	O artigo apresenta o desenvolvimento de um veículo ecológico de transporte, usando a metodologia DFSS. Utilizou também QFD, TRIZ, benchmarking, entre outros, a fim de propor soluções de design orientadas tanto à qualidade quanto à inovação, para satisfazer os clientes.	Estudo de Caso	0
--------------------------------------	---	----------------	---

Fonte: Autoria própria (2022)

Principais livros citados e a abordagem ao tema de cada um.

Referência	Abordagem	Principais Pontos	Citações (Google Acadêmico)
Yang e El-Haik (2003)	Diferencia a metodologia de DFSS do SS. Apresenta um algoritmo detalhado de DFSS, abrangendo as fases ICOV, além de descrever as ferramentas indicadas.	Descreve a relação Qualidade x DNP x DFSS; Foco em funções transferência e otimização; Detalhamento das ferramentas empregadas;	774
Brue e Launsby (2003)	Caracteriza a metodologia de maneira genérica e a descreve considerando as fases IDOV. Não há enfoque matemático.	Descrição sobre o que é o DFSS; Detalhamento de fases de execução e ferramentas sugeridas; Descreve algumas ferramentas; Apresenta alguns exemplos reais de aplicação;	214
Cudney e Furterer (2012)	Estudos de caso e aplicação do DFSS	São descritos estudos sobre a aplicação do DFSS em diversos segmentos;	18
Staudter <i>et al.</i> (2013)	Abordagem sintetizada do DFSS considerando a estrutura DMADV. Enfoque nas ferramentas recomendadas em cada fase.	São oferecidas listas com diversas ferramentas para execução de cada fase; Não há detalhamento das atividades específicas de cada fase;	13
Agustiady e Cudney (2016)	Enfoque maior nas ferramentas que podem ser utilizadas na metodologia DFSS.	Comparação entre a estrutura DFSS e SS; Detalhamento sobre <i>Project Charter</i> , <i>Balanced Scorecard</i> , <i>Benchmarking</i> , Gestão de projetos, captura da voz do cliente, QFD, TRIZ, <i>Lean Manufacturing</i> , DFX, Matriz de Pugh, Modelagem (Diagrama P), Taguchi, entre outras ferramentas. São apresentados estudos de caso da aplicação do DFSS.	9
Belair e O'Neill, (2007)	Apresenta de maneira genérica o modelo DMADVI, com a descrição das ferramentas recomendadas e apresenta um estudo de caso.	Apresenta uma visão estratégica sobre a aplicabilidade do DFSS; Estabelece a forma de controle de efetividade da metodologia; Apresenta um estudo de caso detalhado sobre a aplicação do DFSS e ferramentas utilizadas em cada fase;	8

Werkema (2012)	Descrição do que é DFSS, considera as etapas DMADV, detalha etapas e ferramentas somente das etapas Definir e Mensurar.	Descrição detalhada de todas as atividades de cada fase da metodologia DMADV; Apresenta detalhamento das ferramentas das fases Definir e Mensurar;	7
----------------	---	--	---

Fonte: Autoria própria (2022)

➤ **RBS sobre usinagem**

Elementos de fixação	BOYLE, RONG e BROWN (2011)	Mais de setenta e cinco ferramentas e abordagens CAFD são revisadas em termos das fases de projeto de fixação que elas suportam e as tecnologia subjacentes sobre a qual se baseiam. A principal conclusão da revisão é que, embora avanços significativos tenham sido feitos em relação ao projeto de fixação, existem principalmente duas questões de pesquisa que exigem mais esforço. A primeira delas é que a pesquisa atual do CAFD é segmentada por natureza e permanece a necessidade de fornecer um suporte de design de fixação mais coeso. Em segundo lugar, um foco maior é necessários para apoiar o projeto detalhado da estrutura física de um acessório.
Usinabilidade de metais	BHATTACHARYA (1987)	O artigo revisa as características de usinabilidade, técnicas de medição e análise, métodos para melhorar a usinabilidade e formas de melhorar aços de usinagem livre.
	PARK, BEMENT, HARTMAN, SMITH e FARRAR (2007)	Fornece uma revisão sobre materiais ativos no contexto de aplicações em processos de fabricação de usinagem. Os conceitos importantes e os antecedentes dos materiais ativos são brevemente apresentados. Em seguida, são discutidas as aplicações desses materiais em temas relevantes em processos de usinagem.
	ÅNMARK, KARASEV e JÖNSSON (2011)	Revisa os mecanismos de fraturas do aço durante diferentes operações de usinagem e o comportamento de várias inclusões não metálicas em uma zona de corte. Mais especificamente, os efeitos da composição, tamanho, número e morfologia das inclusões nos fatores de usinabilidade (como desgaste da ferramenta de corte, consumo de energia, etc. ) são discutidos e resumidos.
	MARIMUTHU e CHANDRASEKARAN (2012)	Análise da rugosidade superficial produzida pelo processo de torneamento CNC em AISI 316 por diferentes casos de ferramenta de corte revestida utilizada a seco.
	SANTOS, MACHADO, SALES, BARROZO e EZUGWU (2016)	O artigo apresenta uma revisão com informações relevantes sobre as características de usinabilidade das ligas de alumínio.
Fluídos de Corte	SHARMA e DOGRA (2009)	O artigo apresenta uma visão geral dos principais avanços em técnicas de lubrificação de quantidade mínima (MQL)/usinagem semi seca (NDM), refrigeração de alta pressão (HPC), refrigeração criogênica, refrigeração a ar comprimido e uso de lubrificantes/refrigerantes sólidos. Essas técnicas resultaram na redução do atrito e do calor na zona de corte, melhorando a produtividade do processo.

	YAN, RONG e WANG (2016)	De acordo com a revisão das pesquisas em fluidos de corte aplicados no processo de corte de metais, as pesquisas disponíveis focaram principalmente nas estratégias de aplicação e capacidade de penetração, desempenho de processamento, novos tipos de fluidos de corte ecologicamente corretos e qualidade preliminar da superfície usinada. Este artigo também sugere que o efeito do fluido de corte na qualidade e desempenho da superfície usinada se tornará uma importante direção de pesquisa. Existe um problema de correspondência entre os fluidos de corte e os materiais da peça.
	BOBZIN (2017)	O artigo apresenta uma revisão sobre aspectos gerais de Ferramentas de corte com revestimentos duros.
Otimização em processos de usinagem	EHMANN et al. (1997)	É apresentado um resumo dos trabalhos realizados na área de modelagem do processo de corte dinâmico de metal. Apresenta-se uma visão geral da evolução dos modelos de processo de corte dinâmico. Especificamente, quatro abordagens de modelagem, incluindo métodos analíticos, experimentais, mecanicistas e numéricos, são revisadas criticamente.
	JAIN e JAIN (2001)	Há necessidade contínua de uma revisão abrangente e exaustiva de vários modelos analíticos de remoção de material para diferentes processos avançados de usinagem. O artigo visa suprir essa necessidade na área de usinagem avançada. Vários modelos analíticos e alguns semi-empíricos/empíricos de remoção de material (aproximadamente 40) para diferentes processos de usinagem avançada de tipo mecânico foram revisados de forma abrangente sendo apresentados em um formato adequado para referência rápida.
	SHERCLIFF e LOVATT (2001)	O objetivo é identificar sistematicamente a correspondência entre os requisitos do projeto e as capacidades dos processos. Foi proposta uma metodologia para esta seleção de processos baseada em tarefas que envolve a consideração dos atributos do material, design e processo que são relevantes para a tarefa. Três níveis de acoplamento quantitativo requisito-atributo são identificados para seleção no nível da tarefa no projeto.
	SICK (2002)	O artigo tem como objetivo investigar por que não foi possível desenvolver sistemas de monitoramento adequados até o momento. Para descrever o 'estado da arte', são avaliadas 138 publicações que tratam do monitoramento on-line e indireto de desgaste de ferramentas em torneamento por meio de redes neurais artificiais. O artigo compara os métodos aplicados nestas publicações, bem como as metodologias utilizadas para selecionar determinados métodos, realizar experimentos de simulação, avaliar e apresentar resultados, etc.
	SHI e ATTIA (2010)	O artigo apresenta uma revisão de literatura sobre modelagem e simulação do processo de corte de metal, com atenção especial para materiais de difícil corte. As questões críticas na modelagem do processo de corte são apresentadas e investigadas, incluindo a identificação e formulação da equação constitutiva do material, bem como os modelos que descrevem as interações tribológicas e térmicas na interface ferramenta-cavaco. São resumidas as aplicações atuais e as direções futuras da modelagem de elementos finitos (FEM) do processo de corte de metal.

DESALE e JAHAGIRDAR (2011)	O artigo revisa a aplicação do sistema de inferência neurofuzzy adaptativo para previsão de variáveis de saída em fresamento e torneamento processos de usinagem.
ZUBAIDI, GHANI e CHE HARON (2011)	Tendo em vista a importância das redes neurais artificiais na usinagem, o artigo revisa os estudos e investigações anteriores sobre a aplicação de redes neurais artificiais no processo de fresagem na última década.
YUSUP, ZAIN e HASHIM (2012)	O artigo fornece uma visão geral e a comparação das pesquisas de cinco anos de 2007 a 2011 que usaram técnicas de otimização evolutivas para otimizar os parâmetros do processo de usinagem tradicional e moderna. Cinco técnicas são consideradas: algoritmo genético (GA), simulado (SA), otimização por enxame de partículas (PSO), algoritmo de otimização de colônias de formigas (ACO) e de colônias artificiais de abelhas (ABC).
D'ADDONA e TETI (2012)	Um paradigma de otimização baseado em algoritmos genéticos (AG) para a determinação dos parâmetros de corte em operações de usinagem é proposto. Nos processos de corte de metais, as condições de corte influenciam na redução do custo e tempo de produção e na decisão da qualidade de um produto final. Para encontrar parâmetros de corte ótimos durante um processo de torneamento, o algoritmo genético tem sido utilizado como um localizador de soluções ótimas. A otimização do processo deve gerar um tempo mínimo de produção, considerando as restrições tecnológicas e materiais.
ARRAZOLA et al. (2013)	O artigo apresenta o estado da arte em modelos preditivos de desempenho para usinagem e identifica os pontos fortes e fracos dos modelos atuais. Isso inclui uma avaliação crítica das técnicas de modelagem relevantes e sua aplicabilidade e/ou limitações para a previsão das complexas operações de usinagem realizadas na indústria.
GARG, BHALERAO e TAI (2013)	O processo de torneamento possui maior complexidade e incerteza e, portanto, diversas técnicas de modelagem empírica como redes neurais artificiais, análise de regressão, lógica fuzzy e máquinas de vetores de suporte têm sido utilizadas para prever o desempenho do processo. Este artigo revisa as aplicações de técnicas de modelagem empírica na modelagem do processo de torneamento e discute questões vitais relacionadas a ele.
AHILAN et al. (2013)	Proposta de desenvolvimento de modelos de redes neurais para predição de parâmetros de usinagem no processo de torneamento CNC. Os experimentos são projetados com base no Design of Experiments (DoE) de Taguchi e conduzidos com velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte e raio de ponta como parâmetros do processo e rugosidade da superfície e consumo de energia como objetivos.
LEOPOLD (2014)	O foco principal deste artigo é uma avaliação crítica dos métodos de modelagem simples relevantes para a simulação de usinagem, bem como fornecer alguns roteiros para outras direções para a modelagem em malha fechada de usinagem.

MONDAL, RAY e MAITI (2014)	A robustez é modelada por diversos pesquisadores e praticantes para projeto e implementação em um processo de fabricação. Uma revisão de todas essas abordagens é essencial para avaliar seus pontos fortes, limitações e aplicabilidade sob diferentes condições e restrições de processo. Ao longo dos anos, muitas dessas abordagens encontraram ampla aplicação na medição, avaliação e modelagem da robustez do processo na manufatura e em outras indústrias. Neste artigo, foi feita uma tentativa de revisar criticamente as abordagens existentes para medir e avaliar a robustez dos processos de fabricação.
LAURO et al. (2014)	Este artigo de revisão discute os primeiros passos envolvidos na escolha e definição de várias técnicas que podem ser usadas para monitorar processos de usinagem. Além disso, este artigo também descreve as técnicas para adquirir e processar os sinais dos processos de monitoramento.
DUREJA et al. (2016)	Este artigo tenta avaliar a aplicabilidade de vários métodos de modelagem e otimização para parâmetros de resposta específicos em problemas de torneamento. Várias técnicas de modelagem empírica, como modelagem de regressão linear, redes neurais artificiais, modelagem polinomial e difusa juntamente com otimização de processo através de Taguchi, metodologia de superfície de resposta e algoritmo genético para aplicações de torneamento duro foram discutidos em detalhes para fornecer aos engenheiros de produção um banco de dados pronto para comparar os méritos relativos e a adequação dessas técnicas para uma aplicação de usinagem específica.
ZHANG et al. (2019)	Revisar e resumir o status de pesquisa e aplicação da tecnologia de modelagem e simulação na fabricação. Analisando simulação de unidade de fabricação, simulação integrada de fabricação e tecnologias de simulação inteligente de fabricação. Prevendo tendências de desenvolvimento de tecnologias de modelagem e simulação em futuras indústrias de manufatura inteligente.
URBIKAIN et al. (2019)	Este artigo relata alguns dos principais esforços da literatura científica para prever estabilidade e evitar trepidação com ênfase especial em sistemas de torneamento. Existem diferentes técnicas e abordagens para reduzir e evitar os efeitos da vibração. O objetivo do artigo é resumir o estado atual da pesquisa neste tópico quente, particularmente (1) os métodos mecânicos, analíticos e numéricos para previsão de estabilidade em torneamento; (2) as técnicas disponíveis para detecção e controle de vibração; (3) as principais técnicas ativas e passivas.
HERNÁNDEZ (2019)	O método baseia-se em 6 principais grupos de métricas: impacto ambiental, consumo de energia, gerenciamento de resíduos, custo, utilização de recursos e sociedade / saúde do pessoal / segurança operacional. A metodologia é voltada para processos de fabricação, inclusive a usinagem. O estudo apresenta um estudo de caso direcionado para usinagem.
LI et al. (2020)	A evolução histórica dos métodos de modelagem de recursos é revisada neste artigo. A questão da interoperabilidade foi identificada como um desafio fundamental e uma revisão completa é realizada. O foco desta pesquisa está no estado da arte da aplicação de recursos nos campos de pesquisa emergentes. Além da modelagem de um único produto, a capacidade dos recursos deve ser aprimorada para modelar sistemas avançados de manufatura.

➤ **RBS sobre Planejamento de Processo de Usinagem**

Referência	Objetivos do Estudo	Etapas Consideradas no Planejamento do Processos de Usinagem
Butdee e Kunhirunbawon, 2020	O estudo propõe um método de decisão multicritério para a avaliação do planejamento do processo de usinagem por meio da modelagem em lógica <i>fuzzy</i> .	Planejamento de sequências de usinagem: tipo de operação, tipos de ferramentas e restrições relacionadas principalmente à recursos baseados na geometria.
Lishu <i>et al.</i> (2020)	O estudo apresenta um método de decisão multicritério, com enfoque em melhorias nas etapas de usinagem. O método auxilia na escolha da melhor sequência de operação, considerando requisitos como rugosidade, ruídos, energia consumida, e tempo de processamento.	
Wang (2013)	Desenvolver um sistema orientado a serviços, baseado na Internet e na Web, para monitoramento da disponibilidade de máquinas e planejamento de processos.	As atividades envolvidas no planejamento de processos de usinagem incluem sequenciamento do processo, seleção de recursos (máquina e ferramenta de corte), atribuição dos parâmetros de corte, planejamento de operações de usinagem, otimização da operação e geração de código em comando numérico. O planejamento do processo de usinagem também está relacionado ao planejamento de setup de máquina e fixação (peça e ferramentas).
Xia <i>et al.</i> (2018)	O objetivo do artigo é estender as abordagens tradicionais de planejamento de processos de usinagem de peças unitárias para conjuntos de peças, considerando conceitos de modularidade, tecnologias baseadas em plataforma e em configuração.  peça até os processos de projeto para um domínio de variantes de peças, levando em consideração a modularidade, as tecnologias baseadas em plataforma e em configuração.	O plano de processo de usinagem é composto pelos elementos: tipo de processo, operações realizadas, recursos e parâmetros relevantes.
Chang <i>et al.</i> (2000)	Os autores propõem um método de planejamento de processo de usinagem que considera o banco de dados sobre planos anteriores, e através de similaridade, selecionam-se planos para novos produtos.	A similaridade entre planos de processo de usinagem considera três aspectos: forma geométrica, características do material e precisão requerida. Portanto, o plano de processo considerado pelos autores é direcionado ao levantamento dos aspectos dimensionais, análise sobre a dureza e resistência à temperatura do material usinado e a característica de superfície requerida da

		peça. A tolerância também é um fator considerado.
Helgoson e Kalhori (2012)	O artigo apresenta um modelo conceitual que direciona o compartilhamento de informações relevantes para a definição do plano de usinagem.	Os autores definem todas as etapas de desenvolvimento de produtos usinados, classificando-as em três grupos: pré-processo, em processo e pós-processo. Atividades de pré-processo incluem: levantamento sobre os requisitos do cliente, projeto do produto, sequenciamento de operações, seleção de ferramentas, seleção dos parâmetros sobre o corte. Atividades denominadas como em processo, incluem: usinagem e coleta de dados do processo. Atividades pós-processo, incluem: verificação do processo, análise da qualidade, otimização do processo, validação do modelo.
Duda e Poboziak (2017)	Os autores propõem uma arquitetura de programação de máquinas CNC, baseado em meta-conhecimento e condições da peça bruta para trabalho. A arquitetura proposta é direcionada ao planejamento do processo de usinagem auxiliado por computador. Ressalta-se que o procedimento é direcionado ao processamento de peças acabadas onde todas as características dimensionais são atribuídas através de usinagem, não sendo a usinagem processamento de acabamento somente, mas sim o processo principal de fabricação.	O planejamento de processo de usinagem do artigo tem como foco a seleção da peça bruta para processamento. São considerados três estágios de planejamento: Estágio I) definição da estrutura generalizada do processo de fabricação fundamentada nas características geométricas e de fabricação do produto. Estágio II) esta etapa é composta pelo conjunto de ações: planejamento das formas intermediárias do produto; projeto da peça bruta (considera-se o tipo de peça a ser produzida, análise das características do material e de qualidade e as dimensões padrão de peças brutas para processamento). Com base nessas informações determinam-se os meios de fixação da peça. Estágio III) com os resultados do estágio II, e considerando as características de capacidade do processo, são definidas as etapas do plano de processo, onde são detalhadas as sequências de operação, <i>setups</i> , posições e ciclos de usinagem.
Gao, Mou e Peng (2016)	O artigo apresenta uma proposta para análise e classificação de dados históricos que auxiliam na estruturação do planejamento de usinagem para novos produtos.	O artigo propõe 4 conjuntos de dados históricos, que direcionam o planejamento de novos produtos usinados: Características básicas (material, tamanho, características de formato da peça e tolerâncias); Parâmetros (centro de usinagem, ferramentas de corte, etapas de usinagem e estratégia de trocas de ferramentas); Processo (forças de corte, vibração, desgaste de ferramenta e limitações de máquina); Resultados (deformação de usinagem, qualidade superficial e tempo de usinagem). Nota-se que apesar de não ser citado no artigo, os conjuntos são analisados hierarquicamente, e a decisão final do resultado depende das melhores relações entre as três fases iniciais.
Zhao e Xu (2010)	Proposta de um sistema de planejamento cognitivo, integrando usinagem,	Este artigo apresenta a particularidade de considerar o planejamento de usinagem conjunto ao planejamento de inspeção da qualidade. Neste sentido, os autores citam



	inspeção e <i>feedback</i> para sistemas de manufatura.	que o processo de metrologia dimensional total pode ser dividido em quatro elementos principais de interação: definição do produto, planejamento do processo de medição, execução da medição e análise/ relatório de dados de qualidade. Cada um desses quatro elementos interage entre si e estão todos intimamente relacionados aos ambientes de usinagem e às capacidades de usinagem.
Wang, Givhchi e Wang (2017)	O artigo apresenta uma proposta de estrutura e relação de blocos de dados armazenados em nuvens, com o planejamento do processo de usinagem. Um estudo de caso utilizando a proposta é exposto.	Principais atividades do planejamento de processos de usinagem: sequenciamento do processo, seleção de máquina e ferramenta de corte, planejamento das etapas de usinagem, otimização da operação, geração do comando numérico, bem como planejamento sobre parâmetros e fixação.
Feng, Stouffer e Jurrens (2005)	É apresentada uma proposta de integração entre sistemas de softwares comerciais, com foco no planejamento de processos e controle de máquinas com comando numérico.	Apesar do artigo não descrever etapas do planejamento de processos de usinagem, propõe a relação entre os dados que compõe o planejamento. Neste sentido, o planejamento de processo é relacionado a: parâmetros de processo, dados de capacidade para seleção de ferramentas de corte, dados sobre o material e sobre a ferramenta de corte, capacidade do processo e a programação do comando numérico da máquina.
Denkena <i>et al.</i> (2007)	O artigo apresenta uma ontologia para planejamento de processos com ações de tomada de decisão inclusas. A proposta dos autores foi realizada considerando processos de usinagem através de abrasão. Uma abordagem holística foi adotada incorporando aspectos tecnológicos tradicionais de planejamento de processos, bem como aspectos complementares.	O planejamento de processos considerado pelos autores engloba as seguintes atividades e requisitos: pedido e detalhes do projeto; seleção de matéria prima e “forma”; seleção da tecnologia do processo; sequenciamento de processos; preparo do plano de processamento. Neste plano, inclusive: seleção das operações de usinagem, sequenciamento das operações, seleção das ferramentas de corte, determinação dos requisitos de processo, parâmetros de corte, seleção/ projeto de gabaritos e acessórios (fixação), planejamento de rota de corte, estimativa de custos e tempos de processamento. Programação de CNC e documentação do processo são gerados ao fim do planejamento do processo.
Meissner e Aurich (2019)	É apresentada uma análise sobre a Indústria 4.0 e os sistemas cyber-físicos de produção, e o impacto no planejamento de processos.	As etapas do plano de processos descritas no artigo são: através do desenho da peça a ser processada, os processos são escolhidos; as máquinas, ferramentas e acessórios são escolhidos na sequência, assim como são determinados os parâmetros do processo. Com isso, programa-se a máquina para executar o processo assim como são definidos os planos de produção.
Zhang et al. (2019)	Os autores propõem uma estrutura teórica para planejamento inteligente de processos de fabricação, abrangendo simulações realizadas com dados reais –	O planejamento de processos inteligente abrange três estágios chave (Tecnologia, Transformação e Decisão). Cada estágio chave apresenta as seguintes atividades: recebimento de pedidos de produção, interpretação do desenho da peça, análise

	<i>"Digital Twin Manufacturing Cell"</i>	detalhada dos requisitos da peça e proposta teórica do processo. Através da análise do ambiente real e virtual do processo, são verificados os parâmetros de máquina, ferramenta de corte e de processo. A decisão é embasada pela simulação de produção visando a otimização.
Kumar (2017)	Trata-se de um artigo de revisão sobre inteligência artificial aplicada no planejamento de processos.	Apesar do artigo ter uma abordagem ampla sobre planejamento de processos, apresenta um tópico direcionado ao processo de usinagem, onde não apresenta a sequência de planejamento, entretanto, aborda os principais conjuntos de atividades realizadas, sendo elas: análise das condições de projeto (estudo sobre as características do material usinado, geometria da peça), seleção de ferramentas, definição sobre os parâmetros de corte, definição sobre as etapas de usinagem, definição sobre os controles de processo.

**APÊNDICE B - Lista de atividades, classificadas por fase de DFSS, levantadas na  
RB**

Referência	Fase 1 - Definir	Fase 2 - Identificar	Fase 3 - Projetar	Fase 4 - Otimizar	Fase 5 - Verificar
Brue Launsby (2003) <sup>e</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção e início do projeto;</li> <li>• Indicação dos responsáveis e equipe do projeto;</li> <li>• Treinamento da equipe;</li> <li>• Definição do planejamento estratégico;</li> <li>• Definição do cronograma de implementação;</li> <li>• Elaborar o “<i>Project Charter</i>”;</li> <li>• Definir metas do projeto</li> <li>• Identificar canais para avaliação de dados de capacidade (MSA – <i>Measurement System Analysis</i>);</li> <li>• Mapear o processo;</li> <li>• Planejamento da comunicação sobre o projeto;</li> <li>• Revisão sobre as lições aprendidas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição do cliente;</li> <li>• Identificar, entender e priorizar os requisitos do cliente;</li> <li>• Estabelecer outros requisitos (organizacionais, normalizados, ambientais, etc.);</li> <li>• Identificar os CTQ e os requisitos técnicos, metas e limites de especificação e desempenho;</li> <li>• Priorização e documentação de CTQ (formalização);</li> <li>• Estabelecer métricas de CTQ;</li> <li>• Criar indicadores;</li> <li>• Selecionar o projeto conceitual;</li> <li>• Através do CTQ definir os CTP;</li> <li>• Analisar a influência do CTQ em requisitos técnicos de produto;</li> <li>• Desenvolver alternativas inovadoras para satisfazer os requisitos funcionais;</li> <li>• Realizar análise de risco e identificar meios de correção de erros;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formular o projeto conceitual;</li> <li>• Identificar CTQ de produto e processo;</li> <li>• Criar o controle dos CTQ;</li> <li>• Quantificar as funções transferência;</li> <li>• Estabelecer os valores de controle e tolerâncias;</li> <li>• Avaliar a performance do processo;</li> <li>• Analisar possíveis falhas;</li> <li>• Gestão de riscos;</li> <li>• Executar “<i>Design for X</i>”;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar falhas potenciais;</li> <li>• Desenvolver o projeto robusto;</li> <li>• Aplicar metodologia de resposta de superfície;</li> <li>• Aplicar EVOP (<i>Evolutionary Operations</i>);</li> <li>• Atualizar a seleção de CTQ;</li> <li>• Atualizar os dados de MSA e capacidade;</li> <li>• Atualizar indicadores;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Validar produtos, processos e serviços;</li> <li>• Demonstrar a capacidade de processo;</li> <li>• Verificar as tolerâncias;</li> <li>• Conduzir o MSA;</li> <li>• Implementar o Controle Estatístico de Processos (CEP);</li> <li>• Definir e implementar o plano de controle;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selecionar materiais;</li> <li>• Projeto preliminar de compras e manufatura;</li> <li>• Formular o projeto conceitual e o nível sigma de qualidade pretendido;</li> </ul>			
Yang e El-Haik (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprometimento da gerencia de alto e médio nível;</li> <li>• Criação de um sistema de gerenciamento do programa;</li> <li>• Levantamento dos recursos do DFSS;</li> <li>• Definição da estrutura de implementação;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar métodos para levantar as necessidades e desejos do cliente;</li> <li>• Transformar as necessidades e desejos dos clientes em uma lista de VOC;</li> <li>• Traduzir a lista de VOC em requisitos funcionais e mensuráveis;</li> <li>• Finalizar requisitos: Estabelecer definições mínimas de requisitos. Identificar e preencher lacunas nos requisitos fornecidos pelo cliente. Validar os ambientes de aplicação e uso;</li> <li>• Identificar os requisitos críticos para o cliente (CTS – <i>Critical to supplier</i>) como críticos para a qualidade (CTQ), críticos para a entrega (CTD – <i>Critical to delivery</i>), crítico ao custo (CTC), etc.</li> <li>• Quantificar os CTS;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traduzir os CTQ em requisitos funcionais de produto;</li> <li>• Gerar alternativas de projeto;</li> <li>• Avaliar as alternativas de projeto;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajustar parâmetros relacionados aos requisitos técnicos levantados;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teste piloto e melhorias;</li> <li>• Validação e controle de processos;</li> <li>• Entrega do processo;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabelecer métricas para CTS;</li> <li>• Estabelecer níveis de desempenho aceitáveis;</li> </ul>			
Belair e O'neill, (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lançar o projeto;</li> <li>• Definir resultados;</li> <li>• Escopo de projeto;</li> <li>• Identificar os <i>stakeholders</i>;</li> <li>• Selecionar equipe;</li> <li>• Determinar a abordagem do projeto;</li> <li>• Criar o plano de projeto;</li> <li>• Definir os controles do projeto;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar clientes;</li> <li>• Definir o estado de conhecimento;</li> <li>• Desenvolver e implementar o plano de pesquisa de mercado;</li> <li>• Traduzir as necessidades dos clientes em requisitos de produto/ CTQ;</li> <li>• Especificar metas, limites de tolerância e margem sigma;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver as funções de produto;</li> <li>• Desenvolver o projeto conceitual do produto;</li> <li>• Identificar processos de produção;</li> <li>• Avaliar a viabilidade, capacidade prevista e análise de falhas;</li> <li>• Desenvolver o projeto detalhado de produção;</li> <li>• Refinar a capacidade de processo;</li> <li>• Desenvolver planos de controle de processos, verificação e validação;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção do processo de produção;</li> <li>• Teste de desempenho piloto;</li> <li>• Analisar falhas e causas;</li> <li>• Avaliar potencial de <i>ramp-up</i>;</li> <li>• Desenvolver plano de implementação e transição;</li> </ul>
Awad <i>et al.</i> (2009)	-	O principal objetivo da fase é identificar as necessidades do cliente e traduzi-las em requisitos de engenharia que possam ser mensurados e controlados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nesta fase são definidos todos os “ruídos” que afetam os requisitos previamente definidos. Testes são realizados nesta fase para analisar a relação entre os requisitos e os ruídos identificados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são citadas atividades específicas;</li> </ul>	Não são detalhadas as atividades executadas.
Aggogeri, Mazzola e O'Kane (2009)	Os autores não descrevem no artigo as ações específicas realizadas nesta etapa, apenas o levantamento de requisitos críticos de	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudar as necessidades dos clientes (VOC);</li> <li>• Comparar os pontos da VOC com a VOP;</li> <li>• Definir os CTQ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição dos principais indicadores de desempenho;</li> <li>• Definição dos projetos conceituais;</li> </ul>	-	-

	processo. Um ponto destacável deste estudo é que os requisitos foram definidos considerando-se os defeitos possíveis de serem obtidos no produto.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar principais fatores de variabilidade;</li> </ul>		
Baril, Yacout e Clément (2011)	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizar a sensibilidade do desempenho de produto utilizando o projeto robusto;</li> <li>• Aplicar tolerâncias nos parâmetros críticos de projeto;</li> <li>• Otimizar a confiabilidade do projeto;</li> </ul>	-
Wu <i>et al.</i> (2011)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir e aplicar os requisitos dos clientes;</li> <li>• Projetar e verificar o esquema de produção;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir o projeto;</li> <li>• Projeto do protótipo;</li> <li>• Projeto de processo e manufatura;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Otimização do projeto do produto;</li> <li>• Otimização do projeto de processo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar a qualidade do projeto;</li> <li>• Verificar a qualidade do processo;</li> <li>• Verificar e validar o produto;</li> </ul>
Mast, Diepstraten e Does (2011)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar os requisitos dos clientes;</li> <li>• Estabelecer as funções e subfunções;</li> <li>• Definir os requisitos funcionais;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir soluções para cada função identificada para cada requisito;</li> <li>• Desenvolver e ranquear os projetos conceituais;</li> <li>• Elaboração de projeto de alto nível;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar parâmetros;</li> <li>• Especificar projeto nominal;</li> <li>• <i>Design for X</i>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaios de verificação;</li> <li>• Projeto de controle de processos;</li> <li>• Transferência de atividades ao setor de produção;</li> </ul>
Werkema (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaborar a justificativa para o desenvolvimento do projeto;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudar as necessidades dos clientes (VOC) – pesquisa qualitativa e quantitativa, identificar e</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar as funções, gerar os projetos conceituais e selecionar o melhor;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iniciar a produção piloto;</li> <li>• Realizar testes de campo do novo produto;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise do mercado potencial;</li> <li>• Definir mercado alvo;</li> <li>• Análise de concorrência;</li> <li>• Avaliação de viabilidade técnica e econômica;</li> <li>• Elaboração do cronograma preliminar do projeto;</li> </ul>	<p>priorizar as necessidades dos clientes;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisar os principais concorrentes;</li> <li>• Análise detalhada dos concorrentes e de mercado;</li> <li>• Estabelecer CTQ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testar o projeto conceitual;</li> <li>• Analisar a viabilidade econômica;</li> <li>• Desenvolver o projeto detalhado;</li> <li>• Planejar a produção em pequena e larga escala;</li> <li>• Conduzir o projeto 6 sigma para melhoria da capacidade produtiva;</li> <li>• Atualizar a análise financeira do projeto;</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar testes de mercado;</li> <li>• Atualizar a análise financeira do projeto;</li> <li>• Iniciar e validar a produção em larga escala e transferir a responsabilidade do processo produtivo;</li> <li>• Lançar o produto no mercado;</li> </ul>
Koziołek e Derlukiewicz (2012)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamento dos principais requisitos do cliente;</li> <li>• Levantamento de pontos críticos do produto (baseando-se em defeitos);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerar soluções alternativas de projeto;</li> <li>• Avaliação e escolha de uma solução de projeto;</li> </ul>	-	-
Staudter <i>et al.</i> (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver o <i>Business Case</i>;</li> <li>• Definir oportunidades e objetivos;</li> <li>• Calcular benefício financeiro;</li> <li>• Definir funções;</li> <li>• Definir o escopo do projeto;</li> <li>• Desenvolver um plano de vários níveis;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar e classificar os clientes;</li> <li>• Selecionar e conduzir métodos de pesquisa;</li> <li>• Coletar VOC;</li> <li>• Identificar, estruturar, categorizar e priorizar as necessidades do cliente;</li> <li>• Derivar CTC e medições;</li> <li>• Realizar <i>benchmarking</i>;</li> <li>• Priorizar medições, determinar valores e</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar requisitos de funcionabilidade;</li> <li>• Desenvolver projetos conceituais alternativos de alto nível;</li> <li>• Selecionar o melhor projeto conceitual;</li> <li>• Resolver pontos de conflito;</li> <li>• Coletar feedback dos clientes e <i>stakeholders</i> ;</li> <li>• Definir o processo básico;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derivar estratégias de implementação;</li> <li>• Elaborar um plano de implementação detalhado;</li> <li>• Finalizar o lançamento no mercado</li> <li>• Elaborar a documentação do processo e procedimentos operacionais;</li> <li>• Definir a equipe de implementação;</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar acompanhamento de boas práticas;</li> <li>• Planejar atividades, tempos e recursos;</li> <li>• Planejar orçamento;</li> <li>• Configurar o gerenciamento de <i>stakeholders</i>;</li> <li>• Planejar a comunicação do projeto;</li> <li>• Estimar riscos do projeto;</li> </ul>	<p>especificações desejados;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir índices de qualidade;</li> <li>• Estimar risco potencial;</li> <li>• Coletar <i>feedback</i> do cliente;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparar o lançamento no mercado;</li> <li>• Derivar requisitos dos recursos necessários;</li> <li>• Mapear características alternativas de <i>design</i> do sistema;</li> <li>• Elaborar uma estrutura detalhada de custos;</li> <li>• Aplicar projeto de tolerância;</li> <li>• Comparar elementos alternativos de projeto;</li> <li>• Aplicar metodologias de prototipagem e criar protótipos;</li> <li>• Realize a simplificação do sistema com a ajuda de <i>Design for X</i>;</li> <li>• Prever os riscos e evitá-los;</li> <li>• Avaliar a capacidade atual do processo;</li> <li>• Elaborar o projeto de processo;</li> <li>• Elaborar instruções de trabalho e operação;</li> <li>• Planejar instalações, equipamentos e recursos;</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controlar o desempenho do processo;</li> <li>• Finalizar a documentação do projeto;</li> <li>• Entregar a responsabilidade a equipe do processo/manufatura;</li> </ul>
Jahanzaib, Jamil e Akhtar (2013)	-	• Definir os CTQ com base nos requisitos levantados;	-	-	-

Bertelli e Loureiro (2015)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação dos requisitos do produto;</li> </ul>	-	-	-
Wang, Yeh e Chu (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação de equipe;</li> <li>• Levantamento de requisitos amplos de cliente;</li> <li>• Análise financeira;</li> <li>• Análise de risco;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição de CTQ;</li> <li>• Definição dos limites de CTQ;</li> <li>• Execução do DFMEA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Criação de alternativas de projeto que atendam aos requisitos de cliente e solucione possíveis ruídos;</li> <li>• São definidas tolerâncias em torno dos requisitos técnicos definidos;</li> <li>• Seleção do melhor projeto conceitual;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teste de confiabilidade;</li> <li>• Plano de manutenção;</li> <li>• Prova de erros por projeto;</li> <li>• Plano de controle de qualidade do processo;</li> </ul>
Awad e Shanshal (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir os modos de falha possíveis;</li> <li>• Identificar as respostas funcionais dos sistemas estudados;</li> <li>• Selecionar potenciais fatores-chave de <i>design</i> e processo que afetam as respostas;</li> <li>• Avaliar o sistema de medição usado para medir a resposta funcional;</li> <li>• Análise dos históricos de desenvolvimento de projetos anteriores;</li> <li>• Estudos de <i>benchmarking</i> e análise do desempenho atual do sistema, se houver;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As necessidades do cliente são definidas e traduzidas para requisitos de engenharia ou serviço (<i>y</i>) que podem ser medidos e avaliados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Listar todas as variáveis de controle e ruído em potencial que afetam os requisitos de engenharia;</li> <li>• Análise das especificações designadas;</li> </ul>	Não há descrição de atividades específicas, apenas o uso das ferramentas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar testes e resultados da fase de otimização;</li> </ul>

Hu <i>et al.</i> (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformar VOC em CTQ;</li> </ul>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificação numérica;</li> <li>• Verificação computacional;</li> </ul>
Liverani <i>et al.</i> (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coletar informações sobre as necessidades dos clientes;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaborar o projeto conceitual;</li> <li>• Executar o projeto;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são definidas atividades específicas.</li> </ul>
Shojaie e Kahedi (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparar uma lista com os requisitos de cliente e objetivos da organização em relação ao produto a ser desenvolvido;</li> <li>• Definir prioridades;</li> <li>• Relacionar os requisitos técnicos com as principais áreas envolvidas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver o projeto conceitual;</li> <li>• Identificação das causas dos ruídos identificados (variações);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantar e ranquear as principais variações encontradas;</li> <li>• Buscar soluções das variações;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Validar o projeto;</li> <li>• Estabelecer o plano de controle;</li> <li>• Desenvolvimento do gerenciamento de riscos;</li> <li>• Desenvolvimento do projeto conceitual da produção;</li> </ul>
Frizziero, Liverani e Nannini (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar os requisitos e necessidades dos clientes;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção do projeto conceitual e testes.</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são listadas atividades específicas da fase.</li> </ul>

**APÊNDICE C - Ferramentas aplicadas no DFSS, classificadas por fase,  
resultantes da RBS**

Referência	Fase 1 - Definir	Fase 2 - Identificar	Fase 3 - Projetar	Fase 4 - Otimizar	Fase 5 - Verificar
Brue Launsby (2003) <sup>e</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de pesquisa de mercado;</li> <li>• Pesquisa interna com equipes de P&amp;D, vendas, marketing, etc.</li> <li>• <i>Benchmarking</i>;</li> <li>• <i>Multi-generation planning</i> (MGP);</li> <li>• Sistema de <i>Black e Green Belts</i> (Metodologia SS);</li> <li>• “<i>Project Charter</i>”;</li> <li>• <i>Measurement System Analysis</i> - definição de <i>Key process variable</i> (KPV), Variáveis Chave do Processo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SIPOC;</li> <li>• Modelo de Kano;</li> <li>• QFD;</li> <li>• Diagrama de afinidade;</li> <li>• FMEA (<i>Failure Mode Effects Analysis</i>);</li> <li>• Matriz de Pugh;</li> <li>• TRIZ;</li> <li>• <i>Design for X</i> (DFX);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de Pugh;</li> <li>• FMEA;</li> <li>• <i>Design of Experiments</i> (DOE);</li> <li>• Índices de capacidade de processos (Cp, Cpk, Cr, Ppk, Pp e Pr);</li> <li>• Simulação de Monte Carlo;</li> <li>• <i>Design for X</i>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FMEA;</li> <li>• DOE;</li> <li>• Método de Taguchi;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluxogramas;</li> <li>• Gráficos de controle;</li> <li>• Gráfico de Pareto;</li> <li>• Diagramas de causa-efeito;</li> <li>• Histogramas de frequência;</li> <li>• Cartas de controle;</li> <li>• Estudos de capacidade de processos;</li> <li>• Planos de amostragem;</li> <li>• Diagramas de dispersão;</li> </ul>

Yang e El-Haik (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagrama de Venn para análise de interesses entre diferentes <i>stakeholders</i>;</li> <li>• Matriz de priorização de projeto de acordo com o que é crítico para o consumidor e para o negócio;</li> <li>• Seleção de projetos através de Pareto;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesquisa de mercado;</li> <li>• QFD;</li> <li>• Análise de Kano;</li> <li>• Análise de risco;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRIZ;</li> <li>• QFD;</li> <li>• Projeto Axiomático;</li> <li>• Projeto robusto;</li> <li>• <i>Design for X</i>;</li> <li>• DFMEA e PFMEA (<i>design/ performance failure mode–effect analysis</i>);</li> <li>• CAD/CAE (<i>computer-aided design/engineering</i>);</li> <li>• Simulação;</li> <li>• Gestão de processos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE;</li> <li>• Método de Taguchi;</li> <li>• Projeto baseado em confiabilidade;</li> <li>•</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelagem da capacidade do processo;</li> <li>• DOE;</li> <li>• Teste de confiabilidade;</li> <li>• Poka Yoke;</li> <li>• Plano de controle dos processos;</li> <li>• Treinamentos;</li> </ul>
Belair e O'Neill, (2007)	<p>Os autores apresentam uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo A). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Benchmarking</i>;</li> <li>• SIPOC (método SS);</li> <li>• Análise SWOT;</li> </ul>	<p>Os autores apresentam uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo B). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagrama de afinidades;</li> <li>• QFD;</li> <li>• Análise de Kano;</li> </ul>	<p>Os autores apresentam uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo C). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> <li>• Diagrama de árvore;</li> <li>• <i>Benchmarking</i>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teste piloto;</li> <li>• Revisão de projeto;</li> <li>• Ferramentas para análise de causas de falhas;</li> <li>• Ferramentas de gestão de projetos;</li> </ul>

	•	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gráfico de radar;</li> <li>•</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de Pugh;</li> <li>• Funções transferência;</li> <li>• DOE;</li> <li>• <i>Design for X</i>;</li> <li>• Princípios <i>Lean</i>;</li> <li>• Planos de Controle;</li> </ul>		
Awad <i>et al.</i> (2009)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de Kano;</li> <li>• Diagrama P;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagrama P;</li> <li>• DOE;</li> <li>• Correlação de dados;</li> <li>• Análise de sensibilidade;</li> <li>• ANOVA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE;</li> <li>• Correlação;</li> <li>• ANOVA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulações computacionais sobre as variações entre entradas e saídas das funções relacionadas aos requisitos críticos.</li> </ul>
Aggogeri, Mazzola e O'Kane (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gráfico de Pareto para análise dos requisitos críticos;</li> <li>• QFD (<i>Quality Function Deployment</i>);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gráfico de Pareto;</li> <li>• QFD;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brainstorming</i>;</li> <li>• DOE;</li> <li>• FMEA;</li> <li>• Diagrama de causa-efeito;</li> <li>• ANOVA;</li> <li>• Índices de capacidade;</li> </ul>	-	-
Baril, Yacout e Clément (2011)	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O artigo propõe uma estrutura específica de otimização no DFSS.</li> </ul>	-
Wu <i>et al.</i> (2011)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DFX;</li> <li>• Funções Transferência;</li> <li>• FMEA;</li> <li>• Capacidade;</li> <li>• DOE;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE;</li> <li>• <i>Artificial Neural Network Optimize</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Artificial Neural Network Optimize</i></li> </ul>

Mast, Diepstraten e Does (2011)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brainstorming</i>;</li> <li>• TRIZ;</li> <li>• Matriz Morfológica;</li> <li>• Matriz de Pugh;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DFMEA;</li> <li>• DOE;</li> <li>• Funções transferência;</li> <li>• Projeto robusto;</li> <li>• Projeto de tolerâncias;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testes funcionais;</li> <li>• Análise de capacidade;</li> <li>• Controle estatístico de processo;</li> <li>• PFMEA;</li> </ul>
Werkema (2012)	<p>A autora apresenta uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo A). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise de séries temporais e análise de regressão;</li> <li>• Análise fatorial e de conglomerados;</li> <li>• <i>Brainstorming</i>;</li> <li>• Diagrama de afinidades, relações e de matriz;</li> <li>• Cálculo estimado do período de <i>payback</i> do projeto;</li> <li>• Diagrama de Gantt;</li> <li>• <i>Project Charter</i>;</li> <li>• Diagrama de Árvore;</li> <li>• PERT/CPM;</li> <li>• Diagrama do Processo Decisório 5W2H;</li> </ul>	<p>A autora apresenta uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo B). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Questionários e entrevistas individuais;</li> <li>• Modelo de Kano;</li> <li>• Diagrama de afinidades;</li> <li>• Histograma;</li> <li>• <i>Benchmarking</i>;</li> <li>• Engenharia reversa;</li> <li>• TRIZ;</li> <li>• Planejamento de experimentos;</li> <li>• ANOVA;</li> <li>• Diagrama de dispersão;</li> <li>• Análise de regressão;</li> <li>• QFD;</li> </ul>	<p>A autora apresenta uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo C). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> <li>• <i>Brainstorming</i>;</li> <li>• TRIZ;</li> <li>• DFX;</li> <li>• Planejamento de experimentos (ANOVA);</li> <li>• FMEA;</li> <li>• Histograma;</li> <li>• Fluxo de caixa;</li> <li>• <i>Payback</i>;</li> <li>• Diagrama de Gantt;</li> <li>• PERT/CPM;</li> <li>• Fluxograma;</li> <li>• Índices de capacidade de processos;</li> <li>• DMAIC;</li> </ul>	-	<p>A autora apresenta uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo E). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluxograma;</li> <li>• Amostragem;</li> <li>• Histograma;</li> <li>• Índices de capacidade do processo;</li> <li>• ANOVA;</li> <li>• QFD;</li> <li>• Análise de regressão;</li> </ul>



Koziółek e Derlukiewicz (2012)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brainstorming</i>;</li> <li>• Check-lists;</li> <li>• Modelo de Kano;</li> <li>• Matriz KPC;</li> <li>• Diagrama de árvore;</li> <li>• QFD;</li> <li>• FMEA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brainstorming</i>;</li> <li>• <i>Check-lists</i>;</li> <li>• Modelo de Kano;</li> <li>• Diagrama de árvore;</li> <li>• FMEA;</li> <li>Projeto robusto;</li> </ul>	-	-
Staudter et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Project Charter</i>;</li> <li>• <i>Multi Generation Plan (MGP)</i> – Plano para multi cenários;</li> <li>• Diagrama de Gantt;</li> <li>• Diagrama RACI;</li> <li>• Cálculo de <i>Budget</i> – orçamento/despesas;</li> <li>• Tabela de análise de <i>Stakeholders</i>;</li> <li>• Matriz de análise de risco;</li> <li>• SCRUM – <i>Agile Project Management</i>;</li> </ul>	<p>Os autores apresentam uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo B). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SIPOC;</li> <li>• Análise de mercado;</li> <li>• Classificação ABC;</li> <li>• Análise de ciclo de vida;</li> <li>• 5W + 1H;</li> <li>• Diagrama de afinidade;</li> <li>• Modelo de Kano;</li> <li>• <i>Analytic- Hierarchy - Process</i> – Método AHP;</li> <li>• QFD;</li> <li>• <i>Benchmarking</i>;</li> </ul>	<p>Os autores apresentam uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo C). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> <li>• Matriz morfológica;</li> <li>• Matriz de Pugh;</li> <li>• TRIZ;</li> <li>• FMEA;</li> <li>• SIPOC;</li> <li>• DOE;</li> <li>• <i>Design for X</i>;</li> <li>• Poka Yoke;</li> <li>• Análise de fluxo de valor (VSM);</li> <li>• 5S;</li> <li>• TPM;</li> <li>• Sistema KPI;</li> </ul>	-	<p>Os autores apresentam uma vasta tabela com ferramentas aplicáveis para cada atividade. (Anexo D). As mais comuns utilizadas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estratégia de implementação;</li> <li>• Plano de transição;</li> <li>• Preparação de <i>follow-up</i> de mercado;</li> <li>• Documentação do processo;</li> <li>• Procedimentos de operação padrão;</li> <li>• ERIC (<i>Eliminate – Reduce – Increase – Create</i>) Square;</li> </ul>
Jahanzaib, Jamil e Akhtar (2013)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> </ul>	-		

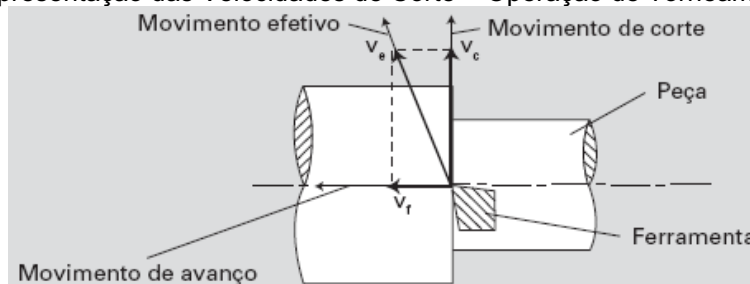
Bertelli e Loureiro (2015)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> <li>• FMEA;</li> <li>• Método de Taguchi;</li> <li>• TRIZ;</li> </ul>	-	-	-
Wang, Yeh e Chu (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Project charter</i>;</li> <li>• Pesquisa de mercado, VOC, análise de Kano, etc.</li> <li>• Análise do ponto de equilíbrio, análise de retorno, análise do valor presente, análise de sensibilidade, etc.</li> <li>• Análise de risco;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> <li>• DFMEA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRIZ;</li> <li>• Matriz de Pugh;</li> <li>• DOE;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são descritas ferramentas específicas.</li> </ul>
Awad e Shanshal (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MSA;</li> <li>• DFMEA (<i>Design Failure Mode Effect Analysis</i>);</li> <li>• Diagrama P;</li> <li>• Diagrama de causa e efeito;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MSA;</li> <li>• DFMEA;</li> <li>• P-diagram;</li> <li>• Diagrama de causa-efeito;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MSA;</li> <li>• DFMEA;</li> <li>• Diagrama P;</li> <li>• Diagrama de causa-efeito;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE;</li> </ul>
Hu <i>et al.</i> (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD;</li> </ul>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE;</li> </ul>
Liverani <i>et al.</i> (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Responder a 6 questões: Quem, O que, Onde, Quando, Como e Por que;</li> <li>• QFD;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAD;</li> <li>• CAE;</li> <li>• CAM;</li> <li>• Análise de elementos finitos;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas de validação através de tecnologia de fabricação aditiva;</li> <li>• DFX;</li> <li>• CAD;</li> </ul>

Shojaie e Kahedi (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não cita ferramentas específicas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagrama de causa-efeito;</li> <li>• DFMEA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DFMEA;</li> <li>• AHP;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são listadas ferramentas desta fase.</li> </ul>
Frizziero, Liverani e Nannini (2019)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Responder a 6 questões: Quem, O que, Onde, Quando, Como e Por que;</li> <li>• QFD;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAE;</li> <li>• CAD;</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAE (<i>Computer Aided Design</i>);</li> </ul>

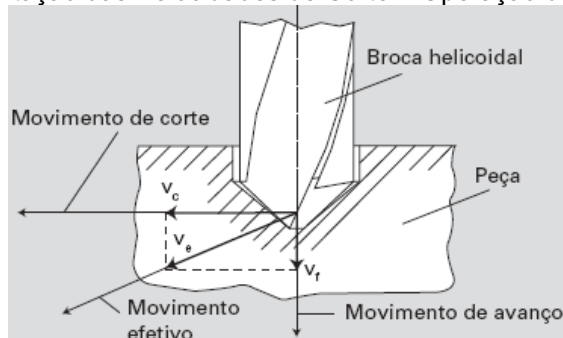
**APÊNDICE D - Parâmetros de entrada dos processos de usinagem - Adaptado dos textos de Machado et al. (2015) e NBR 6162 (1989)**

Parâmetro	Descrição de Parâmetro	Equação
Velocidade de Corte ( $v_c$ ) (Processos com movimentos de rotação – peça ou ferramenta)	Velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido do corte.	Equação 1 $v_c = \pi \cdot d \cdot n / 1000$ Unidade de medida: (m/min) $d$ = diâmetro da peça ou ferramenta (mm) $n$ = rotações por minuto (rpm)
Velocidade de Avanço ( $v_f$ )	Velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço.	Equação 2 $v_f = f \cdot n$ Unidade de medida: (mm/min) $f$ = avanço (mm/revolução) $n$ = rotações por minuto (rpm)
Velocidade Efetiva de Corte ( $v_e$ )	Velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo de corte.	Equação 3 $v_e = v_c + v_f$ Unidade de medida: (m/min)

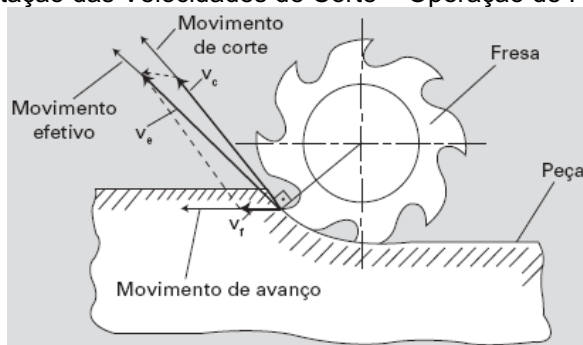
#### Representação das Velocidades de Corte – Operação de Torneamento

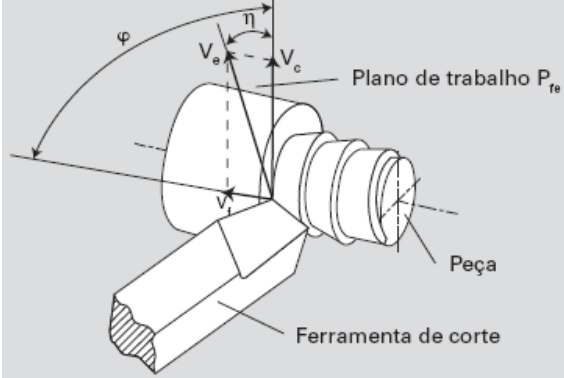
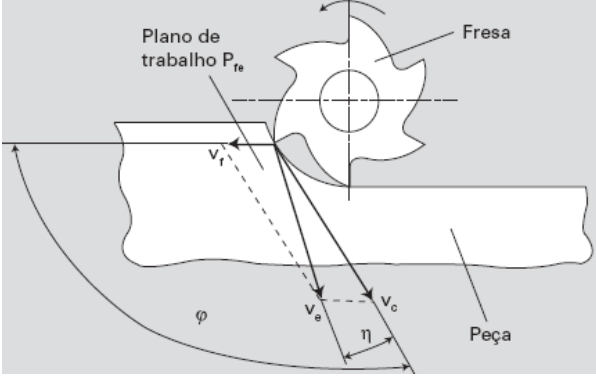


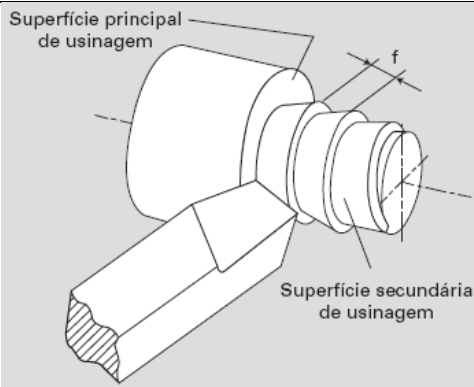
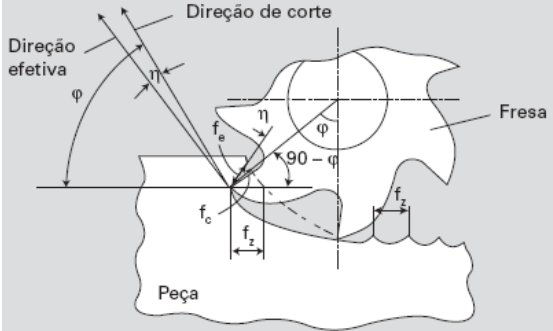
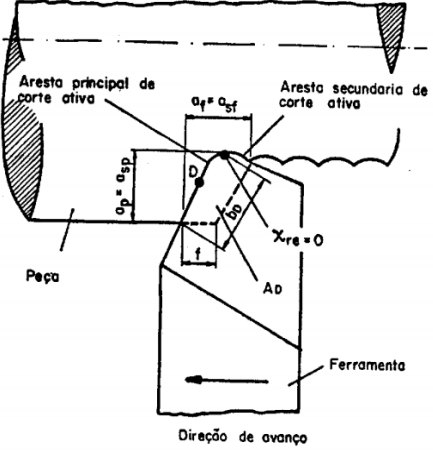
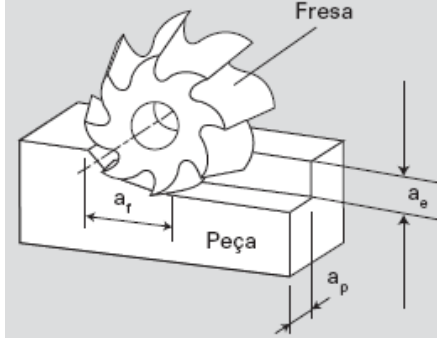
#### Representação das Velocidades de Corte – Operação de Furação



#### Representação das Velocidades de Corte – Operação de Fresamento



Ângulo de direção de avanço ( $\varphi$ )	Formado entre a direção de avanço e a direção do corte.	Equação 4 $tg \eta = vf \operatorname{sen}(\varphi) / v_c \cos \varphi + v_c$ $= \operatorname{sen}(\varphi) \cos \varphi + v_c v_f$
Ângulo da direção efetiva de corte ( $\eta$ )	Formado entre a direção efetiva de corte e a direção de corte	
Representação dos ângulos de direção – Operação de torneamento		
		
Representação dos ângulos de direção – Operação de fresamento		
		
Avanço ( $f$ )	É o percurso de avanço em cada volta (mm/revoluções) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe). Ferramentas monocortantes (torneamento) $fz = f$	Equação 5 $f = fz \cdot z$ Unidade de medida: (mm/revoluções) $fz =$ avanço por dente $z =$ número de dentes
Avanço de Corte ( $f_c$ )	É a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho. No torneamento $\varphi = 90^\circ$ , com isso $f_c = fz = f$	Equação 6 $f_c = fz \cdot \operatorname{sen} \varphi$ Unidade de medida: (mm/dente)
Avanço Efetivo de Corte ( $f_e$ )	Representa a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho	Equação 7 $f_e = fz \cdot \operatorname{sen} \varphi - \eta$ Unidade de medida: (mm/dente)
Representação do avanço – Operação de torneamento		

	 <p>Superfície principal de usinagem</p> <p>Superfície secundária de usinagem</p>	
	<p align="center"><b>Representação de avanço – Operação de fresamento</b></p> 	
<p>Profundidade de Usinagem (<math>ap</math>)</p>	<p>de</p> <p>É a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. No torneamento cilíndrico e de faceamento, e no fresamento frontal <math>ap</math> refere-se a profundidade. No torneamento de mergulho e fresamento periférico, <math>ap</math> refere-se a largura de usinagem. Em furação <math>ap</math> corresponde a metade do diâmetro da broca.</p>	<p>Representação da penetração de avanço - Torneamento cilíndrico</p> 
<p>Penetração Trabalho (<math>ae</math>)</p>	<p>de</p> <p>Penetração da ferramenta em relação a peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço.</p>	<p>Representação da profundidade de usinagem – Operação de fresamento</p>
<p>Penetração Avanço (<math>af</math>)</p>		

Taxa de Remoção - Q (Torneamento)	Volume de corte em uma unidade de tempo.	Equação 8 $Q = vc . f . ap$
Taxa de Remoção - Q (Alargamento ou furação com pré-furação)	Em processos de fresamento, furação e alargamento, quando a taxa de remoção de material refere-se a um único dente, recebe denominação $Q_z$ . Sendo:	Equação 9 $Q = vc . ap . fz . z$
Taxa de Remoção - Q (Furação em cheio)	$Q_z = Q_z$	Equação 10 $Q = \pi . ap^2 . vf$
Taxa de Remoção - Q (Fresamento)	(Equação 11)	Equação 12 $Q = ae . ap . vf$



**APÊNDICE E - Atividades de planejamento de processos de usinagem - Adaptado do texto de Melo (2003)**

Categoria de Atividade	Atividades relacionadas	Descrição
Interpretação do desenho do projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise das características geométricas</li> <li>• Análise das características superficiais</li> <li>• Identificação de cotas ou requisitos críticos do projeto</li> <li>• Identificação do material a ser processado e a necessidade de sobremetal em etapas de usinagem</li> <li>• Identificação de processos complementares</li> </ul>	Com base nas informações técnicas contidas no desenho do produto, são definidos quais os processos de usinagem podem ser utilizados, o tipo de ferramenta de corte e método de resfriamento, se serão necessários elementos de fixação especiais para a peça, a precisão dimensional também indica a necessidade de processos auxiliares. Também são verificados os meios requeridos de controle de características de qualidade indicadas através do desenho.
Agrupamento dos processos em trabalhos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrupamento em uma mesma estação de trabalho</li> <li>• Etapa de concentração</li> <li>• Etapa de diferenciação/separação</li> </ul>	O foco do agrupamento é ter o melhor aproveitamento possível da máquina-ferramenta minimizando os custos e erros de precisão das operações. O foco da concentração é reduzir o número de ajustes e de dispositivos de fixação (diminuindo o acúmulo de tolerâncias). A diferenciação simplifica a operação de ajuste do equipamento, o que torna a programação de produção mais complexa. O grau de concentração e diferenciação dependem do tamanho de lotes e volumes de produção.
Parâmetros de corte	Definição de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade</li> <li>• Avanço</li> <li>• Profundidade de corte</li> </ul>	A escolha dos parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) tem influência direta no acabamento superficial, potência de máquina, no tempo de corte, vida útil de ferramenta, entre outros. A otimização dos processos de usinagem (máxima produção ou mínimo custo) dependem diretamente dos parâmetros definidos. Para operações de desbaste o avanço e profundidade devem ser o máximo possível, com velocidade de corte baixa, operações de acabamento requerem avanço e profundidade baixos com alta velocidade de corte.
Seleção de máquinas-ferramentas	Critérios envolvidos na seleção da máquina-ferramenta: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo e número de ferramentas necessárias</li> <li>• Tamanho do lote (deve ser considerado em relação ao tempo de setup da máquina)</li> <li>• Precisão das operações selecionadas, que dependem do requisito técnico da peça</li> <li>• Recursos e capacidades da máquina</li> </ul>	O primeiro estágio de seleção de máquina baseia-se no tipo de processo necessário e nas dimensões físicas. O segundo estágio consiste em escolher uma máquina cuja potência do motor seja maior que a mínima requerida para executar a sequência de operações. Se a potência é menor, exclui-se a opção. Uma máquina de maior potência só será considerada se o custo hora-máquina for menor do que o custo das demais, ou se a

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A escolha de uma máquina em detrimento de outra sempre dependerá de considerações econômicas</li> <li>• A escolha também é dependente da disponibilidade de acordo com a programação de produção</li> </ul>	<p>velocidade do eixo for maior que a rotação da de menor potência (e essa rotação for requerida pela operação). O terceiro estágio somente é empregado se ainda for elevado o número de opções restantes. A estimativa do tempo de usinagem ou custo de hora-máquina é importante para esse estágio. Selecionam-se as três máquinas que possuem menor tempo de usinagem, a máquina que tem um custo mínimo em qualquer operação simples, se ainda houver muitas opções analisa-se a que tem custo mínimo para um maior número de operações.</p>
Seleção das ferramentas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição de quais operações usarão as mesmas ferramentas <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Operações separadas em internas, externas e operações especiais</li> </ul> </li> <li>• Escolha sobre o mínimo ângulo de direção do gume e o menor ângulo de direção do gume secundário para cada segmento de corte da ferramenta. Na prática o ângulo de posição é determinado pela disponibilidade deste ângulo nos porta-ferramentas comerciais</li> </ul>	<p>Alguns parâmetros são necessários para seleção de ferramentas: forma e tipo do inserto, suporte da ferramenta, método de fixação do inserto no porta-ferramenta, entre outros. Ferramentas são escolhidas após terem sido selecionadas as máquinas e as operações de usinagem.</p>
Seleção da superfície de referência	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primeira superfície de referência (superfície de abertura) – superfície existente no “espaço cru”. Deve ter tamanho suficiente para assegurar estabilidade e ser livre de furos e fendas</li> <li>• A precedência das superfícies tem que ser ordenada de acordo com as prioridades definidas na análise do desenho</li> <li>• A escolha dos pontos de contato é consequência da precisão requisitada, aplica-se o uso dos seis pontos de fixação que impedem movimento sem deformar a peça</li> <li>• A fixação tem que prevenir a instabilidade que as forças de corte, ou quaisquer outros distúrbios podem causar</li> <li>• Deve haver boa acessibilidade para a ferramenta, de modo que a peça possa ser posicionada no dispositivo corretamente</li> <li>• A escolha do dispositivo deve ser feita considerando os aspectos econômicos.</li> </ul>	
Sequência de usinagem	<p>Prioridades consideradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensões com uma referência como prioridade</li> <li>• Tolerâncias geométricas com uma referência de dados como prioridade</li> <li>• Obstáculos tecnológicos em ordem para executar as sequências de operação corretamente</li> <li>• Obstáculos econômicos nos quais reduzem os custos de</li> </ul>	<p>Tolerâncias de cada operação dependem do processo, a tolerância da operação final é, normalmente, a especificada no projeto. Tolerâncias de cada operação preparatória são determinadas em função da precisão que pode ser obtida no processo escolhido para a execução.</p>

	produção e desgaste, ou ruptura de ferramentas	
Posicionamento e fixação da peça	Posicionamento e fixação de peças dependem do projeto de elementos de fixação. Geralmente esse trabalho é executado em paralelo com o desenvolvimento das demais atividades de planejamento de usinagem, e por equipe ou empresa específica.	
Cartas de tolerância	Recomenda-se o uso de cartas de tolerância para verificar se a sequência de operações que serão executadas, satisfaz as tolerâncias de projeto.	
Preparação final do plano de processo	O plano de processo é um procedimento formal de manufatura, onde são descritas todas as características e requisitos para operacionalização do processo de usinagem. Neste procedimento devem ser especificados: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação da peça</li> <li>• Identificação da máquina a ser utilizada</li> <li>• Material</li> <li>• Operações (identificadas)</li> <li>• Ferramenta de corte utilizada e pastilha</li> <li>• Fixação</li> <li>• Quantidade de lote de produção</li> <li>• Parâmetros de usinagem</li> </ul>	
Programação do comando numérico	A programação é gerada somente após a definição do plano de processo.	
Determinação das condições de trabalho	As condições de trabalho abrangem as atividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escolha de operador de máquina adequado</li> <li>• Indicação do modo de preparação da máquina e da ferramenta (setup)</li> <li>• Definição e implementação de instruções de trabalho</li> </ul>	
Tempos de Fabricação	O cálculo e especificação de tempos de fabricação são realizados através de cálculos considerando os parâmetros definidos, ou ainda, consideram-se peças similares já processadas como referência para previsão do tempo de fabricação.	
Elaboração de Croquis (Procedimentos operacionais)	Instrução de trabalho para orientação sobre a fabricação da peça, ou sobre o preparo de máquina (Setup).	

**APÊNDICE F - Questionário enviado aos profissionais (segmento de usinagem)**

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR) – Campus  
Ponta Grossa**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Doutorado  
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Produto e Processos de Manufatura  
Discente: Ana Caroline Dzulinski, Orientador: Prof.º Dr. Aldo Braghini Junior*

Caríssimo,

Primeiramente, agradeço seu aceite em participar da presente pesquisa. Este questionário objetiva o levantamento de opinião de profissionais que atuam diretamente no desenvolvimento de produtos usinados, atuando como fornecedor ou projetista deste segmento de produto. As informações levantadas através deste meio não serão publicadas na íntegra, sendo garantida a anonimidade dos respondentes e empresas a quais estes atuam e/ou representam na pesquisa, de maneira a proteger qualquer forma de segredo industrial envolvido nas respostas.

A pesquisa objetiva a proposta de um modelo de desenvolvimento de produtos usinados, sendo este uma adequação do modelo *Design for Six Sigma* (DFSS). Preliminarmente, através desta pesquisa, o DFSS foi definido como: “É uma metodologia com enfoque no **desenvolvimento otimizado de produtos, processos e serviços, que considera** de maneira sistematizada e quantificada, através de ferramentas matemáticas e de qualidade, **os requisitos críticos de projeto fundamentados nas expectativas dos clientes.**”

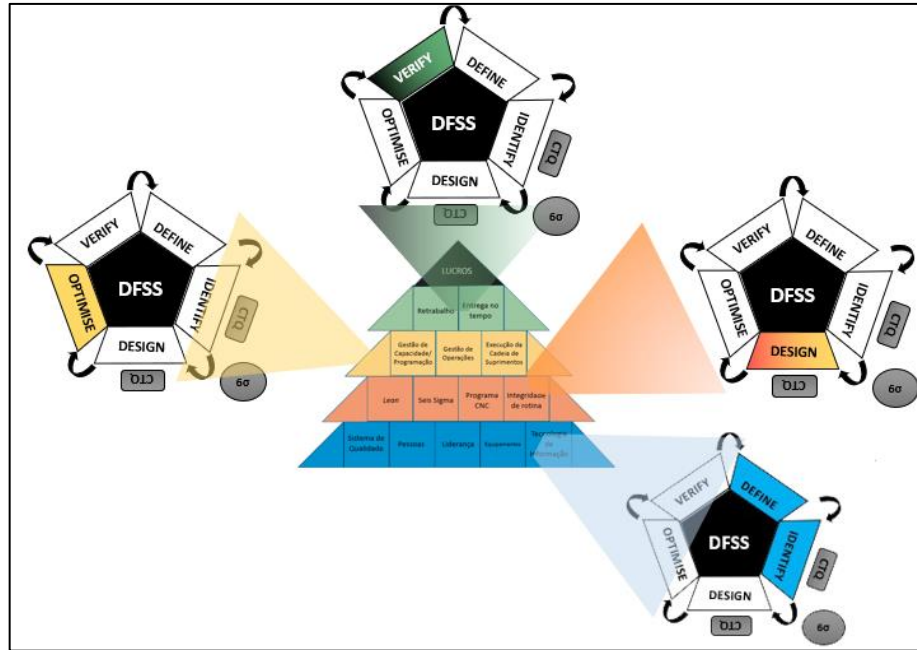
A seguir são disponibilizadas a perguntas, e agradecemos se puder responder a todas.

- 1) A empresa em que você trabalha atualmente é fornecedora ou cliente do segmento de usinagem?
- 2) Qual a sua função na empresa, sua formação e a quanto tempo atua com o desenvolvimento de produtos/processo de usinagem?
- 3) Anteriormente a empresa que atua hoje, já atuava com a mesma função em outra empresa?
- 4) Há um padrão de desenvolvimento dos produtos usinados onde você atua? Cite quais são as etapas. Há um modelo padrão ou não?
- 5) Qual a relação entre o projeto da peça e o que é executado no processo? Você nota uma dificuldade em atender o projeto? Se sim, com que frequência?
- 6) Quais são as áreas envolvidas no desenvolvimento dos produtos usinados?

- 7) Você considera que há diferença entre desenvolver o produto usinado, em relação a outros produtos de outras características?

**As próximas perguntas visam a avaliação da proposta de DFSS para usinagem que foi desenvolvido através da pesquisa. O modelo foi apresentado previamente pela pesquisadora, mas oferecemos ao final deste documento as tabelas e o diagrama síntese do modelo.**

- 8) É claro para você que o modelo é composto por etapas, atividades e ferramentas sugeridas?
- 9) Você concorda com os objetivos, *gates* (decisão que determina a sequência do desenvolvimento), entradas e saídas das fases?
- 10) O que você identifica no modelo que se assemelha às atividades atuais de desenvolvimento na empresa onde você atua?
- 11) O que no modelo você acredita que não condiz com as atividades desenvolvidas?
- 12) Você considera o modelo viável de aplicar? Você implementaria?
- 13) Se você respondeu não na perguntaria anterior, qual a justificativa?
- 14) O que você propõe para que o modelo possa ser aplicado?
- 15) Se o modelo estiver vinculado a um plano de processo automatizado, você consideraria a implementação?
- 16) O que você sugere para melhorar o modelo e torná-lo possível de operacionalização?



<b>Fase: Define – Definir</b>	
<b>Objetivo:</b> Definir a viabilidade preliminar do desenvolvimento de processo de usinagem baseado no projeto do cliente.	
<b>Gate de decisão:</b> Atendimento de requisitos preliminares de projeto de cliente.	
<b>Entradas da Fase 1:</b> - Intenção de desenvolvimento de produto de cliente (solicitação de orçamento); - Capacidade de produção disponível para novos projetos;	
<b>Saídas da Fase 1:</b> Aprovação preliminar de condições básicas de projeto	
Atividades	Ferramentas
<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Desenvolvimento de Cultura para Qualidade e treinamentos; <i>(Atividade contínua)</i></li> <li>(2) Comprometimento da equipe e alta gerência; <i>(Atividade contínua)</i></li> <li>(3) Planejamento de vários níveis; <i>(Atividade contínua)</i></li> <li>(4) Mapeamento sobre a capacidade de produção disponível (Histórico de dados de processo) – indispensável os dados por equipamentos; <i>(Atividade contínua)</i></li> <li>(5) Gestão da busca e recebimento de intenção para desenvolvimento de novos projetos – gestão da cadeia de suprimentos;</li> <li>(6) Análise de requisitos preliminares de projetos (equipe multifuncional):                         <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Dimensões de peça;</li> <li>b. Operações requeridas;</li> <li>c. Volume de produção requerido;</li> <li>d. Controle de qualidade necessário;</li> <li>e. Aspectos contratuais (financeiros, logísticos, serviços adicionais, etc.)</li> <li>f. Identificação da necessidade de terceirização;</li> </ol> </li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de gestão e controle de sistemas formais de qualidade;</li> <li>• Gerenciamento dos indicadores de Tarvin (2016) e demais indicadores que contribuem para a análise de capacidade produtiva;</li> <li>• Gestão do banco de dados – controle de histórico de informações por equipamento/máquina ferramenta;</li> <li>• Ferramentas para planejamento estratégico:                         <ol style="list-style-type: none"> <li>d. SWOT;</li> <li>e. Análise de Risco;</li> <li>f. Matriz de Priorização;</li> </ol> </li> <li>• Cronograma para análise de requisitos preliminares;</li> <li>• Ferramentas para análise financeira e definição sobre investimentos, quando necessário;</li> <li>• Documento formal de registro sobre análise preliminar, contendo decisão e justificativa sobre aceite ou declínio de projeto;</li> </ul>

<b>Fase 2: Identify - Identificar</b>
<b>Objetivos:</b> Aceite ou declínio sobre o projeto e plano de desenvolvimento após aceite de proposta por parte do cliente.
<b>Gate de decisão:</b>



<i>Decisão interna:</i> Aceitar o desenvolvimento do projeto após análise detalhada; <i>Decisão externa (cliente):</i> Aceitar proposta de orçamento.	
<b>Entradas da Fase 2:</b> - Planos organizacionais; - Resultado da análise preliminar de projeto, com indicação sobre os recursos recomendados (equipamentos);	
<b>Saídas da Fase 2:</b> Plano de desenvolvimento do projeto de produto.	
Atividades	Ferramentas
<p>(1) Identificação dos <i>stakeholders</i>;</p> <p>(2) Busca dos dados históricos de processos realizados nos equipamentos predeterminados na Fase 1;</p> <p>(3) Análise detalhada do desenho;</p> <p>(4) Avaliação sobre a necessidade de serviços/processos terceirizados;</p> <p>(5) Determinar o nível sigma pretendido;</p> <p>(6) Identificação de parâmetros críticos de projeto - CTQ;</p> <p>h. Agrupamento dos processos/operações;</p> <p>i. Identificação de parâmetros de corte;</p> <p>j. Seleção das ferramentas de corte;</p> <p>k. Estimativa de capacidade de processo para CTQ identificados considerando as máquinas ferramentas pré-determinadas.</p> <p>(7) Identificação de parâmetros críticos da organização – CTQ;</p> <p>l. Estimativa de eficiência produtiva;</p> <p>m. Estimativa da viabilidade econômica do processo;</p> <p>n. Análise prévia sobre impactos ambientais (energia consumida e fluídos de corte).</p> <p>(8) Seleção dos recursos viáveis com base nas estimativas prévias;</p> <p>(9) Elaboração e envio do orçamento para o cliente;</p> <p>(10) Negociação e ajustes de detalhes de orçamento quando solicitados.</p> <p>(11) Elaboração do Plano de Desenvolvimento de Produto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestão do banco de dados – controle de histórico de informações por equipamento/máquina ferramenta;       <ul style="list-style-type: none"> <li>a. <i>Benchmarking</i>;</li> <li>b. <i>Brainstorming</i>;</li> <li>c. Diagrama de afinidades;</li> </ul> </li> <li>• Gerenciamento dos indicadores de Tarvin (2016) e demais indicadores referentes aos equipamentos pré-selecionados;</li> <li>• Registros sobre o controle estatístico de processo por equipamento;</li> <li>• Análise sobre a distribuição estatística de dados:       <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Teste de normalidade;</li> <li>b. Cálculo da média e desvio padrão difusos (<i>Fuzzy</i>);</li> <li>c. Cálculo de estimativa de índices <math>C_p</math> e <math>C_{pk}</math> para o novo projeto;</li> </ul> </li> <li>• Simulações (CAD/CAM) para análise preliminar sobre as variáveis de processo;</li> <li>• Correlação estatística entre dados de equipamentos com os parâmetros críticos para a organização;</li> <li>• Ferramentas para o Plano de Desenvolvimento de Produto:       <ul style="list-style-type: none"> <li>h. TRIZ;</li> <li>i. SIPOC;</li> <li>j. Diagrama P;</li> <li>k. DOE;</li> <li>l. Design for X (DFX);</li> <li>m. Engenharia reversa;</li> <li>n. 5W2H;</li> <li>n. ACV;</li> </ul> </li> </ul>

<b>Fase: <i>Design</i> - Projetar</b>	
<b>Objetivo:</b> Realização do <i>try out</i> e elaboração do projeto detalhado de manufatura e fornecimento	
<b>Gate de decisão:</b> <i>Decisão interna:</i> Aprovação interna e de fornecedores da qualidade de produto e validação de critérios mínimos de processo; <i>Decisão externa (cliente):</i> Aprovação de subfornecedores (quando requerido).	
<b>Entradas da Fase 3:</b> Plano de desenvolvimento de projeto do produto	
<b>Saídas da Fase 3:</b> Elementos críticos para otimização (Plano de otimização de processo) e projeto detalhado de manufatura e fornecimento	
Atividades	Ferramentas
<p>(1) Desdobramento de parâmetros críticos (fundamentado na análise de CTQ e outros fatores críticos de projeto);</p> <p>(2) Definição do plano para serviços/processos terceirizados e aprovação de fornecimento;</p> <p>(3) Reutilização de planos de processo existentes;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas focadas nas características de produto para planejamento de projeto de produção:       <ul style="list-style-type: none"> <li>i. CAD/CAE;</li> <li>j. DOE;</li> <li>k. Projeto robusto;</li> </ul> </li> </ul>

<p>(4) Definir sequência de operações;</p> <p>(5) Especificação das máquinas e equipamentos;</p> <p>(6) Seleção e especificação de pessoal e habilidades;</p> <p>(7) Especificar fixação;</p> <p>(8) Especificar a inspeção;</p> <p>(9) Especificar os métodos de processo;</p> <p>(10) Especificar parâmetros de trabalho;</p> <p>(11) Elaborar procedimentos e instruções de trabalho;</p> <p>(12) Obter a programação em CNC;</p> <p>(13) Determinação dos tempos de produção;</p> <p>(14) Definir o controle dos CTQ;</p> <p>(15) Quantificar as funções transferência que envolvem os requisitos;</p> <p>(16) Estabelecer os limites de controle e tolerâncias;</p> <p>(17) Prever as possíveis falhas (ruídos) do processo;</p> <p>(18) Prever a performance do processo;</p> <p>(19) Refinar a capacidade de processo;</p> <p>(20) Desenvolver o plano de controle;</p> <p>(21) Definir os indicadores de desempenho;</p> <p>(22) Projetar instalações;</p> <p>(23) Produção de lote piloto – <i>Try out</i> de produção</p> <p>(24) Plano de otimização de processo</p>	<p>l. Design for X;</p> <p>m. Diagrama P;</p> <p>n. As 7 ferramentas da qualidade;</p> <p>o. FMEA/ DFMEA;</p> <p>p. SIPOC;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas para projeto de processos: <ul style="list-style-type: none"> <li>f. PFMEA;</li> <li>g. CAM;</li> <li>h. Princípios Lean;</li> <li>i. PERT/CPM;</li> <li>j. Ferramentas para análise de processos;</li> </ul> </li> <li>• Ferramentas para avaliação de variáveis de projetos: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Índices de capacidade de processos (Cp, Cpk, Cr, Ppk, Pp e Pr);</li> <li>j. Funções transferência;</li> <li>k. Análise de fluxo de valor (VSM), Poka Yoke, e demais ferramentas do Lean Manufacturing;</li> <li>l. Planos de Controle;</li> <li>m. Métodos estatísticos para análise de dados (análise de variância, correlação, histograma, etc.);</li> <li>n. MSA;</li> <li>o. Elementos finitos;</li> <li>p. Simulação de Monte Carlo;</li> </ul> </li> </ul>
---	---

#### Fase: *Optimize* - Otimizar

<p><b>Objetivo:</b> Realizar as melhorias de projeto de manufatura visando a máxima eficiência e aprovação do cliente do processo e produto</p>	
<p><b>Gate de decisão:</b>  <i>Decisão interna:</i> Liberação de processo para <i>ramp up</i> de produção;  <i>Decisão externa (cliente):</i> Aprovação de processo e produto.</p>	
<p><b>Entradas da Fase 4:</b> Plano de otimização de processo</p>	
<p><b>Saídas da Fase 4:</b> Plano de <i>ramp up</i> de produção</p>	
Atividades	Ferramentas
<p>(1) Definição do plano de ação de melhorias;</p> <p>(2) Desenvolvimento do projeto robusto, com minimização da sensibilidade;</p> <p>(3) Aplicar EVOP (<i>Evolutionary Operations</i>);</p> <p>(4) Atualizar os CTQ;</p> <p>(5) Atualizar o MSA e os parâmetros de capacidade;</p> <p>(6) Atualizar os indicadores;</p> <p>(7) Aprovação de Produto e Processo – início do <i>ramp up</i> de produção</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas para otimização de variáveis e redução de ruídos no projeto: <ul style="list-style-type: none"> <li>n. DOE;</li> <li>o. DFMEA;</li> <li>p. Método de Taguchi;</li> <li>q. FMEA;</li> <li>r. Projeto baseado em confiabilidade;</li> <li>s. Correlação;</li> <li>t. ANOVA;</li> <li>u. Artificial Neural Network Optimize;</li> <li>v. Funções transferência;</li> <li>w. Projeto robusto;</li> <li>x. Projeto de tolerâncias;</li> <li>y. AHP;</li> </ul> </li> </ul>

#### Fase: *Verify* - Verificar

<p>Objetivo: Controle dos parâmetros críticos (CTQ)</p>
---

Atividades	Ferramentas
<p>(1) Condução do MSA;</p> <p>(2) Implementação do Controle Estatístico do Processo (CEP);</p> <p>(3) Definição e implementação do plano de controle;</p> <p>(4) Desenvolvimento de planos de manutenção;</p> <p>(5) Desenvolvimento de “Provas de Erros”;</p> <p>(6) Gerenciamento de riscos;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de controle de variáveis do produto: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. DOE;</li> <li>b. Diagrama de causa-efeito;</li> <li>c. PFMEA;</li> <li>d. CAD;</li> </ul> </li> <li>• Ferramentas de gestão de projetos: <ul style="list-style-type: none"> <li>e. Artificial Neural Network Optimize;</li> <li>f. QFD;</li> <li>g. Estratégia de implementação;</li> <li>h. Preparação de follow-up de mercado;</li> <li>i. ERIC Square – <i>Eliminate, Reduce, Increase, Create</i>;</li> </ul> </li> <li>• Ferramentas de controle de variáveis de processos: <ul style="list-style-type: none"> <li>j. Estudos de capacidade de processos;</li> <li>k. Fluxogramas;</li> <li>l. DFX;</li> <li>m. Gráfico de Pareto;</li> <li>n. Histogramas de frequência;</li> <li>o. Cartas de controle;</li> <li>p. Planos de amostragem;</li> <li>q. Plano de controle dos processos;</li> <li>r. Simulações computacionais;</li> <li>s. Diagramas de dispersão;</li> <li>t. <i>Poka Yoke</i>;</li> <li>u. Teste piloto;</li> <li>v. ANOVA, Análise de regressão;</li> <li>w. Documentação do processo;</li> <li>x. Plano de transição;</li> <li>y. Procedimentos de operação padrão;</li> </ul> </li> </ul>