

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DA MANUFATURA**

**CRISTIANO ZENI**

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE RELATIVA DO  
CUSTO ASSOCIADO À TOLERÂNCIA ESPECIFICADA DURANTE A  
FASE DE PROJETO**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2018**



**CRISTIANO ZENI**

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE RELATIVA DO  
CUSTO ASSOCIADO À TOLERÂNCIA ESPECIFICADA DURANTE A  
FASE DE PROJETO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.

Co-orientador: Prof. Carlos Cziulik, Ph D.

**CURITIBA**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Z54d Zeni, Cristiano

2018 Desenvolvimento de modelo de análise relativa do custo associado à tolerância especificada durante a fase de projeto / Cristiano Zeni.-- 2018.

133 p.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica

Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2018

Bibliografia: p. 107-112

1. Tolerância (Engenharia). 2. Custo industrial. 3. Produtos novos. 4. Indústria automobilística. 5. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Beltrão, Paulo André de Camargo, orient. II. Cziulik, Carlos, coorient. III. Universidade Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

---

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## **TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 329**

A Dissertação de Mestrado intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE RELATIVA DO CUSTO ASSOCIADO À TOLERÂNCIA ESPECIFICADA DURANTE A FASE DE PROJETO**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Cristiano Zeni**, no dia 23 de agosto de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Paulo André de Carmargo Beltrão - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto - UTFPR

Prof. Dr. Walter Luis Mikos - UTFPR

Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan - UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Mariane pelo apoio e força que me ajudaram a continuar no desenvolvimento do projeto

Ao meu orientador, Paulo André de Camargo Beltrão, que auxiliou nas partes burocráticas e fornecendo informações precisas.

Ao meu co-orientador, Prof. Ph.D. Carlos Cziulik, com quem muito aprendi e de quem mantenho um grande respeito e admiração. Agradeço pela amizade, competência e direcionamento dados em todas as etapas deste estudo.

Ao Ângelo Bomfati, que auxiliou e muito no desenvolvimento e programação da ferramenta.

Aos professores Paulo César Borges e Milton Borsato por seus auxílios nas diversas situações burocráticas necessárias para a validação do mestrado.

A todos os profissionais que se dispuseram em responder os questionamentos levantados nesta investigação.

“No pain, no gain”  
Jane Fonda

## RESUMO

A concorrência acirrada do mercado estimula as indústrias automotivas a percorrerem todos os caminhos para alcançar a máxima satisfação dos clientes com o maior ganho econômico possível. Sendo assim, o processo de redução de custos nas empresas possui papel fundamental. Uma das maneiras de eliminar desperdícios monetários é através da otimização dos valores das tolerâncias de projeto em componentes mecânicos, atividade essa que não têm sido explorada em seu pleno potencial. Desse modo, realizou-se uma pesquisa de campo prospectiva, a fim de avaliar como é conduzida a engenharia dimensional em uma empresa automotiva de grande porte. Constatou-se que os projetistas utilizam, majoritariamente, da experiência e de conhecimentos adquiridos em projetos passados, a fim de alocar as tolerâncias com propriedade. Isso acarreta limitações aos desenvolvedores de produto com pouco tempo de prática. Analisando as referências existentes, concluiu-se que apesar dos diversos estudos realizados dentro desse escopo, envolvendo análises focadas em perdas de manufatura, controle, qualidade, sustentabilidade e outras etapas do ciclo de vida de um produto, é constatado que: devido à difícil aplicabilidade dos métodos, o emprego dos mesmos pela engenharia de produto ainda é reduzido. Tal efeito pode ser explicado frente à grande complexidade dos métodos envolvidos, da baixa adaptabilidade e da excessiva quantidade de dados de entrada necessários, os quais devem ser fornecidos pelo usuário. A partir das necessidades avaliadas em uma pesquisa de campo realizada com colaboradores da indústria automotiva e com base em referenciais da literatura, o presente trabalho propõe um modelo de avaliação de custos de especificação de tolerâncias para auxílio aos projetistas durante a fase de desenvolvimento. Baseando-se em uma análise comparativa e qualitativa das tolerâncias atuando como guia para a alocação de valores de maneira simples e eficaz. A partir do modelo proposto foi desenvolvido uma ferramenta em planilha eletrônica, para atuar como interface, banco de dados e realizando os processamentos para o usuário. A ferramenta visa à análise de custo de peças simples e à otimização de conjuntos mecânicos. O modelo e a ferramenta foram verificados em duas pesquisas de campo, com projetistas e engenheiros de diversos cargos e experiências, através de tarefas direcionadas e pesquisa de opinião. Constata-se que a aceitação do modelo e ferramenta foram positivos e que existe grande chance de sua introdução na rotina de desenvolvimento dos colaboradores. Conclui-se que o trabalho atende melhor as expectativas dos projetistas com menor tempo de experiência, servindo como um referencial de fácil e rápido acesso para especificar tolerâncias com menor custo. Porém, a aderência do modelo e ferramenta já não apresenta uma aceitação tão alta por parte dos colaboradores seniores, visto que devido ao seu alto grau de experiência, realizam grande parte das operações de maneira automática, sem a necessidade de um referencial.

**Palavras-chave:** Tolerância; Custo; Desenvolvimento de Produto.

## ABSTRACT

The fierce market competition encourages automotive industries to go all the way to achieving maximum customer satisfaction with the greatest economic gain possible. Therefore, the process of cost reduction in companies plays a fundamental role. One way to eliminate monetary waste is by optimizing the design tolerance values in mechanical components, which have not been exploited to their full potential. A prospective field research was carried out to evaluate how dimensional engineering is conducted in a large automotive company. It was found that designers make the most use of the experience and knowledge acquired in past projects, in order to allocate the tolerances with property, which implies limitations to the developers of product with little time of practice. By examining existing references, it was concluded that despite several studies carried out within this scope, involving analyzes focused on manufacturing losses, control, quality, sustainability and other stages of a product's life cycle, it is noticed that: due to the difficult application of methods, their use by product engineering is still low. Such an effect can be explained by the great complexity of the methods involved, the low adaptability and the excessive amount of input data required, which must be provided by the user. The present study proposes a model of evaluation of the costs of specifying tolerances to assist the designers during the development phase, based on the needs assessed from field research with collaborators of the automotive industry and based on references in the literature. In a comparative and qualitative analysis of the tolerances, in order to serve as a guide for the allocation of values, in a simple and more effective way. From the proposed model, a tool is developed in an electronic spreadsheet, which serves as interface, database and performs the processing for the user. The tool aims at the analysis of the cost of simple parts and the optimization of mechanical assemblies. The model and the tool were verified in two field surveys, with designers and engineers of diverse positions and experiences, through directed tasks and opinion research. One can evaluate that the acceptance of the model and tool were positive and that there is a great chance of its introduction in the day-to-day work by the part of the collaborators. It is evaluated that the work better meets the expectations of designers with less time of experience that having a reference of easy and fast access can specify tolerances with lower cost. However, it is noticed that the adherence of the model and tool no longer shows a tendency so high on the part of the senior employees, since due to their high degree of experience, they can perform a certain part of the operations in an automatic way, without the necessity of a reference.

**Palavras-chave:** Tolerance; Cost; Product Development

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Custo de um produto e determinação de custo nas fases de um projeto .	11
Figura 2 - Montagem funcional de um eixo em um mancal.....	12
Figura 3 - Tolerância no Desenvolvimento do Produto .....	19
Figura 4 - Modelo de sistema das decisões relacionadas à qualidade em um produto .....	23
Figura 5 - Processo de definição de tolerâncias.....	26
Figura 6 - Tipos de encadeamento dimensional.....	26
Figura 7 - Processo de análise de tolerância. ....	27
Figura 8 - Método de análise e toleranciamento funcional CLIC.....	28
Figura 9 - Flange com elementos de tolerância .....	30
Figura 10 - Desdobramento de elementos de tolerância.....	30
Figura 11 - Forma de representação de tolerância dimensional .....	31
Figura 12 – Flange cilíndrica dimensionada linearmente .....	34
Figura 13 – Flange cilíndrica com distorções permissíveis .....	35
Figura 14 - Elementos de tolerância em sua condição de máximo material .....	36
Figura 15 – Acréscimo da tolerância pelo uso da condição de máximo material .....	37
Figura 16 - Princípio de máximo material aplicado na dimensão e no datum.....	38
Figura 17 - Elementos de tolerância em sua condição de mínimo material .....	39
Figura 18 - Custo de tolerâncias para processos de fabricação especificados .....	40
Figura 19 – Variação de custo de usinagem pela tolerância.....	42
Figura 20 - Formulário de complexidade de elementos de tolerância .....	44
Figura 21 – Curva de perda de qualidade .....	46
Figura 22 – Curva assimétrica de perda de qualidade .....	47
Figura 23 - Custo total de um toleranciamento para mínimo custo e perda de qualidade.....	50
Figura 24 – Fluxo processual do modelo proposto.....	56
Figura 25 - Planejamento da planilha de coleta de dados.....	59
Figura 26 – Processo de busca dos dados na base de dados .....	61
Figura 27 – Processo que retorna os valores resultados ao usuário.....	64
Figura 28 - Processo de otimização de tolerâncias.....	66
Figura 29 - Aba de coleta de dados, mostrando as tabelas para grau IT7 .....	71
Figura 30 - Aba de verificação da ferramenta .....	74
Figura 31 - Aba de otimização da ferramenta .....	76
Figura 32 – Região 1, dados da montagem, valor resultante da pilha de tolerâncias e valor da meta.....	76
Figura 33 – Região 2, tabela para inserção de dados primários .....	76
Figura 34 – Região 3, tabela para inserção de dados secundários.....	76
Figura 35 – Região 4, tabela para preenchimento dos valores de ponderações.....	77

Figura 36 – Região 5, tabela para inserção de dados das dimensões da montagem e resultados da análise .....	77
Figura 37 - Janela de retorno ao usuário, mostrando o status da otimização .....	77
Figura 38 – Figura de desenho em corte de um eixo genérico, utilizado como exemplo.....	79
Figura 39 – Seletores para os dados primários.....	79
Figura 40 - Análise para IT6-IT9, fornecedor Y. ....	80
Figura 41 – Resultados de IT6 – IT9 para fornecedor X. ....	81
Figura 42 – Região de entrada do coletor de líquido Refrigerante .....	82
Figura 43 – Planilha preenchida com os valores para análise .....	83
Figura 44 – Exemplo de montagem esquemática de componentes mecânicos.....	85
Figura 45 – Tabela de otimização preenchida com os valores de análise .....	85

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de respondentes, classificados por cargo e tempo de experiência .....	94
Gráfico 2 – Quantidade de não-respondentes, classificados por cargo e tempo de experiência .....	94
Gráfico 3 - Tempo utilizado por cada usuário para realização dos exercícios.....	95
Gráfico 4 – Valores percentuais médios das diferenças entre as especificações antes e depois do uso da ferramenta.....	96
Gráfico 5 – Quantidade de respostas de confiança e utilidade percebidas pelos participantes .....	96
Gráfico 6 – Média da quantidade de dimensões sobre dimensionadas encontradas. ....	97
Gráfico 7 – Média dos valores de relevância percebidas do módulo nas atividades cotidianas dos participantes .....	98
Gráfico 8 – Valores percentuais médios das diferenças entre as especificações antes e depois do uso do módulo .....	98
Gráfico 9 – Média dos valores de relevância percebidas do módulo nas atividades cotidianas dos participantes .....	99
Gráfico 10 - Demografia do Estudo .....	115
Gráfico 11 - Cargo dos entrevistados.....	115
Gráfico 12 - Radar dos conhecimentos avaliados.....	116
Gráfico 13 – Radar de conhecimentos, separado por tempo de experiência.....	117
Gráfico 14 - Referências utilizadas para a criação de um desenho de engenharia.	118
Gráfico 15 – Uso de referências por experiência .....	119
Gráfico 16 - Percepção de custo dos entrevistados .....	120
Gráfico 17 – Percepção da indústria pelos colaboradores .....	121
Gráfico 18 - Percepção da empresa pelos colaboradores, separado por tempo de experiência.....	123
Gráfico 19 – Seleção adequada de tolerâncias.....	124
Gráfico 20 – Uso de ferramenta e abordagem .....	125
Gráfico 21 – Otimização de tolerâncias no custo do produto. ....	125

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Simbologia do Toleranciamento Geométrico .....	33
Quadro 2 - Sumário de análise de otimização de custos de tolerâncias (híbridos) ...	52
Quadro 3 - Relação custo-esforço para atingimento de tolerância.....	57
Quadro 4 - Multiplicadores para os modificadores. ....	58
Quadro 5 - Relação grau IT e ocorrência .....	63
Quadro 6 - Relação de severidade.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções matemáticas de custo de tolerâncias.....	41
Tabela 2 – Resultados de Otimização.....	86

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Assistido por Computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Assistida por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Assistida por Computador)
CAT	<i>Computer Aided Tolerancing</i> (Toleranciamento Assistido por Computador)
CLIC	<i>Cotation en Localisation avec des Influences des Contacts</i> (Alocação por Localização com as influências dos contatos)
DFA	<i>Design for Assembly</i> (Projeto para Montagem)
DFM	<i>Design for Manufacturing</i> (Projeto para Manufatura)
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i> (Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico)
LMC	<i>Least Material Condition</i> (Condição de Mínimo Material)
MMC	<i>Maximum Material Condition</i> (Condição de Máximo Material)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
DFMEA	<i>Design Failure Mode Effect and Analysis</i> (Análise de causa e efeito para projeto)
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i> (Projeto para Manufatura e Montagem)

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE.....	11
1.1	OBJETIVO GERAL .....	14
1.1.1	<i>Objetivos Específicos.....</i>	14
1.2	JUSTIFICATIVA .....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>A ESPECIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIAS E SEUS IMPACTOS NO CUSTO DO PRODUTO .....</b>	<b>17</b>
2.1	O PROCESSO DA ENGENHARIA DIMENSIONAL .....	17
2.1.1	<i>A Engenharia Dimensional na Fase Conceitual do Desenvolvimento de Produtos: O Toleranciamento Funcional.....</i>	20
2.2	CONCEITOS BÁSICOS DE TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO DE GRANDE INFLUÊNCIA NOS CUSTOS .....	24
2.2.1	<i>O Processo de Definição de Tolerâncias .....</i>	25
2.2.2	<i>Elementos de Tolerâncias .....</i>	29
2.2.3	<i>Tolerâncias Dimensionais e Valores Padronizados.....</i>	31
2.2.4	<i>Dimensionamento Geométrico de Tolerâncias.....</i>	32
2.2.4.1	<i>Mínimo e máximo material (modificadores).....</i>	35
2.3	MÉTODOS DE TOLERANCIAMENTO PARA MÍNIMO CUSTO .....	39
2.3.1	<i>Alocação de Tolerâncias para Mínimo Custo de Manufatura .....</i>	40
2.3.2	<i>Alocação de Tolerâncias para Mínimo Custo de Qualidade .....</i>	45
2.3.3	<i>Toleranciamento para Mínimo Custo de Controle.....</i>	48
2.3.4	<i>Métodos Híbridos de Toleranciamento para Mínimo Custo.....</i>	49
2.4	CONSIDERAÇÕES .....	53
<b>3</b>	<b>PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO E FERRAMENTA DE CARACTERIZAÇÃO DE CUSTOS DE TOLERÂNCIAS.....</b>	<b>55</b>
3.1	PREMISSAS PARA CRIAÇÃO DO MODELO .....	55
3.1.1	<i>Coleta de Dados.....</i>	56
3.1.2	<i>Armazenamento das Informações.....</i>	59
3.1.3	<i>Dados de Entrada do Usuário .....</i>	60
3.1.4	<i>Processamento da Informação com Base nos Dados do Fornecedor .....</i>	61
3.1.5	<i>Análise de Custos .....</i>	62
3.1.5.1	<i>Modificadores de qualidade.....</i>	62
3.1.5.2	<i>Análise de custo de peças isoladas.....</i>	64
3.1.5.3	<i>Otimização de conjuntos mecânicos.....</i>	65
3.1.6	<i>Modificação ou aprovação do resultado .....</i>	68
3.2	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DO MODELO .....	68
3.2.1	<i>Tabelas de Coleta de Dados de Manufatura e Controle .....</i>	69
3.2.2	<i>Aba de Verificação.....</i>	72
3.2.3	<i>Aba de Otimização.....</i>	75
3.3	APLICAÇÕES DESCRITIVAS .....	78
3.3.1	<i>O Banco de Dados como Guia de Consulta Rápida.....</i>	78
3.3.2	<i>Avaliação de um Projeto Existente em Relação ao Custo.....</i>	82
3.3.3	<i>Dimensionamento de uma Cadeia de Tolerâncias.....</i>	84
3.4	CONSIDERAÇÕES .....	86
<b>4</b>	<b>VERIFICAÇÃO DO MODELO E DA FERRAMENTA .....</b>	<b>88</b>
4.1	PLANEJAMENTO PARA VERIFICAÇÃO .....	88
4.1.1	<i>Descrição dos Estudos de Caso .....</i>	89
4.1.1.1	<i>Coleta de dados no banco de dados (banco de dados como guia) .....</i>	89
4.1.1.2	<i>Avaliação de custo de um componente individual.....</i>	90
4.1.1.3	<i>Avaliação do custo e otimização de uma montagem mecânica.....</i>	91

4.2	REALIZAÇÃO DA VERIFICAÇÃO .....	92
4.3	RESULTADOS OBTIDOS .....	93
4.3.1	<i>Etapa Um: Coleta de Dados no Banco de Dados (Banco de Dados como Guia) .....</i>	95
4.3.2	<i>Etapa Dois: Avaliação de Custo de um Componente Individual .....</i>	97
4.3.3	<i>Etapa Três: Avaliação do Custo e Otimização de uma Montagem Mecânica .....</i>	98
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	99
4.4.1	<i>Coleta de Dados no Banco de Dados (Banco de Dados como Guia) .....</i>	100
4.4.2	<i>Avaliação de Custo de um Componente Individual.....</i>	101
4.4.3	<i>Avaliação do Custo e Otimização de uma Montagem Mecânica .....</i>	102
4.4.4	<i>Visão Geral dos Entrevistados .....</i>	103
4.5	CONSIDERAÇÕES .....	103
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>105</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE A – ENTREVISTA COM DESENVOLVEDORES DE PRODUTO. ....</b>	<b>113</b>
A.1	DEMOGRAFIA .....	114
A.2	CONHECIMENTOS ESPECÍFICOS .....	116
A.3	REFERÊNCIAS UTILIZADAS.....	118
A.4	PERCEPÇÃO DE CUSTOS .....	119
A.5	PERCEPÇÃO DA COMPANHIA.....	120
A.6	QUESTÕES AFIRMATIVAS.....	124
A.7	CONSIDERAÇÕES .....	125
	<b>APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO DO MODELO E DA FERRAMENTA .....</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A redução de custos é um fator de preocupação para várias empresas e setores, seja por implicar cortes em projeto, processo, produção e, até mesmo, pessoas. Normalmente, tem como objetivo proporcionar competitividade para as indústrias (MORONI; PETRÒ; TOLIO, 2011).

Os gastos com manufatura e controle representam uma grande parcela do custo de um produto (SHEHAB; ABDALLA, 2001). A alocação de tolerâncias influencia no decréscimo do custo de fabricação, produção e, até mesmo, controle e qualidade dos componentes (WU; CHEN; TANG, 1998); (CHASE et al., 1990); (YE; SALUSTRI, 2003). Vários trabalhos têm examinado esses assuntos desde a década de cinquenta, como é o caso de Evans, (1958).

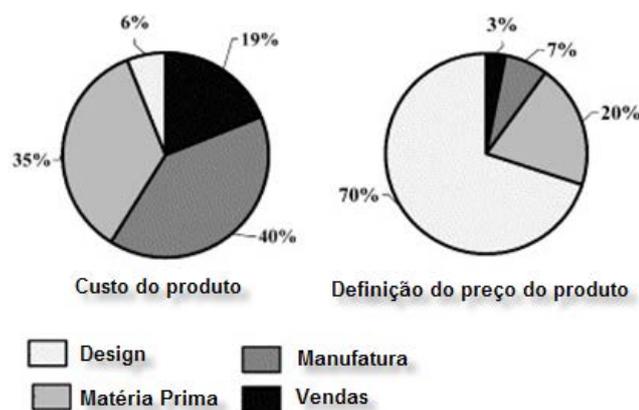
As linhas de pesquisa mais recentes na área abrangem outros tópicos menos óbvios de custo, que são influenciados pelo toleranciamento, como: sustentabilidade e ciclo de vida (HOFFENSON; DAGMAN, SÖDERBERG, 2013), no custo presente de perda de qualidade (PENG, 2012) e, até mesmo, a influência mercadológica (HOFFENSON; SÖDERBERG, 2015).

Geralmente, a especificação de tolerâncias é realizada de maneira iterativa e com base na experiência dos desenvolvedores de produto. Projetistas iniciantes ou mesmo os experientes recorrem à literatura ou a dados de projetos anteriores realizados por diferentes equipes, a fim de especificar dimensões, ao mesmo tempo coerentes, funcionais e com mínimo custo (CAMARGO; ABACKERLI, 2010).

Tolerâncias estreitas, geralmente, produzem sistemas mecânicos de melhor qualidade e permitem melhor montabilidade na linha de produção. Porém, o toleranciamento com rigor desnecessário tende a gerar grandes custos de manufatura e controle para uma dada aplicação (SIVAKUMAR; BALAMURUGAN; RAMABALAN, 2011). O balanceamento entre a qualidade do produto e seu custo tem sido um grande desafio para os desenvolvedores de produto, no ramo de especificação de tolerâncias.

## 1.1 IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE

Há uma grande tendência das companhias em produzir produtos de baixo custo e alta qualidade, a fim de garantir sua competitividade no nível máximo (SHEHAB; ABDALLA, 2001). A redução de custo na fase de concepção de um produto é mais eficaz que na fase de manufatura ou nas etapas mais avançadas de um projeto. Horngren et al. (2010) e Tornberg, Jamsen e Paranko (2002) mostraram que a maioria dos custos de um projeto é determinada na fase de desenvolvimento. Porém, pouco se têm investido na fase de concepção. Os gráficos na Figura 1 sinalizam que, apesar de 70% do custo ser resultante das decisões nas etapas iniciais, apenas 6% da carteira do projeto é utilizada nas mesmas.



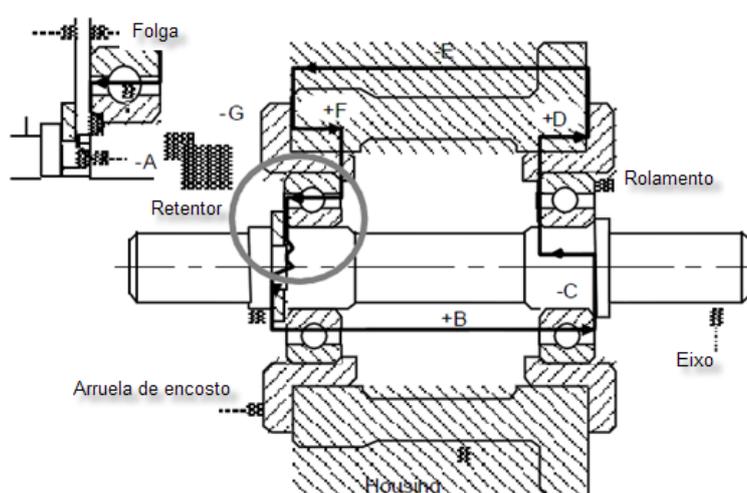
**Figura 1 - Custo de um produto e determinação de custo nas fases de um projeto**  
 Fonte: Adaptado de Shehab e Abdalla (2001)<sup>1</sup>

O toleranciamento<sup>2</sup> adequado na fase de concepção é fundamental para o desempenho funcional e para a competitividade econômica de produtos em diversos ramos de atividade. Sanz-Lobera, Sebastián e Pérez, (2010) comentam que os custos resultantes podem variar desde perdas devidas à indisponibilidade do produto durante o período de reparo, de gastos excessivos com manufatura e controle e, até mesmo, riscos de segurança.

<sup>1</sup> Todas as Figuras, Tabelas, Quadros e Gráficos, sem indicação explícita da fonte foram produzidos pelo autor da dissertação.

<sup>2</sup> Toleranciamento: Atribuição/especificação de tolerâncias à projetos; palavra que será utilizada durante o trabalho, visto que as referências recentes a utilizam, como Zilio, Vieiro e Walber, (2014) e Quartau, (2015).

Segundo Sivakumar; Balamurugan e Ramabalan, (2011), a devida alocação de tolerâncias pode gerar redução de custos com variações em diversas porcentagens, dependendo da funcionalidade e precisão de um produto. Henzold (1995) descreve modelos e mostra como variações de tolerância de 0,01 mm podem resultar em decréscimos de até 30% no custo de um componente. Chase (1999) demonstra em um exemplo simples, de uma montagem de eixo com mancal, como uma estratégia de alocação de tolerâncias para mínimo custo, considerando apenas variáveis de manufatura, gerou uma redução de três dólares em uma única pilha funcional de quatro componentes, como mostrado na Figura 2.



**Figura 2 - Montagem funcional de um eixo em um mancal**  
Fonte: Chase (1999)

Durante o século XX, vários métodos foram desenvolvidos visando limitar os custos resultantes da seleção inadequada de tolerâncias. Sejam eles para análises de cálculos de mínimo custo de manufatura, para cálculos de perda de qualidade e cálculos de custo de inspeção, sustentabilidade e impacto mercadológico. A grande maioria desses métodos possui complexidade elevada e aplicabilidade restrita (ISLAM, 2004), principalmente devido a serem quantitativos e absolutos. Ou seja, buscam valores globais de economia ao invés de realizar um comparativo qualitativo entre possíveis soluções.

Conforme Pahl et al. (2007), alterações de projeto em fases tardias do desenvolvimento são extremamente prejudiciais para o orçamento empresarial e tende-se ao máximo evita-las. Porém, ainda é comum que aconteçam, principalmente na indústria automotiva, devido à complexidade dos componentes e sistemas e, aos restritos requisitos de funcionalidade e segurança. Em tais

conjunturas a alteração de projeto concentra-se em apenas um ou alguns componentes do sistema, a fim de se evitar grandes gastos econômicos na mudança do conceito. Para esses casos a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos até o momento é limitada, visto que os mesmos avaliam o conjunto de componentes em cadeia para a devida otimização.

A fim de se avaliar a situação do uso dos modelos de alocação de tolerância, as dificuldades, necessidades e conhecimento dos projetistas do mercado no assunto, foi criada uma pesquisa de campo, cujos resultados e análise detalhada estão presentes no Apêndice A.

É possível evidenciar nos resultados da pesquisa no Apêndice A, nos Gráfico 14 e 15, que o uso de métodos de avaliação e melhoria de custos ainda não é plenamente difundido nas esferas de projeto. A maneira mais usual de seleção e alocação de tolerâncias ainda é baseada na experiência e conhecimento dos projetistas, que tentam correlacionar todos os fatores inerentes aos requisitos do projeto e a capacidade da manufatura para gerar um dimensionamento adequado. (DIMITRELLO; DIPLARIS, SFANTSIKOPOULOS, 2006; SANZ-LOBERA; SEBASTIÁN, PÉREZ, 2010). Devido a essa natureza empírica e baseada no conhecimento prático, a forma de evitar desperdícios devido às tolerâncias fica restrita a projetistas “sêniores”, com grande experiência. Os “juniors” ou iniciantes, acabam, então, sendo a grande fonte de erros, adquirindo a formação necessária apenas com o passar tempo e depois de diversos erros cometidos.

Com a tendência do chamado “*design re-use*”<sup>3</sup>: o uso das instruções e do conhecimento gerados e documentados em projetos já finalizados é muito comum. A dependência dos projetistas em desenhos e modelos já previamente validados é notável (HOFFENSON; DAGMAN; SÖDERBERG, 2013). Tal prática visa utilizar as decisões já validadas a fim de se evitar o gasto com novas verificações. Porém, ocasiona a transferência de erros e desperdícios previamente considerados.

Nos resultados da entrevista (Apêndice A), em maiores detalhes no Gráfico 14 corrobora-se que na indústria, cuja pesquisa foi efetuada, o uso de informações de projeto anteriores é considerado como principal recurso para o desenvolvimento

---

<sup>3</sup> *Design re-use*: Uso de informações de projeto já validadas previamente, em projetos novos.

de novos componentes. Além disso, percebe-se que o uso da experiência própria é considerado o mais importante pelos entrevistados.

O modo de trabalho de grandes empresas automotivas, que terceirizam a manufatura dos produtos, cujo projeto é próprio, para fornecedores secundários, acaba por criar uma desconexão entre fábrica e engenharia. Devido a negociações comerciais, projetos com desperdício de custo devido a tolerâncias, acabam sendo despercebidos, visto que o fornecedor não possui o conhecimento da funcionalidade da peça e o cliente não possui a perícia da manufatura (FENG; WANG; WANG, 2001). Nota-se na análise do Apêndice A, nos Gráfico 17 e Gráfico 18 que os desenvolvedores de produto possuem pouco acesso aos dados necessários da manufatura para um adequado uso das capacidades de engenharia simultânea.

Levando em conta todos os aspectos citados, admite-se que a falta de uma ferramenta, método, guia ou indicador para o toleranciamento para máxima economia nas empresas cria uma dificuldade para projetistas iniciantes em aplicar diretrizes de redução de custo. E, por consequência, tende a aumentar os gastos da indústria.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo e uma ferramenta de análise de custo de tolerâncias, para auxiliar projetistas iniciantes, na adequada especificação das mesmas, durante a etapa de detalhamento de novos componentes mecânicos ou da modificação de produtos correntes.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar os métodos de otimização de custos de tolerâncias já desenvolvidos, a fim de avaliar sua aplicabilidade ao campo;
- b) Caracterizar as deficiências e necessidades de uma empresa automotiva, quanto à atribuição de tolerâncias;
- c) Criar um banco de dados de informações de literatura, com interface para novas entradas do usuário, providas de dados de campo;

- d) Desenvolver ou adaptar um modelo de custo relativo para as necessidades dos projetistas;
- e) Desenvolver uma ferramenta para aplicação do modelo pelos usuários.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Acredita-se que, com o emprego do modelo de custo de tolerância, pode-se aprimorar o processo de desenvolvimento de produto, em aspectos como:

- a) Redução do custo de componentes, em todos os aspectos do seu ciclo de vida;
- b) Diminuição da dependência de conhecimento prévio para a alocação adequada de tolerâncias e do conhecimento externo (fornecedor);
- c) Redução do tempo gasto em verificação e retrabalho de projetos de engenharia.

Presume-se que, se os desenvolvedores de produtos utilizarem um modelo de toleranciamento adequado para seu ramo de trabalho e souberem de que maneira o mesmo poderá gerar reduções de custos, com perda mínima de qualidade, serão capazes de propor soluções mais eficientes em seus projetos. Para que isso ocorra, o modelo em questão deve ser relativamente simples, para facilitar sua adoção, com resultados satisfatórios e que possibilitem ajustes conforme a demanda.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1, há uma breve introdução sobre o cenário atual da atribuição e síntese de tolerâncias versus custos. São expostos, também, a justificativa e os objetivos (geral e específico), além dos resultados esperados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica explorando a forma pela qual o toleranciamento para mínimo custo vem sendo considerado na literatura corrente, considerando a apresentação desse parâmetro por outros autores. São apresentados, ainda, alguns pontos marginais, princípios básicos de tolerâncias, de engenharia dimensional e de elementos de tolerância.

O processo de desenvolvimento do modelo e da ferramenta, com sua estruturação e metodologia é apresentado no capítulo 3.

No capítulo 4, são mostrados os resultados e a análise da verificação do modelo e da ferramenta no campo, realizada com projetistas.

Por fim, são apresentadas as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

## **2 A ESPECIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIAS E SEUS IMPACTOS NO CUSTO DO PRODUTO**

A síntese de tolerâncias dimensionais é a abordagem primária para acomodar as variações resultantes dos sistemas de manufatura, dos processos de montagem, dos métodos de transporte e do uso, nas dimensões de um produto. A sua apropriada aplicação permite aos projetistas garantir um componente robusto o suficiente e com mínimo custo. Deve informar aos responsáveis pela fabricação e montagem da peça o quão preciso seu processo deve ser a fim de assegurar a qualidade mínima esperada pelo usuário final (SÖDERBERG; LINDKVIST; CARLSON, 2002).

A maior consequência financeira da escolha das tolerâncias é relacionada à precisão da manufatura. Afinal, a obtenção de uma peça com pouca variação dimensional é mais custosa e, além disso, todo produto com dimensões inaceitáveis deve ser refugado ou inutilizado. Porém, vários outros impactos são observados: a perda da satisfação e confiança do usuário do produto final, resultante da baixa qualidade de um produto, o impacto ecológico e socioambiental do descarte de produtos defeituosos, o custo de controle de dimensões excessivamente controladas e a baixa possibilidade de se reaproveitar os componentes em uma próxima atividade de remanufatura; entre outros. (HOFFENSON; SÖDERBERG, 2015).

No capítulo se pretende delinear os diversos fatores influentes na especificação de tolerâncias, apresentar os métodos já existentes para a busca da otimização de custos na alocação e especificação de tolerâncias e analisar o processo de controle e atribuição dimensional no desenvolvimento de produtos. Por fim, pretende-se caracterizar a oportunidade de pesquisa identificada.

### **2.1 O PROCESSO DA ENGENHARIA DIMENSIONAL**

Todos os processos de manufatura são afetados por variações dimensionais. As condições de funcionamento de máquinas, o desgaste dos equipamentos, manuseios incorretos das ferramentas, deformações mecânicas, térmicas, desgaste e outros diversos fatores, fazem com que a obtenção de uma

especificação exata de um componente seja praticamente impossível (DIMITRELLOU; DIPLARIS e SFANTSIKOPOULOS, 2006).

Dentro do desenvolvimento do produto, a chamada “engenharia dimensional” é uma atividade importante para assegurar que os requisitos de projeto sejam atendidos. Uma maneira de controlar as variações e de se obter limites permissíveis para os componentes é a alocação de tolerâncias. Sua função principal é definir um requerimento funcional e, entendendo as origens das variações, seja no processo de manufatura, montagem ou variações externas, avaliar os impactos das mesmas e atribuir a correta tolerância dimensional (OMBASIC; ZARE, 2013).

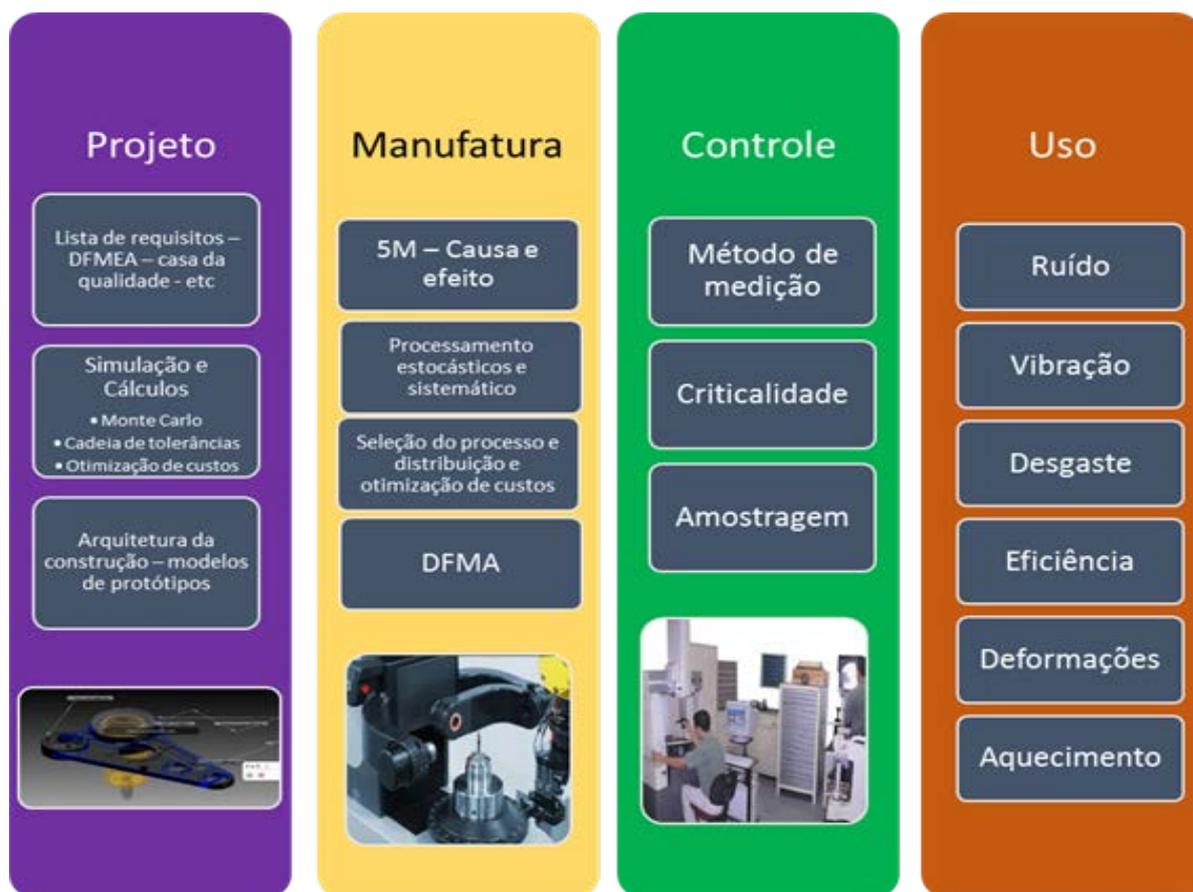
A engenharia dimensional está presente em todas as fases do desenvolvimento do produto. De maneira geral, citam-se três etapas:

- a) Fase conceitual;
- b) Fase de verificação e pré-produção;
- c) Fase de produção.

Em cada fase, aspectos importantes são avaliados na engenharia dimensional (HOFFENSON; DAGMAN; SÖDERBERG, 2013). Dentre eles:

- a) Definição das dimensões críticas do produto final;
- b) Análise de quais componentes contribuem para a dimensão crítica;
- c) Criação de conceitos robustos levando em conta simulações e análises estatísticas de encadeamento dimensional;
- d) Balanceamento de custo das tolerâncias;
- e) Planejamento da medição;
- f) Análise e retroalimentação dos dados de medição.

Com base na análise de Pahl et al., (2007) pode-se sintetizar, conforme mostrado na Figura 3, como ocorre a consideração de tolerâncias nas diversas fases do desenvolvimento de um produto.



**Figura 3 - Tolerância no Desenvolvimento do Produto**  
 Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2007)

Durante a fase de projeto, ferramentas são usadas com o propósito de se prever o comportamento de um produto nas suas mais diversas aplicações. O resultado de uma análise de modos de falha e efeitos (DFMEA) pode levar o projetista a restringir ou aliviar tolerâncias. Já uma análise ou simulação de Monte Carlo auxilia a decidir sobre qual amplitude de variação a dimensão pode atuar. Além disso, diversos métodos de otimização de custos (descritos nas próximas seções) podem ser empregados juntamente com a utilização dos sistemas CAD, que permitem uma visualização do ambiente no qual o componente projetado está inserido.

Na manufatura, as tolerâncias de projeto são transformadas em tolerâncias de processo. Nessa etapa são calculados os efeitos de cada tolerância, além da

capabilidade<sup>4</sup> do componente (PAHL et al., 2007). Após, são selecionados os métodos de fabricação, outras otimizações de custos são desdobradas e diversas análises de montagem e fabricação são realizadas (CAMARGO; ABACKERLI, 2010).

Em paralelo à manufatura, o controle dimensional do componente é planejado. Determina-se o método de medição, definem-se as amostragens com base nas criticidades<sup>5</sup> selecionadas no desenho e cria-se um plano de controle e validação da qualidade (CHASE et al., 1990).

Por fim, o produto a até o usuário final, com suas infinitas possibilidades de dimensões, o qual se espera estar dentro da conformidade definida. Ainda assim, a grande variação dessas especificações pode causar efeitos indesejáveis aos usuários, como: ruídos, vibração, desgaste, quebras e perda de eficiência. Cabe ao responsável pelo produto avaliar tais “inconsistências” e retornar com informações para os projetistas.

Tendo em vista o escopo do trabalho, de permitir uma avaliação do toleranciamento durante a fase de concepção do produto, descreve-se a seguir como a prática é abordada dentro de tal etapa.

### 2.1.1 A Engenharia Dimensional na Fase Conceitual do Desenvolvimento de Produtos: O Toleranciamento Funcional

O produto é desenvolvido e as especificações de produção do mesmo são consolidadas durante a fase conceitual. Nela, o dimensionamento é definido primeiramente com uma especificação robusta, tomando-se como base a experiência em outros projetos, ou o chamado *design re-use* (OMBASIC; ZARE, 2013). Tolerâncias são então alocadas no nível da peça considerando a sensibilidade geométrica, os custos de fabricação e o custo de qualidade (PENG,

---

<sup>4</sup> Capabilidade: habilidade intrínseca de um processo de desempenhar suas funções nas condições de trabalho, satisfazendo certas especificações e tolerâncias. (KAPUR e PECHT, 2014)

<sup>5</sup> Criticidade: nível crítico, visa mostrar o impacto da não conformidade do requerimento. (KAPUR e PECHT, 2014)

2012). Após essa primeira etapa, geralmente tem-se o uso da análise estatística de tolerâncias para verificar a concepção do componente contra o sistema de produção assumido. Então, alocam-se as mesmas considerando as análises de otimização pertinentes.

Desenhos e modelos de engenharia são utilizados para a documentação de um projeto e para a efetiva comunicação entre indivíduos envolvidos em diferentes fases de um desenvolvimento. São as representações gráficas das intenções de um desenvolvedor, as quais apresentam as formas e dimensões de seu conceito, visando manter a integridade de uma peça manufaturada (HENZOLD, 1995).

Para garantir que a informação seja assimilada de forma coerente e para eliminar ambiguidades na leitura de requerimentos, a indústria desenvolveu metodologias próprias para dimensionamento geométrico e toleranciamento funcional.

Desde 1950 houveram vários trabalhos envolvendo toleranciamento, tendo seu pico nos anos 2000, principalmente devido à difusão das ferramentas CAD (PUROHIT; SHARMA, 1999). Com isso, várias definições foram sendo consolidadas e, assim, surgiu o chamado toleranciamento funcional.

O propósito do toleranciamento funcional, segundo Anselmetti, (2006), é criar desenhos mecânicos de partes de um mecanismo de maneira a gerar geometrias aceitáveis utilizando um formato normalizado (ASTM, ISO). A base para a definição da funcionalidade de uma peça são seus requisitos funcionais. Ou seja, a condição física ou geométrica que deve ser respeitada a fim de possibilitar que a manufatura e montagem de um produto garantam plenamente o desempenho esperado do mesmo.

A especificação de tolerâncias depende demasiadamente da experiência em projetos anteriores. Todavia algumas literaturas são frequentemente utilizadas para direcionar a especificação, tais como:

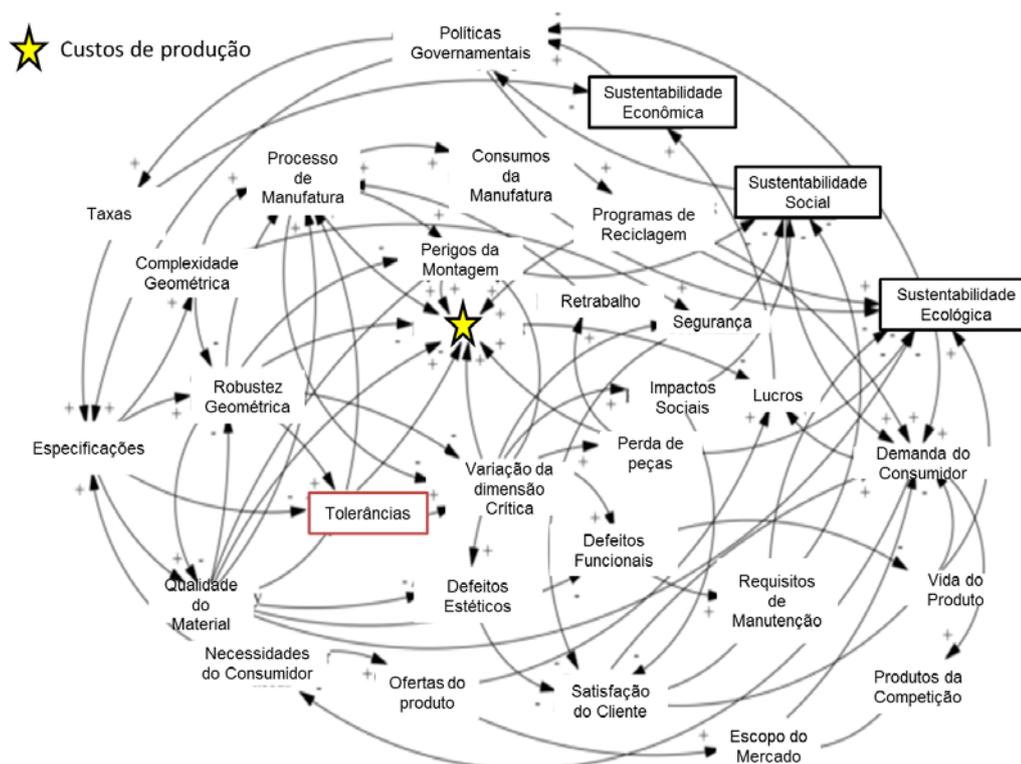
- a) Normas internacionais e nacionais, tais como a NBR 6158 (1995) e a ISO 286-1 (1990).
- b) Normas internas, geralmente, disponibilizadas nas empresas de maior porte e baseadas em dados resultantes de desenvolvimentos de processos;
- c) Literatura específica como, por exemplo, as obras de Bjorke, (1978) e Bralla (1997), que apresentam boas práticas para a criação do produto;

Outras ferramentas, métodos e boas práticas são utilizados no gerenciamento dimensional a fim de facilitar as atividades dos projetistas, as mais usuais são:

- a) Formação de equipes de engenharia simultânea: que são organizadas no início do projeto e retidas até a sua conclusão, com o intuito de abordar todas as áreas impactadas e prover as informações necessárias. É, geralmente, composta de engenheiros de projeto, fabricação, qualidade e de membros com conhecimento ou experiência especializada. Muitas equipes também incluem representantes do cliente;
- b) Diagramação dos objetivos, metas e interfaces: estabelecimento de requisitos de interface para que quaisquer alterações de engenharia relacionadas com o componente sejam mínimas;
- c) DFM e DFA. O DFM tenta oferecer a compatibilidade entre a definição do produto e do processo de manufatura proposto. O objetivo geral é atender as capacidades de fabricação e processo para alcançar a intenção do projeto. Já o DFA foca em simplificar a montagem e reduzir custos e tempos de manufatura;
- d) GD&T. A especificação de tolerância geométrica segue um sistema internacional de representação em engenharia. Baseado em uma linguagem gráfica universalmente aceita, conforme normas nacionais e internacionais, busca melhorar a comunicação, o projeto de produto e a qualidade (XU; KEYSER, 2014);
- e) Definição da característica chave. É uma característica de uma instalação, montagem ou detalhe do componente cuja variação dimensional tem o maior impacto no desempenho ou vida útil. A identificação das principais características de um produto específico é responsabilidade da equipe de gestão dimensional, em estreita ligação com o cliente;
- f) Simulações de variação. Visam representar a realidade com simulações baseadas em conceitos estatísticos, tendo em conta a relação entre os requisitos funcionais, bem como o processo esperado e capacidades de medição.

Durante os anos, diversos autores perseguiram o gerenciamento dimensional macro sistêmico, como Hoffenson e Söderberg (2015), que descrevem uma maneira de usar o pensamento sistemático no contexto das decisões de projeto

que afetam a qualidade do produto. Foi criado um mapa que analisa todos os aspectos impactados, mostrado na Figura 4, e então o foi aplicado para o projeto de uma capa de celular de plástico. Essa linha de pesquisa possibilitou averiguar os impactos que mudanças simples e rápidas de projeto podem gerar em todo o espectro do ciclo de vida de um produto.



**Figura 4 - Modelo de sistema das decisões relacionadas à qualidade em um produto**  
 Fonte: Adaptado de Hoffenson e Söderberg (2015)

Um dos aspectos úteis deste modelo de sistema de tomada de decisões é que ele revela *trade-offs*<sup>6</sup> de decisões de design. Um número par de sinais negativos em uma cadeia indica uma correlação positiva entre dois elementos, enquanto que um número ímpar indica uma correlação inversa. Por exemplo, quando se examina para as ligações entre as tolerâncias e as sustentabilidades econômicas, sociais e ecológicas, existem diversos caminhos possíveis. Um caminho mostra que o

<sup>6</sup> *Trade-off*: expressão em inglês que significa o ato de escolher algo em detrimento de outro e muitas vezes é traduzida como "relação custo-benefício".

acréscimo das tolerâncias aumenta o custo de produção (sinal positivo) e por consequência reduz a sustentabilidade econômica. Por outro lado, um caminho alternativo mostra que esse aumento melhora a demanda do cliente pelo produto. Isto sinaliza ao projetista que existem forças conflitantes que podem levar a escolher uma maior ou menor qualidade de tolerância para melhorar, ou a demanda, ou os lucros da empresa. Se o projetista possui certo nível de familiaridade com o problema, ele pode ser capaz de estimar quais efeitos são mais importantes. Caso contrário, o projeto do componente pode necessitar de uma avaliação mais aprofundada.

Dentro do processo de engenharia dimensional, vários conceitos e modelos de toleranciamento são utilizados na fase de seleção e alocação de tolerâncias. Os mais relevantes serão discutidos na próxima seção.

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS DE TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO DE GRANDE INFLUÊNCIA NOS CUSTOS

Para que a alocação de tolerâncias seja realizada de maneira adequada, primeiramente, faz-se necessidade a definição de uma linguagem comum para a efetiva comunicação entre os diversos setores e companhias envolvidas (ROY; LIU; WOO, 1991). Atualmente, duas abordagens de especificação de tolerâncias são as mais comumente difundidas e utilizadas: i) as tolerâncias dimensionais; e as ii) geométricas.

A tolerância dimensional pode ser definida como a variação admitida, no projeto de um componente, de uma dimensão linear. Por sua vez a tolerância geométrica expande o universo linear para duas ou três dimensões, a fim de controlar a forma, orientação e localização da especificação (CHIABERT; LOMBARDI; ORLANDO, 1998). Ambas as abordagens possuem estratégias e métodos de especificação que, se usados corretamente, podem reduzir o custo dos componentes (UMARAS, 2010).

Será descrito a seguir algumas definições, normas e táticas de projeto que permitem melhorar a avaliação dos custos de tolerância e também meios de indicar o requisito funcional de uma dimensão sem ocasionar em desperdício monetário.

### 2.2.1 O Processo de Definição de Tolerâncias

O procedimento para a definição de tolerâncias em projetos mecânicos é mostrado na Figura 5 e é compreendido por três tarefas principais (ARMILLOTTA, 2013):

- a) Especificação de tolerâncias<sup>7</sup>: nessa etapa são definidos os tipos de tolerâncias e seus posicionamentos, ordens de precedência e necessidades. É uma etapa mais demorada dentro do toleranciamento geométrico, visto que as possibilidades de combinações de tipos de tolerâncias são maiores que o dimensional;
- b) Alocação de tolerâncias: é a etapa onde os valores numéricos das tolerâncias são definidos e corretamente distribuídos, diversas iterações são esperadas nessa fase, com base no feedback das análises. A maioria dos métodos de otimização de tolerâncias atuam nessa área.
- c) Análise de tolerâncias: a cada loop de alocação é realizada um estudo de análise dos valores das tolerâncias e seu impacto no conjunto há quais fazem parte, a fim de determinar se os valores definidos atendem os requisitos de desempenho.

As dimensões toleradas de um conjunto mecânico são resultantes do encadeamento dos componentes que o integram. Um encadeamento de tolerâncias pode ser definido como uma sequência de elementos, onde cada um tem ponto inicial em comum com seu predecessor e outro ponto com seu sucessor. O ponto inicial no encadeamento está localizado em superfície, denominada referência característica (BJØRKE, 1978). Conforme a quantidade de elementos em uma cadeia aumenta, o valor da variação possível para o elemento final é maior. Na Figura 6 mostram-se alguns tipos de encadeamento, dentre eles, tende-se a evitar o encadeamento elementar e o simples de tolerâncias no projeto de um produto, a fim de diminuir o erro admissível no componente, fazendo com que as dimensões tenham o seu sucessor como a referência característica.

---

<sup>7</sup> O termo especificação de tolerâncias é frequentemente entendido e aceito como a etapa formada pela junção das fases de especificação com a de alocação.

A análise do encadeamento de tolerâncias para um conjunto de componentes é geralmente realizada nas fases de desenvolvimento de produto, a fim de avaliar como cada componente individual irá se comportar quando em dimensões diferentes de sua nominal.

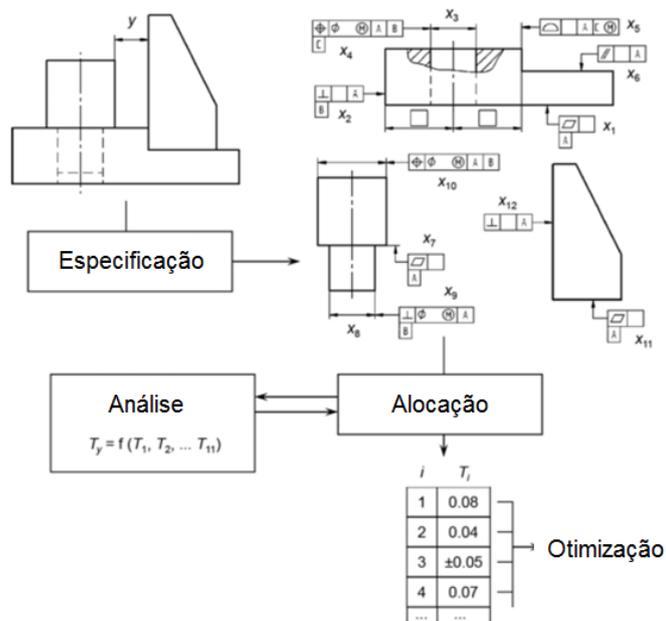


Figura 5 - Processo de definição de tolerâncias  
 Fonte: Adaptado de Armillotta, (2013)

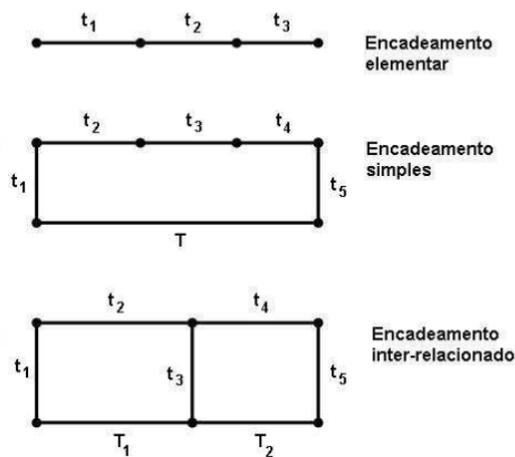


Figura 6 - Tipos de encadeamento dimensional  
 Fonte: Adaptado de Bjorke, (1978)

O método mais comum e utilizado para a alocação e análise de tolerâncias dimensionais, citado por Henzold, (1995), explicita que os passos a serem seguidos

são os da Figura 7. Também conhecido como *stack-up*<sup>8</sup>, ou análise de empilhamento de tolerâncias, visa prever o comportamento do conjunto de componentes em suas condições de variação dimensional. Com base nessa análise é possível atribuir os valores da tolerância dos componentes a fim de se evitar que os requerimentos de desempenho sejam negativamente impactados.



**Figura 7 - Processo de análise de tolerância.**  
**Fonte: Adaptado de Henzold, (1995)**

Esse procedimento é, geralmente, utilizado nas indústrias automotivas. Funciona relativamente bem para tolerâncias dimensionais. Porém, em grandes cadeias e pilhas de tolerâncias se torna bem restrito. É um método limitado quando utilizado em conjunto com o toleranciamento geométrico, que devido às suas características de controle em duas e/ou três dimensões faz com que esta análise fique extremamente complexa nesse modelo (CHIABERT; LOMBARDI; ORLANDO, 1998).

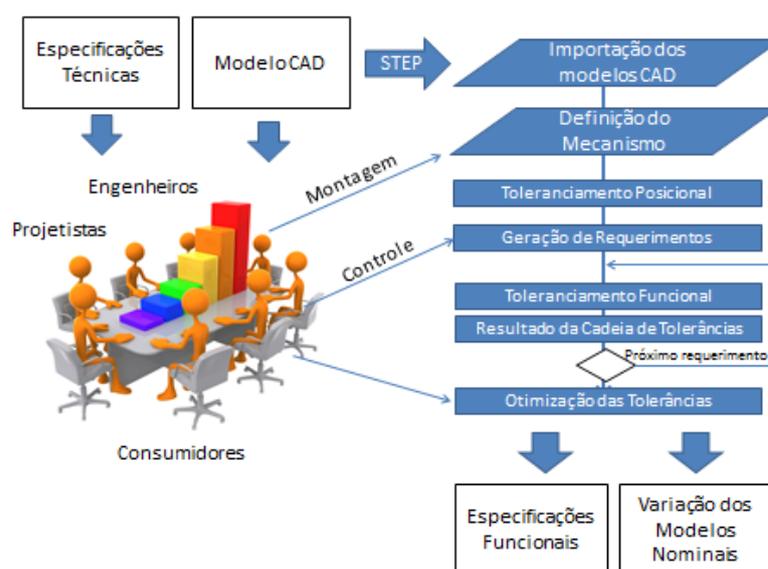
Com a popularização dos sistemas CAD e da computação pessoal, métodos com maior eficiência e capacidade de análise foram desenvolvidos, que, inclusive levam em conta a variação permissível em três dimensões. Porém, a maioria deles é limitada à realização da etapa de análise, não provendo sugestões de valores ou

---

<sup>8</sup> *Stack-up*: termo utilizado na indústria e em algumas referências para a análise de variação dimensional de um conjunto de componentes. Basicamente, consiste no somatório vetorial das tolerâncias do conjunto, a fim de se avaliar a variação do requerimento funcional com base nas tolerâncias especificadas.

forma de dimensionamento e demandam um longo tempo de pré e pós-processamento (ARMILLOTTA, 2013)

Durante o século XXI, múltiplos métodos tentaram automatizar também a etapa de especificação, visando melhorar o processo de toleranciamento geométrico, entre eles, notoriamente, tem-se o denominado CLIC, (*Cotation en Localisation avec Influence des Contacts*) proposto por Anselmetti (2006), que utiliza como estrutura uma base de engenharia simultânea e de análise de requerimentos funcionais, a fim de determinar tolerâncias geométricas para um sistema. A diagramação simples do processo é mostrada na Figura 8. Nesse método, é apresentada uma tabela de tolerâncias geométricas genéricas retiradas da literatura e baseada na experiência do autor, para servir de base de dados para um software de automatização, incluído em um programa CAD. O software lê os requerimentos impostos pelo projetista e então fornece uma primeira proposta de toleranciamento.



**Figura 8 - Método de análise e toleranciamento funcional CLIC.**  
**Fonte: Adaptado de Anselmetti, (2006)**

Anselmetti (2006) focou na seleção adequada das tolerâncias, a fim de garantir todos os seus requisitos funcionais, não se preocupando em demasia com as possíveis reduções de custo que implicariam na correta alocação dos valores de variação dimensional.

Apesar de completo, o processo ainda não é inteiramente automatizado. Baseia-se em definições adotadas pelo projetista. Ou seja, ainda é dependente da experiência do mesmo.

Atuais desdobramentos de pesquisa no ramo de toleranciamento funcional tendem a aperfeiçoar o desempenho de um componente e por consequência, seu custo. Geralmente buscam reduzir as influências oriundas da experiência dos desenvolvedores.

Tendo-se realizado a avaliação macro do toleranciamento dimensional, faz-se necessário descrever certos detalhes e conceitos que impactam no custo de um componente.

### 2.2.2 Elementos de Tolerâncias

Um elemento de tolerância (TE) é definido como uma característica 3D de um componente, de determinada forma, tamanho e tolerância (DIMITRELLOU; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2006)

Na diagramação dos recursos funcionais, na otimização de tolerâncias e, também, no controle de custos, a classificação de um componente em um conjunto de elementos de tolerância permite a separação e a análise comparativa. Um exemplo de um conjunto de elementos de tolerância é apresentado na Figura 9, onde o flange exemplo é mostrado com três elementos de tolerância.

Um TE pode ser desdobrado em quantos níveis forem necessários dependendo da análise que for realizada. Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006), em suas análises para custo de toleranciamento, fizeram-no em cinco níveis, conforme Figura 10.

Pode-se, por exemplo, para uma análise de custo de controle, desagregar o TE em mais elementos, conforme o controle geométrico requerido, como: rugosidade, forma entre outros. No exemplo do flange da Figura 9, com a análise de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos (2006), pode-se classificar o elemento de tolerância TE1 como: rotacional (visto que a superfície que o compõe é cilíndrica), com fator de tamanho (valor nominal dividido por tolerância) de 20, interno, plano e assim sucessivamente em quantas categorias forem necessárias.

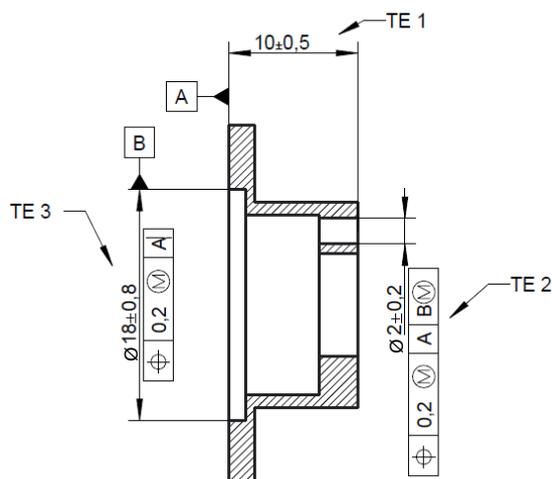


Figura 9 - Flange com elementos de tolerância

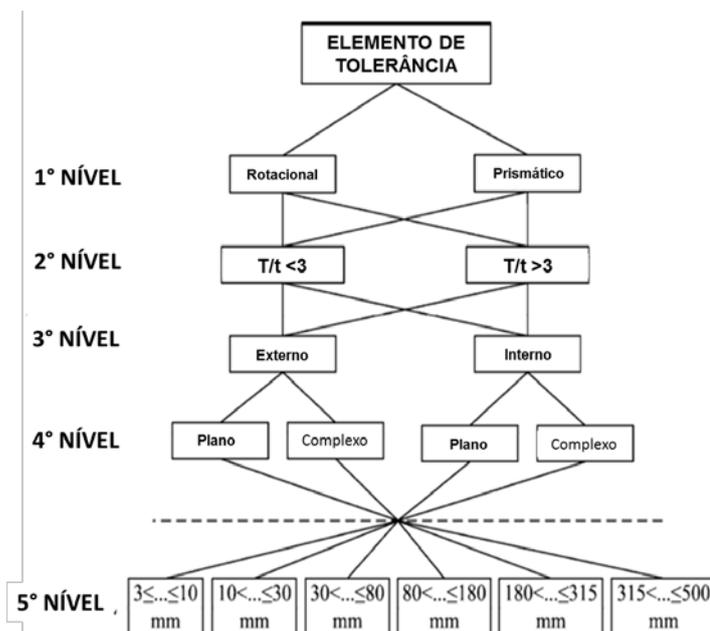


Figura 10 - Desdobramento de elementos de tolerância.  
Fonte: Adaptado de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006)

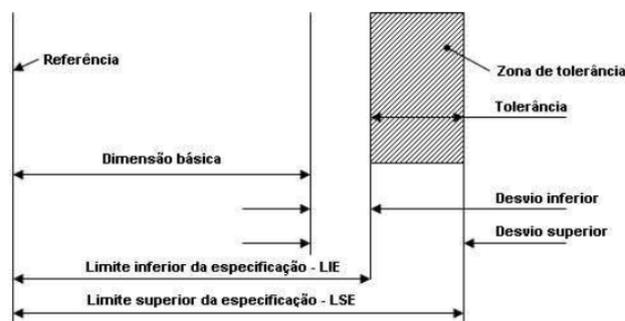
Nas categorias de análise de um TE, alguns valores são inerentes à peça, como por exemplo, os relacionados a sua geometria. Já outros, são as variações de tolerância selecionadas e que é objetivo desse estudo. Faz-se necessário descrever como são feitas as alocações padrão desses valores e as normativas utilizadas nas perspectivas atuais.

### 2.2.3 Tolerâncias Dimensionais e Valores Padronizados

A tolerância dimensional é definida como a variação admitida, no projeto de um componente, para uma dimensão. Apesar de o conceito ser único, tipos diferentes de representação são utilizados na especificação de tolerâncias dimensionais em desenhos, dependendo de requisitos específicos de cada projeto. Um mesmo desenho pode, inclusive, considerar tipos diferentes de representação.

As principais representações e definições de tolerâncias dimensionais são mostradas na Figura 11, e contemplam (BJORKE, 1978):

- A referência (*datum*), para o posicionamento da dimensão e da tolerância no componente;
- Limites, superior e inferior, da especificação: são os valores máximos e mínimos aceitáveis para a dimensão;
- Dimensão básica: é o valor a partir da qual os cálculos dos limites são realizados;
- Desvio superior: é a diferença entre o limite superior da especificação e a dimensão básica;
- Desvio inferior: é a diferença entre o limite inferior da especificação e a dimensão básica;
- A tolerância é a diferença entre os limites superior e inferior da especificação. Conseqüentemente, é também a diferença entre os desvios superior e inferior. Sempre é um valor absoluto.



**Figura 11 - Forma de representação de tolerância dimensional**  
**Fonte: Adaptado de Bjørke, (1978)**

Ao projetar componentes mecânicos, um sistema de tolerâncias padronizados, envolvendo graus internacionais de tolerância, é frequentemente

utilizado. A graduação IT, por exemplo, refere-se ao Grau de Tolerância Internacional de um processo industrial definido na norma ISO 286-1 (1990) Ao projetar uma peça, um engenheiro, tipicamente, determina uma dimensão-chave e alguma tolerância sobre essa dimensão. Usando a norma, o projetista pode determinar qual grau é necessário para produzir a peça com as especificações necessárias. A Equação 1 mostra o cálculo definido pela ISO 286-1 (1990) para uma tolerância (T), tendo a dimensão (D) e o grau IT (ITG).

$$T = 10^{0,2 \times (ITG-1)} * (0,45 \times \sqrt[3]{D} + 0,001 \times D) \quad \text{Eq 1.}$$

Se um processo de fabricação, por exemplo, o de fundição de metais por molde em areia, é capaz de produzir apenas componentes que atendem requisitos de tolerância acima de IT10, então, não será possível fabricar uma peça com requisitos de IT9, ou menores. Pode-se também concluir que, sendo IT10 o limite cujo processo atende, graus de tolerâncias maiores terão custo menor de fabricação, em sensibilidades que variam com a natureza do meio de manufatura.

Com o crescimento da complexidade dos produtos, as tolerâncias dimensionais começaram a não atender todas as demandas de geometria de um componente, tolerâncias de posição, localização e forma não são possíveis de serem consideradas simplesmente em um dimensionamento linear. Foi necessária então, uma nova linguagem para tratar esses casos (HENZOLD, 1995).

#### 2.2.4 Dimensionamento Geométrico de Tolerâncias

O Dimensionamento Geométrico de Tolerâncias (GD&T) é uma linguagem para comunicar as variações de geometria do projeto de engenharia.

Tal dimensionamento surgiu da necessidade de se definir precisamente características de forma, orientação e localização para um componente, uma limitação do toleranciamento dimensional, a fim de evitar: desvios de forma (o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem) e os desvios de posição (grau de variação dentre as diversas superfícies reais entre si, com relação ao seu posicionamento teórico).

A simbologia do toleranciamento é apresentada no Quadro 1, mostrando as diversas formas de controlar as variações.

Pode-se citar o exemplo de um flange cilíndrico como mostrado na Figura 12, no qual, com apenas tolerâncias dimensionais, permite variações que podem gerar o sólido distorcido da Figura 13. Devido à falta de limitações de posição e de forma da tolerância dimensional, tal componente seria aprovado em uma análise de controle de qualidade.

O flange da Figura 12 será utilizado como elemento para discutir os tópicos que se pretende abordar nesta dissertação.

**Quadro 1 - Simbologia do Toleranciamento Geométrico**  
**Fonte: Adaptado de NBR 6409.**

TOLERÂNCIAS	CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO
<b>Forma</b>	<b>Retitude</b>	—
	<b>Planicidade</b>	
	<b>Circularidade</b>	
	<b>Cilindricidade</b>	
	<b>Perfil de linha</b>	
	<b>Perfil de superfície</b>	
<b>Orientação</b>	<b>Paralelismo</b>	//
	<b>Perpendicularidade</b>	⊥
	<b>Inclinação</b>	∠
<b>Localização</b>	<b>Posição</b>	⊕
	<b>Concentricidade</b>	⊙
	<b>Simetria</b>	≡
<b>Deformação</b>	<b>Circular</b>	
	<b>Total</b>	

O uso do toleranciamento geométrico ocasiona adição de custo de manufatura, qualidade e, principalmente, controle de uma peça. A fim de garantir, não apenas a dimensão resultante, a manufatura necessita ter o cuidado de atingir

as expectativas de forma e posição. Isto demanda equipamentos mais avançados, menores velocidades de corte, maiores tempos de *set-up* e maior controle (CHIABERT; LOMBARDI; ORLANDO, 1998).

O uso do toleranciamento geométrico deve ser, portanto, empregado com moderação. Alguns fatores que devem ser avaliados a fim de se decidir o uso, ou não de GD&T envolvem o requerimento funcional da peça e a capacidade da manufatura. Se o elemento de tolerância permite prover de grandes desvios de forma e posição, a manufatura entende a função da peça e sua capacidade é muito boa. A probabilidade da dimensão não atender os requisitos funcionais é muito reduzida e a adição de tolerâncias geométricas irá apenas causar um controle rigoroso excessivo (HENZOLD, 1995).

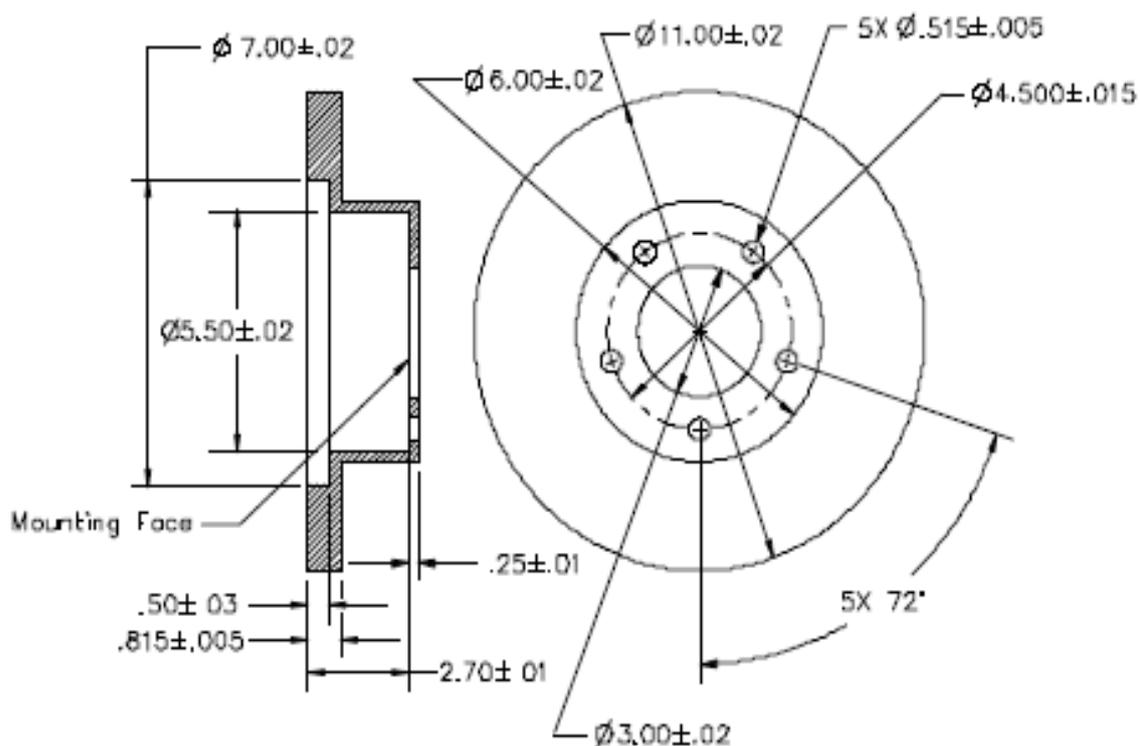
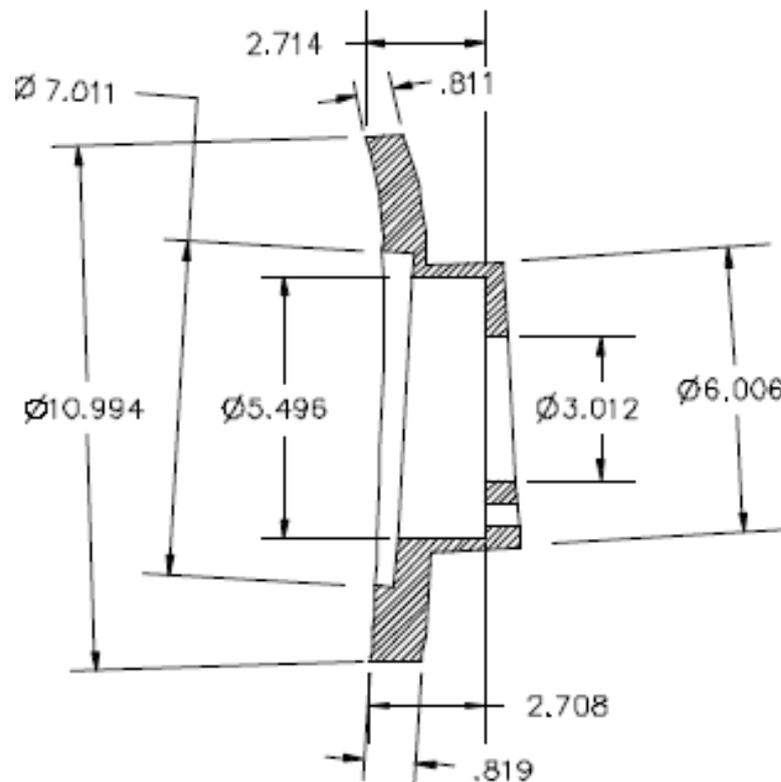


Figura 12 – Flange cilíndrica dimensionada linearmente  
Fonte: Henzold, (1995)



**Figura 13 – Flange cilíndrica com distorções permissíveis**  
**Fonte: Henzold, (1995)**

Algumas formas existem, dentro do GD&T, para diminuir custos. Uma delas é o uso de modificadores, de máximo e mínimo material, que possuem o objetivo de atrelar tolerâncias entre si e permitir variações funcionais de montagem. Tais conceitos serão detalhados na seção a seguir.

#### 2.2.4.1 Mínimo e máximo material (modificadores)

Dois conceitos amplamente utilizados para o projeto de novas peças e produtos são os princípios de tolerância geométrica de máximo e mínimo material. Esses conceitos representam uma maneira diferente de levar em consideração a natureza e aplicação de um objeto, pois fogem à regra geral de dimensionamento da ISO 2692 (2006), cuja explicação diz que cada tolerância deve ser analisada isoladamente. Tais princípios trabalham com o conceito de fusão das tolerâncias, tanto a máxima quanto a mínima, gerando uma interação entre elas para atender exigências geométricas e de dimensionamento (CAMARGO; ABACKERLI, 2010).

O princípio de máximo material, ou MMC de *maximum material condition*, é a condição para qual o componente tolerado está em sua condição dimensional com a maior quantidade de matéria, dentro dos limites especificados. No caso exemplo de um flange, a parte cilíndrica externa, que pode ser tratada como um pino, possui diâmetro de  $16+0,5\text{mm}$  e um furo dimensionado em seu diâmetro com o valor de  $18+0,8\text{mm}$ . O pino, quando possui o princípio aplicado, deve ter o valor de sua tolerância quando seu diâmetro é máximo, ou seja,  $16,5\text{mm}$ , já para o furo se aplica no diâmetro mínimo de  $17,2\text{mm}$ , conforme Figura 14.

Geralmente, utiliza-se em componentes de montagem ou fixação de peças, como parafusos e pinos de encaixe livre, dentre outros. O MMC limita variações de forma, orientação e posicionamento caso um dos elementos esteja na condição de matéria máxima. Porém, se tal elemento não atingir o MMC permite-se que o mesmo tenha variações maiores em suas dimensões. Essas variações são comumente chamadas de “tolerância bônus”. Como consequência direta, tem-se que mais peças são aprovadas pelos procedimentos de inspeção e, mesmo assim, atendem aos requisitos funcionais.

A Figura 15 mostra como o uso de máximo material aumenta a permissividade de valores possíveis para o componente. O eixo, quando se encontra no diâmetro de  $19,9\text{mm}$ , pode ter um uma variação de  $0,3\text{mm}$  na sua tolerância de perpendicularismo.

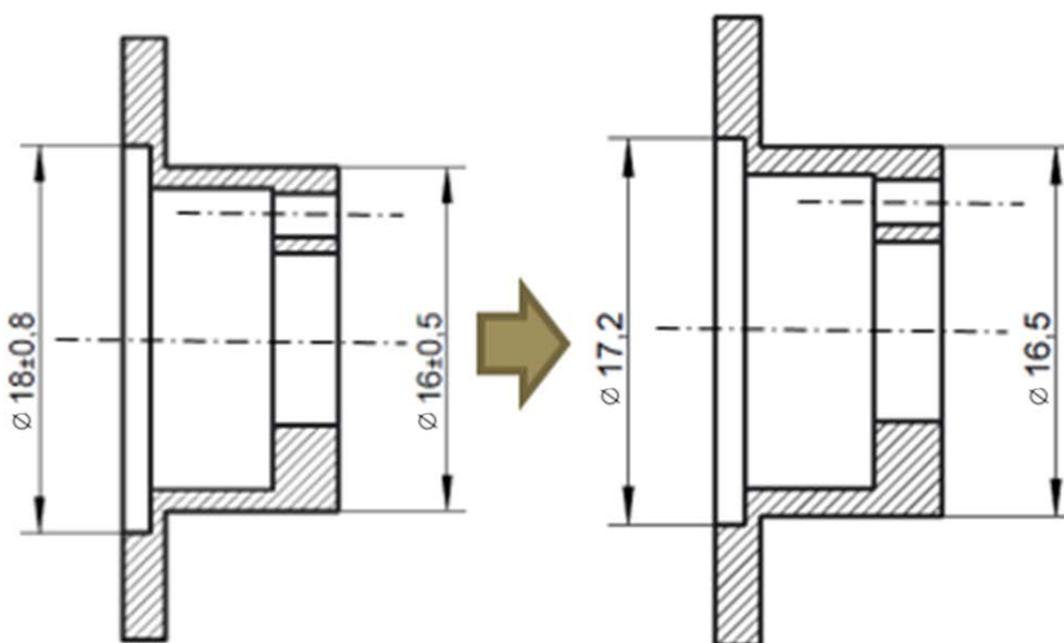


Figura 14 - Elementos de tolerância em sua condição de máximo material

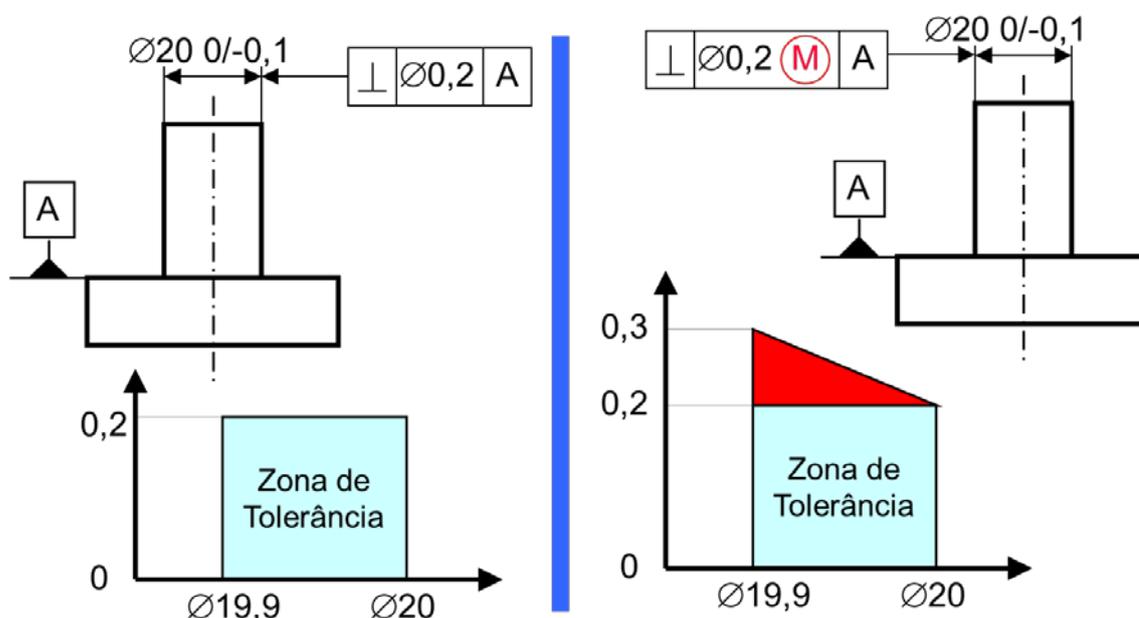


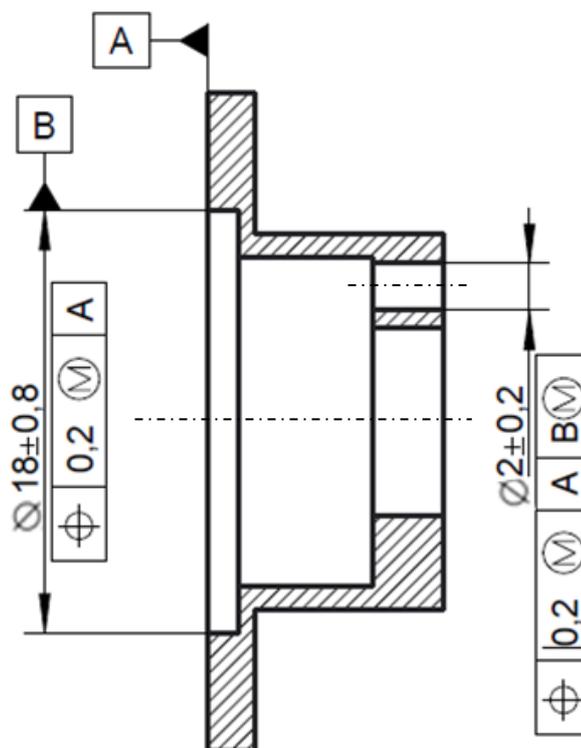
Figura 15 – Acréscimo da tolerância pelo uso da condição de máximo material

O princípio permite que sejam aceitas peças cujos eixos centrais de pinos de fixação não se encontrem perfeitamente com o eixo central de seus furos de montagem, permitindo assim montagens descentralizadas. Nas quais até mesmo as superfícies externas do pino tocam as superfícies internas do furo. Portanto, a recomendação geral de uso para o MMC é quando a montagem de um componente é de extrema importância. Quando não importa a localização e a exatidão da montagem, mas sim, o encaixe das peças.

Como especificado em ISO 2692 (2006), o símbolo da condição de máximo material deve ser indicado nos desenhos pelo símbolo M, dentro de um círculo, conforme mostrado na Figura 15. Deve ser aplicado apenas após o valor da tolerância no quadro ou logo após a indicação no componente de referência.

Para o caso no qual é aplicado além do valor da tolerância, e também na referência de controle, como no furo de 2 mm do flange, o valor tolerado torna-se dependente não apenas do dimensional próprio, mas também do valor dimensional do elemento de referência. Sendo assim o furo pode variar de posição, além de seus  $0,2$ mm permitidos, com um acréscimo de  $0,2$  milímetros, caso o furo do *datum* B esteja na sua dimensão mínima (máximo material), um exemplo é mostrado na Figura 16. Para o caso do exemplo, visualiza-se também um exemplo da condição

de máximo material aplicado em um datum (B), essa é uma condição específica que não será explanada nesse trabalho.



**Figura 16 - Princípio de máximo material aplicado na dimensão e no datum**

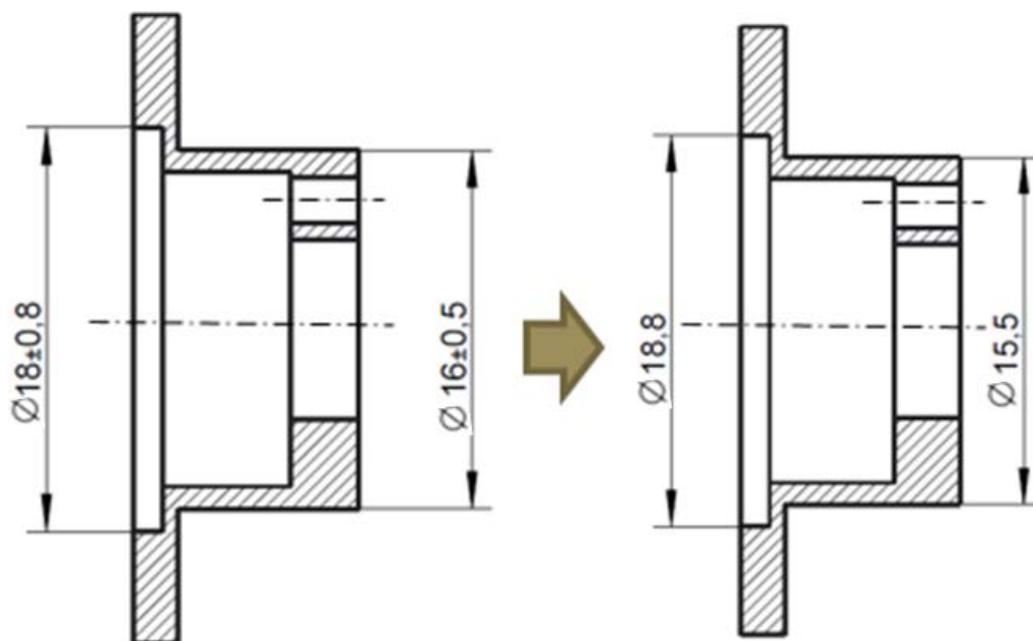
De maneira geral o toleranciamento para MMC reduz o preço médio das peças, visto que abre, de forma considerável, o valor de variação para as quais estão submetidas.

Tolerâncias mais abertas significam menos controle, menos análise e permitem a fabricação de peças por métodos menos exatos de fabricação e, portanto, mais baratos. Verifica-se, então, a vantagem do uso de máximo material.

O princípio de mínimo material, ou LMC de (*“least material condition”*), é a condição para qual o componente tolerado está em sua condição dimensional com a menor quantidade de matéria, dentro dos limites especificados. Como no exemplo mostrado anteriormente, o pino dimensionado com tal princípio tem o valor de sua tolerância aplicada quando seu diâmetro é mínimo. Ou seja, 15,5. Já para o furo aplica-se no diâmetro máximo de 18,8mm, conforme Figura 17.

Como especificado em ISO 2692 (2006), o símbolo de mínimo material deve ser indicado nos desenhos por um L dentro de um círculo e deve ser aplicado

apenas após o valor da tolerância, no quadro, ou logo após a indicação no componente de referência.



**Figura 17 - Elementos de tolerância em sua condição de mínimo material**

Analogamente, o modificador de mínimo material é utilizado para ajustes que necessitam de interferência ou ajuste fino. Sua aplicação para redução de custo de manufatura é limitada, visto que, ao contrário do modificador de máximo material, restringe ainda mais a variação permitida.

### 2.3 MÉTODOS DE TOLERANCIAMENTO PARA MÍNIMO CUSTO

A partir de 1960, o toleranciamento para mínimo custo passou a ser estudado e diversos métodos foram propostos. Nas próximas seções serão detalhadas as abordagens mais relevantes.

Como as especificações de tolerância possuem influências nas diversas fases do desenvolvimento do produto, muitas análises diferentes foram conduzidas, desde o custo mínimo para manufatura, até o custo de sustentabilidade ambiental e mercadológica. Decidiu-se agrupar os métodos em quatro grandes áreas:

- a) Manufatura;
- b) Qualidade;
- c) Controle;

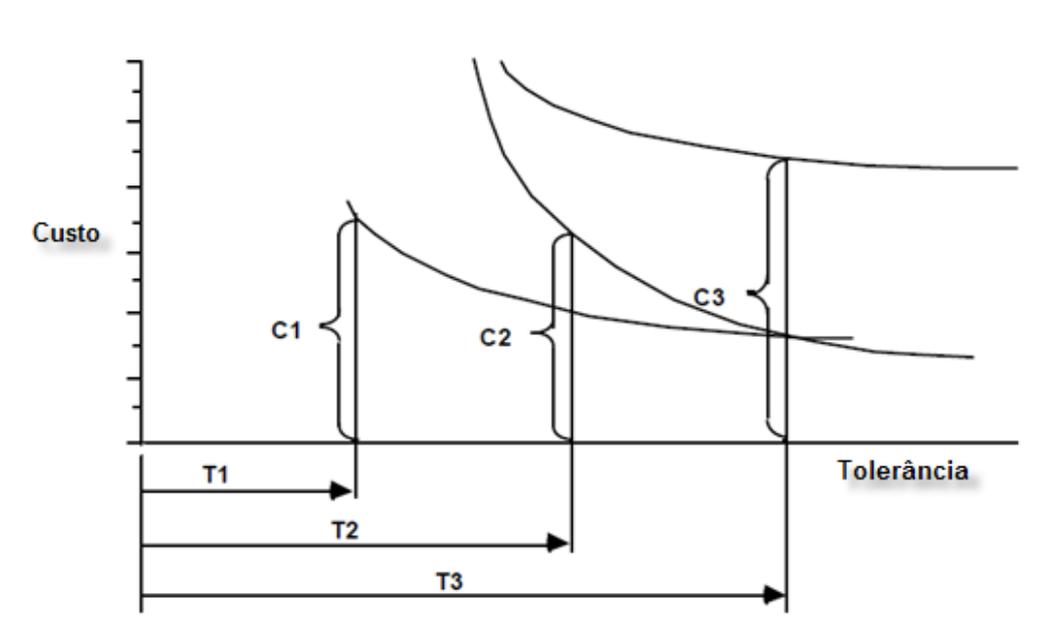
d) Híbridos.

As duas primeiras são as que apresentam a maior quantidade de referências, visto que são as mais impactantes nos custos. Por esse motivo serão descritas em tópicos separados.

### 2.3.1 Alocação de Tolerâncias para Mínimo Custo de Manufatura

Tolerâncias restritas levam a custos excessivos de fabricação, enquanto especificações muito flexíveis podem gerar desperdício excessivo e problemas de montagem e qualidade (PUROHIT; SHARMA, 1999).

Autores como Evans (1958) e Pike e Silverberg. (1953) foram os pioneiros no desenvolvimento de teorias e formulações matemáticas no assunto. Já, Chase (1999) resumizou os estudos anteriores e mostrou que para a alocação de tolerância de custo mínimo, é necessário caracterizar o relacionamento matemático dos valores de tolerância com o custo das mesmas, a fim de selecionar qual combinação é a mais rentável. No exemplo mostrado na Figura 18, cada método de fabricação apresenta um custo (C) determinado para as tolerâncias (T).



**Figura 18 - Custo de tolerâncias para processos de fabricação especificados**  
**Fonte: Adaptado de Chase, (1999)**

A função algébrica que determina a tolerância ótima para uma dada aplicação é, geralmente, obtida de maneira experimental e varia de máquina para

máquina. Muitas vezes também, varia de uma mesma máquina para locações diferentes. Portanto, diversos modelos genéricos diferentes foram propostos. A Tabela 1 mostra algumas funções.

**Tabela 1 — Funções matemáticas de custo de tolerâncias**  
**Fonte: Adaptado de Chase (1999)**

<b>Modelo de custo</b>	<b>Função</b>	<b>Autor</b>
Recíproca Quadrática	$A+B/tol^2$	Spotts (1973)
Recíproca	$A + B/tol$	Chase e Greenwood (1988)
Recíproca de potência	$A + B/tol^k$	Chase et al. (1990)
Exponencial	$Ae^{-Btol}$	Speckhart (1972)

Cada uma dessas funções apresenta uma aderência e uma sensibilidade diferente para cada aplicação, cabe então ao projetista analisar uma a uma e definir a mais adequada para o uso. Como exemplo, Trucks, (1974) realizou um estudo e apresentou de maneira gráfica, na Figura 19, na qual se pode perceber a tendência do custo de usinagem conforme a tolerância especificada.

Apesar de simples e matematicamente robusta essa abordagem não foi amplamente utilizada devido à grande dificuldade de extrair tais funções de maneira empírica. O número de variáveis presentes para a determinação é volumoso. Qualquer variação no ambiente, como grau de afiação da ferramenta, temperatura, máquina e calibração, pode gerar uma variação no custo difícil de ser precisada.

Outra grande dificuldade no tratamento do problema envolvendo custos e tolerâncias de fabricação é sua dependência das condições locais de manufatura. A maioria das empresas e fornecedores não disponibiliza tais dados. Algumas vezes, também, estes custos podem ser considerados como itens estratégicos de concorrência comercial. Um fator que influencia favoravelmente no custo real ou absoluto de um componente é sua escala de produção. O custo do material e de insumos é, geralmente, menor para uma maior quantidade produzida devido a fatores de negociação comercial. Também, o processo é ajustado para um maior tamanho de lote. Ou seja, o custo relacionado ao tempo de ajuste do processo (*set-up*) é rateado por um número maior de peças. Esse caminho de estudo, porém, apresenta viabilidade para se verificar o impacto econômico de uma tolerância e permite generalizar uma tendência dos valores monetários.

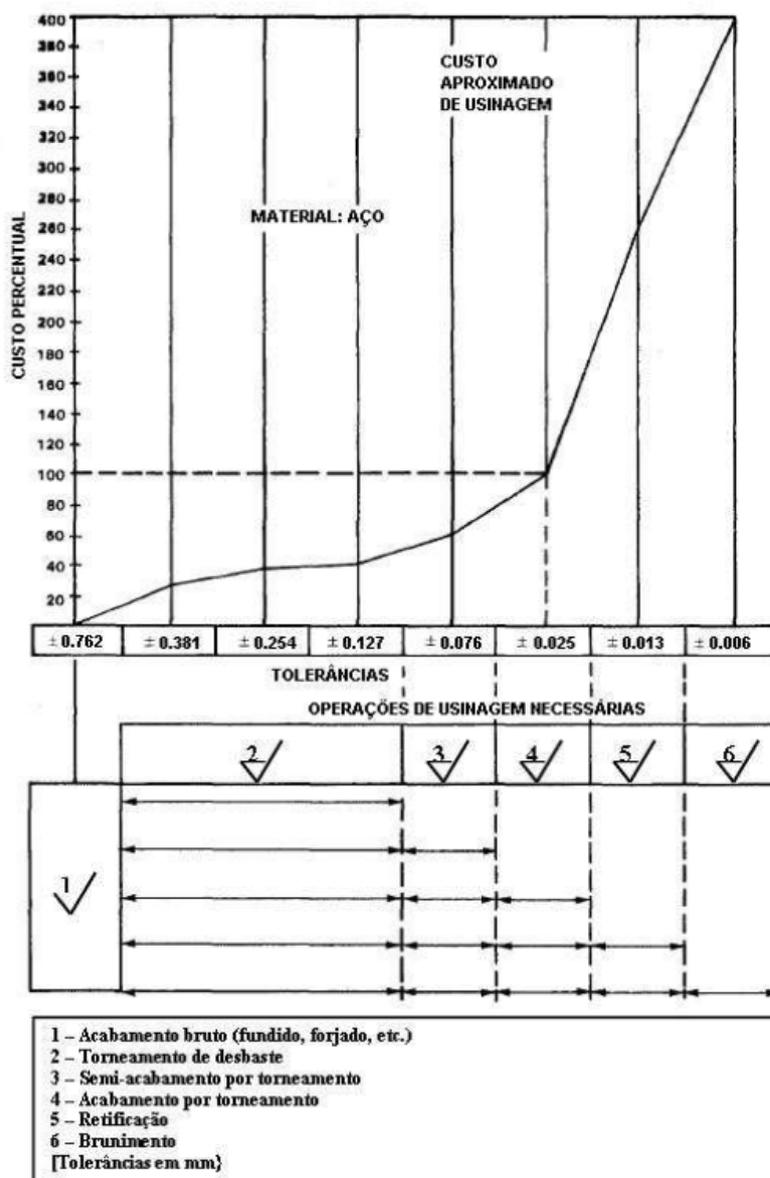


Figura 19 – Variação de custo de usinagem pela tolerância  
 Fonte: Adaptado de Trucks, (1974)

Visto essas dificuldades, alguns autores partiram para a análise mais comparativa e qualitativa do custo em tolerâncias, como os mostrados a seguir. Eles serão priorizados e mais detalhados nesse trabalho visto que o objetivo do autor é desenvolver um método nesses moldes.

Islam (2004) desenvolveu um software com o intuito de ser simples para os usuários, focando nos problemas de dimensionamento funcional e tolerâncias em um ambiente de engenharia simultânea. Ele fornece uma maneira sistemática de conversão de requisitos funcionais de um produto em especificações dimensionais por meio das seguintes etapas. Primeiramente, as relações necessárias para resolver problemas são representadas em uma forma matricial, chamada de matriz

de requisitos funcionais e dimensões. Em seguida, os valores das dimensões e as tolerâncias são então determinados, a fim de satisfazer todas estas relações representadas através da aplicação de uma estratégia global. Usando as equações mostradas previamente e levando em conta o banco de dados de diversos processos, o estudo desenvolveu um software de análise de otimização de custo para em encadeamento de tolerâncias. O software apesar de ser simples, ainda consome muito tempo do usuário para o preenchimento e análise e sofre dos mesmos problemas comentados anteriormente, a grande dependência da variabilidade dos processos e das diferentes maneiras de organização das manufaturas, impossibilitando assim uma análise de custo confiável.

Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006) criaram uma planilha de análise com fatores genéricos de avaliação, tendo o objetivo de comparar cada categoria de um elemento de tolerância conforme sua habilidade de ser produzido. O método se baseia no preenchimento de um formulário, pela manufatura, com valores representativos para cada classe de tolerância IT. Como mostrado na Figura 20, cada célula da tabela deve ser preenchida com valores de 1 a 10, onde 1 é extremamente fácil e 10 muito difícil ou impossível.

Baseado na opinião da manufatura e usando a tabela preenchida como banco de dados, era criado um método de otimização que buscava definir o conjunto de tolerâncias, com menor impacto na fabricação.

Essa análise simplificou consideravelmente o processo de otimização, porém ainda requer um tempo de *set-up* muito grande para poder ser usado imediatamente. Em uma empresa de grande porte, com componentes de materiais diversos, e, com uso de diversos métodos de fabricação diferentes, o seu uso fica restrito ao preenchimento de um número elevado de campos. Em uma empresa automotiva, por exemplo, seria necessário exigir o preenchimento da planilha para cada fornecedor, dentre os inúmeros da companhia.

Outros autores continuaram a expandir os métodos matemáticos de Chase et al (1989), Spotts (1973) e Speckhart (1972), adicionando algumas variáveis pertinentes.

**Rotational Elements**

**External**

**Internal**

<b>TOLERANCE GRADE IT6</b>										
			<b>External</b>				<b>Internal</b>			
			<b>Plain</b>		<b>Complex</b>		<b>Plain</b>		<b>Complex</b>	
a/a	Reference Dimension (mm)	Tolerance Zone T (µm)	L≤3D	L>3D	L≤3D	L>3D	L≤3D	L>3D	L≤3D	L>3D
1	3-10	8 - 9								
2	10-30	11 - 13								
3	30-80	16 - 19								
4	80-180	22 - 25								
5	180-315	29 - 32								
6	315-500	36 - 40								

<b>TOLERANCE GRADE IT7</b>										
			<b>External</b>				<b>Internal</b>			
			<b>Plain</b>		<b>Complex</b>		<b>Plain</b>		<b>Complex</b>	
a/a	Reference Dimension (mm)	Tolerance Zone T (µm)	L≤3D	L>3D	L≤3D	L>3D	L≤3D	L>3D	L≤3D	L>3D
1	3-10	12 - 15								
2	10-30	18 - 21								
3	30-80	25 - 30								
4	80-180	35 - 40								
5	180-315	46 - 52								
6	315-500	57 - 63								

**Figura 20 - Formulário de complexidade de elementos de tolerância**  
 Fonte: Adaptado de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006)

O modelo proposto por Sanz-lobera; Sebastián e Jesus (2010) é fundado sobre o estabelecimento de uma relação de custo-tolerância individualizada considerando a variabilidade existente de recursos de produção a cada momento. O modelo calcula o número de peças que estão fora da especificação e subsequentemente, o número de peças adicionais que devem ser fabricadas para compensar essa perda.

Sivakumar; Balamurugan e Ramabalan (2011) foram pioneiros em juntar o cálculo de otimização de custo de tolerâncias com a seleção de processos. Ambos os assuntos eram previamente tratados de maneira separada. Em seu estudo, de grande complexidade computacional, desenvolveram um conjunto de equações e sistemas e os incluíram em uma rotina de otimização. Não desenvolveram uma interface para o usuário, e devido à grande capacidade computacional necessária para execução, as análises ficam restritas a problemas simples.

Percebe-se pela grande quantidade de referências existentes, que poucas conseguem, de maneira eficaz, prover um método simples, rápido e que forneça informações de valia para os projetistas, quanto ao custo de manufatura relacionado a tolerâncias.

### 2.3.2 Alocação de Tolerâncias para Mínimo Custo de Qualidade

A engenharia de qualidade usa o projeto de um produto como meio para aumentar a confiabilidade dos componentes, predominantemente pela redução da variância das especificações. Basicamente existem dois modos de examinar os requisitos, a fim de reduzir a variação de fabricação de um produto. O primeiro, pela mudança do valor nominal de uma dimensão, alteração essa que, geralmente, não afeta os custos. O segundo é pela alteração específica da tolerância, que como discutido anteriormente, gera custo. Portanto, é sempre preferível mudar os parâmetros nominais de desempenho às tolerâncias, por motivos econômicos.

No ramo de toleranciamento para aperfeiçoamento de qualidade, se destaca Taguchi; Elsayed e Thomas (1989), que iniciaram o estudo desse ramo e criaram uma função de perda de qualidade para variações de tolerâncias. Ainda hoje é referenciado na maioria dos trabalhos sobre o assunto e, portanto, será descrito em maiores detalhes.

Taguchi; Elsayed e Thomas (1989) propuseram que a perda de qualidade deve ser tratada como uma despesa, juntamente com o custo de fabricação. Esta medida de perda de qualidade representa a perda para a sociedade que ocorre quando um produto se desvia do conjunto ótimo de parâmetros de concepção. Os desvios são controlados por tolerâncias. A função perda de qualidade transforma a degradação em um custo, que podem então ser incluídos em uma função objetivo, juntamente com os custos de produção. A função quadrática, mostrada na Figura 21, pode prever uma estimativa para o detrimento de qualidade segundo a característica do produto. A perda é maior que zero se a característica funcional desvia da sua dimensão tida como meta, não importando o tamanho da oscilação. A expressão para cálculo de perda para uma dimensão resultante pode ser calculada então como:

$$L(y) = K(y - m)^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde  $m$  é o valor meta para a dimensão resultante  $y$ . Se um produto tiver uma variação de  $\Delta$  na dimensão e causar uma perda de  $A$ , então a constante  $K$  pode ser determinada por:

$$K = \frac{A}{\Delta^2} \quad \text{Eq.3}$$

A equação 2 provê um meio de verificar a perda para cada componente individual. Porém esse método é apenas válido para processos nos quais produtos com dimensões acima e abaixo das especificadas causam uma perda equivalente. Wu; Chen e Tang (1998) citam um exemplo no qual um projeto adequado de um pistão de um motor deve ter uma folga de  $3\mu\text{m}$  para sua camisa. Porém o motor irá falhar se tal folga for maior que  $10\mu\text{m}$  ou menor que  $1\mu\text{m}$ . Para resolver esses casos Taguchi; Elsayed e Thomas (1989) propôs o uso de uma função assimétrica composta por dois segmentos e mostrada na Figura 22, com valores de  $K$  diferentes para cada segmento.

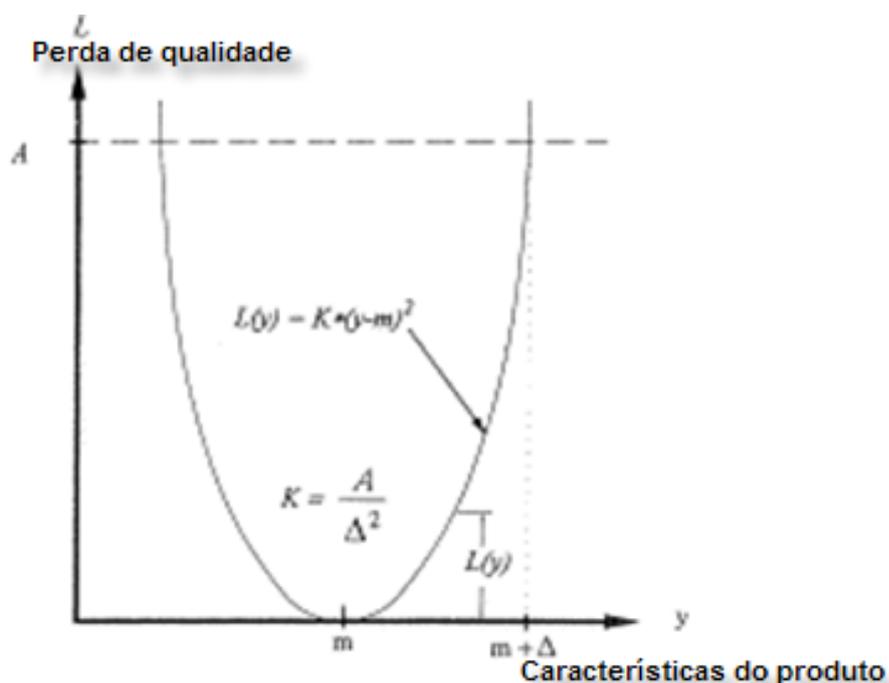
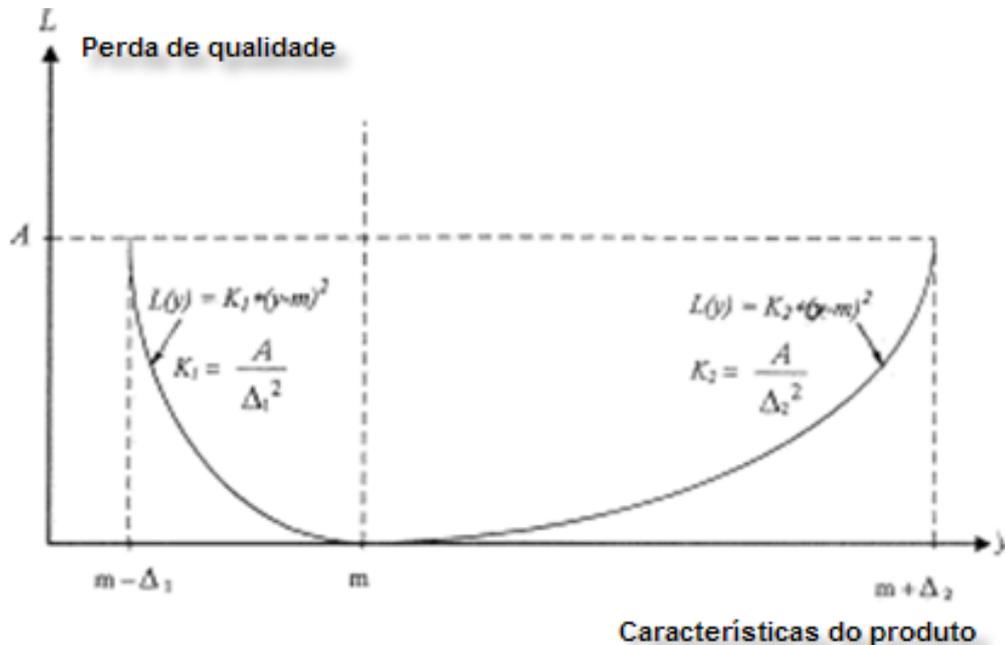


Figura 21 – Curva de perda de qualidade  
Fonte: Adaptado de Taguchi; Elsayed e Thomas (1989)



**Figura 22 – Curva assimétrica de perda de qualidade**  
 Fonte: Adaptado de Taguchi; Elsayed e Thomas (1989)

A partir dos estudos de Taguchi; Elsayed e Thomas (1989), diversos autores desenvolveram métodos próprios para a resolução do custo de perda de qualidade para tolerâncias, como: (CHENG; MAGHSOODLOO, 1995; JEANG, 2011; TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1989; WU; CHEN; TANG, 1998; YE; SALUSTRI, 2003; ZHANG; YANG, 2009). Os dois mais relevantes para o trabalho presente podem ser citados abaixo:

- a) Thornton (1999), propôs um método de tomada de decisões que equilibra o custo de reduzir a variação em relação ao custo das peças de retrabalho. O custo da redução da variação é semelhante à curva da função perda de qualidade de Taguchi. O custo de retrabalho é uma análise simples de passa-ou-não passa. O método centra-se na tomada de decisão em vez da síntese tolerância.
- b) Ye e Salustri (2003) desenvolveram uma função de perda de qualidade dos componentes baseado na vida, ou seja, tratando a duração total do componente como o objetivo do cliente. Uma função foi desenvolvida a partir de relações físicas entre dimensões críticas e

a vida. A função de perda total para o cliente é então determinada incluindo o preço do componente.

Vale ressaltar que a grande maioria dos estudos foi conduzido com base em uma formulação matemática pesada e complexa, tendem a aperfeiçoar com precisão o custo para a síntese de tolerâncias e os métodos aplicados assumem que o componente que será tolerado é novo e com características funcionais independentes.

### 2.3.3 Toleranciamento para Mínimo Custo de Controle

A inspeção de componentes é o processo de verificação que garante que o componente manufaturado está em conformidade com as tolerâncias especificadas. Na fabricação mecânica, geralmente as tolerâncias geométricas e dimensionais são inspecionadas por meio de medições por coordenadas de metrologia. Projetos de inspeção e planejamento são necessários para garantir a agilidade e qualidade da resposta da medição (MAROPOULOS; CEGLAREK, 2010).

O projeto de tolerâncias deve, portanto, considerar o custo da análise das especificações requeridas, visto que a escolha de requerimentos restritos pode ocasionar na necessidade de sistemas de medições extremamente precisos e caros.

Moroni; Petrò e Tolio, (2011) desenvolveram uma análise para calcular o impacto no custo de controle e verificação de tolerâncias. Em seu estudo seccionaram o custo de medição em: i) custo de medição efetivo: que considera o tempo necessário para a execução da atividade e o custo de maquinário e *set-up* para a realização das mesmas e ii) o custo do erro da medição: que considera a probabilidade de erro durante a medição e o conseguinte retrabalho.

Em seu estudo percebe-se que os maiores impactos no custo de medição e controle estão relacionados com o uso de tolerâncias geométricas, que acabam causando a necessidade de aparelhos mais sofisticados de medição e controle mais rigorosos para análise.

#### 2.3.4 Métodos Híbridos de Toleranciamento para Mínimo Custo

Com o maior uso da engenharia simultânea, a quantidade de informação necessária para o perfeito desenvolvimento de um componente em todos os estágios de criação de um produto é cada vez maior. A grande competitividade do mercado levou à popularização do chamado “projeto para x” (onde se entende por “x” qualquer ramo impactado pelo design, pode ser entendido como: manufatura, qualidade, mantinabilidade, custo, entre outros). Tais tendências iniciaram uma nova fase do estudo do toleranciamento para mínimo custo. Uma fase que pretende, com o avanço da pesquisa no ramo de toleranciamento, com modelos cada vez mais sofisticados e tirando grande proveito do poder computacional atual e principalmente, com o auxílio das ferramentas de CAD, CAM e CAE, criar análises de otimização simultâneas para diferentes geradores de custo.

Com os estudos de Taguchi; Elsayed e Thomas (1989) percebeu-se que um aumento do valor de uma tolerância pode causar impactos tanto positivos quanto negativos no custo de um produto. Tolerâncias apertadas são preferidas para garantir a performance e evitar custos de qualidade. Porém, implicam em um alto custo de manufatura. Essa relação conflitante foi o início para os primeiros estudos nessa área e para os primeiros métodos híbridos, ou seja, que consideram em uma mesma análise a melhoria de custo de fabricação e de qualidade. Os mais relevantes para o trabalho em questão são descritos a seguir.

Wu; Chen e Tang (1998) decidiram combinar os efeitos de qualidade e custo de manufatura por meios matemáticos, usando o método geral de toleranciamento para mínimo custo apresentado na Tabela 1 e a equação de perda de qualidade proposta por Taguchi; Elsayed e Thomas (1989) na Equação 2.

O cálculo da perda de qualidade foi baseado em um único produto. Se um lote de produtos é manufaturado, a perda de qualidade média deve ser considerada em vez da perda individual. Nos casos em que a distribuição de probabilidades de produtos é conhecida como uma função de densidade de  $F$ , da dimensão resultante  $y$ , a perda média de  $L$  de um produto de lote pode ser avaliada pela integração mostrada na Equação 4 (WU; CHEN; TANG, 1998).

$$L = \int_{-\infty}^{\infty} F(y)K(y - m)^2 dy = Kz^2 \quad \text{Eq.4}$$

Em que  $z$  é o desvio padrão da dimensão dos produtos medidos a partir de  $m$ , alvo do projeto.

Uma vez que os dados de manufatura só fornecem a informação sobre o custo de produção dos componentes individuais sem relação direta entre a tolerância resultante e o custo total de fabricação de uma montagem, Wu; Chen e Tang (1999) então utilizam um único componente para ilustrar a metodologia de sua concepção.

O gráfico da Figura 23 mostra os valores computados por Taguchi; Elsayed e Thomas (1989) da soma do custo de manufatura com o de perda de qualidade.

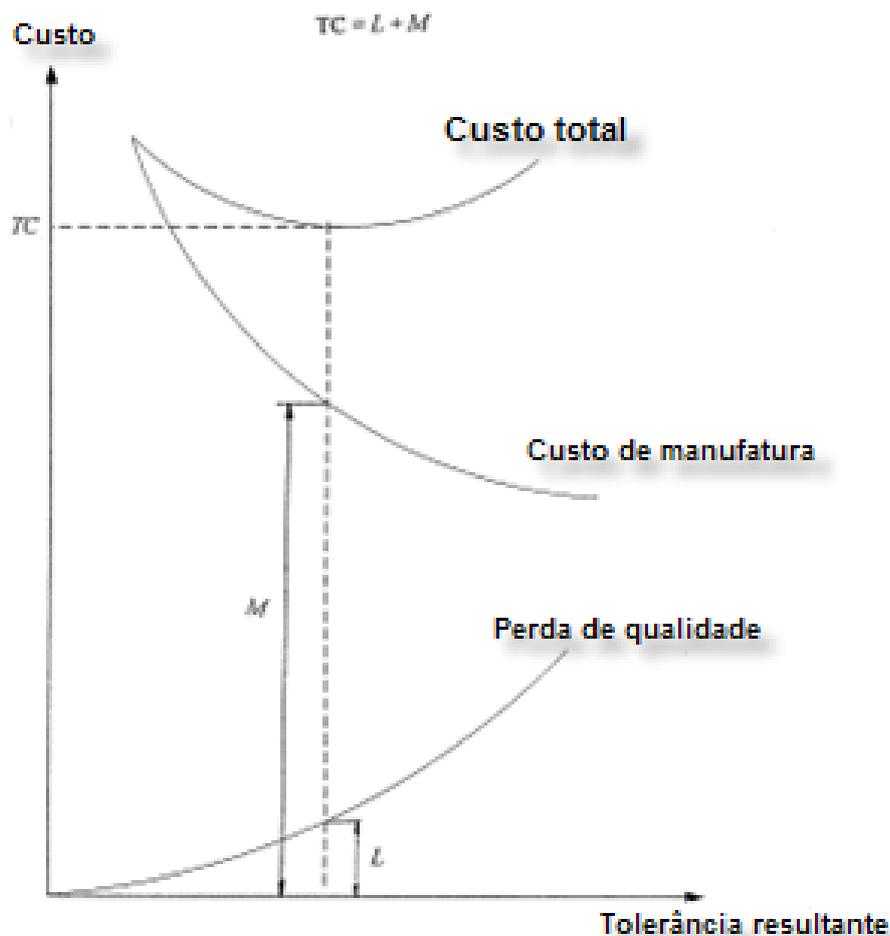


Figura 23 - Custo total de um toleranciamento para mínimo custo e perda de qualidade.  
Fonte: Wu, Chen e Tang (1998)

Pode se perceber no gráfico de custo total (custo de manufatura + qualidade) que existe um ponto de inflexão, que o estudo em questão busca determinar.

O estudo de Wu; Chen e Tang (1998) apresenta certa formulação matemática, não tão complexa e não tão exata, mas de fácil entendimento. Com seu método é possível traçar uma análise e concluir tendências dos custos em relação à tolerância. Pelas razões expostas, foi mais discutido nesse trabalho.

Umaras, (2010) realizou um estudo semelhante ao de Wu; Chen e Tang (1998) chegando em conclusões análogas, mas descrevendo melhor e sintetizando as análises de maneira a possibilitar a fácil replicação.

Diversas referências se basearam em soluções complexas com mecanismos de buscas avançados e com algoritmos específicos a fim de se aperfeiçoar as tolerâncias, gerando modelos com grande precisão, porém com aplicabilidade restrita e necessitando de grande quantidade de informações para as condições iniciais de análise.

Devido à sua natureza quantitativa e complexa, com muitas variáveis a serem consideradas para o seu emprego, não se encaixam completamente no escopo do trabalho e são apenas brevemente analisadas a seguir, na forma do Quadro 2. Basicamente, os trabalhos se resumem em três grandes áreas: os métodos gráficos e analíticos, como os citados anteriormente, os baseados em multiplicadores de Lagrange e os baseados em algoritmos genéticos.

Um produto já existente está limitado ao seu ambiente. Ou seja, quando uma modificação do mesmo é requisitada, a possibilidade de otimização de uma pilha de tolerâncias envolvendo as outras peças do sistema é geralmente inviável. A aplicabilidade dos modelos acima se torna então muito limitada. Para tais casos, uma análise baseada em tomada de decisão com estudos qualitativos e normalizada é mais interessante.

**Quadro 2 - Sumário de análise de otimização de custos de tolerâncias (híbridos).**

<b>Método / Estudo</b>	<b>Particularidade</b>	<b>Forma de Análise</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
Wu; Chen e Tang (1998)	Primeira a fazer a análise.	Gráfica	Facilidade de uso e entendimento. Simples de generalizar	Análises precisas e de otimização são muito limitadas
Umaras (2010)	Descreve melhor as fórmulas e conceitos.			
Chen e Maghsoodloo (1995)	Inclusão de fatores estatísticos e lógicos para melhorar qualidade da análise.			
Choi; Park e Salysbury (2000),	Primeiro a utilizar formulações matemáticas complexas.	Multiplicadores de LaGrange;	Fórmulas matemáticas complexas. Difícil de generalizar.	Análises mais precisas.
Peng, (2012)	Incluiu a análise de perda de qualidade com o tempo (degradação).			
Lee e Johnson, (1993) Shan; Roth e Wilson (2003) Al-Ansary e Deiab (1997)	Uso de grande capacidade computacional	Algoritmos genéticos	Exige o desenvolvimento de algoritmo complexo específico para cada caso estudado, sendo de difícil aplicação prática.	Precisão de análise em alto nível, para o caso específico.

Novamente, na grande gama de referências do assunto, pouco se verifica o uso de sistemáticas simples e de fácil e imediata aplicação, com foco em engenheiros e projetistas iniciantes, no toleranciamento para uma generalidade de casos e para a modificação ou criação de um componente simples, desagregado de sua montagem.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES

Como se pôde observar, a atribuição de tolerâncias é uma linha de pesquisa abrangente. Normas, métodos, modelos e metodologias diversas existem a fim de explorar todos os detalhes e impactos do assunto. Nota-se, que repercussão da correta seleção dos valores não é apenas restrita à funcionalidade do produto, mas, também, ao seu custo e a todas as etapas do seu ciclo de vida.

Com referência ao processo de especificação de tolerâncias, percebe-se que, apesar de haver grande quantidade de estudos no ramo e, da existência de diversas ferramentas e técnicas para o auxílio do projetista, como evidenciado na pesquisa realizada e presente no Apêndice A que ainda estas não são completamente difundidas na indústria. Muitas definições ainda são baseadas no conhecimento prévio. Como exemplo mostra-se os resultados apontados no Gráfico 19, Gráfico 20 e Gráfico 21. Apenas uma parte dos projetistas entrevistados utiliza algum método de auxílio à seleção de tolerâncias e quase nenhum faz uso de otimização de custo por variação dimensional.

No que se concerne aos conceitos básicos de tolerâncias, concepções antigas e baseadas em normas ainda permanecem válidas e são frequentemente utilizados em estudos atuais. Os procedimentos básicos para o empilhamento, o uso de tolerâncias geométricas e técnicas como a utilização dos princípios de máximo material foram explanados. Percebe-se que a aderência desses processos na indústria é maior, como mostrado nos resultados presentes no Apêndice A, onde a maioria dos entrevistados confirmou possuir as habilidades técnicas referentes ao assunto. Tal fenômeno pode ser atribuído ao fato de os métodos estarem atrelados à normas internacionais e, portanto, treinamentos e a obrigação de uso nas empresas são incentivados.

Realizando-se uma análise crítica dos estudos que visaram a otimização de custos de tolerância, percebe-se que prevalecem os referentes ao custo de manufatura, à perda de qualidade e à junção de ambos, os denominados híbridos. Predominantemente, há formulações matemáticas complexas e, restrições às aplicações específicas. Um pequeno número de estudos desenvolveu métodos qualitativos e tentou simplificar a análise. Pode-se afirmar que a abrangência desses métodos no mercado é reduzida também devido a esses fatores.

### **3 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO E FERRAMENTA DE CARACTERIZAÇÃO DE CUSTOS DE TOLERÂNCIAS**

Este capítulo visa abordar o processo adotado para o desenvolvimento do modelo de caracterização de custos de tolerâncias dimensionais e geométricas, os critérios utilizados e as ponderações estabelecidas para o funcionamento do mesmo. O modelo visa integralmente suprir o projetista com informações relevantes e aplicadas a fim de facilitar a especificação de tolerâncias.

Nas seções seguintes se descreve a estrutura do modelo proposto, seus processos e funcionalidades.

#### **3.1 PREMISSAS PARA CRIAÇÃO DO MODELO**

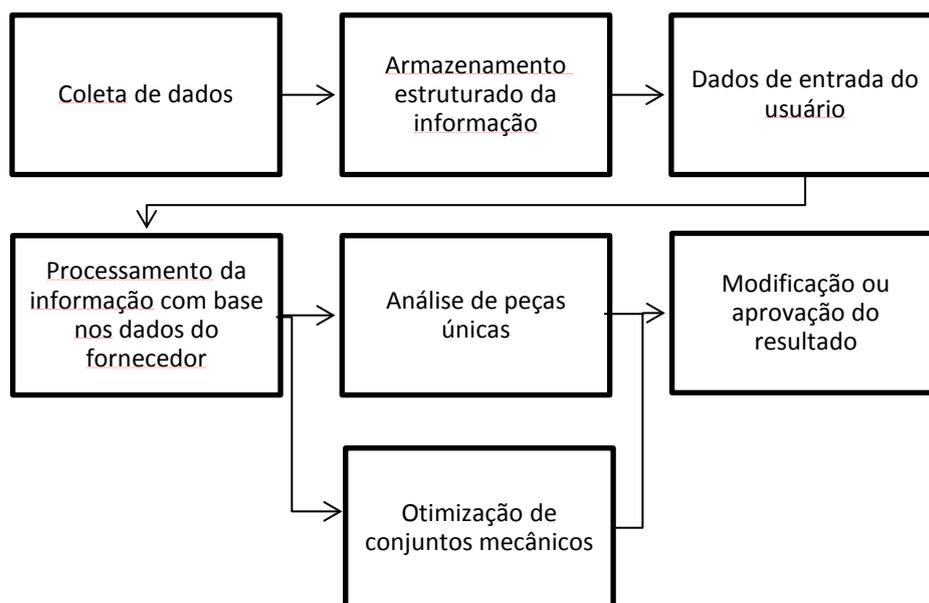
O processo de dimensionamento e de especificação de tolerâncias consiste numa etapa dinâmica da fase de detalhamento de um produto. Existem diversas abordagens e fontes de informação disponíveis para tal, conforme descrito na Seção 2.3. Do mesmo modo, a Seção 2.4 aponta a dificuldade e complexidade da utilização dessas sistemáticas e os possíveis erros que podem ocorrer com a falta de documentação e padronização nesse processo de dimensionamento.

Através dos dados obtidos a partir do instrumento de coleta de informações contido no Apêndice A e, também, da caracterização da literatura, foram estabelecidas algumas premissas que fundamentam o modelo. São elas:

- a) Contemplar um grande número de materiais, processos e empresas ou fornecedores no seu banco de dados;
- b) Armazenar de maneira estruturada esses dados, permitindo rápido acesso e atualizações;
- c) Tratar os custos de maneira relativa, com base na dificuldade de assegurar uma tolerância no componente fabricado;
- d) Prover uma base inicial para o processo de especificação, mostrando possíveis combinações de tolerâncias e seus custos relativos;
- e) Fornecer informações suficientes para auxiliar na decisão do valor de tolerância a ser empregado em um projeto.

Demonstra-se na Figura 24, como ocorre o fluxo de dados, de processos, de cálculos e seus respectivos módulos. O intuito do modelo é capturar dados

concretos do maior número possível de fabricantes de componentes e de fornecedores de serviços de medição e controle metrológicos, além das demandas de qualidade esperada do produto. Visando prover para o usuário um resultado de custo híbrido que contemple: qualidade, controle e manufatura e que possibilite a eventual otimização de projeto, seja de uma peça única (separada do seu contexto) ou de um sistema mecânico completo.



**Figura 24 – Fluxo processual do modelo proposto**

Nas próximas seções serão descritos, em detalhes, cada um desses processos e, após, examinados seus subsequentes subprocessos.

### 3.1.1 Coleta de Dados

Como mostrado na Seção 2 do Apêndice A, grande parte das referências usadas para a otimização de custos no toleranciamento pelos projetistas sondados vêm da literatura, dos fornecedores ou de guias previamente utilizados. Tendo em vista essa utilização frequente, é proposto o módulo descrito a seguir, cujo intuito é capturar e armazenar informações relevantes da fabricação e controle de peças mecânicas de diferentes fontes, para que possam ser usados na eventual análise das tolerâncias.

Considerando a revisão da literatura, optou-se por empregar o modelo de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006) como base para a coleta de dados. Dentre os diversos modelos estudados este é o que apresenta melhor aderência para o escopo deste trabalho, visto que, aborda de maneira relativa os custos de tolerância. São propostas modificações para melhorar sua utilização no cotidiano dos projetistas, incluindo os aspectos de qualidade, controle e, também, de tolerâncias geométricas.

Os elementos de tolerância, descritos na Seção 2.2.2, são desdobrados em suas funções e fornecidos aos fabricantes dos componentes ou ao responsável pela inserção de dados, via uma tabela, para que relações sejam estabelecidas entre tolerância e custos. Tal tabela deve, preferencialmente, capturar informações do ambiente de fabricação onde o trabalho em particular será realmente executado, mas pode ser preenchida também por qualquer outra pessoa que tenha um conhecimento na fabricação do produto, ou mesmo com dados extraídos da literatura. Na presente abordagem, as capacidades de execução com precisão, em conjunto com uma estimativa quantitativa de seu custo relativo são registradas.

O conceito de custo relativo que deve ser preenchido representa, em termos comparativos, os custos necessários para a perícia, esforço e recursos, conforme as tolerâncias se tornam mais estreitas. Ao preencher a tabela, o profissional especialista deve anotar o custo relativo dos elementos de tolerâncias utilizando a escala de dez notas, retiradas do Quadro 3.

**Quadro 3 - Relação custo-esforço para atingimento de tolerância.**  
**Fonte: Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006)**

<b>10</b>	Infactível
<b>9</b>	Extremamente Difícil
<b>8</b>	Muito Difícil
<b>7</b>	Difícil
<b>6</b>	Factível com esforço
<b>5</b>	Factível
<b>4</b>	Facilmente Atingível
<b>3</b>	Fácil
<b>2</b>	Muito Fácil
<b>1</b>	Extremamente Fácil

O formulário deve ser estruturado de modo a abordar todas as classes dos elementos de tolerância nas faixas de tolerância IT6 a IT17, tamanhos 3-500 mm e pode ser estendido a graus IT mais restritos ou abertos.

Em seguida, a fim de endereçar o toleranciamento geométrico e a qualidade, propõe-se expandir o modelo de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006), inserindo um novo conjunto de campos ao formulário. Para evitar um aumento exponencial de dados a serem preenchidos, optou-se por tratar esses aspectos como “multiplicadores de complexidade”. O fabricante deve fornecer como informação para o processo de manufatura sendo examinado, valores dentre os definidos no Quadro 4, que multiplicam o nível de complexidade anotado nos outros campos do formulário, caso as tolerâncias especificadas apresentem algum modificador. Os valores da Tabela 6 foram definidos entre 0.5 a 2, a fim de não gerar distorções na sensibilidade dos valores. Os limites estabelecidos foram tais que: um valor de multiplicador 2, pode facilmente transformar uma tolerância 5 (factível) em 10 (infectível) e vice-versa com o valor 0.5. Caso o valor especificado, multiplicado pelo fator, ultrapasse 10, considera-se que ele atinge o limite máximo estabelecido e assume-se 10.

**Quadro 4 - Multiplicadores para os modificadores.**

<b>2.00</b>	Dificulta muito
<b>1.90</b>	
<b>1.80</b>	
<b>1.70</b>	
<b>1.50</b>	
<b>1.20</b>	
<b>1.00</b>	Neutro
<b>0.90</b>	
<b>0.70</b>	Facilita Muito
<b>0.50</b>	

Os modificadores escolhidos para compor o modelo foram:

- a) Modificadores geométricos: forma, orientação, perfil, batimento e localização, a fim de contemplar as tolerâncias geométricas;
- b) Modificadores de material: máximo material e mínimo material, como visto na Secção 2.2.4.1;
- c) Criticidade: condição severa, (que pode causar parada não programada) e condição crítica (que gera riscos de segurança),

modificadores que quando presentes fazem com que o fornecedor necessite assegurar um controle fino das tolerâncias entregues. É incluído a fim de possibilitar uma análise posterior do custo de qualidade.

Com base nas descrições anteriores, mostra-se na Figura 25, como é o plano para a tabela de coleta de dados proposta pelo modelo. A tabela Grau IT, deve ser replicada para cada grau de tolerância IT que pretende ser avaliada para o processo em questão.

#### Preenchimento com valores do Quadro 3

Geometrico					Modificadores			Criticalidade	
Forma	Orientação	Perfil	Batimento	Localização	M	L	E	SC	CC

GRAU IT									
		Rotacional				Prismático			
		Interno		Externo		Interno		Externo	
Dimensão		Plano	Complexo	Plano	Complexo	Plano	Complexo	Plano	Complexo
3	10								
11	30								
31	50								
51	80								
81	180								
181	315								
316	500								

#### Preenchimento com valores do Quadro 4

Figura 25 - Planejamento da planilha de coleta de dados

### 3.1.2 Armazenamento das Informações

Todas as informações coletadas na seção anterior são armazenadas em um banco de dados com os seguintes requisitos:

- a) Ser de fácil acesso ao usuário;
- b) Permitir que os processos do modelo acessem as informações rapidamente;
- c) Evitar duplicidade de informações;
- d) Não permitir valores diferentes dos pré-estabelecidos pelo sistema (i.e., valores alfanuméricos em campos numéricos);
- e) Definir de maneira clara e organizada os dados necessários a serem preenchidos e os já existentes.

Como as informações geradas são numéricas e não se supõe um elevado número de dados, o emprego de tabela com seletores dos três parâmetros disponíveis para a alteração é o escolhido. Os parâmetros para manufatura são: material, processo e fabricante. Para controle: tipo de medição, tempo de preparação e medidor.

### 3.1.3 Dados de Entrada do Usuário

O modelo prevê três possibilidades de análise as quais o projetista pode realizar durante a etapa de projeto detalhado, são elas:

- a) Mudança de peças únicas, inseridas em montagens já pré-concebidas;
- b) Verificação de tolerâncias de peças correntes, a fim de otimizar custo e eliminar sobre dimensionamento;
- c) Toleranciamento de um conjunto de peças.

Para os dados de entrada necessários aos itens a) a c) o modelo requer que o usuário forneça as informações para a busca da tolerância no banco de dados. Informações primárias, que não variam de dimensão para dimensão. São elas:

- a) Material do componente;
- b) Fabricante;
- c) Controlador;
- d) Tipo de Controle;
- e) Tempo de setup.

Informações secundárias, que são diferentes para cada dimensão:

- a) Dimensão toleranciada;

- b) Processo de fabricação;
- c) Caracterização do elemento de tolerância;
- d) Modificadores;
- e) Severidade em caso de falha.

### 3.1.4 Processamento da Informação com Base nos Dados do Fornecedor

Baseado nas entradas fornecidas pelo usuário, o modelo deverá realizar uma busca na base de dados já preenchida previamente e retornar os valores. Os processamentos realizados nessa etapa são descritos na Figura 26.

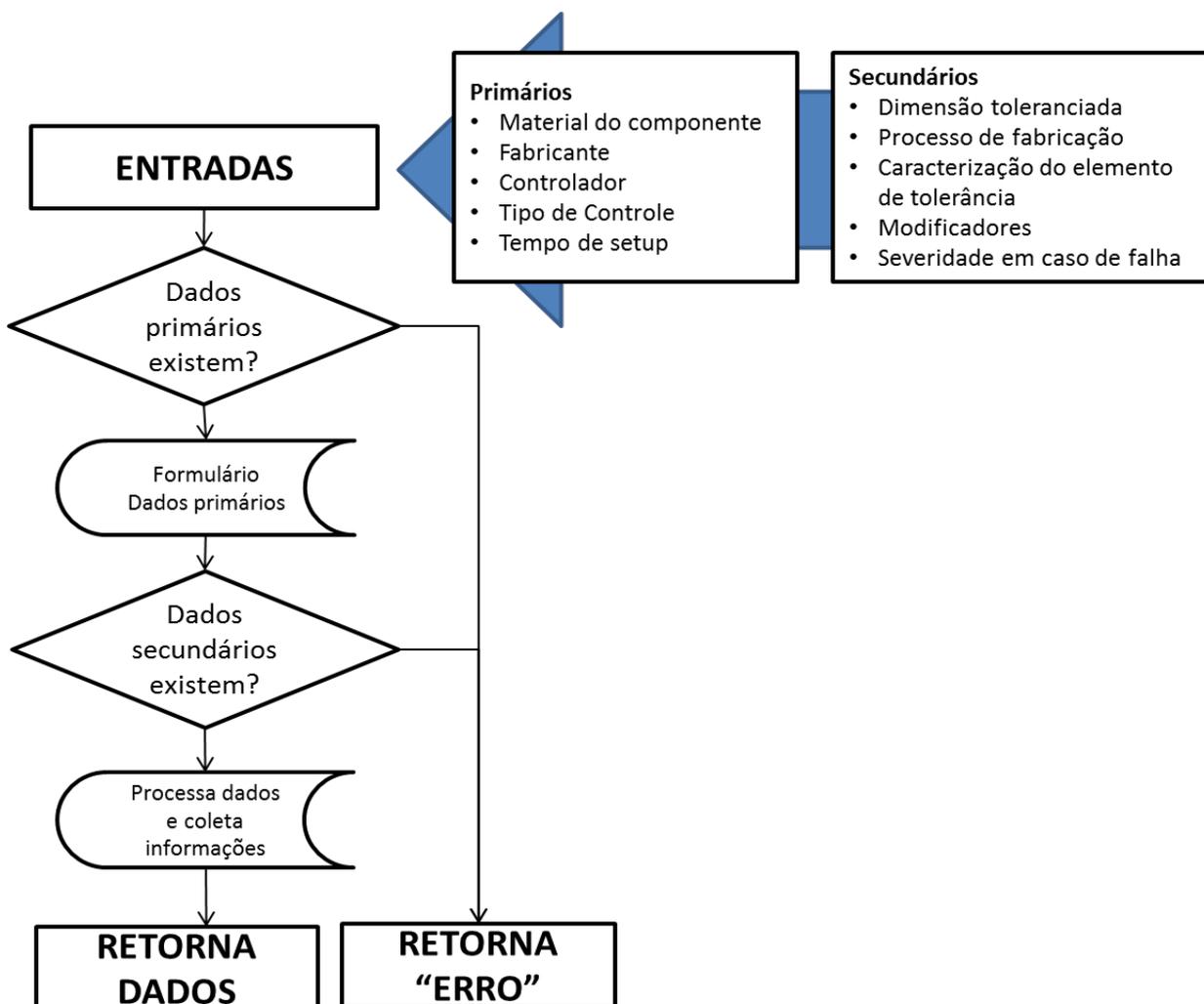


Figura 26 – Processo de busca dos dados na base de dados

O modelo busca em uma primeira etapa a tabela de dados correta com base nas entradas primárias, a fim de verificar se a informação existe no banco de dados.

Em seguida, realiza a procura das entradas secundárias. Se a informação existe, ele retorna o valor preenchido previamente. Senão, retorna uma mensagem de erro.

### 3.1.5 Análise de Custos

Nessa etapa, descreve-se os processos de análise de custos de peças simples ou isoladas e de otimização de custos de montagens mecânicas.

Nesses dois processos, faz-se necessário um novo conjunto de dados de entrada do usuário para a análise dos custos de qualidade. Esses modificadores serão descritos na subseção a seguir.

#### 3.1.5.1 Modificadores de qualidade

Durante a etapa de análise de peças simples e de otimização de conjuntos, uma série de dados deve ser informada pelo usuário para cada tolerância, a fim de realizar a análise de custo de qualidade.

Baseado no trabalho de Taguchi; Elsayed e Thomas (1989), determina-se que no caso de uma falha de uma dimensão, seu custo associado varia com a sua severidade e a sua possibilidade de ocorrência.

Tendo como base a Equação 3, descrita na Seção 2.3.2, e visando-se manter a mesma escala do modelo, seleciona-se os valores de 1 a 10 e é então estabelecida a relação do Quadro 5 para o quesito de ocorrência (O). Essa relação visa representar a possibilidade de uma especificação desviar do seu valor nominal durante a fabricação em relação ao grau IT de sua tolerância. Quanto maior o valor da tolerância, considera-se maior a probabilidade de que o valor resultante da dimensão produzida desvie-se da nominal.

Para a definição do quesito severidade (S), define-se necessária a atuação do usuário seguindo os critérios baseados na ferramenta FMEA, descrita em Stamatis (2003) e mostrado no Quadro 6. Para cada valor de 1 a 10, estima-se o efeito causado no produto final caso a tolerância especificada falhe.

**Quadro 5 - Relação grau IT e ocorrência**

Grau IT	Ocorrência (O)	Probabilidade de desvio da nominal
6	1	Extremamente baixa
7	2	Muito baixa
8	2	Muito baixa
9	3	Baixa
10	4	Baixa
11	5	Normal
12	6	Alta
13	7	Alta
14	8	Muito alta
15	9	Muito alta
16	10	Extremamente alta

**Quadro 6 - Relação de severidade**  
**Fonte: adaptado de Stamatis (2003)**

Ranking	Severidade (S)	Critério
1	Nenhuma	Sem efeito
2	Muito pequena	Efeito quase imperceptível
3	Muito baixa	Efeito quase imperceptível
4	Baixa	Defeito pouco perceptível
5	Normal	Objeto operante, mas com perda de conveniência baixa
6	Alta	Objeto operante, mas com perda de conveniência alta
7	Alta	Objeto operante, mas com perda de performance
8	Muito alta	Objeto inoperante
9	Muito alta	Risco de segurança, com aviso
10	Extremamente alta	Risco de segurança, sem aviso

Com o objetivo de assegurar normalização entre os valores de qualidade e os de manufatura e controle, define-se a Equação 5, cujo intuito é ponderar os valores de severidade (S) e ocorrência (O) para a mesma base. É utilizada para calcular o fator qualidade (q) de cada dimensão:

$$q = \frac{S \times O}{10} \quad \text{Eq. 5}$$

### 3.1.5.2 Análise de custo de peças isoladas

Com o resultado da busca desse processo, espera-se auxiliar o projetista no toleranciamento e na seleção dos valores de tolerâncias, averiguando a relação custo/benefício de uma tolerância em um componente específico, sem levar em conta sua montagem e suas pilhas funcionais de tolerâncias. Descreve-se o fluxo proposto na Figura 27.

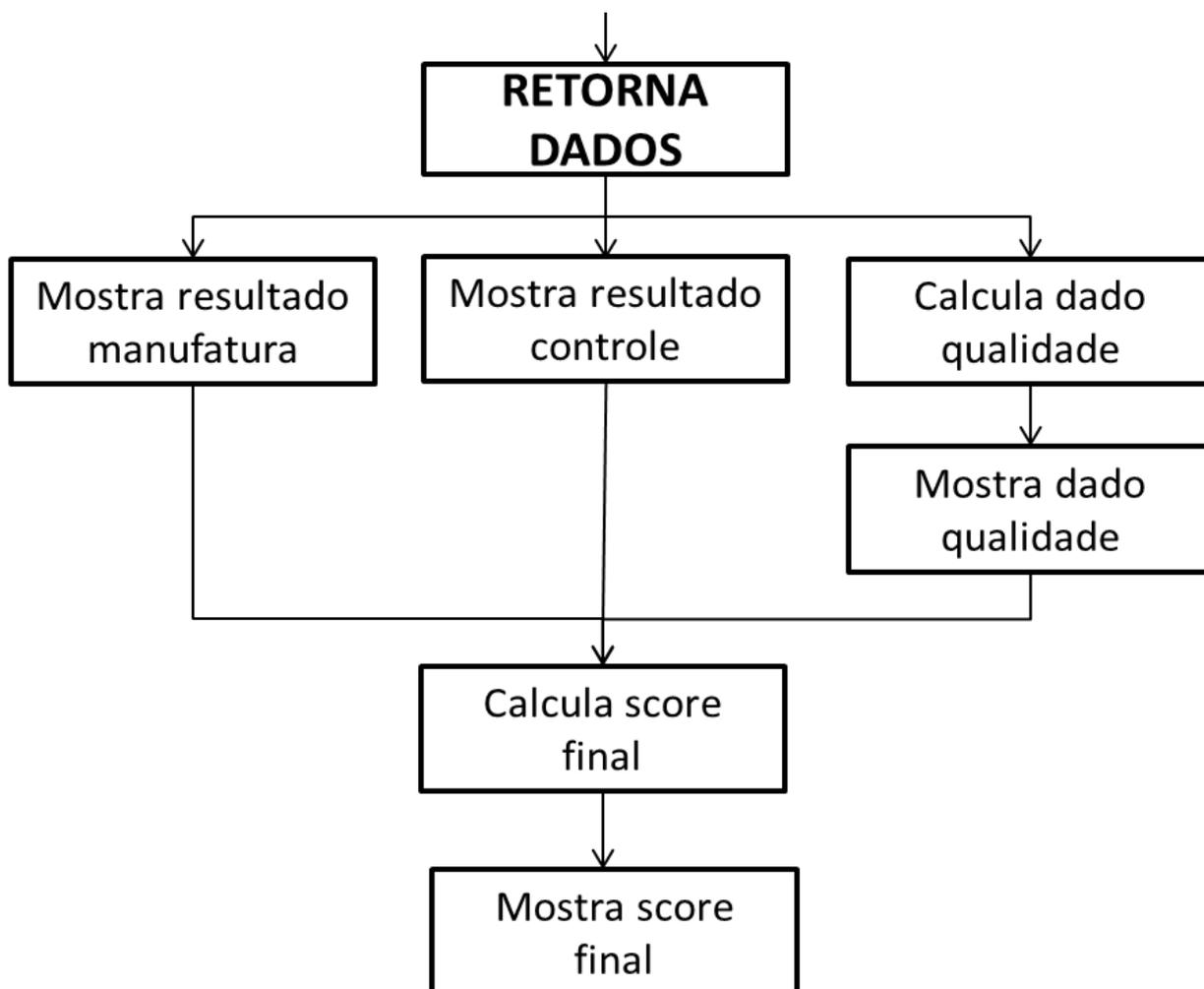


Figura 27 – Processo que retorna os valores resultados ao usuário

Deve ser utilizado nas mudanças corriqueiras de componentes, ou, na criação de novos, similares aos já existentes e que devem ser montados em ambientes conhecidos, onde a mudança de dimensões ou tolerâncias de outras peças não é recomendável. Outra aplicação possível é averiguar projetos já na fase final de concepção, ou até mesmo já em produção, capturando sobre toleranciamentos originários da fase de concepção que geram um sobre-custo desnecessário.

O processo é iterativo. Ou seja, cada mudança nos dados de entrada do usuário vai resultar por consequência em uma nova análise e o modelo retornará um valor diferente. O usuário deverá estar apto a rapidamente realizar a busca no banco de dados com base na sua entrada e ao mesmo tempo conduzir diversos testes verificando cada vez o valor resultante e analisando os impactos produzidos.

### 3.1.5.3 Otimização de conjuntos mecânicos

O módulo de otimização de conjuntos mecânicos visa examinar e aprimorar uma pilha de tolerâncias de uma montagem completa de componentes. Possui uma abordagem semelhante aos trabalhos de Wu; Chen e Tang (1998) e Umaras (2010). Assim, o modelo desenvolvido visa criar uma pilha de tolerâncias que atende o requisito funcional e, ao mesmo tempo, adere a meta especificada. No caso desse trabalho, a melhor relação custo/qualidade. A descrição do processo encontra-se detalhada na Figura 28.

Os dados de entrada do usuário, necessários para a otimização são:

- a) Precisão da análise (p): valor da iteração que será feita na otimização (i.e., caso seja especificado 0.1mm, o modelo realizará a verificação da montagem para cada variação de 0.1mm nas tolerâncias);
- b) Meta da montagem (m): valor funcional para o qual a pilha de tolerâncias deve atender (i.e., valor de folga entre furo e parafuso, uma folga entre mancal e eixo ou uma distância entre paredes);
- c) Ponderações: de manufatura (M), de qualidade (Q) e de controle (C). Valores de 0 a 10, que permitem ao usuário um controle da análise (i.e., caso o usuário deseje realizar uma análise tomando em conta

apenas a otimização dos custos de manufatura deve zerar as ponderações de qualidade e custos).

- d) Dados primários e secundários para cada tolerância da pilha, como descrita na Seção 3.1.3;
- e) Dados de qualidade para cada tolerância, como descrita na Seção 3.1.4.1.

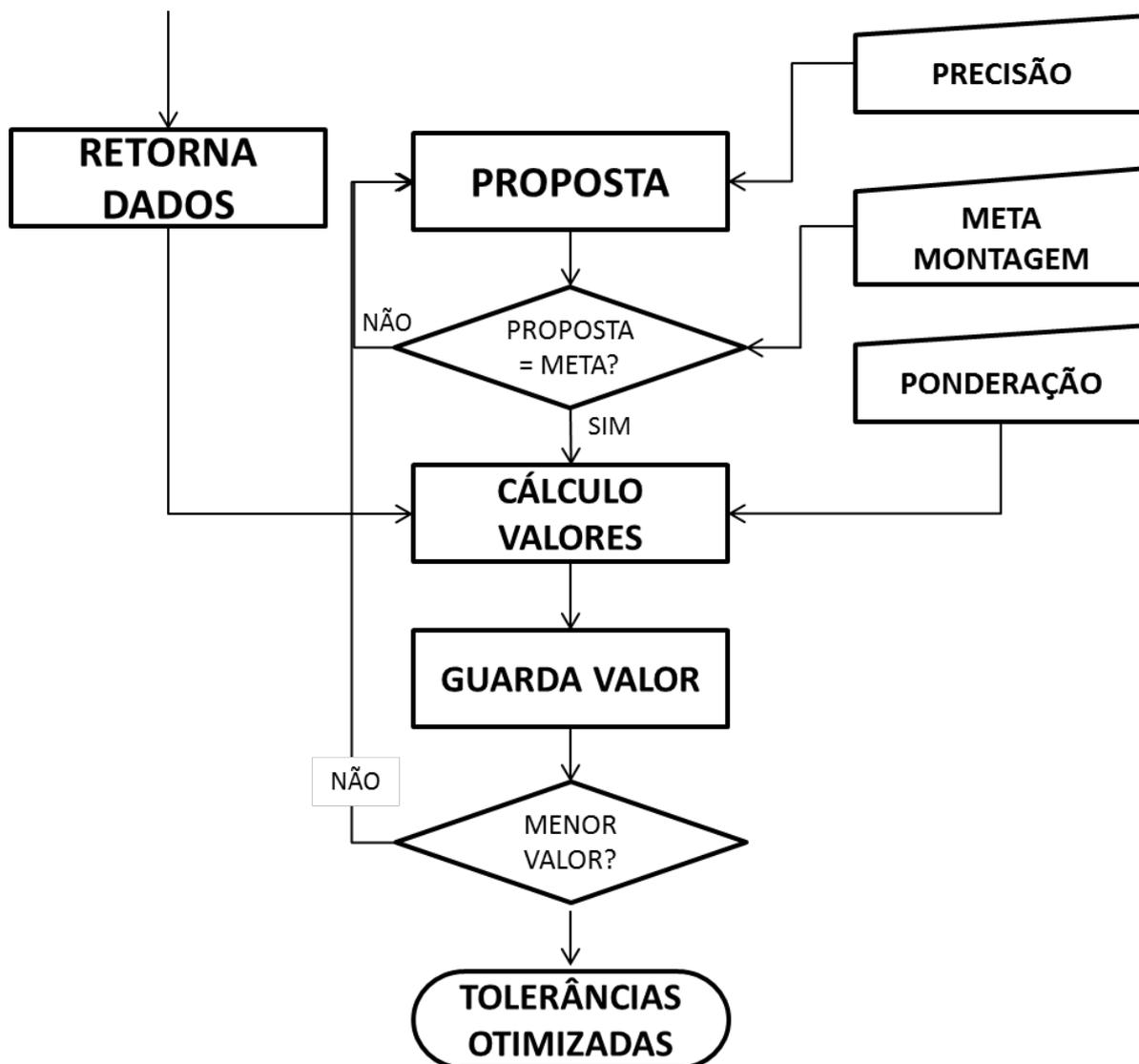


Figura 28 - Processo de otimização de tolerâncias

Para o processamento dos dados, considerando a precisão ( $p$ ) de variação fornecida pelo usuário, o modelo gera uma proposta de somatório de tolerâncias simples  $t_i$ . Baseada no modelo de análise de pior caso, essa proposta é testada

contra a entrada da meta de montagem ( $m$ ), o valor de tolerância ao qual a montagem deve atingir, conforme mostrado na Equação 6.

$$se \sum_{i=1}^{\frac{m}{p}} t_i = m \quad \text{Eq.6}$$

O modelo cria propostas e as verifica até que o resultado da Equação 6 seja verdadeiro (atinge o requisito  $m$ ). Nesse momento, coleta as informações do processo da Seção 3.1.2, que possui como base as entradas do usuário, faz o somatório dos valores e os otimiza a fim de procurar o menor somatório. Essa operação é descrita pela Equação 7.

$$\sum_{i=1}^n \frac{Mm_i + Qq_i + Cc_i}{M + Q + C} \rightarrow \min \quad \text{Eq.7}$$

Fatores de ponderação, para que o usuário possa controlar sua análise, a fim de direcionar a otimização, são utilizados na Equação 7. Permite-se, por exemplo, caso conclua que os dados de qualidade não são confiáveis, zerar essa ponderação para que ela não seja levada em conta na otimização. Define-se então,  $M$  a ponderação para manufatura,  $Q$  a ponderação para qualidade,  $C$  a ponderação para controle,  $m_i$ ,  $q_i$  e  $c_i$  os valores de manufatura, qualidade e controle resultantes do processo de coleta de informações, respectivamente para as tolerâncias únicas  $i$ , do total de  $n$ .

O modelo realiza a operação diversas vezes, a fim de encontrar o valor mínimo da Equação 7, para as propostas que passaram pelo teste lógico da Equação 6. Quando o valor é encontrado, o modelo então apresenta ao usuário os resultados ótimos de tolerâncias para cada especificação.

### 3.1.6 Modificação ou aprovação do resultado

Com base nas saídas dos processos das Seções 3.1.5.2 e 3.1.5.3, o usuário pode tomar decisões de manter ou descartar o resultado apresentado pelo modelo. Caso observe, por exemplo, que sua premissa inicial de teste não produziu o resultado previsto o mesmo pode retornar para as etapas anteriores do modelo e realizar alterações nos dados de entrada a fim de realizar o teste novamente.

Quando o resultado lhe é adequado, o projetista obterá valores com um grau de otimização de custo mais elevado que o inicial.

## 3.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DO MODELO

Essa seção pretende detalhar o desenvolvimento da ferramenta que faz a interface do modelo com o usuário, seus módulos e seu modo de operação.

Com o intuito de atender aos objetivos do trabalho, desdobram-se os requisitos da ferramenta, sendo eles:

- a) Ser de fácil acesso e reduzida complexidade de uso;
- b) Capturar de maneira simples a intenção do projetista;
- c) Permitir a coleta e acesso rápido aos dados disponíveis;
- d) Ser implementada em plataforma acessível, que os projetistas já possuam contato e experiência;
- e) Ser aberta, permitindo ao usuário modificar aspectos visuais e do modelo a fim de se adaptar a sua realidade e coletar sua experiência.

Para tanto, optou-se por empregar planilhas utilizando o software Microsoft Office Excel, com programação VBA. Na ferramenta foram implementadas as seguintes abas visíveis ao usuário:

- a) Tabelas de Manufatura e Controle;
- b) Otimização;
- c) Inspeção.

E as abas não visíveis:

- a) Dados de Manufatura;
- b) Dados de Controle.

Cada uma dessas abas é descrita nas seções seguintes e seu funcionamento exemplificado.

### 3.2.1 Tabelas de Coleta de Dados de Manufatura e Controle

As tabelas de coleta de informação visam contemplar a definição do modelo descrita na Seção 3.1.1. Essas tabelas, podem ser preenchidas tanto pelo projetista (a partir de questionamentos aos fabricantes ou controladores de um componente) ou diretamente, pelos próprios fabricantes.

O formato de planilha foi escolhido por ser o tipo de entrada de dados e de manuseio muito comum na engenharia, um formato que permite a visualização simultânea de uma grande quantidade de dados e facilita também o preenchimento de valores que são repetidos em células próximas.

A aba é dividida em cinco partes, como mostrado na Figura 29<sup>9</sup>. Cada setor, identificado por índice numérico é descrito a seguir:

1. Área de seleção primária: nessa região o usuário seleciona, a partir dos três parâmetros primários definidos anteriormente no modelo, qual o conjunto de tabelas será acessado. A região conta também com um botão para salvar as informações na base de dados;
2. Tabela dos multiplicadores: nessa região o usuário deve preencher os valores dos multiplicadores de tolerância geométrica, de material e de criticidade;
3. Um guia de informação complementar para reforçar ao usuário sobre os valores aceitáveis e suas referências que podem ser empregados no preenchimento;
4. Guia de informação mostrando como é realizada a classificação dos elementos de tolerância utilizados no aplicativo;

---

<sup>9</sup> A ferramenta é apresentada nas figuras com títulos e células em inglês. Como a verificação posterior será realizada em âmbito internacional e a futura possível aplicação da ferramenta ocorrerá em diferentes sítios de uma multinacional, foi decidido desenvolvê-la dessa maneira.

5. Região de coleta de dados: contendo uma tabela para todos os elementos de tolerância possíveis dentro de cada grau de tolerância IT, na qual o usuário deve preencher com os valores descritos na região 3.

Após a seleção do processo, material e nome do fornecedor (para a aba manufatura), ou do procedimento, tempo de setup e fornecedor (para a aba controle) pelos seletores mostrados na área 1, os responsáveis pelo processo de fabricação e pelo controle do componente devem preencher o formulário de coleta de dados, mostrado na área 5. Preenchimento esse, que deve ser realizado com valores relativos de percepção de custo para cada elemento de tolerância (discutidos na Seção 3.1.1), nos graus de precisão IT de 6 a 17 e na escala de dimensão de 3-500mm, conforme a tabela da área 3. Desta forma, associa-se o grau dificuldade da realização de cada combinação de elemento de tolerância com seu devido processo de fabricação ou controle.

Devem, também, preencher com base na tabela da área 3, os multiplicadores de dificuldade gerados pela alocação de tolerâncias geométricas, na área 2.

Apesar da quantidade de campos ser relativamente extensa, existe a necessidade de preenchimento uma única vez, visto que tais dados serão gravados e usados apenas como dados de entrada para cálculo em etapas seguintes.

Retornos são enviados aos usuários, para facilitar a compreensão e impedir a entrada de dados errôneos, tais como:

- a) Aviso de porcentagem de células preenchidas;
- b) Mensagem informando que os dados foram salvos na ativação do botão “Salvar”;
- c) Formatação condicional com cores diferenciadas para cada valor colocado na célula, mostrando sua intensidade;
- d) Validação de dados, não permitindo a entrada de dados diferentes de 0 a 10.

Material

Procedure **3D machine**

Setup Time **High**

Supplier **Y**

SAVE

Geometric				Modifiers			Criticality	
Orientation	Profile	Runout	Location	M	L	E	SC	CC
1,2	1,5	1,2	1,5	0,9	1	1,2	1,5	1,9

Rotational Elements

Prismatic Elements

		Rotational				Prismatic					
		Internal		External		Internal		External			
Dimension	Tolerance	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex		
3	10	++0,010	++0,016	6	6	6	7	6	6	5	6
11	30	++0,016	++0,023	5	6	5	5	5	6	3	6
31	50	++0,023	++0,027	5	6	5	5	5	6	3	6
51	80	++0,027	++0,032	5	6	5	5	5	6	4	6
81	180	++0,032	++0,043	5	6	4	6	5	6	5	5
181	315	++0,043	++0,054	5	5	4	5	5	6	5	5
316	500	++0,054	++0,065	6	6	5	6	6	6	6	6

IT6	100%
IT7	100%
IT8	100%
IT9	100%
IT10	100%
IT11	100%
IT12	100%
IT13	100%
IT14	100%
IT15	100%
IT16	100%
IT17	100%

Modifiers	Values
2,00 Highly Difficult	10 Unfeasible
1,90 Difficult	9 Extremely Difficult
1,80	8 Very Difficult
1,70	7 Difficult
1,50	6 Feasible with effort
1,20	5 Feasible
1,00 Neutral	4 Easily achievable
0,90	3 Easy
0,70 Highly Facilitates	2 Very Easy
0,50	1 Extremely Easy

Higher Precision

↑

Figura 29 - Aba de coleta de dados, mostrando as tabelas para grau IT7

As informações são armazenadas no momento que o usuário pressiona o botão “Salvar” e são carregadas automaticamente quando o mesmo muda para a opção de seleção de processo, material ou fornecedor.

Os dados são armazenados na mesma planilha Excel. Como são dados numéricos simples, que não criam documentos de tamanho excessivo, foi decidido manter a base de dados no mesmo arquivo a fim de facilitar a disseminação da ferramenta sem a necessidade de arquivos anexos ou consulta a banco de dados associados em outros arquivos ou plataformas.

### 3.2.2 Aba de Verificação

A aba de verificação visa atender ao requisito do modelo descrito na Seção 3.1.5.2, onde o usuário examina um projeto já concebido que deve ser verificado a fim de se analisar as devidas melhorias com relação ao custo e possíveis erros de sobre-dimensionamento. Para tanto, deve-se preencher os dados de elemento de tolerância de cada uma das dimensões e recebe-se como retorno o custo relativo de cada dimensão e, também, do projeto como um todo.

A aba pode ser descrita em cinco áreas, como mostrado na Figura 30, são elas:

1. Resultado da análise: região que retorna os valores relativos de custo do projeto completo ao usuário;
2. Seleção dos parâmetros primários: região na qual o usuário deve selecionar os parâmetros primários (que caracterizam a peça) e serão usados para o cálculo;
3. Guia básico para consulta da definição dos elementos de tolerância;
4. Região de preenchimento dos parâmetros secundários: área onde o usuário deve entrar com os dados de cada tolerância, caracterizando-a segundo seus elementos de tolerância, a dimensão e os modificadores existentes;
5. Resultado da análise para dimensões individuais: área onde o usuário irá receber o retorno de custo relativo para cada tolerância.

Essa aba foi projetada para ser facilmente alterável e permitir um rápido preenchimento dos valores pelo usuário. O cálculo dos valores é realizado sempre que houver mudança de qualquer dado de entrada, sem a necessidade de acionar o botão, o que permite uma rápida resposta. O formulário usa como dados de entrada os valores de parâmetros secundários e realiza a busca dos valores de dados armazenados nos formulários da Seção 3.2.1. Assim proporciona uma interface rápida para a consulta e para a experimentação dos valores existentes.

A aba fornece um “score” ou valor de referência para o projeto, baseado nas suas avaliações de controle, qualidade e manufatura, o que permite a comparação direta com outros projetos ou iterações diferentes.

Project Inspection

**SCORE**  
(click here to refresh)

M

3,1667

Q

2,25

C

3,1167

Manufacture

Control

Material	Steel
Supplier	X

Procedure	3D machine
Setup Time	High
Measurer	X

Rotational Elements

External      Internal

Prismatic Elements

External      Internal

Process	Type			Dimension	Tolerance +- (mm)	IT	Modifiers			Quality		SCORES		
	Rotational / Prismatic	Plain / Complex	Intern / Extern				M / L / E	SC / CC	Geometric	Severity	Occurrence	Manufacturing	Quality	Control
Turning	Rotational	Plain	Internal	34,90	0,08	10				2	4	5	0,8	6
Turning	Rotational	Plain	Internal	34,90	0,4	13	M		Location	2	7	3	1,4	2,7
Turning	Rotational	Plain	Internal	29,00	0,3	13				3	7	3	2,1	3
Turning	Rotational	Plain	Internal	28,00	0,3	13				6	7	3	4,2	3
Turning	Rotational	Plain	Internal	17,50	0,5	14				4	8	3	3,2	2
Turning	Rotational	Plain	Internal	3,50	0,5	15				2	9	2	1,8	2

Figura 30 - Aba de verificação da ferramenta

### 3.2.3 Aba de Otimização

A aba de otimização visa contemplar a necessidade do modelo descrita na Seção 3.1.5.3, onde o usuário poderá preencher informações de uma pilha de tolerâncias de uma montagem mecânica completa e, quando requisitado, o programa entrega a possibilidade de tolerância ótima com base nos custos descritos.

A aba mostrada na Figura 31 criada para o modelo contém cinco partes, sendo elas:

1. Dados da montagem: onde o usuário irá receber o resultado da soma das dimensões da pilha de tolerância e onde o mesmo deve preencher o valor meta para a otimização (valor permissível para a variação da dimensão resultante), como mostrado na Figura 32;
2. Tabela de dados primários: onde o usuário deve preencher os dados primários de cada tolerância da pilha de montagem, o valor da ocorrência é calculado automaticamente com base na tolerância. Tabela mostrada na Figura 33;
3. Tabela de dados secundários: continuação da inserção de dados do usuário, mostrado na Figura 34;
4. Valores de ponderação: onde o usuário seleciona o nível de ponderação que deseja para cada análise, segundo apresentado na Seção 3.1.5.3. Mostrada na Figura 35.
5. Resultado da Análise: tabela na qual serão mostradas as tolerâncias ótimas para cada linha. Também é o local no qual o usuário deve preencher os valores da pilha de tolerância usando valores positivos para tolerâncias que diminuem a folga funcional e negativos para os que aumentam, conforme mostrado na Figura 36.

Optimization Form (double click to start)																
Multiplex	1															
Manufacture	1															
Quality Control	0															
Resulting Dimension (mm)		3,00														
Tolerance Goal (+- mm):		0,1														
Material	Process	Supplier	Measuring Procedure	Setup Time	Measurer	Severity	Occurrence	Modifiers			Type			Dimension	Tolerância +- mm	IT
Steel	Turning	X	3D machine	High	X	5	2	M/L/E	SC/CC	Geometric	Rotation / Prismatic	Plain / Complex	Internal / External	100,00	0,03	7
Steel	Turning	Y	3D machine	High	X	10	1			CC	Rotational	Plain	Internal	-65,00	0,02	8
Aluminum	Turning	Y	3D machine	High	X	5	1				Rotational	Plain	External	-7,00	0,01	6
Aluminum	Turning	Y	3D machine	High	X	5	2		Location		Rotational	Plain	External	-35,00	0,04	8

Figura 31 - Aba de otimização da ferramenta

<b>Resulting Dimension (mm)</b>	<b>3,00</b>
<b>Tolerance Goal (+- mm):</b>	<b>0,1</b>

Figura 32 – Região 1, dados da montagem, valor resultante da pilha de tolerâncias e valor da meta

Material	Process	Supplier	Measuring Procedure	Setup Time	Measurer	Severity	Occurrence
Steel	Turning	X	3D machine	High	X	5	2
Steel	Turning	Y	3D machine	High	X	10	1
Aluminum	Turning	Y	3D machine	High	X	5	1
Aluminum	Turning	Y	3D machine	High	X	5	2

Figura 33 – Região 2, tabela para inserção de dados primários

Modifiers			Type		
M/L/E	SC/CC	Geometric	Rotation / Prismatic	Plain / Complex	Internal / External
			Rotational	Plain	External
	CC		Rotational	Plain	Internal
			Rotational	Plain	External
		Location	Rotational	Plain	External

Figura 34 – Região 3, tabela para inserção de dados secundários

Multipliers	
Manufacture	1
Quality	1
Control	0

Figura 35 – Região 4, tabela para preenchimento dos valores de ponderações

Dimension	Tolerância +- (mm)	IT
110,00	0,03	7
-65,00	0,02	6
-7,00	0,01	6
-35,00	0,04	8

Figura 36 – Região 5, tabela para inserção de dados das dimensões da montagem e resultados da análise

Todas as células mostradas em cinza escuro são resultados de cálculos e as em cinza claro e branco, campos para dados de entrada do usuário. A planilha foi criada num formato que facilita o seu preenchimento de forma rápida e que permite ao usuário a fácil duplicação de dados quando necessário. As células possuem validação de dados, não permitindo valores diferentes dos já existentes no banco de dados.

Quando a otimização é demandada uma nova janela aparece mostrando o status da análise, como mostrado na Figura 37, visto que o processamento pode ser demorado (caso uma grande quantidade de tolerâncias e alta precisão sejam requisitados). Nesse caso, faz-se necessário o envio de um *feedback* aos projetistas.

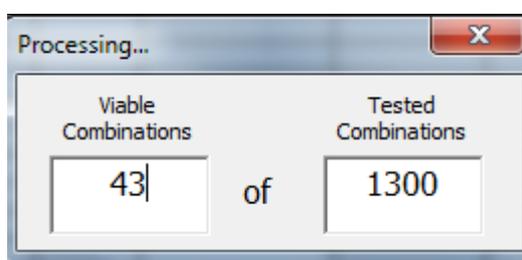


Figura 37 - Janela de retorno ao usuário, mostrando o status da otimização

Caracterizada a ferramenta e suas abas, percebe-se que a navegação no sistema é simples, mas não completamente intuitiva e instantânea, devido à

quantidade de células e informações disponíveis para o usuário. Faz-se necessário, previamente à aplicação da ferramenta, uma explanação ou breve treinamento para garantir sua funcionalidade ótima.

A fim de testar e demonstrar o uso com exemplos do método e do modelo, descreve-se na seção a seguir alguns usos práticos onde os mesmos podem ser empregados.

### 3.3 APLICAÇÕES DESCRITIVAS

Com o intuito de verificar o comportamento do modelo e da ferramenta em uma situação de projeto, foi proposta uma aplicação demonstrativa para cada uma das três possíveis aplicações visualizadas da ferramenta, sendo elas:

- a) O banco de dados como guia de consulta rápido;
- b) Avaliação de um projeto existente em relação ao custo;
- c) Dimensionamento de uma cadeia de tolerâncias.

A seguir descreve-se, com casos retirados de projetos reais ou de exemplos retirados da literatura, como o modelo funciona e seus resultados.

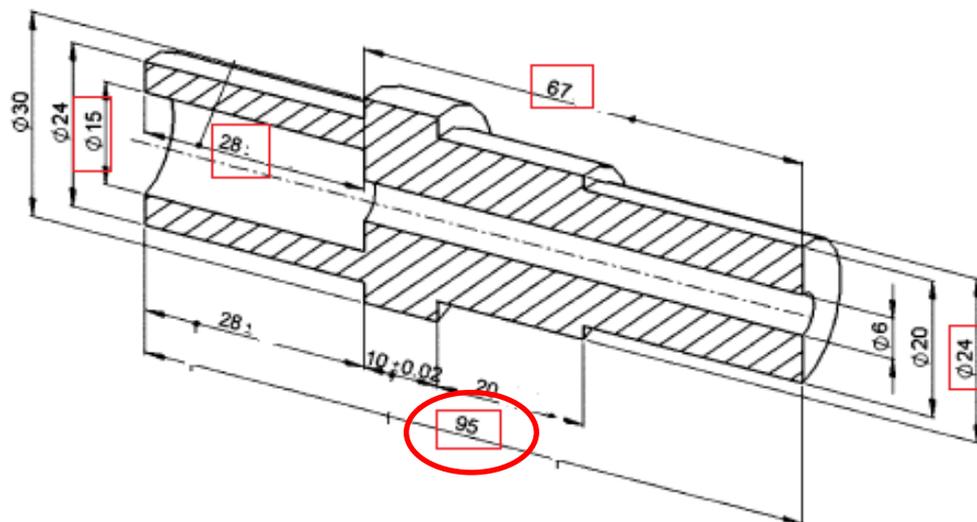
Para fins didáticos, os valores de custo de tolerância mostrados no trabalho foram tomados a partir de bases e guias da literatura, mais especificamente de Bralla; (1999); Roy, Liu e Woo; (1991) e Pahl et al.; (2007).

#### 3.3.1 O Banco de Dados como Guia de Consulta Rápida

Durante o processo de especificação de tolerâncias, os projetistas se deparam diversas vezes com a dificuldade de escolher qual tolerância pode se adaptar melhor às características de seu projeto. Sendo o número teórico permissível de tolerâncias que podem ser atribuídas a cada caso extremamente elevado, um guia rápido mostrando as complexidades de cada valor se faz extremamente útil.

O exemplo descrito a seguir se baseia no caso no qual, considerando o projeto da Figura 38, (i.e., um eixo em aço, torneado) o projetista deve definir as tolerâncias para as dimensões enquadradas. Consultando a aba de manufatura, para os dados de entrada primários, “*Steel*” e “*Turning*”, como mostrado na Figura

39, o usuário já verifica quais são as tolerâncias que provavelmente serão mais complexas de serem obtidas.



**Figura 38 – Figura de desenho em corte de um eixo genérico, utilizado como exemplo**

Os dados da ferramenta, mostrados na Figura 40, já permitem rapidamente uma análise de que, por exemplo, para a dimensão circulada na Figura 38, a partir de tolerâncias com grau IT9, para um fornecedor específico, o processo de fabricação fica bem menos dispendioso para o fabricante (de 5 em IT6,7 e 8 para 4 em IT9). Com isso, o projetista pode aferir que nesse ponto de inflexão se encontra um bom limite para restringir sua escolha de tolerâncias.

Material		Process		Supplier	
Material	Steel	Process	Turning	Supplier	Y
					X Y

**Figura 39 – Seletores para os dados primários**

O mesmo pode, ainda, fazer considerações de processo, material e fornecedor, mudando os seletores da Figura 39. Na aba fornecedor, de “Y” para “X” por exemplo, o mesmo se depara com uma nova tabela um pouco diferente, como mostrada na Figura 41. Percebe-se, que para o fornecedor “X”, os valores para a tolerância IT9 já são mais complicados para as dimensões maiores que 90mm, o

que pode influenciar em sua decisão caso o fabricante escolhido do componente seja X.

				IT6 100%							
				Rotational				Prismatic			
				Internal		External		Internal		External	
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex
3	10	+0.007	+0.010	6	7	5	7	10	10	10	10
11	30	+0.010	+0.014	6	7	5	7	10	10	10	10
31	50	+0.014	+0.017	6	7	5	7	10	10	10	10
51	80	+0.017	+0.020	6	7	5	7	10	10	10	10
81	180	+0.020	+0.027	6	7	5	8	10	10	10	10
181	315	+0.027	+0.034	7	8	6	8	10	10	10	10
316	500	+0.034	+0.041	7	8	7	8	10	10	10	10
				IT7 100%							
				Rotational				Prismatic			
				Internal		External		Internal		External	
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex
3	10	+0.010	+0.016	6	7	5	7	10	10	10	10
11	30	+0.016	+0.023	6	7	5	7	10	10	10	10
31	50	+0.023	+0.027	6	7	5	7	10	10	10	10
51	80	+0.027	+0.032	6	7	5	7	10	10	10	10
81	180	+0.032	+0.043	6	7	5	8	10	10	10	10
181	315	+0.043	+0.054	7	8	6	8	10	10	10	10
316	500	+0.054	+0.065	7	8	7	8	10	10	10	10
				IT8 100%							
				Rotational				Prismatic			
				Internal		External		Internal		External	
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex
3	10	+0.016	+0.025	6	7	5	7	10	10	10	10
11	30	+0.025	+0.036	6	7	5	7	10	10	10	10
31	50	+0.036	+0.043	6	7	5	7	10	10	10	10
51	80	+0.043	+0.051	6	7	5	7	10	10	10	10
81	180	+0.051	+0.068	6	7	5	8	10	10	10	10
181	315	+0.068	+0.085	7	8	6	8	10	10	10	10
316	500	+0.085	+0.102	7	8	7	8	10	10	10	10
				IT9 100%							
				Rotational				Prismatic			
				Internal		External		Internal		External	
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex
3	10	+0.026	+0.039	5	6	4	5	10	10	10	10
11	30	+0.040	+0.057	5	6	4	5	10	10	10	10
31	50	+0.058	+0.068	5	6	4	5	10	10	10	10
51	80	+0.068	+0.080	5	6	4	5	10	10	10	10
81	180	+0.081	+0.108	5	6	4	5	10	10	10	10
181	315	+0.109	+0.134	5	6	4	5	10	10	10	10
316	500	+0.135	+0.162	5	6	4	5	10	10	10	10

Figura 40 - Análise para IT6-IT9, fornecedor Y.

IT6												100%
				Rotational				Prismatic				
				Internal		External		Internal		External		
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	
3	10	+0.007	+0.010	7	8	6	7	10	10	10	10	
11	30	+0.010	+0.014	7	8	6	7	10	10	10	10	
31	50	+0.014	+0.017	7	8	6	7	10	10	10	10	
51	80	+0.017	+0.020	10	10	10	10	10	10	10	10	
81	180	+0.020	+0.027	10	10	10	10	10	10	10	10	
181	315	+0.027	+0.034	10	10	10	10	10	10	10	10	
316	500	+0.034	+0.041	10	10	10	10	10	10	10	10	
IT7												100%
				Rotational				Prismatic				
				Internal		External		Internal		External		
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	
3	10	+0.010	+0.016	7	8	6	7	10	10	10	10	
11	30	+0.016	+0.023	7	8	6	7	10	10	10	10	
31	50	+0.023	+0.027	7	8	6	7	10	10	10	10	
51	80	+0.027	+0.032	7	8	6	7	10	10	10	10	
81	180	+0.032	+0.043	8	8	7	7	10	10	10	10	
181	315	+0.043	+0.054	8	8	7	7	10	10	10	10	
316	500	+0.054	+0.065	8	8	7	7	10	10	10	10	
IT8												100%
				Rotational				Prismatic				
				Internal		External		Internal		External		
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	
3	10	+0.016	+0.025	6	7	5	6	10	10	10	10	
11	30	+0.025	+0.036	6	7	5	6	10	10	10	10	
31	50	+0.036	+0.043	6	7	5	6	10	10	10	10	
51	80	+0.043	+0.051	6	7	5	6	10	10	10	10	
81	180	+0.051	+0.068	8	8	7	7	10	10	10	10	
181	315	+0.068	+0.085	8	8	7	7	10	10	10	10	
316	500	+0.085	+0.102	8	8	7	7	10	10	10	10	
IT9												100%
				Rotational				Prismatic				
				Internal		External		Internal		External		
Dimension		Tolerance		Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	Plain	Complex	
3	10	+0.026	+0.039	5	6	4	5	10	10	10	10	
11	30	+0.040	+0.057	5	6	4	5	10	10	10	10	
31	50	+0.058	+0.068	5	6	4	5	10	10	10	10	
51	80	+0.068	+0.080	5	6	4	5	10	10	10	10	
81	180	+0.081	+0.108	6	7	5	5	10	10	10	10	
181	315	+0.109	+0.134	6	7	5	5	10	10	10	10	
316	500	+0.135	+0.162	6	7	5	6	10	10	10	10	

Figura 41 – Resultados de IT6 – IT9 para fornecedor X.

Essa iteração foi apenas uma das várias possíveis para essa aba. O usuário poderia verificar se fabricar a peça em alumínio, por exemplo, resultaria na especificação de tolerâncias mais apertadas com custo reduzido. Ou, se ao invés de

tornear a peça, seus valores de tolerâncias necessárias poderiam ser atingidos apenas com o processo mais grosseiros, como fundição ou forja.

### 3.3.2 Avaliação de um Projeto Existente em Relação ao Custo

Com o objetivo de demonstrar o uso da ferramenta para verificação de peças únicas é utilizado uma região de um desenho de um componente já existente, um coletor de admissão de líquido refrigerante de um motor à diesel de alumínio fundido e posteriormente usinado, mostrado na Figura 42.

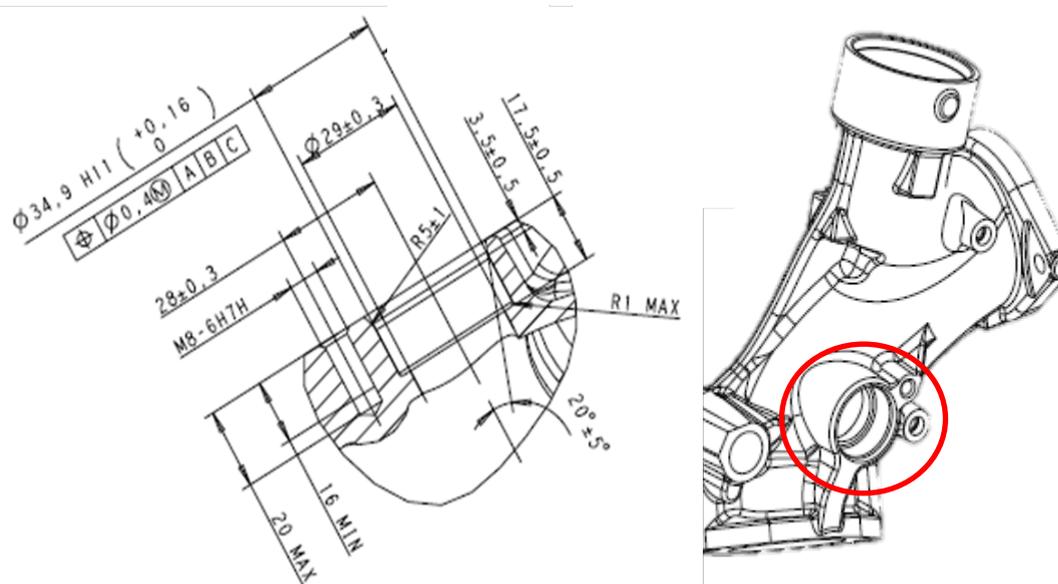


Figura 42 – Região de entrada do coletor de líquido Refrigerante

A fim de se determinar o custo relativo de todas essas dimensões e ao mesmo tempo encontrar os casos onde pode haver sobre-dimensionamentos, o projetista ou usuário preencherá os valores da aba “Verificação” com os valores do desenho, como mostrado na Figura 43 (para os valores de tolerâncias não simétricos, a fim de serem propriamente trabalhados no modelo, devem ser trazidos para o valor médio e podem ser revertidos ao valor não simétricos após a análise, i.e.,  $34,9 +0,16, +0$ , deve ser convertido para  $34,98 \pm 0,08$ ). Os valores de custo relativo para cada tolerância são automaticamente coletados no banco de dados e mostrados nos campos de cada linha.

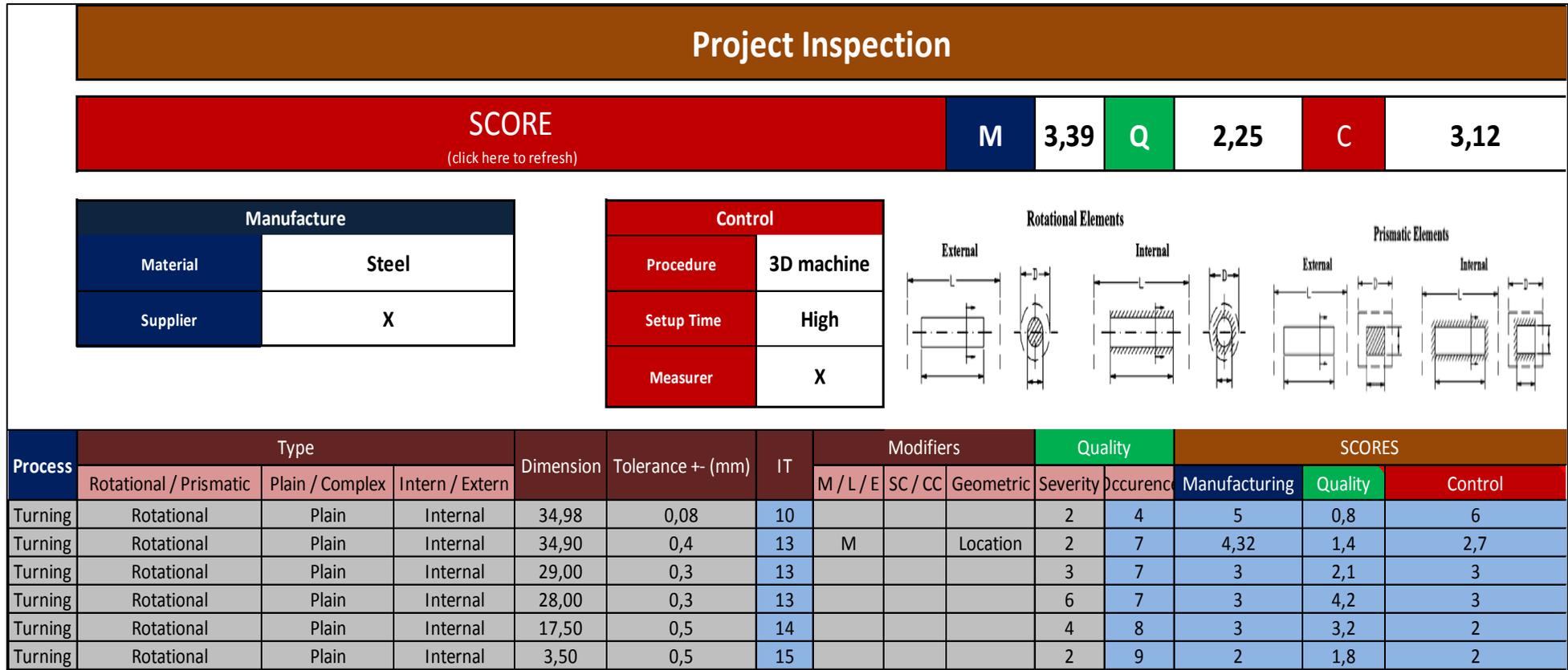


Figura 43 – Planilha preenchida com os valores para análise

Analisando os resultados obtidos pode-se perceber que alguns se destacam.

São eles:

- a) Para a tolerância da primeira linha, percebe-se que há uma grande dispersão entre custo de manufatura, custo de controle e o custo de qualidade. Aqui, aparentemente, é factível um acréscimo de tolerância, visto que o custo de qualidade está bem reduzido em relação aos outros e pode ser modificado para diminuir os custos de manufatura e controle;
- b) A linha dois mostra uma tolerância com baixa severidade, baixo custo de medição e um custo de manufatura um pouco elevado, devido basicamente, a ser uma tolerância de posição. Nesse caso, pode-se recomendar uma investigação para remover essa especificação;
- c) A tolerância da linha quatro apresenta uma severidade mais elevada em relação às outras, mas seu custo de manufatura ainda é baixo. Restringindo o valor dessa tolerância poderá auxiliar na qualidade do produto sem grandes impactos no custo de manufatura.

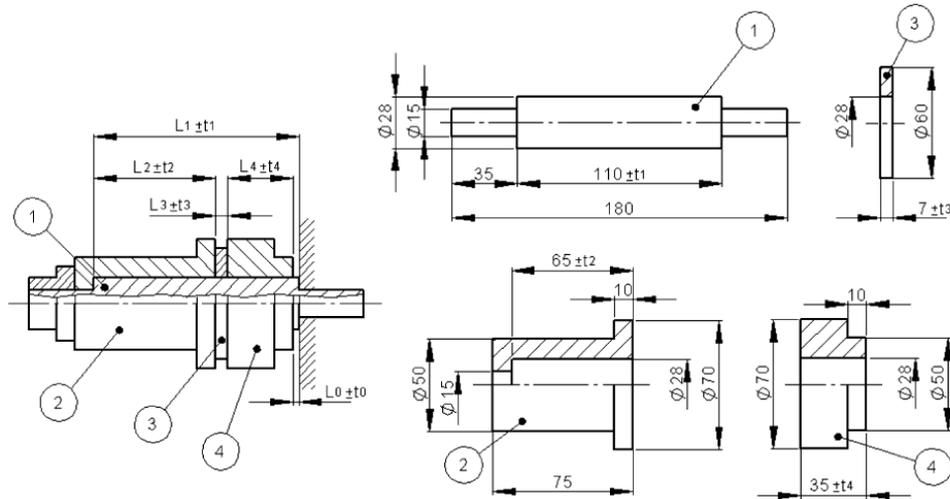
Percebe-se que num caso simples de apenas uma região do projeto já é possível de verificar algumas condições em que a ferramenta atua para mostrar aos projetistas possíveis imperfeições de dimensionamento existentes aumentando a sua percepção e, conseqüentemente, seu conhecimento no processo de especificação de tolerâncias.

### 3.3.3 Dimensionamento de uma Cadeia de Tolerâncias

Para exemplificar o uso da ferramenta em um processo de dimensionamento de um conjunto mecânico e, ao mesmo tempo, comparar o modelo com outros da literatura, decidiu-se utilizar o exemplo de montagem simples retirado de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006), mostrado na Figura 44 e considerando:

- a) Peça 1: Aço usinado, fornecedor X, medidor X, máquina 3D;
- b) Peça 2: Aço usinado, fornecedor Y, medidor X, máquina 3D;
- c) Peças 3 e 4: Alumínio usinado, fornecedor Y, medidor X, máquina 3D;

- d) Dimensão L2 possui criticidade SC e severidade 10. Todas as outras possuem severidade 5;
- e) Dimensão L3 apresenta uma tolerância de posição = t3, inclusa;
- f) Variação permissível de montagem ( $L_0 \pm t_0$ ) =  $3 \pm 0.4\text{mm}$ .



**Figura 44 – Exemplo de montagem esquemática de componentes mecânicos**  
**Fonte: Adaptado de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006)**

Com os dados mostrados no exemplo, pode-se facilmente preencher a aba “Otimização” com os valores mostrados na Figura 45.

#	Material	Process	Supplier	Measuring Procedure	Setup Time	Measurer	Severity	Occurence
1	Steel	Turning	X	3D machine	High	X	5	2
2	Steel	Turning	Y	3D machine	High	X	10	1
3	Aluminum	Turning	Y	3D machine	High	X	5	1
4	Aluminum	Turning	Y	3D machine	High	X	5	2

#	Modifiers			Type			Dimension
	M / L / E	SC / CC	Geometric	Rotation / Prismatic	Plain / Complex	Internal / External	
1				Rotational	Plain	External	110,00
2		CC		Rotational	Plain	Internal	-65,00
3				Rotational	Plain	External	-7,00
4			Location	Rotational	Plain	External	-35,00

**Figura 45 – Tabela de otimização preenchida com os valores de análise**

Após requisição do usuário para a execução da análise, o programa começa o processamento baseando-se no processo descrito na Seção 3.1.4.2, procurando os melhores valores possíveis de tolerância que atendam ao requisito funcional de

montagem e com o menor custo possível. Depois de diversas iterações (10000 para esse caso específico) entrega o resultado mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Resultados de Otimização**

Descrição	Tolerância +- (mm)
L1	0.03
L2	0.02
L3	0.01
L4	0.04

Com esse resultado a definição de tolerâncias está concluída para essa montagem. Percebe-se que existe uma variação que, apesar de pequena, não é desprezível entre os componentes. Observa-se:

- a) A influência da dimensão nos valores ótimos: dimensões mais expressivas, como 110mm, são mais difíceis de serem rigorosamente produzidas em uma tolerância apertada, portanto o valor atribuído foi mais alto;
- b) A influência do material, para a dimensão L4, que por ser de alumínio e apresentar uma fabricação relativamente mais fácil, atende tolerâncias mais apertadas mais facilmente;
- c) A influência da criticidade e severidade, que acaba restringindo o valor da dimensão L2 a fim de evitar perdas de qualidade.

Comparando os resultados desse exemplo com o do trabalho de Dimitrellou; Diplaris e Sfantsikopoulos, (2006) verifica-se que existe coerência entre os resultados de ambos.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES

A partir do desenvolvimento do modelo e da ferramenta é possível mapear as características mais impactantes no custo de um produto e, também, a possibilidade de auxiliar os projetistas de maneira rápida e fácil em um processo inicial de toleranciamento e na tomada de decisão. Foi verificado que o modelo por ser versátil e abrangente pode contemplar várias possibilidades para auxílio.

Estruturou-se uma ferramenta com caráter intuitivo e acessível com o intuito de facilitar seu uso pelos projetistas inexperientes, sem a necessidade de programas dedicados e complexos, desenvolvida em uma plataforma de uso comum e com acesso livre para modificações.

Ao realizar algumas análises de possíveis casos práticos, percebe-se que existe uma coerência dos resultados com os testados em outros modelos de outros autores.

A próxima seção tem como objetivo constatar, a partir de testes e coleta de dados de campo, se o modelo atende às necessidades dos projetistas inexperientes para a atribuição de valores de tolerâncias de modo adequado as características do projeto.

## 4 VERIFICAÇÃO DO MODELO E DA FERRAMENTA

Neste capítulo, será apresentada a aplicação da ferramenta dentro de um cenário específico, através de um experimento dirigido a projetistas. Com o objetivo principal de verificar como a ferramenta se comporta diante de algumas situações de projeto, com profissionais da área de desenvolvimento de produtos. Além disso, possui o intuito de capturar as percepções destes profissionais quanto ao uso de uma ferramenta que possibilite aperfeiçoar e realizar a seleção de tolerâncias mais adequadas para um projeto específico.

### 4.1 PLANEJAMENTO PARA VERIFICAÇÃO

Como o objetivo principal do trabalho é o de auxiliar na especificação de tolerâncias por projetistas iniciantes, servindo como um guia para a fase de projeto detalhado (e talvez podendo ser utilizado até mesmo durante a fase conceitual) buscou-se capturar parâmetros que suportem a compreensão da real aplicação e utilidade do programa.

Foram empregados estudos de caso, com a formatação de experimentos baseados em casos reais. Devem participar projetistas com diversos níveis de experiência. Para a coleta de informações serão empregados questionários.

A verificação foi planejada considerando as seguintes etapas:

- a) Seminário para a apresentação do modelo e uniformização de conceitos;
- b) Apresentação da ferramenta e suas funcionalidades;
- c) Apresentação das tarefas vinculadas aos experimentos, que serão detalhadas na Seção 4.1.1;
- d) Apresentação do questionário a ser preenchido após a realização da tarefa;
- e) Instruções gerais.

O perfil dos participantes é definido como:

- a) Aprendiz ou técnico em desenvolvimento de produto;

- b) Estagiários de engenharia, atuando na área de desenvolvimento de produto;
- c) Engenheiros projetistas, com níveis de iniciante à sêniores, atuando na área de desenvolvimento de produto;
- d) Engenheiros responsáveis por componentes;
- e) Engenheiros de documentação e verificação de projeto.

Propõe-se realizar o experimento no campo, em uma empresa automotiva de grande porte e em sítios nacionais e internacionais.

Descreve-se a seguir as tarefas vinculadas ao experimento e como são estruturadas.

#### 4.1.1 Descrição dos Estudos de Caso

Visando manter a coerência com a Seção 3.3, pretende-se avaliar as aplicações propostas com exercícios relativamente interligados aos usos definidos para o aplicativo. Sendo assim, três situações são apresentadas aos projetistas a fim de coletar a aplicabilidade do programa:

- a) Coleta de dados no banco de dados (banco de dados como guia);
- b) Avaliação de custo de um componente individual;
- c) Avaliação do custo e otimização de uma montagem mecânica.

Descreve-se nas seções a seguir, cada uma dessas etapas detalhando o tipo de perguntas, modo de realização do questionário, tempo estimado de preenchimento e outros detalhes.

##### 4.1.1.1 Coleta de dados no banco de dados (banco de dados como guia)

Essa tarefa visa avaliar a aplicabilidade do banco de dados da ferramenta ao ser utilizado como um guia para o toleranciamento, através de um exercício prático. Após a realização da tarefa, solicita-se que seja respondido um questionário com quatro perguntas abertas. O tempo estimado para resolução é de 10 minutos.

Numa primeira etapa, propõe-se avaliar o conhecimento prévio do projetista quanto ao toleranciamento para mínimo custo. Apresenta-se o componente a ser detalhado (o mesmo utilizado na Seção 3.3.1) para que o mesmo defina para

dimensões selecionadas (contando apenas com sua experiência) níveis de tolerâncias que ele acredita serem aceitáveis para que ocorra:

- a) Uma fabricação sem dificuldades, com baixo custo e com elevada taxa de aprovação em controle;
- b) Uma fabricação atingível, com taxa elevada de aprovação de componentes, mas com alguns fora do especificado;
- c) Uma fabricação controlada que requer precisão e cuidado e com uma taxa média de aprovação das peças;
- d) Uma fabricação de extrema precisão e dificuldade.

Em uma segunda etapa, solicita-se que o projetista realize o mesmo exercício, porém, utilizando o banco de dados da ferramenta como guia para o toleranciamento. Com a realização das duas etapas, será possível avaliar a diferença entre o conhecimento que o projetista possui e a evolução da sua capacidade de especificar tolerâncias após o uso da ferramenta, verificando a mudança entre os valores em cada etapa.

As quatro perguntas abertas do questionário demandam a opinião sobre a ferramenta, visando capturar se o mesmo observou uma mudança nítida na sua habilidade com tolerâncias, se a ferramenta lhe parece útil e se o tempo despendido realmente consagra a qualidade do resultado.

#### 4.1.1.2 Avaliação de custo de um componente individual

Neste caso, busca-se verificar a aplicabilidade do módulo de avaliação de custo relativo de peça simples da ferramenta, mostrado na aba de verificação de desenho simples. Novamente um exercício é proposto, seguido de questões dissertativas e qualitativas. O tempo estimado para o preenchimento é de 10 a 20 minutos.

Fornece-se um desenho complexo, do mesmo componente da Seção 3.3.2, mostrando o projeto de uma peça com uma grande quantidade de dimensões e especificações. É solicitado que o projetista colete um número de dimensões que ele julga adequado ao seu tempo para a realização do exercício, preencha-os na aba e execute o processamento. Com os resultados em mãos, demanda-se que o mesmo responda algumas questões dissertativas quanto aos valores dos resultados,

questionando se o mesmo: i) encontrou alguma dimensão que acredita estar sobre-dimensionada, ii) percebe alguma melhoria no desenho que fica evidente com o uso da ferramenta e iii) o tempo gasto para preenchimento. Essas perguntas ajudarão a avaliar a aderência esperada da aplicação e a sua capacidade de capturar sobre-dimensionamentos. Em uma segunda fase, é solicitado que o usuário mude os parâmetros de entrada primários, tais como: fornecedor, processo de fabricação, severidades, ocorrências e valores de tolerância geométrica. Na sequência é solicitado que o mesmo observe se grandes diferenças dos valores estabelecidos são perceptíveis. Por fim, uma reflexão lhe é demandada quanto à utilidade da ferramenta em seu cotidiano.

#### 4.1.1.3 Avaliação do custo e otimização de uma montagem mecânica

Para o último caso, visa-se verificar a aplicabilidade do módulo de otimização de cadeia de tolerâncias. Um exercício é proposto e questões dissertativas são feitas logo em seguida. O tempo estimado do exercício é de 10-30 minutos, o que pode variar muito dependendo da capacidade computacional do equipamento que o entrevistado utiliza.

Nesse contexto, é fornecido ao entrevistado a montagem da Seção 3.3.3 e solicitado, em uma primeira etapa, que o mesmo realize a distribuição dos valores de tolerância conforme sua experiência. Na segunda etapa, é requerido que o usuário preencha os valores na ferramenta, execute o programa e novamente anote os resultados. A análise comparativa dessas duas etapas permitirá avaliar a diferença entre a proficiência atual do projetista e a definição ótima, prevista pela ferramenta, para o toleranciamento.

Por fim, questões são propostas para determinar se o usuário: i) confia no programa (se acredita que os resultados são confiáveis com base na sua experiência), ii) consegue detectar a origem das divergências entre os resultados e iii) percebe utilidade e aplicabilidade do modelo no seu cotidiano.

## 4.2 REALIZAÇÃO DA VERIFICAÇÃO

O experimento ocorreu em duas etapas, ambas nas dependências de uma empresa de desenvolvimento de produto multinacional que atua no ramo automotivo comercial pesado.

A primeira etapa foi realizada no sítio nacional da companhia, no Brasil, na cidade de Curitiba. Uma primeira reunião de uma hora ocorreu na data de 29 de maio de 2018, com a apresentação da pesquisa, do modelo, da ferramenta e do questionário de coleta de dados. Os participantes presentes e que concordaram em participar da pesquisa apresentam o seguinte perfil:

- a) Um aprendiz em desenvolvimento de produto, com menos de um ano de experiência;
- b) Dois estagiários em desenvolvimento de produto, com tempo de experiência entre um e dois anos;
- c) Três engenheiros projetistas, com tempo de experiência entre um a dois anos (iniciantes);
- d) Três engenheiros projetistas, com tempo de experiência entre dois a cinco anos (plenos);
- e) Dois engenheiros projetistas, com tempo de experiência superior a cinco anos (sêniores);
- f) Um engenheiro de componente, com tempo de experiência superior a cinco anos (sêniores);
- g) Um engenheiro de verificação de documentação técnica com três anos de experiência.

A segunda etapa foi realizada na França, na cidade de Lyon, em um dos sítios europeus responsável pela plataforma de desenvolvimento da companhia. Uma reunião com duração de uma hora e meia ocorreu na data de 5 de julho de 2018, com a apresentação da pesquisa, do modelo, da ferramenta e do questionário de coleta de informações. Estavam presentes na reunião e concordaram em participar da pesquisa:

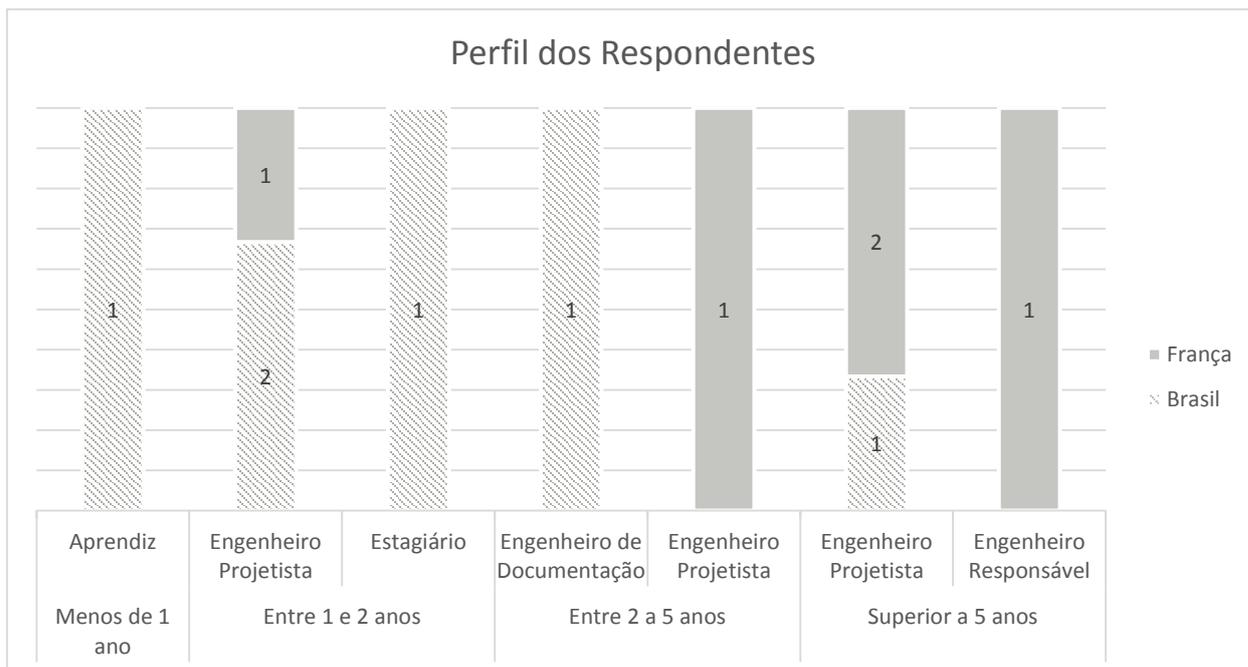
- a) Um estagiário em desenvolvimento de produto, com tempo de experiência entre um e dois anos.
- b) Um engenheiro projetista, com tempo de experiência entre um a dois anos (iniciante);
- c) Quatro engenheiros projetistas, com tempo de experiência entre três a cinco anos (plenos);
- d) Cinco engenheiros projetistas, com tempo de experiência superior a cinco anos (sêniores)
- e) Cinco engenheiros responsáveis por componente, com tempo de experiência superior a cinco anos (sêniores)

O questionário fornecido após a reunião presencial, nas duas etapas, foi o mesmo, e é mostrado na sua versão em português no Apêndice B. Após a reunião presencial, estabeleceu-se a data limite de duas semanas para que os participantes esclarecessem suas dúvidas e enviassem a resposta dos questionários ao autor.

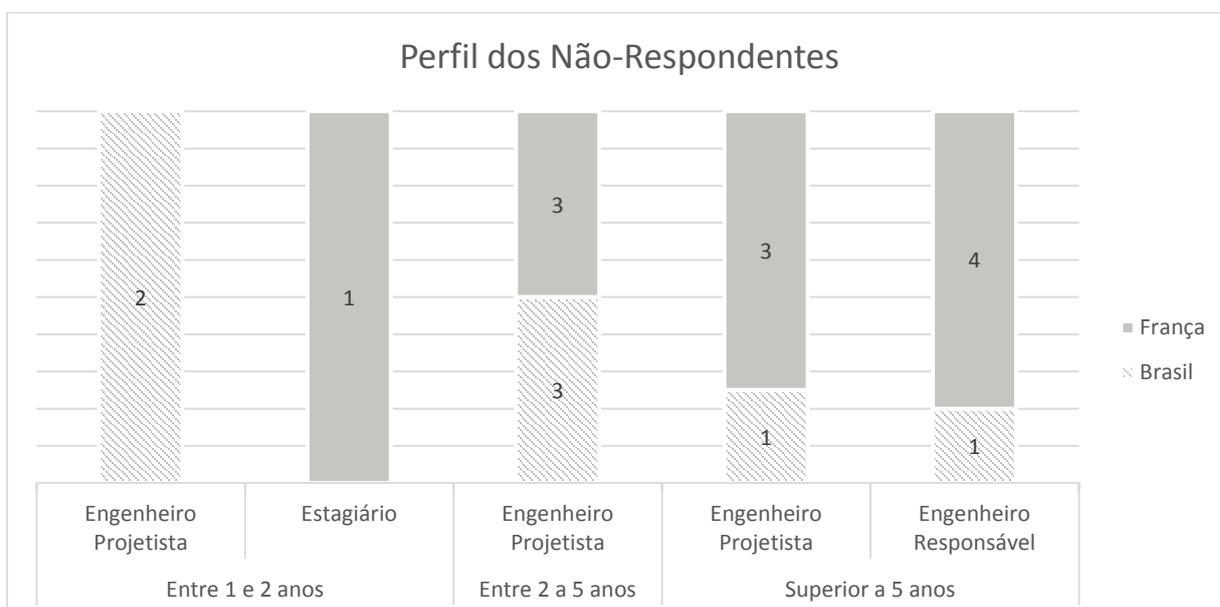
Na seção seguinte, descreve-se os resultados obtidos com a análise dos retornos oriundos dos participantes.

#### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção tem-se os resultados obtidos com as respostas recebidas dos questionários de pesquisa de campo. Do total de 29 participantes das reuniões de apresentação, 11 finalizaram o experimento e forneceram respostas ao autor. O perfil dos respondentes é apresentado no Gráfico 1, mostrando seu tempo de experiência, seu cargo e o país de origem. O perfil dos entrevistados que não responderam é encontrado no Gráfico 2.



**Gráfico 1 – Quantidade de respondentes, classificados por cargo e tempo de experiência**



**Gráfico 2 – Quantidade de não-respondentes, classificados por cargo e tempo de experiência**

O tempo que cada participante dispendeu para a realização de cada tarefa é mostrado no Gráfico 3, separados pela ordem dos exercícios, pelo cargo e tempo de experiência. Na última coluna é mostrado o tempo previsto pelo autor para a realização dos questionários



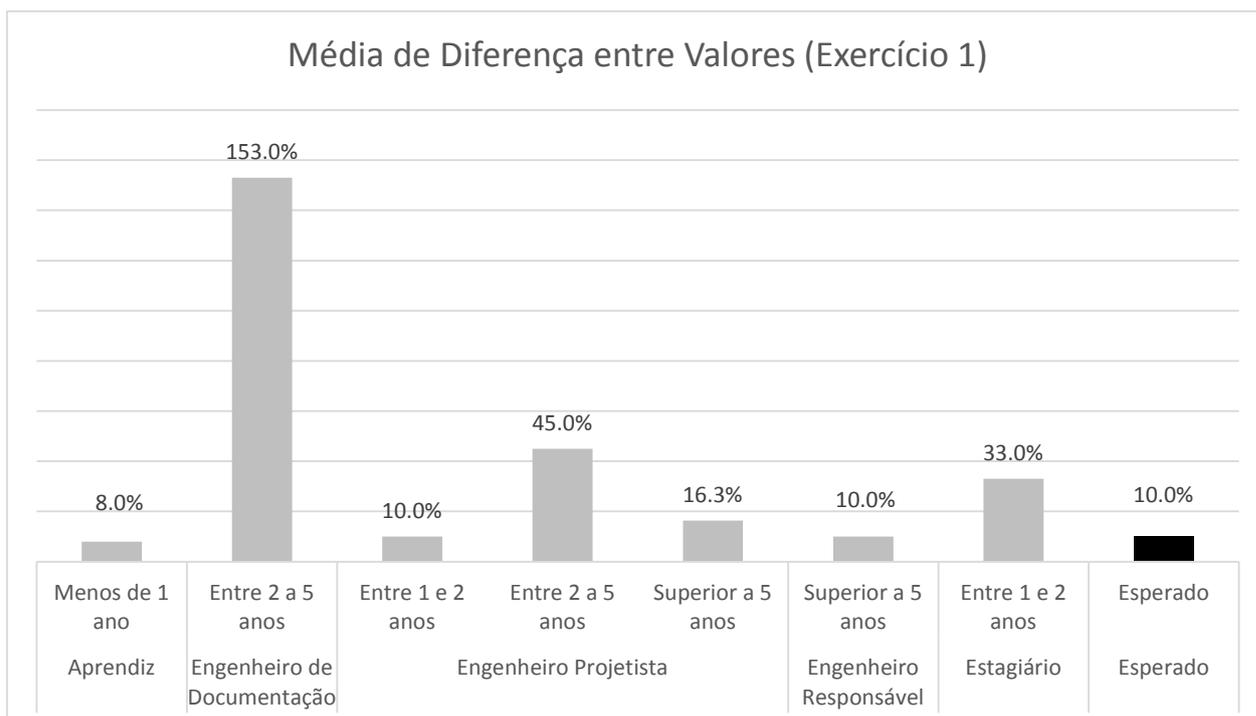
**Gráfico 3 - Tempo utilizado por cada usuário para realização dos exercícios.**

A seguir, descrevem-se os resultados para cada etapa do questionário de validação.

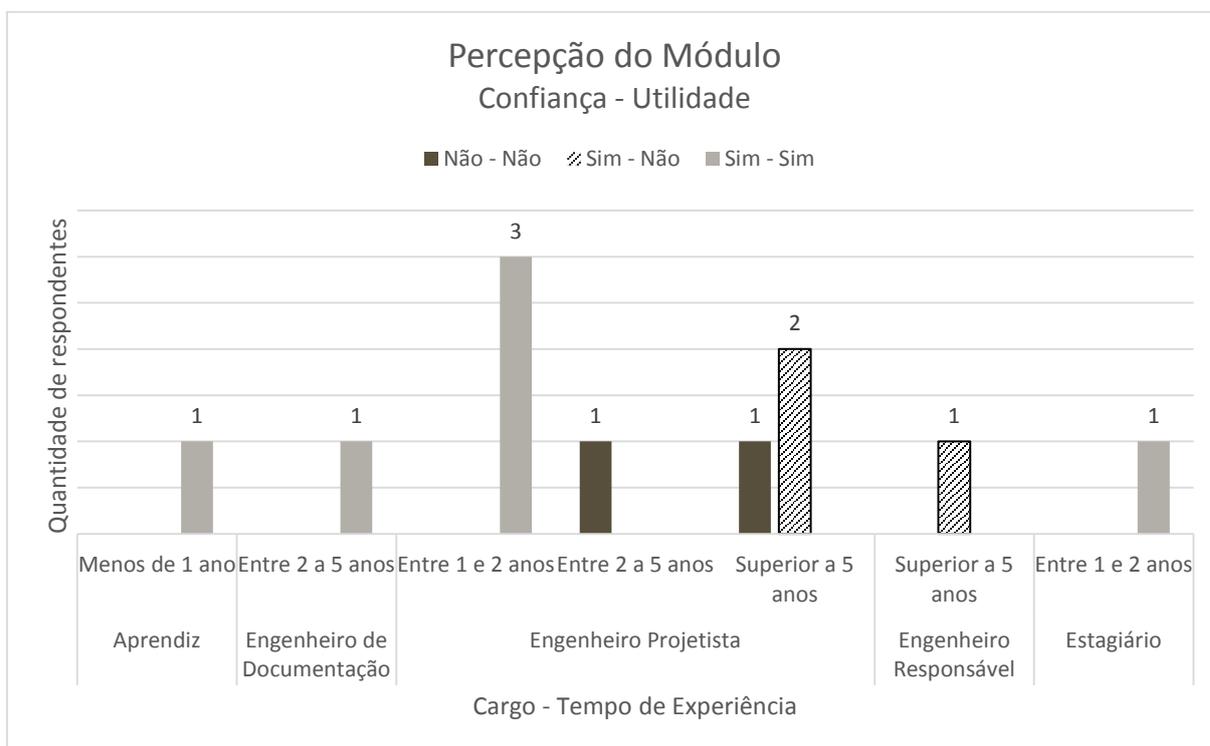
#### 4.3.1 Etapa Um: Coleta de Dados no Banco de Dados (Banco de Dados como Guia)

Na etapa um, foram extraídas duas informações de maneira gráfica. A primeira, presente no Gráfico 4, evidencia a média da disparidade dos valores especificados de tolerância antes e depois do uso do programa, capturando a diferença causada pelo programa na especificação dos projetistas. Também é considerado o cargo e tempo de experiência.

No Gráfico 5 tem-se os resultados de percepção de confiança no programa (se o usuário acredita que os resultados são coerentes, baseado na sua experiência) e de utilidade (se o usuário acredita que o módulo será útil como guia de toleranciamento).



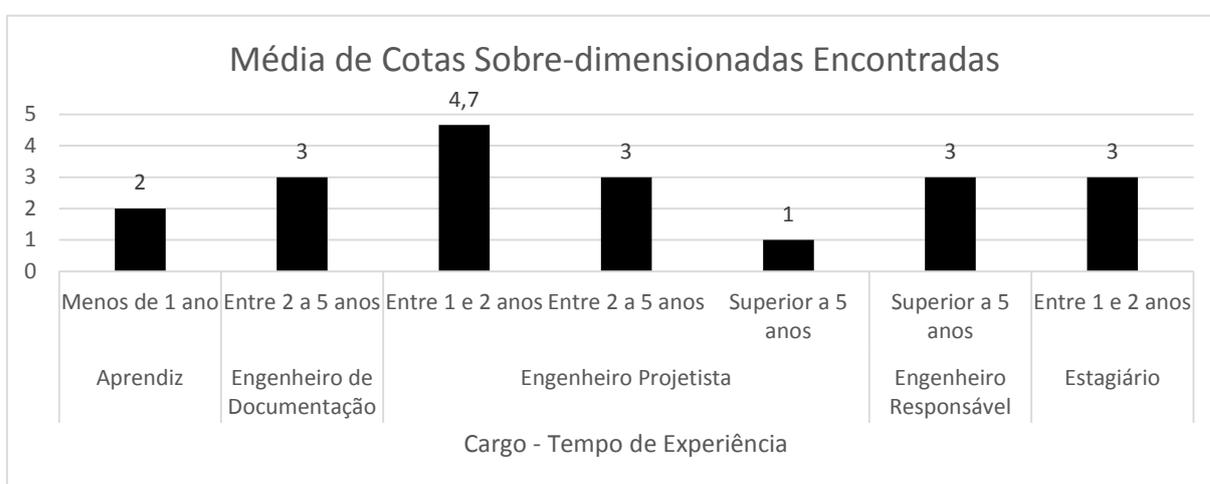
**Gráfico 4 – Valores percentuais médios das diferenças entre as especificações antes e depois do uso da ferramenta**



**Gráfico 5 – Quantidade de respostas de confiança e utilidade percebidas pelos participantes**

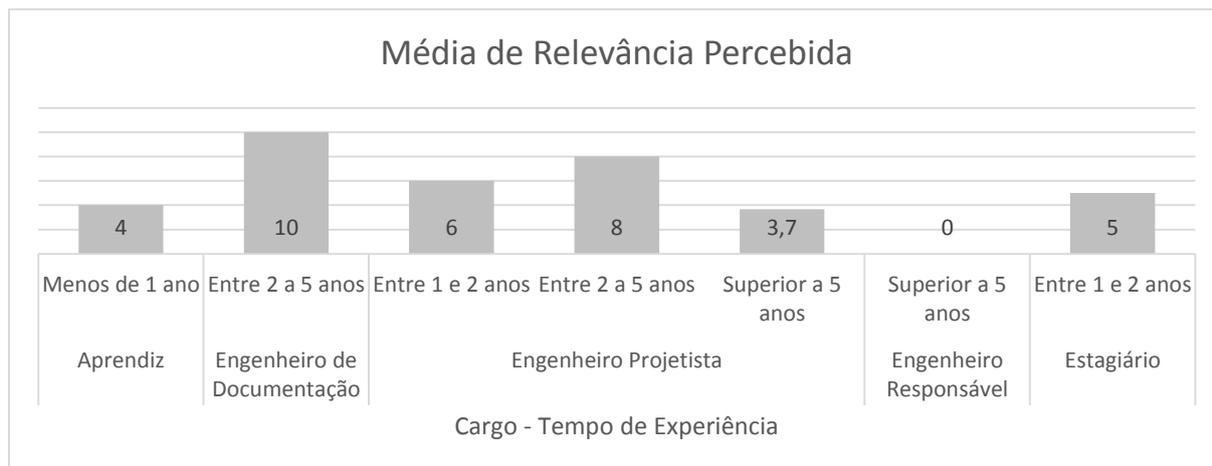
#### 4.3.2 Etapa Dois: Avaliação de Custo de um Componente Individual

Na segunda etapa, avaliação do módulo de toleranciamento de componentes individuais, tem-se os valores presentes no Gráfico 6, com a quantidade de dimensões que foram encontradas e avaliadas como sobre-dimensionadas pelos projetistas, baseados em seu nível de experiência e cargo. O autor planejou a tarefa contendo duas tolerâncias sobre-dimensionadas bem evidentes.



**Gráfico 6 – Média da quantidade de dimensões sobre dimensionadas encontradas.**

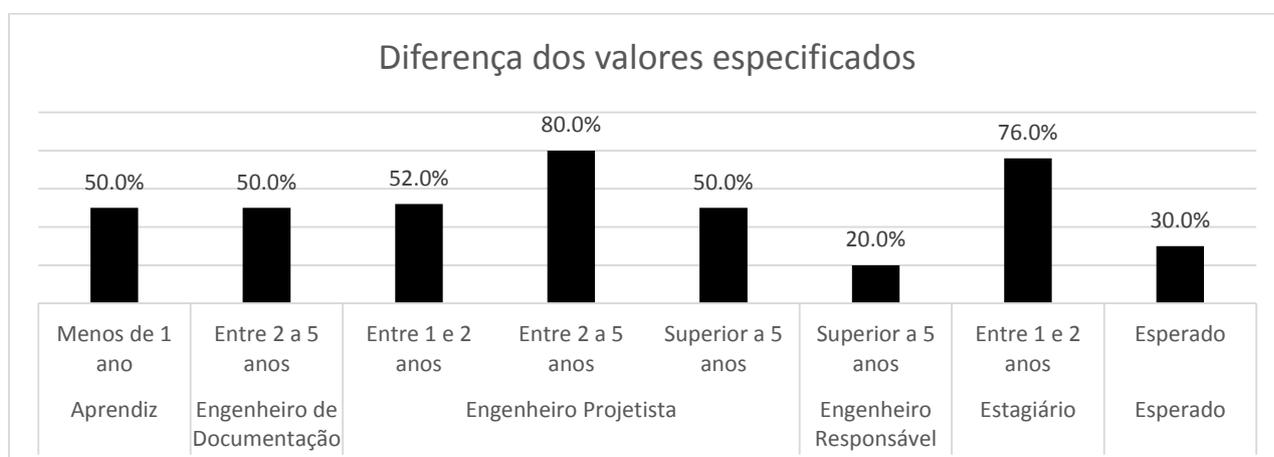
No Gráfico 7, tem-se a média da relevância percebida do módulo pelos entrevistados, com valores de 0 (totalmente irrelevante) à 10 (extremamente útil), separados por cargo e tempo de experiência.



**Gráfico 7 – Média dos valores de relevância percebidas do módulo nas atividades cotidianas dos participantes**

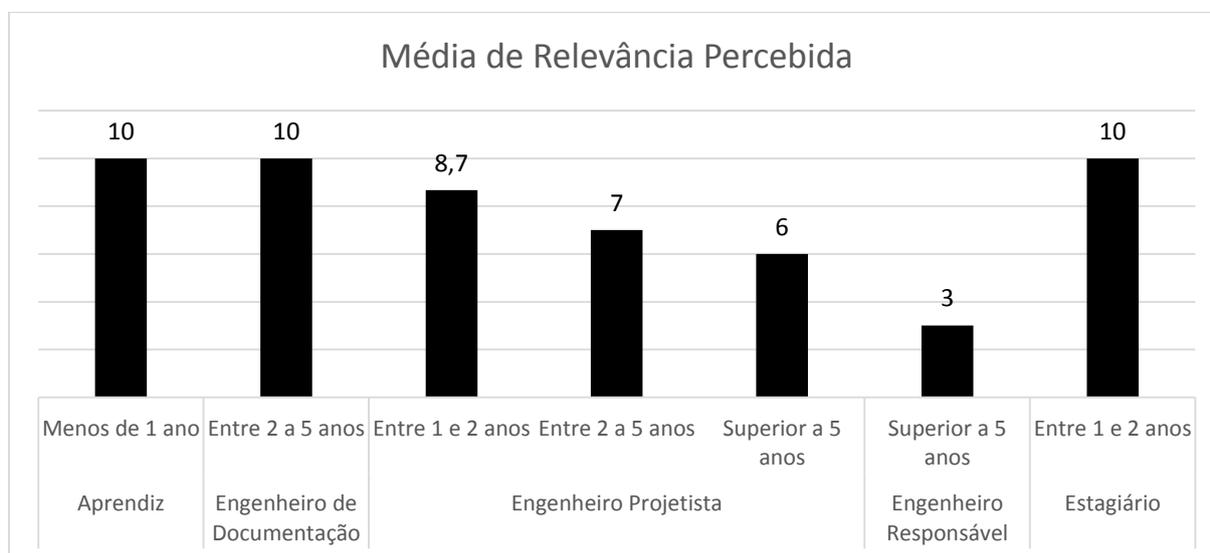
#### 4.3.3 Etapa Três: Avaliação do Custo e Otimização de uma Montagem Mecânica

Essa etapa avalia a aplicabilidade do módulo de otimização de montagem mecânica. No Gráfico 8 mostra-se a média da diferença dos valores especificados de tolerância nos componentes da montagem antes e depois do uso do programa, capturando a diferença causada pelo programa na especificação dos projetistas. Nesse caso, a resposta esperada da ferramenta deverá ser sempre a mesma, a diferença mostrada então é o desvio da especificação inicial do projetista, do resultado fornecido pela ferramenta. Considera o cargo e tempo de experiência. Na última coluna encontra-se a expectativa de diferença esperada pelo autor.



**Gráfico 8 – Valores percentuais médios das diferenças entre as especificações antes e depois do uso do módulo**

O Gráfico 9, caracteriza a média da relevância percebida do módulo pelos participantes, com valores de 0 (totalmente irrelevante) à 10 (extremamente útil), separados por cargo e tempo de experiência.



**Gráfico 9 – Média dos valores de relevância percebidas do módulo nas atividades cotidianas dos participantes**

Conclui-se aqui a apresentação dos resultados mais relevantes para a verificação do trabalho. Tem-se na seção seguinte a análise dos mesmos e a descrição de outros comentários e retornos dos entrevistados.

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa seção, tecem-se comentários sobre os resultados obtidos na realização das tarefas e do questionário, os próximos passos para a evolução do modelo e da ferramenta identificados durante a fase de verificação.

Primeiramente, avalia-se os resultados referentes à execução das tarefas como um todo. Em seguida, desdobra-se em subseções, para cada tarefa.

De 29 participantes 11 concluíram a tarefa e responderam o instrumento de coleta de dados. Percebe-se pelo Gráfico 2 que grande parte dos participantes que não entregaram possuem mais tempo de experiência, cargos de responsabilidade e são localizados no sítio plataforma (França) da empresa. Uma possível explicação talvez envolva o tempo necessário para realizar as tarefas, que, no caso deles,

devido à sua maior responsabilidade na empresa, pode comprometer suas outras atividades. Também, pode-se atribuir falta de interesse de participar de uma pesquisa que ao seu ver não agrega grande valor à sua experiência.

No Gráfico 3, apresenta o tempo que cada entrevistado dispendeu para realizar cada tarefa com a ferramenta. Algumas variações do esperado pelo autor são percebidas conforme o cargo e o tempo de experiência da pessoa, mas na maioria dos casos dentro da média. Apenas um participante necessitou de muito mais tempo para realizar a tarefa. Desse modo, avalia-se que a ferramenta possui uma certa facilidade para sua manipulação.

A seguir faz-se a análise de verificação para cada um dos módulos da ferramenta.

#### 4.4.1 Coleta de Dados no Banco de Dados (Banco de Dados como Guia)

Com o intuito de avaliar o tempo necessário para consulta e a aderência do banco de dados da ferramenta em sua utilidade como guia de toleranciamento, pode-se avaliar pelo Gráfico 3, que a média de tempo necessário para que ocorra a busca de 20 valores de tolerâncias é de 13 minutos. Menos de um minuto por tolerância. Como o intuito do módulo não é fazer uma inspeção detalhada do projeto do produto, pode-se considerar que é um valor de tempo aceitável que o projetista pode dispender a fim de melhorar a qualidade de custo ou a especificação de seu projeto. Porém, quanto menor o tempo de busca dentro da ferramenta, melhor a aderência do usuário ao modelo. O valor médio de tempo gasto não varia muito entre os cargos e tempos de experiência, o que mostra que a ferramenta, por ser implementada em software já conhecido e de simples entendimento não causou dificuldade nos participantes.

O Gráfico 4 mostra as diferenças entre os valores que os usuários especificaram baseados apenas na sua experiência e os valores que encontraram usando o banco de dados como referência. Percebe-se uma notável diferença dos valores, considerando o cargo do participante. Engenheiros projetistas sêniores e iniciantes, aprendiz e engenheiros responsáveis sêniores ficaram com valores bem próximos ao estimado pelo autor (10%), enquanto engenheiros projetistas plenos e outros cargos ficaram com uma variação bem mais expressiva. Percebe-se que a

ferramenta pode ajudar em casos extremos, onde os projetistas não possuem uma boa noção dos valores a serem toleranciados e também auxiliar no refino do conhecimento de experiência pré-adquirida. Comprova-se também que o uso mais frequente da ferramenta como guia pode ajudar a nivelar os conhecimentos de especificação de tolerância para mínimo custo na companhia.

Analisando o Gráfico 5, pode-se capturar a percepção de aplicabilidade do banco de dados como guia, na opinião dos participantes. É constatado que os usuários com menor tempo de experiência confiam mais nos dados previamente preenchidos no programa e acreditam ser de fato úteis para o seu trabalho cotidiano. Para os profissionais mais experientes verificam-se dois casos, nos quais os participantes não confiam nos dados presentes no banco de dados. Em outros três casos, com entrevistados com alto nível de experiência, os mesmos acreditam que os valores obtidos pelo programa estão corretos. Porém não vislumbram utilidade da ferramenta no seu cotidiano, possivelmente devido ao guia mostrar valores já conhecidos e esperados, não agregando em nada na sua experiência profissional.

É notório o benefício do uso do banco de dados como guia para os usuários com menor tempo de experiência em toleranciamento. Para esses, a ferramenta se mostra como uma fonte confiável de informações, com acessibilidade rápida e fácil. Já para os projetistas experientes o guia se mostra com uma eficácia reduzida, pois, apesar de ser rápido e simples, ainda não é mais eficaz que a mente humana (i.e.; memória e conhecimento prévio).

#### 4.4.2 Avaliação de Custo de um Componente Individual

Avaliando o Gráfico 3, verifica-se que o tempo destinado para a realização da tarefa ainda é bem elevado, de 23 minutos em média. O valor previsto pelo autor era de 10 a 20 minutos. Portanto, um pouco acima do limite máximo esperado. O fato pode ser explicado pelo número de tolerâncias existentes e o tempo necessário para preencher a planilha coletando manualmente as definições presentes no desenho.

Porém, quando se observa o Gráfico 6, pode-se perceber que praticamente todos os projetistas foram capazes de identificar duas ou mais tolerâncias possivelmente sobre-dimensionadas no desenho. Tolerâncias essas que em um

próximo passo de verificação podem gerar a otimização de um projeto e evitar futuras perdas monetárias.

A aplicabilidade do módulo é investigada pelo Gráfico 7, onde constata-se novamente que a utilidade reportada pelos usuários é maior entre os engenheiros projetistas e de documentação, com menor tempo de experiência. Estes profissionais geralmente são os que mais percebem utilidade nessa base de conhecimento, pois os auxilia à corretamente especificar e inspecionar os valores de tolerância de um projeto.

#### 4.4.3 Avaliação do Custo e Otimização de uma Montagem Mecânica

O módulo de otimização de montagem mecânica foi o módulo que apresentou, como mostrado no Gráfico 3 uma média de 18 minutos para ser realizado, com um exercício que englobava apenas quatro tolerâncias. Porém, analisando em conjunto com o Gráfico 1, pela quantidade de respostas, percebe-se que foi o que menos, em questão de tempo de execução, variou entre os entrevistados. O motivo para tal é que o tempo de processamento do módulo é elevado. A otimização calcula para cada possibilidade de tolerância no espectro, o custo relativo de montagem até a otimização, o que faz com o tempo de processamento aumente exponencialmente com o número de componentes na pilha funcional de tolerâncias da montagem.

Com base no Gráfico 8 calcula-se, que a média de diferença de especificações antes e depois da otimização é maior que a esperada pelo autor, sendo de 51%. Assim, conforme a quantidade de componentes em uma pilha funcional aumenta, o correto balanceamento das tolerâncias para que haja um custo ótimo em uma montagem não é facilmente avaliado pelos projetistas, mesmo pelos que possuem alto conhecimento e longo tempo de experiência. Aqui, nesse caso, verifica-se a utilidade do processamento da ferramenta, que consegue levar em conta diversos fatores ao mesmo tempo a fim de determinar a ótima combinação para as tolerâncias.

A aderência e percepção de utilidade desse módulo são também bem mais pronunciados, pela análise das respostas mostradas no Gráfico 9. A aplicabilidade mais elevada é verificada pelos os projetistas, função essa de suma

responsabilidade no toleranciamento de um projeto. Ela é ainda mais evidente nos projetistas juniores, que são mais adaptáveis a novas ferramentas e aceitam o uso com mais facilidade, além de se beneficiarem de um conhecimento que ainda estão desenvolvendo.

#### 4.4.4 Visão Geral dos Entrevistados

Diversas questões dissertativas foram também apresentadas aos participantes, como mostrado no Apêndice B, com o intuito de capturar prováveis melhorias, a opinião geral dos mesmos e as possíveis limitações do modelo e ferramenta.

A recepção da ferramenta como um todo foi positiva. Boa parte dos participantes nitidamente não conhecia o ramo de estudos de toleranciamento para mínimo custo e ficou impressionado com o modo abrangente e mais simples que foi apresentado o assunto na pesquisa. A grande maioria viu uma aplicabilidade instantânea para o modelo e a ferramenta, já visualizando sua utilização em um futuro próximo.

Algumas sugestões de melhorias fornecidas foram:

- a) Reduzir o número de possibilidades de ocorrência e severidade de 10 para 5 ou 3 no âmbito de análise de qualidade, para agilizar o processo de preenchimento;
- b) Conectar o programa automaticamente com a ferramenta CAD, a fim de automatizar o preenchimento da tabela ou de mostrar os valores já no momento do toleranciamento;
- c) Reduzir o tempo de otimização, que ainda é bem demorado;
- d) Incluir a otimização por empilhamento quadrático (soma dos quadrados).

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES

O plano de verificação do modelo e ferramenta foi apresentado e discutido, visando avaliar três possíveis aplicações identificadas pelo autor. Porém, como o modelo foi criado de uma maneira abrangente, outras aplicações do mesmo podem

ser visualizadas, aplicações essas que não estavam presentes no plano, como por exemplo: utilizar a ferramenta como etapa mandatória na inspeção de projetos ou ainda auxiliar na seleção de fornecedores ou processos para um determinado componente.

Foi realizada a verificação conforme o planejado em uma empresa automotiva. Porém, uma quantidade expressiva de participantes não executou as tarefas, mesmo tendo concordado em fazê-las após reunião de apresentação. Observa-se, nesse caso, que a abordagem realizada com os usuários para a verificação do modelo e da ferramenta talvez tenha sido mais longa que o tolerável para alguns colaboradores que não conseguiram priorizar a pesquisa.

Conclui-se que o modelo e a ferramenta atendem aos objetivos: serem instrumentos com boa possibilidade de aderência ao ramo de desenvolvimento de produto e que possam auxiliar os especificadores de tolerância, com maior expressividade aos com pouco tempo de experiência.

A percepção e aceitação geral do modelo e ferramenta foram positivos e algumas sugestões de melhorias foram apresentadas, podendo se tornar novas propostas em trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo possibilitou um melhor entendimento de como a especificação de tolerâncias impacta no custo de um produto e de como a literatura e a indústria ainda podem se beneficiar do contínuo desenvolvimento dessa área de pesquisa.

Mostrou-se através da revisão da literatura que, apesar de certa quantidade e qualidade dos materiais presentes, ainda havia espaço para melhoria contínua. Foi identificado que o processo de toleranciamento para mínimo custo ainda não estava plenamente desenvolvido para auxiliar tanto os projetistas iniciantes quanto os mais seniores, faltando uma ferramenta didática, com recursos simples e de fácil entendimento, visando gerar valor agregado.

Com a sondagem de campo, foi averiguado que a análise de tolerâncias para mínimo custo é muito pouco desenvolvida na indústria, mostrando claramente que o desenvolvimento científico na área ainda não tem a aderência no campo.

Com a conexão entre a necessidade do campo, baseado na pesquisa, e com as diferentes referências presentes na literatura, foi proposto um modelo e subsequentemente uma ferramenta que visa simplificar e dinamizar o processo de especificação de tolerâncias para mínimo custo nas indústrias e auxiliar os projetistas nessa tarefa. O modelo criado fornece uma maneira de simplificar a sistematização do processo de toleranciamento, levando em conta seu potencial de ganho econômico, nas indústrias, a fim de melhorar a qualidade dos produtos finais, sem desperdícios monetários, de forma radical ou incremental.

Com a verificação realizada por exemplos descritivos, pode-se concluir que o modelo e ferramenta possuem diversas aplicações no âmbito de toleranciamento e que não tomam uma grande quantidade de tempo para sua utilização. A melhoria em relação ao processo manual é verificada na qualidade das especificações e na proximidade das mesmas ao modelo ótimo.

Na fase de verificação em campo do modelo e ferramenta, avalia-se que a receptividade dos grupos quanto ao uso foi positiva. Foi possível perceber o interesse por parte dos participantes em futuramente poder utilizar a ferramenta. Além disso, várias sugestões de melhoria foram feitas, o que mostra claramente que a ferramenta tem potencial para aderir ao uso cotidiano dos desenvolvedores de

produto. Os tempos tomados nessa fase para a realização das tarefas propostas não foram longos e houve melhoria na qualidade da especificação de tolerâncias.

Com isso, pode-se concluir que a proposta tem condições de ser utilizada na prática projetual, no processo de detalhamento e até mesmo, em menor escala, na fase de projeto conceitual, pois se trata de instrumentos que auxiliam e direcionam a equipe de projeto na escolha de tolerâncias com maior potencial de economia. Serve também como uma excelente base para transmissão de conhecimento e formação de novos profissionais nessa área. Conclui-se também que os objetivos principais e específicos da dissertação foram atingidos.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações apresentadas a seguir dizem respeito à ferramenta e o modelo proposto, bem como as pesquisas futuras relacionadas ao tema deste trabalho.

Foi identificado durante a fase de pesquisa prospectiva que, uma ferramenta de auxílio que estivesse devidamente interligada com a ferramenta CAD aumentaria em muito a eficiência do processo de especificação de tolerâncias. Uma proposta de melhoria é a implantação do modelo atual em uma ferramenta que consiga capturar automaticamente as informações e fornecer retorno diretamente ao ambiente CAD, eliminando uma boa parte do processo de transferência de informação entre banco de dados.

Como o devido funcionamento da ferramenta depende dos dados inseridos pelos usuários no banco de dados, dados esses retirados do fornecedor, literatura e experiência, acredita-se que testar o modelo depois de um certo tempo de aplicação nas indústrias, com o banco de dados com mais informações coletadas e realizando uma análise de sensibilidade, auxiliaria no melhoramento contínuo e na comprovação de seu funcionamento.

Durante a fase de verificação, algumas melhorias possíveis ao modelo foram levantadas pelos participantes, entre elas, a de inserir o método de análise quadrático de empilhamento de tolerâncias no módulo de otimização e de melhorar o tempo de processamento da ferramenta. Como a otimização foi programada de maneira simples, ou seja, por tentativa de todas as possibilidades sem eliminação, acredita-se que o emprego de estratégias mais avançadas de otimização pode reduzir em muito o tempo de processamento.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistema de tolerâncias e ajustes ABNT NBR 6158. 1995.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR 6409: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho”. INMETRO, Rio de Janeiro
- AL-ANSARY, M. D.; DEIAB, I. M. Concurrent optimization of design and machining tolerances using the genetic algorithms method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, n. 12, p. 1721-1731, 1997.
- ANSELMETTI, B. Generation of functional tolerancing based on positioning features. **Computer-Aided Design**, v. 38, n. 8, p. 902-919, 2006.
- ARMILLOTTA, A. A method for computer-aided specification of geometric tolerances. **Computer-Aided Design**, v. 45, n. 12, p. 1604-1616, 2013.
- BJØRKE, Øyvind. **Computer-aided tolerancing**. New York: Tapir, 1978.
- BRALLA, James G. **Design for manufacturability handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999.
- CAMARGO, R; ABACKERLI, A. importância da tolerância: uma contribuição da engenharia dimensional no processo de desenvolvimento do produto. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 19, 2010.
- CHASE, K. W. Minimum cost tolerance allocation. **Department of Mech. Engg., Brigham Young University, ADCATS Report**, n. 99-5, 1999.
- CHASE, K. W. et al. Least cost tolerance allocation for mechanical assemblies with automated process selection. **Manufacturing Review**, v. 3, n. 1, p. 49-59, 1990.
- CHASE, K. W.; GREENWOOD, William H. Design issues in mechanical tolerance analysis. **Manufacturing Review**, v. 1, n. 1, p. 50-59, 1988.

CHENG, B.; MAGHSOODLOO, S. Optimization of mechanical assembly tolerances by incorporating Taguchi's quality loss function. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 14, n. 4, p. 264, 1995.

CHIABERT, P.; LOMBARDI, Franco; ORLANDO, M. Benefits of geometric dimensioning and tolerancing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 78, n. 1, p. 29-35, 1998.

CHOI, H. R.; PARK, M.; SALISBURY, E. Optimal tolerance allocation with loss functions. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 122, n. 3, p. 529-535, 2000.

DIMITRELLOU, S. Ch; DIPLARIS, S. C.; SFANTSIKOPOULOS, M. M. Cost-competent tolerancing in CAD. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 35, n. 5-6, p. 519-526, 2007.

EVANS, David H. Optimum tolerance assignment to yield minimum manufacturing cost. **Bell System Technical Journal**, v. 37, n. 2, p. 461-484, 1958.

FENG, C.; WANG, J.; WANG, J. An optimization model for concurrent selection of tolerances and suppliers. **Computers & Industrial Engineering**, v. 40, n. 1, p. 15-33, 2001.

HENZOLD, G. **Handbook of geometrical tolerancing: design, manufacturing, and inspection**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 1995.

HOFFENSON, S.; DAGMAN, A.; SÖDERBERG, R. **Smart product engineering: Procedia CIRP**, Bochum, Germany, March 11th - 13th, 2013. Disponível em: ABRAMOVICI, M.; STARK, R. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 865–874.

HOFFENSON, S.; SÖDERBERG, Rikard. Systems thinking in tolerance and quality-related design decision-making. **Procedia CIRP**, v. 27, p. 59-64, 2015.

HORNGREN, C. T. et al. Cost accounting: A managerial emphasis. **Issues in Accounting Education**, v. 25, n. 4, p. 789-790, 2010.

ISLAM, M. N. Functional dimensioning and tolerancing software for concurrent engineering applications. **Computers in Industry**, v. 54, n. 2, p. 169-190, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, DIN. 286-1: ISO-System für Grenzmaße und Passungen. **Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen**, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, DIN. 286-2: ISO-System für Grenzmaße und Passungen. **Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen**, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2692 (2006) Geometrical product specifications (GPS) – Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR), disponível em <https://www.sis.se/api/document/preview/908185/>, acesso em 05 de abril de 2018.

JEANG, A.. Tolerance chart balancing with a complete inspection plan taking account of manufacturing and quality costs. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 55, n. 5-8, p. 675-687, 2011.

KAPUR, Kailash C.; PECHT, Michael. **Reliability engineering**. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2014.

LEE, J.; JOHNSON, G. E. Optimal tolerance allotment using a genetic algorithm and truncated Monte Carlo simulation. **Computer-Aided Design**, v. 25, n. 9, p. 601-611, 1993.

MAROPOULOS, P. G.; CEGLAREK, D. Design verification and validation in product lifecycle. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 740-759, 2010.

MORONI, G.; PETRÒ, S.; TOLIO, T.. Early cost estimation for tolerance verification. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 195-198, 2011.

OMBASIC, N.; ZARE, D. Dimensional engineering: methods and tools for a dimensional engineering process at Scania, **Chalmers University Report**, 2013.

PAHL, G. et al. **Engineering design: a systematic approach. engineering design: a systematic approach**, Edited by G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote. Berlin: **Springer**, 2007, v. 1, 2007.

PENG, H. Concurrent tolerancing for design and manufacturing based on the present worth of quality loss. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, n. 9-12, p. 929-937, 2012.

PIKE, E. W.; SILVERBERG, T. R. Assigning tolerances for maximum economy. **Machine Design**, v. 25, p. 139, 1953.

PUROHIT, K.; SHARMA, C. S. Recent developments in tolerancing techniques. **Defence Science Journal**, v. 49, n. 4, p. 291, 1999.

QUARTAU, Daniel Jorge Silva Rodrigues. Desafios operacionais e metrológicos da medição 3D. 2015. **Dissertação de Mestrado**. Universidade de Aveiro.

ROY, U.; LIU, C. R.; WOO, T. C. Review of dimensioning and tolerancing: representation and processing. **Computer-aided Design**, v. 23, n. 7, p. 466-483, 1991.

SANZ-LOBERA, A.; SEBASTIÁN, M. A.; PÉREZ, J. M. New cost–tolerance model for mechanical part design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 51, n. 5-8, p. 421-430, 2010.

SHAN, A.; ROTH, R. N.; WILSON, R. J. Genetic algorithms in statistical tolerancing. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 38, n. 11, p. 1427-1436, 2003.

SHEHAB, E. M.; ABDALLA, H. S. Manufacturing cost modelling for concurrent product development. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 17, n. 4, p. 341-353, 2001.

SIVAKUMAR, K.; BALAMURUGAN, C.; RAMABALAN, S. Simultaneous optimal selection of design and manufacturing tolerances with alternative manufacturing process selection. **Computer-Aided Design**, v. 43, n. 2, p. 207-218, 2011.

SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L; CARLSON, Johan. Virtual geometry assurance for effective product realization. In: **First Nordic Conference on Product Lifecycle Management-NordPLM**. p. 25-26. 2006.

SPECKHART, F. Calculation of tolerance based on a minimum cost approach. **Journal of Engineering for Industry**, v. 94, n. 2, p. 447-453, 1972.

SPOTTS, M.. Allocation of tolerances to minimize cost of assembly. **Journal of Engineering for Industry**, v. 95, n. 3, p. 762-764, 1973.

STAMATIS, Dean H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. **ASQ Quality Press**, v.13, p 216-225, 2003.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, Elsayed A.; HSIANG, T. C. **Quality Engineering in Production Systems**. New York: McGraw-Hill College, 1989.

THORNTON, A. C. A mathematical framework for the key characteristic process. **Research in Engineering Design**, v. 11, n. 3, p. 145-157, 1999.

TORNBERG, K.; JÄMSEN, M.; PARANKO, J. Activity-based costing and process modeling for cost-conscious product design: A case study in a manufacturing company. **International Journal of Production Economics**, v. 79, n. 1, p. 75-82, 2002.

TRUCKS, H. E. Designing for economical production. **Society of Manufacturing Engineers**, Michigan: Dearborn, Mich. 1974, 221 p, 1974.

UMARAS, E. **Tolerâncias dimensionais em conjuntos mecânicos: estudo e proposta para otimização**. 2010, 75 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2010.

WU, C.; CHEN, Z.; TANG, G. Component tolerance design for minimum quality loss and manufacturing cost. **Computers in Industry**, v. 35, n. 3, p. 223-232, 1998.

XU, S.; KEYSER, J. Geometric computation and optimization on tolerance dimensioning. **Computer-Aided Design**, v. 46, p. 129-137, 2014.

YE, B.; SALUSTRI, F. A. Simultaneous tolerance synthesis for manufacturing and quality. **Research in Engineering Design**, v. 14, n. 2, p. 98-106, 2003.

ZHANG, Y.; YANG, M. A coordinate SPC model for assuring designated fit quality via quality-oriented statistical tolerancing. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 1, p. 73–79, ago. 2009.

ZILIO, Tiago Muner; VIERO, Carlos Frederico; WALBER, Marcio. GD&T–aspectos relacionados ao desenvolvimento de produtos. **Revista CIATEC-UPF**, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2014.

## **APÊNDICE A – ENTREVISTA COM DESENVOLVEDORES DE PRODUTO.**

Este apêndice contém uma descrição e uma análise da pesquisa de campo prospectiva, desenvolvida com o intuito de avaliar o mercado quanto à especificação de tolerâncias.

Com o intuito de avaliar a abrangência da técnica no mercado automotivo e observar o perfil dos engenheiros de desenvolvimento de produto quanto ao tema abordado, foi desenvolvida uma entrevista cujos principais objetivos foram:

- a) Mapear o conhecimento quanto ao toleranciamento dos envolvidos;
- b) Verificar a percepção da importância do toleranciamento de mínimo custo;
- c) Apurar que fatores e técnicas são as mais predominantes para a criação de um desenho mecânico;
- d) Investigar como os colaboradores percebem o toleranciamento na companhia.

Para tal, a entrevista foi dividida em quatro etapas:

- a) Conhecimento pessoal: que foca em entender qual o nível de experiência e perícia do entrevistado em relação ao toleranciamento;
- b) Análise de referências: que visa identificar quais os métodos ou técnicas usadas para a criação de um novo desenho mecânico;
- c) Percepção de custo: análise de como os engenheiros percebem o impacto de custo das tolerâncias nas peças;
- d) Percepção da companhia: perguntas direcionadas a entender a cultura da empresa em relação ao toleranciamento.

No total foram feitas oito perguntas que se desdobravam em 40. Cada bloco teve um formato específico a fim de extrair a maior quantidade de informação com o menor tempo possível de resposta.

O grupo de conhecimento pessoal requisitava que o respondente classificasse de 0 (básico) à 4 (guru) cada um dos tópicos apresentados. Essa escala de 0 a 4 é uma escala amplamente difundida na empresa em questão para avaliação de conhecimentos, onde zero é o conhecimento quase nulo no

tópico e quatro é um conhecimento tão abrangente que o funcionário possui capacidade de ensinar aos outros. Também foi perguntado o tempo de experiência em toleranciamento e o cargo do mesmo na empresa.

Na análise de referências foi solicitado que o funcionário avaliasse de 0 (nunca) a 5 (sempre) cada uma das técnicas e métodos exemplificados, quanto ao seu uso na criação de um novo desenho ou projeto mecânico. Também foi perguntado se faz uso de métodos de otimização de custo para tolerâncias.

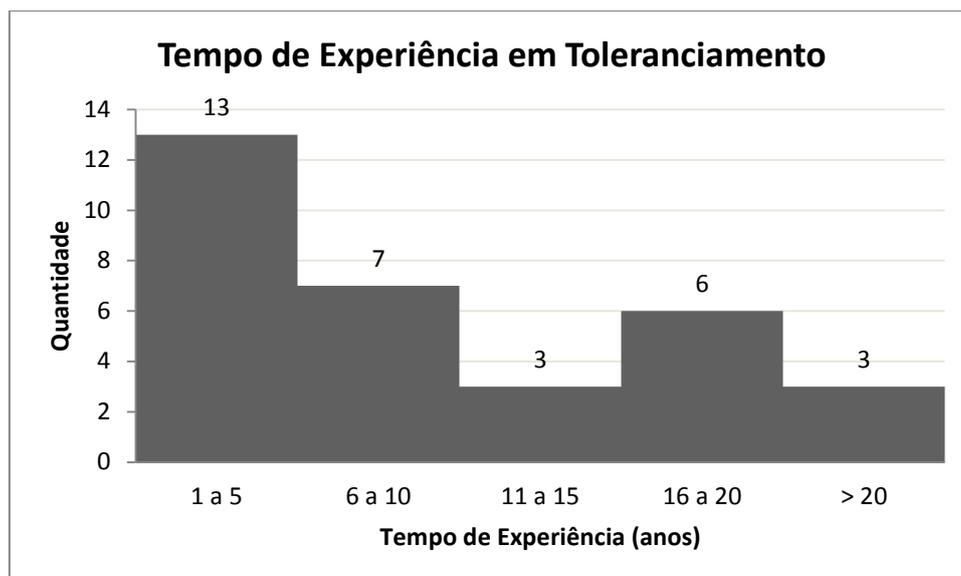
Para a percepção de custos foi perguntado, em percentagem, qual a avaliação de custos de toleranciamento que o respondente tem em mente.

E, para a percepção da companhia, várias afirmações foram feitas quanto à capacidade da empresa e pedido aos entrevistados que avaliassem de 0 (discordo totalmente) à 10 (concordo plenamente) com as afirmações.

A entrevista foi realizada em uma empresa automotiva, por meio digital em uma pesquisa *online*. Foram enviados e-mails com o link para 100 engenheiros de desenvolvimento de produto da área de motores da corporação, em todas as suas filiais espalhadas pelo mundo, obtendo uma quantidade de 39 respondentes.

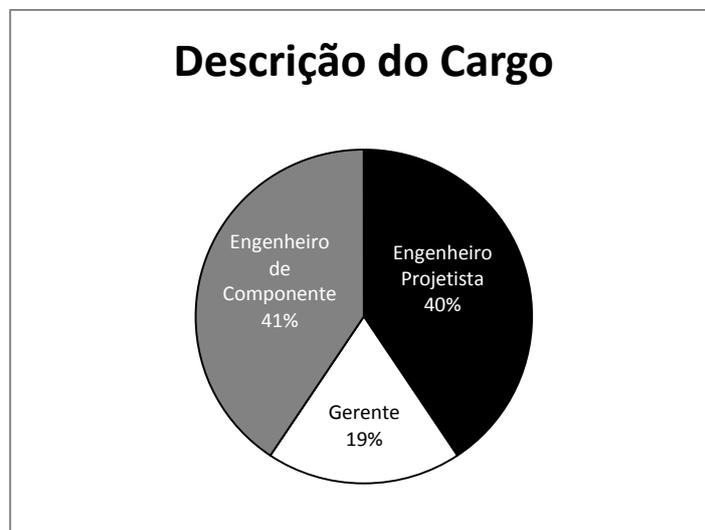
## A.1 DEMOGRAFIA

Grande parte dos respondentes possui de um a cinco anos de experiência em toleranciamento (40%), podem ser considerados “júniores”. A quantidade de entrevistados com nível de experiência maior é menos expressiva em cada categoria, mas ainda considerável, visto que representam 60% do restante da população avaliada como pode ser visto no Gráfico 10. Do montante total 30% podem ser considerados como “plenos” (6-15 anos de experiência) e 30% como sêniores (16-20 anos ou mais).



**Gráfico 10 - Demografia do Estudo**

A maioria dos respondentes possuem cargos diretamente direcionados com o desenvolvimento e especificação de tolerâncias. Ou seja, engenheiros projetistas e engenheiros de componente, como visto no Gráfico 11.



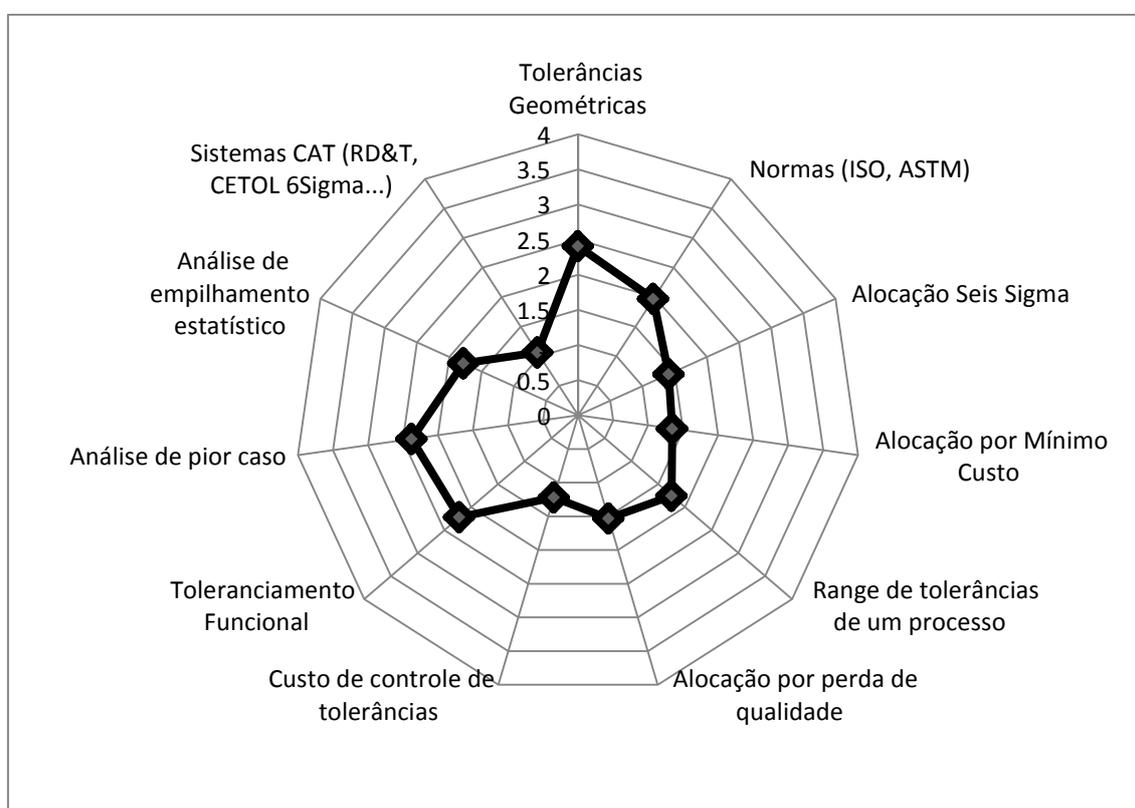
**Gráfico 11 - Cargo dos entrevistados**

Percebe-se que apesar da grande quantidade de júniores na empresa, há uma quantia expressiva de sêniores com mais de dez anos de experiência com a especificação de tolerâncias.

## A.2 CONHECIMENTOS ESPECÍFICOS

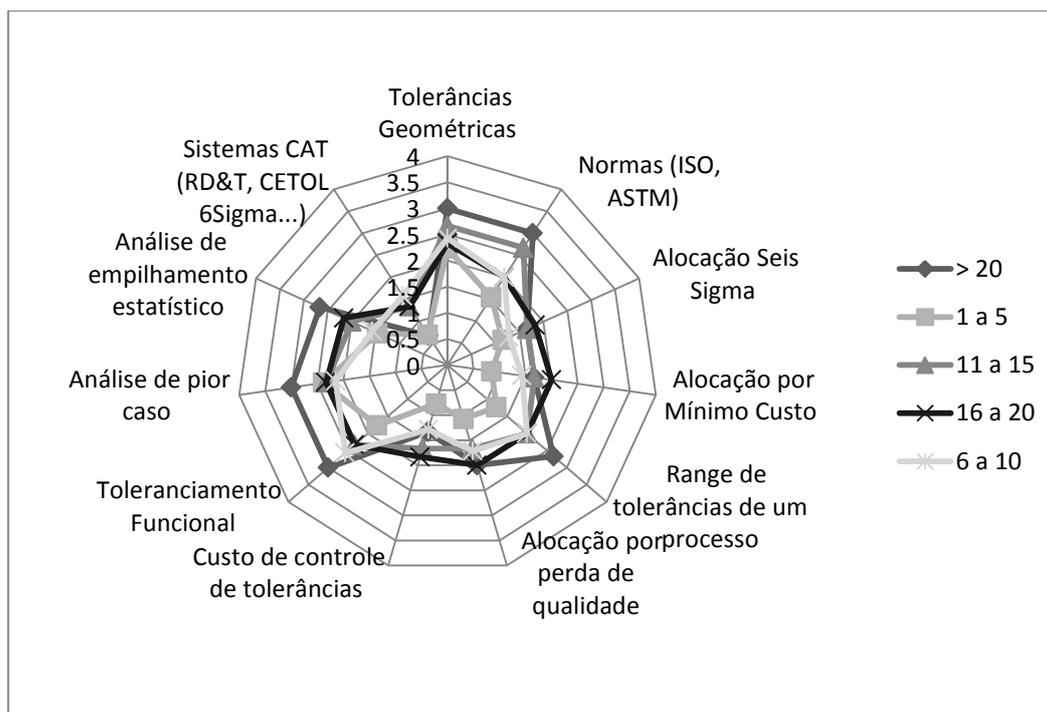
Foi gerado um gráfico de radar a fim de se avaliar quais conhecimentos estão mais presentes em cada faixa de experiência e avaliar, como um todo, o conhecimento dos funcionários quanto à especificação de tolerâncias, o resultado está presente no Gráfico 12.

Para todo o espectro, percebe-se que os funcionários se apresentam um maior domínio do toleranciamento geométrico, funcional e análise de toleranciamento para pior caso e com menor proficiência nos métodos estatísticos e de alocação otimizada de tolerâncias.



**Gráfico 12 - Radar dos conhecimentos avaliados**

Separando o gráfico por tempo de experiência, no Gráfico 13, pode-se perceber o distanciamento mais explícito entre os níveis. Porém, em vários aspectos, como toleranciamento de mínimo custo, toleranciamento para perda de qualidade e Seis Sigma e CAT ambos os espectros estão com avaliações próximas do nível básico.

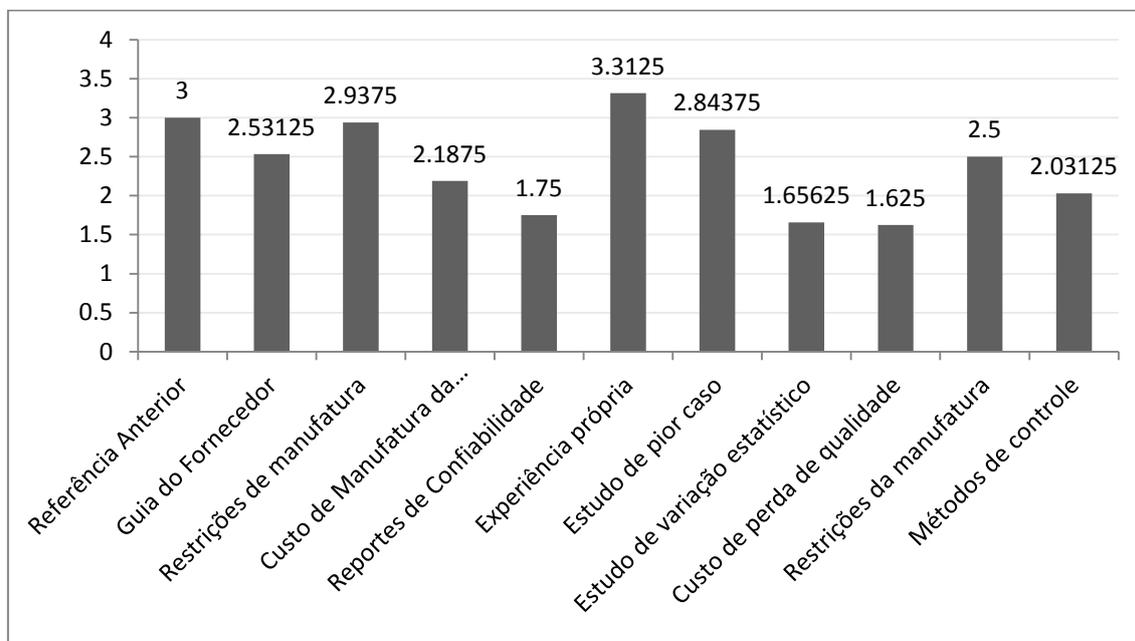


**Gráfico 13 – Radar de conhecimentos, separado por tempo de experiência.**

Com essa avaliação pode-se perceber que mesmo com o passar dos anos e com a absorção de conhecimentos, os projetistas sêniores não se distanciam dos júniores nos quesitos mais ligados ao toleranciamento de mínimo custo. Ambos gráficos possuem valores baixos.

### A.3 REFERÊNCIAS UTILIZADAS

As respostas quanto às referências utilizadas estão apresentadas no Gráfico 14, para toda a esfera de respondentes.



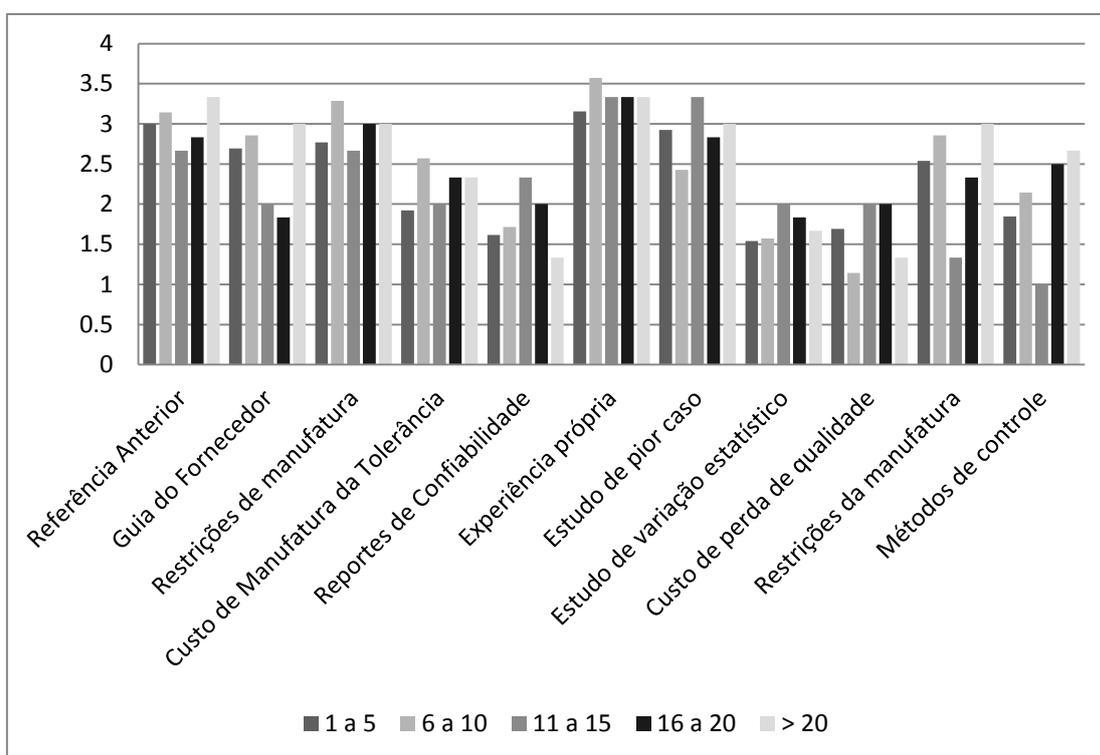
**Gráfico 14 - Referências utilizadas para a criação de um desenho de engenharia**

Percebe-se que dentre as diversas referências possíveis a serem utilizadas para a confecção de um desenho, as mais corriqueiramente usadas são: a experiência passada com outros componentes, os desenhos de componentes semelhantes, as restrições conhecidas da manufatura e o estudo de empilhamento de tolerâncias para pior caso.

As duas referências com qualificação mais elevada são extremamente atreladas à experiência passada e a conhecimentos já previamente adquiridos. Tais maneiras de desenvolvimento de projeto, apesar de serem métodos seguros e rápidos de seleção de tolerâncias, podem carregar erros ou conservadorismos passados para designs futuros, ocasionando em diversas vezes, custos de fabricação desnecessários ou grandes perdas de qualidade dos produtos.

O Gráfico 15 demonstra os mesmos resultados, mas agora com uma divisão por faixa de experiência. Percebe-se que as respostas podem ser

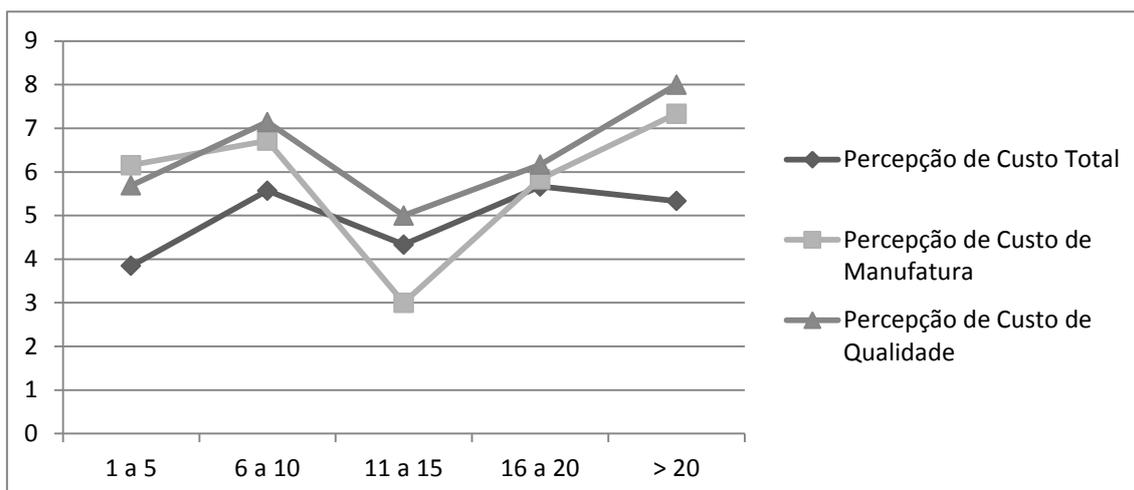
consideradas alinhadas quanto às diferenças de tempo de toleranciamento, mas o mais notável é que em quase todos os aspectos tem-se que os engenheiros “sêniores” utilizam mais referências e análises para a criação de uma especificação de produto. Porém, demonstram menor preocupação com as análises referentes à qualidade do produto, como: os custos de perda de qualidade e o uso de reportes de confiabilidade do produto. Tais negligências podem ser explicadas pelo fato de que devido à sua maior experiência, tais funcionários já as realizam, intrinsicamente.



**Gráfico 15 – Uso de referências por experiência**

#### A.4 PERCEPÇÃO DE CUSTOS

Produziu-se uma análise em função do tempo, a fim de se avaliar como a percepção dos custos de toleranciamento evolui com a experiência dos entrevistados, como mostrado no Gráfico 16.



**Gráfico 16 - Percepção de custo dos entrevistados**

Traçando uma linha de tendência, pode-se constatar que a percepção de custos das tolerâncias possui um crescimento com o passar do tempo e com a conquista de perícia dos entrevistados, porém, percebe-se uma variação nos custos de manufatura e qualidade, onde os engenheiros no meio da faixa, os considerados “plenos” julgam com menor intensidade os gastos com especificação dimensional. Este fato é possivelmente relacionado com o ganho de confiança durante um certo tempo de trabalho e, provavelmente, falta de *feedback* de instruções e preocupações previamente concebidas durante o início de sua carreira. Tal discernimento aparentemente retorna nos níveis de experiência mais altos, ou “sêniores”.

#### A.5 PERCEPÇÃO DA COMPANHIA

No Gráfico 17, são mostradas as respostas para as perguntas quanto à percepção das práticas e habilidades da companhia para estimular a seleção adequada de tolerâncias pelos seus empregados.

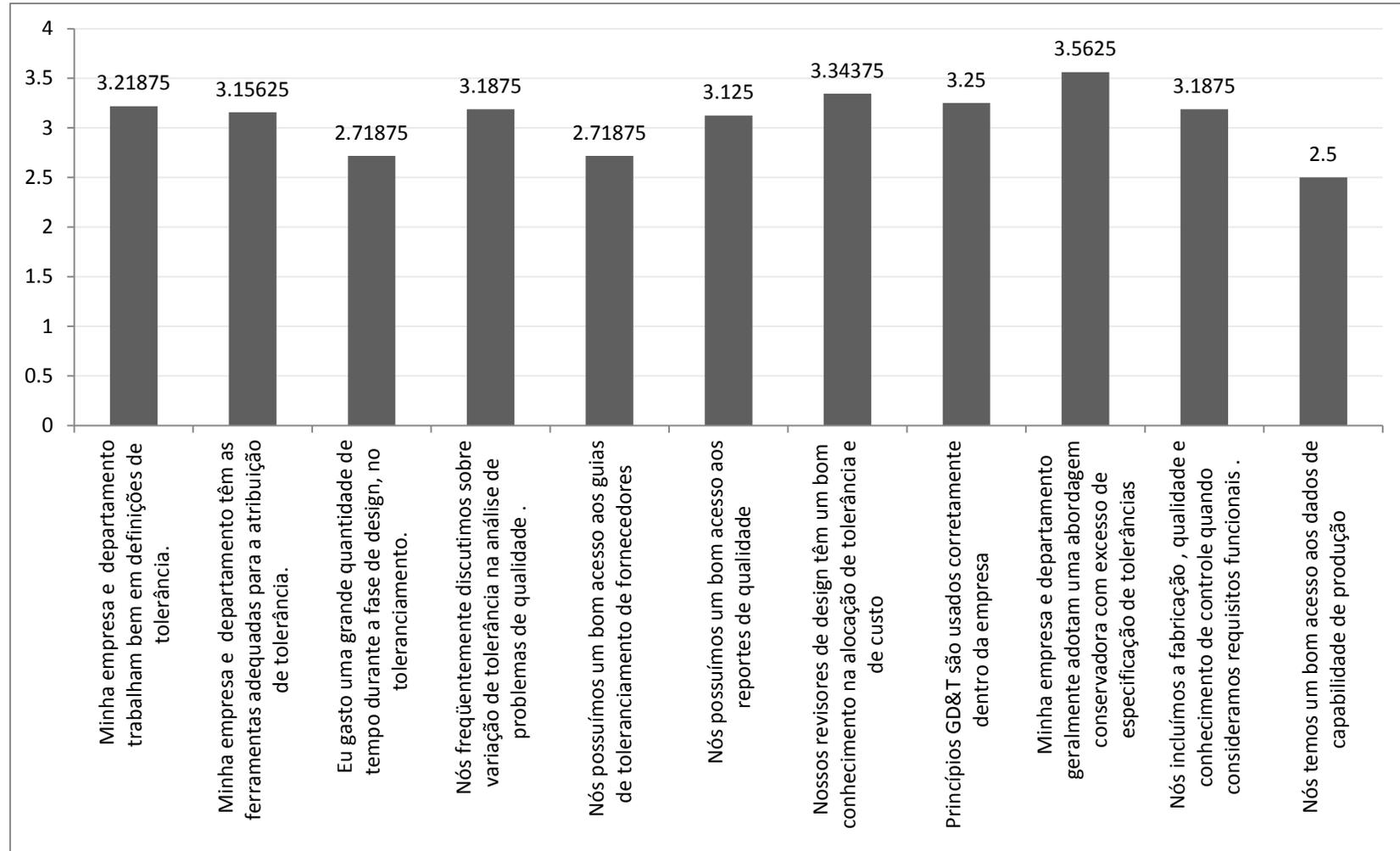


Gráfico 17 – Percepção da indústria pelos colaboradores

Com base nos resultados do Gráfico 17, um aspecto a ser destacado é que a afirmação com maior pontuação foi a de que a companhia e o departamento especificam tolerâncias com conservadorismo, a fim de se evitar riscos de perda eventual de qualidade e futuros problemas em campo. Tal maneira de se selecionar tolerâncias pode ser segura e, evitar custos futuros de garantia ou de perda de imagem. Porém, devido à pouca análise de otimização de custos de manufatura que é realizada pelos engenheiros, percebe-se que existe um nicho onde é possível aperfeiçoar o processo, tendo em vista reduzir os custos adicionais de manufatura e controle que estão embutidos em um projeto excessivamente robusto.

Para os outros fatores é possível verificar que os engenheiros possuem poucos dados quanto à capacidade das máquinas de manufatura dos fornecedores e da própria empresa, o que ajudaria muito na correta seleção de tolerâncias e evitando-se retrabalhos dos projetos no futuro. Outro ponto com baixo score foi o tempo gasto com a especificação de tolerâncias. Os entrevistados pouco concordaram com tal afirmação, o que leva a crer que o toleranciamento não é um grande consumidor de tempo do projeto do produto, provavelmente devido à utilização em baixa escala de softwares ou métodos de análise de tolerâncias e à grande difusão do uso de desenhos de referência e da experiência dos projetistas.

No Gráfico 18, separando as afirmações acima por tempo de experiência, pode-se concluir que os projetistas “sêniores” concordam em maior grau com as afirmações. Tendem a concluir que a empresa emprega e fornece as ferramentas necessárias para a coleta de dados de toleranciamento e que o faz de maneira efetiva. Porém, os projetistas juniores e plenos não concordam com tal afirmação. Isto que leva a conclusão de que, possivelmente, o acesso as fontes certas acabam ocorrendo com o tempo e com o aprendizado dos funcionários. Outra alternativa de trabalho se apresenta, onde um método de toleranciamento e um acesso facilitado à dados inerentes para o projeto sejam concretizados em uma plataforma, para todos os níveis de experiência, ajudando aos engenheiros de juniores à adquirir o nível de perícia dos sêniores.

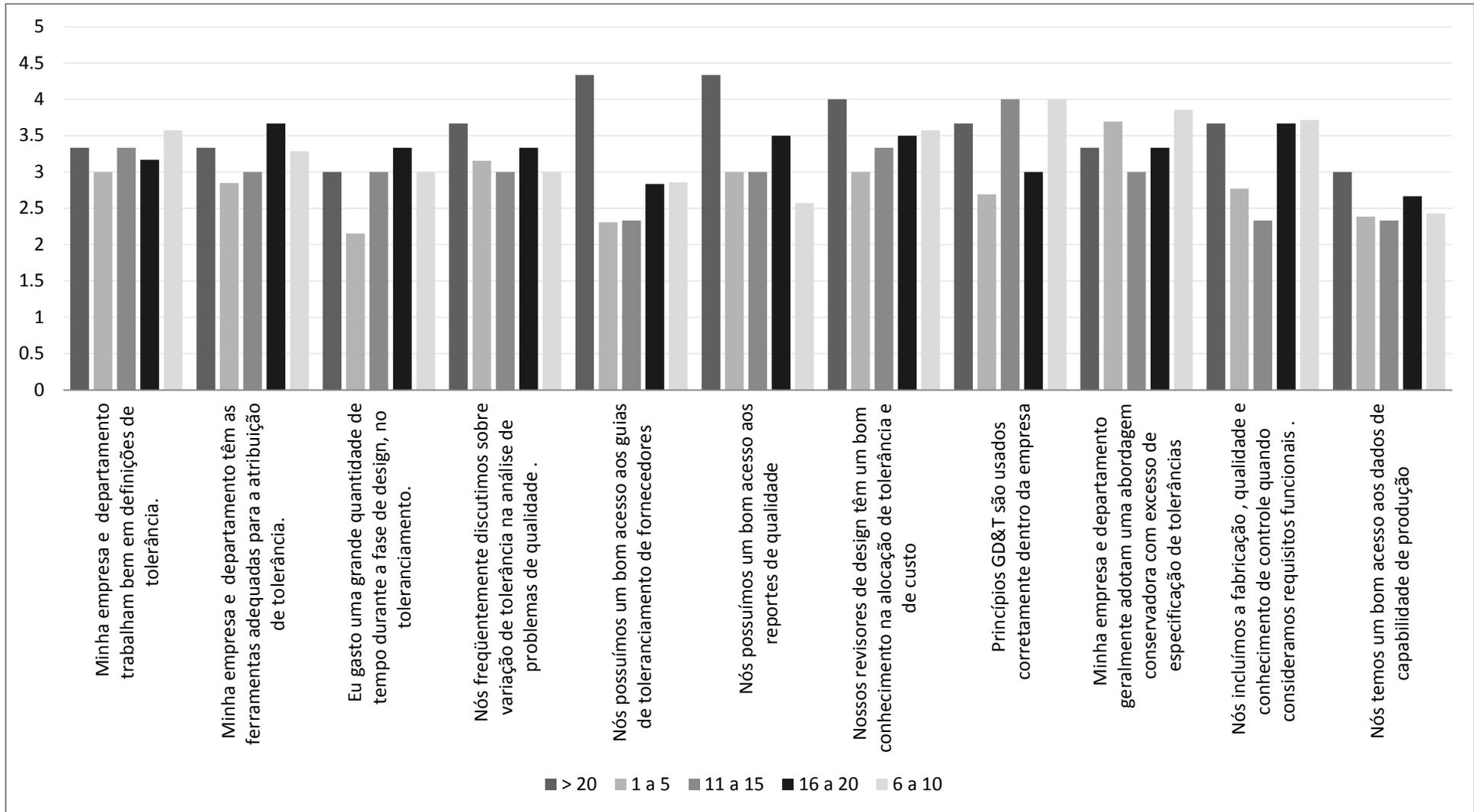
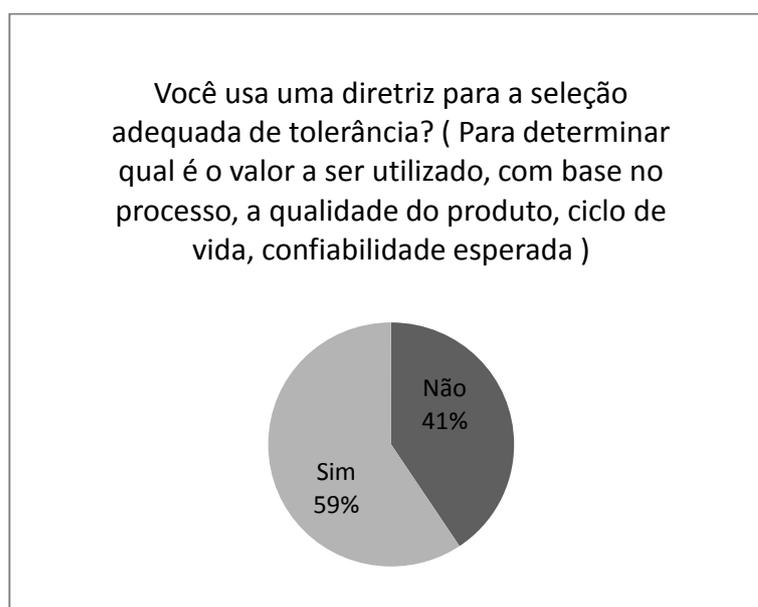


Gráfico 18 - Percepção da empresa pelos colaboradores, separado por tempo de experiência.

## A.6 QUESTÕES AFIRMATIVAS

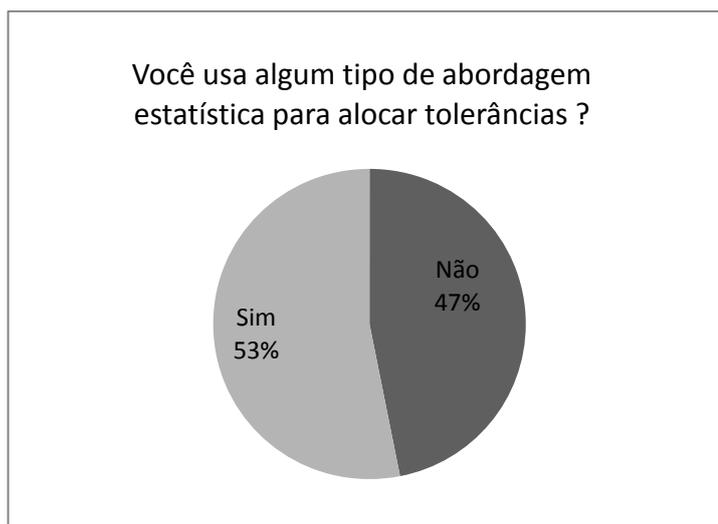
A fim de se obter um direcionamento direto para ações específicas pertinentes ao trabalho, algumas questões foram feitas de maneira direta, com alternativas de sim ou não. Foi perguntado se os entrevistados usam algum método ou boas práticas para a seleção de tolerâncias, pelos resultados mostrados no Gráfico 19, percebe-se que grande parte ainda não os faz.



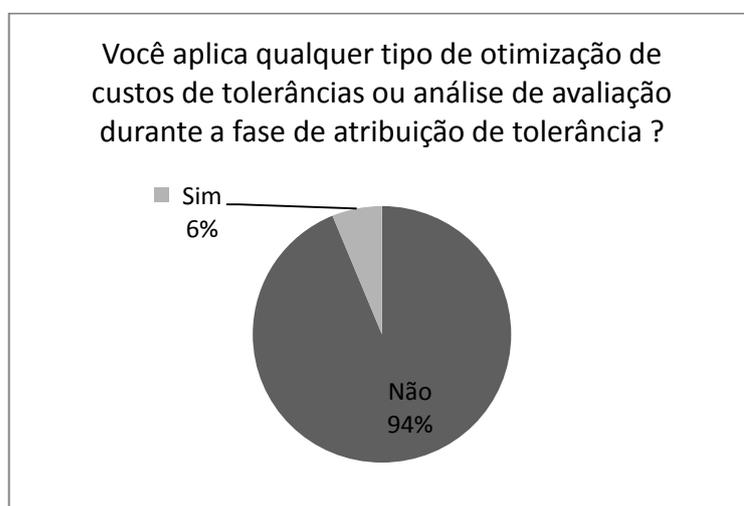
**Gráfico 19 – Seleção adequada de tolerâncias**

Também foi questionado o uso de ferramentas estatísticas para o toleranciamento, avaliado no Gráfico 20, percebe-se que grande parte dos entrevistados não usa as análises estatísticas de tolerâncias em seus projetos.

E finalmente foi indagado se os entrevistados usam algum tipo de otimização de tolerâncias para mínimo custo. Mostrados pelo Gráfico 21, tem-se que quase nenhum entrevistado faz otimização de custos de tolerâncias no desenvolvimento de produto.



**Gráfico 20 – Uso de ferramenta e abordagem**



**Gráfico 21 – Otimização de tolerâncias no custo do produto.**

## A.7 CONSIDERAÇÕES

Com os resultados da pesquisa prospectiva realizada, for possível verificar os seguintes aspectos:

- Existem discrepâncias quanto ao nível de experiência em alocação de tolerâncias, os engenheiros considerados júniores possuem nível de conhecimento menor do que os sêniores e plenos, porém, tal diferença é relativamente baixa e, em alguns aspectos, até inexistente.
- O uso de ferramentas baseados no conhecimento prévio são majoritariamente utilizadas no processo de definição de tolerâncias,

entre elas: a experiências, os valores já presentes nos projetos anteriores e guias de prática de fornecedores.

- c) De maneira geral, foi concordado que na corporação existe a cultura de sobre especificar tolerâncias, a fim de diminuir os riscos de problemas de qualidade. Também, que não se é gasto um grande tempo na fase de especificação de tolerâncias e que o uso de ferramentas de otimização não é incentivado ou requerido.
- d) Uma parte expressiva dos respondes não usa guias específicos para a atribuição de tolerâncias ou ferramentas de análise estatística e, apenas um deles diz usar métodos de otimização de custo por especificação de tolerâncias.

## APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO DO MODELO E DA FERRAMENTA

Neste apêndice, apresenta-se abaixo o questionário fornecido (em sua versão em português) aos participantes da pesquisa:



### Análise de aplicabilidade de modelo;

Aluno: Cristiano Zeni

Dissertação: MODELO DE ANÁLISE DE CUSTO ÓTIMO ASSOCIADO À TOLERÂNCIA ESPECIFICADA DURANTE A FASE DE PROJETO

Nome do entrevistado: \_\_\_\_\_

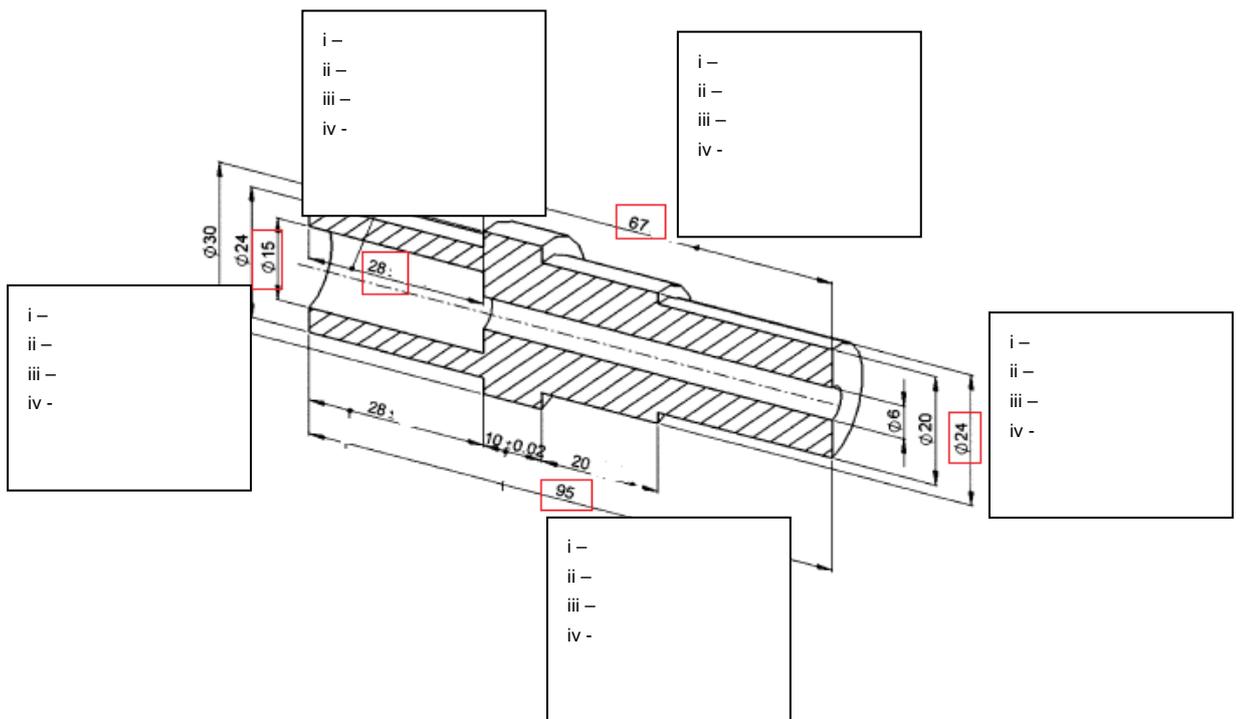
Data da entrevista: \_\_\_\_\_ Tempo do exercício: 1 - \_\_\_\_\_ 2 - \_\_\_\_\_ 3 - \_\_\_\_\_

1) Tendo como um projeto de produto apresentado como na figura abaixo e sabendo-se que:

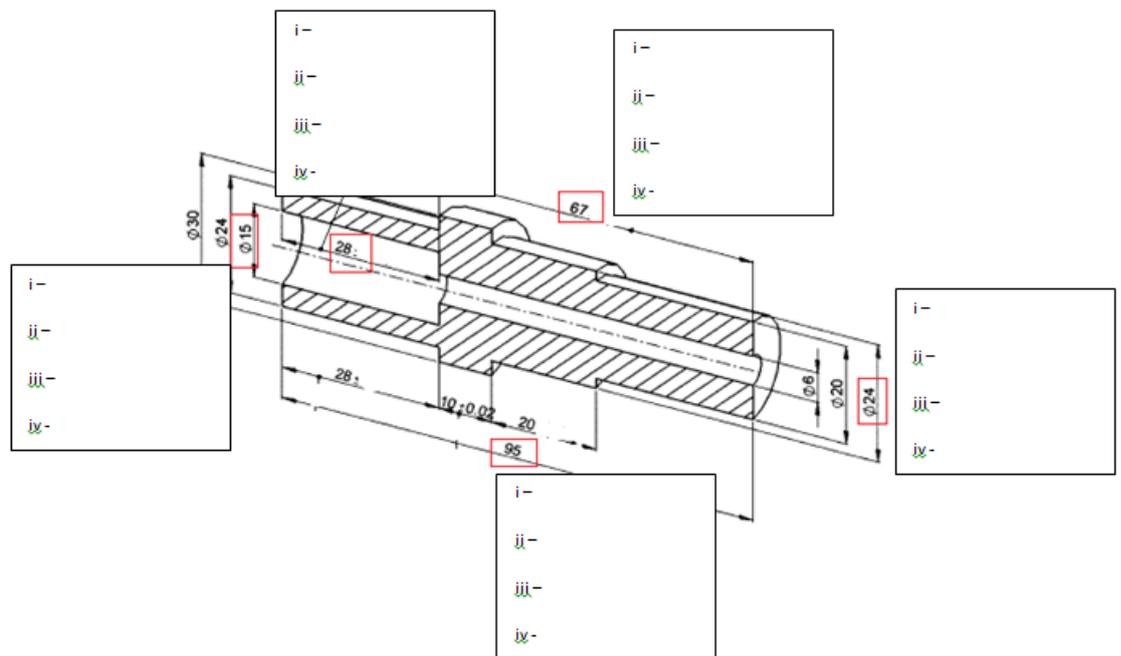
- a. Material da peça: Aço (considere qualquer aço comercial)
- b. Forma de fabricação: Torneamento
- c. Desconsidere a funcionalidade da peça, ou seja, onde ela será montada e para qual uso ela existe.

Preencha quais níveis de tolerâncias (+- x / +-y) você acredita serem aceitáveis para:

- i. Uma fabricação fácil e sem dificuldades, com baixo custo. Com alta taxa de aprovação em controle.
- ii. Uma fabricação média e atingível, com taxa alta de aprovação de peças, mas com algumas fora do especificado.
- iii. Uma fabricação controlada que requer precisão e cuidado. Média taxa de aprovação das peças.
- iv. Uma fabricação de extrema precisão e dificuldade.



1) Agora faça o mesmo exercício com o uso das abas “Manufacturing form” e “Control form”, usando os valores anotados como base:



a. Percebeu alguma diferença nítida? Foi mais rápido e útil? O resultado foi diferente? Deixe seus comentários.

---



---



---



---

- 
- 
- b. Acredita que tendo essa informação em mãos iria ajudar na especificação de tolerâncias no seu dia-a-dia?

---

---

---

---

---

---

- 2) Tendo como base o desenho do arquivo abaixo, preencha algumas (ou todas) as dimensões na aba "Drawing check". Rode a simulação, veja o resultado e responda as perguntas:

- i. Viu alguma cota que está aparentemente sobre dimensionada? (Com valores muito altos de custo e que poderia ser modificado)

---

---

---

---

- ii. Percebeu possibilidades de melhoria nas dimensões com o uso do programa?

---

---

---

---

- iii. Quanto tempo levou pra preencher os dados (aproximadamente);

---

---

---

---

- iv. Faça modificações nos parâmetros de entrada, mude o fornecedor, o processo de fabricação, o fornecedor da medição, a severidade e a ocorrência de falha da tolerância, os valores de tolerância geométrica. Você vê grande diferença de valores para valores? Consegue visualizar a aplicabilidade da ferramenta para melhoria do dimensionamento no seu dia-a-dia?

---

---

---

---

- v. De 0 (totalmente irrelevante) para 10 (muito útil), que nota daria para a relevância da ferramenta no seu dia-a-dia?

---

---

---

- vi. Vê alguma melhoria no layout ou alguma ideia que possa ser aplicada?

---

---

---

- vii. Alguma sugestão? Comentário?

---

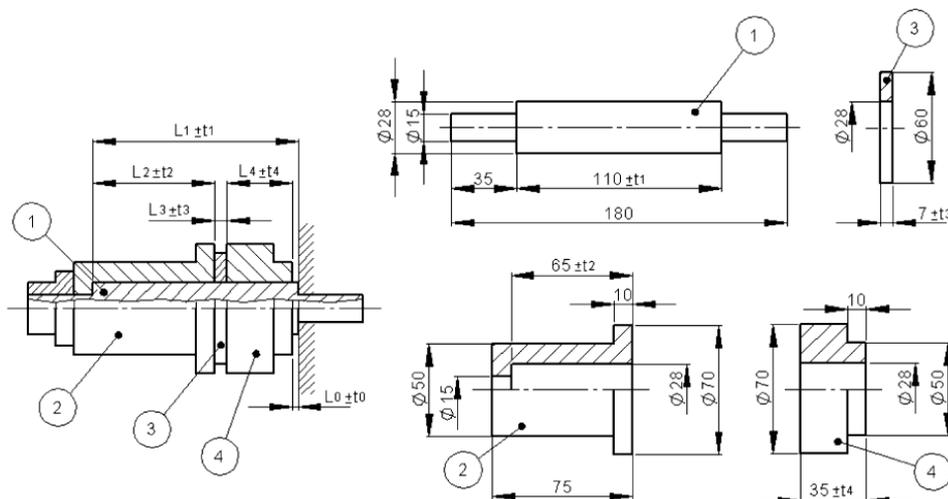
---

---

---



- 3) Tendo como base a montagem da figura abaixo, e considerando:
- Peças 2 e 4: Material: **Aço** com superfícies fresadas e torneadas, fornecedor y, medidor X, máquina 3D.
  - Peças 1 e 3: Aço usinado, fornecedor X, medidor X, máquina 3D.
  - Variação permissível de montagem ( $L_0 \pm t_0$ ) =  $3 \pm 0.4$ mm



- Faça uma distribuição de tolerâncias que para as dimensões  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$  com base apenas no seu conhecimento.

T1	
T2	
T3	
T4	

- Utilizando a aba “otimização, rode o programa com as sugestões e anote os valores do resultado (tempo esperado de otimização = 10min):

T1	
T2	
T3	
T4	

Responda:

- Os resultados foram muito diferentes?

- Se sim, o que acredita que influenciou?

---



---

- 
- 
- b) Acredita que os resultados dados pela planilha são coerentes com base na sua experiência prévia?

---

---

---

- c) De 0 (inútil) a 10 (extremamente útil), como você classificaria o uso dessa ferramenta para distribuição de tolerâncias? Algum comentário?

---

---

---

- d) Alguma outra sugestão? Comentário?

---

---

---

---

---