



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL
Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Tese de doutorado

**Um método para criar requisitos dimensionais na
indústria automotiva: o processo de escolha de
símbolos na especificação de tolerâncias**

Apresentada por: Thiago B. Murari
Orientador: Marcelo A. Moret

Novembro de 2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

M972m Murari, Thiago Barros

Um método para criar requisitos dimensionais na indústria automotiva: o processo de escolha de símbolos na especificação de tolerâncias / Thiago Barros Murari. – Salvador, 2016.

70 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2016.

Inclui referências.

1. Classificação de elementos geométricos. 2. Conhecimento explícito. 3. Gerenciamento de tolerâncias dimensionais. 4. Lógica Fuzzy. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Gonçalves, Marcelo Albano Moret Simões. III. Título.

CDD: 620.00113

Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC


Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada "Um método para criar requisitos dimensionais na indústria automotiva: o processo de escolha de símbolos na especificação de tolerâncias", apresentada no dia 23 de novembro de 2016, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.


Orientador:


Prof. Dr. Marpelo Albano Moret Simões Gonçalves
SENAI CIMATEC

Membro Interno:


Prof. Dr. Renelson Ribeiro Sampaio
SENAI CIMATEC


Membro Interno:


Prof.ª Dr.ª Josiane Dantas Viana Barbosa
SENAI CIMATEC

Membro Externo:


Prof. Dr. Roberto Carlos dos Santos Pacheco
UFSC

Membro Externo:


Prof. Dr. Luiz Pereira Calôba
UFRJ

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus.

Sou grato por todo o apoio que recebi da minha família, meus pais e irmãos, além da minha querida Mariana.

Também sou grato de por ter feito novas e verdadeiras amizades durante esta etapa da minha vida como discente do PPGMCTI.

Agradeço a Ford Motor Company pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Expresso meus sinceros agradecimentos ao Colegiado do Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC por acreditarem no meu potencial, e especialmente para o meu orientador e amigo, Marcelo A. Moret.

Salvador, Brasil
23 de Novembro de 2016

Thiago B. Murari

Resumo

Especificação de Tolerâncias Geométricas e Dimensionais é uma linguagem usada para descrever as variações geométricas e dimensionais permitidas de acordo com o projeto do produto. A engenharia de desenvolvimento de produto define os símbolos a serem utilizados na especificação dimensional de cada componente. A definição destes símbolos não é mais trivial, uma vez que a função dos produtos tem um incremento na sua complexidade ano após ano. Falhas nas especificações do produto podem aumentar o custo de produção, exigir mudanças no produto final ou até mesmo pode levar a problemas legais. Neste cenário, desenvolvemos um método para classificar os elementos geométricos e analisar a avaliação de especialistas na indústria automotiva. Além disto, foi possível sugerir o melhor conjunto de símbolos a partir da análise geométrica do elemento, montagem e sua função no conjunto.

Palavras-chave: GD&T, classificação de elementos, conhecimento explícito, gerenciamento de tolerâncias dimensionais, sistemas complexos, lógica Fuzzy.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Definição do problema	3
1.2	Objetivo Geral	4
1.2.1	Objetivos específicos	4
1.3	Importância da pesquisa	4
1.4	Motivação	5
1.5	Limites e limitações	5
1.6	Questões e hipóteses	5
1.7	Aspectos metodológicos	5
1.8	Organização do projeto de tese	6
2	Revisão da literatura	7
2.1	O GD&T nas fases do desenvolvimento de produto na indústria automotiva	7
2.2	Especificação de tolerâncias geométricas e dimensionais	10
2.2.1	Os símbolos no GD&T	11
2.2.2	Abordagens na especificação de tolerâncias geométricas	14
2.3	Considerações sobre a especificação de tolerâncias no desenvolvimento de produto	16
3	Gestão do conhecimento e a escolha dos símbolos no GD&T	18
3.1	A gestão do conhecimento no desenvolvimento de produto	18
3.2	Gestão do conhecimento na especificação de tolerâncias	21
3.2.1	Conhecimento, confiança e frequência de uso do GD&T na indústria automotiva	21
3.2.2	Conclusões sobre a pesquisa	27
4	Desenvolvimento do método para criar requisitos de tolerâncias dimensionais	29
4.1	Aplicação de inteligência artificial na gestão do conhecimento	29
4.1.1	Fuzzy	30
4.1.2	Métodos de fuzzificação	31
4.1.3	Métodos de inferência fuzzy	32
4.1.4	Métodos de defuzzificação	34
4.2	Definição do método para criar requisitos dimensionais com sistema especialista	35
4.2.1	Classificação de elementos geométricos	35
5	Estudo de caso: aplicação da método na indústria automotiva	38
5.1	Sistema de montagem fixa	38
5.2	Seleção dos especialistas	40
5.3	Avaliação do problema proposto pelos especialistas	42
5.4	Aplicação do modelo fuzzy	43
5.5	Desenvolvimento do requisito dimensional	44
5.6	Validação do método	45

6	Considerações finais	47
6.1	Conclusões	47
6.2	Atividades Futuras de Pesquisa	48
A	Apêndice	49
A.1	Questões	49
A.2	Respostas	49
	Referências	53

Lista de Tabelas

2.1	Comparação dos métodos de especificação de tolerâncias	16
5.1	Regras utilizadas na lógica fuzzy	43
5.2	Função triangular de entrada	44
5.3	Função triangular de saída	44
5.4	Resultados obtidos com o modelo fuzzy	44
A.1	Respostas do questionário aplicado	50

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de ciclo de vida genérico para um projeto	7
2.2	Modelo genérico de PDP	8
2.3	Fases da especificação de tolerâncias	9
2.4	A especificação de tolerâncias no processo em V	10
2.5	Exemplo de dimensionamento direto	11
2.6	Placas de regulamentação de trânsito	12
2.7	Símbolos de característica geométrica na ASME Y14.5 2009	13
2.8	Exemplos de símbolos modificadores na ASME Y14.5 2009	13
2.9	Representação dos símbolos em um FCF genérico	13
3.1	Modelo SECI	20
3.2	Representação das dimensões analisadas no questionário	22
3.3	Escala Qualitativa do questionário	22
3.4	Exemplo de sistema de montagem fixa	23
3.5	Área de atuação dos profissionais	23
3.6	Tempo de experiência na indústria automotiva	24
3.7	Treinamento formal de GD&T	24
3.8	Frequência de leitura ou utilização dos conhecimentos de GD&T	25
3.9	Conhecimentos gerais sobre GD&T	25
3.10	Confiança de leitura ou utilização dos conhecimentos de GD&T	26
3.11	Gráfico da influência do tempo de experiência nos conhecimentos de GD&T	27
3.12	Gráfico da influência do tempo de experiência na confiança e conforto de utilizar o GD&T	27
4.1	Sistema típico de inferência fuzzy	30
4.2	Exemplo de função base de pertinência	32
4.3	Exemplos de formas de funções	32
4.4	Modelo de classificação de elementos geométricos	37
5.1	Exemplo de um sistema de montagem fixa	38
5.2	Símbolos modificadores do estudo de caso	39
5.3	Representação da zona de interferência devido as variações de orientação do furo roscado	40
5.4	Média de frequências de uso e leitura agrupadas	41
5.5	Médias de conhecimento, confiança e conforto em aplicar GD&T agrupadas	41
5.6	Gráfico de intervalos de confiança para a média dos resultados da pesquisa	42
5.7	Requisito dimensional de engenharia	45
5.8	Simulação de Monte Carlo para validação do modelo fuzzy	46

Lista de Siglas

CAD	Computer-aided Design
DRF	Datum Reference Frame
FCF	Feature Control Frame
GD&T	Geometric and Dimensional Tolerancing
MMC	Maximum Material Condition
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PPGMCTI ..	Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
PT	Projected Tolerance
RFS	Regardless of Feature Size
SECI	Socialização, Externalização, Combinação e Internalização

Lista de Termos

ASME Y14.5 2009: Norma da Sociedade Americana de Engenheiros Americanos que trata da especificação de tolerâncias dimensionais e geométricas.

Datum: Elemento geométrico de referência definido pela engenharia, normalmente utilizado para a localização do componente no espaço tridimensional. Superfícies de contato, pinos e furos de localização são considerados bons elementos para serem utilizados como datums.

Feature Control Frame: Quadro de controle de tolerâncias, que contém as informações sobre as tolerâncias geométricas aplicadas em um determinado elemento, ou um conjunto deles.

Feature of Size: Elemento mensurável. Define de um elemento geométrico associado a uma dimensão específica. Pode ser regular ou irregular.

Maximum Material Condition: Condição de máximo material. É a condição onde o elemento mensurável contém a máxima quantidade de material dentro dos limites dimensionais especificados.

Projected Tolerance: Tolerância projetada. Zona de tolerância projetada para além do elemento mensurável, cujo valor nominal é determinado pelo valor especificado no quadro de tolerância geométrica.

Regardless of Feature Size: Independente da dimensão do elemento. Tolerância geométrica aplicada que é independente de qualquer incremento real da dimensão do elemento mensurável.

Introdução

A especificação de tolerâncias geométricas e dimensionais (GD&T) está presente em todas as fases do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP): inclusive sendo influenciado pelo escopo do pré-desenvolvimento e afetando os resultados documentados no pós-desenvolvimento. Praticamente todas as etapas da fase de desenvolvimento no PDP tem ações que envolvem diretamente o GD&T. É nesta fase que as tolerâncias geométricas devem ser especificadas, valores numéricos atribuídos e tolerâncias geométricas são analisadas, e os requisitos do cliente traduzidos em especificações dimensionais e geométricas.

A definição do produto deve ser baseada em requisitos funcionais. A função é muito importante na especificação de tolerâncias dimensionais em um elemento geométrico na peça (LIGGETT, 1993). A determinação de tolerância dimensional deve ser precedida de especificação cuidadosa dos tipos de tolerância e símbolos que serão aplicados nos elementos a serem controlados. Desde a seleção de elementos de posicionamento, chamados de referenciais para a localização do componente no espaço tridimensional, que são globalmente conhecidos como datums, até a escolha de um modificador de material ou o uso do símbolo de diâmetro podem modificar a zona de tolerância e impactar na medição da peça (ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011). As dimensões e tolerâncias nos desenhos técnicos são a tradução dos requisitos de fabricação e montagem de produtos e são fundamentais no processo de fabricação para garantir a qualidade do produto final (FARMER, 1998).

Projetistas e engenheiros podem ser treinados no PDP como uma alternativa para reduzir os problemas causados pela escolha e má interpretação da especificação dimensional (SOUSA; WANDECK, 2009), mas apenas o treinamento não é um processo a prova de erros no GD&T. Infelizmente uma grande parte dos engenheiros não são capacitados para ler um desenho de engenharia. Uma vez que a especificação do desenho irá conduzir todo o processo, a aplicação adequada do GD&T é mandatória. Além disso, a engenharia necessita compreender o impacto de suas especificações sobre a capacidade do processo de produção, qualidade e custo do produto (DAY, 1999).

A atribuição de tolerâncias geométricas em peças fabricadas tem sido constantemente pesquisada. Os métodos desenvolvidos podem ser classificados em três categorias: especificação, alocação e análise da tolerância (HONG; CHANG, 2002). Projetistas definem valores numéricos para todas as tolerâncias na alocação de tolerância e a engenharia verifica os requisitos de projeto, como as espaços e ângulos, na análise de tolerância.

Na especificação de tolerância, o projetista deve selecionar os datums, características

importantes e símbolos que serão utilizados no quadro de controle do elemento (Feature Control Frame ou FCF). A seleção de cada símbolo depende da experiência do projetista para determinar a melhor sequência de símbolos e assim desenvolver o FCF. Algumas indústrias desenvolvem regras internas para auxiliar a engenharia na tarefa de especificar as tolerâncias para os casos mais comuns, porém isto não é suficiente para evitar falhas na especificações de tolerância. A experiência do projetista sobre especificação de tolerâncias é um conhecimento tácito, definida como habilidades ou experiências adquiridas que não são facilmente codificadas ou mesmo traduzidas (CHUGH, 2015). Em relação ao GD&T, é difícil de codificar esse conhecimento tácito e transformá-lo em conhecimento explícito.

Alguns dos fatores importantes que devem ser aplicados no processo de implantação do sistema de gestão dimensional são o GD&T em conformidade com a norma internacional, treinar os engenheiros e projetistas, identificar as características importantes com base em requisitos funcionais, além de identificar os requisitos de produto do cliente (TEOI et al., 2016).

As normas internacionais são compostas de um conjunto variado de símbolos que serão utilizados no FCF. A norma ASME Y14.5 2009 é composta por quatorze símbolos de controle de características geométricas e vinte e dois modificadores, além de vários outros símbolos disponíveis distribuídos em suas mais de duzentas páginas. Cada símbolo tem a sua própria regra de uso e a sequência de modificadores utilizados pode mudar completamente a zona da tolerância (ASME, 2009). A dificuldade que os projetistas e os engenheiros têm de escolher o melhor conjunto de símbolos para atender a função de um elemento geométrico específico é claramente devido a quantidade de possíveis símbolos a serem utilizados em conjunto, com diferentes significados, além da crescente complexidade dos componentes e conjuntos na indústria mecânica. Desenhos insuficientemente especificados podem resultar em dúvidas para engenheiros de produção, manufatura e inspeção, além de possíveis retrabalhos e defeitos (HENZOLD, 2006).

Avanços na especificação de tolerância são esperados em três diferentes áreas: o tratamento de dados, a estratégia geral para a solução dos problemas de definição, assim como a compatibilidade com as tarefas e gerenciamento. Algumas melhorias também são esperadas no tratamento de requisitos de projeto, como a identificação automática de requisitos de montagem. Os requisitos funcionais precisam ser modelados e classificados corretamente (ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011).

No que diz respeito a tolerância e requisitos de classificação, existem recursos em softwares de Desenho Auxiliado por Computador (CAD) que permitem associar tolerâncias com um elemento geométrico desde 1999. Entretanto, a forma como este requisito de tolerância é armazenada e associada com o elemento ainda não é padronizado (WILSON, 1999). Isto é uma barreira para se estabelecer uma base de dados de GD&T possível de ser analisado

por métodos computacionais.

1.1 Definição do problema

O crescimento da capacidade de processamento computacional disponível torna possível a adição de mais complexidade aos modelos analíticos (HARTY, 1999). Modelos complexos requerem mais dados para serem definidos, e estes dados demandam tempo para serem adquiridos. Porém isto é necessário ao desenvolvimento dos modelos computacionais que avaliam, por exemplo o impacto da variação dimensional em sistemas complexos de veículos automotores.

Esta análise pode ser dividida em empírico e analítico. O entendimento empírico provém da tentativa e erro pelo aprendizado de quais fatores influenciam o desempenho do veículo sobre determinadas condições. Porém, sem o conhecimento mecânico de como mudanças de projeto e propriedades afetam o desempenho, extrapolando experiências passadas e novas condições que envolvam fatores desconhecidos, os métodos empíricos podem induzir a erros. Por este motivo a abordagem analítica costuma ser muito mais empregada pelos engenheiros. A abordagem analítica propõe descrever os mecanismos de interesse baseado nos conhecimentos das leis da física, e neste caso pode-se estabelecer um modelo analítico. Em casos mais simples estes modelos podem ser representados por equações algébricas e diferenciais relacionadas com as forças ou movimentos do sistema. O modelo provém a capacidade de prever, e permite propor soluções para alcançar o objetivo durante as fases de projeto. Os métodos analíticos não são a prova de erros, visto que tratam de aproximações da realidade. Cabe ao engenheiro compreender as hipóteses e fatores de entrada para melhor aproximar o modelo analítico à realidade, de forma a aproveitar ao máximo suas qualidades. Os métodos analíticos devem ser parte de um processo estruturado, para garantir que o erro do modelo seja aceitável. Um método analítico difundido na engenharia automotiva é o processo em V (BLUNDELL; HARTY, 2004).

Aplicar corretamente as tolerâncias dimensionais e geométricas em produtos complexos depende em grande parte da experiência do projetista no sistema e do seu conhecimento nas normas. Como estas normas são muito extensas e com muitos detalhes são inúmeras as possibilidades de escolhas de símbolos para especificar uma tolerância, e, desta forma, os desenhos técnicos precisam ser revisados várias vezes por especialistas antes de serem liberados para a produção. Por se tratar de um processo manual, alguns destes desenhos liberados contem especificações fora dos padrões da norma ou que não atendem às necessidades relativas a função do produto. Estas especificações podem ser interpretadas de forma diferente entre diversos fornecedores e acarretar em custos como reparo ou substituição do produto, dificuldade para montar os componentes na linha de produção, dentre outros problemas que afetam podem afetar os resultados financeiros de uma empresa

automotiva.

Como garantir que o projeto de tolerâncias e os símbolos utilizados no projeto representam as necessidades do produto relativos a sua montagem e função?

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um método computacional para auxiliar a especificação das tolerâncias geométricas e a escolha dos símbolos utilizados nestas tolerâncias durante o processo de desenvolvimento de produto.

1.2.1 Objetivos específicos

- (i) Compreender o processo de escolha dos símbolos no GD&T.
- (ii) Desenvolver um método para classificar dos elementos geométricos no desenvolvimento do GD&T em projetos da indústria automotiva.
- (iii) Propor um modelo computacional que permita transformar o conhecimento tácito do time de engenharia dimensional em conhecimento explícito, capaz de auxiliar a escolha dos tipos de tolerâncias geométricas e modificadores a serem utilizados com base na função do componente.

1.3 Importância da pesquisa

Um dos desafios atuais no desenvolvimento de produto é a integração da função do elemento no desenvolvimento de tolerâncias dimensionais e a avaliação do seu efeito nos custos de produção. A engenharia de produto define o conjunto, seus componentes e suas formas geométricas, assim como suas especificações dimensionais. Por outro lado, a manufatura de componentes no valor nominal da especificação é impossível devido aos processos de manufatura e o comportamento do material, que geram, naturalmente, a variação dimensional. Então, elementos manufaturados sempre desviarão da dimensão nominal requerida no projeto. A correta especificação do GD&T nos componentes é fator importante na definição de custos e qualidade do conjunto.

Para melhorar o processo de especificação de tolerâncias, é necessário encontrar o balanceamento entre o processamento explícito de requisitos, ideal para tratar cadeias complexas de tolerâncias geométricas, e uma estratégia geral direcionada pelas relações dos elementos

no conjunto, ou seja, a função dos elementos. A formalização do conhecimento técnico se dará por meio de regras ou requisitos de engenharia para a seleção de tipos de tolerância e datums em condições típicas de projeto (ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011).

Estudos interdisciplinares podem contribuir para aumentar a compreensão de como a dinâmica e a função dos conjuntos mecânicos são fortemente afetados não somente pelos valores de tolerância alocados no sistema, mas também pela escolha dos símbolos de característica geométrica e modificadores.

1.4 Motivação

Compreender o processo da escolha de símbolos do GD&T no resultado final da produção de um conjunto mecânico, contextualizado dentro da indústria automotiva.

1.5 Limites e limitações

Este projeto está limitado à investigação de um determinado conjunto de símbolos que fazem parte da norma ASME Y14.5 2009.

1.6 Questões e hipóteses

A análise das funções dos elementos que fazem parte de um componente ou conjunto mecânico auxiliam o projetista a determinar as tolerâncias geométricas e dimensionais que serão aplicadas durante a fase de detalhamento no desenvolvimento de produto.

1.7 Aspectos metodológicos

Este é um projeto interdisciplinar com ênfase em dados obtidos por meio de pesquisa com profissionais da indústria automotiva e desenhos técnicos com especificações de tolerâncias dimensionais. Desenvolveu-se um manuscrito em formato de artigo e dois capítulos de livro, de forma que cada um dos objetivos serão contemplados em publicações. Assim, espera-se que todos os estudos desenvolvidos aqui foram submetidos à avaliação de especialistas em cada uma das áreas de conhecimento.

1.8 Organização do projeto de tese

Este documento apresenta 6 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução**
- **Capítulo 2 - Revisão de literatura**
- **Capítulo 3 - Gestão do conhecimento e a escolha dos símbolos no GD&T**
- **Capítulo 4 - Desenvolvimento do método para criar requisitos de tolerâncias dimensionais**
- **Capítulo 5 - Estudo de caso: aplicação do sistema especialista fuzzy na indústria automotiva**
- **Capítulo 6 - Considerações Finais:** Apresenta as conclusões, contribuições e algumas sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas no futuro.

Revisão da literatura

2.1 O GD&T nas fases do desenvolvimento de produto na indústria automotiva

O desenvolvimento dos veículos automotores passa por diferentes fases de projeto. Estas fases no ciclo de vida do desenvolvimento de produto foram identificadas de forma genérica conforme a Figura 2.1.

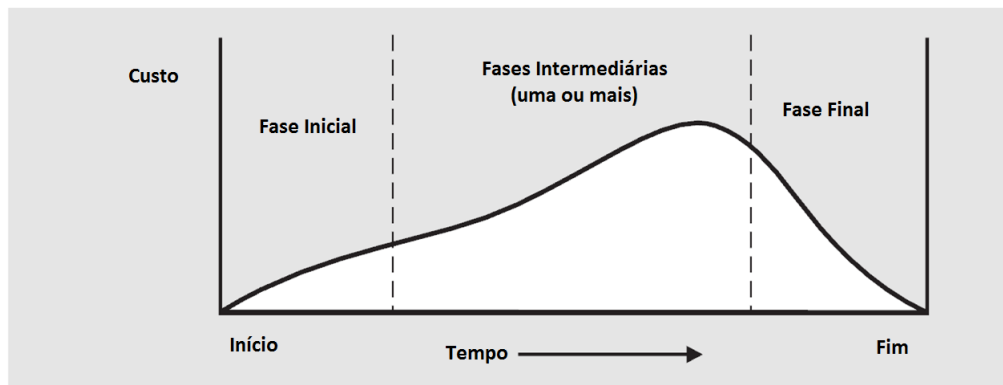


Figura 2.1: Exemplo de ciclo de vida genérico para um projeto. Fonte: [DUNCAN, 1996](#)

Da mesma forma, o PDP pode ser dividido, de forma genérica, em três grandes fases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento ([ROZENFELD et al., 2006](#)). O objetivo do pré-desenvolvimento é definir os projetos que serão desenvolvidos pelo time de Desenvolvimento de Produtos. Nesta fase temos o desdobramento do planejamento estratégico em um portfólio, o escopo e a definição do plano do projeto inicial. A fase de desenvolvimento, também chamada de desenvolvimento de produtos é formada por várias etapas que vão desde a definição de requisitos do produto até a concepção do mesmo. O pós-desenvolvimento é a fase onde é necessário documentar o projeto para garantir que o conhecimento adquirido pelo time de engenharia seja utilizados na definição e desenvolvimento do próximo projeto. Além disto, é no pós-desenvolvimento que deve ser avaliado o ciclo de vida real do produto, para garantir que alcance o planejamento econômico realizado no desenvolvimento e o adequado descarte ou reciclagem do produto após o uso (Figura 2.2).

O objetivo do projeto informacional é compreender a voz do consumidor e traduzir em requisitos de produto. Nesta fase, deve ser documentado todos os requisitos de tolerâncias dimensionais do produto. Dentre estes requisitos estão as características estéticas, como

folgas e nivelamentos entre as peças do veículo, ângulos de alinhamento de rodas, e características funcionais e de montagem das peças. Nesta etapa também são avaliados os projetos similares documentados anteriormente, e os componentes e sistemas dos veículos da concorrência, para garantir que os requisitos são possíveis de atingir considerando o planejamento econômico da fase de pré-desenvolvimento (CRAIG, 1997). Estes requisitos de produto serão as entradas do processo de desenvolvimento do GD&T.

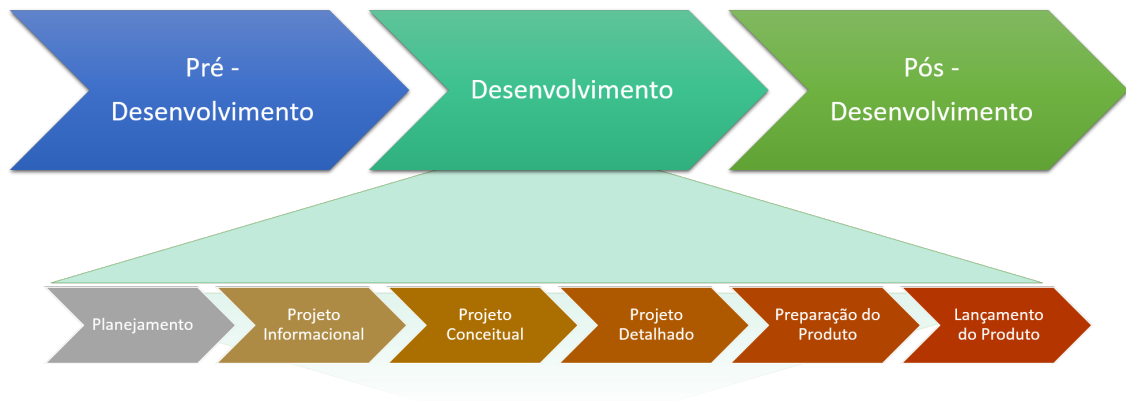


Figura 2.2: Modelo genérico de PDP. Fonte: Adaptado de ROZENFELD et al.,2006

Durante o projeto conceitual, o time de engenharia seleciona sistemas que atendem os requisitos de produto e o custo estimado para cada sistema. Nesta etapa deve ocorrer a identificação das principais funções de ordem dimensional do produto e o mapeamento dos requisitos de função, comportamento e especificações geométricas, Em 2008, MAO et al. propõe um método onde o modelo de representação da tolerância é considerado nessa fase, de forma a garantir a viabilidade da estrutura conceitual do projeto.

Várias pesquisas foram desenvolvidas para auxiliar o desenvolvimento do processo de determinação de tolerâncias. Esta especificação influencia no custo final do produto devido aos processos de fabricação que serão escolhidos para atender os requisitos de engenharia (CRAIG, 1997). Os métodos desenvolvidos podem ser classificados em três categorias, conforme a Figura 2.3 e devem ocorrer durante a etapa de projeto detalhado (HONG; CHANG, 2002):

1. Especificação de tolerâncias. Os elementos geométricos que devem ser tolerados estão em todas as peças do conjunto. Alguns destes elementos são selecionados como datums. Para cada elemento, uma série de tipos diferentes de tolerância são escolhidas para limitar a variação com relação ao valor nominal e datums. Esta é a categoria que trata dos símbolos e dos valores iniciais.

2. Atribuição de tolerâncias. Valores numéricos são determinados para todas as tolerâncias especificadas de acordo com os requisitos, sejam eles valores de ajustes ou otimização.
3. Análise de tolerâncias. Os requisitos de projeto do conjunto são verificados. São verificados, por exemplo, as distâncias e ângulos entre os elementos de diversos componentes nos conjuntos. Análises de empilhamento de tolerâncias são executadas em uma, duas ou três dimensões.

A processo de determinação de tolerâncias também influencia na preparação do produto para o lançamento. Um projeto dimensional baseado na função do componente resultará em processo de fabricação estável, na definição de um método de controle dimensional eficaz e, conseqüentemente, em um produto final que atende as expectativas do consumidor.



Figura 2.3: Fases da especificação de tolerâncias. Fonte: o Autor

Estas categorias para definição de tolerâncias podem ser claramente destacadas no Processo em V (Figura 2.4). Este processo é um método analítico difundido na engenharia automotiva e foi proposto por [BLUNDELL; HARTY](#) em 2004, para estruturar modelos computacionais e, desta forma, garantir que os erros encontrados estejam dentro de limites aceitáveis para o projeto.

Durante a síntese, o objetivo principal é criar as peças e subsistemas, geralmente com o auxílio de computadores para validar se os objetivos individuais estão sendo atingidos. É neste momento que se faz necessário especificar e alocar os valores de tolerância para cada característica significativa para o projeto. Exemplos desta etapa são verificações de esforços em pontos específicos do componente ou simulação da cinemática da suspensão. Na etapa de simulação, também referida como prototipagem virtual, faz-se uso

de modelos computacionais para prever o comportamento do sistema completo e seus contribuidores. Alguns modelos preparados para os subsistemas na fase de síntese podem ser reutilizados na simulação. É nesta etapa do processo em V que é possível dizer o impacto, ou análise, de cada tolerância escolhida no resultado final do produto.

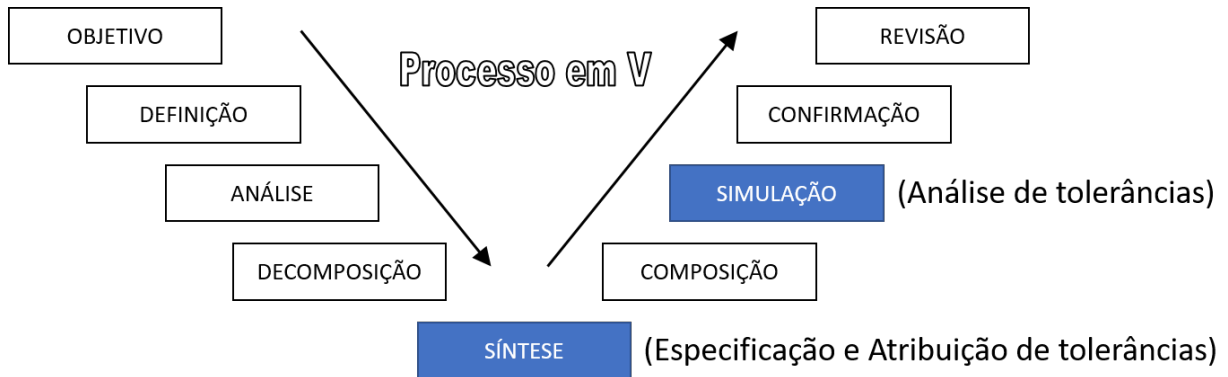


Figura 2.4: A especificação de tolerâncias no processo em V. Fonte: o Autor

2.2 Especificação de tolerâncias geométricas e dimensionais

Quando geradas pelo método de especificação de tolerâncias direto ou linear, o processo é reduzido à seleção de dimensões funcionais que devem ser controladas em um componente (Figura 2.5). Cada dimensão funcional é definida pela distância entre superfícies ou outras entidades geométricas, como eixos, pontos ou cantos, que tenham relação com o conjunto. De acordo com a prática comum, estas dimensões são toleradas somente caso contribuam nos resultados dos requisitos de projeto. Este tipo de especificação também é limitada no que diz respeito a interpretação, inspeção e efetividade.

A especificação de tolerâncias deve considerar o uso de tolerâncias geométricas para permitir o controle de características como forma, orientação localização, entre outras. Uma condição fundamental é estar em conformidade com as normas ASME ou ISO. Considerando a dificuldade de assegurar esta condição, não é surpresa que poucos métodos de especificação de tolerâncias são capazes de gerar requisitos de tolerâncias dimensionais consistentes com as normas (ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011). Como exemplo, alguns destes métodos não respeitam a prioridade de datums no FCF conforme requerido pela norma ASME (KANDIKJAN; SHAH; DAVIDSON, 2001).

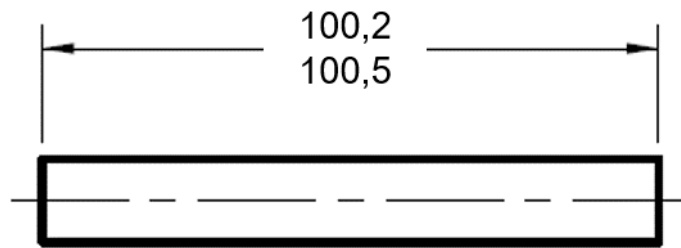


Figura 2.5: Exemplo de dimensionamento direto. Fonte: O Autor

A especificação de tolerâncias foi, durante muito tempo, uma tarefa do projeto considerada simples. O projetista de produto era responsável por definir tolerâncias lineares em algumas dimensões do componente para atender os requisitos de engenharia que ele reconhecesse como necessário. Estas especificações eram aplicadas pela engenharia de manufatura, que contribuía com melhorias no projeto por meio de comentários sobre problemas ocorridos durante a produção e possíveis melhorias relacionadas com custos.

O aumento da competição pelo mercado influenciou as empresas a reduzir defeitos e custos de produção nas últimas décadas. Normas técnicas encorajam a utilização do GD&T, proporcionando ao projetista mais ferramentas para assegurar a montagem e o correto funcionamento do produto. Restrições no GD&T surgiram devido ao controle estatístico do processo e o gerenciamento da qualidade. Como resultado, a especificação de tolerâncias passou a ser uma atividade complexa que envolve os engenheiros de manufatura, qualidade e desenvolvimento. Entretanto, isto acontece nos estágios em que a difusão das tolerâncias geométricas tem o maior impacto. Enquanto as especificações geométricas necessitarem ser convertida em símbolos, o projetista não pode evitar ter que utilizar os vários tipos de controle geométrico e datums agora disponíveis. A complexidade e evolução contínua das normas faz com este processo de adaptação seja difícil e lento (ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011).

2.2.1 Os símbolos no GD&T

As normas de GD&T fazem uso dos símbolos para comunicar os requisitos de engenharia. Os símbolos utilizados nesta pesquisa são estabelecidos na Seção 3 da ASME Y14.5 2009 (ASME, 2009). Considerem os símbolos da Figura 2.6. Todo motorista consegue reconhecer estes símbolos porque recebem treinamento para entender seu significado, mesmo quando os símbolos não são formados em conjunto com palavras, como é o caso dos sinais de trânsito "Dê a preferência" ou "Proibido estacionar". O mesmo deve ocorrer com

o GD&T. Os projetistas e engenheiros necessitam receber treinamento para aprender a identificar e compreender os símbolos utilizados.



Figura 2.6: Placas de regulamentação de trânsito. Fonte: [DETRAN, 2016](#)

Além do mais, o uso dos símbolos trazem algumas vantagens:

- Símbolos estão configurados no CAD.
- São facilmente identificados nos desenhos técnicos.
- Combinações de símbolos podem substituir grandes parágrafos.
- Produz uma apresentação mais ordenada do desenho técnico.
- Atingem os objetivos das normas internacionais de ultrapassar as barreiras de linguagem.

Existem quatorze símbolos de característica geométrica da ASME Y14.5 2009 que estão representados na figura 2.7. Além dos símbolos de característica geométrica temos os símbolos que representam os datums e vários símbolos modificadores. Alguns dos mais utilizados podem ser vistos na Figura 2.8.

O FCF é composto por este conjunto de símbolos em diferentes sequências que geram diversos significados (Figura 2.9). É possível perceber que alguns campos do FCF na figura estão com linhas pontilhadas: estes são campos que podem ou não existir dependendo da aplicação dos símbolos utilizados e da função do elemento no componente e conjunto. Cabe ao projetista e engenheiro definir como estes símbolos serão utilizados para compor o FCF de forma a representar o requerimento de engenharia para o elemento geométrico em questão.

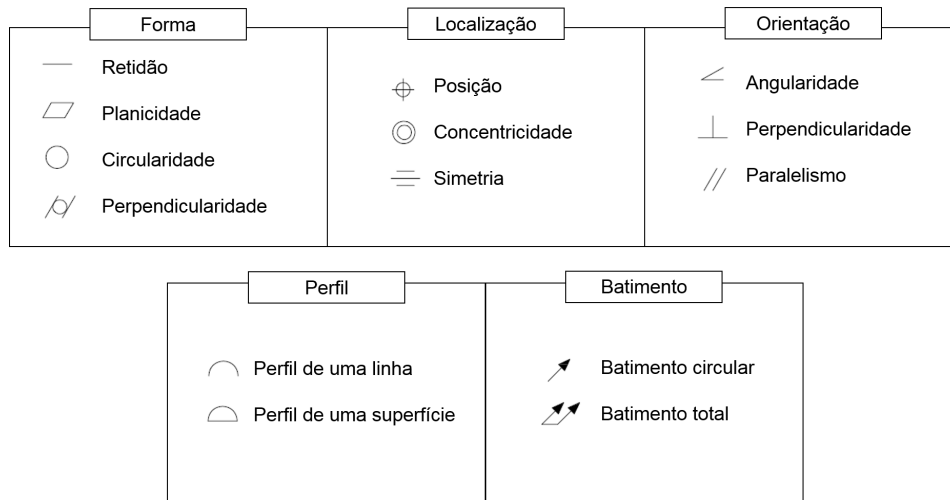


Figura 2.7: Símbolos de característica geométrica na ASME Y14.5 2009. Fonte: o Autor

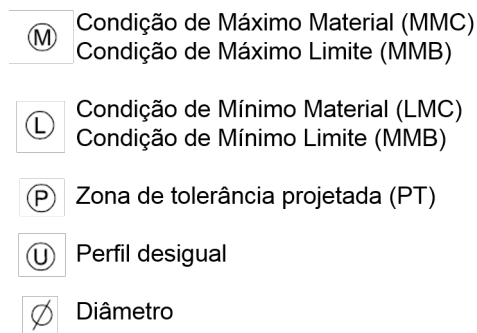


Figura 2.8: Exemplos de símbolos modificadores na ASME Y14.5 2009. Fonte: o Autor

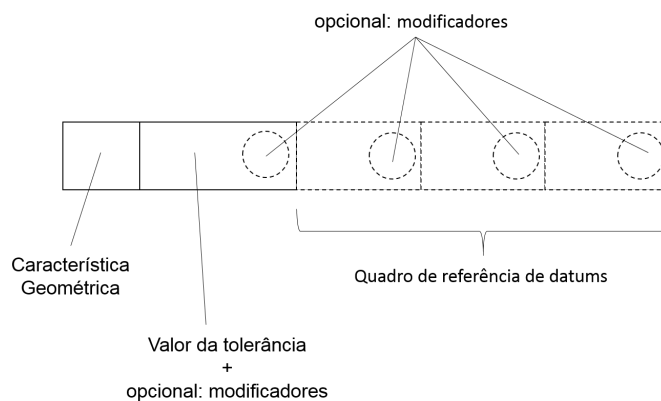


Figura 2.9: Representação dos símbolos em um FCF genérico. Fonte: o Autor

2.2.2 *Abordagens na especificação de tolerâncias geométricas*

Atualmente os engenheiros de projeto e manufatura devem integrar as várias tecnologias e processos relacionados ao ciclo de vida do produto. Dito isto, é nas especificações de projeto detalhadas onde todos contribuem para a concretização do produto, seu ciclo de vida e descarte (PEGNA; FORTIN; MAYER, 1998).

Os projetistas podem ter dificuldades na especificação de tolerâncias geométricas devido à falta de conhecimento explícito disponível, muitas vezes limitado a regras e exemplos básicos fornecidos pelas normas. Especialistas e pesquisadores tentam organizar o conhecimento sobre especificação de tolerâncias em conceitos e regras, incluindo regras empíricas para a seleção dos pontos de referência e símbolos geométricos, além de classificações de casos específicos para definir um conjunto limitado de soluções (ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011).

A escolha dos datums é estudada nos manuais de especificação de tolerâncias baseadas nas normas ASME (DRAKE, 1999) e estudos de caso sobre especificação de tolerância (WANG et al., 2003). Uma regra básica sugere selecionar as características que estabelecem as relações de montagem mais importantes para a função do produto como datums. O eixo de rotação ou superfícies de contato podem ser selecionadas como datums. Uma vez que o quadro de referência de datums (Datum Reference Frame ou DRF) é selecionado, as tolerâncias devem ser escolhidas para todos os elementos geométricos importantes na peça.

Na especificação da tolerância geométrica, cada elemento é tolerado em relação a um DRF. A maioria destas especificações são baseadas no conceito de invariância. Todos os possíveis desvios que o elemento pode ter da geometria nominal deve ser restrito dentro das zonas de tolerância. A invariância é baseado em graus de conceito liberdade. O modelo classifica superfícies da peça em sete classes de acordo com a sua invariância de acordo com translações e rotações, que podem ser definidas como esférica, planar, cilíndrico, helicoidal, rotação, prismáticos e genérica (CLEMENT; RIVIERE; SERRE, 1995).

As associações entre duas superfícies pertencentes à mesma parte são chamadas de superfícies conectadas tecnologicamente e topologicamente (Technologically and Topologically Related Surfaces ou TTRSs) (CLEMENT; RIVIERE; SERRE, 1995). Com o TTRS é possível definir um símbolo de característica geométrica para ser utilizado. Considere um cilindro (alvo) com um plano (datum). Caso o cilindro esteja perpendicular ao plano, o TTRS resultante pertence à classe de invariância de superfícies de rotação, e corresponde a uma tolerância de perpendicularidade. Caso seja paralelo ao plano, o TTRS corresponde a uma tolerância de posição. O resultado do TTRS é um conjunto limitado de casos de especificação de tolerâncias geométricas e pode ser explorado em um procedimento de

especificação generativa. A classificação de acordo com o modelo TTRS não é o único, uma vez que a definição de classes de invariância não abrange a totalidade de elementos e funções projetadas em peças fabricadas ([ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011](#)).

Métodos computacionais foram propostos para a seleção de DRFS e tipos de tolerância para elementos geométricos das peças. O primeiro e mais citado método foi desenvolvido a partir do modelo TTRS. A abordagem deste método define cada superfície por uma classe invariância e um conjunto de mínimo de datums (Minimum Geometric Datum Element ou MGDE). Quando duas superfícies estão conectadas, é possível determinar as tolerâncias necessárias para controlar a sua posição relativa, sempre associada a uma classe de invariância e uma MGDE. Este conceito baseia-se numa hierarquia de TTRSs sobre as características funcionais de cada peça ([ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011](#)). Este método foi aplicado em uma ferramenta computacional interativa ([SALOMONS, 1995](#)).

Outros métodos importantes foram desenvolvidos para auxiliar esta especificação de tolerância geométrica, além de implementados em ferramentas de CAD. Entre eles está a análise dos graus de liberdade dos elementos geométricos ([SHAH; YAN; ZHANG, 1998](#); [KANDIKJAN; SHAH; DAVIDSON, 2001](#)), a propagação dos datums e controles geométricos a partir de características especiais, também chamados de método dos espelhos ([WANG et al., 2003](#)). Função e decomposição de requisitos de funcionalidade por meio da simplificação do gráfico de relação de montagem ([BALLU; MATHIEU, 1999](#)). [ARMILLOTTA](#) definiu um método com a possibilidade de adicionar requisitos definidos pelo usuário relacionados à função e montagem para selecionar o DRF de cada peça e, assim, atribuir os tipos de tolerância a serem aplicados nos elementos ([ARMILLOTTA, 2013](#)). Também encontramos a atribuição de tolerância posição geométrica em engenharia reversa para definir tolerâncias de posição de conjuntos ([KAISARLIS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008](#)), o método da tabela de posicionamento, que se baseia na propagação de requisitos do conjunto para cada uma das peças ([ANSELMETTI; MAWUSSI, 2003](#); [MEJBRI; ANSELMETTI; MAWUSSI, 2003](#)), o circuito de realimentação variacional ([HU; XIONG; WU, 2004](#)) dentre outros métodos disponíveis.

A Tabela 2.1 resume os componentes dos principais métodos de especificação de tolerâncias em relação a classificação teórica, as relações dos elementos na montagem do conjunto e o tratamento de requisitos explícitos de engenharia. Nenhum dos métodos apresentados tem como objetivo a definição de símbolos de tolerância geométrica e modificadores para um elemento do componente em uma determinada situação, ou seja, classificação e análise do conjunto e função para determinar os símbolos, além dos de tolerância geométrica, que devem ser utilizados em um FCF específico.

O FCF é composto de um conjunto de características de controle geométrico, modificado-

Tabela 2.1: Comparação dos métodos de especificação de tolerâncias. Fonte: adaptado de [ARMILLOTTA; SEMERARO, 2011](#)

Método	Classificação	Modelo de relações	Requisitos explícitos
TTRS	X	X	-
Graus de Liberdade	X	X	-
Espelhos	-	X	-
Decomposição da Função	-	X	X
Tabela de Posicionamento	-	-	X
Realimentação Variacional	X	-	X

res e datums. Diferentes conjuntos de símbolos que modificam pode afetar drasticamente a zona de tolerância e devem ser selecionados de acordo com o ajuste e função do elemento na peça e no conjunto. De acordo com o Apêndice E na ASME Y14.5 2009, os projetistas devem considerar tanto a estabilização da peça quanto os requisitos funcionais dos elementos durante a documentação do projeto ([ASME, 2009](#)). A falta de experiência pode ser uma barreira para usar esses símbolos modificadores para uma determinada função e resultar em uma especificação dimensional que não atende a necessidade do cliente.

2.3 Considerações sobre a especificação de tolerâncias no desenvolvimento de produto

O GD&T está presente em todas as fases do PDP: é diretamente influenciado pelo escopo do pré-desenvolvimento, também é parte importante nas etapas do desenvolvimento, e afeta os resultados documentados no pós-desenvolvimento. É necessário compreender as entradas, o processo e as saídas que afetam a aplicação do GD&T durante a fase de desenvolvimento para garantir sua correta aplicação nos desenhos técnicos. Praticamente todas as etapas da fase de desenvolvimento no PDP tem ações que envolvem o GD&T (Figura 2.2). É nesta fase que as tolerâncias geométricas devem ser especificadas, valores numéricos atribuídos e FCF analisados e validados. Além disto, os requisitos do cliente são traduzidos em especificações dimensionais e geométricas.

Os métodos apresentados na Seção 2.2, sobre especificação de tolerâncias, são genéricos. O objetivo é abranger a maior quantidade de indústrias e situações, e, por este motivo, são dependentes da experiência do projetista ou engenheiro em cada novo projeto para analisar os resultados obtidos com as análises computacionais. Nenhum dos métodos levam em consideração as três dimensões apresentadas na Tabela 2.1 ao mesmo tempo, o que pode levar a falhas no desenvolvimento destas especificações. Os programas computacionais para validação ou determinação de tolerâncias existentes no mercado, inclusive alguns deles provenientes destes métodos, tem funcionamento limitado quando se trata de definir tolerâncias com base na função e projeto do componente. Eles tem como foco principal a

avaliação da geometria e a validação da sintaxe de cada FCF em relação ao GD&T.

Gestão do conhecimento e a escolha dos símbolos no GD&T

3.1 A gestão do conhecimento no desenvolvimento de produto

As definições de conhecimento são influenciadas pelos seus desafios específicos das pessoas ou seus preconceitos sobre um determinado tópico. Existe uma diferença entre data, informação e conhecimento, além de um nível de hierarquia entre estes termos. Dados consistem de sequências de símbolos ou caracteres, como, por exemplo, letras ou dígitos, cuja combinação tem um significado e está de acordo com determinadas regras. Entretanto, dados brutos não são interpretados, e não é possível concluir sobre um assunto específico apenas com estes dados ([WOHINZ; OBERSCHMID, 2007](#)).

Informação, por outro lado, é criada quando os dados são avaliados e colocados em contexto. Adicionando uma perspectiva ou interpretação econômica, dados brutos são convertidos em informação significativa que pode ser utilizada para guiar operações e decisões. Conhecimento, por sua vez, é desenvolvido quando a informação é conectada com uma meta e classificada dentro de um contexto de experiência. A dependência no contexto cria o problema em que a mesma informação pode gerar diferentes formas de conhecimento sobre as mesmas circunstâncias, quando empregadas em diferentes contextos baseados na experiência. Criar e gerenciar o conhecimento sobre um determinado produto é crucial para o desenvolvimento e produto automotivo e deveria ser tratado como um processo de alta prioridade ([HIRZ et al., 2013](#)).

Existem várias definições levemente diferentes sobre desenvolvimento de produto, que envolvem essencialmente:

1. Conhecimento e informação existente no produto (geometria, função...)
2. Informação do produto - conhecimento explícito documentado como informação
3. Conhecimento do produto - conhecimento que se encontra nas cabeças do integrantes do time de desenvolvimento de produto

O conhecimento sobre o produto emerge em várias origens. Assim como o conhecimento humano básico é aprendido por meio da educação que recebemos durante a nossa infância, de várias formas diferentes, o conhecimento adquirido sobre o produto é naturalmente desenvolvido em cada ser humano que tem interesse pelo produto específico. Para a

organização, isto significa que a gestão de informações e conhecimento do produto deve ser utilizado para construir uma base de conhecimento coletivo, com o objetivo de estabelecer e preservar este conhecimento. Neste contexto, o conhecimento do produto representa todo o conjunto da informação existente sobre ele (HIRZ et al., 2013).

Existem algumas saídas, ou resultados, provenientes do conhecimento sobre o produto. Conhecimento sobre os fatos ou evidências (know-what), sobre o processo (know-how) e os motivos (know-why) representam conhecimento explícito e impessoal sobre produtos nas suas versões e variantes. Estas saídas preservam o conhecimento do produto quando são reutilizadas e válidas por um longo período de tempo (PROBST; RAUB; ROMHARDT, 2006). Ainda, de acordo com PROBST; RAUB; ROMHARDT, conhecimento é definido como o conjunto de experiências e habilidades que indivíduos utilizam para solucionar problemas. Esta habilidade, também conhecida como competência, é bem definida no momento em que o conhecimento é aplicado.

As competências essenciais, consideradas extraordinariamente importantes para as organizações, são uma coleção de habilidades e tecnologias sobre conhecimentos específicos que não podem ser facilmente copiadas pelos competidores. Estas competências permitem que as organizações atendam a necessidade dos clientes e podem ser transferidas para novos produtos e áreas (HAMMEL; PRAHALAD, 1994). Por serem únicas, competências essenciais determinam a competitividade de uma empresa e são um recurso estratégico para desenvolver as bases do desenvolvimento de vantagens competitivas.

O conhecimento ainda pode ser definido quanto a sua psicologia, expressão e portador (SCHEUBLE, 1998). Em relação ao portador, o conhecimento é estruturado sobre o indivíduo e o coletivo, este último importante para a organização. Sobre a habilidade de expressão, o conhecimento pode ser tácito, classificado como a habilidade que não pode ser explicada por meio de palavras faladas ou escritas e pode ser apenas demonstrado, ou explícito, que é o conhecimento codificado através de manuais e documentos (NONAKA; TAKEUCHI, 1997). Também existe a estrutura da psicologia, dividindo conhecimento em declarativo, relacionado com os fatos (know-what), e processual, que se refere ao processo sobre o conhecimento (know-how).

A diferença entre conhecimento tácito, também conhecido como implícito, e explícito pode ser rastreado até (POLANYI, 1966), que argumentou em sua pesquisa que as pessoas sabem mais do que pode articular. Ele chamou a parte que não pode ser expressada de tácita. A habilidade de comunicar e os meios de fazer isto podem ser usados para diferenciar estas formas de conhecimento.

Para NONAKA; TAKEUCHI, a relação entre pessoas tem um papel crucial no desenvolvimento do conhecimento. O modelo de Socialização, Externalização, Combinação, Inter-

nalização (SECI) passou a ser empregado em estudos sobre a conversão do conhecimento, pois sintetiza as conversões em quatro modos para explicar a criação de conhecimento novo no ambiente organizacional devido a relação entre as pessoas Figura 3.1.



Figura 3.1: Modelo SECI. Fonte: Adaptado de [NONAKA; TAKEUCHI, 1997](#)

Socialização é ponto de partida para o processo completo da criação de conhecimento, caracterizado pela interação entre os indivíduos, que se comunicam sem precisar de códigos ou objetos explícitos para a mensagem. A externalização é a ação de transmitir as ideias e conceitos socializados, onde a mensagem será codificada e será possível acessá-la posteriormente. A combinação trata da reunião de conhecimentos explícitos existentes, formando novos conjuntos de conhecimento que teriam utilidade em um determinado contexto. Internalização, transforma o conhecimento explicitado nas duas etapas anteriores em conhecimento tácito novamente, para iniciar um novo ciclo de conversões, em espiral, resultando na ampliação do compartilhamento de conhecimento. A cada iteração desta espiral novos conhecimentos poderão ser criados.

A comunicação para a troca de informações e a diminuição do risco de não se conseguir alcançar os objetivos do projeto são valorizados em gestão de projetos. O conhecimento de uma organização, portanto, é um ativo, já que impacta nos resultados econômicos e no desenvolvimento de um produto de sucesso. Também se fala muito nas melhores práticas

para difusão da informação ao longo do projeto, porém pouco sobre como podemos medir os resultados desta comunicação para para compreendermos a saúde de um projeto quanto ao seu fluxo informacional. Não é possível gerenciar aquilo que não se mede (MORAES, 2010).

3.2 Gestão do conhecimento na especificação de tolerâncias

A especificação de tolerâncias é parte importante e está presente em várias etapas de todas as fases do desenvolvimento de produto (Seção 2.3). Por este motivo, a gestão deste conhecimento específico é necessário para garantir vantagens competitiva e econômica das organizações durante o desenvolvimento de novos veículos. Ainda, de acordo com PEGNA; FORTIN; MAYER (1998), não há dúvidas que o GD&T é um assunto complexo que somente pode ser aprendido por meio de prática excessiva.

Neste cenário, é importante compreender como o conhecimento sobre GD&T é influenciado pela frequência de utilização no desenvolvimento de produto, sua relação com a confiança em aplicar símbolos, e, além disto, como este conhecimento influencia na conforto em definir os símbolos que serão utilizados nas dimensões e geometrias especificadas.

3.2.1 Conhecimento, confiança e frequência de uso do GD&T na indústria automotiva

Um estudo de caso, no formato de um questionário de pesquisa, foi desenvolvido com o objetivo de analisar os fatores que influenciam no conforto em escolher os símbolos que serão utilizados no FCF para representar os requisitos de engenharia em um determinado componente que faz parte de um sistema veicular da indústria automotiva. A Figura 3.2 representa as dimensões analisadas com a aplicação deste questionário.

Estudo de caso é caracterizado como uma pesquisa cujo objeto é analisar profundamente um ambiente, um simples sujeito ou uma situação particular. O propósito fundamental é analisar intensivamente uma determinada unidade social, como por exemplo, uma indústria que apresenta ótimos índices de qualidade ou um grupo de pessoas que é foi de reduzir a rejeição de componentes em uma produção. O enfoque deve ser exploratório e descritivo e o pesquisador deve estar aberto às novas descobertas. Apesar de iniciar a partir de um esquema teórico, deve analisar novos elementos ou dimensões que poderão surgir no decorrer da pesquisa. O pesquisador deve mostrar a multiplicidade de dimensões para uma situação, uma vez que a realidade é sempre complexa (GODOY, 1995). Pra compreender o significado de um texto ou ação, baseado na interpretação de dados, é

recomendado o uso de um estudo de caso (TESCH, 1990).

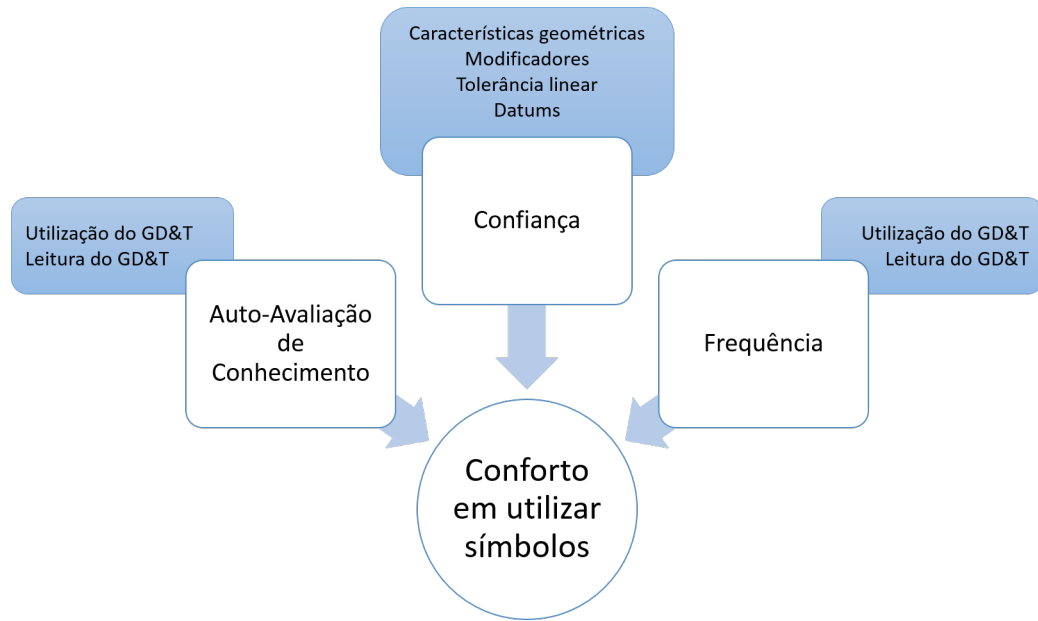


Figura 3.2: Representação das dimensões analisadas no questionário. Fonte: o Autor

As questões levantadas estão no Apêndice A.1 e este questionário foi respondido livremente pelos profissionais. As respostas deste questionário encontram-se no Apêndice A.2. Todas as questões foram pontuadas em uma escala qualitativa, conforme a Figura 3.3.

Confiança / Conhecimento / Conforto

Baixo					Médio					Alto
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frequência

Nunca				As vezes (em média, 2 vezes por mês)					Frequentemente (em média, mais do que 4 vezes por mês)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 3.3: Escala Qualitativa do questionário. Fonte: o Autor

Além disto, a Figura 3.4 auxilia o entendimento acerca da questão sobre conforto na escolha de símbolos, e foi utilizada no questionário aplicado.

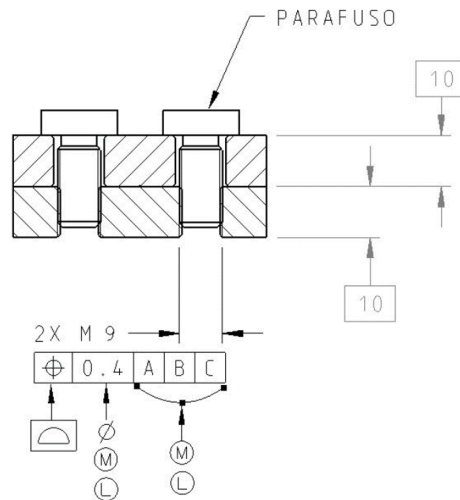


Figura 3.4: Exemplo de sistema de montagem fixa. Fonte: o Autor

Este questionário foi respondido por setenta e nove profissionais da indústria automotiva que atuam em algum processo relacionado com o GD&T, durante o mês de agosto de 2016, dentre eles engenheiros de desenvolvimento de produto, manufatura e qualidade (Figura 3.5). Em todos os gráficos de boxplot e média existe uma marcação de referência nos números 4 e 7. O objetivo é dividir a escala em três faixas, onde, por exemplo, abaixo de 4 o nível de conhecimento pode ser considerado baixo e acima de 7 ele pode ser considerado alto.

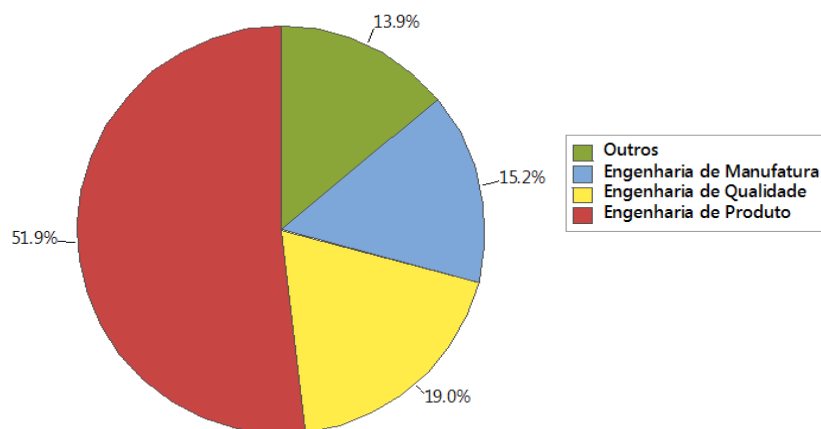


Figura 3.5: Área de atuação dos profissionais. Fonte: o Autor

Estes profissionais tem diferentes níveis de experiência na indústria (Figura 3.6) e 26,6% deles não receberam algum tipo de treinamento formal de GD&T (Figura 3.7).

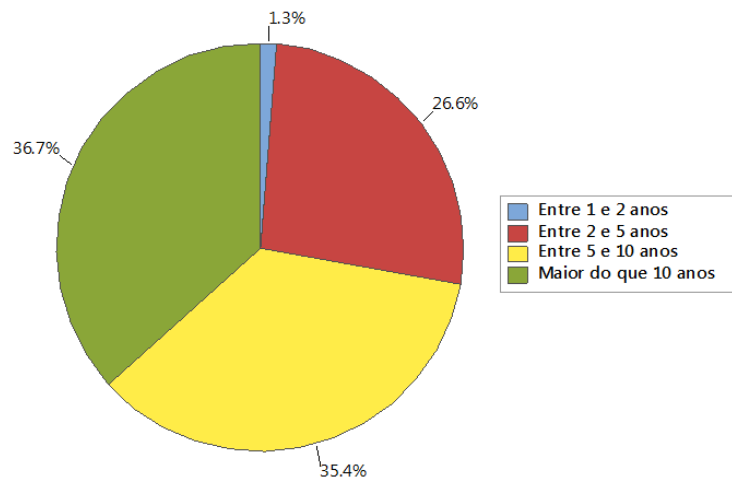


Figura 3.6: Tempo de experiência na indústria automotiva. Fonte: o Autor

Primeiramente foram analisados os dados de frequência com que os profissionais tem interação com o GD&T, seja por meio da leitura e interpretação de desenhos ou pelo uso, com a modificação ou desenvolvimento das tolerâncias (Figura 3.8). A frequência de utilização corresponde a média de respostas relativas a modificação e desenvolvimento do GD&T. Menos do que 25% dos profissionais utilizam frequentemente seus conhecimentos de GD&T para modificar ou desenvolver FCF. Um pouco mais do que 25% deles lêem frequentemente desenhos que contém informações de GD&T.

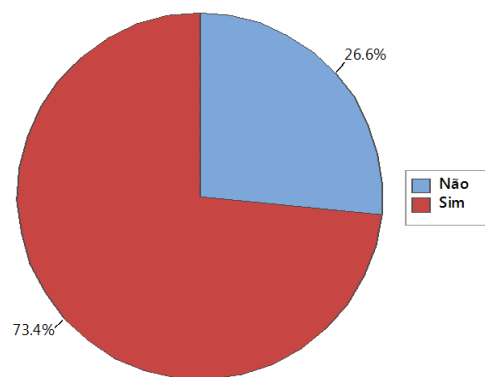


Figura 3.7: Treinamento formal de GD&T. Fonte: o Autor

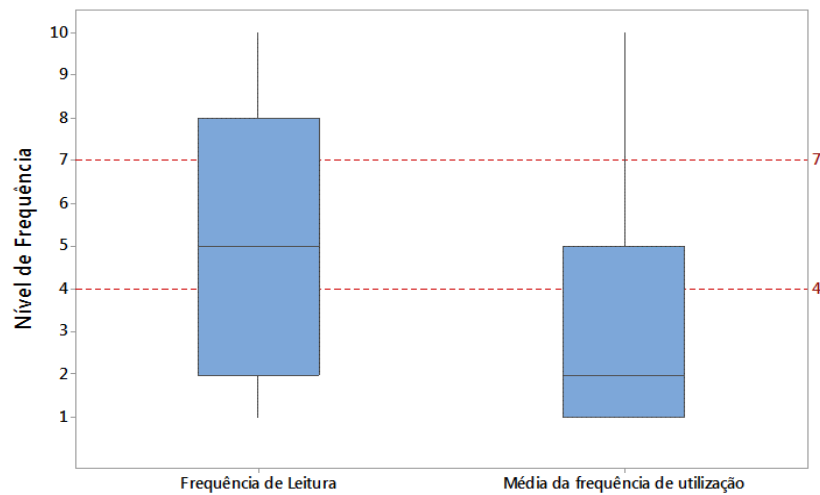


Figura 3.8: Frequência de leitura ou utilização dos conhecimentos de GD&T. Fonte: o Autor

A análise da auto-avaliação de conhecimento apresentou os seguintes resultados: aproximadamente 75% avaliaram ter um alto nível de conhecimento sobre especificações de tolerâncias diretas; 50% consideraram ter um alto nível de conhecimento sobre características geométricas e datums; porém, 25%, aproximadamente, alegaram ter um alto nível de conhecimento sobre símbolos modificadores (Figura 3.9).

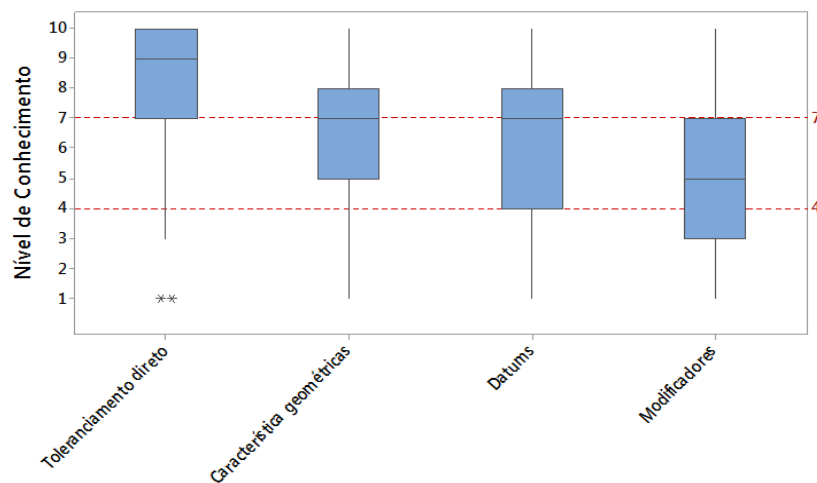


Figura 3.9: Conhecimentos gerais sobre GD&T. Fonte: o Autor

Em valores aproximados, 50% dos profissionais pesquisados sentem alto nível de confiança durante a leitura de símbolos de GD&T, entretanto apenas 25% sentem este mesmo nível de confiança durante a utilização destes símbolos de GD&T na modificação ou desenvolvimento de FCF (Figura 3.10).

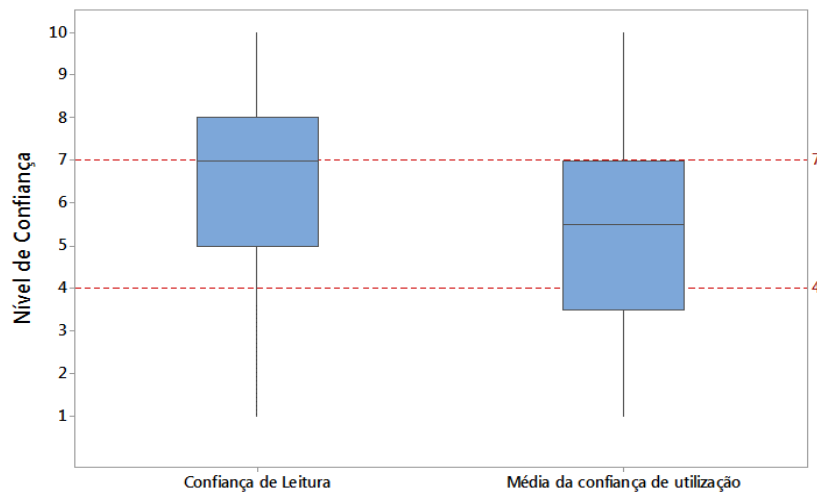


Figura 3.10: Confiança de leitura ou utilização dos conhecimentos de GD&T. Fonte: o Autor

Posteriormente foi analisada a hipótese de que o conhecimentos de GD&T pode ser influenciado pelo tempo de experiência na indústria automotiva. A Figura 3.11 apresenta a média de cada dimensão do conhecimento de GD&T e sua respectiva barra de incerteza, divididos por faixa de tempo e dimensão de conhecimento. Apesar de ser existir uma leve tendência visual de incremento das médias de conhecimento com o passar dos anos, não é possível determinar se existe alteração da média do ponto de vista estatístico, devido as análise das incertezas das médias. Entretanto, é possível afirmar que a média de conhecimento sobre símbolos modificadores não chega ao nível mais alto, mesmo após dez anos de experiência dos profissionais que estão na indústria automotiva.

Da mesma forma que o conhecimento, a média de confiança e o conforto em escolher símbolos durante o desenvolvimento dos FCF foi analisado (Figura 3.12). Em ambos os casos, a média das avaliações dos profissionais não atingiram o nível mais alto da pesquisa, mesmo entre os profissionais com mais de dez anos de experiência. Também não é possível afirmar que existe diferença estatística entre as médias com o passar dos anos, a partir de dois anos de experiência na indústria.

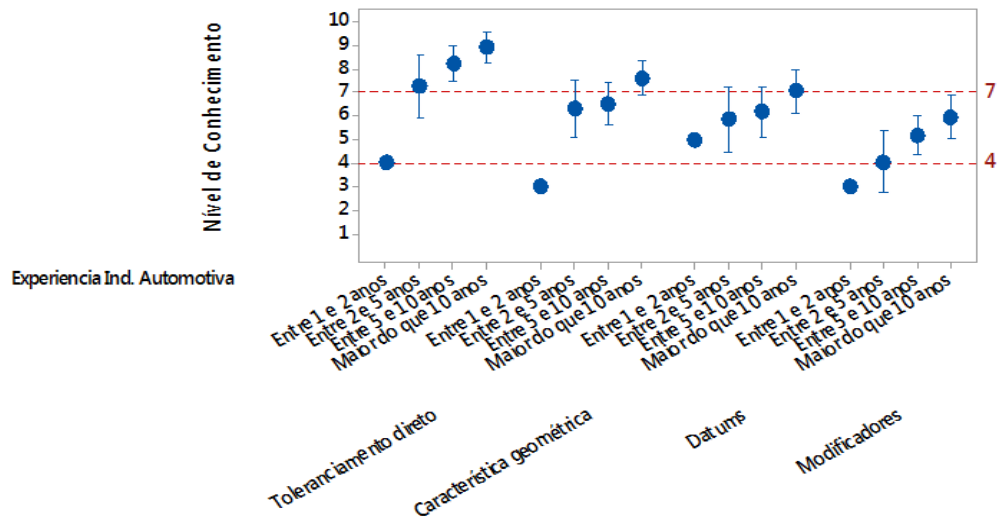


Figura 3.11: Gráfico da influência do tempo de experiência nos conhecimentos de GD&T. Fonte: o Autor

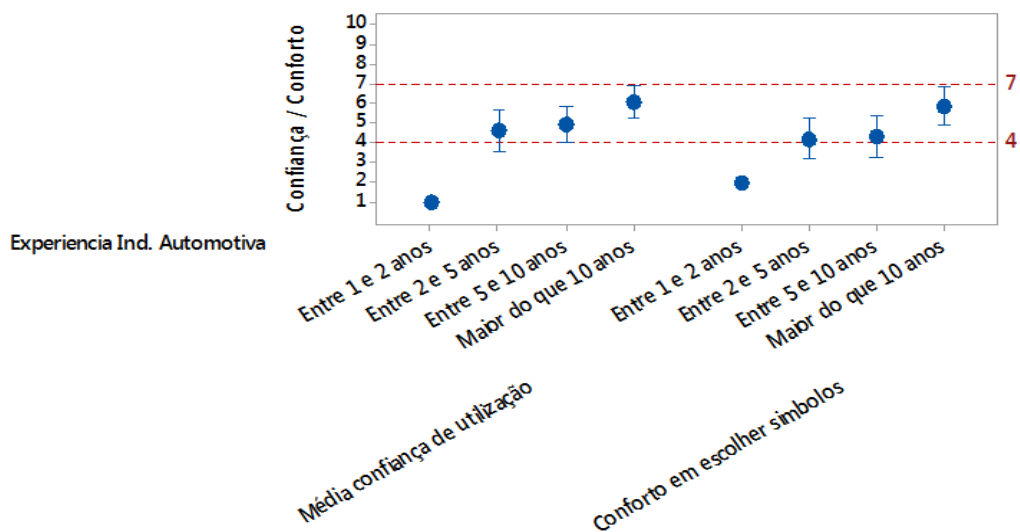


Figura 3.12: Gráfico da influência do tempo de experiência na confiança e conforto de utilizar o GD&T. Fonte: o Autor

3.2.2 Conclusões sobre a pesquisa

A especificação de tolerâncias diretas tem a maior porcentagem de profissionais que consideram ter um alto nível de conhecimento sobre este assunto, aproximadamente 75%. Entretanto, 50% dos profissionais acreditam ter um alto nível conhecimento em símbolos de característica geométrica e datums, e somente 25% dizem ter este mesmo conhecimento

sobre modificadores. A alta porcentagem encontrada para especificação de tolerâncias diretas é compreensível, já que os cursos de graduação em engenharia tem em sua grade curricular a matéria de desenho técnico, onde este assunto é ensinado.

A confiança em utilizar os símbolos de GD&T durante o desenvolvimento ou modificação do FCF pode ser considerada média para alta, já que aproximadamente 50% destes profissionais alegam estar neste nível, e 25% deles responderam que sentem um alto nível de confiança neste mesmo assunto. Esta confiança em aplicar os símbolos do GD&T no FCF quando não se tem pleno conhecimento sobre a função destes símbolos pode levar a erros no projeto de tolerâncias dos componentes.

Este conhecimento pode ser adquirido, mesmo que parcialmente, com a frequência de uso. Mas apenas uma pequena parcela da população pesquisada, menos do que 25%, utiliza frequentemente o GD&T para modificar ou desenvolver FCF. Este pode ser um indicativo do fato de não haver alteração estatisticamente significativa da média de conhecimento em símbolos de tolerância geométrica e modificadores, mesmo entre profissionais com mais de dez anos de experiência na indústria automotiva.

Todas as abordagens para a especificação de tolerâncias geométricas apresentadas no Capítulo 2 são dependentes da experiência do projetista ou engenheiro para analisar os resultados obtidos com as análises computacionais (Seção 2.3). Esta pesquisa indica que profissionais, mesmo que experientes na indústria automotiva, podem comprometer o projeto de tolerâncias devido ao fato de que este tempo de experiência não afeta significativamente a média de conhecimento sobre a aplicação de símbolos no GD&T (Figuras 3.11 e 3.12).

Desenvolvimento do método para criar requisitos de tolerâncias dimensionais

4.1 Aplicação de inteligência artificial na gestão do conhecimento

É notório que as empresas obtêm vantagens competitivas quando são capazes de manter o conhecimento, explorando seus recursos para desenvolver uma estratégia. Este processo de aprendizagem é tanto individual quanto coletivo, e não é restrito somente aos aspectos humanos, mas também aos sistemas, estratégias, estruturas e processos (PABLOS, 2004). Por este motivo, é possível relacionar a gestão do conhecimento com Inteligência Artificial (IA), já que os benefícios serão mantidos com a organização, mesmo com o afastamento do colaborador, e, desta forma, a IA contempla: sistemas especialistas, redes neurais, lógica fuzzy, entre outros (IGARASHI et al., 2006).

A tecnologia para a capturar este conhecimento tem sido estudada por décadas pela IA. Assim, a gestão do conhecimento tornou-se uma tarefa especializada, e pode ser aplicada para descobrir novos conhecimentos ou automatizar processos. IA pode ser usadas em várias etapas do processo de Gestão de Conhecimento: gestão de conteúdo, técnicas de recuperação baseadas em casos, entre outras. E a IA auxilia neste processo com a aquisição, interpretação, organização, armazenagem e difusão do conhecimento (TSUI; GARNER; STAAB, 2000).

Um dos objetivos da IA é desenvolver sistemas computacionais com comportamento inteligente mais próximo do homem. Algumas destas características incluem a capacidade de aprender com a experiência e aplicar o conhecimento adquirido, tratar situações complexas, determinar o que é importante, processar e manipular símbolos, e utilizar a heurística (TURBAN, 2003).

Para simular o desempenho humano é necessário compreender como ele raciocina e pensa. RICH (1988) comparou o grau de capacidade entre a IA e a inteligência natural (humana), e percebeu que a IA tem uma alta capacidade para realizar cálculos complexos, documentar e transferir informações quando comparada com a inteligência natural.

Dentre as vantagens da IA estão: conhecimento amplo na área específica, com capacidade de absorver o conhecimento humano; comportamento inteligente, propondo soluções novas para problemas complexos por meio de conclusões em dados de alta complexidade onde é

possível definir a melhor estratégia para solucionar o problema; tomada de decisão, com a explicação de como se processou seu raciocínio; confiança; produtividade; disponibilidade em qualquer lugar ou momento; permite incorporar sistemas diversos. Algumas limitações são: conhecimento limitado, onde não é possível lidar com o conhecimento que combina regras, além de não ser capaz de adquirir conhecimento por si só; erro, sendo que a principal fonte de informação é o especialista humano, logo uma informação errada afetará o sistema negativamente; alto custo de desenvolvimento; possíveis soluções diferentes para cada especialista; não possuir responsabilidade ética (RICH, 1988).

Utilizar a IA para transformar o conhecimento tácito dos especialistas em especificação de tolerâncias geométricas e dimensionais em conhecimento explícito é adequado para os objetivos propostos neste projeto. Um sistema especialista fuzzy é capaz de atuar nas informações provenientes dos especialistas, e, em um contexto específico, resultar em requisitos de tolerâncias dimensionais.

4.1.1 Fuzzy

A lógica fuzzy permite descrever o comportamento esperado de um sistema por meio de linguagem descritiva. Também permite expressar o grau de incerteza associado com o item em consideração (HITCHINGS; VLACIC; KECMAN, 2001). A estrutura de um sistema de inferência fuzzy é representada na Figura 4.1.

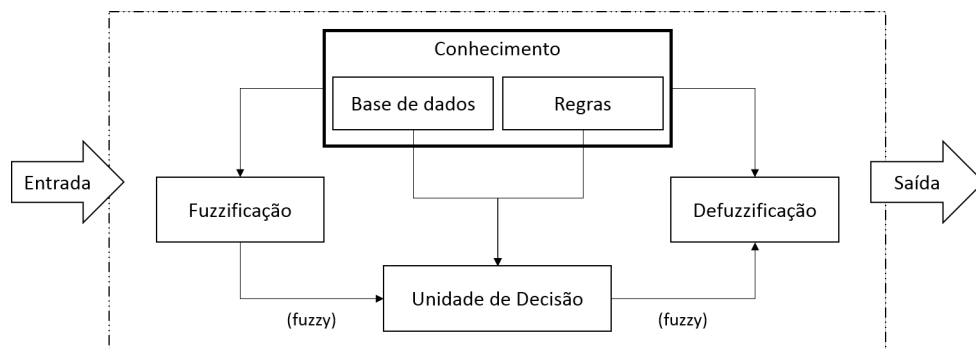


Figura 4.1: Sistema típico de inferência fuzzy. Fonte: adaptado de SIVANANDAM, 2007

A função de cada bloco na Figura 4.1 é a seguinte:

- O bloco de regras contém um determinado número de regras "SE-ENTÃO".
- A base de dados define a função de pertinência do conjunto fuzzy para ser utilizado nas regras.
- Unidade de decisão executa as operações de inferência.

- A interface de fuzzificação transforma o conjunto de dados de entrada em graus que correspondem aos valores linguísticos.
- E a interface de defuzzificação transforma os resultados da inferência em um conjunto de saídas.

Além disto, sistemas com lógica fuzzy são amplamente difundidos na engenharia de controle pelas seguintes razões (VONALTROCK, 1995):

- Sistemas de controle fuzzy podem ser projetados para comparar qualquer conjunto de dados de entrada ou saída. Ideal para controlar sistemas não lineares e multi-variáveis.
- As técnicas oferecem flexibilidade de projeto e os sistemas podem ser facilmente redesenhados.
- Permite liberdade para modelar sistemas complexos sobre o pensamento humano e a linguagem natural.
- Dados imprecisos são aceitos em sistemas fuzzy.
- Controles convencionais podem fazer uso de sistemas de controle fuzzy.

Estas razões fazem com que a lógica fuzzy seja empregada em diversos sistemas complexos, sendo adequada para resolver problemas de escolha de símbolos durante o processo de GD&T.

As entradas para um sistema fuzzy são descritas como variáveis linguísticas. Uma variável linguística é um grupo de termos, por exemplo, atributos, associados a um grau de pertinência de um valor único (crisp value) para a variável (HITCHINGS; VLACIC; KEC-MAN, 2001). Uma variável linguística típica pode ser expressa como:

$$\text{Variável Linguística (termo 1, termo 2, ... termo n)} \quad (4.1)$$

onde: n é o número de termos em uma variável linguística.

4.1.2 Métodos de fuzzificação

O estágio de fuzzificação utiliza os valores únicos do processo e os mapeia para os termos atribuindo um grau de pertinência. A função base de pertinência, que define cada um dos termos de uma variável linguística, é utilizada para mapear. Um exemplo de função base de pertinência é apresentado na Figura 4.2.

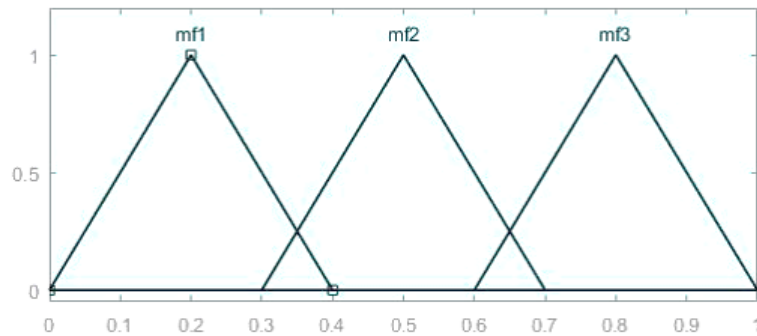


Figura 4.2: Exemplo de função base de pertinência. Fonte: o Autor

Toda fuzzificação determina um grau de pertinência que um dado real tem para uma variável linguística. Para uma variável contínua, este grau de pertinência é descrito por uma função de pertinência (HITCHINGS; VLACIC; KECCMAN, 2001). Esta função mapeia cada input em termos linguísticos, e, corriqueiramente, são expressadas em um diagrama, como na Figura 4.3. A forma desta função é variada, podendo ser triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outras.

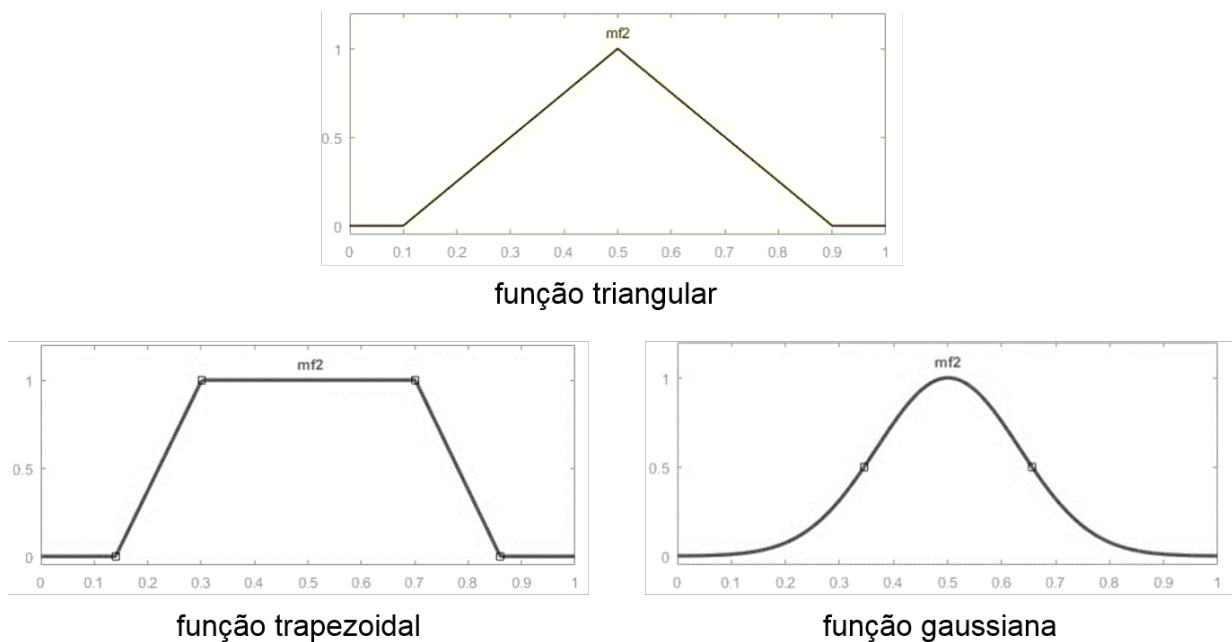


Figura 4.3: Exemplos de formas de funções. Fonte: o Autor

4.1.3 Métodos de inferência fuzzy

As regras de inferência fuzzy geralmente assumem a forma de um conjunto de regras que descrevem o comportamento do sistema completo. A parte "Se" da regra é conhecida por

agregação e a parte "Então" denominada composição. Estas regras mapeiam as entradas e saídas linguísticas. Um exemplo de regra de inferência pode ser:

$$\text{Se CARRO é RÁPIDO então MOTOR é POTENTE} \quad (4.2)$$

onde:

CARRO é uma variável linguística de entrada

RÁPIDO é um termo, atributo de CARRO

MOTOR é uma variável linguística de saída

POTENTE é um termo, atributo de MOTOR

As regras de inferência fuzzy mapeiam as entradas linguísticas em saídas linguísticas. Esta inferência consiste de duas partes: a agregação, que calcula a importância de uma regra com o uso de operadores lógicos; a composição, que calcula a influência de cada regra nas variáveis de saída. Dois tipos de sistemas de inferência fuzzy são considerados os mais importantes: Mamdani e Sugeno ([SIVANANDAM, 2007](#)).

O método de inferência de Mamdani é o mais utilizado na metodologia fuzzy. Ele foi proposto por [MAMDANI; ASSILIAN \(1975\)](#) para controlar um sistema de motores a vapor sintetizando um conjunto de regras de controle linguísticos obtidos por meio da experiência dos operadores. Este método faz com que a função de pertinência de saída seja um conjunto fuzzy ([VONALTROCK, 1995](#)). Depois do processo de agregação, existe um conjunto fuzzy para cada variável de saída que necessita ser defuzzificado.

O processo do método Mamdani é descrito a seguir:

1. Determinar um conjunto de regras fuzzy
2. Fuzzificar as entradas de acordo com as regras para estabelecer a potência da regra
3. Encontrar a consequência da regra pela combinação entre a potência e a função de pertinência de saída
4. Combinar as consequências para obter uma distribuição de saída
5. Defuzzificar a distribuição de saída quando necessário

O método de Sugeno, ou Sugeno-Takagi, propôs uma abordagem para gerar regras a partir dos dados de entrada e saída ([SUGENO; TAKAGI, 1985](#)). A principal diferença entre os

modelos de Mamdani e Sugeno é que a função de pertinência da saída do Sugeno pode ser linear ou constante.

As vantagens do método de Sugeno são (SIVANANDAM, 2007):

- É eficiente do ponto de vista computacional
- Funciona bem com técnicas lineares
- Funciona bem com técnicas adaptativas e otimização
- Garente a continuidade da superfície de saída
- Adequado para análises matemáticas

As vantagens do método de Mamdani são (SIVANANDAM, 2007):

- É intuitivo
- Ampla aceitação
- Adequado para entradas humanas

4.1.4 Métodos de defuzzificação

Em muitos casos, é desejado que o processo apresente uma única saída do método de inferência fuzzy. Por exemplo, caso deseje classificar uma carta escrita a mão em um tablet, fundamentalmente o sistema deve trazer um resultado que diga em qual tipo de computador a carta foi escrita. Este resultado é obtido no processo de defuzzificação(SIVANANDAM, 2007).

A defuzzificação utiliza a saída das regras de inferência e converte em valores únicos que melhor represente a decisão fuzzy para devolver ao sistema. Existem diversos métodos de defuzzificação, que nada mais é do que aplicar o método inverso da fuzzificação. Uma função base de pertinência semelhante a Figura 4.2 pode ser utilizada neste processo de defuzzificação (HITCHINGS; VLACIC; KECMAN, 2001).

4.2 Definição do método para criar requisitos dimensionais com sistema especialista

O objetivo deste método é organizar o processo de desenvolvimento de requisitos dimensionais e garantir que as organizações possam transformar o conhecimento tácito relacionado com especificação de tolerâncias em conhecimento explícito. Este método foi parcialmente adaptado do projeto de sistemas de controle fuzzy proposto por [HITCHINGS](#); [VLACIC](#); [KECMAN](#).

1. Escolher o elemento geométrico padrão, definido como um elemento geométrico qualquer cuja função se repete em diferentes conjuntos. Por exemplo, um furo roscado para fixação, um pino de localização ou um eixo giratório.
2. Classificar o elemento, com o objetivo de poder reutilizar os resultados alcançados e a partir de um banco de dados estruturado.
3. Definir a hipótese ou questão a ser respondida. Esta questão é fundamental para determinar as entradas e as regras, além de compreender a saída do modelo fuzzy.
4. Projetar as entradas do modelo, ou seja, as variáveis linguísticas.
5. Selecionar os especialistas de acordo com a aplicação a ser avaliada. O número de especialistas deve ser suficiente para garantir que o resultado seja válido.
6. Desenvolver e aplicar o questionário de pesquisa entre os especialistas selecionados.
7. Determinar as funções de fuzzificação.
8. Desenvolver as regras lógicas para as respostas dos especialistas (estrutura para inferência).
9. Determinar as funções de defuzzificação.
10. Aplicar os resultados do questionário no sistema especialista fuzzy.
11. Analisar as saídas encontradas.
12. Documentar o resultado, transformando-o em um requisito dimensional de engenharia.

4.2.1 Classificação de elementos geométricos

A especificação de tolerâncias tem como ponto de partida a análise do elemento geométrico e sua conexão com outros elementos, em outras peças, e a sua função no conjunto

([DRAKE, 1999](#)). O desenvolvimento de requisitos dimensionais que podem ser utilizados no processo de especificações depende de um método de classificação estruturado. Esta estrutura de classificação é importante para organizar os dados no processo de especificação de tolerância (Figura 4.4) e está de acordo com a classificação de elementos geométricos da [ASME](#) e com as funções básicas de componentes sistemas mecânicos, como movimentos de rotação e translação. Além disto, traz a necessidade de avaliar a peça e os elementos conectados com o elemento principal.

Atualmente os sistemas de projeto auxiliado por computador (CAD) estão conectados com um banco de informações de produto e manufatura (PMI). Cada característica importante pode ser classificada e conectada ao elemento geométrico relacionado com o modelo matemático no CAD. Uma vez que estes dados estão disponíveis, métodos computacionais de inteligência artificial estão aptos a utiliza-los.

Neste cenário, novas classificações de elementos são rapidamente avaliadas pelos especialistas em GD&T, e desta forma, criam novos requisitos de engenharia. Mesmo os requisitos existentes poderiam evoluir no caso de uma nova classificação ser avaliada pela equipe e esta análise afeta-lo. Uma vez que este requisito é implementado no ambiente CAD, uma ou mais soluções de FCF podem ser sugeridas cada vez que um elemento é classificado pelo projetista ou engenheiro durante o desenvolvimento de produto, além de aplicar diversos filtros para encontrar aplicações semelhantes.

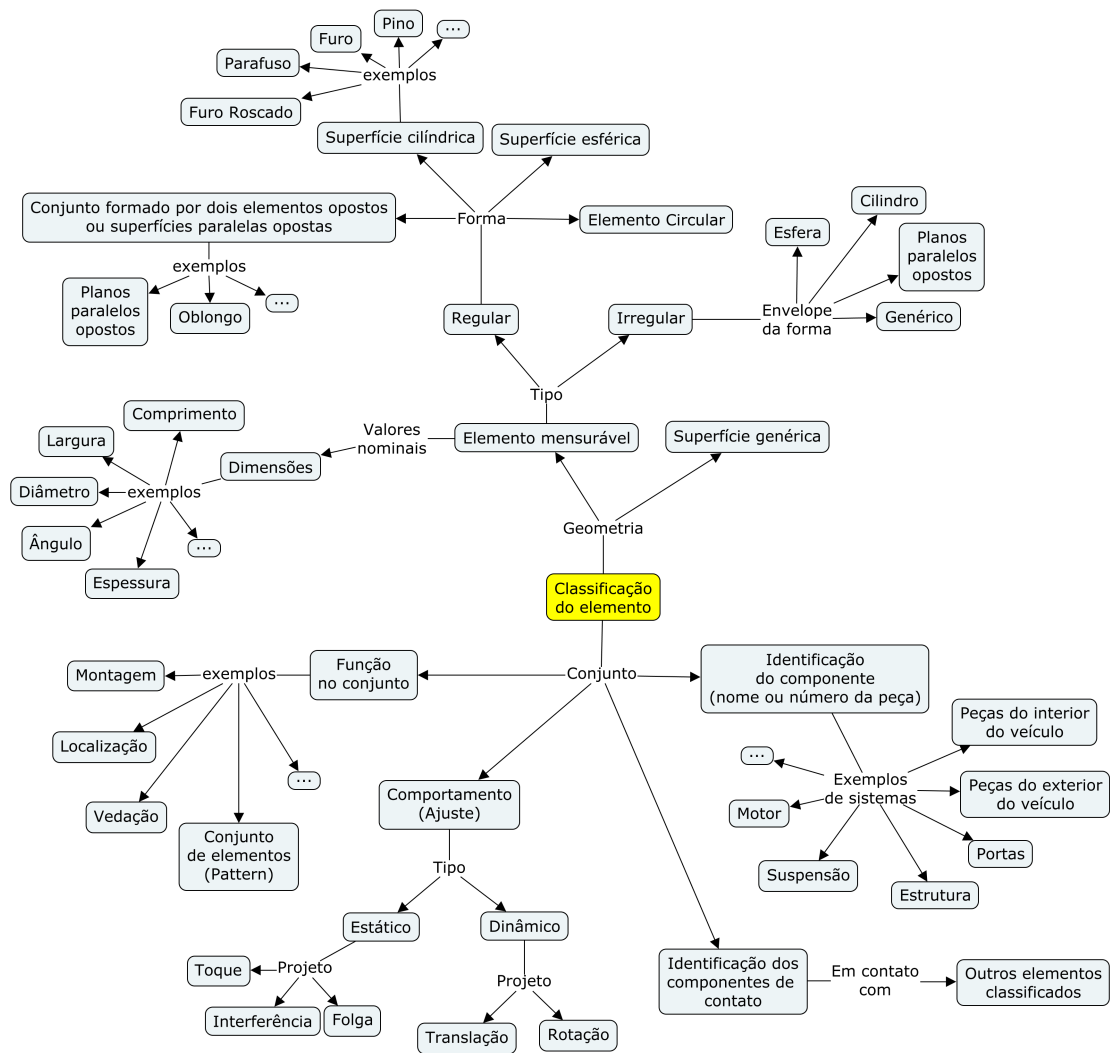


Figura 4.4: Modelo de classificação de elementos geométricos. Fonte: o Autor

Estudo de caso: aplicação da método na indústria automotiva

5.1 Sistema de montagem fixa

O sistema de montagem fixa é uma condição em que duas ou mais partes são unidas e uma parte localiza um elemento de montagem utilizando-se de furos roscados ou furos sem folga (Figura 5.1). O FCF de um furo roscado em um sistema de montagem fixo será analisado neste estudo de caso. Este é um exemplo clássico em projetos mecânicos da indústria automotiva, porque é constantemente utilizado para fixar componentes e formar conjuntos. Exemplos de uso deste sistema passam pelo bloco e cabeçote de um motor a combustão, roda e cubo da roda, componentes da suspensão, entre outros.

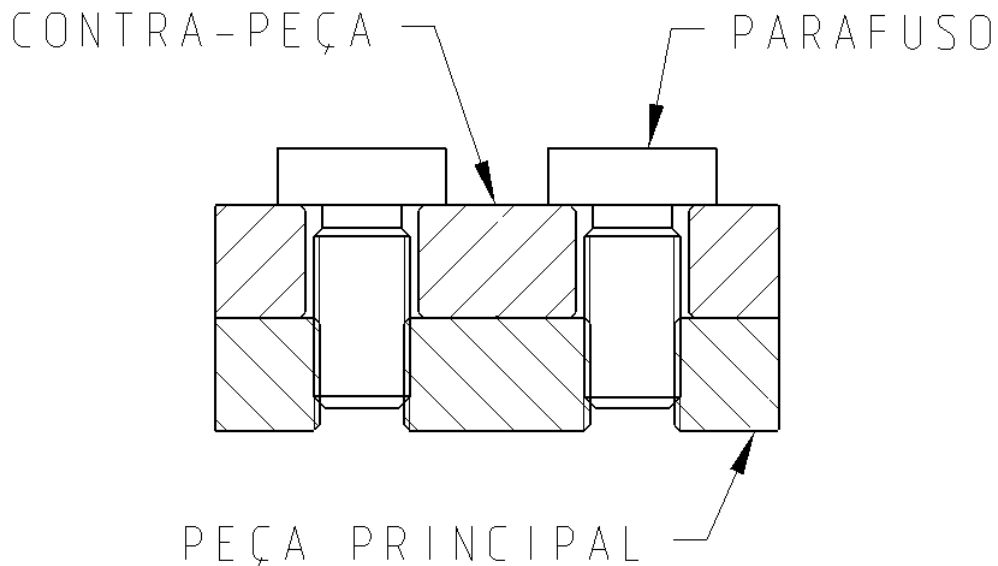


Figura 5.1: Exemplo de um sistema de montagem fixa. Fonte: o Autor

O furo roscado na peça principal pode ser classificado como uma superfície cilíndrica, ou seja, um elemento mensurável regular. Faz parte de uma montagem estática no motor e o requisito do projeto para este elemento é manter as superfícies de toque em contato na condição de trabalho. Sua principal função é fixar a contra-peça no componente principal com um elemento de fixação, neste caso, parafusos. As peças analisadas podem possuir diferentes espessuras. De acordo com a equipe de montagem final, peças com

maior espessura apresentam mais problemas para serem montadas. Desta forma é possível classificar o elemento de acordo com a análise da geometria e sua função na montagem.

A tolerância de posição é frequentemente aplicada em um furo roscado, para assegurar a montagem correta das peças neste sistema. Três diferentes conjuntos de símbolos no FCF foram encontrados para esta aplicação de montagem fixa. No primeiro caso analisado, a engenharia optou por utilizar apenas o controle de tolerância de posição sem qualquer símbolo modificador sobre o FCF. esta condição é conhecida como independente da dimensão do elemento (Regardless of Feature Size, RFS). Em outros desenhos, os projetistas utilizaram o símbolo de condição de máximo material (Maximum Material Condition, MMC). No terceiro caso encontrado, projetistas aplicaram o MMC e o símbolo de tolerância projetada (Projected Tolerance, PT) em conjunto na FCF (Figura 5.2). Todos os FCF avaliados têm o seu DRF preenchido de acordo com a montagem.

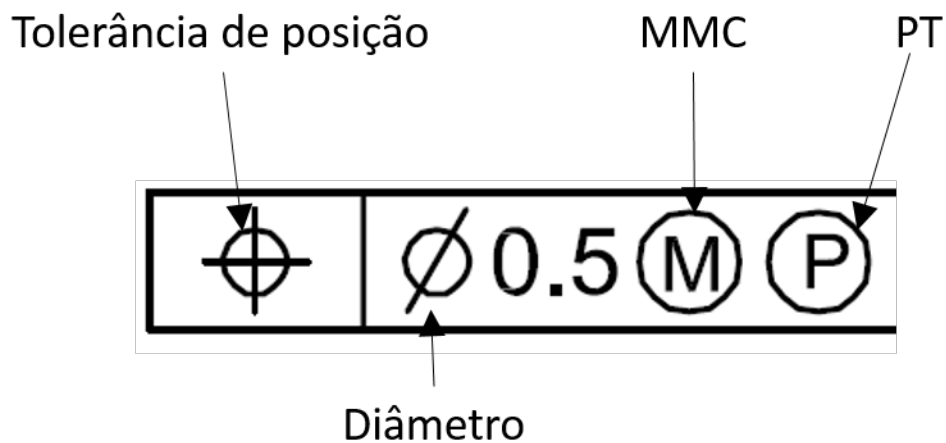


Figura 5.2: Símbolos modificadores do estudo de caso. Fonte: o Autor

A tolerância de posição controla a localização de um ou mais elementos em aos datums especificados. MMC é a condição em que um elemento está com a quantidade máxima de material dentro dos limites indicados de tamanho, ou seja, a peça está na sua condição de maior peso. O MMC é frequentemente usado para garantir a montagem das peças nas piores condições, como, por exemplo, o diâmetro do furo no valor mínimo da tolerância ou o diâmetro do eixo no valor máximo.

É recomendado aplicar o PT quando a variação na orientação dos furos roscados pode causar interferência na contra-peça. Ao contrário das aplicações de montagem flutuante, onde os furos na peça e contra-peça são projetados com folga, a condição de montagem fixa depende da orientação do furo produzido em relação aos datums (ASME, 2009). Estes três conjuntos de FCF encontrados estão corretos em relação a sua sintaxe de acordo com a ASME Y14.5 2009, entretanto, eles afetam os resultados do projeto modificando a zona

de tolerância especificada.

Neste cenário, qual símbolo, dentre os apresentados para definir a tolerância geométrica e modificadores, deve ser utilizado nesta aplicação classificada, neste sistema de montagem fixa? Durante a avaliação para classificar o elemento, a espessura da contra-peça foi determinada como um fator importante na definição desta zona de tolerância, pois o risco de interferência aumenta diretamente com o incremento na espessura nominal (Figura 5.3).

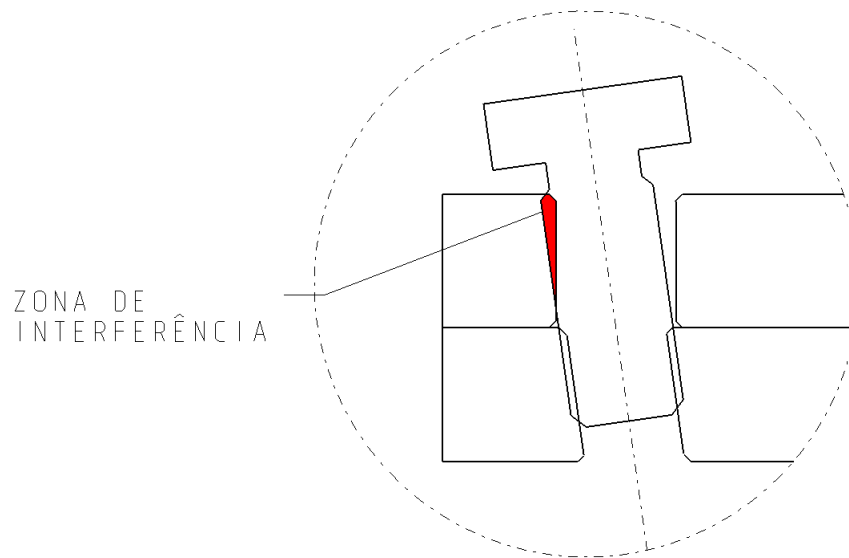


Figura 5.3: Representação da zona de interferência devido as variações de orientação do furo roscado. Fonte: o Autor

5.2 Seleção dos especialistas

A técnica de agrupamento por K-means foi aplicada com os dados levantados na pesquisa Apêndice A.2. O K-Means é uma heurística de agrupamento não hierárquico que busca minimizar a distância dos elementos a um conjunto de k centros dado por $\chi = x_1, x_2, \dots, x_k$ de forma iterativa. A distância entre um ponto e um conjunto de clusters, dada por $d(\rho_i, \chi)$, é definida como sendo a distância do ponto ao centro mais próximo dele (LINDEN, 2009). O número de agrupamentos definidos (k) foram três, com o objetivo de verificar se existem agrupamentos de características distintos para especialistas, usuários e iniciantes.

A Figura 5.4 demonstra que o grupo 1, calculado pela técnica de agrupamentos K-Means, frequentemente lê e utiliza o GD&T, comparado com os outros dois grupos. O mesmo grupo 1 também tem médias superiores a 7 na análise das médias de conhecimento geral sobre GD&T, confiança em aplicar GD&T e conforto em escolher os símbolos, conforme

a Figura 5.5.

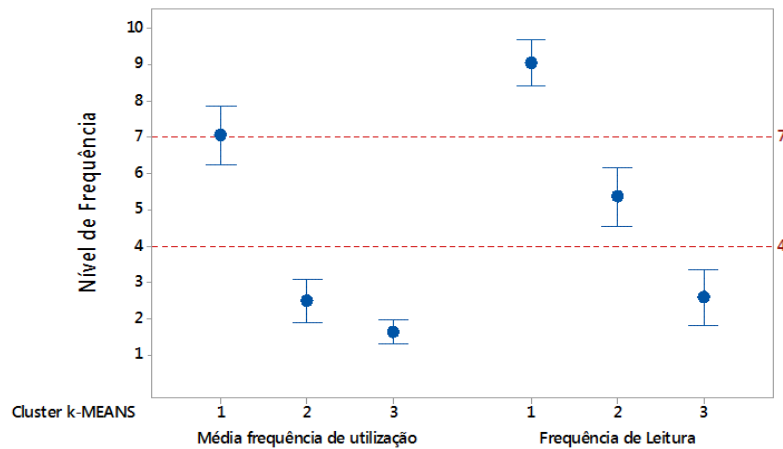


Figura 5.4: Média de frequências de uso e leitura agrupadas. Fonte: o Autor

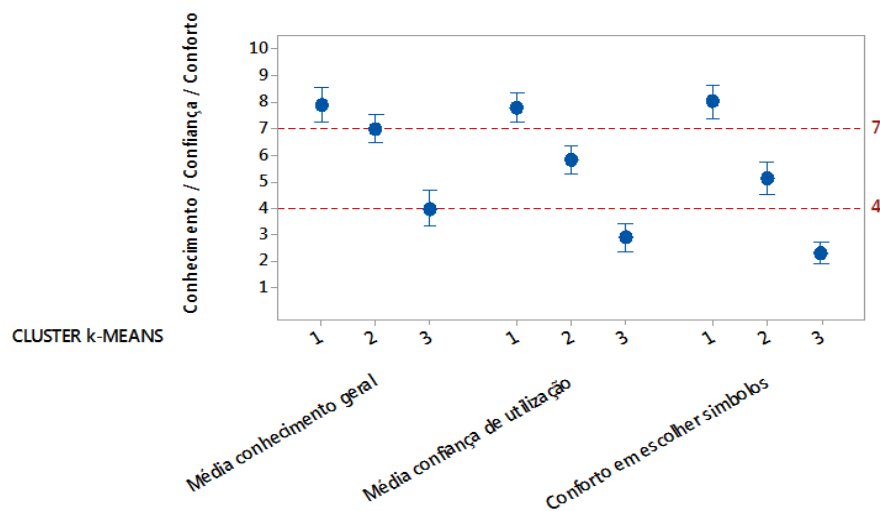


Figura 5.5: Médias de conhecimento, confiança e conforto em aplicar GD&T agrupadas. Fonte: o Autor

Os engenheiros e projetistas que frequentemente utilizam e lêem GD&T, irão sentir-se mais confortáveis em aplicar os símbolos no FCF de acordo com a função do elemento, além de ter mais confiança e conhecimento sobre o assunto do que aqueles que não utilizam o GD&T com frequência. Portanto o grupo 1 apresenta parte dos fatores necessários para definir especialista. Esta foi a base para construir a definição de especialistas neste projeto.

Foram considerados especialistas neste projeto engenheiros e projetistas que lêem e utilizam GD&T frequentemente, ou seja, mais do que 3 vezes por mês (acima do nível 7 na escala de frequência de uso e leitura). Além disto, estes profissionais precisam estar

familiarizados com a aplicação de GD&T no conjunto ou sistema e sentir-se confortáveis em escolher símbolos de tolerância geométrica e modificadores.

Desta forma, cinco especialistas da indústria automotiva que trabalham com análise de variação dimensional por mais do que cinco anos foram selecionados para avaliar o problema proposto sobre o sistema de montagem fixa. Todos estes profissionais tem contato frequente com GD&T, quase que diariamente, e trabalham com análises de tolerâncias em motores, sistemas de suspensão e conjuntos metálicos estampados e soldados.

5.3 Avaliação do problema proposto pelos especialistas

A pesquisa para coletar informações de especialistas em GD&T foi desenvolvida com base na condição apresentada na seção 5.1. Esta pesquisa apresentou uma condição sistema de montagem fixa com furos roscados. A espessura nominal da contra-peça foi definida entre menos de 1mm até mais de 20mm, dividida em uma escala de cinco etapas. Especialistas em GD&T avaliaram esta pesquisa com números inteiros entre 1 e 5, onde 1 é a condição em que se julga a menor conexão dos símbolos apresentados quanto a função ou aplicação do elemento e 5 é a condição com maior conexão para a mesma função ou aplicação.

Cinco especialistas em GD&T, selecionados conforme os requisitos apresentados na seção 5.2, responderam à pesquisa proposta. O resumo gráfico dos resultados encontrados está na Figura 5.6, onde é possível identificar a média para cada condição avaliada com o intervalo de incerteza de um desvio padrão. O gráfico sugere que as médias não são estatisticamente diferentes, devido a sobreposição dos intervalos, e, por este motivo, é difícil definir um requisito de engenharia diretamente da análise gráfica deste resultado obtido.

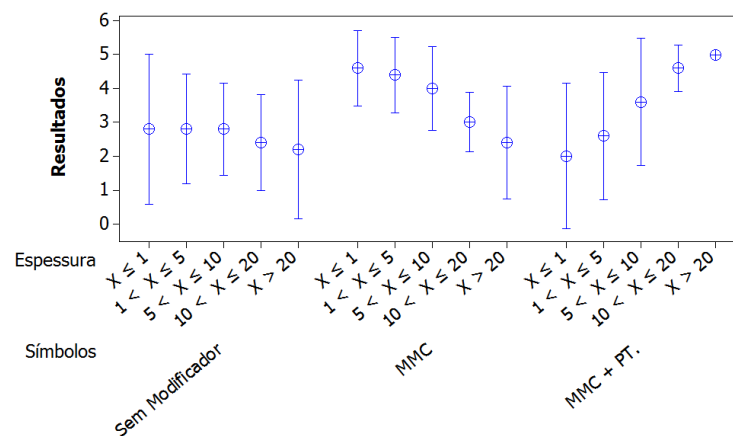


Figura 5.6: Gráfico de intervalos de confiança para a média dos resultados da pesquisa. Fonte: o Autor

5.4 Aplicação do modelo fuzzy

Como apresentado na seção 4.1, os modelos fuzzy são capazes de traduzir o conhecimento tácito em explícito, e, desta forma, é possível desenvolver requisitos de engenharia a partir do conhecimento dos engenheiros especialistas. Os resultados encontrados na pesquisa foram aplicados em um modelo fuzzy Mamdani. Este método mostrou-se adequado para resolver este problema por ser facilmente aplicável com entradas linguísticas (linguagem humana). Este modelo requer a criação de regras para transformar este conhecimento tácito em explícito. Estas regras foram aplicadas no modelo Fuzzy Mamdani de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Regras utilizadas na lógica fuzzy. Fonte: o Autor

Avaliação dos especialistas	Resposta
Se $\varnothing X.XM$ é MODERADO e $\varnothing X.X$ é BAIXO e $\varnothing X.XMP$ é BAIXO	$\varnothing X.X$
Se $\varnothing X.XM$ é ALTO e $\varnothing X.X$ é BAIXO e $\varnothing X.XMP$ é BAIXO	$\varnothing X.XM$
Se $\varnothing X.XM$ é ALTO e $\varnothing X.X$ é MODERADO e $\varnothing X.XMP$ é BAIXO	$\varnothing X.XM$
Se $\varnothing X.XM$ é ALTO e $\varnothing X.X$ é BAIXO e $\varnothing X.XMP$ é MODERADO	$\varnothing X.XM$
Se $\varnothing X.XM$ é ALTO e $\varnothing X.X$ é MODERADO e $\varnothing X.XMP$ é MODERADO	$\varnothing X.XM$
Se $\varnothing X.XM$ é BAIXO e $\varnothing X.X$ é MODERADO e $\varnothing X.XMP$ é BAIXO	$\varnothing X.X$
Se $\varnothing X.XM$ é BAIXO e $\varnothing X.X$ é ALTO e $\varnothing X.XMP$ é BAIXO	$\varnothing X.X$
Se $\varnothing X.XM$ é MODERADO e $\varnothing X.X$ é ALTO e $\varnothing X.XMP$ é BAIXO	$\varnothing X.X$
Se $\varnothing X.XM$ é BAIXO e $\varnothing X.X$ é ALTO e $\varnothing X.XMP$ é MODERADO	$\varnothing X.X$
Se $\varnothing X.XM$ é MODERADO e $\varnothing X.X$ é ALTO e $\varnothing X.XMP$ é MODERADO	$\varnothing X.X$
Se $\varnothing X.XM$ é BAIXO e $\varnothing X.X$ é BAIXO e $\varnothing X.XMP$ é MODERADO	$\varnothing X.XMP$
Se $\varnothing X.XM$ é BAIXO e $\varnothing X.X$ é BAIXO e $\varnothing X.XMP$ é ALTO	$\varnothing X.XMP$
Se $\varnothing X.XM$ é MODERADO e $\varnothing X.X$ é BAIXO e $\varnothing X.XMP$ é ALTO	$\varnothing X.XMP$
Se $\varnothing X.XM$ é BAIXO e $\varnothing X.X$ é MODERADO e $\varnothing X.XMP$ é ALTO	$\varnothing X.XMP$
Se $\varnothing X.XM$ é MODERADO e $\varnothing X.X$ é MODERADO e $\varnothing X.XMP$ é ALTO	$\varnothing X.XMP$

Além disto, duas funções triangulares foram utilizadas, uma delas para avaliar as entradas (Tabela 5.2) e, a outra, para defuzzificar os resultados (Tabela 5.3).

Tabela 5.2: Função triangular de entrada. Fonte: o Autor

Função	Mínimo	Pico	Máximo
Baixo	-0.6	1	2.6
Moderado	1.4	3	4.6
Alto	3.4	5	6.6

Tabela 5.3: Função triangular de saída. Fonte: o Autor

Função	Mínimo	Pico	Máximo
MMC	-0.4	0	0.4
RFS	0.1	0.5	0.9
MMC + PT	0.6	1	1.4

5.5 *Desenvolvimento do requisito dimensional*

O modelo fuzzy sugere duas respostas diferentes com base na espessura da contra-peça. Em peças com espessura menor do que 10 mm, os projetistas devem usar apenas o símbolo modificador MMC. O uso dos símbolos MMC e PT em conjunto é indicado quando a espessura da contra-peça é maior do que 10 mm (Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Resultados obtidos com o modelo fuzzy. Fonte: o Autor

Espessura (mm)	Valor numérico	Símbolo modificador
$X \leq 1$	0,163	MMC
$1 < X \leq 5$	0,144	MMC
$5 < X \leq 10$	0,344	MMC
$10 < X \leq 20$	0,856	MMC + PT
$X > 20$	0,847	MMC + PT

Desta forma, o resultado pode ser traduzido em um requisito de engenharia e orientar o processo de especificação de tolerância. Este requisito é capaz de definir quais os símbolos que devem ser usados na função específica de um elemento classificado (Figura 5.7).

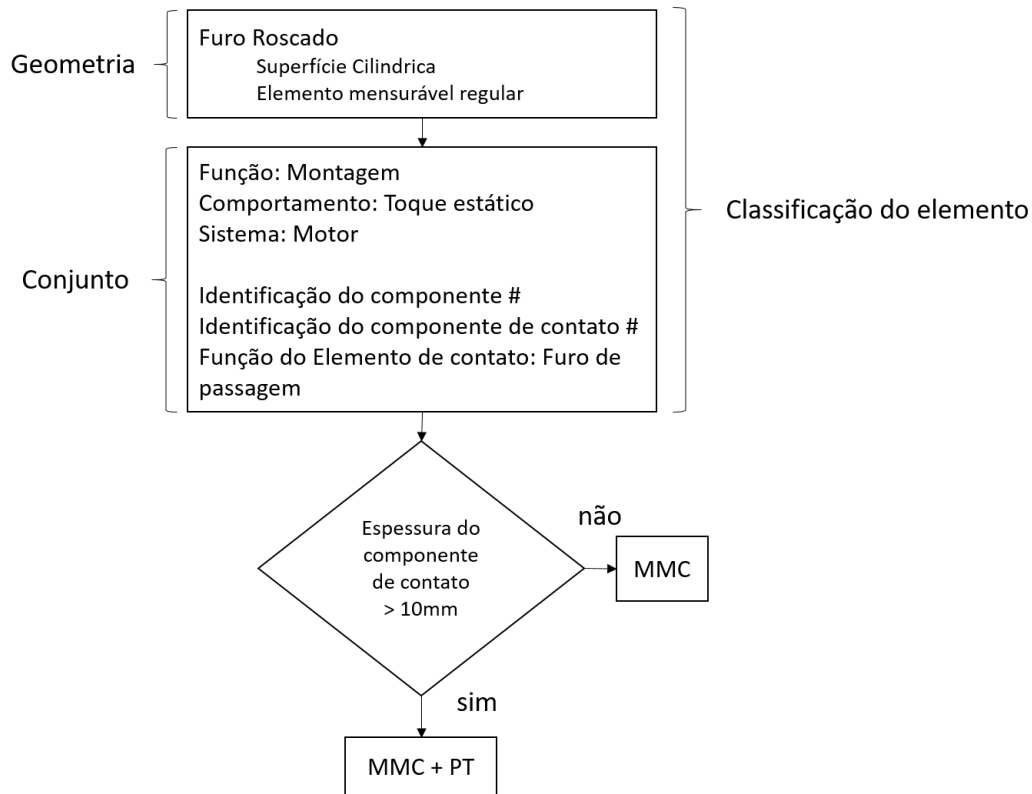


Figura 5.7: Requisito dimensional de engenharia. Fonte: o Autor

5.6 Validação do método

Os resultados encontrados com o método proposto foram validados com o uso de um modelo estocástico para cálculos de variação dimensional. Este modelo foi desenvolvido em um software de simulação estocástica que utiliza o método de Monte Carlo, específico para avaliação da variação dimensional em sistemas mecânicos.

A Simulação de Monte Carlo, ou SMC, simula um determinado número de possíveis cenários a partir de um processo estocástico para a variável aleatória específica. A SMC apresenta diversas vantagens como flexibilidade, simplicidade conceitual, facilidade de incorporação de modelagens complexas e obtenção de distribuições empíricas de probabilidades. É possível destacar que a SMC não tem critério determinado para definir o intervalo da frequência acumulada, cujo sorteio aleatório tem como base a distribuição escolhida (KLEIJNEN, 1974). Os métodos de simulação estocástica são procedimentos para a geração de números pseudo-aleatórios cujo objetivo é explorar o espaço de incerteza ou campo de possibilidades de um dado fenômeno físico ou então outros tipos de variáveis onde o comportamento pode ser matematicamente quantificado (PRODAN; PRODAN, 2001).

O modelo estocástico foi utilizado para simular a produção de dez mil conjuntos, ou seja, iterações, para cada espessura estudada, em cada condição proposta (RFS, MMC e MMC + PT). A Figura 5.8 resume as saídas desta simulações. Qualquer condição proposta não interfere na estimativa de interferência para contra-peças com espessura menor do que 5mm. Entre 5mm e 10mm, o uso do MMC aumenta a estimativa de conjuntos que apresentarão interferência durante a produção, porém, a porcentagem de interferência fica próxima a um ponto percentual quando a espessura é de 10mm.

A decisão dos especialistas no resultado do modelo fuzzy foi utilizar o MMC para espessuras menores do que 10mm. O método de controle dimensional que pode ser utilizado em um FCF que contenha somente o MMC é mais barato do que com o uso do RFS: é possível construir dispositivos mecânicos de controle dimensional para substituir o uso de máquinas de medição por coordenadas, que demandam profissionais especializados e significam maiores custos para o controle dimensional do elemento geométrico.

O MMC + PT foi a melhor escolha para contra-peças com espessuras maiores do que 10mm em ambas as análises, no modelo estocástico e no modelo fuzzy. O uso destes dois modificadores no mesmo FCF garante que os componentes produzidos dentro do especificado não apresentarão problemas de interferência durante a montagem, mas demanda o uso de máquinas de medição por coordenadas, o que torna mais caro do que o MMC. Por este motivo, foi indicado pelos especialistas para projetos de maior espessura do componente, acima de 10mm.

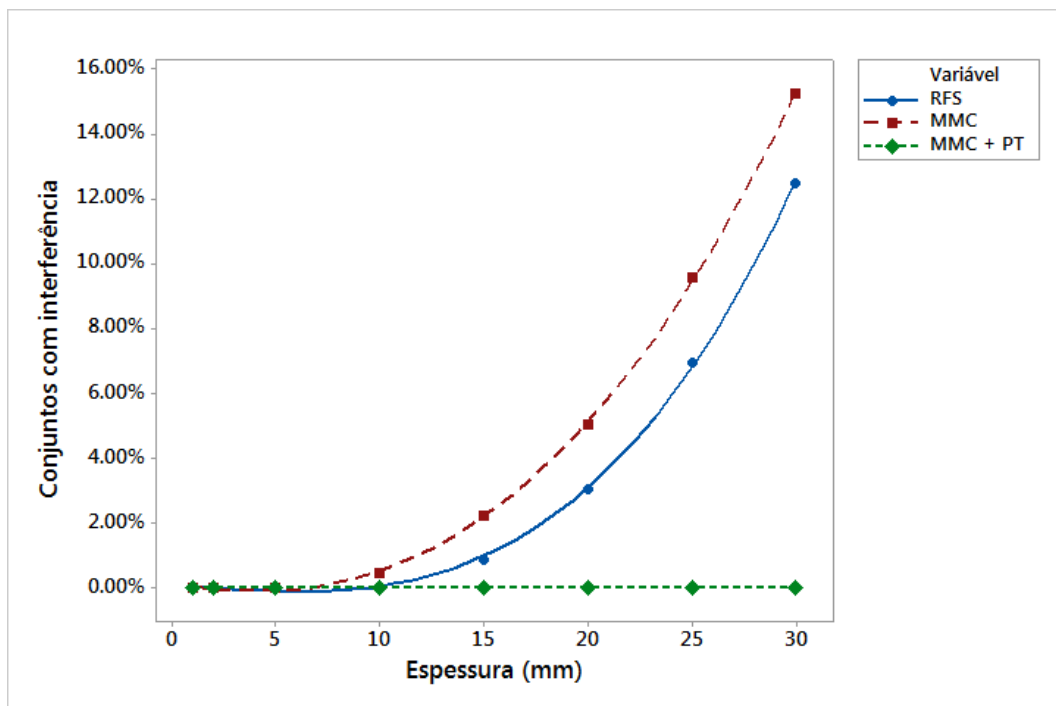


Figura 5.8: Simulação de Monte Carlo para validação do modelo fuzzy. Fonte: o Autor

Considerações finais

6.1 Conclusões

O método para criar requisitos dimensionais com sistema especialista fuzzy mostrou ser adequado para o desenvolvimento de produto na indústria automotiva. Com ele foi possível definir um padrão, requisito dimensional, para a escolha de símbolos modificadores que tem como base a função do elemento geométrico. Também foi possível demonstrar, em um estudo de caso real sobre bloco e cabeçote do motor, a aplicação deste método.

Estes requisitos dimensionais são utilizados na fase de desenvolvimento no PDP, mais precisamente na síntese do processo em V, antecipando a escolha dos símbolos com base na função do elemento. Esta escolha impacta diretamente em atributos importantes do veículo, como, por exemplo dirigibilidade, que é a resposta do veículo aos comandos do motorista, ou qualidade estética, que pode ser representada pelo alinhamento das portas com a carroceria. Também pode afetar nos resultados da organização, com custos diretos devido ao reparo de componentes e ajustes nos veículos produzidos, e custos indiretos, afetando a qualidade do produto percebida pelo consumidor final.

O conhecimento tácito dos especialistas foi transformado em explícito, com o uso do modelo computacional proposto, e documentado na forma de requisito dimensional (Figura 5.7). Este requisito é um exemplo da capacidade deste método de modificar, para melhor, a forma como engenheiros e projetistas desenvolvem produtos e especificam as tolerâncias de cada componente nos veículos. A IA, aplicada neste método, proporcionou a análise dos resultados, que não seriam capazes de serem obtidos por meio de análise estatística comum, como avaliação de médias e barras de erro.

A especificação de tolerâncias geométricas e dimensionais é um sistema complexo e a escolha dos símbolos é parte importante deste sistema. Um elemento geométrico é parte de um componente que será montado em um subsistema de um veículo automotor. No caso deste elemento ser indevidamente dimensionado, alguns resultados inesperados, imprevisíveis por meio de equações matemáticas, podem ocorrer. E como especificar tolerâncias é um processo composto por três fases, sendo especificação, atribuição e análise de tolerâncias, a correta escolha destes símbolos que farão parte do FCF é importante ponto de partida para obter-se melhores resultados de qualidade e custo do produto final.

6.2 Atividades Futuras de Pesquisa

O sistema de classificação de elementos geométricos proposto tem o potencial de gerar dados suficientes nas organizações para que outros métodos de inteligência artificial possam ser aplicados, como, por exemplo, sistemas neuro-fuzzy. Análises de material, resultados de qualidade e custos com manufatura poderiam ser utilizados como entrada do sistema especialista para determinar requisitos de especificação de tolerâncias dimensionais com o melhor custo benefício possível para cada situação do projeto. Para que isto ocorra, é necessário uma mudança no processo de documentação de engenharia, para que, dentro de alguns anos, estes dados estejam disponíveis para aplicação nestes estudos.

Apêndice

A.1 Questões

1. Quantos anos de experiência na indústria automotiva?
 - 1a) Entre 1 e 2 anos
 - 1b) Entre 2 e 5 anos
 - 1c) Entre 5 e 10 anos
 - 1d) Maior do que 10 anos
2. Qual a sua área de atuação?
 - 2a) Engenharia de Produto
 - 2b) Engenharia de Manufatura
 - 2c) Engenharia de Qualidade
 - 2d) Outros
3. Você já fez algum treinamento de GD&T?
 - 3a) Sim
 - 3b) Não
4. Com que frequência você modifica GD&T de produtos existentes?
5. Com que frequência você desenvolve GD&T em novos produtos?
6. Com que frequência você lê GD&T?
7. Qual o seu nível de confiança para validar o GD&T em novos produtos?
8. Qual o seu nível de confiança para aplicar GD&T em novos produtos?
9. Qual o seu nível de confiança para ler e compreender a informação de GD&T?
10. Como você define seu conhecimento sobre Datums?
11. Como você define seu conhecimento sobre Símbolos modificadores?
12. Como você define seu conhecimento sobre Símbolos de característica geométrica?
13. Como você define seu conhecimento sobre Métodos de especificação de tolerâncias diretas?
14. Você foi escolhido para participar do grupo de projeto de um sistema de montagem fixa. Qual o seu nível de conforto para determinar os símbolos que devem ser utilizados na condição apresentada?

A.2 Respostas

Tabela A.1: Respostas do questionário aplicado

Prof.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	D	A	Sim	7	5	10	9	10	10	10	9	10	10	10
2	C	A	Sim	8	8	8	8	8	9	10	7	10	10	8
3	C	A	Sim	1	1	1	3	3	3	2	2	4	8	1
4	B	A	Sim	2	6	9	7	8	9	8	7	8	9	6
5	C	A	Sim	10	10	10	9	9	9	10	8	10	10	8
6	D	A	Sim	5	10	10	9	8	9	9	7	7	10	8
7	C	A	Sim	2	2	6	6	6	7	8	5	7	9	3
8	C	A	Sim	6	6	6	6	8	8	8	6	8	10	6
9	D	D	Sim	1	1	4	5	6	7	7	6	7	8	6
10	C	A	Sim	2	4	4	3	3	8	8	4	9	10	3
11	B	A	Não	5	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3
12	C	A	Sim	4	5	7	5	5	6	7	5	6	7	3
13	D	A	Sim	6	7	10	5	7	7	7	1	4	10	8
14	C	D	Sim	1	3	3	1	5	7	9	5	7	10	1
15	C	A	Sim	3	7	9	5	6	7	6	7	7	8	5
16	D	A	Sim	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
17	C	A	Sim	5	5	8	6	6	7	6	6	7	8	7
18	C	A	Sim	9	8	10	8	9	9	10	8	8	8	9
19	D	A	Sim	3	3	3	8	8	8	9	9	9	9	8
20	C	A	Sim	8	8	10	6	6	7	8	8	7	7	8
21	D	A	Sim	1	2	7	6	6	8	7	6	10	10	8
22	D	A	Sim	6	6	6	8	8	8	10	8	8	10	10
23	C	A	Sim	5	8	10	6	7	7	7	5	7	8	6
24	C	A	Sim	1	1	6	1	1	6	3	3	6	10	3
25	D	D	Sim	1	3	3	7	6	8	8	7	8	8	7
26	D	A	Sim	2	3	4	5	6	7	8	6	6	6	5
27	B	A	Sim	6	6	9	7	7	7	8	7	8	10	7
28	B	B	Não	2	2	2	5	5	5	3	3	3	3	5
29	C	A	Sim	3	3	3	4	5	6	5	5	7	8	3
30	B	B	Não	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	B	B	Não	5	5	5	5	5	5	6	3	4	6	4
32	C	B	Não	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2
33	B	B	Não	1	1	1	2	2	7	1	1	8	9	2
34	B	B	Sim	1	2	2	6	6	7	7	7	9	9	6
35	C	B	Não	1	1	1	5	6	7	7	7	5	8	2
36	B	B	Não	1	1	5	5	5	7	10	1	9	10	3
37	B	B	Não	1	1	1	4	2	6	5	3	3	7	1

Continua

Tabela A.1 – *Continuação*

Prof.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
38	B	A	Não	2	5	10	2	2	4	2	1	5	8	3
39	B	A	Sim	2	2	2	2	5	7	8	2	8	10	4
40	B	A	Sim	5	4	10	7	7	8	9	7	8	10	7
41	B	B	Não	1	1	1	3	3	3	3	3	4	3	2
42	A	A	Sim	2	2	7	1	1	3	5	3	3	4	2
43	D	A	Sim	1	1	2	2	5	5	2	2	7	8	2
44	B	A	Não	2	2	8	4	4	6	6	1	6	10	4
45	C	A	Não	2	2	8	6	4	7	7	4	7	8	4
46	C	C	Sim	4	6	6	7	7	8	6	5	7	9	7
47	C	A	Sim	1	1	1	1	4	4	1	1	1	10	4
48	B	B	Não	1	1	6	3	7	8	10	2	10	10	5
49	C	A	Não	7	6	7	7	7	7	6	6	7	7	7
50	C	C	Sim	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	3
51	D	A	Não	1	1	2	2	2	5	2	2	7	10	3
52	B	A	Sim	9	9	9	8	8	8	8	7	8	9	7
53	C	A	Sim	2	2	2	4	5	6	7	5	5	9	3
54	D	D	Sim	2	2	7	4	4	7	6	4	6	10	3
55	B	B	Não	1	1	2	1	1	1	3	3	5	5	2
56	B	C	Sim	4	5	5	6	8	7	8	9	9	7	7
57	D	C	Sim	6	6	6	8	8	8	7	7	9	9	7
58	D	C	Sim	9	9	9	8	8	8	9	7	8	10	8
59	D	C	Não	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
60	C	D	Sim	1	1	2	7	7	7	8	8	10	10	2
61	D	C	Sim	1	3	3	6	5	6	4	5	5	8	3
62	D	D	Sim	2	10	10	10	9	9	10	9	10	10	10
63	D	C	Sim	1	1	6	5	5	6	7	6	7	6	6
64	D	C	Sim	1	1	7	3	4	7	7	3	5	10	4
65	D	D	Sim	3	1	10	4	5	7	9	6	9	10	5
66	D	C	Sim	1	1	5	8	8	8	9	9	9	10	6
67	B	C	Sim	2	2	2	9	9	9	10	10	10	10	8
68	D	D	Sim	1	1	3	4	4	4	10	3	10	10	2
69	D	D	Sim	2	3	2	5	6	7	5	6	7	8	5
70	D	D	Sim	1	1	8	7	7	8	9	9	10	10	5
71	D	C	Sim	1	1	5	8	8	8	7	7	8	10	5
72	D	C	Sim	3	3	3	3	3	3	3	3	8	10	3
73	C	A	Sim	7	9	10	8	8	8	8	8	8	9	10
74	C	C	Sim	1	1	2	1	1	7	7	7	8	8	1
75	D	D	Não	2	2	3	7	6	7	5	7	8	10	5

Continua

Tabela A.1 – *Continuação*

Prof.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
76	D	A	Sim	6	6	6	5	5	5	6	6	6	6	6
77	C	A	Sim	1	1	4	2	5	5	2	1	3	7	1
78	B	A	Não	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	1
79	C	C	Não	1	1	1	1	1	2	2	4	6	9	1

Referências Bibliográficas

- ANSELMETTI, B.; MAWUSSI, K. Computer aided tolerancing using positioning features. *ASME J Comput Inf Sci Eng*, ASME, v. 3, p. 15–21, 2003. [2.2.2](#)
- ARMILLOTTA, A. A method for computer-aided specification of geometric tolerances. *Computer-Aided Design*, Elsevier, v. 45, p. 1604–1616, 2013. [2.2.2](#)
- ARMILLOTTA, A.; SEMERARO, Q. Geometric tolerance specification. In: COLOSIMO, B.; SENIN, N. (Ed.). *Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*. New York: Springer, 2011. [1](#), [1.3](#), [2.2](#), [2.2](#), [2.2.2](#), [2.1](#)
- ASME. *Y14.5 Dimensioning and tolerancing*. New Jersey: American Society of Mechanical Engineers, 2009. [1](#), [2.2.1](#), [2.2.2](#), [4.2.1](#), [5.1](#)
- BALLU, A.; MATHIEU, L. Choice of functional specifications using graphs within the framework of education. In: *Proceedings of the CIRP seminar on computer-aided tolerancing*. Twente: [s.n.], 1999. p. 197–206. [2.2.2](#)
- BLUNDELL, M.; HARTY, D. *Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*. 1. ed. England: Elsevier, 2004. [1.1](#), [2.1](#)
- CHUGH, R. Do australian universities encourage tacit knowledge transfer? In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*. Portugal: [s.n.], 2015. p. 128–135. ISBN 978-989-758-158-8. [1](#)
- CLEMENT, A.; RIVIERE, A.; SERRE, P. A declarative information model for functional requirements. In: *Proceedings of the CIRP seminar on computer-aided tolerancing*. Tokyo: [s.n.], 1995. p. 3–16. [2.2.2](#)
- CRAIG, M. Dimensional management: a necessary process to meet corporate goals for global competition. In: *Colloquium of Control of Dimensional Variation*. Birmingham: [s.n.], 1997. [2.1](#), [2.1](#)
- DAY, D. Barriers to the future success of geometric dimensioning and tolerancing. In: DRAKE, P. (Ed.). *Dimensioning and tolerancing handbook*. United States: McGraw-Hill, 1999. [1](#)
- DETRAN. agosto 2016. (<http://www.detran.se.gov.br>). [2.6](#)
- DRAKE, P. J. *Dimensioning and tolerancing handbook*. New York: McGraw-Hill, 1999. [2.2.2](#), [4.2.1](#)
- DUNCAN, W. R. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. United States: Project Management Institute, 1996. [2.1](#)
- FARMER, L. View points on future direction in cat research. In: EIMARAGHY, H. A. (Ed.). *Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications*. United States: Springer Science+Business Media Dordrecht, 1998. [1](#)

- GODOY, A. S. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. *Revista de Administração de Empresas*, v. 35, n. 3, p. 20–29, 1995. [3.2.1](#)
- HAMMEL, G.; PRAHALAD, C. Competing for the future. *Harvard Business Review*, Harvard School Press, 1994. [3.1](#)
- HARTY, D. The myth of accuracy. *Engineering Integrity journal*, Engineering Integrity Society, 1999. [1.1](#)
- HENZOLD, G. *Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection: a handbook for geometrical product specification using ISO and ASME standards*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2006. [1](#)
- HIRZ, M.; DIETRICH, W.; GFRERRER, A.; LANG, J. *Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development: Development Processes, Geometric Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data Management*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-11940-8. [3.1](#), [3.1](#)
- HITCHINGS, M.; VLACIC, L.; KECCMAN, V. Fuzzy control. In: VLACIC, L.; PARENT, M.; HARASHIMA, F. (Ed.). *Intelligent Vehicle Technologies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 289–331. ISBN 978-0-7506-5093-9. [4.1.1](#), [4.1.1](#), [4.1.2](#), [4.1.4](#), [4.2](#)
- HONG, Y. S.; CHANG, T. C. A comprehensive review of tolerancing research. *Int J Prod Res*, Taylor and Francis, v. 40, n. 11, p. 2425–2459, 2002. [1](#), [2.1](#)
- HU, J.; XIONG, G.; WU, Z. A variational geometric constraints network for a tolerance types specification. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 24, p. 214–222, 2004. [2.2.2](#)
- IGARASHI, W.; RAUTENBERG, S.; MEDEIROS, L. F.; PACHECO, R. C. S.; TODESCO, J. L. Aplicações de inteligência artificial para gestão de conhecimento nas organizações: um estudo exploratório. In: *Proceedings of XIII SIMPEP*. Brasil: [s.n.], 2006. [4.1](#)
- KAISARLIS, G. J.; DIPLARIS, S. C.; SFANTSIKOPOULOS, M. M. Geometrical position tolerance assignment in reverse engineering. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Taylor & Francis, v. 21, n. 1, p. 89–96, 2008. [2.2.2](#)
- KANDIKJAN, T.; SHAH, J. J.; DAVIDSON, J. K. A mechanism for validating dimensioning and tolerancing schemes in cad systems. *Comput Aided Design*, Elsevier, v. 33, p. 721–737, 2001. [2.2](#), [2.2.2](#)
- KLEIJNEN, J. P. C. *Statistical Techniques in Simulation - Part I*. New York, United States: Marcel Dekker, Inc., 1974. [5.6](#)
- LIGGETT, J. V. *Dimensional variation management handbook: a guide for quality, design, and manufacturing engineers*. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. [1](#)
- LINDEN, R. Técnicas de agrupamento. *Revista de Sistemas de Informação*, FSMA, v. 4, p. 18–36, 2009. [5.2](#)
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int J Man Mach Stud*, v. 7, n. 1, p. 1–13, 1975. [4.1.3](#)

- MAO, J.; CHING, H.; SU, D.; DU, R. A tolerance representation model for conceptual design. In: *9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design*. China: [s.n.], 2008. p. 413. [2.1](#)
- MEJBRI, H.; ANSELMETTI, B.; MAWUSSI, B. A recursive tolerancing method with sub-assembly generation. In: *Proceedings of the IEEE international symposium on assembly and task planning*. Besançon: [s.n.], 2003. p. 235–240. [2.2.2](#)
- MORAES, M. *O fluxo do conhecimento durante a criação de um produto automotivo: uma proposta de gerenciamento*. Tese (MSc thesis) — Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, Brasil, 2010. [3.1](#)
- NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. *Criação de conhecimento na empresa: como as empresas japonesas geram a dinâmica da inovação*. Rio de Janeiro: Campus, 1997. [3.1](#), [3.1](#)
- PABLOS, P. O. Measuring and reporting structural capital - lessons from european learning firms. *J. of Intellectual Capital*, Emerald, v. 5, p. 629–647, 2004. [4.1](#)
- PEGNA, J.; FORTIN, C.; MAYER, R. Teaching tolerances: A comparison between the conventional and reverse engineering approaches. In: EIMARAGHY, H. A. (Ed.). *Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications*. United States: Springer Science+Business Media Dordrecht, 1998. [2.2.2](#), [3.2](#)
- POLANYI, M. *The tacit dimension*. London: Routledge and Kegan Paul, 1966. [3.1](#)
- PROBST, G.; RAUB, S.; ROMHARDT, K. *Wissen managen - Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. Wiesbaden: [s.n.], 2006. [3.1](#)
- PRODAN, A.; PRODAN, R. Stochastic simulation and modelling. *ETK-NTTS 2001*, 2001. [5.6](#)
- RICH, E. *Inteligência Artificial*. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. [4.1](#)
- ROZENFELD, H. et al. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Editora Saraiva, 2006. [2.1](#), [2.2](#)
- SALOMONS, O. W. *Computer support in the design of mechanical products - constraints specification and satisfaction in feature based design and manufacturing*. Tese (PhD thesis) — University of Twente, United States, 1995. [2.2.2](#)
- SCHEUBLE, S. *Wissen und Wissenssurrogate - Eine Theorie der Unternehmung*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts, 1998. ISBN 978-3-8244-6813-3. [3.1](#)
- SHAH, J. J.; YAN, Y.; ZHANG, B. C. Dimension and tolerance modeling and transformations in feature based design and manufacturing. *J Intell Manuf*, Springer, v. 9, p. 475–488, 1998. [2.2.2](#)
- SIVANANDAM, S. N. *Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB*. [S.l.]: Springer, 2007. ISBN 9783540357803. [4.1](#), [4.1.3](#), [4.1.3](#), [4.1.4](#)
- SOUSA, A. R.; WANDECK, M. Deficiências da metrologia industrial no brasil no correto entendimento do gd&t na definição de estratégias de medição consistentes para o seu controle geométrico. In: *Proceedings of the V Congresso Brasileiro de Metrologia*. Brasil: [s.n.], 2009. [1](#)

- SUGENO, M.; TAKAGI, T. Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 116–132, 1985. [4.1.3](#)
- TEOI, A. Y.; ANHOLON, R.; SILVA, D.; QUELHAS, O. L. G. Critical factors for the dimensional management system (dms) implementation in manufacturing industries. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, 2016. [1](#)
- TESCH, R. *Qualitative Research: Analysis types and software tools*. New York: Falmer, 1990. [3.2.1](#)
- TSUI, E.; GARNER, B.; STAAB, S. The role of artificial intelligence in knowledge management. *Knowledge-based Systems*, Elsevier, v. 13, n. 5, p. 235–239, 2000. [4.1](#)
- TURBAN, E. *Administração da Tecnologia da Informação*. Rio de Janeiro: Campus, 2003. [4.1](#)
- VONALTROCK, C. *Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Applications Explained*. 1. ed. New Jersey: Prentice-Hall Publishing, 1995. [4.1.1](#), [4.1.3](#)
- WANG, H.; ROY, U.; SUDARSAN, R.; RAM, D.; KEVIN, W. Functional tolerancing of a gearbox. In: *Proceedings of NAMRC*. Hamilton: [s.n.], 2003. [2.2.2](#)
- WILSON, B. A. The future of dimensioning and tolerancing. In: DRAKE, P. (Ed.). *Dimensioning and tolerancing handbook*. United States: McGraw-Hill, 1999. [1](#)
- WOHINZ, J. W.; OBERSCHMID, H. *Wissensmanagement*. Austria: TU Graz, 2007. [3.1](#)

Um método para criar requisitos dimensionais na indústria automotiva: o processo de escolha de símbolos na especificação de tolerâncias

Thiago B. Murari

Salvador, Novembro de 2016.