

PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS E AJUSTES CONSIDERANDO OS CUSTOS DE NÃO QUALIDADE

Guilherme Akio Oi, guiaoi95@gmail.com¹

Robert Eduardo Cooper Ordoñez, cooper@fem.unicamp.br¹

Rosley Anholon, rosley@fem.unicamp.br¹

¹Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Rua Mendeleev, 200, Campinas, SP, CEP 13083-860.

Resumo: Com o início das transformações na indústria e o foco na redução de custos de não qualidade, houve um crescimento da exigência na definição de tolerâncias geométricas e dimensionais dos produtos, impulsionando o estudo metódico das mesmas. Ainda existindo ferramentas como o Projeto para Controle Dimensional (*Design for Dimensional Control* – DDC) constata-se uma inadequação na forma do tratamento da especificação de tolerâncias e a determinação de ajustes durante a fase de projeto do produto na maioria das empresas, inexistindo um sistema ou método específico e de simples utilização que o considere. Por meio de técnicas de revisão bibliográfica, este trabalho pretende identificar em quais fases do processo de desenvolvimento de produtos o controle dimensional está inserido, com a intenção de propor um procedimento que identifique os parâmetros que impactam na especificação de tolerâncias e ajustes nesse processo e que ao mesmo tempo considere a análise dos custos de não qualidade resultantes da variação dimensional.

Palavras-chave: Controle dimensional, variação dimensional, custos de não qualidade, processo de desenvolvimento de produtos.

1. INTRODUÇÃO

Com o início de transformações na indústria e a necessidade pela padronização, houve um crescimento da exigência na qualidade de seus produtos, impulsionando o estudo metódico das tolerâncias geométricas e dimensionais.

Na década de 1970, foi criado o DFA (*Design for Assembly* – Projeto para Montagem), que introduziu novas técnicas, revolucionando a forma de pensar no projeto do produto. Devido ao seu sucesso, seus conceitos foram expandidos para outros campos de interesse, surgiu, assim, o DFX (*Design for “X”*) (HUANG, 1996).

Dentro das aplicações do conceito DFX surgiu o Projeto para Controle Dimensional (*Design for Dimensional Control* - DDC), que é um método capaz de verificar as características dimensionais de peças, subconjuntos ou mesmo equipamentos completos, tendo como objetivo principal garantir a montagem, o bom funcionamento e intercambiabilidade de peças e componentes de equipamentos (Leaney, 1996).

A função do DDC não é eliminar a variação dimensional, mas sim administrá-la, implicando, entre outros aspectos: manufatura e montagem mais fáceis, ajuste e acabamento aprimorados, melhor fluxo de trabalho, diminuição da necessidade de habilidade dos operários de chão de fábrica; menos mudanças no projeto e melhor consistência e confiabilidade dos produtos em termos de manutenção e reparos.

A gestão da variação dimensional pode ser melhor entendida quando a mesma é vinculada com um Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), por apresentar um conjunto de etapas que possuem procedimentos destinados a transformar informações em especificações técnicas para a fabricação de um novo produto.

Porém, na indústria, constata-se uma inadequação na forma de tratamento da problemática de especificação de tolerâncias dimensionais e determinação de ajustes durante a fase de projeto do produto na maioria das empresas, inexistindo um sistema específico e simples utilização que o considere (RICCI et. al. 2014).

Isso pode ser atribuído à falta de conhecimento do assunto pelos responsáveis da elaboração de projetos, à complexidade das propostas existentes na literatura, além da falta de software de fácil utilização, inviabilizando, desse modo, a aplicação prática da especificação de tolerâncias dimensionais e contribuindo para agravar o custo da não-qualidade.

Assim, analisando as implicações que o controle dimensional tem no desenvolvimento de produtos, o objetivo deste trabalho é identificar em quais etapas do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) o controle dimensional está contemplado e ao mesmo tempo propor um procedimento para aplicar uma análise de custos resultantes da variação dimensional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Projeto para Controle Dimensional

Segundo Leaney (1996), o *Design for Dimensional Control* (DDC) ou Projeto para Controle Dimensional, consiste na gestão de variações dimensionais durante o projeto, fabricação e montagem, procurando atender às expectativas de qualidade quanto a aparência e funcionalidade sem a necessidade de operações de refinamento no chão de fábrica.

Para Sleath (1997), o DDC é centrado no uso de ferramentas analíticas para quantificar o impacto que a variação inerente do processo tem sobre os atributos e desempenho do produto final.

Em outra definição, Cerqueira (2013) define DDC como uma metodologia de engenharia combinada com ferramentas de simulação computacional, na qual se procura entender as fontes de variação, selecionar características de produto e dos processos de manufatura que a minimizam, e usar apropriados métodos para comunicar o nível esperado de variação e maneiras designadas para controlá-la.

Além das definições encontradas, vários autores mostram os benefícios que um controle dimensional pode trazer. Craig (1996) afirma que, ao se executar de maneira adequada as atividades de análise de tolerâncias e otimização, a equipe de desenvolvimento do produto beneficia-se com a confirmação antecipada de que o *design* e o processo conforme especificados atingem ou não os requisitos do produto, com a previsão da quantidade e causas de variação, o que permite uma diminuição na quantidade de protótipos necessários, reduzindo-se o tempo de desenvolvimento e custos.

2.2 Processo de Desenvolvimento de Produtos

Karniel e Reich (2011) afirmam que o PDP é um processo complexo, dinâmico, iterativo e único; o mesmo apresenta um conjunto de etapas que possuem procedimentos destinados a transformar informações vindas de novas ideias, conceitos e oportunidades de mercado em especificações técnicas para a fabricação de um novo produto que será comercializado.

Para Jung et. al. (2009), os modelos de PDP são modelos amplos, que iniciam no planejamento estratégico do projeto, determinam o processo de gestão e desenvolvimento do produto e propõem o acompanhamento no mercado e descontinuidade do produto. Esses autores estudaram as características lineares e sistêmicas de 21 modelos de desenvolvimento de produto, selecionados entre diversos modelos propostos entre 1962 e 2006. Um dos resultados obtidos mostra que somente no modelo proposto por Rozenfeld et. al. (2006) foi identificada a característica sistêmica de adaptabilidade; isto é, que o modelo PDP seja adaptável às necessidades da empresa, sendo possível customizar as etapas propostas pelo modelo em função das particularidades da empresa.

Para Rozenfeld et. al. (2006) o desenvolvimento de produtos é considerado um processo de negócio cada vez mais crítico para a competitividade das empresas, principalmente pela internacionalização dos mercados, aumento da diversidade de produtos e redução do ciclo de vida desses produtos no mercado.

Dessa forma, o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) situa-se na interface entre a empresa e o mercado, ganhando grande importância estratégica no sentido de identificar as necessidades dos clientes em todas as fases do ciclo de vida do produto, considerando todas as possibilidades tecnológicas, de qualidade, de tempo e a um custo competitivo. Além disso, também deve ser assegurada a manufaturabilidade do produto desenvolvido, em termos de facilidade de produção e de atendimento às restrições de custos e de qualidade na produção (ROZENFELD et. al., 2006).

A representação do modelo PDP proposta por Rozenfeld et. al. (2006), que é o modelo de referência selecionado para este trabalho, está mostrada na Fig. (1). A seleção desse modelo foi feita considerando a análise desenvolvida por Paula e Mello (2013), na qual avaliam vários modelos de PDP para aplicar em uma empresa do setor de autopeças, resultando o modelo proposto por Rozenfeld et al. (2006) como o mais completo.

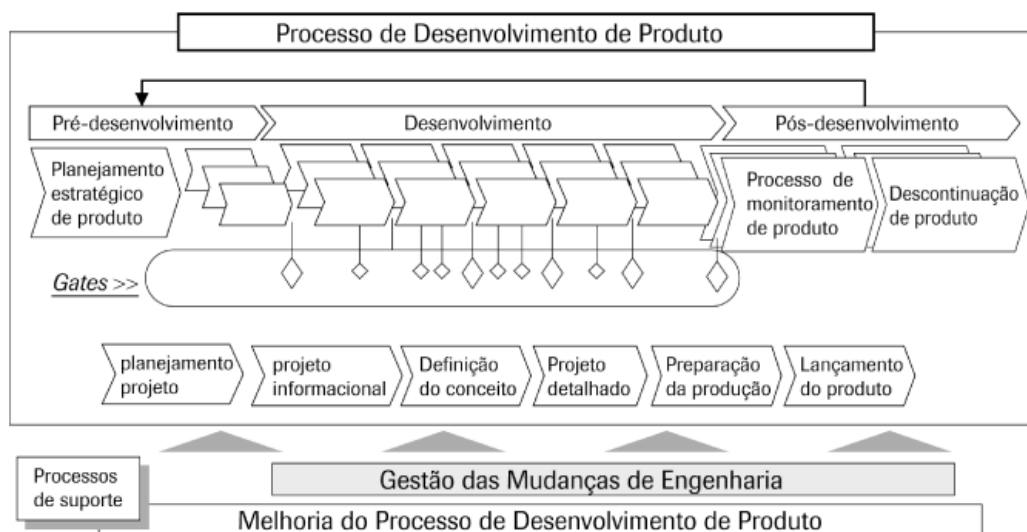


Figura 1. Visão geral do modelo de referência PDP. Fonte: Rozenfeld et. al. (2006).

Como apresentado na Fig. (1), o modelo PDP está dividido em três macro fases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. A primeira macro fase consiste no planejamento estratégico dos produtos e dos projetos, o objetivo é gerar ou revisar o portfólio de produtos da organização, a partir do Planejamento Estratégico da Unidade de Negócio (PEN), para definir novos projetos de produto. A segunda macro fase compreende cinco etapas: (i) Projeto informacional: definição dos requisitos do cliente, dos requisitos do produto, das especificações meta do produto e dos fornecedores, ciclo de vida do produto; (ii) Projeto conceitual: função global do produto, lista inicial de materiais, layout e estilo do produto, macroprocesso de fabricação, lista inicial de sistemas, subsistemas e componentes (SSC); (iii) Projeto detalhado: detalhamento dos SSCs, desenhos com tolerâncias, protótipo funcional, desenvolvimento de fornecedores, planejamento do processo de produção e montagem, otimização do produto e processo, planejamento do fim de vida do produto, projeto aprovado para desenvolvimento, homologação do produto; (iv) Preparação da produção do produto: recebimento e instalação de recursos, produção lote piloto, homologação do processo, otimização da produção e certificação do produto, treinamento dos funcionários, planejamento do marketing e (v) Lançamento do produto: desenvolvimento do processo de vendas, distribuição, atendimento do cliente, assistência técnica, marketing de lançamento, lançamento do produto. A macro fase de pós-desenvolvimento compreende duas fases: (i) Acompanhar produto/processo: avaliar satisfação do cliente, monitorar desempenho do produto (técnico, econômico, de produção e de serviços, realizar auditoria pós-projeto e registrar lições aprendidas e (ii) descontinuar produto: analisar e aprovar descontinuidade do produto, planejar a descontinuidade do produto, preparar o recebimento do produto, acompanhar o recebimento do produto, descontinuar a produção, finalizar suporte ao produto, avaliação geral e encerramento do projeto.

Além das macro fases que foram detalhadas, a estrutura do PDP também é composta por processos de apoio que se dividem em atividades de gerenciamento de mudanças de engenharia e melhoria incremental do processo.

2.3 Custos de Não Qualidade: a abordagem de Taguchi

Genichi Taguchi foi um engenheiro e estatístico japonês, que realizou uma abordagem inovadora para a sua época. Tradicionalmente, para que um produto fosse aceito, este deveria estar dentro de um intervalo de dimensões limites. Porém, de acordo com este conceito, dois produtos conformes, sendo um com dimensão próxima ao limite e outro com valor próximo ao valor de referência, não seriam distintos. Com isso, Taguchi propõe a utilização de valores precisos, onde um desvio deste valor pode gerar uma perda de qualidade.

Taguchi, Subir e Wu (2005) definem a perda de qualidade como “a perda que um produto custa à sociedade a partir do momento que ele é liberado para despacho. Perdas tais como falha na função, riscos à saúde, poluição, custos operacionais e custos de manutenção estão todos incluídos”. A partir dessa definição, Taguchi desenvolveu o conceito da Função-perda, uma função quadrática, que quantifica o impacto da não qualidade do produto através de valores monetários. O gráfico de comportamento desta função é ilustrado na Fig. (2) e tem a forma da Eq. (1):

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (1)$$

Sendo:

- y – valor da característica do produto;
- m – valor nominal da característica de qualidade;
- k – coeficiente de perda de qualidade.

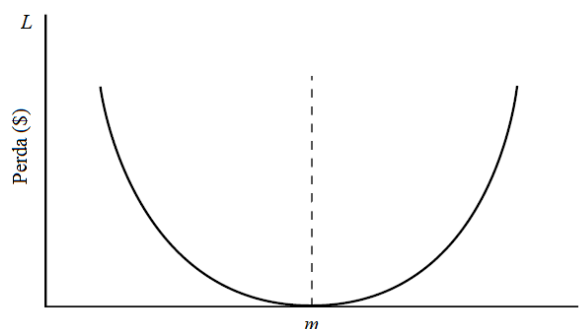


Figura 2. Função-perda de Taguchi.

Para se utilizar os conceitos da função-perda, é necessário definir a função por completo. Ao projetar um produto, parte-se do princípio de que o valor nominal da característica de qualidade (m) é conhecido. O valor da característica do produto (y) pode ser obtido por uma medição simples. Logo, é necessário apenas definir o valor do coeficiente de perda de qualidade (k).

A definição do fator (k) é simples. Com uma peça fora do valor nominal e sabendo o seu desvio, junto com a perda causada $L(y)$, pode-se determinar o valor do fator (k). Assim, toda a função é definida.

Diversos autores defendem a utilização do Método de Taguchi e apontam os seus benefícios. Petenate (1997) lista algumas vantagens de se aplicar o método de Taguchi, sendo elas: Reduzir a variabilidade funcional, e consequentemente reduzir a perda de qualidade; reduzir custos; reduzir o tempo de desenvolvimento do produto; atingir robustez.

Castro (2001) realiza algumas reflexões sobre o método. Segundo a autora, há um crescimento na aplicação do método, com diversos casos de sucesso. Destaca também a simplicidade e baixo custo na sua aplicação, tornando-o muito atrativo. Outro ponto, por se tratar de um método sistematizado, é acessível para não-estatísticos.

Para Almeida e Toledo (1989), o objetivo subjacente à proposta de Taguchi é a busca da máxima homogeneidade, com redução da variação de desempenho do produto durante o seu uso, bem como da variação entre unidades do produto, caminhando-se em direção ao valor nominal. Esse objetivo, de não apenas cumprir os limites de especificações, como tradicionalmente se faz, mas de alcançar o valor nominal a fim de reduzir as perdas, obviamente exige e leva a um contínuo processo de aperfeiçoamento da qualidade.

3. METODOLOGIA

O trabalho apresentado caracteriza-se como de natureza exploratória, pois objetiva a compreensão do aspecto teórico da temática de definição de tolerâncias dimensionais e ajustes considerando os custos de não qualidade, no contexto do PDP, permitindo um aprimoramento da visão sobre os parâmetros que impactam a variação dimensional e especificando um procedimento.

A forma de tratamento da problemática é predominantemente qualitativa, com a finalidade de identificar possíveis alocações das variáveis que impactam na variação dimensional dentro do modelo de referência PDP. O procedimento utilizado para obtenção dos dados foi essencialmente o levantamento bibliográfico de trabalhos pertinentes na área definida, seguindo as orientações de Gil (2002).

Neste estudo, foi realizada a coleta de dados que possibilitou a formulação do referencial teórico utilizando as bases de dados: *Science Direct*, *Scopus*, *Emerald*. A partir destas informações, foram definidos o resultado e a discussão, que tiveram como produtos: em primeiro lugar, a descrição e alocação de um conjunto de variáveis que relacionam a variação dimensional como as fases do modelo de referência de PDP adotado. Em segundo lugar, a proposta de um procedimento que considera os custos da não qualidade com base na variação dimensional. Esse procedimento foi testado em um exemplo teórico, através de uma ferramenta de simulação utilizando o software MATLAB.

4. RESULTADOS

4.1 Identificação de variáveis relacionadas com atividades de controle dimensional

Na primeira etapa do projeto, foi feito um levantamento bibliográfico para encontrar os parâmetros ou variáveis que impactam nas atividades de controle dimensional. A partir dos trabalhos publicados por Liggett (1993), Huang (1996), Sleath (1997), Craig (1997) e Cerqueira (2013) foi obtida a lista apresentada na Tab. (1):

Tabela 1. Variáveis levantadas na pesquisa.

No.	Variáveis definidas	Definição
1	Precisão das medidas dos componentes/conjunto	De acordo com a necessidade de tolerâncias mais apertadas, a sua fabricação exigirá operações de maior precisão, e consequentemente aumentando os custos envolvidos na obtenção das peças.
2	Precisão dos processos de fabricação	É necessário definir a precisão dos processos de fabricação para determinar as operações que serão utilizadas para a obtenção da peça.
3	Sequência dos processos de fabricação	Determinar a sequência dos processos é muito importante para definir as dimensões finais da peça, onde processos mais precisos serão feitos nas operações finais de obtenção da peça.
4	Sequência dos processos de montagem	Na sequência dos processos de montagem podem ocorrer restrições físicas, impedindo a sua devida montagem. Logo, é necessário prever essas possíveis restrições, evitando a alteração posterior do processo de montagem.
5	Máquinas disponíveis	Operações de fabricação possuem tempos diferentes de processo, onde operações mais lentas necessitam de uma disponibilidade de um maior número de máquinas.
6	Mudança de escopo	Caso o projeto sofra alterações durante a sua aplicação, haverá a necessidade de adaptação dos processos, possivelmente ocasionando em maiores custos.
7	Quantidade de peças a serem fabricadas	O número de peças a serem fabricadas é muito importante para a escolha dos processos de fabricação que serão utilizados para a obtenção de determinada peça, principalmente em termos de vida útil da ferramenta e de moldes.
8	Tipo de comunicação utilizada (Desenho técnico, <i>software</i> , etc)	A escolha correta do método de comunicação utilizada evita o entendimento equivocado das informações referentes ao processo.
9	Tempo disponível para a realização do projeto	O tempo disponível para a concepção do projeto pode influenciar no processo de análise de tolerâncias, pois, caso o prazo seja curto, será necessário aplicar as ferramentas mais rapidamente, aumentando os riscos de se realizar uma má gestão dimensional.
10	Custo total do produto/recursos disponíveis	Quanto mais apertada for a tolerância, maior será o custo para obtê-la. Caso os custos de obtenção das tolerâncias esteja muito alto, será necessário buscar alternativas para contornar o problema.
11	Número de operações de montagem e fabricação necessárias	Quanto maior for o número de operações que compõe a obtenção do produto, maior o número de verificações de tolerância.
12	Complexidade da geometria das peças	A complexidade das formas das peças pode dificultar a sua obtenção, podendo agregar custos maiores na sua produção.

Com as variáveis listadas (Tab. 1), foi possível fazer a relação delas com o modelo PDP. Assim, na Tab. (2) estão listadas as atividades ou etapas do PDP em que se pode aplicar o controle da variação dimensional e quais variáveis teriam influência em cada atividade.

Analisando o resultado apresentado na Tab. (2), nota-se que todas as atividades estão inseridas na macro fase de Desenvolvimento, mais especificamente nas fases de Projeto Conceitual e Projeto Detalhado do modelo PDP. Logo, chega-se à conclusão de que a gestão da variação dimensional está mais focada nessa macro fase, sendo pouco ou até mesmo não aplicada nas outras macro fases de Pré e Pós Desenvolvimento. No mesmo sentido, algumas variáveis são mais recorrentes do que outras, tendo uma presença maior.

Ainda analisando a Tab. (2), nota-se que não houve a utilização da sexta variável, correspondente a mudança de escopo. Mesmo que não foi detectada uma relação dessa variável dentro da macro fase de desenvolvimento do modelo PDP, para a proposta descrita neste trabalho, se faz necessário considerar essa variável, pois caso o projeto inicial sofra alterações, as mesmas terão impacto nas definições de geometria e processo de fabricação dos componentes do produto.

Tabela 2. Variáveis relacionadas com o modelo PDP.

Macro fase de Desenvolvimento (fases / atividades)	Variáveis definidas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Projeto Conceitual / Conceptual Design												
4.5 Definir arquitetura para o produto												
Identificar Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC)	X											X
Definir integração entre SSCs das alternativas de projeto	X											X
4.6 Analisar Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC)												
Identificar e analisar aspectos críticos do produto	X											X
Definir parâmetros principais (forma, materiais, dimensões e capacidades)	X											X
4.10 Planejar o processo de manufatura macro/Definir plano macro de processo	X	X	X	X			X	X			X	
Projeto Detalhado / Detailed Design												
5.2 Criar e detalhar SSCs, documentação e configuração												
Criar, reutilizar, procurar e codificar SSCs								X				
Calcular e desenhar SSCs	X							X				X
Especificar tolerancias	X							X				
Finalizar desenhos e documentos								X				
5.3 Decidir por fazer ou comprar SSC												
Levantar informações de custos, tempo, capacidades e competências para o desenvolvimento/fornecimento dos SSCs	X	X			X		X		X	X	X	X
Estimar os custos dos SSCs para a empresa	X	X			X		X		X	X	X	X
5.5 Planejar o processo de fabricação e montagem												
Planejar processo de fabricação macro	X	X	X				X	X	X	X	X	X
Planejar processo de montagem macro				X			X	X	X	X	X	X
Desdobrar parametros criticos dos componentes fabricados	X											X
Definir / Avaliar componente em bruto	X											X
Definir e Sequenciar operacoes		X	X	X			X				X	X
Selecionar / Especificar máquinas e equipamentos		X	X	X			X				X	X
Selecionar / Especificar pessoal e habilidades		X	X	X			X				X	X
Especificar fixacao		X	X		X		X					X
Selecionar / Especificar metodos		X	X	X								X
Selecionar / Especificar ferramental		X	X	X								X
Calcular sobremetal	X	X	X		X		X			X	X	X
Simular processo de fabricação	X	X					X				X	X
5.7 Avaliar SSCs, configuração e documentação do produto e processo												
Avaliar Tolerancia Analiticamente	X	X	X		X		X				X	X
5.8 Otimizar Produto e Processo												
Finalizar aplicacao DFx							X		X	X		
Ajustar tolerancia dos SSCs	X	X										X

Nota-se na Tab. (2) que as variáveis: (1: precisão das medidas dos componentes/conjunto), (2: precisão dos processos de fabricação), (3: Sequência dos processos de fabricação), (7: quantidade de peças a serem fabricadas) e (12: complexidade da geometria das peças) foram as mais utilizadas. Isso se deve provavelmente ao fato de serem variáveis diretamente vinculadas com as definições de tolerâncias geométrica e dimensional, que são a base de definição de qualquer processo de controle dimensional. A análise supracitada baseia-se apenas na contagem das vezes que a variável foi relacionada com uma atividade e não reflete a importância de cada uma delas.

Por outra parte, nota-se que a variável 6 (Mudança de escopo) não foi relacionada em nenhuma das etapas. Isso se deve ao fato de que a mesma não tem uma definição diretamente relacionada com o aspecto dimensional, porém, a aparição dessa variável em qualquer uma das etapas do PDP indica que haverá a necessidade de verificar a influência das mudanças de escopo sobre os aspectos dimensionais e de processo de fabricação das peças.

4.2 Adaptação da Função-perda de Taguchi

Para a utilização da função perda de qualidade de Taguchi na presente proposta, foram feitas adaptações na função original. A princípio, essa função não estabelece a diferença entre ultrapassar os limites superiores ou inferiores em relação ao valor nominal (m). No entanto, em uma aplicação real, independente do quanto a peça está longe desse valor nominal (m), se ela for descartada por estar fora dos limites de tolerância, o custo por passar do limite superior ou inferior pode ser diferente.

Tomando como exemplo um eixo, caso a dimensão ultrapasse o limite superior, ainda pode-se aproveitar a peça, retirando o material em excesso. No entanto, caso a peça esteja fora do limite inferior, esta não pode ser mais reaproveitada, sendo necessário descartá-la, implicando em custos maiores. Essa situação se inverte se a peça fabricada se tratar de um furo.

Assim, sugere-se a definição de custos de descarte por ultrapassar o Limite Superior, que seria referente aos custos envolvidos em operações para que a peça seja descartada ou reaproveitada. O mesmo se aplica para o caso em que a peça ultrapasse o Limite Inferior. Vale ressaltar que esses custos serão diferentes e o maior valor entre eles será definido pelo tipo e geometria da peça.

4.3 Obtenção dos custos de não qualidade

O objetivo desta proposta é obter um método em que se possa prever o comportamento ou impacto dos custos de não qualidade da fabricação dos produtos. No entanto, simular o processo sem ter nenhum parâmetro pareceu muito complicado, gerando um alto grau de incerteza. Assim, a recomendação é utilizar o método com base em dados históricos.

Para simular a fabricação, foi utilizada uma distribuição normal gaussiana. Essa escolha foi feita pois reflete a forma real em que os processos de comportam, conforme é mostrado por Novaski (2013). Para se definir uma distribuição gaussiana, são necessários dois parâmetros, média e desvio padrão. Esses parâmetros dificilmente podem ser previstos antes de iniciar a produção, assim, para a aplicação desse método, deve-se realizar alguns testes de produção para se obter esses parâmetros. Com esses valores definidos, pode-se definir completamente a distribuição normal e assim simular a fabricação das peças.

A ferramenta para simulação do método foi desenvolvida no *software* MATLAB. Para a utilização do método, primeiro é preciso fornecer os parâmetros de entrada. Esses parâmetros são: Média e desvio padrão do processo; valor nominal; Limite Superior e Limite Inferior obtidos no projeto; Coeficiente de perda de qualidade (k); custos das peças fora dos limites da tolerância; Número de simulações desejadas. As etapas que compõem o procedimento estão descritas no fluxograma mostrado na Fig. 3.

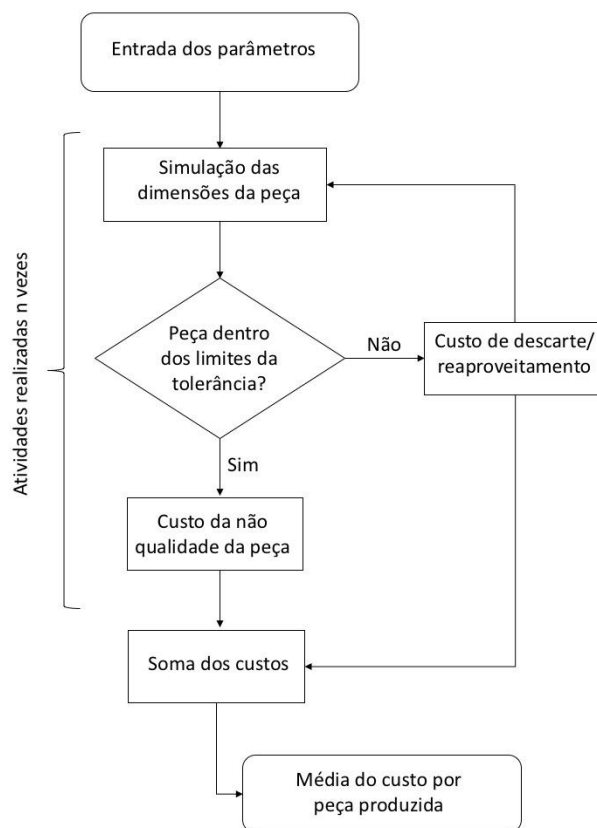


Figura 3. Fluxograma do procedimento elaborado.

4.4 Exemplo de aplicação do método

Para a entrada dos dados de fabricação, não foi possível encontrar dados reais, já que consiste em dados sigilosos de empresas, que não são divulgados frequentemente. Portanto, os dados de entrada apresentados neste trabalho são apenas exemplos de como a ferramenta funcionaria.

Como exemplo, o método será aplicado no seguinte conjunto, mostrado na Fig. (4), obtida de Novaski (2013).



Figura 4. Conjunto de peças montadas.

As dimensões são as seguintes:

$$\begin{aligned} A &= 75,0 \pm 0,050 \text{ mm} \\ B &= 150,0 \pm 0,100 \text{ mm} \\ C &= 100,0 \pm 0,080 \text{ mm} \end{aligned}$$

A dimensão nominal de D é a soma dos três componentes. Os dados de entrada foram estimados, servindo apenas para realizar a simulação. A Tab. (3) mostra o conjunto de dados utilizados. O custo de descarte se refere a aquelas peças que estão abaixo do limite inferior e devem ser descartadas. Já o custo de reaproveitamento são as peças que sofrerão retrabalho, porém poderão ser reaproveitadas.

Como pode-se observar na Tab. (3), foram feitas 10.000 simulações. Esse valor foi obtido após alguns testes com a ferramenta desenvolvida. Esses testes consistiram em determinar um número de simulações de fabricação e simular algumas vezes o programa. Caso os resultados fossem os mesmos, pode-se concluir que o número de simulações estava condizente. Assim, observou-se que os resultados obtidos com um número pequeno de simulações de fabricação (entre 10 e 100) era muito disperso. Com o aumento de simulações, os resultados foram convergindo, onde um número de 10.000 foi considerado coerente.

Tabela 3. Parâmetros de entrada do método.

Parâmetro	Valor
Número de simulações	10.000
Valor Nominal de A (mm)	75,000
Limite Superior de A (mm)	75,050
Limite Inferior de A (mm)	74,950
Média do processo de A (mm)	75,002
Desvio padrão do processo de A (mm)	0,0185
Custo de reaproveitamento da peça A (unidades de \$)	8
Custo de descarte da peça A (unidades de \$)	10
Valor Nominal de B (mm)	150,000
Limite Superior de B (mm)	150,100
Limite Inferior de B (mm)	149,900
Média do processo de B (mm)	150,001
Desvio padrão do processo de B (mm)	0,037
Custo de reaproveitamento da peça B (unidades de \$)	13
Custo de descarte da peça B (unidades de \$)	15
Valor Nominal de C (mm)	100,000
Limite Superior de C (mm)	100,080
Limite Inferior de C (mm)	99,920
Média do processo de C (mm)	100,005
Desvio padrão do processo de C (mm)	0,0296
Custo de reaproveitamento da peça C (unidades de \$)	10
Custo de descarte da peça C (unidades de \$)	12
Coefficiente da perda de qualidade (k) (unidades de \$/mm ²)	1.000

Assim, rodando a simulação, chegou-se aos seguintes resultados, mostrados na Tab. (4). Logo, após realizar a simulação, obteve-se o custo da não qualidade por peça produzida.

Tabela 4. Resultados obtidos na simulação dos parâmetros de entrada.

Parâmetro	Valor
Peças A fora da tolerância	0,76%
Peças B fora da tolerância	0,71%
Peças C fora da tolerância	0,78%
Custo da não qualidade por conjunto (unidades de \$)	2,7411

Na Tab. (4), os valores em porcentagem se referem às peças fabricadas e que estavam fora do intervalo de tolerância definido, necessitando serem descartadas ou reaproveitadas, consequentemente envolvendo maiores custos na produção do produto.

A diferença entre os valores de peças descartadas se deve ao desvio padrão do processo de fabricação de cada peça. Portanto, quanto menor for o desvio padrão do processo, menor será o valor de peças descartadas.

Já o último valor apresentado na Tab. (4), refere-se ao custo da não qualidade por conjunto produzido. Por se tratar de um exemplo, não ser especificado o valor monetário utilizado e o custo de produção aceitável varia de acordo com cada fabricante, não se pode concluir se o resultado obtido é aceitável ou não, cabendo à empresa avaliar se os custos estão coerentes com os seus objetivos.

Para avaliar como a alteração do processo impacta no custo da não qualidade, foi simulado o programa com os mesmos parâmetros de custo, porém variando os valores do processo, modificando o desvio padrão. Assim, foi simulado um desvio padrão 25% maior e 25% menor, onde os dados obtidos estão mostrados na Tab. (5).

Tabela 5. Resultados obtidos na simulação para comparação.

Parâmetro	Diminuição de 25% do desvio padrão	Aumento de 25% do desvio padrão
Peças A fora da tolerância	0,04%	3,24%
Peças B fora da tolerância	0,04%	3,17%
Peças C fora da tolerância	0,04%	3,34%
Custo da não qualidade por conjunto (unidades de \$)	1,5238	4,4652

Usando os parâmetros da Tab. (4) como referência e comparando com os resultados da Tab. (5), pode-se notar que a variação do desvio padrão causado por alterações no processo possui uma grande influência nos resultados do custo da não qualidade e das peças produzidas fora de tolerância. Assim, é possível definir os custos da não qualidade por peça produzida.

As informações dadas pelo método podem ser úteis no desenvolvimento do produto, a fim de diminuir os custos de produção. Sabe-se que aumentando a precisão do processo, consequentemente a perda da não qualidade seria menor, já que mais peças ficariam próximas do valor nominal. Porém, Umaras (2010) descreve que a função custo aumenta continuamente com o aumento da precisão das tolerâncias. Assim, deve-se balancear os dois fatores, com o objetivo de se minimizar o custo total envolvido no produto. Como os custos de fabricação dependem de vários fatores, essa análise é única para cada fabricante.

5. CONCLUSÃO

Com a identificação das variáveis que podem impactar o controle dimensional no processo de desenvolvimento de produtos (PDP) e com a proposta de método para obtenção dos custos da não qualidade, pode-se afirmar que a proposta deste trabalho pode auxiliar fabricantes a encontrar um valor ótimo de mínimo custo, com uma baixa necessidade de recursos, se tornando uma ferramenta muito acessível.

Pode-se também interpretar a metodologia obtida como um complemento às técnicas de Controle Estatístico do Processo, incluindo o Método de Taguchi e os conceitos que envolvem ele, caminhando para uma análise mais próxima da realidade.

6. AGRADECIMENTOS

O projeto em questão foi financiado pelo CNPq através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), sendo apoiado pela Pró-reitoria de Pesquisa da Universidade Estadual de Campinas.

7. REFERÊNCIAS

Almeida, H. S. De; Toledo, J. C. Método Taguchi: qualidade voltada para o projeto do produto e do processo, Revista de Administração, v. 24, n. 4, p. 62-68, São Paulo, 1989.

- Castro, P. M. Taguchi's method: Quality control with a non-conventional use of design of experimentes (DOE), Instituto Português de Administração de Marketing (IPAM). Lisboa, 2001.
- Cerqueira, R. C.; Passos, F. U. Design for Dimensional Control in Product Development - A management application at a Brazilian Automotive Industry plant. 2013.
- Craig, M. Colloquium of Control of Dimensional Variation, Birmingham – UK. Dimensional Management: a Necessary Process to Meet Corporate Goals for Global Competition, 1997.
- Fonseca, F. E. A.; Rozenfeld, H. Medição de desempenho para a gestão do ciclo de vida de produtos: uma revisão sistemática da literatura. Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v.12, n. 1, p. 159-184, jan./mar. 2012.
- GIL, A. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4 ed. Atlas, São Paulo, 2002. 175 p
- Huang, G.Q. Design for X: Concurrent Engineering Imperatives. London – UK: Editora Chapman & Hall, 1996.
- Jung, C. F.; Caten, C. S.; Echeveste, M. E.; Ribeiro, J.L. Análise estrutural e síntese das características lineares e sistêmicas de modelos de desenvolvimento de produto. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 9, n. 12, p. 103-114, jan./jun. 2009.
- Novaski, O. Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica, 2ª edição, São Paulo, Blucher, 2013.
- Leaney, P. G. Design for Dimensional Control. In Design for X – Concurrent Engineering Imperatives (Ed. G.Q. Huang), pp. 173-195. London – UK: Editora Chapman & Hall, 1996.
- Liggett, J. V. Dimensional Variation Management Handbook: a guide for quality, design, and manufacturing engineers. New Jersey – USA: Prentice Hall, 1993.
- Paula, J. O.; MELLO, C. H. P. Seleção de um modelo de referência de PDP para uma empresa de autopeças através de um método de auxílio à decisão por múltiplos critérios. Produção, São Paulo, v. 23, n.1, p. 144-156, mar. 2013.
- Petenate, A. J. Utilização do Método de Taguchi na redução de custos de projeto. In: IV Congresso Internacional de Custos e II Congresso Brasileiro de Gestão Estratégica de Custos, Campinas, 1997.
- Ricci, F.; Bedolla, J. S.; Gomez, J. M.; Chiabert, P. PMI: a PLM Approach for the Management of Geometrical and Dimensional Controls in Modern Industries. p. 1, 2014. Computer-Aided Design and Applications, v. 1, n. 1, 2014.
- Rozenfeld, H; Forcellini, FA; Amaral, DC; Toledo, JC; Silva, SL; Alliprandini, D H; Scalice, RK. Gestão de Desenvolvimento de Produtos. 1. ed., São Paulo: Editora Saraiva; 2006. 542p.
- Sleath, D.; Leaney, P. Colloquium of Control of Dimensional Variation, Birmingham – UK. Control of Dimensional Variation and Integrated Product Development, 1997.
- Umaras, E. Tolerâncias Dimensionais em Conjuntos Mecânicos: Estudo e Proposta para Otimização. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, 2010.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

A PROPOSED PROCEDURE FOR DETERMINING DIMENSIONAL TOLERANCES AND ADJUSTMENTS CONSIDERING THE COSTS OF NON-QUALITY

Guilherme Akio Oi, guiaoi95@gmail.com¹
Robert Eduardo Cooper Ordoñez, cooper@fem.unicamp.br¹
Rosley Anholon, rosley@fem.unicamp.br¹

¹Department of Manufacturing and Materials Engineering, School of Mechanical Engineering, University of Campinas - UNICAMP. 13083-860, Campinas, SP, Brazil.

Abstract: *With the beginning of the transformations in the industry and the focus on the reduction of costs of non-quality, there was an increase in the requirement in the definition of geometric and dimensional tolerances of the products, impelling a methodical study of them. Although there are tools such as the Design for Dimensional Control (DDC), there is an inadequacy in the form of the treatment of the specification of tolerances and the determination of adjustments during the product design phase in most companies, without a specific or simple use method that considers it. This work intends to identify in which phases of the product development process the dimensional control is inserted, with the intention of proposing a procedure that identifies the parameters that impact on the specification of tolerances and adjustments in this process and at the same time consider the analysis of non-quality costs resulting from dimensional variation.*

Keywords: *Dimensional control, dimensional variation, non-quality costs, product development process.*