



# A REVISÃO DO PROCESSO EM V: COMO APLICAR OS RESULTADOS DOS MODELOS COMPUTACIONAIS DE DINÂMICA VEICULAR NA PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Thiago B. Murari<sup>1,2</sup>, Marcelo A. Moret<sup>1</sup> e Gilney F. Zebende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SENAI CIMATEC  
<sup>2</sup>Ford Motor Company

E-mails: [thiogomurari@hotmail.com](mailto:thiogomurari@hotmail.com), [mamoret@gmail.com](mailto:mamoret@gmail.com), [gfzebende@hotmail.com](mailto:gfzebende@hotmail.com)

## RESUMO

É crescente a quantidade e variedade de modelos computacionais que auxiliam a engenharia a desenvolver novos produtos. Estes modelos são utilizados durante várias fases do desenvolvimento de produto e seus resultados são aplicados na melhoria dos componentes e sistemas que fazem parte de um veículo automotor. Os modelos de dinâmica veicular são largamente utilizados pela indústria para definir as tolerâncias geométricas e dimensionais dos elementos de cada componente de um sistema de suspensão. Como é possível utilizar os resultados destes modelos computacionais criados no desenvolvimento de produto para auxiliar a resolução dos problemas provenientes da variação dimensional durante a fabricação? A revisão e documentação do projeto, uma fase importante e por vezes omitida, suporta a engenharia de manufatura nas melhorias dos seus resultados com o uso de gráficos e tabelas para explicar as variações dimensionais encontradas e manter o processo sobre controle. Por isto é importante utilizar um processo de revisão estruturado para avaliar os fatores que mais contribuem para a variação dimensional e que suporte o uso prático destes modelos no dia a dia da produção.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento da capacidade de processamento computacional disponível torna possível a adição de mais complexidade aos modelos analíticos [1]. 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 a dinâmica de veículos automotores.

A dinâmica veicular pode ser dividida em dois níveis: o empírico e o 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, que é dividido em nove fases [2]:

1. Objetivo (*Aspiration*): Definição dos objetivos a serem alcançados. Por exemplo: ter o sistema de direção mais confortável do mercado.
2. Definição (*Definition*): Definir um valor mensurável para que seja possível determinar se a pretensão foi alcançada. Ao final desta etapa deve-se ter uma descrição clara de sucesso e falha.
3. Análise (*Analysis*): Geralmente existe mais de uma forma de conseguir a solução do sistema, pela combinação de subsistemas e componentes. Durante esta etapa algumas decisões terão que ser tomadas sobre quais combinações são preferidas, baseado na pretensão. Um mapa do escopo pode ser desenvolvido e servir de guia para a tomada de decisões.
4. Decomposição (*Decomposition*): Decompor o sistema em subsistemas ou componentes e atribuir objetivos como custos, desempenho e peso.
5. Síntese (*Synthesis*): Criar as peças e subsistemas, geralmente com o auxílio de computadores para validar se os objetivos individuais estão sendo atingidos. Exemplos desta etapa são verificações de esforços em pontos específicos do componente ou simulação da cinemática da suspensão.
6. Composição (*Composition*): Montar o sistema para uma simulação completa, porém com um nível de confiança muito maior para cada componente individual.
7. Simulação (*Simulation*): Muitas vezes referida como prototipagem virtual, a fase de simulação é a utilização de modelos computacionais para prever o comportamento do sistema completo e seus contribuidores. Alguns modelos preparados para os subsistemas na fase de síntese são reutilizados na simulação.
8. Confirmação (*Confirmation*): Testes em veículos reais devem ser efetuados para a correta aprovação do modelo virtual. Este estágio não deve apresentar surpresas, já que mudanças costumam ter um elevado custo após a construção de protótipos físicos.
9. Revisão (*Review*): Muitas vezes omitida, na fase de revisão deve-se questionar os resultados obtidos. O que foi bem executado? O que poderia ser melhor? Quais as tecnologias que poderiam ser empregadas no sistema? Documentar esta fase permite poupar recursos durante o desenvolvimento da nova geração de produtos.

Existe a necessidade de documentar a fase de revisão não somente para aplicar em novos produtos mas também para melhorar os resultados da produção, com atuação imediata sobre os problemas que ocorrem durante a produção. O objetivo é reagir rapidamente aos problemas relacionados com variação dimensional sem ter que recorrer a projetos dispendiosos e controles que encarecem a produção.

## 2. METODOLOGIA

O Processo em V foi aplicado no desenvolvimento de um sistema de suspensão veicular, com foco na obtenção dos resultados de tendência direcional do veículo. Autores importantes, [2] e [3], que tratam de dinâmica veicular descrevem a necessidade e importância do alinhamento de rodas dianteiras e traseiras em veículos automotores. Para assegurar a dirigibilidade e estabilidade direcional do veículo, as montadoras incluem tolerâncias aos valores nominais para eixos dianteiros e traseiros [3]. As variações permitidas no alinhamento de roda somado as variações dimensionais provenientes da fabricação dos pneus produzem forças e momentos no contato entre este e a pista. Os efeitos destas forças e momentos podem ser percebidos pelo consumidor quando o veículo está em movimento. Um destes efeitos é o Torque de Alinhamento Residual do Veículo (VRAT), definido como o valor médio do torque requerido no volante para dirigir em linha reta [4].

O objetivo do modelo é garantir que o consumidor não tenha a percepção de que o veículo esteja desalinhado e a meta a ser atingida neste projeto é um valor nominal e limites de especificação para VRAT de  $0 \pm 0.50$  Nm. O veículo utilizado foi baseado em um carro compacto com suspensão Macpherson na dianteira e barra de torção, também chamada de Twist Beam, na traseira. Essa configuração de suspensão cobre grande parte dos veículos com plataforma de baixo custo desenvolvidos atualmente.

VRAT pode ser calculado como uma função de vários fatores. Basicamente, deve-se utilizar nos cálculos fatores que influenciam na diferença de forças que atuam sobre os pneus do lado esquerdo e direito. É possível dividir estes fatores em carroceria, pneu e externo. Os fatores relacionados com a variação dimensional da carroceria são Cross Camber e Cross Caster. Os fatores relacionados com a variação dimensional do pneu são Conicidade e PRAT. Existe um fator externo que não é possível de ser controlado, porém influencia diretamente no resultado de VRAT: a Inclinação da Pista (Figura 1) [5].

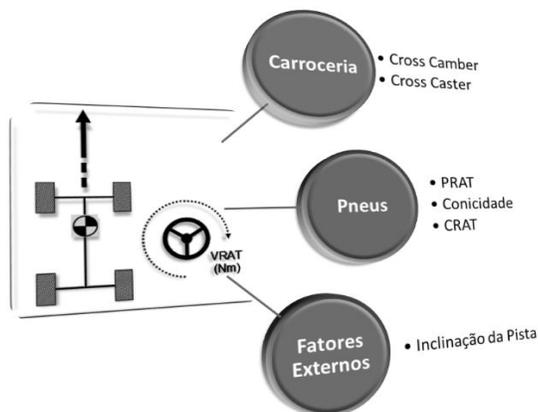


Figura 1: Fatores utilizados para simular o VRAT. Fonte: Os autores.

Camber é ângulo da roda relativo ao eixo vertical, visto da frente ou da traseira do veículo e Cross Camber é diferença entre os ângulos de Camber do lado direito e esquerdo das rodas do veículo. Caster é ângulo em que o eixo de giro do pneu é inclinado para frente ou para trás da vertical, quando se avalia o veículo lateralmente e Cross Caster é diferença entre a medição de Caster do lado direito e esquerdo das rodas

do veículo. A Conicidade do pneu é a força lateral gerada nos pneus pela inclinação da banda de rodagem em relação ao eixo de giro da roda, que não muda de sentido em relação à face do pneu devido à mudança de direção da rotação. CRAT é momento criado no eixo que passa longitudinalmente no centro do pneu do veículo, resultante da força lateral gerada pela conicidade no contato do pneu com o solo. PRAT se refere ao momento gerado pela força do plysteer (força lateral gerada pelo pneu devido as variações e assimetrias na armação, ou carcaça, do pneu) no centro de rolagem do veículo.

Durante a síntese do sistema utilizou-se um modelo estocástico com o método de monte carlo para validar Cross Camber e Cross Caster. Este modelo contém as informações geométricas e dimensionais referentes ao projeto detalhado de cada um dos componentes e também a sequência de montagem do produto [6]. Os resultados obtidos aprovam os sistemas de tolerância geométrica e dimensional para os componentes (Figuras 2 e 3).

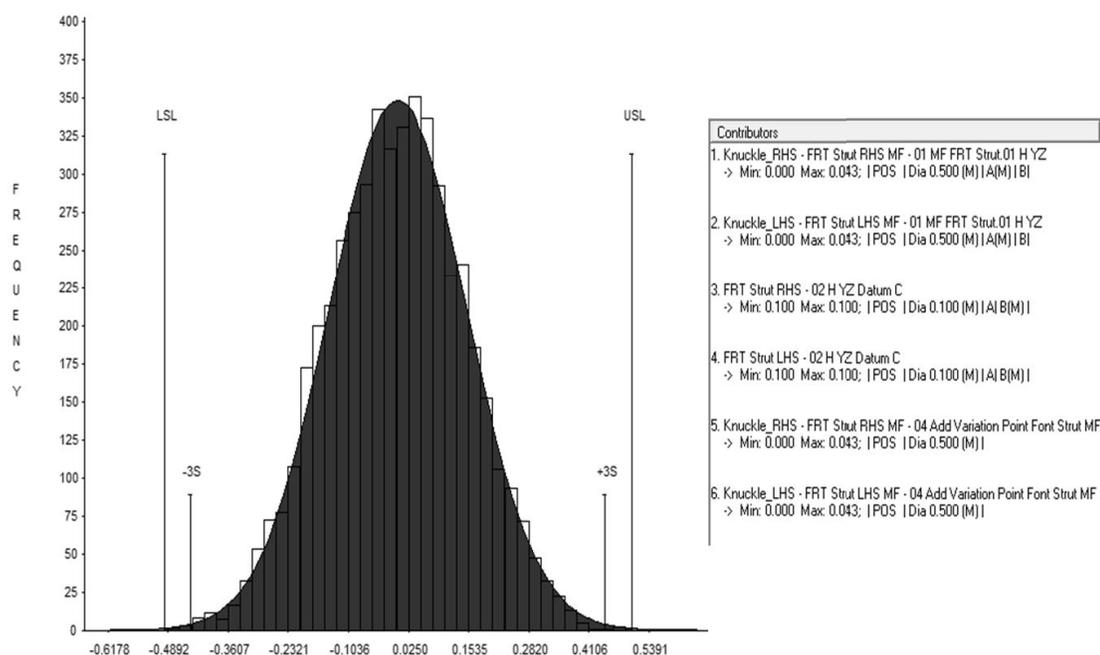


Figura 2: Curva de distribuição e principais fatores que contribuem para a variação de Cross Camber. Fonte: Os autores.

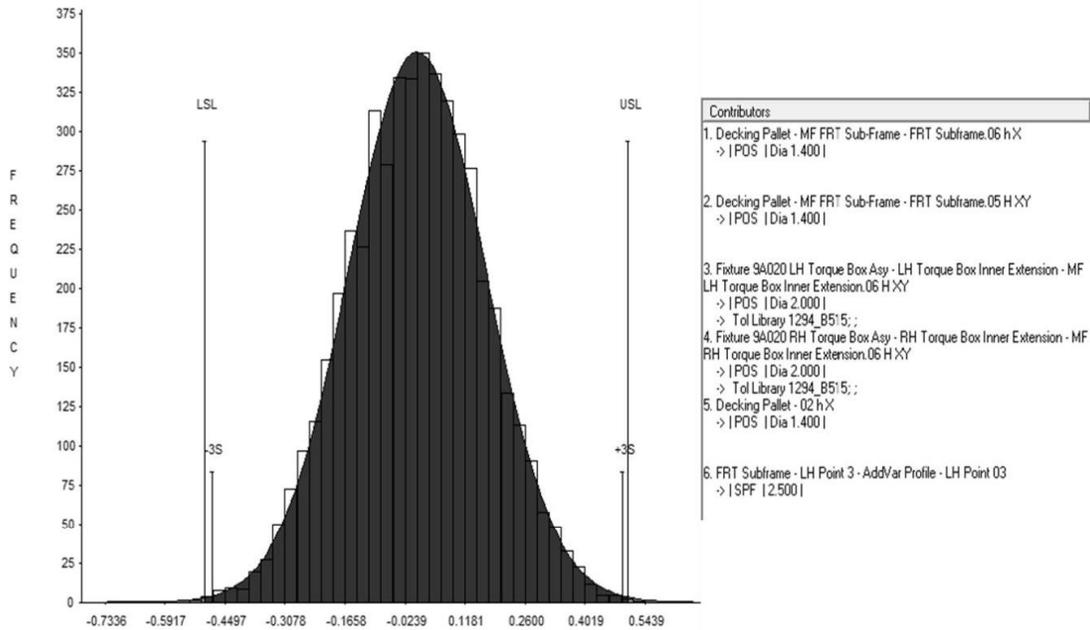


Figura 3: Curva de distribuição e principais fatores que contribuem para a variação de Cross Caster. Fonte: Os autores.

Um modelo multicorpos de análise dinâmica foi utilizado durante a fase de composição e simulação do processo em V. Com o resultado obtido na simulação foi possível calcular a variação esperada de VRAT para o veículo em estudo (Figura 4).

Após a confirmação do modelo com testes em protótipos e ajustes, deve-se iniciar a revisão do projeto e garantir que os ganhos alcançados durante o projeto sejam alcançados e mantidos durante a produção do veículo.

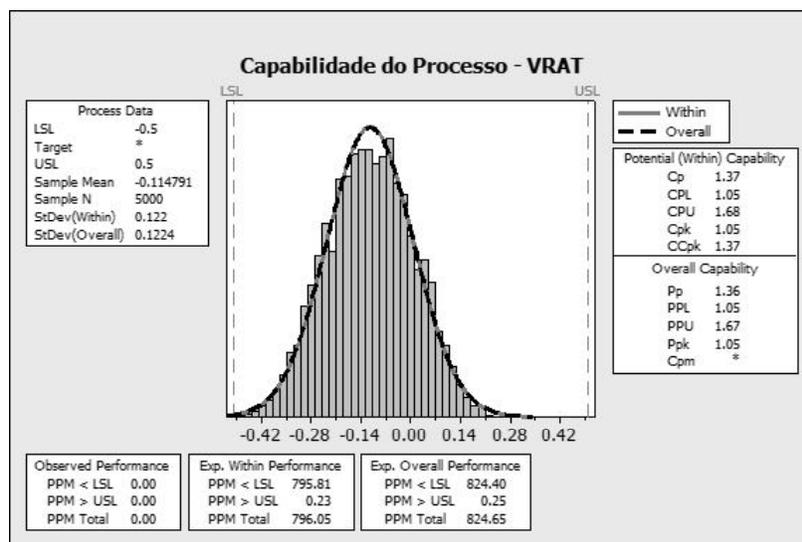


Figura 4: Curva de distribuição de VRAT. Fonte: Os autores.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do Processo em V é possível verificar e validar o projeto de suspensão e carroceria, incluindo a geometria e as tolerâncias de fabricação e montagem de cada uma das peças que compõem o sistema. A Engenharia de Processo deverá receber a DFMEA e os desenhos com tolerâncias de peças e conjuntos para desenvolver o processo de fabricação e montagem, e também determinar quais serão as características críticas e significativas do processo.

O modelo computacional pode auxiliar no desenvolvimento de planos de ação com gráficos e novos modelos que facilitem o acompanhamento e a tomada de decisões na produção. A Revisão do projeto, várias vezes omitida [2], passa a ser importante para garantir que os ganhos adquiridos durante o projeto do sistema sejam alcançados na produção do veículo. As Engenharias de Produto e Processo devem formar um time interdisciplinar no intuito de aproveitar ao máximo as informações geradas nesta etapa para gerar um plano robusto. O fluxo de processo apresentado na Figura 5 pode ser utilizado para assegurar que a Revisão seja aplicada efetivamente na obtenção da qualidade do produto.

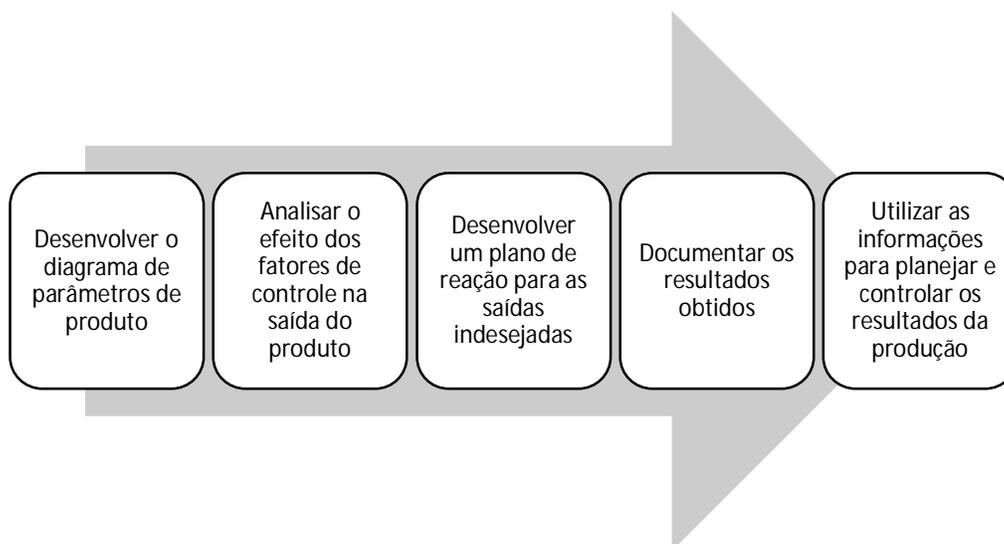


Figura 5: Etapas para aplicar a Revisão com foco na produção. Fonte: Os autores.

Para visualizar como os fatores afetam o resultado e, desta forma, desenvolver o plano de ação, é necessário o desenvolvimento do Diagrama de Parâmetros, conforme a Figura 6. No centro do diagrama está o produto ou processo em questão. Na esquerda estão as entradas e no lado direito, a saída desejada e as saídas indesejadas. A parte superior é composta pelos fatores de controle e a inferior pelos ruídos no sistema. Nesta fase do projeto é indicado um Diagrama de Parâmetros do produto. Posteriormente a Engenharia de Processos deverá desenvolver diagramas para cada um dos processos de fabricação dos componentes e desta forma fechar o ciclo de desenvolvimento. Posteriormente será necessário entender como os fatores de controle afetam a saída, e com isto determinar quais são os mais importantes do ponto de vista da variação dimensional.

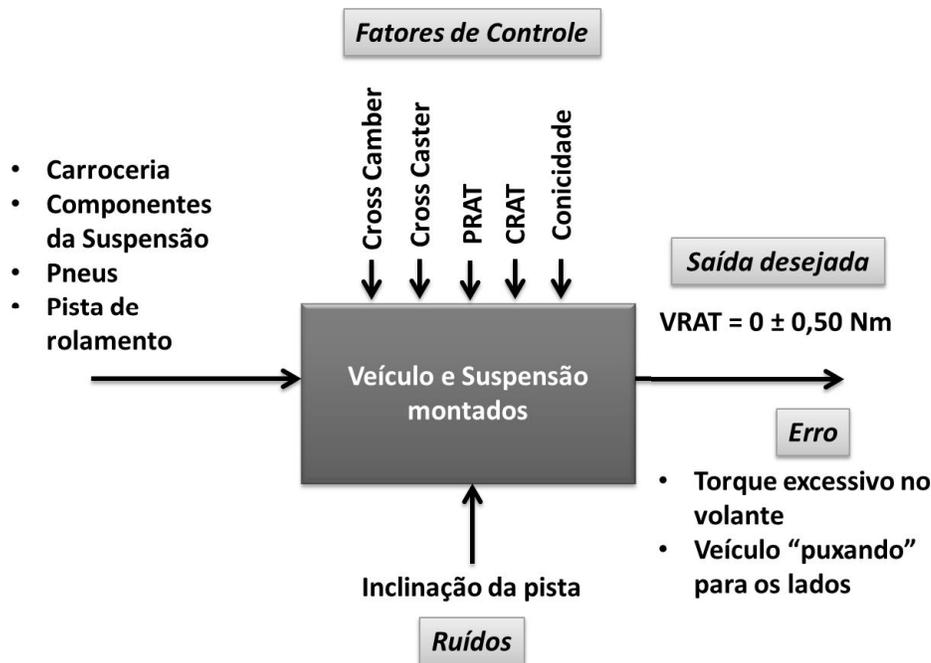


Figura 6: Diagrama de parâmetros para VRAT. Fonte: Os autores.

Os fatores de controle podem ser divididos em duas categorias: carroceria e pneus (Figura 1). Como os pneus que serão montados nos veículos são entregues para as montadoras por fornecedores especializadas na fabricação destes componentes, é importante exigir o controle estatístico das características importantes (PRAT, CRAT e Conicidade) para aceitar recebimento de cada lote. Por este motivo, os efeitos destes fatores já estão contemplados no cálculo da curva de distribuição de VRAT e não necessitam de uma análise mais profunda. As montadoras são responsáveis pela montagem da carroceria e algumas vezes pela fabricação de componentes da suspensão, e por este motivo é interessante desenvolver o estudo de Cross Camber e Cross Caster. Para efetuar esta análise, utilizou-se o delineamento de experimentos. Foram geradas mil iterações aleatórias e os fatores foram ajustados de acordo com a especificação do veículo, exceto para o desvio padrão de Cross Camber e Cross Caster, ajustados para terem seus limites variando individualmente entre  $0^\circ$  e  $1^\circ$  para cada uma destas estimativas. Os limites de tolerância utilizados nestes fatores extrapolam as recomendações de engenharia. Este fato tem relação com a possibilidade que a manufatura tem de entregar o produto com diferentes variações ao longo do tempo, ocasionadas tanto por causas comuns quanto causas especiais. Estas 1000 iterações aleatórias foram usadas como estimativas iniciais e para cada uma delas foram aplicadas uma simulação de Monte Carlo com 200 iterações, num total de 200.000 iterações, simuladas para gerar gráficos da relação entre a variação natural de Cross Camber e Cross Caster e o desvio padrão do VRAT (Figura 7).

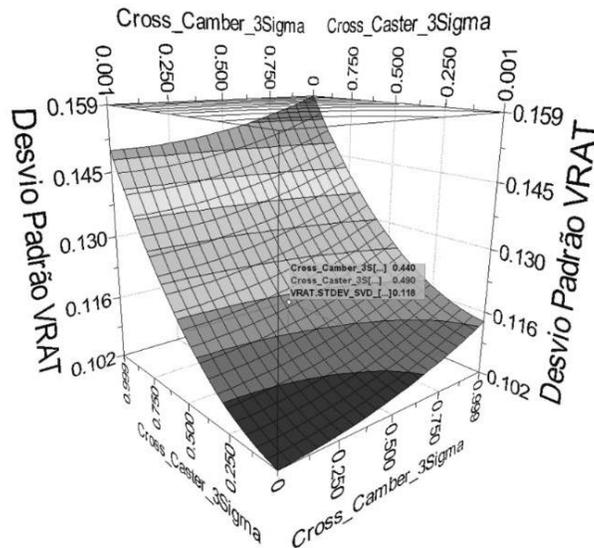


Figura 7: Efeito da variação natural de Cross Camber e Cross Caster simultaneamente no desvio padrão do VRAT. Fonte: Os autores.

Além do cálculo das curvas de distribuição para os Cross Camber e Cross Caster, também é possível simular com o modelo estocástico os principais fatores que contribuem para a variação. Os principais contribuidores da variação proveniente da carroceria do veículo são as tolerâncias da coluna telescópica e da junta articulada tolerâncias no quadro e a capacidade de localização do dispositivo de montagem da suspensão na estrutura do veículo, além da posição de uma peça estrutural que afeta na localização do quadro da suspensão (Figuras 2 e 3).

Com os dados de variação e gráficos desenvolvidos é possível criar um Plano de Reação, que consiste no planejamento de ações corretivas necessárias para evitar a produção de veículos defeituosos. O importante é reagir nas primeiras etapas do processo, e assim evitar que peças ou montagens defeituosas passem para a próxima etapa e o veículo seja produzido com um valor de VRAT fora do especificado, aumentando os custos devido ao retrabalho ou descarte de componentes ou até mesmo reduzindo a satisfação do cliente. O custo com a má qualidade é proporcional a etapa em que o defeito foi encontrado: caso o defeito seja encontrado nas etapas iniciais do processo o custo será menor (Figura 8).





Figura 8: Custos com a má qualidade do VRAT. Fonte: Os autores.

O Controle Estatístico de Processo, ou CEP, deve ser utilizado para reduzir o custo com o controle dimensional dos componentes e conjuntos envolvidos e será o indicador de quando se deve agir no processo. O CEP é um conjunto de ferramentas que possibilitam monitorar a variação de um processo. Com estas ferramentas é possível fazer uma descrição detalhada do comportamento do processo, identificar suas fontes de variabilidade ao longo do tempo, analisar e tratar as causas especiais responsáveis pelas instabilidades do processo (Figura 9) [7].

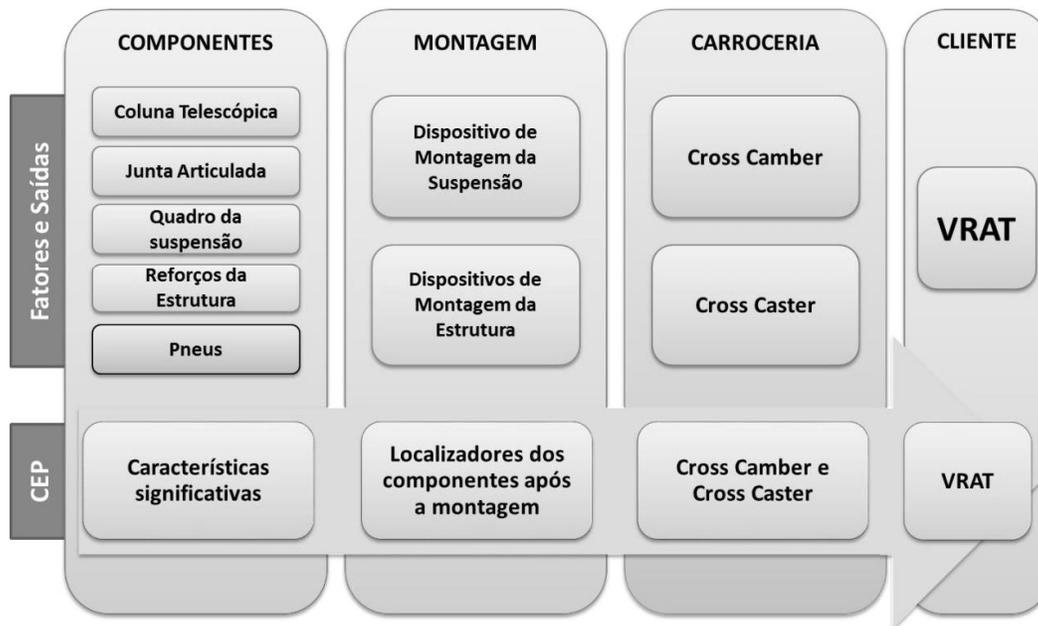


Figura 9: Fatores a serem considerados para o CEP. Fonte: Os autores.

Nesta etapa, além dos fatores de carroceria, devem ser definidas ações para as características significativas do produto relativas aos pneus. O plano consiste no que é necessário controlar para cada componente ou conjunto e quais as ações necessárias para retornar o processo para a condição de controle e dentro dos parâmetros especificados.

Finalmente, é possível criar um gráfico para avaliar o VRAT em relação a Cross Camber e Cross Caster durante a produção dos veículos (Figura 10). Para facilitar o entendimento e uso do gráfico, o gráfico da Figura 7 foi planejado. Além disto, determinou-se um valor máximo para considerar o carro aprovado ou rejeitado. Especificamente para este veículo o limite foi a própria variação natural simulada para VRAT, que é 0,37 Nm. Esta decisão foi tomada baseado no conceito de que a curva já está deslocada para a esquerda, estatisticamente comprovado pelo valor de Cpk de 1,05 (Figura 4), e um desvio padrão maior no VRAT poderia produzir carros fora do especificado.

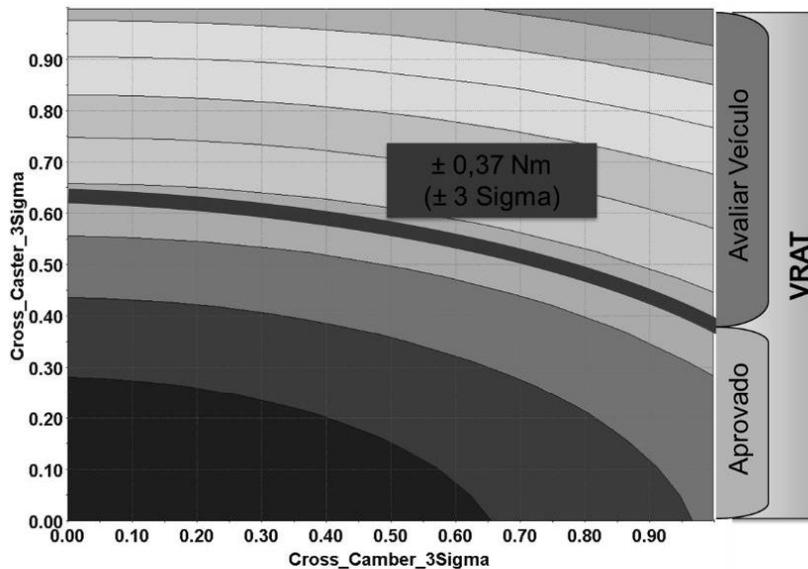


Figura 10: Gráfico para avaliação de VRAT desenvolvido para a produção. Fonte: Os autores.

A avaliação combinada do CEP para Cross Camber e Cross Caster asseguram que o veículo não terá problemas com desgaste prematuro de pneus além do torque excessivo no volante [3], e é facilmente verificada pela engenharia de produção.

A documentação deve ser clara e objetiva, para facilitar o desenvolvimento do FMEA de Processo e do Plano de Controle Dimensional.

#### 4. CONCLUSÃO

A Revisão, fase que as indústrias em geral não utilizam de todo seu potencial, complementa o Processo em V e auxilia a Engenharia de produto a transmitir toda informação necessária para assegurar que sejam utilizadas pelo Engenharia de Processo e consequentemente suportar melhorarias na qualidade do produto fabricado.

Os modelos computacionais utilizados no desenvolvimento de produto têm enorme potencial para utilização dos seus resultados na inovação da resolução de problemas de manufatura, principalmente quando os resultados de simulações dinâmicas (VRAT) são convertidos em tabelas e gráficos de fatores estáticos, como Caster e Camber. A partir do Plano de Reação, a Engenharia de Processo pode planejar as etapas de protótipo, acompanhar as medições das características significativas e validar a produção, além de atuar rapidamente caso alguma característica esteja fora do especificado. A Engenharia de Manufatura também pode utilizar os gráficos apresentados para aprovar ou segregar lotes de veículos produzidos, repara-los antes de enviar para o cliente final caso seja necessário e corrigir o sistema para continuar a produzir dentro do especificado.

Cada vez mais os modelos computacionais interdisciplinares devem ser utilizados para garantir a interação entre desenvolvimento de produto e manufatura, e assim completar o ciclo de desenvolvimento com resultados inovadores para a indústria.



## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup>Harty, D. The myth of accuracy. The Journal of the Engineering Integrity Society, 1999.
- <sup>2</sup>Blundell, M.; Harty, D. Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. Inglaterra: Elsevier Limited, 2004.
- <sup>3</sup>Reimpell, J.; Stoll, H.; Betzler, J. W. The Automotive Chassis. Estados Unidos: Society of Automotive Engineers and Edward Arnold Publishing/Bookpoint, 2001.
- <sup>4</sup>Oh, S.; Cho, Y.; Gim, G. Identification of a vehicle pull mechanism. Society of Automotive Engineers 2000 World Congress, n. 2000-05-0253, 2000.
- <sup>5</sup>Park, K. et al. Robust design optimization of suspension system considering steering pull reduction. International Journal of Automotive Technology. 14, 6, 927-933, 2013.
- <sup>6</sup>Kim, S. A subsystem synthesis method for efficient vehicle multibody dynamics, Multibody System Dynamics, 7, 189-207. 2000.
- <sup>7</sup>Montgomery, D. C.; Runger, G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. Estados Unidos: John Wiley and Sons, 2006.