



## ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE UM PRODUTO

**Daniela S. Oliveira**

[danielas@ppgep.ufrgs.br](mailto:danielas@ppgep.ufrgs.br)

**Gilberto D. Cunha**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Engenharia de Produção  
Laboratório de Otimização de Produtos e Processos (LOPP)

[gcunha@ppgep.ufrgs.br](mailto:gcunha@ppgep.ufrgs.br) - Porto Alegre, RS, Brasil

**Resumo.** *Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo da aplicação de diferentes ferramentas de desenvolvimento de produto utilizadas em empresa do ramo automotivo, apresentando a análise de um caso de projeto de um componente mecânico produzido pela mesma. Será efetuado o estudo dos efeitos da distribuição de carga num eixo cardan submetido à torção, causados pelas modificações da forma de um flange de orelha. Será avaliado o efeito resultante da utilização de técnicas como a Engenharia Assistida por Computador (CAE) e o Projeto Orientado à Fabricação (DFM), além do emprego de testes de laboratório com protótipos (capazes de efetuar avaliação de fadiga). Tal análise assenta-se tanto sobre a questão da redução do tempo de desenvolvimento do produto (e da sua conseqüente colocação no mercado), quanto à questão da adequação ou da necessidade de utilização das diferentes ferramentas.*

**Palavras-chave:** *Design for Manufacture (DFM), Computer-Aided Engineering (CAE), Finite Elements Method (FEM), Time-to-Market (TTM)*

### 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade de produtos e serviços deixou de ser apenas uma estratégia de diferenciação e passou a se tornar uma questão de necessidade para as empresas. A par disso, um fator crítico para a competitividade das indústrias é o tempo de resposta às solicitações dos clientes ou de colocação de novos produtos no mercado (*Time-to-market* - TTM), aí consideradas todas as etapas referentes ao desenvolvimento do produto, da fase projetual à etapa de fabricação. A diminuição do TTM passa a ser um objetivo a ser atingido, para isso sendo necessário ser estudada a melhor forma de combinação dos métodos e das técnicas utilizáveis (Prasad, 1996). Segundo esta ótica, este trabalho apresentará o processo de execução das etapas de desenvolvimento de um produto concebido para atender às exigências de cliente final do ramo automobilístico, efetuando a crítica ao mesmo.

Neste processo, foram empregadas diferentes técnicas para execução do projeto, tais como a análise de tensões através de *sistema computacional de Engenharia Assistida por Computador (Computer-Aided Engineering - CAE)*, que emprega o *Método dos Elementos*

*Finitos (Finite Elements Method – FEM)*, as regras práticas oriundas do *Projeto Orientado à Fabricação (Design for Manufacture – DFM)*. Para a homologação do produto, são realizados testes de fadiga, conforme determinação de normas internas da corporação.

## **2. CONTEXTO DA UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS PROJETUAIS**

A sobrevivência das organizações no mercado atual depende da sua competitividade, decorrente, de forma direta, dos fatores produtividade e qualidade agregados à sua operação. Isto significa dizer que o dinamismo e a crescente competitividade no mundo dos negócios colocam em risco a vida das instituições que não questionarem seus métodos tradicionais de gerenciamento, obrigando-as à permanente atualização de seus métodos e ferramentas para diferentes trabalhos, como desenvolvimento de novos produtos e serviços, produção, controle da qualidade, dentre outros.

### **2.1 Técnicas empregadas para o desenvolvimento de produto**

No caso em análise, será sugerido o emprego de técnicas combinadas para o desenvolvimento projetual, especificamente, o *Projeto Orientado à Fabricação* e a *Engenharia Assistida por Computador*, de modo a resolver o problema de projeto que veio a afigurar-se. Conforme a classificação de Pahl & Beitz (1996) referente às etapas de projeto, pode-se considerar que esta técnica aplica-se à etapa do *projeto preliminar* e aquela à do *projeto detalhado*.

#### **2.1.1 Utilização da Engenharia Assistida por Computador (CAE)**

As ferramentas enquadradas sob a denominação genérica de Engenharia Assistida por Computador são normalmente destinadas a resolver problemas de cálculo em áreas como a Análise de Tensões (caso em questão) e a Transmissão de Calor e Massa. Usualmente baseiam-se na utilização do FEM (Spyrakos, 1987) e permitem, por exemplo, a predição do comportamento do componente mecânico (matematicamente modelado) em termos da resistência mecânica ou da distribuição de temperaturas em função de suas propriedades de massa e das excitações a que é submetido.

O FEM é um procedimento analítico numérico usado para obter soluções aproximadas aos problemas de projeto em campos da engenharia que requeiram soluções pelo emprego de sistemas de equações diferenciais. Frequentemente, os problemas de projeto são suficientemente complexos para inviabilizar a aplicação direta de soluções fornecidas por formulários simplificados de soluções dessas equações.

Na maioria das vezes, porém, as empresas costumam ser reticentes à utilização deste tipo de ferramenta, sob alegações que vão da falta de confiança nos resultados obtidos pela aplicação do método à incapacidade de fazer uma análise adequada dos mesmos. Muitas vezes, isto ocorre por não poderem contar com profissionais devidamente habilitados, seja por carência de oferta no mercado, seja por razões de custo do emprego dos mesmos. No caso da empresa em questão, nenhuma das duas razões poderia ser arrolada.

No caso a ser apresentado, a utilização do CAE justificou-se pela necessidade de fazer o desenvolvimento de um produto cuja configuração geométrica diferia suficientemente em relação aos similares anteriormente projetados para que suas características comportamentais não pudessem ser completamente conhecidas *a priori* sob condições operacionais. Este é um caso em que a abordagem de desenvolvimento tradicional, baseada em tentativas-e-erros, conduz, via de regra, a um aumento do tempo total de desenvolvimento do produto.

### 2.1.2 Utilização do Projeto Orientado à Fabricação (DFM)

O DFM é uma tecnologia de suporte ao desenvolvimento do produto composta por um conjunto de *diretrizes* e de *regras* destinadas a trazer, para a área do projeto de produto, todas as considerações e preocupações relacionadas com a sua fabricação, conforme Bralla (1986):

- compreensão maximizada e otimização dos processos de fabricação;
- entrosamento majorado entre as áreas de projeto, processos e produção;
- conhecimento aprofundado sobre as possibilidades de opção por diferentes alternativas em projeto/ processos/ fabricação baseado-se em avaliações de natureza técnica e econômica;
- utilização de padrões já estabelecidos quanto ao método de produção;
- simplificação e otimização dos detalhes e dos métodos de produção.

No caso em análise, a aplicação do DFM estará restrita ao emprego das assim denominadas “regras de boa prática” aplicáveis a cada classe de processo de fabricação (fresamento, neste caso).

## 3. O PROBLEMA A SER RESOLVIDO – PERFIL DA SAPATA DO FLANGE

Com o objetivo de atender às exigências demandadas por um novo projeto, foi analisado um problema de distribuição de tensões num componente mecânico. O item em questão é um *flange de orelha* (ilustrado à Fig.1), componente que faz parte da transmissão de um veículo de passeio, com a função de acoplar eixo *cardan* ao mecanismo diferencial. A região do componente a ser estudada é a da sua sapata (elemento de fixação), pois, na eventualidade de ser efetuado inadequadamente o dimensionamento da mesma, poderia vir a ser comprometida a resistência do flange em condições de operação. Para a maior compreensão do problema, a seguir será efetuado um breve estudo sobre os componentes mecânicos envolvidos no trabalho.

### 3.1 O papel do flange no eixo *cardan*

O eixo *cardan* tem como função transmitir torque do conjunto motriz (motor-caixa de marchas) ao eixo diferencial, na rotação necessária para atender à velocidade de operação desejada. Além de girar, o eixo *cardan* deve ter a propriedade de operar em condições de movimento irregular e flutuante. Isso quer dizer que esse terá de ser capaz de contrair, expandir e mudar o ângulo de operação acompanhando o movimento do eixo sobre as ondulações do terreno.

Para tanto, a construção de um *cardan* inclui o uso de juntas universais, que garantem ao eixo o funcionamento em ângulos diferentes. Eixos *cardans* são conjuntos específicos e projetados de acordo com a sua aplicação. A especificação de um eixo *cardan* é baseada na magnitude do torque e da rotação a que vai estar submetido, no tipo de trabalho (leve, pesado, passeio), no comprimento (e noutras características) do veículo. Se eventualmente ocorrer a substituição por componentes de outra série ou de diferentes dimensões daquelas especificadas, isso pode vir a ocasionar falhas.

### 3.2 O componente *flange de orelha*

A fixação do flange aos demais componentes do eixo *cardan* é possível através do uso de um elemento em forma de cruz, chamado de cruzeta. A determinação da série do flange (que determina o máximo valor de torque suportado) é feita a partir do conhecimento dos valores de torque a que o componente será submetido durante sua vida útil. Os dados iniciais do

projeto (ex.: diâmetro-piloto para encaixe na caixa de transmissão, expectativa de valores-limite para o torque, etc.) são fornecidos pela própria empresa montadora do veículo.



Figura 1: *Flange de orelha.*

## **4. O DESENVOLVIMENTO PROJETUAL NO CASO EM ANÁLISE**

### **4.1 O processo de desenvolvimento projetual empregado na empresa**

Na empresa objeto de estudo deste caso, tradicionalmente, faz-se o desenvolvimento projetual fortemente baseado na aplicação de conhecimento empírico, baseado na experiência, com a prática de procedimentos de tentativa-e-erro. O emprego de técnicas como CAE e DFM constituiu um experimento relativamente recente na vida desta empresa.

### **4.2 A aplicação do CAE ao estudo da geometria do componente**

Através do uso do CAE, é possível identificar e avaliar as tensões resultantes sobre um corpo (e as deformações a que o mesmo poderá estar submetido) originadas por um determinado carregamento. O processo de análise está dividido basicamente em três etapas: pré-processamento, aplicação do *solver* (programa computacional responsável pela resolução do sistema de equações diferenciais geradas) e pós-processamento.

No *pré-processamento* (criação e definição do modelo), utiliza-se o modelo geométrico da peça (anteriormente produzido num sistema de *Projeto Assistido por Computador - CAD*) para a geração automática de uma malha de elementos finitos. Carregamentos mecânicos (cargas pontuais, cargas distribuídas, deslocamentos prescritos), cargas térmicas ou a combinação de cargas podem ser aplicadas ao modelo. As condições de contorno (também chamadas de restrições) são aplicadas ao modelo, simulando a sua utilização em condições de operação. O próprio sistema de CAE gera então o sistema de equações diferenciais.

Então, utiliza-se o *solver* para se obter os resultados numéricos esperados (valores das tensões resultantes sobre o objeto modelado). Os valores dessas tensões podem ser visualizados mais facilmente através da geração de espectrogramas (etapa de *pós-processamento*) – ver exemplo à Fig. 2. Esta ferramenta é usada com o objetivo de verificar o comportamento estrutural do componente (áreas críticas, níveis de tensões existentes) reproduzindo, aproximadamente, as condições de testes realizados em laboratório.

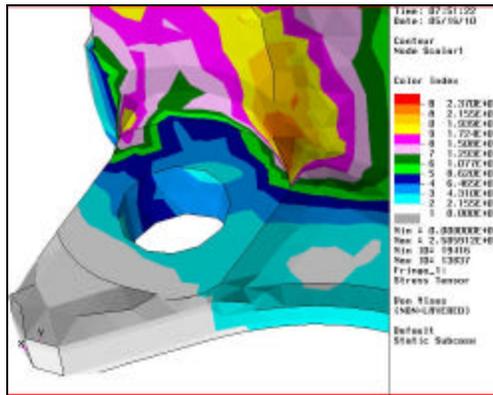


Figura 2: Visualização das tensões na região do *spot face* (para  $R=0,5\text{mm}$ ).

#### 4.2.1 Resultados obtidos pela aplicação do CAE

Na região do *spot face* da peça (região de apoio para a cabeça do parafuso, onde ocorre a concordância entre superfícies) observou-se uma alta concentração de tensões, provavelmente devido ao pequeno *raio de concordância* entre as superfícies externas do flange. Isso denota a necessidade de se proceder à alteração do valor do raio. Outros testes efetuados com o emprego do CAE sugeriram que valores de raio de aproximadamente 2,0 mm não conduziram ao surgimento de sobre-solicitações mecânicas na região anteriormente considerada crítica.

#### 4.3 A aplicação do DFM ao estudo da geometria do componente

Dentre as regras de projeto aplicáveis a processos específicos de fabricação sugeridas pelo DFM em literatura, encontra-se a de suavizar a concordância (pelo aumento do valor do raio) entre superfícies criticamente relacionadas (no caso em estudo, devido às tensões resultantes oriundas de carregamento). Nas regiões fragilizadas pela presença de furos, esta situação pode-se tornar ainda mais crítica, o que é o caso da peça em análise, o que também é referido nessas regras (Bralla, 1986).

Ademais, com o emprego do raio de concordância com 2,0 mm na região do *spot face* foi possível, ainda, a aplicação de outros pressupostos do DFM com relação à fabricação:

- utilizar ferramentas de corte de dimensões padronizadas (fresas com insertos, utilizadas para a obtenção do furo na sapata e do rebaixamento na região da concordância entre as superfícies);
- aumento do tempo de vida útil da ferramenta e troca efetuada com maior facilidade (pelo fato de se estar utilizando insertos).

#### 4.4 A realização de testes de laboratório

Em complemento aos dados teóricos obtidos através da análise efetuada com o sistema de CAE, os componentes foram encaminhados para testes de laboratório, realizados de acordo com as normas da empresa, para fins de análise de fadiga dinâmica. Na Fig. 3, é mostrado o ensaio do flange em teste.

##### 4.4.1 Descrição do teste de laboratório

O teste de fadiga avalia o desempenho do eixo *cardan* quando submetido à carga torcional oscilante de forma senoidal reversa, centrada em zero. Cada ciclo compreende aplicação de carga em ambos os sentidos. A especificação para a aprovação do teste de fadiga é submeter uma amostra de 6 peças a uma ciclagem mínima de 500.000 ciclos, com uma

carga  $ZX$  especificada e com frequência de  $Z$  Hz, sem que haja a ruptura no corpo de prova. Foi adotado como *modo de falha* para o teste de fadiga, a situação de ruptura total do componente, conforme determinação da empresa-cliente deste projeto.



Figura 3: Flange na máquina de teste.

#### 4.4.2 Resultados dos primeiros testes de fadiga

Foram testadas 6 (seis) peças em laboratório, onde foram obtidos os resultados apresentados à tabela 1, observando-se que, em todos os flanges testados, constatou-se o aparecimento de trincas que propagavam-se a partir do raio do *spot face*. Note-se que a condição para a determinação de ocorrência de falha é a ruptura do componente (como ilustrado na Fig. 4), e não o surgimento de trincas, conforme determinação do cliente.

Tabela 1: Resultado da primeira série de testes (raio do *spot face*: 0,5mm).

Peça	Número de Ciclos	Resultado
1	521170	Aprovado
2	473190	Falha
3	523740	Aprovado
4	498220	Falha
5	512480	Aprovado
6	458550	Falha



Figura 4: Estado do flange após aplicado o teste de fadiga dinâmica.

#### 4.5 Soluções adotadas para melhorar o desempenho do flange

Como o primeiro lote de amostras havia sido reprovado nos testes de laboratório, não tendo o desempenho desejado, foram executadas alterações para melhorar o desempenho do flange. O raio de concordância ( $R$ ) do *spot face* foi alterado de 0,5 mm para 2,0 mm, tornando

possível amenizar as tensões resultantes (este valor foi adotado com base na comparação com situações semelhantes anteriormente analisadas pela empresa).

Observe-se que esta conclusão já era esperada em função da análise anteriormente efetuada pela aplicação da regra relativa à suavização de concordâncias entre superfícies provida pelo DFM (item 4.3) e pela análise de tensões efetuada pelo CAE (item 4.2.1).

O flange foi, então, submetido novamente a testes para nova tentativa de validação do produto.

#### 4.5.1 Resultados da aplicação da segunda série de testes

Foram testados outros 6 flanges, já com o raio do *spot face* alterados. Em todos os testes realizados, os resultados superaram a ciclagem mínima requerida por norma da empresa fabricante do componente (500.000 ciclos). Todos os testes foram interrompidos após atingido esse valor (ver tabela 2). A visualização do estado desses componentes após o teste é ilustrada à Fig. 5.

Tabela 2: Resultado da segunda série de testes (raio do *spot face*: 2,0 mm).

Peça	Número de Ciclos	Resultado
1	610.000	interrompido
2	692.000	interrompido
3	613.000	interrompido
4	553.000	interrompido
5	634.000	interrompido
6	626.000	interrompido



Figura 5: Imagem após o teste de fadiga – flange com raio de concordância modificado.

## 5. CONCLUSÕES

A análise do problema de projeto previamente efetuada, com base na aplicação *conjunta* dos conhecimentos da área do DFM e do CAE, permitiram chegar às mesmas conclusões que as obtidas pela aplicação dos *testes de laboratório (fadiga dinâmica)*. Portanto, as questões que aqui se evidenciam são as seguintes:

- haverá necessidade do recurso sistemático à aplicação desses tipos de testes, onerosos em termos de custos e de tempo de execução, se outras fontes de conhecimento, bem aplicadas, poderiam conduzir às mesmas alterações de projeto executadas ao final do desenvolvimento projetual (?);
- não se estaria deixando de utilizar técnicas que poderiam estar ao alcance de aplicação por parte das empresas, em especial as de maior porte, como é o caso daquela envolvida no caso em análise, apenas pela falta de uma postura gerencial mais adequada com relação ao desenvolvimento de produtos (?);

- c) pelo menos, não se deveriam aplicar técnicas deste tipo com o intuito de reduzir o número de tentativas de testes-e-erros ao longo do processo de desenvolvimento do produto (?);
- d) ainda, o tempo ganho na atividade de desenvolvimento projetual não seria eventualmente útil à melhor execução de outras atividades relacionadas com o desenvolvimento do produto, entre as quais, a execução de pesquisas de mercado e a realização de atividades de preparação da fabricação, por exemplo (?).

A resposta a todas estas questões reside em que as empresas devem ser capazes de efetuar o desenvolvimento de seus produtos de forma cada vez mais rápida e eficiente para alcançar ou manter os níveis competitivos exigidos pelo mercado. Já não basta apenas utilizarem-se de ferramentas capazes de promover a melhoria da qualidade e/ou da produtividade do sistema de produção. É necessário investir também em técnicas que permitam colocar os produtos com uma melhor qualidade intrínseca no mercado, e a prazos hábeis cada vez mais exíguos.

Neste contexto, torna-se cada vez mais importante a aplicação de técnicas que permitam acelerar o tempo de desenvolvimento do produto, especialmente aquelas que visam aproximar o projeto da fabricação. Isto vem a requerer, no mais das vezes, uma certa reestruturação da empresa, através do estabelecimento de um sistema de gestão do desenvolvimento de produtos, capaz de coordenar a apropriação e a utilização de técnicas, métodos e ferramentas disponíveis visando garantir as melhores condições necessárias ao planejamento, controle e execução do desenvolvimento projetual. A lição extraída pela empresa fabricante do flange com relação ao caso aqui analisado inseriu-se exatamente neste contexto, tendo, a partir disso, passado a investir mais em métodos de gestão do desenvolvimento de produtos.

## REFERÊNCIAS

- Beitz, W. & Pahl, G., 1996. Engineering Design - A Systematic Approach. Springer-Verlag, Londres, pp. 467-494.
- Bralla, James G., 1986. Handbook of Product Design for Manufacturing. McGraw-Hill, vol. 2, pp. 4-34, vol. 3, pp 7-56.
- Prasad, B., 1996. Concurrent Engineering Fundamentals - Prentice-Hall, vol. 1, 478 p.
- Spyrakos, Constantine C., 1994. Finite Element Modelling in Engineering Practice. Algor, pp 1-73.

## ANALISYS ON A CASE OF PRODUCT DEVELOPMENT

**Abstract.** *This paper aims to analyze the application of diverse product development tools by means of presenting a case study (design of a mechanical part: a flange yoke to be assembled to a driveshaft). It will be addressed the application of techniques as Computer-Aided Engineering (CAE) and Design for Manufacture (DFM) to be compared to the application of laboratory tests made upon prototypes. The results will be evaluated in terms of the efficiency regarding the product time-to-market (TTM).*

**Keywords:** *Design for Manufacture (DFM), Computer-Aided Engineering (CAE), Finite Elements Method (FEM), Time-to-Market (TTM)*