

# Analysis of the Virtual Simulation Usage on Product Development Process<sup>1</sup>

## Avaliação do Uso da Simulação Virtual no Processo de Desenvolvimento de Produtos

**Ana Cristina Mongelli Martin**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marly Monteiro de Carvalho**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Produção

### ABSTRACT

Due to global and dynamic environment in which companies are inserted, the Product Development Process (PDP) is an important factor to gain competitive capacity. Companies are investing on new technologies and processes to guarantee quality and reduced costs to the project.

The advance of computational technologies became possible the implementation of new development and validation processes by virtual tools introduction.

In this paper, a critical analysis of simulation usage on PDP is presented, the methodology chosen was a case study in a automotive sector.

### RESUMO

Devido ao ambiente globalizado e dinâmico em que as empresas atualmente estão inseridas, o PDP (Processo de Desenvolvimento de Produto) corresponde a um fator decisivo para adquirir capacidade competitiva. As empresas estão investindo em novas tecnologias, novos processos e técnicas para se tornarem mais ágeis, flexíveis e como também para assegurar a qualidade e menor custo para o projeto.

O avanço recente de tecnologias computacionais tornou possível a implementação de novos processos de desenvolvimento e validação do produto com a introdução de ferramentas virtuais, que podem resultar em fonte de vantagem competitiva para as empresas.

Neste trabalho faz-se uma análise crítica do uso da simulação no PDP, utilizando como estratégia de pesquisa o estudo de caso em uma empresa do setor automotivo.

### PALAVRAS CHAVE

Processo de Desenvolvimento de Produtos, Simulação Virtual, Protótipo Físico, CAE (*Computer Aided Design*).

---

<sup>1</sup> Artigo extraído do Trabalho de Conclusão de Curso de Ana Cristina Mongelli Martin, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do Título de Mestre Profissional em Engenharia Automotiva.

## INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do uso da simulação virtual no PDP. Pretende-se fazer uma análise comparativa do PDP tradicional, denominação utilizada neste trabalho para o desenvolvimento sem o uso de ferramentas virtuais, baseado no ciclo de projeto, construção de protótipos físicos e teste, com o PDP que utiliza a simulação virtual para a análise do projeto anteriormente à construção e teste do protótipo físico.

Duas questões centrais pautam o desenvolvimento deste trabalho:

1. Como o processo de desenvolvimento de produtos pode se beneficiar do uso da simulação virtual?
2. Quais os fatores que restringem a aplicação da simulação virtual como substituição dos protótipos físicos?

A abordagem metodológica da pesquisa foi o estudo de caso em uma empresa do setor automobilístico. A análise foi feita com base na análise documental e levantamento de dados primários junto aos profissionais envolvidos com a atividade de PDP e de simulação virtual.

Confrontando-se o resultado da pesquisa de campo com a teoria, será possível responder às questões propostas neste estudo, discutindo-se as vantagens e as limitações do uso das ferramentas virtuais.

## PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO (PDP)

**FASES DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS** - Existem diversas abordagens disponíveis na literatura no que concerne às fases do PDP, a Tabela 1 sintetiza as fases de desenvolvimento segundo autores clássicos. Pode-se verificar que não existem muitas diferenças entre as abordagens quanto às fases do PDP.

Tabela 1 – Fases do desenvolvimento de produto.

Clark & Wheelwright, 1982	Clark & Fujimoto, 1991	Pugh, 1991
1. Desenvolvimento Conceitual	1. Desenvolvimento Conceitual	1. Requisitos de Mercado
2. Planejamento do Produto	2. Planejamento do Produto	2. Especificação do Produto
3. Engenharia de Produto / Processo	3. Engenharia do Produto	3. Design Conceitual
4. Produção Piloto / Aumento da Produção	4. Engenharia de Processo	4. Detalhamento do Projeto
		5. Manufatura
		6. Vendas

Segundo Pugh (1991), o desenvolvimento do produto corresponde a um conjunto de atividades sistemáticas necessárias, desde identificação de uma necessidade do consumidor ou mercado até a venda do produto [1].

A Figura 1 apresenta as fases de desenvolvimento de produto assim como o paralelismo entre as atividades segundo Clark; Wheelwright [2].

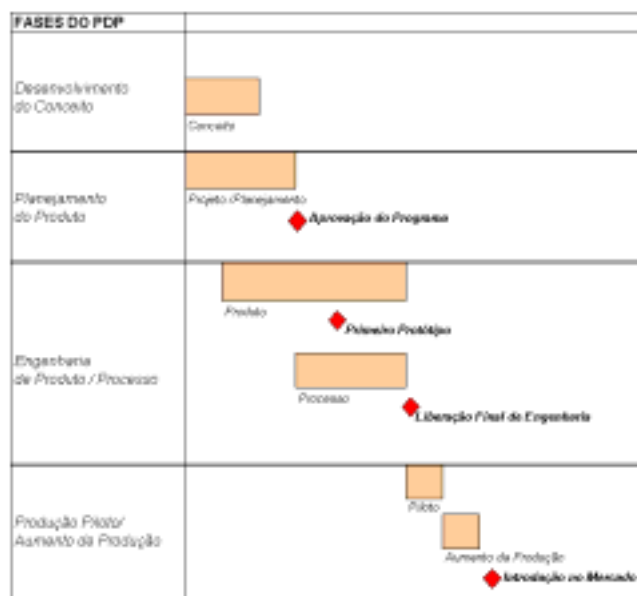


Figura 1 – Fases do processo de desenvolvimento de produto adaptado de Clark; Wheelwright [2].

A fase do PDP foco da pesquisa corresponde a Engenharia do Produto, fase onde se inicia o detalhamento do produto e a construção de protótipos, compreendendo o ciclo de “projeto-construção-teste”, em que uma seqüência de testes permitirá a avaliação do projeto e implementação de correções necessárias, a conclusão do detalhamento do projeto é feita quando o projeto final está de acordo com os requisitos estabelecidos [2] e [3].

PDP “MODELO TRADICIONAL” – esta denominação adotada neste artigo, significa o PDP sem o uso de ferramentas virtuais, apenas para facilidade de referência.

Segundo Xu, o PDP “modelo tradicional” corresponde ao ciclo de projeto, construção de protótipos físicos e testes como apresentado na Figura 2. A fase de testes segue como ciclo de erro e acerto correspondendo a uma ferramenta de desenvolvimento e aprendizado, bem como de validação do produto. Se o projeto não está adequado, melhorias ou correções são feitas baseadas na experiência, tornando o processo extenso uma vez que a melhoria só será conferida no protótipo físico [4].

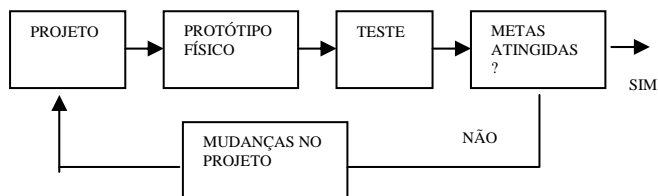


Figura 2: Ciclo do PDP “modelo tradicional” adaptado de Xu [4].

De acordo com Clark e Fujimoto, há ampla diversidade de protótipos físicos que podem ser aplicados para o desenvolvimento e validação do produto. Nas fases iniciais de desenvolvimento de produto podem ser construídos protótipos em materiais alternativos, denominados *mockup's*, bem como protótipos mecânicos que representam o produto apenas parcialmente permitindo análise de chassis como suspensão, freios e direção, reproduzindo fielmente a dirigibilidade do novo modelo, mas não representando a estrutura final da carroceria e nem a forma externa. Estes primeiros protótipos representam a primeira oportunidade para a análise física do veículo, em seguida tem-se o protótipo completo, que representa fielmente o produto final [3].

Conforme Clark e Wheelwright, os protótipos iniciais representam baixo custo para o projeto e podem ser construídos rapidamente, mas possuem menor representatividade; já os protótipos físicos finais que representam todo o sistema são extremamente caros e de longo período de construção, no entanto possuem alto índice de representatividade [2].

A Tabela 2 apresenta um comparativo de custo e representatividade do protótipo em *clay*, protótipo mecânico e protótipo completo.

Tabela 2 - Custo e representatividade de diferentes tipos de protótipos físicos adaptado de Clark; Wheelwright [2].

	MODELO CLAY	PROTÓTIPO MECÂNICO DE ENGENHARIA	PROTÓTIPO COMPLETO DE ENGENHARIA
<b>CUSTO</b>			
<b>Custo</b>	Baixo	Médio	Alto
<b>Tempo</b>	Baixo	Médio	Alto
<b>REPRESENTATIVIDADE</b>			
<b>Forma</b>	Alto	Alto	Alto
<b>Montagem</b>	Médio	Alto	Alto
<b>Funcionalidade</b>	Baixo	Alto	Alto
<b>Material</b>	Baixo	Alto	Alto
<b>Processo</b>	Baixo	Baixo / Médio	Alto

Na empresa automobilística, o custo do protótipo completo de engenharia representa um custo muito alto porque é produzido com dispositivos e ferramentas específicos para a construção e montagem de um lote reduzido de veículos.

Como o PDP “modelo tradicional” corresponde a uma ferramenta de aprendizado, onde as melhorias e correções do projeto são feitas baseados nos resultados dos protótipos físicos, são requeridos vários ciclos de projeto, construção e teste até o alcance de performance satisfatória do projeto [4].

O resultado desta seqüência de ciclos implica diretamente em alto custo e longo período para a introdução do produto no mercado [5].

## O USO DA SIMULAÇÃO NO PDP

A simulação computacional corresponde ao processo de desenvolvimento de um modelo matemático lógico de um sistema real e experimentação deste modelo com o uso de computadores. Assim, a simulação compreende o processo de criação do modelo assim como o projeto e implementação de um experimento adequado para a representação de um sistema real [6].

Um dos métodos mais utilizados atualmente para simulação de testes dinâmicos corresponde ao método de elementos finitos, que inicialmente foi desenvolvido para análise de questões estruturais, mas sua aplicação foi estendida para diversas áreas como análise térmica, dinâmica de fluidos, vibrações e ruídos \*.

O conceito básico de simulação pelo método de elementos finitos corresponde à:

- Preparação do modelo de elementos finitos utilizando-se uma ferramenta que permite capturar a informação geométrica do *software* CAD, para em seguida dividi-la em elementos discretos, recebendo a denominação de malha. Portanto, o modelo em elementos finitos corresponde à representação geométrica da região em estudo;
- Entrada de dados das condições de contorno as quais representam as influências externas no estudo, como forças, momentos e velocidades;
- Processamento do modelo de elementos finitos sob as condições de contorno, através de um sistema de cálculos denominado *solver*, fornecendo o resultado do teste de simulação, que será visualizado através de uma ferramenta específica.

**DIFUSÃO DO USO DAS FERRAMENTAS VIRTUAIS:** Na década de 70, as atividades computacionais nas indústrias automobilísticas estavam voltadas para a digitalização de desenhos de engenharia, já na década de 80 grandes investimentos foram feitos nos

\* RAMOS, R. **Simulação aplicada a Engenharia Automotiva**. [Mensagem Pessoal] Mensagem recebida por [roberto.ramos@gm.com](mailto:roberto.ramos@gm.com) em 20 de abr. 2002.

sistemas de simulação CAE, o foco da computação estava voltado para atividades como simulação de testes e engenharia avançada.

Os programas de simulação criaram perspectivas de realização de testes dinâmicos sem a necessidade de protótipos físicos, criando possibilidades de redução de custo e aumento do número de alternativas testadas [2] e[3].

Contudo, no final da década de 80 ainda era constatado alto número de protótipos físicos utilizados para a validação de projetos no setor automobilístico, o protótipo de engenharia continuava sendo a principal ferramenta de validação, mesmo com o progresso da tecnologia computacional. As dificuldades estavam relacionadas principalmente à capacidade computacional, uma vez que mesmo os mais avançados computadores apresentavam problemas para gerar as simulações de sistemas complexos [2].

Foi na década de 90 que as ferramentas virtuais se disseminaram. No início desta década, o ciclo de desenvolvimento de produto era composto de uma seqüência de construções físicas, mas já em meados de 1996, o processo de desenvolvimento havia reduzido o número de protótipos com a inclusão de testes virtuais. No final da década, e mais recentemente em 2001, uma fase completa de construção de protótipos pode ser excluída do ciclo de desenvolvimento de veículos devido aos avanços e confiabilidade adquiridas nas validações virtuais [7].

Vários fatores tornaram possível a utilização mais intensa das simulações virtuais na década de 90 [8]:

- Modelos de elementos finitos e modelos sólidos tridimensionais estavam disponíveis para a maioria dos componentes de sistemas,
- Recentes tecnologias simplificaram a representação do modelo do componente podendo ser eficientemente processado em grandes sistemas de simulação,
- As estações gráficas de trabalho se tornaram mais baratas e completas,
- Sistema de gerenciamento de dados permitiu grande quantidade de informação atualizada e disponível em rede.

Com o uso da ferramenta de simulação virtual, os ciclos de construção de protótipos físicos, testes e correções de projeto, estão sendo substituídos gradativamente pelas avaliações virtuais [7].

A literatura indica um conjunto de fatores, que concernem a questões técnicas e organizacionais, que tem impacto no sucesso da implementação da simulação. Krouse [5] destaca o seguinte conjunto de fatores:

- Alta qualidade dos dados de entrada dos sistemas de simulação, incluindo parâmetros como coeficientes de atrito, localização de pivôs, *input* de cargas, massa de componentes e centro de gravidade para peças individuais. Krouse recomenda a construção de um banco de dados para possibilitar rápido acesso à informação e para disponibilizar a informação para projetos futuros.
- Barreiras culturais e organizacionais também devem ser vencidas, uma vez que pessoas habituadas aos processos tradicionais se tornam relutantes ou se sentem inseguros com a nova tecnologia. O compartilhamento de dados entre grupos pode criar condições de disputas e desentendimentos, o melhor caminho para direcionar estes problemas é manter as pessoas envolvidas, tão cedo quanto possível, na implementação do protótipo virtual.
- Investimentos em *hardware*, *software*, *networking* e treinamento garantindo alta qualidade da infraestrutura CAE.

Os autores Murphy; Perera complementam os apontamentos de Krouse relativo aos fatores de sucesso, com itens relacionados à base de conhecimento. Murphy; Perera recomendam o desenvolvimento de mecanismos efetivos para a difusão do conhecimento e dos benefícios da simulação como ferramenta importante de negócios, a troca de experiências e conhecimento entre todos os usuários de simulação, a formação de um time estruturado de especialistas e engenheiros para conduzir construção do modelo, análise e gerenciamento do projeto[9].

## METODOLOGIA

Para responder as perguntas centrais do desenvolvimento deste trabalho foi escolhida a pesquisa qualitativa devido a necessidade de grande envolvimento no contexto da organização e ênfase na interpretação de resultados das pesquisas com os entrevistados [10].

O método de pesquisa selecionado foi o estudo de caso, constituindo-se na melhor estratégia para a condução da pesquisa de campo. Conforme classificação de Yin, o estudo de caso permite a análise dos dados contemporâneos, não exige o controle de variáveis comportamentais, possui a capacidade de lidar com uma ampla variedade de evidências seja documentos, artefatos, entrevistas e observações [11].

Este estudo de caso utilizou os seguintes tipos de evidências: documentos e entrevistas. Dois tipos de entrevistas foram aplicados. O primeiro tipo, denominado entrevista focal de acordo Yin, corresponde a entrevista espontânea e informal baseada num roteiro de perguntas que permite ampla abertura para comentários do entrevistado [11]. Este tipo de entrevista é denominado

neste trabalho de roteiro I, tendo sido aplicado para o Gerente da Área de Simulação, com o objetivo de se obter informações da aplicação da simulação para testes específicos.

O segundo tipo de entrevista é denominado como levantamento de acordo Yin, em que a entrevista assume um caráter mais formal e é composta por questões mais estruturadas [11]. Este tipo de entrevista, denominado roteiro II, foi aplicado para nove Gerentes e cinco Diretores das áreas que compõem a unidade de análise com o objetivo de identificar o ponto de vista da Engenharia de Produto sobre a aplicação da simulação. A unidade de análise corresponde a Engenharia de Produtos da empresa em estudo, formado pelos seguintes grupos: Engenharia de Operações e Validações e Engenharia de Projetos.

Os documentos utilizados para levantamento de dados foram relatórios de teste físico e de simulação, normas e procedimentos internos.

Devido à vasta gama de testes disponíveis, para a realização das entrevistas e análise dos documentos, foi necessário definir preliminarmente os testes que seriam analisados no estudo de caso. Foram adotados vários critérios para a seleção dos testes, com o intuito de garantir a abrangência do uso da simulação como ferramenta de substituição de protótipos físicos, quais sejam:

- Critério 1: Testes aplicados em protótipos físicos e simulação virtual, permitindo a comparação de dados como custos, tempo e performance entre as duas modalidades.
- Critério 2: Testes aplicados em projetos já lançados da companhia, por corresponder a uma base confiável de dados e devido fator confidencialidade de projetos futuros.
- Critério 3: Os testes selecionados devem ter sido aplicados em projetos de mesmo porte, ou seja com similar quantidade de modificações para permitir análise comparativa de custo e tempo.
- Critério 4: Testes que pertençam a diferentes níveis da escala de capacidade e confiabilidade de simulação, permitindo análise dos variados níveis de aplicação da simulação.

A Figura 3 apresenta a seqüência de atividades realizada neste trabalho, iniciado com o estudo da literatura, escolha da metodologia de pesquisa, determinação do tipo de evidências para a obtenção e análise de dados visando responder as questões centrais do trabalho.

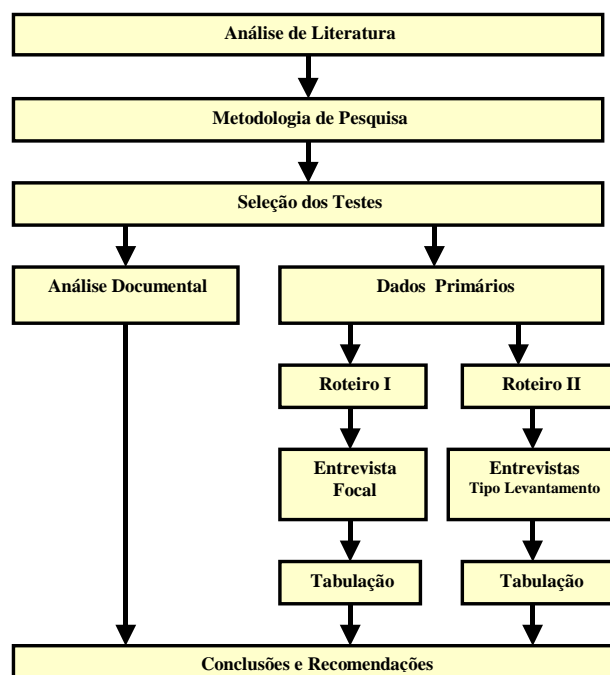


Figura 3 – Abordagem Metodológica adotada neste trabalho.

## ANÁLISE DOS DADOS DA PESQUISA DE CAMPO

**ANÁLISE DOCUMENTAL:** O levantamento de dados secundários para subsidiar a análise do estudo de caso foi baseado em relatórios de teste físico, relatório de simulação, normas legais, procedimentos de testes físicos e metodologias de simulação.

Estes documentos descritos acima permitiram comparação dos resultados do teste físico com a simulação virtual, possibilitando a análise da capacidade e confiabilidade de resposta da simulação.

A Tabela 3 apresenta os dados obtidos pela análise de documentos, permitindo a visualização da diferença de resultados obtidos da simulação virtual com o teste físico, este valor está determinado na tabela como diferença, indicada em porcentagem.

Tabela 3: Comparação de resultados do teste físico com simulação virtual.

Descrição do Teste	Resultado Teste Físico	Resultado Simulação Virtual	Diferença (%)
<i>Roof Crush</i>	--	--	< 10
<i>Stiffness</i>	--	--	< 5
<i>Impacto Lateral</i>	--	--	< 15
<i>Penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar.</i>	Com o defletor na região A, há de redução do fluxo de água na entrada do sistema de admissão de ar.	Com o defletor na região A, não há penetração de água no motor e não há umidade na saída de ar do elemento filtrante.	--
<i>Temperatura de Carroceria</i>	--	--	< 10

Devido ao fator confidencialidade, não foram apresentados os valores absolutos dos resultados dos testes na Tabela 3.

A Tabela 3 mostra que a ferramenta de simulação virtual, embora possa ser aplicada para uma variedade de testes, apresenta diferentes níveis de confiabilidade e capacidade da simulação.

É importante ressaltar que o teste de simulação de penetração de água no motor é feito utilizando-se uma avaliação qualitativa que indica o comportamento do fluxo de água na região de admissão de ar.

Já o teste de temperatura de carroceria depende de dados do protótipo físico como temperatura do escapamento e perda de calor através do carpete. Portanto, somente com estes dados é possível a geração de resultados refinados na simulação virtual. Para este teste específico a simulação não elimina os protótipos, mas pode reduzir ciclos de avaliação física.

Já para o teste de *roof crush* e *stiffness* a simulação virtual consegue representar o procedimento de teste físico com boa precisão permitindo maior substituição de protótipos físicos.

**PESQUISA DE CAMPO:** Os dados primários obtidos pelas entrevistas realizadas na unidade de análise permitiram a identificação das restrições do uso da simulação como ferramenta de substituição de protótipos, bem como os benefícios que podem ser alcançados pelo uso simulação.

Numa primeira etapa realizou-se a entrevista focal (roteiro I) com o Gerente da Área de Simulação.

Os dados obtidos com o roteiro I apresentam a redução de custo e tempo da simulação virtual em relação ao protótipo físico. Foram comparados os custos e tempo para execução dos testes previamente selecionados, tanto na modalidade de teste físico como na simulação virtual. A Tabela 4 apresenta este comparativo.

Tabela 4: Comparação do Custo e Tempo do Primeiro Protótipo Físico com a Primeira Simulação Virtual.

Descrição do Teste	Primeiro Protótipo Físico	Primeira Simulação Virtual
<b>Tempo</b>		
<i>Roof Crush</i>	41%	17%
<i>Stiffness</i>	41%	17%
<i>Impacto Lateral</i>	100%	17%
<i>Penetração de água</i>	25%	2%
<i>Temperatura de Carroceria</i>	25%	2%
<b>Custo</b>		
<i>Roof Crush</i>	90%	43%
<i>Stiffness</i>	90%	43%
<i>Impacto Lateral</i>	100%	43%
<i>Penetração de água</i>	36%	2%
<i>Temperatura de Carroceria</i>	36%	4%

Devido ao fator confidencialidade não foram apresentados os dados absolutos, utilizou-se como base da análise comparativa o protótipo físico de impacto lateral.

Os fatores/dados que foram considerados para o cálculo do tempo e custo do protótipo físico e simulação estão relacionados na Tabela 5.

Tabela 5 – Fatores considerados para o cálculo de custo e tempo do protótipo físico e simulação.

	<b>TESTE FÍSICO</b>	<b>SIMULAÇÃO VIRTUAL</b>
<b>Fatores relacionados ao Custo</b>	1-Mão de Obra, 2-Material, 3-Computadores e Softwares (licenças de uso).	1-Mão de Obra, 2-Computadores e Softwares (licenças de uso).
<b>Fatores relacionados ao Tempo</b>	1-Construção do ferramental e dispositivos, 2-Inspeção do ferramental e dispositivos, 3-Montagem da Carroceria, 4-Pintura, 5-Montagem de Componentes e Sistemas, 6-Preparação e Execução do teste.	1-Criação do Modelo, 2-Adaptação do modelo matemático, 3-Execução da simulação.

A Tabela 5 não apresenta como custo os ferramentais e dispositivos de montagem das peças protótipos, uma vez que o foco de estudo é a redução de protótipos físicos, o que não elimina a fabricação dos ferramentais e dispositivos protótipos, portanto, este custo é independente do número de protótipos.

Destaca-se que, considerando-se um segundo ciclo de avaliações, uma vez que tenha sido identificada alguma falha no produto no resultado do primeiro ciclo, tem-se diferenças maiores de custo e de tempo da simulação com o protótipo físico.

O custo e tempo de uma simulação adicional apresentam valores bem inferiores se comparados à primeira simulação. Isto é devido principalmente ao fato do modelo de elementos finitos já estar pronto para uma avaliação adicional, requerendo apenas sua adaptação, conforme a solução de engenharia (pode-se exemplificar a solução como aumento de espessura do material ou mudança de material). A Tabela 6 exemplifica esta situação com o teste de *roof crush*.

Tabela 6: Custo e tempo do protótipo físico e simulação, considerando dois ciclos de avaliação.

<b>CICLO 1 – ROOF CRUSH</b>		<b>CICLO 2 – ROOF CRUSH</b>	
<b>CUSTO</b>		<b>CUSTO</b>	
Primeiro Protótipo Físico	Primeira Simulação	Protótipo Físico Adicional	Simulação Adicional
100%	41%	100%	4%
<b>TEMPO</b>		<b>TEMPO</b>	
Primeiro Protótipo Físico	Primeira Simulação	Protótipo Físico Adicional	Simulação Adicional
100%	48%	52%	5%

Através do roteiro I, também foi possível identificar as restrições para a substituição do protótipo físico para os testes previamente selecionados, a Tabela 7 sumariza estes dados.

Tabela 7- Restrições para a substituição do protótipo físico.

<b>TESTES</b>	<b>RESTRICÇÕES</b>
<i>Roof Crush</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requisito legal requer protótipo físico de validação.</li> </ul>
<i>Impacto Lateral</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Há limitação do modelo de simulação (representação do <i>dummy</i>)</li> <li>Requisito legal requer protótipo físico de validação.</li> </ul>
<i>Stiffness Torsional</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não há restrições</li> </ul>
<i>Penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta software de simulação que represente o sistema de análise.</li> </ul>
<i>Temperatura de Carroceria</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faltam mais correlações com os resultados dos testes físicos.</li> <li>Dificuldade em obter os dados de entrada.</li> </ul>

A segunda etapa da pesquisa de campo, se refere ao roteiro II. No roteiro II haviam questões associadas aos benefícios e dificuldades no uso da simulação. Para a questão associada com os benefícios da simulação, os entrevistados tiveram como opções de resposta uma escala de Likert: concordo plenamente, concordo parcialmente, indiferente, discordo parcialmente e discordo totalmente.

A Figura 4 apresenta a porcentagem de concordância dos entrevistados com 05 fatores previamente determinados como benefícios da simulação.

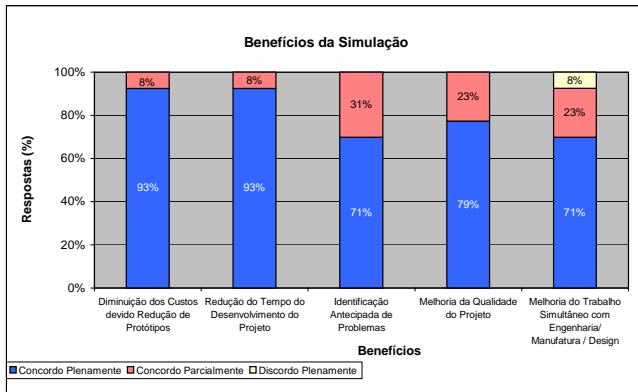


Figura 4: Benefícios da Simulação no Processo de Desenvolvimento de Produtos.

Verifica-se na Figura 4 que houve a concordância por mais de 70% dos entrevistados quanto aos benefícios da simulação, no que concerne à redução de custo e tempo, melhoria da qualidade, verificação antecipada de problemas em relação ao protótipo físico e melhoria do trabalho simultâneo. Com estes dados, conclui-se que a unidade de análise está consciente dos benefícios e há uma postura positiva quanto ao uso da simulação no desenvolvimento e validação do projeto.

O roteiro II permitiu o levantamento das dificuldades e restrições para o uso efetivo da simulação no PDP pelo ponto de vista da unidade de análise. Os dados obtidos estão apontados na Figura 5.

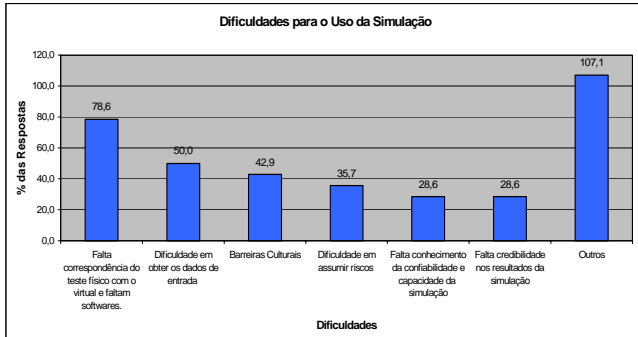


Figura 5 – Dificuldades para o uso da simulação, apontados pela unidade de análise.

Foi identificado pela maioria dos entrevistados do roteiro II como fator limitador para o uso efetivo da simulação em relação à substituição de protótipos, o quesito “Falta de correspondência do teste físico com o virtual e faltam softwares”, coincidindo com os resultados obtidos do roteiro I, em que foram identificados para os testes específicos de penetração de água e impacto lateral as restrições de falta de software e limitação do modelo de simulação, respectivamente.

O quesito “Dificuldade em obter os dados de entrada” foi classificado por 50% dos entrevistados como fator de restrição para o uso efetivo da simulação em relação a substituição de protótipos, também coincidindo com os resultados obtidos do roteiro I, em que foi identificado a dificuldade em obtenção dos dados de entrada para o teste específico de medição de temperatura de carroceria.

O terceiro item mais votado pelos entrevistados corresponde às barreiras culturais, o costume de desenvolver e validar produtos com o uso de protótipos físicos acaba contribuindo como barreira para a migração ao uso da simulação virtual.

Além dos itens descritos acima, a análise documental e a entrevista relativa ao roteiro I apresentaram o fator requisito legal como limitador para a substituição de protótipos físicos para os testes específicos de *roof crush* e impacto lateral, no entanto o item requisito legal não foi apontado como restrição nas entrevistas referentes ao roteiro II. Neste caso, o conjunto de informações da análise documental mais roteiro I e II, permitiram avaliação mais completa dos fatores que bloqueiam o uso da simulação como substituição de protótipos.

Finalmente, destacou-se o fator “Falta de Conhecimento da Capacidade e Confiabilidade de Simulação”, que foi apresentada por aproximadamente 30% dos entrevistados. Considerou-se um item de grande relevância uma vez que esta resposta não estava induzida no questionário do roteiro II, e aparecendo de forma espontânea no quesito outros em vários entrevistados. Portanto, julgou-se adequado separá-lo da categoria outros.

## CONCLUSÕES

A primeira análise é referente à questão, como o processo de desenvolvimento de produtos pode se beneficiar do uso da simulação virtual? e seu respectivo pressuposto, o uso da simulação virtual no PDP contribui para a redução de custos e tempo de implementação do projeto.

A análise conjunta dos dados confirmou os benefícios da simulação, nas diferentes formas de evidências coletadas. A análise documental permitiu a comparação dos resultados dos testes físicos com os testes virtuais indicando o nível de confiabilidade e capacidade da simulação para os testes previamente selecionados, concluindo que todos os testes selecionados permitem redução de protótipos físicos, mas em diferentes proporções, refletindo de maneira geral em menor custo e tempo. O roteiro I também comprovou os benefícios da simulação através da apresentação do custo e tempo da avaliação física e virtual para os testes selecionados para este estudo de caso. O roteiro II através



da percepção dos entrevistados quanto aos benefícios da simulação; e por fim a revisão teórica através dos autores Krouse [5], Clark e Wheelwright [2], Clark e Fujimoto [3] também confirmaram a redução de custo e de *tempo* de implementação do projeto quando se utiliza a simulação virtual em substituição ao protótipo físico.

Além dos benefícios referentes à redução de custos e redução do tempo de implementação do projeto, também foram identificados os seguintes benefícios da simulação: identificação antecipada de problemas, melhoria da qualidade do projeto e melhoria da atividade simultânea entre áreas (Engenharia / Manufatura/ Design). Vale complementar que estes benefícios foram identificados na pesquisa de campo e confirmados na revisão teórica.

A segunda análise é referente à questão: quais os fatores que restringem a aplicação da simulação virtual como substituição de protótipos físicos? e seu respectivo pressuposto, o crescimento da simulação virtual está relacionado ao rompimento de barreiras culturais.

O segundo pressuposto também foi confirmado tanto pela revisão teórica através dos autores Krouse [5] e Murphy; Perera [9] como pela pesquisa de campo através do roteiro I e II. No entanto, as entrevistas e mesmo a revisão teórica apresentaram outros fatores que estão relacionados ao sucesso do uso da simulação, além das barreiras culturais.

Os fatores limitantes mais apontados pela unidade de análise e suportados pela revisão teórica através de Krouse [5] e Murphy; Perera [9] foram: falta de softwares e limitação dos modelos de simulação, dificuldade de obtenção dos dados de entrada, barreiras culturais e falta de conhecimento da capacidade e confiabilidade da simulação.

Embora não mencionado na revisão teórica o fator “requisito legal” pode ser o limitador para substituição de protótipos físicos para alguns testes específicos como identificado na pesquisa de campo.

Confrontando a análise dos dois pressupostos, concluiu-se que os benefícios do uso da simulação virtual vão além da redução de custos e tempo de implementação do projeto, assim como as dificuldades para o uso efetivo da simulação não estão relacionadas apenas as barreiras culturais. Desta forma, os benefícios gerados pelo uso da simulação são de grande importância para a obtenção de um PDP ótimo, portanto alternativas para as dificuldades existentes devem ser trabalhadas, minimizando o seu impacto no PDP.

De acordo com os resultados adquiridos nesta pesquisa, o autor recomenda os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Identificação das prioridades a serem implementadas na unidade de análise, com o objetivo de proporcionar maior redução de protótipos físicos através do uso da simulação.
- Desenvolvimento de um processo para a geração de uma base de dados viva com informações sobre a capacidade e confiabilidade adquirida da simulação virtual, permitindo a identificação da evolução da simulação pela unidade de análise.

## REFERENCIAS

[1] PUGH, S. **Total Design:** integrated methods for successful product engineering. Addison\_Wesley Publishing Company, 1991. 277p.

[2] CLARK K.B., WHEELWRIGHT S. C. **Revolutioning Product Development: Quantum Leaps in Speed Efficiency, and Quality.** New York: The Free Press, 1992, 364p.

[3] CLARK K. B.; FUJIMOTO T. **Product Development Performance:** Strategy, Organization and Management in the World Auto Industry. Boston, Massachusetts : Harvard Business School Press, 1991, 409p.

[4] XU, H. **Concept and Concurrent Analysis and Optimization in a Product Design and Development Process.** SAE Technical Paper Series, Indianapolis, n. 982808, p.1-7, Nov. 1998.

[5] KROUSE J. - **Smarter to Market: How System-Level Virtual Prototyping is helping Automotive Manufactures Raise Their Development Processes to the Next Level of Productivity.** USA, 1999. Disponível em <<http://www.adams.com/solutions/auto>>. Acesso em: 26 Fev. 2003.

[6] PRITSKER, A.A.B. - **Introduction to Simulation and SLAM II.** 3ed. New York: Systems Publishing Corporation, 1986.

[7] ROHDE, S. M. - **GM's Journey to Math – The Virtual Vehicle.** In: DHBA's Annual Conference, USA, 2001. Disponível em: <<http://www.dhbrown.com/dhbrown/superd/jan02/rohde.pdf>>. Acesso em: 30 Set. 2003.

[8] RYAN, R.R. - **Digital Testing in the Context of Digital Engineering: Functional Virtual Prototyping.** Michigan, 2000. Disponível em <<http://www.smartsim.org/content/documents.htm>>. Acesso em 26 Fev. 2003.

[9] MURPHY, S. P.; PERERA, T. Successes and failures in UK/US development of simulation. *Simulation Practice and Theory*, n.9, p.333-348, 2002.

[10] NAKANO, D.N; FLEURY A.C.C. - Métodos de Pesquisa na Engenharia de Produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 16., Piracicaba, 1996. **Anais**. Piracicaba. CD-ROM.

[11] YIN, R.K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205p.