

ANA CRISTINA MONGELLI MARTIN

**AVALIAÇÃO DO USO DA SIMULAÇÃO
VIRTUAL NO PROCESSO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissionalizante).

**CONSULTA
FMP-29**

São Paulo
2004

ANA CRISTINA MONGELLI MARTIN

**AVALIAÇÃO DO USO DA SIMULAÇÃO
VIRTUAL NO PROCESSO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissionalizante).

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dra.
Marly Monteiro de Carvalho

São Paulo
2004

Aos meus pais e a meu marido pelo incentivo e compreensão.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Relatório de Defesa

Relatório de defesa pública de Dissertação do(a) Senhor(a) Ana Cristina Mongelli Martin no Programa: Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 27 dias do mês de janeiro de 2005, realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Ana Cristina Mongelli Martin, apresentada para a obtenção do título de Mestre em Profissional - Área: Engenharia Automotiva, intitulada:

"Avaliação do uso da simulação virtual no processo de desenvolvimento de produtos"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Vínculo do Docente	Sigla da Unidade	Resultado
Marly Monteiro de Carvalho	Presidente	EP	APROVADA
Gabriel Felix Gueler	Titular	Docente Externo	APROVADO
Fernando José Barbin Laurindo	Titular	EP	APROVADO
Resultado Final: APROVADA			
Parecer da Comissão Julgadora			

Eu, Elisabete Aparecida F da Silva Ramos, Técnico Acadêmico, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 27 dias do mês de janeiro de 2005.

Gabriel Felix Gueler
Gabriel Felix Gueler

Fernando José Barbin Laurindo
Fernando José Barbin Laurindo

Marly Monteiro de Carvalho
Marly Monteiro de Carvalho
Orientador(a)

Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório. Nos termos do artigo 110, do RG-USP, encaminhe-se o presente relatório à CPG, para homologação.

AGRADECIMENTOS

A orientadora Prof. Dra Marly Monteiro de Carvalho pelas diretrizes e confiança durante todo o período em que trabalhamos juntas.

Ao colega de trabalho Roberto Ramos, cuja colaboração foi decisiva para a concretização deste trabalho.

Aos gerentes e diretores da General Motors que participaram e contribuíram na obtenção de dados da pesquisa de campo.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi analisar o impacto do uso da simulação virtual no processo de desenvolvimento de produto (PDP). Duas questões centrais direcionaram o desenvolvimento deste trabalho, como o processo de desenvolvimento de produto pode se beneficiar do uso da simulação virtual? e quais os fatores que restringem a aplicação da simulação virtual como substituição de protótipos físicos?

O escopo deste trabalho foi localizado na utilização de softwares de simulação virtual para a análise de performance de novos produtos.

A revisão teórica foi estruturada basicamente pelos seguintes tópicos: a) PDP “modelo tradicional”, denominação utilizada neste trabalho para o PDP sem o uso de simulação virtual, b) evolução dos sistemas computacionais e c) PDP “modelo atual”, processo este que utiliza a simulação para a análise do projeto.

A abordagem metodológica da pesquisa foi o estudo de caso em uma empresa do setor automobilístico – GMB (General Motors do Brasil). Para a coleta de dados foram utilizados os métodos: análise documental, entrevista focal e entrevista tipo levantamento; as entrevistas foram aplicadas diretamente aos gerentes e diretores da Engenharia de produtos.

Confrontando o resultado da pesquisa de campo com a revisão teórica, foi possível analisar os benefícios do uso da simulação virtual assim como os fatores limitadores da simulação para a substituição dos protótipos físicos.

ABSTRACT

The objective of this task was to analyze the impact of virtual simulation use on product development process (PDP). Two fundamental questions involved in the research of the development of this task: how PDP can be benefited with virtual simulation use? and what are the factors that block the virtual simulation application as physical prototype substitution?

The research focus was localized on virtual simulation software for new products performance analysis.

The theoretical content was composed mainly by following subjects: a) PDP “traditional model”, denomination applied in this work to PDP without virtual simulation; b) computational systems evolution and c) PDP “actual model”, process that uses virtual simulation for project analysis.

The research methodology approach was the case study at GMB (General Motors Brasil) in the automotive sector. The analysis was done based on documents and data research with professionals involved on PDP activities and virtual simulation. The data research was done with two questionnaires; interviews were applied to directors and managers from GMB product engineering.

It was possible to analyze the virtual simulation benefits and the restrictions for physical prototypes reduction, due to the results from field research plus theoretical content.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO 1

1.1. Introdução 1

1.2. Objetivos 1

1.3. Conteúdo do Trabalho 2

CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

2.1. Introdução 5

2.2. Fases do processo de desenvolvimento de produto 5

2.2.1. Desenvolvimento conceitual e planejamento de produto 8

2.2.2. Engenharia de Produto 10

2.2.3. Engenharia de Processos 10

2.2.4. Produção piloto 11

2.2.5. Aceleração da produção 11

2.2.6. Revisão das fases 11

2.2.7. Paralelismo das atividades de desenvolvimento de produtos 13

2.3. Processo de desenvolvimento de produto – “modelo tradicional” 15

CAPÍTULO 3 - O USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

3.1. Introdução 19

3.2. Definição da simulação computacional 19

3.3. Evolução dos sistemas computacionais 20

3.4. Processo da simulação computacional 21

3.4.1. Simulação pelo método de elementos finitos 23

3.5. Processo de desenvolvimento de produto – “modelo atual”	28
3.6. Investimentos para a implementação de ferramentas virtuais	32
3.7. Os fatores de sucesso para a implementação do PDP “modelo atual”	34
3.8. Ferramentas complementares para o desenvolvimento de produto	37
3.8.1. CAD – Computer Aided Design	38
3.8.2. Realidade virtual	39
3.8.3. Fábrica virtual	40
3.8.4. CAM – Computer Aided Manufacturing	41
3.8.5. Simulação de processos estampados	42
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE PESQUISA	44
4.1. Introdução	44
4.2. Classificação da pesquisa	44
4.3. Métodos de pesquisa	46
4.4. Plano de pesquisa	47
4.4.1. As questões do plano de pesquisa	48
4.4.2. Os pressupostos do plano de pesquisa	48
4.4.3. Unidade de análise	49
4.4.3.1. Seleção dos testes do estudo de caso	49
4.4.4. Ligação lógica dos dados aos pressupostos	51
4.4.5. Instrumento de coleta de dados	52
4.4.5.1. Teste piloto do questionário roteiro	55
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO	56
5.1. Apresentação do estudo de caso	56
5.1.1. A unidade de análise: Engenharia de Produtos da GMB	57
5.1.2. O processo de desenvolvimento de produtos na GMB	58
5.1.3. Definição da aplicação de protótipos físicos e/ou virtuais	63
5.2. Apresentação e análise dos dados secundários.....	64
5.2.1. Teste 1: roof crush	64
5.2.1.1. Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual	65

5.2.1.2.Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual	66
5.2.2. Teste 2: torsional stiffness	67
5.2.2.1.Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual	68
5.2.2.2.Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual	68
5.2.3. Teste 3: impacto lateral	69
5.2.3.1.Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual	69
5.2.3.2.Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual	70
5.2.4. Teste 4: penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar	71
5.2.4.1.Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual	71
5.2.4.2.Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual	72
5.2.5. Teste 5: medição da temperatura na carroceria	73
5.2.5.1.Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual	73
5.2.5.2.Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual	74
5.3. Apresentação e análise dos dados primários	75
5.3.1. Roteiro I.....	75
5.3.1.1. Evolução da simulação virtual	75
5.3.1.2. Comparação do custo e tempo do teste físico e simulação virtual	78
5.3.1.3. As restrições para a substituição total do protótipo físico e fatores para a melhoria da simulação	81
5.3.2. Roteiro II	83
5.3.2.1.Perfil dos entrevistados	83
5.3.2.2. Percepção dos usuários quanto à capacidade e confiabilidade da simulação	85
5.3.2.3. Benefícios da simulação no PDP	86
5.3.2.4. Dificuldades existentes para o uso efetivo da simulação no PDP	88
5.4. Análise dos resultados da pesquisa de campo face às proposições da pesquisa	90

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	94
6.1. Conclusões finais	94
6.2. Limitação da pesquisa	95
6.3. Sugestões para trabalhos futuros	95
ANEXO A- Roteiro I: Questionário para pesquisa de campo	97
ANEXO B- Roteiro II: Questionário para pesquisa de campo	100
ANEXO C- Descrição simplificada dos procedimentos de testes	105
LISTA DE REFERÊNCIAS	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Fases de desenvolvimento de produto	6
Tabela 2.2	Custo e representatividade por tipo de protótipo físico adaptado de Clark; Wheelwright(1992)	17
Tabela 3.1	Reduções de custos de engenharia, adaptado de Campbell (1998) ...	33
Tabela 3.2	Diferenças culturais entre EUA e RU adaptado de Murphy: Perera (2002)	35
Tabela 4.1	Comparação entre pesquisa qualitativa e quantitativa por Bryman (1989) apud Nakano: Fleury (1996)	46
Tabela 4.2	Condições relevantes de diferentes métodos de pesquisa (YIN,2001)	47
Tabela 4.3	Classificação dos níveis de simulação virtual	51
Tabela 4.4	Instrumento de coleta de dados para o estudo de caso	54
Tabela 5.1	Comparação do teste físico e simulação do roof crush	65
Tabela 5.2	Resultado da simulação do roof crush	67
Tabela 5.3	Comparação do teste físico e simulação de stiffness	68
Tabela 5.4	Resultado da simulação de stiffness	69
Tabela 5.5	Comparação do teste físico e simulação de impacto lateral	70
Tabela 5.6	Resultado da simulação de impacto lateral	71
Tabela 5.7	Comparação do teste físico e simulação de penetração de água	71
Tabela 5.8	Resultado da simulação de penetração de água	72
Tabela 5.9	Comparação do teste físico e simulação de temperatura de carroceria	73
Tabela 5.10	Resultado da simulação de temperatura de carroceria	74
Tabela 5.11	Evolução de simulação de acordo critério da Tabela 4.3	75
Tabela 5.12	Fatores relacionados ao custo e tempo do teste físico e simulação ...	78
Tabela 5.13	Relação de custo e tempo para o primeiro protótipo físico e a primeira simulação	79
Tabela 5.14	Comparação do tempo e custo do protótipo físico e simulação para a primeira avaliação e avaliação adicional	81

Tabela 5.15	Restrições para substituição total do protótipo físico e fatores para a melhoria da simulação	82
-------------	---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Etapas do trabalho	3
Figura 2.1	Fases do processo de desenvolvimento de produto adaptado de Clark; Wheelwright (1992)	7
Figura 2.2	Processo de desenvolvimento (CARVALHO, 2001)	8
Figura 2.3	Fases e gates do PDP adaptado de Rosenthal (1992)	12
Figura 2.4	Modelo flexível de desenvolvimento de produto adaptado de MacCormack; Verganti; Iansiti (2001)	15
Figura 2.5	Ciclo de protótipos do PDP “modelo tradicional”, adaptado de Xu (1998)	18
Figura 3.1	Uso relativo de protótipos para a análise de vibração e ruído, adaptado de Clark; Fujimoto (1991)	20
Figura 3.2	Comparação da representação gráfica de softwares comerciais de simulação com os testes físicos	23
Figura 3.3	Exemplo do modelo de uma carroceria em elementos finitos	24
Figura 3.4	Processo de análise por elementos finitos adaptado de Bathe (1996)	27
Figura 3.5	Comparação do PDP “modelo tradicional” como o PDP “modelo atual”, adaptado de Krouse (1999)	30
Figura 3.6	PDP “modelo atual” adaptado de Xu (1998)	31
Figura 5.1	Organograma simplificado da unidade de análise do estudo de caso	58
Figura 5.2	Processo de desenvolvimento de produto adaptado de General Motors (2003b)	62
Figura 5.3	Entradas necessárias para o plano de análise, desenvolvimento e validação do veículo	64
Figura 5.4	Curva de resposta do teste físico e simulação do roof crush	67
Figura 5.5	Simulação virtual aplicada nos projetos	76
Figura 5.6	Classificação geral dos entrevistados por faixa de idade	84
Figura 5.7	Classificação geral dos entrevistados por tempo de experiência	84
Figura 5.8	Percepção dos entrevistados quanto à capacidade de simulação	85
Figura 5.9	Benefícios da simulação no PDP	87
Figura 5.10	Dificuldades para o uso da simulação	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CAD – *Computer Aided Design*
- CAE – *Computer Aided Engineering*
- CAM – *Computer Aided Manufacturing*
- CAVE – *Cave Automatic Virtual Environment*
- CNC – *Computer Numerical Control*
- DFA – *Design for Assembly*
- DFC – *Design for Cost*
- DFM – *Design for Manufacturing*
- ECE R95-01 – *Economic Commission European R95-01*
- EUA – *Estados Unidos da America*
- FMVSS216 – *Federal Motor Vehicle Safety Standard 216*
- GMB – *General Motors do Brasil*
- GMI L 1-8 – *General Motors International Engineering Standard L -1-8*
- GMI LI-1C-1 – *General Motors International Engineering Standard LI-1C-1*
- GVDP – *Global Vehicle Development Process*
- PDP – *Processo de Desenvolvimento de Produto*
- PPS – *Product Program Submission*
- R.AB.06.090 – *Teste de rodagem abusivo 06.090*
- R.AR.13.022 – *Teste de rodagem de arrefecimento 13.022*
- RU – *Reino Unido*
- VSAS- *Virtual Synthesis, Analysis and Simulation*
- VTS – *Vehicle Technical Specification*

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1 Introdução

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.

De acordo Eversheim (1997), para satisfazer os consumidores, três pontos chaves devem ser considerados no PDP: custo, tempo e qualidade. Estes três itens podem ser traduzidos em objetivos:

- redução do período entre a concepção do produto e introdução no mercado,
- redução dos custos de desenvolvimento e de produção,
- melhoria da qualidade do produto.

A competitividade do setor automobilístico está muito forte, portanto, é necessário buscar vantagens competitivas para atrair o consumidor e o diferencial pode ser obtido através do PDP. 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, a simulação virtual baseada no software *CAE (Computer Aided Engineering)* foi escolhida como objeto de estudo deste trabalho devido a significativa oportunidade de redução de custo e tempo de implementação do projeto.

1.2 Objetivos

O objetivo desta pesquisa corresponde à análise da aplicação de recentes ferramentas de simulação virtual no processo de desenvolvimento e validação do projeto.

Com a ferramenta de simulação baseada na estrutura CAE é possível a análise do projeto anteriormente à construção do protótipo físico, permitindo rápidas avaliações com custo reduzido e conseqüentemente a definição da melhor concepção do projeto.

Este trabalho busca a identificação dos benefícios e das restrições do uso da simulação como ferramenta de substituição de protótipos físicos no PDP, objetivando responder as seguintes perguntas:

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

Para responder as perguntas citadas, foram estabelecidos dois pressupostos:

- O uso da simulação virtual no processo de desenvolvimento de produto contribui para a redução de custos e tempo de implementação do projeto.
- O crescimento do uso da simulação virtual como substituição aos protótipos físicos está relacionado ao rompimento de barreiras culturais.

1.3 Conteúdo do trabalho

A Figura 1.1 apresenta as etapas gerais do trabalho, iniciou-se com a pesquisa bibliográfica, seguindo pelo estudo e escolha da metodologia adequada para o alcance dos objetivos traçados. Os meios definidos para a obtenção de dados foram a análise documental e entrevistas em campo. As entrevistas em campo foram feitas através de dois roteiros específicos, o primeiro foi aplicado para o gerente do departamento de *VSAS (Virtual Synthesis, Analysis and Simulation)*, o segundo foi aplicado para os gerentes e diretores da Engenharia de Projetos e Engenharia de Operações e Validações. O resultado da análise dos documentos, entrevistas e revisão bibliográfica permitiram o alcance de conclusões e recomendações.

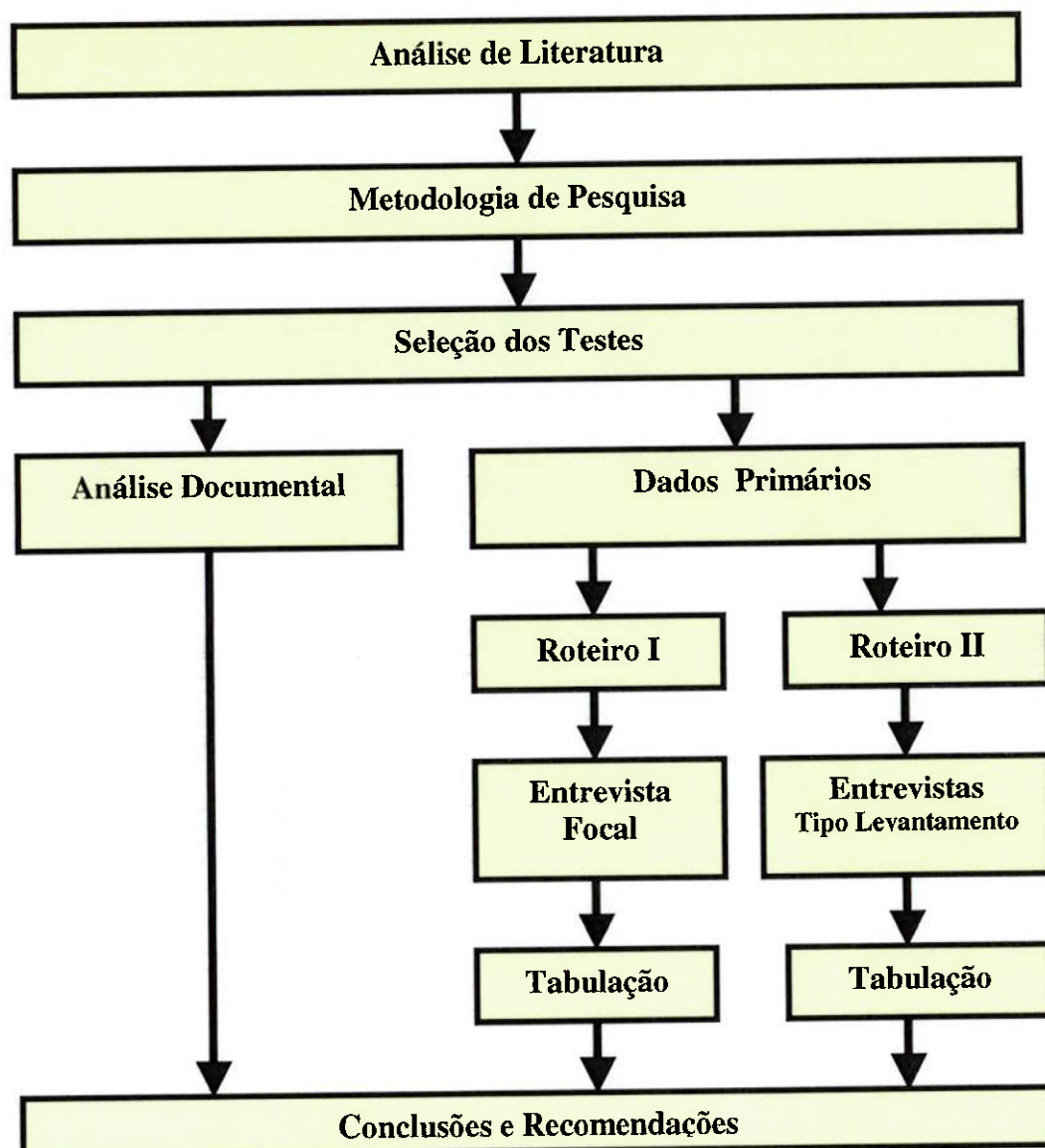


Figura 1.1- Etapas do trabalho

O trabalho está dividido em capítulos, onde o primeiro capítulo apresenta os objetivos e o conteúdo deste trabalho.

O segundo e terceiro capítulo correspondem à revisão bibliográfica, iniciando pelas fases que compõem o PDP, seguindo pela abordagem tradicional do PDP, inclusão das ferramentas virtuais e sua influência no PDP.

O capítulo quatro aborda a metodologia e o plano de pesquisa, indicando o método de estudo de caso como mais adequado para atingir os objetivos traçados neste trabalho.

O capítulo cinco apresenta a pesquisa de campo, com a exposição e análise das informações levantadas através de documentos e entrevistas.

E finalizando, o capítulo seis apresenta as conclusões e recomendações de acordo análise dos resultados do estudo de caso e revisão bibliográfica.

CAPÍTULO 2 – DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo compreende basicamente a análise das fases que compõem o PDP, seguindo com a apresentação do “modelo tradicional” do PDP. A denominação “modelo tradicional” é caracterizada pelo desenvolvimento e validação do projeto através de protótipos físicos. Os termos “modelo tradicional” e “modelo atual” adotados neste trabalho têm apenas o objetivo de facilitar a referência do tipo de PDP.

2.2 Fases do processo de desenvolvimento de produto

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

Existem diversas abordagens disponíveis na literatura no que concerne às fases do PDP, a Tabela 2.1 sintetiza as fases de desenvolvimento segundo os autores clássicos. Pode-se verificar que não existem muitas diferenças entre as abordagens quanto às fases do PDP.

Tabela 2.1- Fases de desenvolvimento de produto.

Clark & Wheelwright (1992)	Clark & Fujimoto (1991)	Pugh (1991)
1. Desenvolvimento Conceitual	1. Desenvolvimento Conceitual	1. Requisitos de Mercado
2. Planejamento do Produto	2. Planejamento do Produto	2. Design Conceitual
3. Engenharia de Produto / Processo	3. Engenharia do Produto	3. Especificação do Produto
4. Produção Piloto / Aumento da Produção	4. Engenharia de Processo	4. Detalhamento do Projeto
		5. Manufatura
		6. Vendas

Segundo Carvalho (2001), o modelo proposto por Pugh (1991), conhecido como *Total Design* (design total) é o que está segmentado em maior número de fases, também designadas de *core phases*. Destaca-se ainda que Pugh (1991) faz distinção entre os conceitos dinâmicos e estáticos no desenvolvimento de produtos, conforme será apresentado no detalhamento das fases.

A Figura 2.1 representa as fases de desenvolvimento de produto assim como o paralelismo entre as atividades segundo Clark; Wheelwright (1992), a descrição das fases será abordada nos tópicos seguintes deste capítulo.

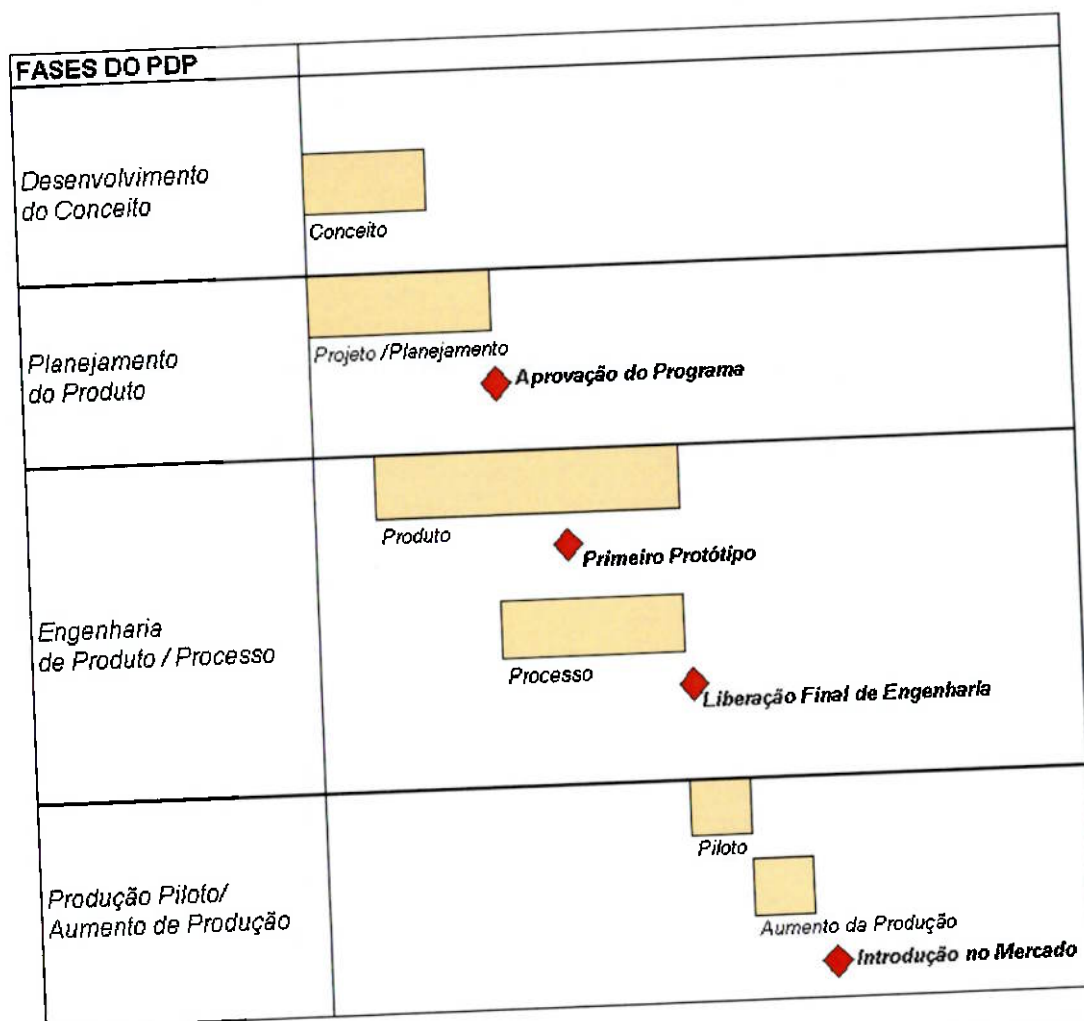


Figura 2.1- Fases do processo de desenvolvimento de produto adaptado de Clark; Wheelwright (1992).

Carvalho (2001) enfatiza a simultaneidade entre as fases como um aspecto decisivo para o sucesso do PDP, conforme ilustra a Figura 2.2. Segundo Clausing (1994) apud Carvalho (1997), o processo integrado chamado de engenharia simultânea têm duas características principais: (a) é um processo simultâneo e (b) é conduzido por um time multifuncional de desenvolvimento.

Carvalho (2001) argumenta também que o projeto do produto deve estar alinhado às estratégias da organização, o que pode resultar em ênfases específicas que terão influência no PDP (design for Xs), ou seja, projeto para a manufatura (*DFM- Design for Manufacturing*), para montagem (*DFA- Design for Assembly*), para custos (*DFC - Design for Cost*), entre outros.

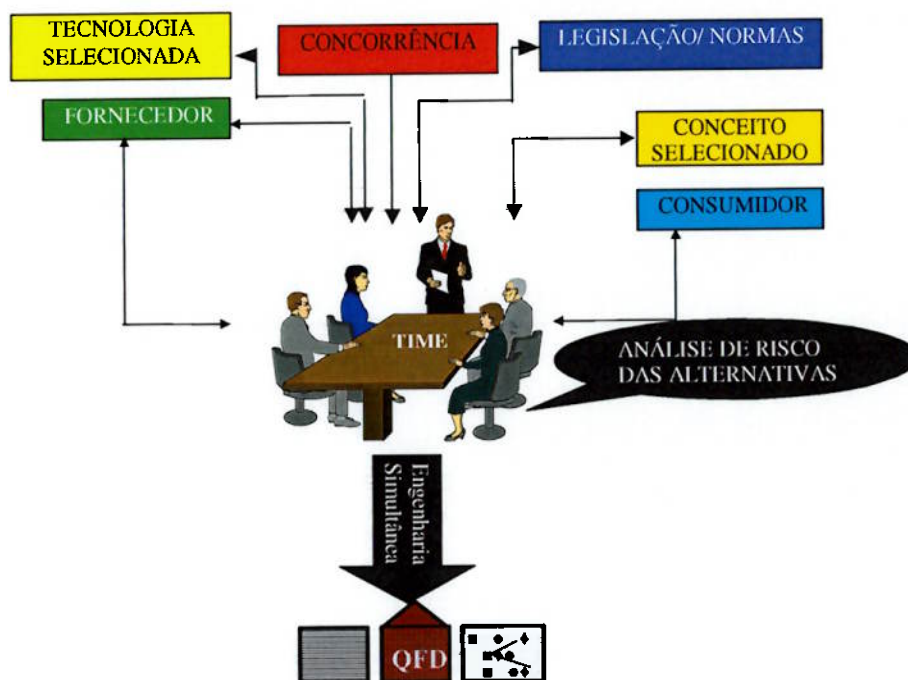


Figura 2.2 – Processo de desenvolvimento (CARVALHO, 2001).

2.2.1 Desenvolvimento conceitual e planejamento de produto

Na fase conceitual, as informações sobre necessidades futuras do mercado, análise da concorrência, possibilidades tecnológicas e viabilidade econômica são combinadas e traduzidas para a formação do projeto conceitual, já nesta fase podem ser utilizados protótipos em *clay* (argila) para a aprovação do projeto conceitual (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

O projeto conceitual especifica como as funções básicas associadas com o veículo completo irão atrair e satisfazer os consumidores. Já nesta fase a interação entre departamentos garante a coerência do produto conceitual, onde fatores como manufaturabilidade, restrições de produção, estilo, considerações de custo e outros já estão sendo considerados (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

No planejamento de produto ocorre a conversão do projeto conceitual em definições mais concretas, incluindo a determinação do mercado alvo, o fator de desempenho esperado, a escolha dos componentes, o estilo, o *layout* (plano de distribuição dos

componentes mecânicos, da estrutura de carroceria, dos passageiros e do portamalas), e assim como o cálculo do investimento requerido e impacto financeiro para a implementação do projeto. Este estágio corresponde à ponte do projeto conceitual para o detalhamento do produto (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

Pugh (1991) especifica o processo de desenvolvimento de produto sob duas abordagens: o processo dinâmico para produtos inovadores e o estático para o produto convencional, conforme citado anteriormente. Por outro lado, os autores Clark; Fujimoto (1991) e Clark; Wheelwright (1992) não fazem esta distinção.

O Processo estático é aplicado para produtos cujo conceito base é considerado como fixo e as mudanças do produto estão no nível de componentes e subsistemas. Pugh (1991) cita alguns exemplos de produtos que seguem o processo estático: bicicletas, automóveis, tesouras e tratores.

No processo de desenvolvimento de produto estático, a seqüência das fases iniciais do processo equivale a especificações de mercado, design conceito – que neste caso já está previamente definido e especificações de produto (PUGH,1991).

Já o processo dinâmico é aplicado para produtos inovadores onde as mudanças não ocorrem somente no nível de componentes, mas na formação do conceito geral do produto, desta forma as fases iniciais do desenvolvimento de produto seguem as especificações de mercado, especificações de produto e design conceito (PUGH,1991). Pode-se citar como exemplo de processo dinâmico o processo de desenvolvimento do micro-ondas na época de sua criação ou o desenvolvimento de motores com combustíveis alternativos.

As especificações de produto correspondem à referência básica para geração do design conceito no caso do processo dinâmico e do detalhamento do produto para o processo estático. A especificação do produto fornece informações como fatores de performance, condições do meio-ambiente, política de manutenção, tamanho, peso,

ergonomia, vida útil, normas a serem seguidas, bem como o prazo para desenvolvimento e outros (PUGH, 1991).

2.2.2 Engenharia de Produto

Após aprovação do programa se inicia o detalhamento do produto e a construção de protótipos, em paralelo ocorre o desenvolvimento de ferramentas e equipamentos pela Engenharia de Processos para atender a produção, como indicado pela Figura 2.1 (CLARK; FUJIMOTO, 1991); (PUGH,1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

A fase de detalhamento do produto compreende 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 (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

É justamente esta fase do processo do desenvolvimento que será discutida neste trabalho, devido às oportunidades de otimização dos ciclos de “projeto – construção – teste” com a utilização de simulações virtuais.

2.2.3 Engenharia de Processos

A fase seguinte corresponde à Engenharia de Processo em que a informação do projeto do produto é convertida em informações para a construção de equipamentos, ferramentas, software de controle da produção, conhecimento operacional e procedimentos operacionais (CLARK; FUJIMOTO, 1991); (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992) e (PUGH, 1991).

A Engenharia de Processo assim como a Engenharia de Produto, realizam uma seqüência de ciclos “projeto–construção-teste”. São desenvolvidos planejamentos para os processos e detalhamento das ferramentas e equipamentos, seguindo com a

fabricação, instalação, processo de análise, teste dos equipamentos, conduzindo finalmente à fase piloto (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

2.2.4 Produção piloto

A fase seguinte se refere à fase piloto, onde várias unidades são produzidas com o objetivo de avaliar e validar os processos de produção, onde estão incluídos os equipamentos e ferramentas de produção assim como a seqüência de montagem piloto (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

2.2.5 Aceleração da produção

A fase final de desenvolvimento corresponde ao aumento do volume de produção, o processo se inicia com baixo volume de produção até que a organização esteja confiante quanto ao desempenho de suas instalações e do suprimento de fornecedores, garantindo que a produção atinja as metas de custo, qualidade e volume estabelecidos, já nesta fase os produtos são vendáveis (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

2.2.6 Revisão das fases

A conclusão de cada fase do desenvolvimento do produto geralmente é marcada pela avaliação de desempenho e progresso do projeto, Rosenthal (1992) denomina como *gates* estas avaliações no final de cada fase, a Figura 2.3 apresenta as fases do desenvolvimento de produto e os respectivos *gates*.

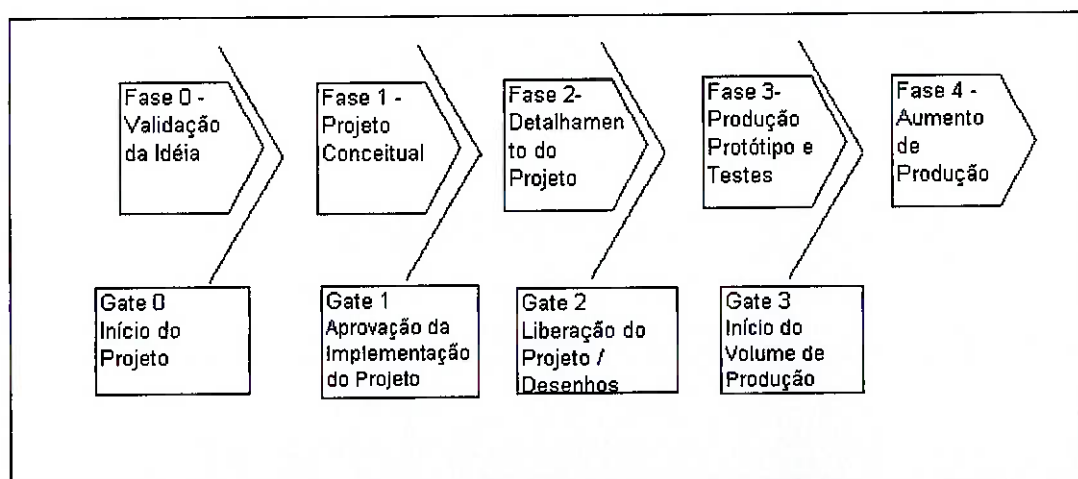


Figura 2.3- Fases e *gates* do PDP adaptado de Rosenthal (1992).

Os *gates* correspondem a um fórum formado por gerentes e diretores de todas as áreas que revisam o progresso do projeto do produto e desenvolvimento do projeto ao final de cada fase, cada *gate* envolve a revisão formal do projeto comparando com as metas originais de funcionalidade, qualidade e custo. O objetivo da revisão do projeto é permitir o controle do mesmo, provendo importante retorno da alta gerência e aprovações para o início das fases seguintes (ROSENTHAL, 1992).

Valeriano (1998) apud Valeri (2000), defende que as revisões de fases devem ser planejadas para épocas específicas, com referência à conclusão das fases. Os objetivos variam com a maturidade dos trabalhos e são instrumentos essenciais para a autorização de início das fases seguintes, culminando em uma revisão final de avaliação de projeto. Seguem as finalidades abordadas da revisão de fases:

- Determinação do grau de evolução do projeto atingido,
- Conferir o balanço de custos e benefícios,
- Reorientar o trabalho no sentido dos objetivos desejados,
- Diminuir os riscos do projeto,
- Dar condições para iniciar a próxima fase do trabalho.

2.2.7 Paralelismo das atividades de desenvolvimento de produtos

As fases do processo de desenvolvimento de produto descrito no tópico 2.2.1 a 2.2.5, já consideram a implementação da engenharia simultânea, uma vez que pode ser observado o paralelismo das fases que compõem o PDP através da Figura 2.1.

A partir dos anos 80 foi observado aumento do grau de paralelismo das atividades relacionadas ao PDP; as atividades que eram realizadas somente após o término e aprovação das atividades anteriores são antecipadas de forma que seu início não dependa dos demorados ciclos de aprovação (ROZENFELD; ZANCUL, 1999).

A filosofia que envolve a engenharia simultânea têm como base a formação de equipes multifuncionais com representantes de diversas áreas da empresa para acompanhar e definir o desenvolvimento do produto (ROZENFELD; ZANCUL, 1999). Clausing (1994) apud Carvalho (2001) corrobora também com esta visão, enfatizando que a engenharia simultânea tem duas características essenciais: (a) é um processo integrado e simultâneo; (b) é conduzido por um time multifuncional de desenvolvimento.

Os recursos computacionais CAD (*Computer Aided Design*) e CAE facilitaram a aplicação da engenharia simultânea, uma vez que o acesso aos dados e informações de produtos e processos é fator decisivo para a integração entre áreas (ROZENFELD; ZANCUL, 1999).

Segundo Pugh (1991), as atividades de projeto e de manufatura estiveram separadas por muito tempo, resultando em atividades seqüenciais, obviamente o projeto deve iniciar primeiramente que o processo de manufatura, mas o problema estava em não envolver os engenheiros de processo desde o início do projeto de produto. Conseqüentemente, o projeto de manufatura se atrasava até que o projeto de produto estivesse concluído, resultando em longos períodos de desenvolvimento desde a fase conceito até a introdução no mercado, assim como produtos ruins.

Para Clark; Fujimoto (1991), a Engenharia de Produto precisa estar ciente das implicações da manufaturabilidade de seus projetos, assim como a Engenharia de Processo deve deixar claro quais são as dificuldades e oportunidades no processo e permitir uma medida de flexibilidade para lidar com alterações do projeto do produto.

A importância da interação entre Engenharia de Processos e Engenharia de Produto desde o início do desenvolvimento do produto se aplica também para todas as demais áreas da empresa, como Marketing, Vendas, Qualidade, Design (departamento responsável pela definição do estilo, forma do veículo), Produção, etc. Os bons produtos e processos são alcançados quando todas as atividades funcionais da empresa se convergem (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

A substituição das atividades sequenciais para a realização das atividades paralelas no processo de desenvolvimento de produto permitiu a redução de custo e tempo para a introdução do produto no mercado. Rosenthal (1992), relaciona os seguintes benefícios e considerações sobre a engenharia simultânea:

- A disciplina no processo de desenvolvimento de produto é fortalecida devido à responsabilidade de vários departamentos para a geração de decisões efetivas no processo e produto.
- Identificação antecipada de problemas e conseqüente redução de risco para o programa.
- O processo de resolução de problemas é fortalecido devido forte interação dos funcionários para atingir um objetivo comum.
- É requerida comunicação extra e flexibilidade entre áreas, gerenciando o risco de trabalho com informações preliminares e possíveis alterações futuras.

No entanto, Rosenthal (1992) destaca que o fluxo de informações entre departamentos deve estar bem estruturado para que permita a aplicação adequada da engenharia simultânea.

Para MacCormack; Verganti; Iansiti (2001), o processo de desenvolvimento flexível requer feedback de desempenho desde as fases iniciais, conforme ilustra a Figura 2.4, este modelo enfatiza a habilidade de gerar e responder novas informações em uma proporção mais longa do ciclo de desenvolvimento, resultando em projetos de melhor performance. Os autores argumentam ainda que a gênese deste tipo de desenvolvimento flexível está na indústria de softwares em que as versões preliminares são disponibilizadas para teste em diferentes estágios do ciclo de desenvolvimento (LAURINDO; CARVALHO, 2002).

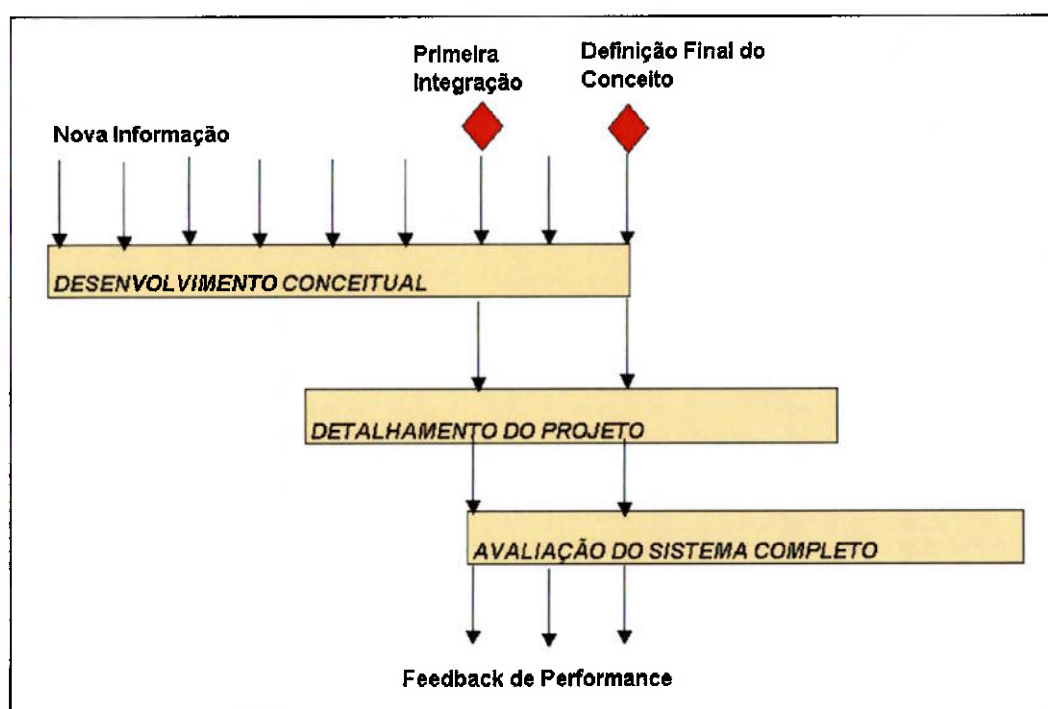


Figura 2.4 – Modelo flexível de desenvolvimento de produto adaptado de MacCormack; Verganti; Iansiti (2001).

2.3 Processo de desenvolvimento de produto – “modelo tradicional”

Em referência ao tópico 2.2- Fases do processo de desenvolvimento de produto, será foco deste trabalho a fase denominada “Engenharia de Produto” caracterizada pelo detalhamento e avaliação do projeto, é nesta fase que está inserido o ciclo de protótipos para a validação do projeto.

De acordo Clark; Fujimoto (1991), a Engenharia de Produto pode utilizar diversos tipos de protótipos. Nas fases iniciais de desenvolvimento de produto têm-se os modelos usinados em *clay* (argila), peças protótipos feitas com materiais alternativos denominadas mock-up's e protótipos mecânicos que representam o produto apenas parcialmente. O modelo em *clay* representa externamente o veículo, mas não é funcional, o protótipo mecânico permite análise de chassis como suspensão, freios e direção reproduzindo fielmente a dirigibilidade do novo modelo, mas não representa a estrutura da carroceria e nem a forma externa. Estes primeiros protótipos representam a primeira oportunidade para a análise física do veículo. Finalmente, tem-se o protótipo completo que representa fielmente o produto final.

Conforme Clark; Wheelwright (1992) os protótipos iniciais como o *clay*, representam baixo custo para o projeto e podem ser construídos rapidamente, no entanto sua representatividade é menor quanto a material, forma, montagem e processo de fabricação; já os protótipos completos que representam todo o sistema são extremamente caros e de longo período de construção, no entanto possuem alto índice de representatividade. A Tabela 2.2 apresenta um comparativo de custo e representatividade do protótipo em *clay*, protótipo mecânico e protótipo completo.

Tabela 2.2 - Custo e representatividade por tipo de protótipo físico adaptado de Clark; Wheelwright (1992).

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

No setor automobilístico, o custo do protótipo completo de engenharia representa um custo muito alto porque é produzido com dispositivos e ferramentais específicos para a construção e montagem de um lote reduzido de veículos.

No “modelo tradicional” de desenvolvimento de produto apresentado por Clark; Fujimoto (1991) e Clark; Wheelwright (1992), a fase de detalhamento de projeto é constituída por vários ciclos de evolução de protótipos, a seqüência dos ciclos correspondem a um processo de aprendizado no qual o conhecimento e solução dos problemas requerem tempo extra de desenvolvimento. Os ciclos somente devem ser encerrados quando soluções aceitáveis forem desenvolvidas.

Para Xu (1998), o processo de desenvolvimento tradicional está estruturado na fase de testes que segue como ciclo de erro e acerto, a fase de testes do PDP não corresponde apenas à validação do produto, mas também a uma ferramenta de desenvolvimento e aprendizado. Se o projeto não está adequado, melhorias ou

correções são feitas baseadas na experiência e o processo se torna extenso uma vez que a melhoria só será conferida no protótipo físico.

Xu (1998), considera o ciclo tradicional tipicamente como ciclo de projeto e teste como mostrado na Figura 2.5:

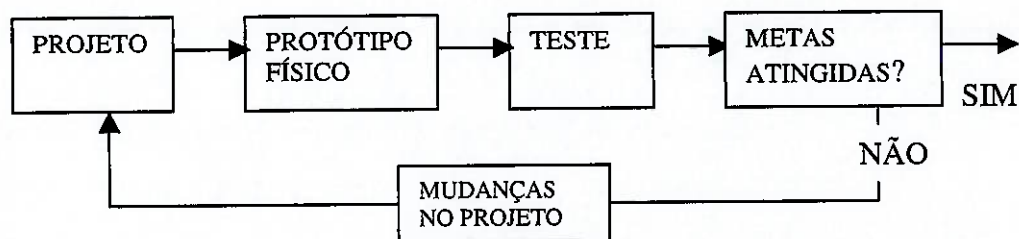


Figura 2.5- Ciclo de protótipos do PDP “modelo tradicional”, adaptado de Xu, (1998).

Segundo Krouse (1999), o ciclo tradicional de desenvolvimento é de alto custo e corresponde a um método de longo prazo, uma vez que está fundamentado na construção e teste de protótipos físicos. Nas empresas automobilísticas, após extensa revisão do detalhamento dos desenhos de engenharia, o protótipo físico é construído e testado, onde são detectadas deficiências estruturais e de performance. Os resultados dos testes retornam à engenharia e o projeto sofre modificações, assim vários ciclos de revisão do projeto, construção e teste são requeridos até alcançar a performance satisfatória.

O desenvolvimento de produto “tradicional” está baseado na seqüência de ciclos de protótipos físicos, passando dos modelos iniciais como o *clay*, protótipos físicos mecânicos e peças *mockup's* para protótipos completos e unidades de produção - piloto. Portanto, o “modelo tradicional” de PDP se apresenta bastante extenso devido aos sucessivos ciclos de protótipos até obtenção das metas estipuladas para o projeto, gerando altos custos de desenvolvimento e longo período para introdução do produto no mercado.

CAPÍTULO 3 – O USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Este capítulo compreende basicamente os conceitos e a evolução da simulação computacional, e análise do “modelo atual” do PDP, caracterizado pelo desenvolvimento e validação do projeto através de protótipos físicos e virtuais.

A aplicação de protótipos virtuais no PDP foi possível com o aparecimento de técnicas como a de elementos finitos e avanços computacionais permitindo a resolução de problemas complexos.

3.2 Definição da simulação computacional

Segundo Pritsker (1986), 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. Estes experimentos permitem avaliações dos sistemas:

- Sem a construção de protótipos físicos,
- Sem distúrbios dos mesmos, se os sistemas estão em operação e o risco ou custo do experimento físico é alto,
- Sem destruí-los, se o objeto do experimento corresponde à determinação de limites de resistência mecânica.

Desta maneira, os modelos de simulação podem ser utilizados para projeto, procedimentos de análise e avaliação de performance (PRITSKER, 1986).

3.3 Evolução dos sistemas computacionais

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 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 (CLARK; FUJIMOTO, 1991) e (CLARK; WHEELWRIGHT, 1992).

No final da década de 80, ainda era constatado alto número de protótipos físicos utilizados para a validação de projetos no setor automobilístico, a Figura 3.1 mostra que 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, mesmo os mais avançados computadores apresentavam problemas para gerar as simulações de sistemas complexos (CLARK; FUJIMOTO, 1991).

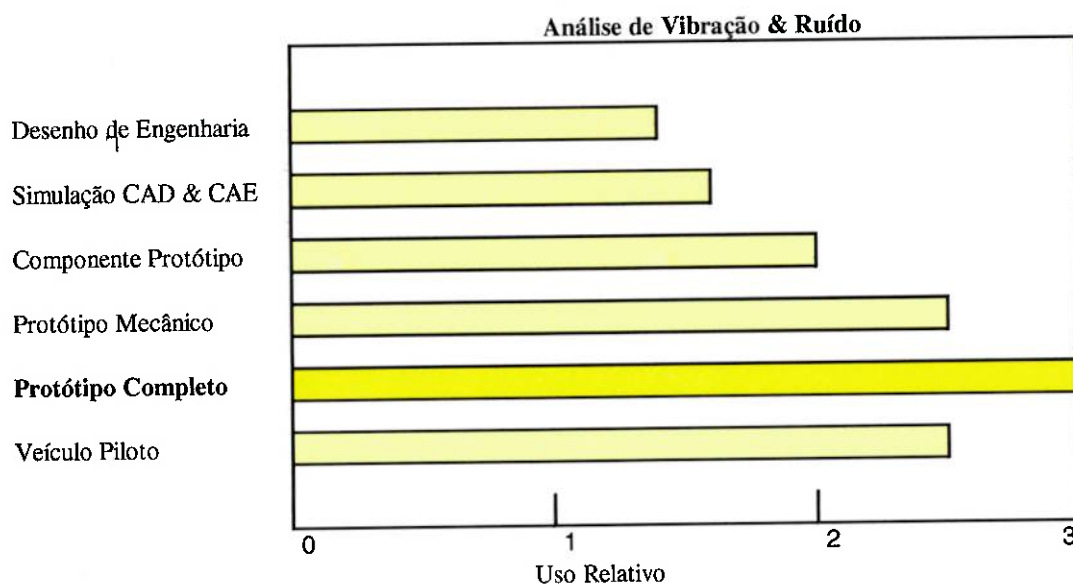


Figura 3.1 – Uso relativo de protótipos para a análise de vibração e ruído adaptado de Clark; Fujimoto (1991).

No entanto, uma série de fatores tornou possível a utilização mais intensa das simulações virtuais (RYAN, 2000):

- 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.

Além dos itens citados, o incremento da velocidade dos servidores de cálculo também é um fator importante para a ampliação do uso da simulação.

A literatura clássica do início da década de 90 previa potencial redução de custo e tempo no ciclo de desenvolvimento com o uso dos modelos de simulação CAE, mas que na época ainda eram pouco utilizados para a análise de sistemas devido à complexidade de resolução. No entanto, os constantes avanços da tecnologia permitiram o uso crescente das ferramentas virtuais.

3.4 Processo da simulação computacional

Para Pritsker (1986) o processo para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional está baseado nas seguintes etapas:

1. **Formulação do Problema:** Consiste na definição clara do problema assim como os objetivos da análise.
2. **Construção do Modelo:** corresponde à correlação do sistema com a lógica matemática de acordo com a formulação do problema.
3. **Aquisição de Dados:** Identificação, especificação e coleta de dados.
4. **Tradução do Modelo:** Preparação do modelo para processamento por computador.

5. Verificação: Consiste na confirmação se o modelo executa conforme a intenção estabelecida, este processo pode ser feito pela checagem dos cálculos da simulação.
6. Validação: Processo de verificação se a desejada precisão ou correspondência existe entre o modelo de simulação e o sistema real.
7. Planejamento Estratégico e Tático: Processo para estabelecer condições para uso do modelo.
8. Experimento: Execução do modelo de simulação para obtenção dos resultados.
9. Análise dos Resultados: Processo de análise dos resultados para obter recomendações para a solução do problema.
10. Implementação e Documentação: processo de implementação das decisões resultantes da simulação e documentação do modelo e seu uso.

Segundo Pritsker (1986), a simulação é uma técnica que tem sido largamente utilizada pela indústria e instituições governamentais, tem sido empregada em estudos dos mais variados sistemas, como sistemas urbanos, de negócios, produtivos, biológicos, de transporte, de saúde e muitos outros. Exemplos de algumas áreas de aplicação de técnicas de simulação:

- Controle de Tráfego (aéreo, ferroviário, urbano),
- Programação da Manutenção de Aeronaves,
- Programação de Linhas de Montagem,
- Layout de Fábricas,
- Projeção de pesquisas eleitorais,
- Projetos de Aeroportos.

Muitos *softwares* comerciais de simulação desenvolvidos especificamente para a indústria automobilística estão disponíveis no mercado, são programas para simulação de impacto, consumo de combustível, análise de fadiga, vibração, análise estrutural, durabilidade e muitos outros, a Figura 3.2 apresenta a representação gráfica de softwares comerciais de simulação virtual comparando com o protótipo físico em teste. A maioria dos programas está baseada no processo de simulação

computacional pelo método de elementos finitos, que será apresentado no tópico 3.4.1.

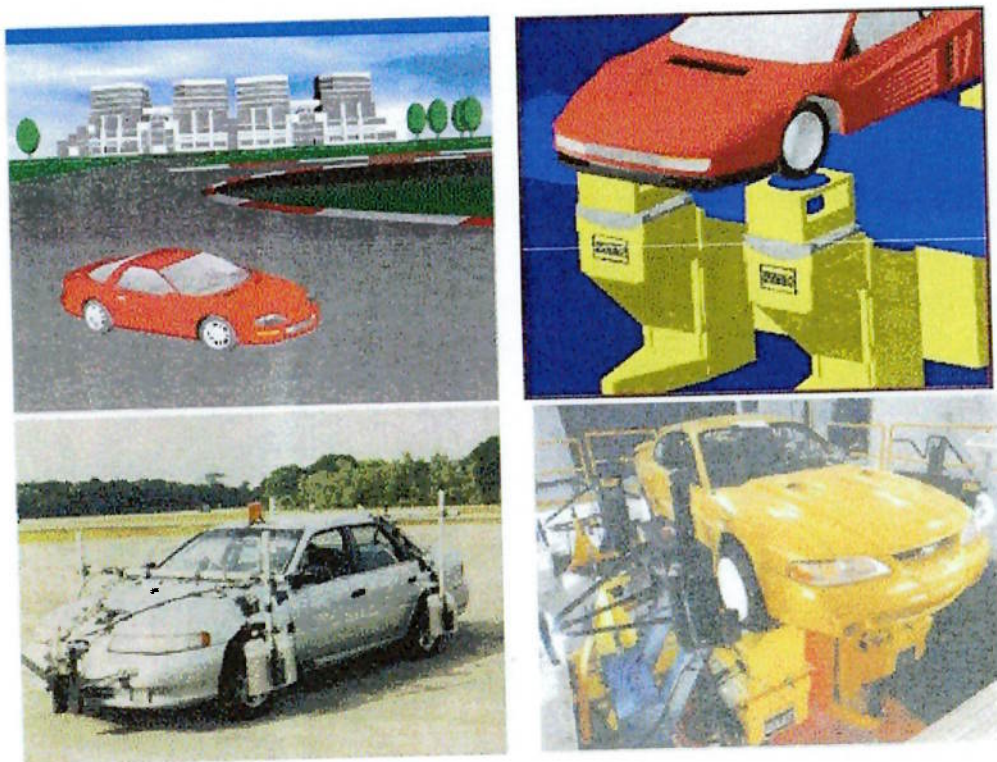


Figura 3.2: Comparação da representação gráfica de softwares comerciais de simulação com os testes físicos (RYAN , 2000).

3.4.1 Simulação pelo método de elementos finitos

O software CAE é usado para a simulação do comportamento de componentes ou sistemas na situação real de operação, se o CAE é capaz de simular o comportamento real do produto, este permite ao engenheiro avaliar com precisão o projeto feito no CAD sem precisar fabricar protótipos (SILVA, 2001).

O sistema de simulação CAE está baseado principalmente no método de elementos finitos, que foi inicialmente desenvolvido para análise de questões estruturais, entretanto, o método foi reconhecido permitindo a extensão de sua aplicação para diversas áreas como análise térmica, dinâmica de fluidos, vibrações e ruídos (ver Figura 3.3).

O procedimento de elementos finitos trabalha com uma série de equações algébricas simultaneamente, portanto somente com a evolução dos computadores foi possível aumentar a sua aplicação uma vez que a limitação da análise de elementos finitos está relacionada com a performance do hardware de acordo Ramos¹.

O conceito básico de simulação pelo método de elementos finitos de acordo Ramos¹ corresponde à:

- Preparação do modelo de elementos finitos, o mesmo é gerado através de uma ferramenta que permite ao engenheiro capturar a informação geométrica do software CAD. Em seguida, a geometria é dividida 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 mais as condições de contorno através de um sistema de cálculos denominado solver, fornecendo o resultado do teste de simulação que serão visualizados através de uma ferramenta específica de visualização.

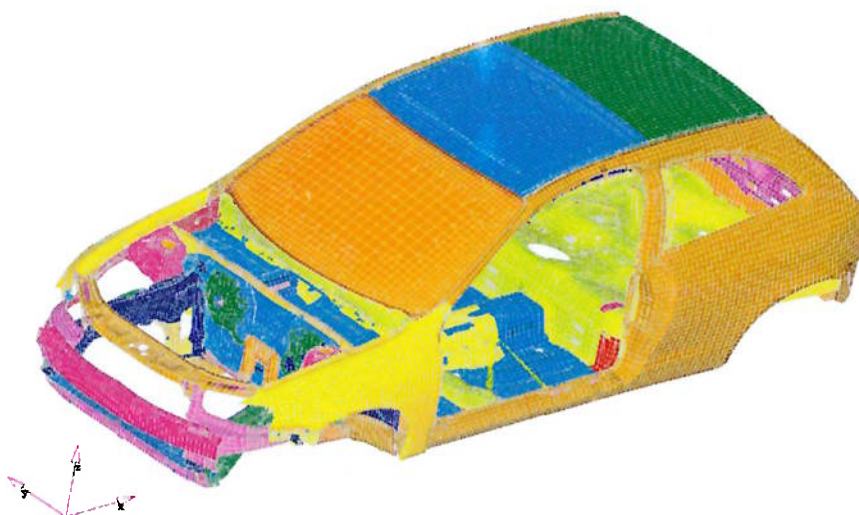


Figura 3.3- Exemplo do modelo de uma carroceira em elementos finitos.

¹ RAMOS, R. **Simulação aplicada a Engenharia Automotiva**. [Mensagem Pessoal] Mensagem recebida por roberto.ramos@gm.com em 20 de abr. 2002.

De acordo Huebner; Thornton; Byron (1995), o método de elementos finitos segue um processo passo a passo, como descrito a seguir:

a- Discretização do modelo: o primeiro passo é dividir a região da solução em elementos, os quais podem ser triangulares, retangulares, tetraédricos e hexaédricos, as formas mais complexas são aplicadas em estudos tridimensionais. O número e o tipo de elementos de um dado problema está vinculado à análise de Engenharia, no entanto a experiência contribui na definição dos elementos do modelo.

b- Seleção das funções de interpolação: Os elementos estão interligados entre si por meio de nós localizados no contorno dos mesmos, e o deslocamento dos nós corresponde às incógnitas dos problemas. Neste passo, deve-se escolher a função de interpolação que representa a variação, ou melhor, o deslocamento dos nós.

c- Determinação das propriedades dos elementos: Uma vez que os elementos e sua função de interpolação foram selecionados, segue-se com a determinação da matriz de equações expressando as propriedades de cada elemento individualmente. Como exemplo de propriedades: espessura, características do material.

d- Montagem das propriedades dos elementos para obter o sistema de equações: Inclui a montagem da matriz para todo o modelo a partir das matrizes dos elementos, é feita a combinação das matrizes que expressam o comportamento dos elementos formando as matrizes que expressam o comportamento de todo o sistema, uma vez que representam todos os nós.

e- Imposições das condições de contorno: Anteriormente a resolução do sistema de equações deve-se considerar as condições externas que influenciam os nós. Como exemplo de condições externas: velocidade, deslocamento, pressão, força, temperatura.

f- Solução do sistema de equações: ocorre a solução de várias equações simultaneamente para a obtenção dos deslocamentos desconhecidos dos nós, que

correspondem a resposta direta do problema. Muitas vezes é utilizada a solução do sistema de equações para calcular outros importantes parâmetros, em problemas estruturais a resposta do sistema de equações permite o cálculo de tensões e deformações, em problemas de condução de calor as temperaturas dos nós são obtidas, permitindo o cálculo do fluxo de calor dos elementos.

A aplicação do método de elementos finitos na indústria automotiva corresponde ao processo descrito por Huebner; Thornton; Byron (1995), no entanto é importante ressaltar que os passos *c*, *d*, *e* e *f* mencionados na literatura correspondem a um processo transparente para o usuário, ou seja, não há interferência humana uma vez que os softwares de solução disponíveis no mercado como NASTRAN e ANSYS realizam o processo de solução de equações de acordo com a entrada dos dados. A entrada de dados corresponde aos passos *a*, *b* e *e* do método de elementos finitos descritos por Huebner; Thornton; Byron (1995).

De acordo Dias (2001), a análise de elementos finitos nunca foi tão importante como atualmente, a percepção da necessidade de sistemas precisos e eficientes de análise de elementos finitos é proveniente da necessidade de redução do ciclo de desenvolvimento. As soluções de software para a grande escala de problemas práticos de engenharia requerem boa modelagem matemática assim como procedimentos para garantir a precisão e performance da solução.

Segundo Bathe (1996), o método de elementos finitos é utilizado para a resolução de problemas de análise e projeto de engenharia, a idealização do problema físico para o modelo matemático requer uma série de considerações que juntos geram equações diferenciais que governam o modelo matemático, a análise de elementos finitos soluciona o modelo matemático. A técnica de solução é um procedimento numérico, portanto é necessário verificar sua precisão, se o critério de precisão não for alcançado recomenda-se repetir a análise com parâmetros refinados, como menores malhas.

Segundo Bathe (1996), uma vez que o modelo matemático esteja resolvido e os resultados interpretados, pode-se decidir se é necessário um modelo matemático mais refinado para aumentar a confiabilidade na resposta do problema matemático, ou se os resultados são satisfatórios. A Figura 3.4 apresenta o fluxo do método de elementos finitos sob a abordagem de Bathe (1996).

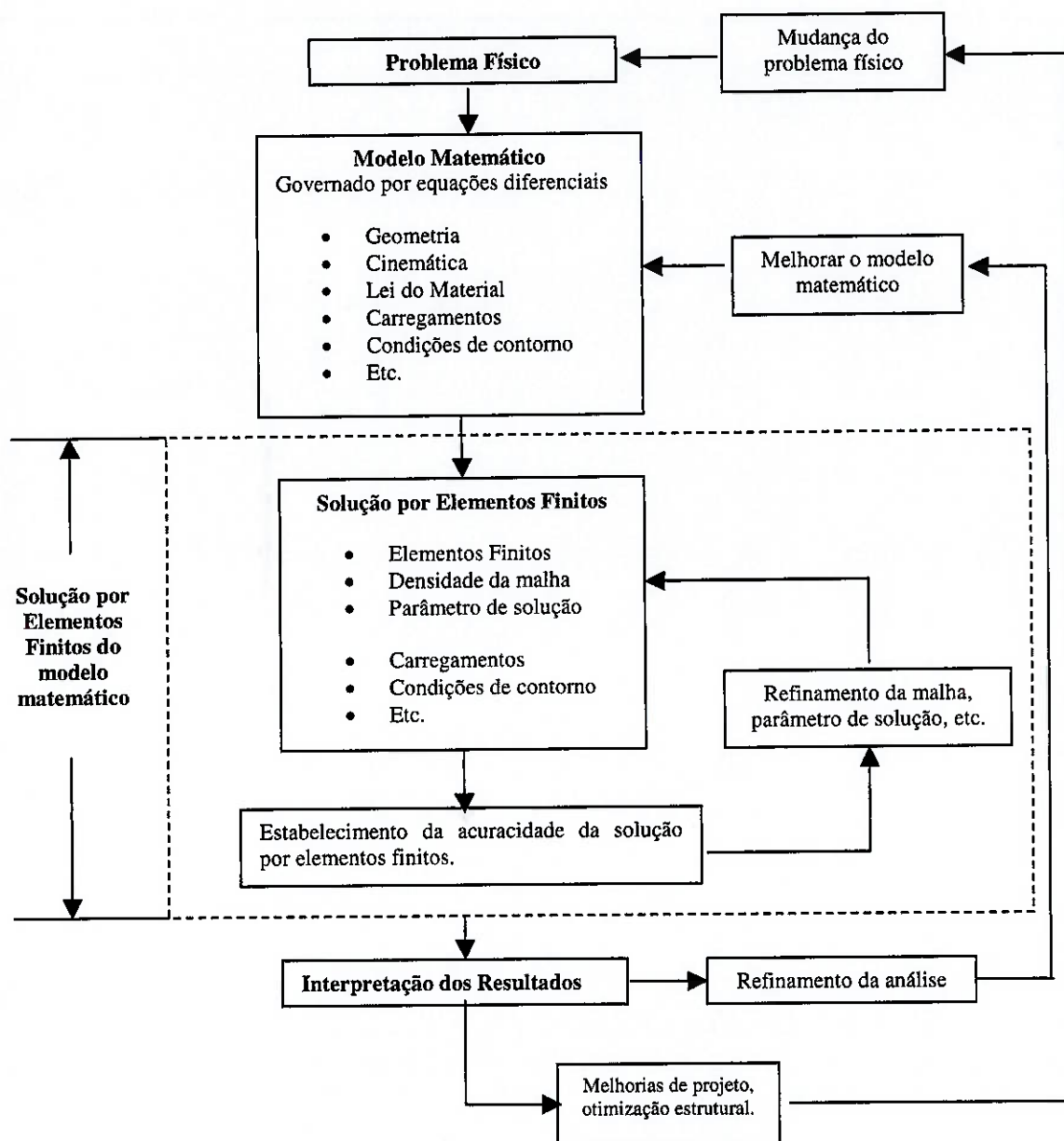


Figura 3.4 Processo de análise por elementos finitos adaptado de Bathe (1996).

A alta performance computacional tem aumentado a capacidade para a realização de testes virtuais mais complexos. As questões como espessura do material, pontos de

solda ou influência da seqüência de montagem são avaliadas devido alta capacidade da ferramenta computacional, permitindo aos projetistas a otimização e implementação de produtos e processos com alta qualidade (ROHDE, 2001a).

O número de elementos dos modelos utilizados para avaliações virtuais tem aumentado, permitindo maior confiabilidade nos resultados. Em 1985, os testes de impacto eram feitos com 10.000 elementos e em 2001 as avaliações contavam com 300.000 elementos. O modelo de aerodinâmica externa atualmente contém 3.000.000 de elementos, portanto a gama e a confiabilidade das aplicações virtuais vêm aumentando fortemente devido ao avanço tecnológico (ROHDE, 2001a); (ROHDE, 2001b).

3.5- Processo de desenvolvimento de produto – “modelo atual”

Os investimentos em tecnologia virtual permitiram otimizações no processo de desenvolvimento, principalmente devido ao uso da simulação CAE, garantindo que empresas se mantivessem competitivas, alcançando as expectativas dos clientes enquanto reduziavam custos e tempo de desenvolvimento.

Por volta de 1991, o ciclo de desenvolvimento de produto era composto de uma seqüência de construções físicas, já por volta de 1996 o processo de desenvolvimento havia reduzido o número de protótipos com a inclusão de testes virtuais, 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 (ROHDE, 2001a).

Segundo Rohde (2001a), a engenharia virtual continua revolucionando o processo de desenvolvimento de produto, o denominado “ modelo tradicional” de PDP como mencionado no capítulo 2, que está baseado em ciclos de construção de protótipos, testes físicos e correções de projeto, está sendo substituído gradativamente pelos processos de simulações virtuais baseados na estrutura CAE.

De acordo Ryan (2000), a prática de técnicas de simulação permite aos engenheiros e analistas rápido acesso quanto à forma, montagem, funcionalidade de novos produtos desde o projeto conceito, detalhamento do projeto até a produção. Ryan (2000) destaca que o valor da simulação virtual se torna aparente a partir do momento em que a metodologia de simulação está validada, ou seja, quando for alcançada a correspondência dos resultados dos testes físicos com os virtuais. Desta forma, milhares de variações dos sistemas, escolhas de componentes, tolerâncias e parâmetros podem ser analisados através da simulação virtual com confiança para a definição do projeto do novo produto.

Assim, não é mais necessário aguardar meses para a construção protótipo, instrumentá-lo, realizar testes e fazer alterações e retrabalhos nos protótipos para representar as melhorias detectadas, ao invés disto, é possível construir protótipos virtuais em pouco tempo, exercitar os modelos em várias condições e testes e otimizar a forma, montagem, manufaturabilidade em uma fração do custo do ciclo tradicional de protótipos físicos (RYAN, 2000).

Krouse (1999), apresenta as alterações do “modelo tradicional” para o “modelo atual” através da Figura 3.5, no processo atual ocorre a utilização de modelos virtuais no desenvolvimento do projeto avaliando a performance previamente à construção dos protótipos físicos. Desta forma, é possível reduzir os ciclos de construção de protótipos com conseqüente redução de custos e tempo de desenvolvimento.

O passo referente a análises virtuais da Figura 3.6 compreende avaliações como durabilidade e vida útil, análise de impacto, ruídos, vibrações e dirigibilidade dentre outros.

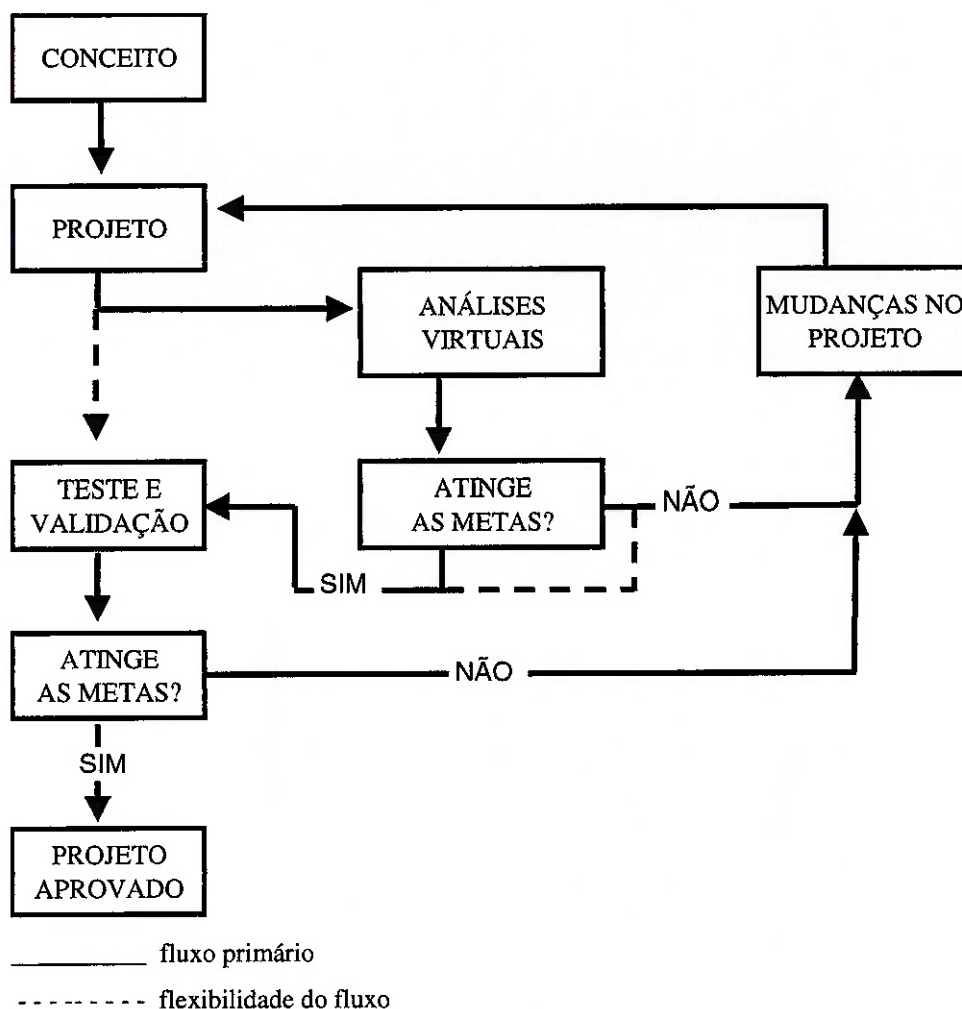


Figura 3.6 – PDP “modelo atual”, adaptado de Xu (1998).

Embora não esteja representado na Figura 3.6, Xu (1998) defende o uso das simulações virtuais desde a fase inicial de desenvolvimento do produto, passando pela fase conceito, fase de detalhamento de produto, ocorrendo em cada fase interações com as análises virtuais do sistema CAE até chegar na validação física.

Conseqüentemente as análises virtuais têm o objetivo de não apenas permitir que o primeiro protótipo físico fique muito próximo das análises virtuais, mas também que a primeira interação virtual do projeto esteja próxima as condições ótimas de projeto, portanto além das técnicas virtuais auxiliarem significativamente na redução do ciclo

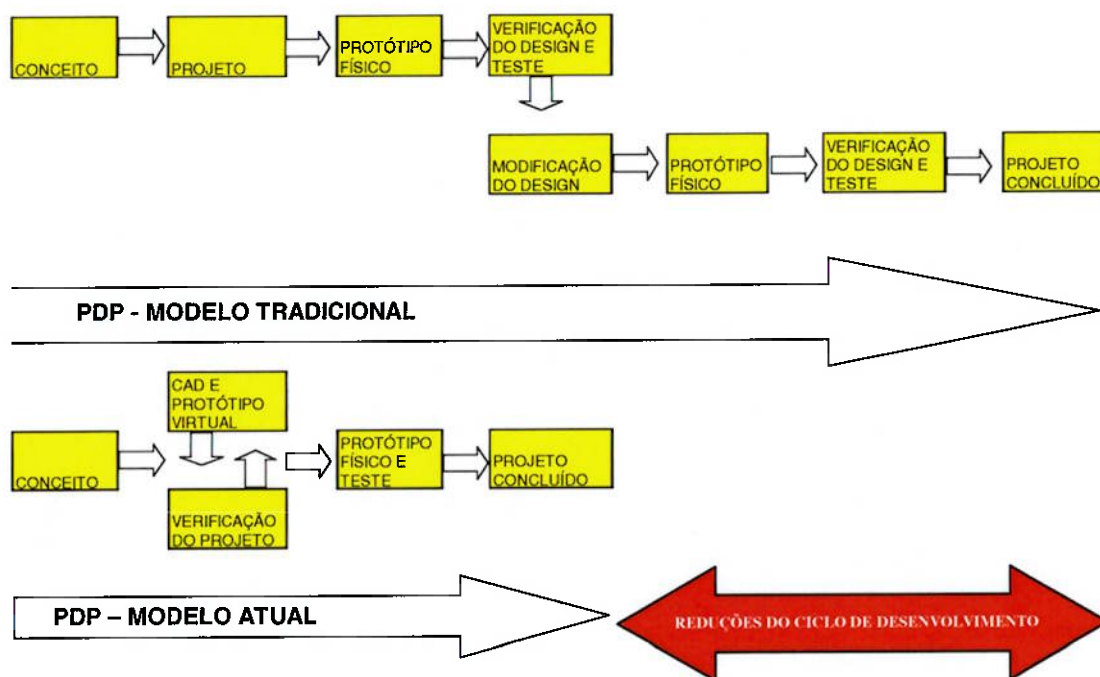


Figura 3.5– Comparação do PDP “modelo tradicional” com o PDP “modelo atual”, adaptado de Krouse (1999).

Embora a Figura 3.5 não apresente interações virtuais na fase conceitual, Krouse (1999) considera que atualmente há muitos casos em que as empresas podem integrar o protótipo virtual no desenvolvimento de produto desde a fase conceitual do veículo. Pela modelagem e simulação do veículo e de sistemas mecânicos no computador, engenheiros podem determinar especificações para subsistemas e componentes e projetá-los apropriadamente.

Xu (1998) apresenta a estrutura atual de desenvolvimento de produto através do ciclo representado pela Figura 3.6, onde as análises virtuais fazem parte do ciclo de desenvolvimento, mas com flexibilidade representada pelas linhas tracejadas.

De acordo com o andamento do detalhamento do projeto, as análises virtuais identificam melhorias nos componentes ou sistemas do projeto previamente à validação em protótipo físico, este ciclo pode se repetir diversas vezes até alcançar a meta estipulada. Com o auxílio do sistema CAE, as análises virtuais permitem reduções dos ciclos tradicionais de projetar – construir - testar (XU,1998).

de produção e teste de protótipos físicos, também permitem que os projetos reduzam o número de interações e correções virtuais uma vez que o processo pode se iniciar anteriormente à definição do conceito do produto (XU, 1998).

De acordo Chang (1999), a utilização da simulação pode ocorrer de duas maneiras distintas:

- A primeira forma contribui para a definição ótima do projeto onde requisitos múltiplos e até mesmo contraditórios são estudados, balanceados e alocados para os subsistemas e componentes através de um processo analítico sistemático. A simulação neste caso está baseada principalmente no uso de modelos matemáticos, a experiência e os métodos empíricos são ferramentas complementares neste processo. Esta forma de simulação tem o objetivo de direcionar a definição do projeto do sistema completo, subsistemas e componentes.
- A segunda forma corresponde ao uso de modelos matemáticos para verificar a performance do sistema definido, ou para melhor entender o comportamento do sistema. Este processo está sendo utilizado como ferramenta de validação em substituição ao protótipo físico.

É a segunda forma de simulação descrita por Chang (1999) e denominada de protótipo virtual que possui grande potencial de substituição dos protótipos físicos, correspondendo assim a uma forte ferramenta de redução do tempo de desenvolvimento e custo do projeto.

3.6 – Investimentos para a implementação de ferramentas virtuais.

Conforme apresentado, o “modelo atual” do PDP engloba protótipos virtuais e protótipos físicos. Portanto para a implementação dos sistemas virtuais são requeridos investimentos significativos quanto à aquisição de softwares assim como requer mudança cultural de toda uma organização para que o processo ocorra adequadamente.

Segundo Campbell (1999), significantes investimentos são requeridos para software, hardware, comunicação em rede, treinamento, automação do processo, mudanças de procedimentos, estes investimentos podem ser consideráveis, mas muitas empresas bem estabelecidas têm provado que o retorno em forma de reduções de custo garante o retorno do investimento quando a tecnologia é aplicada efetivamente.

Em 1996, a empresa automobilística Ford apresentou os seguintes dados: em 1987 era realizado apenas 7% de avaliação virtual anterior ao primeiro protótipo, já em 1995, 95% de avaliação virtual era realizada previamente ao primeiro protótipo físico. Desta forma a Ford alcançou reduções dos ciclos de protótipos físicos em comparação ao método tradicional devido aplicação do sistema CAE, foram cerca de US\$ 41 milhões eliminados do custo de engenharia devido uso intensivo do sistema CAE em três projetos de novos veículos, como mostra a Tabela 3.1 (CAMPBELL, 1998).

Tabela 3.1 – Reduções de custos de engenharia, adaptado de Campbell (1998).

CUSTOS DE ENGENHARIA ELIMINADOS US\$ (Milhão)	
CUSTOS ELIMINADOS EM RELAÇÃO AOS PROTÓTIPOS FÍSICOS	
Mão de Obra	17.4
Protótipos Físicos	54.5
Testes	20.3
Ferramentais	2.0
TOTAL	94.2
CUSTOS DOS SISTEMAS DE SIMULAÇÃO CAE	
Custos CAE	53.0
REDUÇÕES OBTIDAS COM O USO DA SIMULAÇÃO CAE	
Reduções	41.2

3.7 Os fatores de sucesso para a implementação do PDP “modelo atual”

Murphy; Perera (2002) conduziram um estudo de caso envolvendo empresas dos Estados Unidos e Inglaterra objetivando a análise e identificação dos fatores chaves para o alcance do sucesso da implementação e desenvolvimento da simulação dentro das companhias.

A análise comparativa realizada por Murphy; Perera (2002) em 12 grandes companhias do setor automobilístico e aeroespacial, demonstrou que o conhecimento das tecnologias de simulação no Reino Unido é relativamente menor quando comparada com o dos EUA (Estados Unidos) e que as diferenças culturais encontradas nas empresas dos dois países correspondem aos principais fatores de limitação do desenvolvimento da simulação no RU (Reino Unido). A Tabela 3.2 apresenta as principais diferenças culturais entre EUA e RU.

Tabela 3.2- Diferenças culturais entre EUA e RU adaptado de Murphy; Perera (2002).

DIFERENÇAS CULTURAIS ENTRE EUA E RU	
RU	EUA
Não há cursos específicos de simulação no nível de pós-graduação devido baixa demanda da indústria local.	Há cursos específicos de simulação no nível de pós-graduação devido demanda da indústria local.
Baixa exposição e conhecimento do potencial e da importância da simulação dentro da empresa.	Divulgação extensa da capacidade atual e do potencial de aplicação da simulação nas indústrias.
Falta de eventos e de comunidade específica de simulação limitando o crescimento da simulação na indústria.	Conferências específicas do uso e desenvolvimento da simulação na indústria em prática.
Pouco suporte gerencial e baixa confiança na simulação, ceticismo dos benefícios devido limitada experiência e educação sobre simulação.	Devido educação prévia ou experiência de sucesso em projetos anteriores, gerentes estão conscientes dos benefícios do uso da simulação e suportam o seu uso.
Recursos limitados das companhias para desenvolvimento de tecnologias não conhecidas.	Política corporativa de investimento para expansão das aplicações da simulação em novas áreas.
Falta de fornecedores de softwares no país, limitando o suporte e contato necessário para a introdução e uso da simulação.	Abundância de fornecedores de softwares localizados no país.

Muitas das empresas dos EUA estudadas por Murphy; Perera (2002) já estavam trabalhando com as atividades de simulação por cerca de vinte anos, enquanto as empresas do RU estavam relativamente imaturas no uso da tecnologia de simulação.

Para Ryan (2000), geralmente os fatores que ainda retardam o processo de uso de novas tecnologias nas empresas estão relacionados ao fato de que poucas

universidades estão preparando os estudantes para o uso das novas tecnologias de simulação e o uso do protótipo físico ainda está enraizado na maioria das companhias, e portanto a simulação virtual é vista com receio.

Os fatores de sucesso para a prática de simulação foram identificados no estudo de caso de Murphy; Pereira (2002), através das experiências de sucesso que têm permitido às empresas dos EUA o gerenciamento, padronização e planejamento das atividades de simulação correntes e futuras.

- Formação de um time estruturado de especialistas e engenheiros para conduzir a construção do modelo, análise do modelo e gerenciamento do projeto.
- Desenvolver o uso de mecanismos efetivos de promoção para difundir o conhecimento e benefícios da simulação como uma ferramenta importante de negócios. Criar interesse na capacidade de simulação.
- Utilizar experiência interna para formar um time de simulação ao invés dos consultores externos, garantindo à companhia controle interno dos projetos de simulação. Permitir que a experiência de simulação estivesse retida na companhia.
- Envolver todos os membros do time de projeto desde a fase de concepção até a conclusão das avaliações virtuais permitindo assim suporte da gerência e dos engenheiros.
- Trocar experiências e conhecimento entre todos os usuários de simulação. Capturar, reter e desenvolver uma base de conhecimento através da documentação do modelo e do projeto.
- Garantir a integridade e gerenciamento dos dados de entrada do modelo com constante comunicação entre especialistas, engenheiros, clientes e gerência. Fazer uso de artifícios como reuniões, revisões e apresentações com todos os membros do projeto, com o objetivo de indicar as mudanças feitas no modelo ou mudanças dos dados de entrada.

Já para Krouse (1999), para se implementar o uso da simulação com sucesso, os seguintes fatores devem ser seguidos:

- Alta qualidade dos dados de entrada dos sistemas de simulação, incluindo parâmetros como coeficientes de atrito, localização de pivôs, dados de cargas, massa de componentes e centro de gravidade para peças individuais. Krouse (1999) 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 o mais cedo quanto possível na implementação do protótipo virtual.
- Investimentos em *hardware*, *software* e treinamento.

A identificação das barreiras culturais e dos fatores que influenciam o sucesso do uso da simulação, indicam um caminho de crescimento necessário para as empresas se manterem competitivas.

3.8 Ferramentas complementares para o desenvolvimento de produto.

A ferramenta virtual objeto de estudo desta dissertação corresponde ao sistema CAE, no entanto existem outros sistemas computacionais, metodologias e ferramentas que auxiliam o processo de desenvolvimento de produto. Como principais ferramentas utilizadas no PDP, tem-se:

- Realidade virtual, CAD, CAE, fábrica virtual, CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e simulação de processos estampados.

Estas ferramentas computacionais são aplicadas extensivamente nas empresas automobilísticas e aeroespaciais e permitem a redução de protótipos físicos resultando em redução do tempo de implementação do projeto e redução de custo. Uma breve descrição destas ferramentas será feita nos tópicos seguintes deste capítulo.

3.8.1 CAD – *Computer Aided Design*

O CAD corresponde basicamente a um sistema de modelamento geométrico usado para produzir desenhos de peças de engenharia na forma bidimensional ou tridimensional (MURPHY; UCCELLO; NAFARA, 1996).

Os sistemas CAD dão suporte à atividade de projeto na sua criação, modificação, recuperação ou documentação, servindo como uma ferramenta de auxílio à confecção de desenhos de engenharia, a maior contribuição do sistema CAD ocorre na modelagem de produtos e componentes e no detalhamento de seus desenhos (HORTA; ROZENFELD, 1999).

Os sistemas CAD se propõem a auxiliar a manipulação e criação de informações, sistematizando os dados de projeto envolvidos, possibilitando uma rápida reutilização de informações de projeto quando necessário. A ferramenta CAD é de extrema importância para o projeto, contribuindo na redução do tempo e custos, aumento da produtividade geral e até mesmo permitindo um melhor gerenciamento do projeto (HORTA; ROZENFELD, 1999).

Com o software CAD é possível fazer a representação tridimensional do sistema em modelo sólido permitindo rápida e eficiente análise e detecção de interferências e folgas entre peças devido alta performance e facilidade de visualização do software, esta ferramenta recebe a denominação de digital mock-up (RYAN, 2000).

Uma outra característica importante do CAD é a compatibilidade com outros programas como CAM e CAE, permitindo que os modelos geométricos sejam migrados com facilidade, os modelos geométricos são utilizados principalmente para os seguintes sistemas:

- CAM para a geração de programas de CNC (*Computer Numerical Control*),
- Máquinas de prototipagem rápida para a fabricação de peças,
- Simulação virtual CAE,

- Simulação do acesso de dispositivos e ferramentas da produção na montagem de componentes. O software usado na General Motors para esta finalidade é o *Product Vision* que permite a visualização do modelo matemático em conjunto com as ferramentas de montagem existentes na fábrica e digitalizadas no catálogos de ferramentas.

3.8.2 Realidade virtual

Os softwares CAD e CAE diferem da realidade virtual porque os mesmos permitem análise tridimensional, no entanto, não permitem interação do usuário com o meio virtual (NETTO, 2002).

A realidade virtual é definida como interface do usuário com o computador, o usuário entra no espaço virtual das aplicações e visualiza, manipula e explora os dados da aplicação em tempo real, usando os sentidos, particularmente os movimentos naturais do corpo. A vantagem está no conhecimento intuitivo do usuário sobre o mundo físico que pode ser transportado para o mundo virtual, para que essa interação ocorra é necessário o uso de dispositivos de interação como capacetes de visualização e controle e luvas de dados denominados como *datagloves*. O uso destes dispositivos permite a exploração do ambiente e a manipulação natural dos objetos com o uso das mãos (KIRNER, 1996 apud NETTO, 2002).

Como dispositivo de interação de projeção tem-se o conceito CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*), que consiste em uma sala em que paredes, teto, piso, são telas semitransparentes onde as imagens são projetadas permitindo que uma ou mais pessoas fiquem imersas no ambiente virtual. A projeção de imagens é feita por projetores posicionados atrás das telas podendo exigir o uso de óculos obturadores, ocorrendo a total imersão do usuário no ambiente virtual. O sistema CAVE também incorpora sistema de rastreamento de posição e interação dos usuários (NETTO; MACHADO; OLIVEIRA, 2002).

Como dispositivos de interação de entrada tem-se as luvas de dados, que permitem o reconhecimento dos movimentos das mãos dos usuários e a reprodução no ambiente virtual, existem também os dispositivos isométricos, ou bolas isométricas, que funcionam como sensores de trajetória (NETTO; MACHADO; OLIVEIRA, 2002).

A aplicação da realidade virtual na área automobilística está voltada para a definição da forma do projeto tanto da parte interna do veículo como principalmente pela parte externa, avaliação de fatores ergométricos como também pode ser utilizada para avaliação dos processos de montagem de manufatura (NETTO, 2002).

3.8.3 Fábrica virtual

Para a General Motors (2003a), a fábrica virtual corresponde a um modelo matemático tridimensional da fábrica que é utilizado para validar decisões de manufatura anteriormente à sua construção e durante a operação de produção. A ferramenta permite um rápido e preciso planejamento, desenvolvimento e otimização das operações de manufatura tais como análise de ergonomia e segurança operacional, visualização da fábrica e interface com pessoas e material assim como simulação de equipamentos, dispositivos e robôs.

A Fábrica Virtual permite teste e validação extensiva para a garantia do início de produção sem perdas e sem defeitos de qualidade. Simulações de montagem da carroceria com o chassi, instalação de painel de instrumentos, portas, bancos e cintos são exemplos de avaliações prévias à instalação de qualquer equipamento ou dispositivo na planta de montagem.

De acordo Villas Boas², com este software específico é possível simular o layout da planta de montagem verificando previamente qual a melhor disposição de equipamentos na área disponível ou se há necessidade de expansão da área de

² VILLAS BOAS, C.L. **Manufatura Digital e Produtividade no Chão de Fábrica**. Trabalho apresentado no 11º Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, 2002. Não Publicado.

trabalho, analisar o melhor fluxo de trabalho, visualizar espaço para locação de material de montagem e áreas livres para passagem (informação verbal).

Segundo Villas Boas³, a fábrica virtual permite que o processo de montagem dos componentes seja analisado conforme as técnicas de DFA (*Design for Assembly*), permitindo detecção prévia de problemas e oportunidades de melhorias a serem adotadas para facilitar o processo de montagem. Além disto, é possível o estudo da ergonomia do operador, simulando o passo a passo da montagem dos componentes, verificando condições ergonômicas que precisam ser corrigidas seja com um novo dispositivo de montagem, ou com uma nova seqüência de atividades (Informação Verbal).

3.8.4 CAM - Computer Aided Manufacturing

Silva (2001), define o sistema CAM como o uso do computador no planejamento, gerenciamento e controle da manufatura.

Entre as principais operações de suporte à manufatura baseado no sistema CAM, pode-se citar a programação CNC (*Computer Numerical Control*), cujo processo de geração do programa está dividido em três fases (MURPHY; UCCELLO; NAFARA, 1996):

- Definição da geometria da peça: é possível a importação da geometria da peça de um arquivo CAD ou a criação da geometria da peça no próprio sistema CAM,
- Com a geometria da peça como referência, o caminho de corte da ferramenta é definido. Nesta fase também são aplicados os parâmetros de usinagem, como seleção das ferramentas, rotação e velocidade de avanço da ferramenta e tipo de refrigerante,
- Com as informações da fase anterior o pós-processador é executado e permitindo a geração do programa de CNC.

³ VILLAS BOAS, C.L. **Manufatura Digital e Produtividade no Chão de Fábrica**. Trabalho apresentado no 11º Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, 2002. Não Publicado.

O programa gerado é carregado no computador da máquina ferramenta de comando numérico permitindo a usinagem automática da peça. Devido aos avanços das ferramentas computacionais, é possível checar e simular virtualmente os resultados do programa do CNC anteriormente a usinagem da peça pela máquina ferramenta (MURPHY; UCCELLO; NAFARA, 1996).

A aplicação da tecnologia de comando numérico pode ser aplicada para usinagem em tornos e fresas, operações de corte a laser, corte a jato d'água, corte a plasma, eletro-erosão e programação de robôs industriais (MURPHY; UCCELLO; NAFARA, 1996).

3.8.5 Simulação de Processos Estampados

Para os processos e produtos estampados são aplicadas tecnologias virtuais especializadas que possibilitam a análise detalhada e precisa do processo de estampagem como o estudo de fechamento de prensa-chapas, conformação, flangeamento e corte. A ferramenta de simulação para os processos estampados auxilia no processo de desenvolvimento de ferramentas e produtos estampados, combinando o método de elementos finitos, recursos gráficos e modelamento geométrico (CCS ENGENHARIA, 2004).

A CCS Engenharia (2004) apresenta como benefícios da ferramenta de simulação de estampados os seguintes itens:

- Análise antecipada de cada operação de conformação da chapa, identificando potenciais problemas e analisando a viabilidade do processo,
- Evita-se o super dimensionamento do ferramental devido análise mais precisa dos parâmetros do processo de estampagem,
- Minimiza-se o risco de identificação de problemas posteriores a construção de ferramentas.
- Redução do tempo de *try-out* (ajuste) da ferramenta uma vez que processo se torna mais confiável e estável.

Segundo Villas Boas⁴, o programa de simulação de estampados permite análise da manufaturabilidade, análise das distorções das fibras, análise de tensões e rugas decorrentes do processo de estampagem, e até mesmo identifica condições onde é possível reduzir espessura da chapa. Desta forma é possível prevenir futuras falhas de produção (informação verbal).

A necessidade de redução de tempo e custo do processo de desenvolvimento do produto para que as empresas possam se manter competitivas, impulsionou a criação, otimização e extensivo uso de ferramentas virtuais tanto para as atividades relacionadas à Engenharia de Produto como à Manufatura.

⁴ VILLAS BOAS, C.L. **Manufatura Digital e Produtividade no Chão de Fábrica**. Trabalho apresentado no 11º Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, 2002. Não Publicado.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DA PESQUISA

4.1 Introdução

A metodologia é considerada como a forma de conduzir a pesquisa. Neste sentido a metodologia pode ser considerada como conhecimento geral e habilidades necessárias ao pesquisador para se orientar no processo de investigação, tomar as decisões oportunas, selecionando conceitos, hipóteses, técnicas e dados adequados (THIOLLENT, 1986 APUD NAKANO; FLEURY, 1996).

Para a condução adequada de uma pesquisa é necessária a seleção dos métodos pertinentes ao objetivo do estudo, portanto neste capítulo foram selecionados os métodos adequados para suportar a pesquisa deste trabalho.

4.2 Classificação da pesquisa

Como tipos de pesquisa há basicamente dois modos: pesquisa qualitativa e quantitativa, que serão brevemente apresentados neste tópico para a classificação do estudo.

De acordo Bryman (1989), a pesquisa quantitativa tem como ponto de partida a pesquisa teórica que engloba a tentativa de obter explicações sobre algum aspecto da realidade, em seguida hipóteses são formuladas pelo uso da dedução, ou seja, baseado em princípios, leis e raciocínio lógico. Segue fatores importantes que são aplicados na pesquisa quantitativa:

- A hipótese deve conter conceitos que possam ser medidos para sua verificação.
- A hipótese também deve demonstrar uma relação de causa-efeito, seja de forma explícita ou implícita.
- Deve-se buscar conclusões que possam ser generalizadas além dos limites restritos da pesquisa.

- A pesquisa deve permitir reprodução, ou seja, permitir aos demais pesquisadores a verificação dos resultados encontrados através do uso dos mesmos procedimentos.

Segundo Bryman (1989) apud Nakano; Fleury (1996), a diferença entre a pesquisa qualitativa e quantitativa não está na ausência de quantificação de dados, mas sim no fato de que a pesquisa qualitativa focaliza a perspectiva da pessoa que está sendo pesquisada. A pesquisa qualitativa possui as seguintes características:

- O pesquisador observa os fatos da óptica de alguém interno à organização.
- A pesquisa busca uma profunda compreensão do contexto da situação.
- A pesquisa enfatiza o processo dos acontecimentos, isto é, a seqüência dos fatos ao longo do tempo.
- O enfoque da pesquisa é menos rígido, permitindo maior flexibilidade para re-direcionamento.
- A pesquisa pode empregar mais que uma fonte de dados.

Na Tabela 4.1 pode-se ver o resumo das diferenças entre pesquisa qualitativa e quantitativa de acordo Bryman (1989) apud Nakano; Fleury (1996). O tipo de pesquisa mais adequado com o objetivo deste trabalho corresponde à forma **qualitativa**, devido à necessidade de grande envolvimento no contexto da organização, ênfase na interpretação dos resultados das pesquisas com os entrevistados e flexibilidade para re-direcionamento.

Tabela 4.1- Comparação entre pesquisa quantitativa e qualitativa por Bryman, (1989) apud Nakano; Fleury (1996).

Aspecto	Pesquisa Quantitativa	Pesquisa Qualitativa
Ênfase na interpretação do entrevistado	Menor	Maior
Importância do contexto da organização pesquisada	Menor	Maior
Proximidade do pesquisador em relação aos fenômenos estudados	Menor	Maior
Número de fontes de dados	Uma	Várias
Ponto de vista do pesquisador	Externo à Organização	Interno à Organização
Quadro teórico e hipóteses	Definidas rigorosamente	Menos Rígidas

4.3 Métodos da pesquisa

Além da classificação de pesquisa em qualitativa ou quantitativa também há necessidade de identificar os métodos adequados a este estudo, que serão apresentados neste tópico.

Segundo Yin (2001), a definição do método de pesquisa está relacionado a três condições:

- O tipo de questão da pesquisa, que pode ser representado pela série: “quem”, “o que”, “onde”, “como”, “por que” e “quanto”,
- O controle que o pesquisador possui sobre os eventos comportamentais efetivos,
- Foco em fenômenos históricos ou contemporâneos.

A Tabela 4.2 apresenta essas três condições e como cada uma se relaciona aos cinco métodos principais de pesquisa de acordo Yin (2001).

Tabela 4.2- Condições relevantes de diferentes métodos de pesquisa (YIN, 2001).

MÉTODO	FORMA DA QUESTÃO	EXIGE CONTROLE DE EVENTOS COMPORTAMENTAIS ?	FOCO EM ACONTECIMENTOS CONTEMPORÂNEOS ?
Experimental	Como, por que	Sim	Sim
Levantamento (coleta de dados e análise estatística)	Quem, o que, onde, quantos, quanto	Não	Sim
Análise de Arquivos	Quem, o que, onde, quantos, quanto	Não	Sim / Não
Pesquisa Histórica	Como, por que	Não	Não
Estudo de Caso	Como, por que	Não	Sim

O controle de eventos comportamentais só está aplicado ao método experimental, presumindo-se que o ambiente laboratorial permite o controle de todas as variáveis, o pesquisador pode manipular o comportamento de forma direta, precisa e sistemática (YIN, 2001).

Analisando a Tabela 4.2, chega-se a determinação do método de estudo de caso como melhor alternativa de conduzir este trabalho, uma vez que responde a nossa questão de forma, permite análise de dados contemporâneos e não exige o controle de variáveis comportamentais.

Segundo Yin (2001), o estudo de caso vem sendo uma estratégia comum de pesquisa em vários campos incluindo os processos organizacionais e administrativos, devido à necessidade de se compreender fenômenos complexos.

4.4 Plano de pesquisa

O plano de pesquisa é a seqüência lógica que conecta os dados às questões iniciais do estudo e às conclusões (YIN, 2001).

De acordo Nachmias; Nachmias (1992) apud Yin (2001), o plano de pesquisa conduz o pesquisador através do processo de coletar, analisar e interpretar observações. É um modelo lógico de provas que lhe permite fazer inferências relativas às relações causais entre as variáveis sob investigação.

Para os estudos de caso, Yin (2001) propõe cinco importantes componentes para a formação do plano de pesquisa, que serão apresentados nos tópicos subseqüentes:

- As questões de um estudo,
- Pressupostos,
- Unidade de Análise,
- Lógica que une os dados aos pressupostos,
- Critérios para se interpretar as descobertas.

4.4.1 As questões do plano de pesquisa

As questões correspondem à essência do que realmente o pesquisador tem como objetivo de estudo e análise. Portanto, para um bom planejamento da pesquisa é necessário como tarefa inicial estabelecer com clareza a natureza das questões do estudo (YIN,2001).

Seguindo o plano de pesquisa deste trabalho, tem-se como questões do **estudo de caso**:

Questão 1: Como o processo de desenvolvimento de produtos pode se beneficiar do uso da simulação virtual?

Questão 2: Quais os fatores que restringem a aplicação da simulação virtual como substituição de protótipos físicos?

4.4.2 Os pressupostos do plano de pesquisa

Os Pressupostos permitem orientar o pesquisador para o estudo necessário para alcançar a estratégia proposta pelas questões do plano de pesquisa (YIN, 2001).

A questão 1 está relacionada ao seguinte pressuposto:

Pressuposto 1- O uso da simulação virtual CAE no processo de desenvolvimento de produto contribui para a redução de custos e tempo do desenvolvimento do projeto.

E a questão 2 está relacionada ao seguinte pressuposto:

Pressuposto 2- O crescimento do uso de simulação virtual como substituição aos protótipos físicos está relacionado ao rompimento de barreiras culturais.

4.4.3. Unidade de análise

A unidade de análise corresponde à unidade central em que se desenvolve a pesquisa, podendo ser uma empresa, um área específica, uma atividade, entidades e outros (YIN,2001). A unidade de análise define as fronteiras do objeto de estudo.

Para este estudo de caso a unidade de análise corresponde a Engenharia de Produtos da GMB que é formada pela Engenharia de Projetos e pela Engenharia de Operações e Validações.

4.4.3.1 Seleção dos testes do estudo de caso

Como existem vários tipos de testes de validação passíveis de substituição pelo uso da simulação, foram estabelecidos critérios para a sua seleção.

Os testes que compõem o estudo de caso foram escolhidos de forma intencional visando à obtenção de dados de testes de simulação em níveis diferentes de maturidade, isto é, testes com características distintas que contribuam para a análise abrangente do uso da simulação. Desta forma, foram utilizados os critérios a seguir para a seleção dos testes:

- 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 ao fator “proteção à informação” 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.

Para atender o critério 4, foi considerada como referência a Tabela 4.3, na qual as simulações são classificadas de acordo sua capacidade e confiabilidade, variando desde o nível de impossibilidade de aplicação da simulação até o nível de substituição total do protótipo físico pela simulação.

Tabela 4.3- Classificação dos níveis de simulação virtual.

Critério	Capacidade e Confiabilidade da Simulação Virtual	Necessidade de Protótipo Físico		
		Protótipo de Desenvolvimento	Protótipo de Validação	Validação do Modelo Matemático
1	Não existe correlação virtual com protótipo físico, não há capacidade virtual para aplicação.	SIM	SIM	NÃO APLICÁVEL
2	Há limitação do software de simulação, é possível fazer avaliações do projeto, mas confiabilidade é menor que 80%. É possível reduzir alguns ciclos de desenvolvimento com hardware.	SIM	SIM	SIM
3	Há capacidade virtual, mas depende da validação do modelo matemático. A simulação virtual pode requerer dados provenientes de protótipos físicos, e a confiabilidade está entre 80 e 90%.	NÃO	SIM	SIM
4	Resultados da simulação estão bem próximos do teste físico, confiabilidade entre 90% e 95%.	NÃO	SIM	NÃO
5	Resultados de simulação tão bons quanto o teste físico. Confiabilidade maior que 95%.	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: Adaptada do modelo de classificação dos níveis de simulação da GM.

O termo validação do modelo matemático corresponde a necessidade de comparação dos resultados da simulação virtual com o protótipo físico para certificar que o modelo matemático está correto.

4.4.4 Ligação lógica dos dados aos pressupostos

Estes componentes representam as etapas de análise dos dados da pesquisa, correspondem aos aspectos que determinam a validade do estudo (YIN, 2001). A seguir, estão listados os dados referentes a cada proposição.

Pressuposto 1- O uso da simulação virtual CAE no processo de desenvolvimento de produto contribui para a redução de custos e tempo do desenvolvimento do projeto.

Dados relacionados ao pressuposto 1:

- Análise dos custos do protótipo físico e simulação virtual.

- Avaliação do tempo de execução do teste de desenvolvimento ou validação com protótipo físico e simulação virtual.
- Comparação do resultado do teste virtual com o teste físico.
- Identificar a percepção da unidade de análise sobre os benefícios da simulação.
- Análise da evolução da simulação em relação à sua capacidade e confiabilidade.

Pressuposto 2- O crescimento do uso de simulação virtual como substituição aos protótipos físicos está relacionado ao rompimento de barreiras culturais.

Dados relacionados ao pressuposto 2:

- Identificar a percepção da unidade de análise quanto à capacidade e confiabilidade da simulação virtual.
- Levantamento das dificuldades para o uso efetivo da simulação virtual.
- Análise do perfil da Engenharia de Projetos e Engenharia de Validações e Operações.
- Identificar os fatores que podem contribuir para a melhoria da confiabilidade e capacidade de simulação.

4.4.5 Instrumento de coleta de dados

Segundo Yin (2001), o estudo de caso possui a capacidade de lidar com uma ampla variedade de evidências seja documentos, artefatos, entrevistas e observações.

Este estudo de caso utilizou os seguintes tipos de evidências: documentos e entrevistas. Foram reunidos e analisados documentos tais como relatórios, normas e procedimentos de testes. Com a análise documental foram obtidos dados quanto ao custo, tempo de execução, resultados e procedimentos de teste do protótipo físico, e para a simulação virtual foram obtidos os mesmos dados exceto custo e tempo de execução.

Dois tipos de entrevistas foram aplicados, a primeira denominada *entrevista focal* de acordo Yin (2001), que corresponde à entrevista espontânea e informal baseada num

roteiro de perguntas que permite ampla abertura para comentários do entrevistado. Este tipo de entrevista foi aplicado para o Gerente do Departamento de VSAS com o objetivo de se obter informações da aplicação da simulação para os testes previamente selecionados.

O segundo tipo de entrevista, denominado como *levantamento* de acordo Yin (2001), assume um caráter mais formal e é composta por questões mais estruturadas. Este modelo de entrevista foi aplicado com o objetivo de identificar o ponto de vista da Engenharia de Produto sobre a aplicação da simulação no PDP. Foram entrevistados 09 gerentes e 05 diretores.

As entrevistas foram realizadas pessoalmente pelo pesquisador e, anteriormente à aplicação do questionário, os entrevistados receberam informações sobre o objetivo da pesquisa, assim como apresentação sumária do conteúdo do questionário.

O questionário da *entrevista focal* continha questões sobre a aplicação da simulação para os testes selecionados, compreendendo a evolução da simulação, referência de custos e tempo para realizar a simulação e identificação das dificuldades para o seu uso.

A entrevista denominada *levantamento* foi dividida em duas partes. A primeira parte continha questões relacionadas ao perfil do entrevistado, área de atuação, familiaridade com a simulação sob uma perspectiva pessoal e do departamento em questão. A segunda parte abordava aspectos concernentes ao uso da simulação no PDP, com o objetivo de obter informações sobre benefícios, dificuldades e grau de confiança para a substituição de protótipos físicos sob o ponto de vista dos entrevistados, uma vez que fazem parte do grupo de decisão do plano de desenvolvimento e validação de projetos.

A Tabela 4.4 apresenta a síntese dos dados levantados, relacionando-os a cada um dos objetivos da pesquisa de campo. A respectiva tabela também classifica o tipo de

evidência utilizado para a obtenção dos dados do estudo de caso, como descrito sumariamente neste tópico.

Tabela 4.4- Instrumento de coleta de dados para o estudo de caso.

OBJETIVOS / DADOS	TIPO DE EVIDÊNCIA			QUESTÕES DA PESQUISA DE CAMPO
	Análise Documental	Entrevista Focal	Entrevista Levantamento	
Análise dos custos do protótipo físico e simulação virtual.	X	X		<ul style="list-style-type: none"> Como são determinados os custos relacionados a realização dos testes específicos: <i>roof crush</i>, <i>stiffness</i>, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura?
Avaliação do tempo de execução do teste com protótipo físico e simulação virtual.	X	X		<ul style="list-style-type: none"> Quais são os fatores que determinam o tempo necessário para a realização da simulação virtual? Como calcular o tempo de execução dos seguintes testes: <i>roof crush</i>, <i>stiffness</i>, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura?
Comparação do resultado do teste físico com o virtual.	X			<ul style="list-style-type: none"> O desempenho do teste físico é superior à simulação virtual quanto à confiabilidade?
Análise da evolução da simulação em relação à sua capacidade e confiabilidade.		X		<ul style="list-style-type: none"> Classificar as simulações de acordo com o critério de capacidade e confiabilidade (Tabela 4.3), sinalizando a evolução da simulação nos últimos anos. Indicar a data de criação do modelo de simulação e em quantos projetos já foram aplicados a simulação virtual para os testes <i>roof crush</i>, <i>stiffness</i>, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura.
Identificar a percepção da unidade de análise quanto a capacidade e confiabilidade da simulação virtual.			X	<ul style="list-style-type: none"> Identificar o nível de capacidade e confiabilidade de simulação para cada um dos testes mencionados abaixo: <i>roof crush</i>, <i>stiffness</i>, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura; utilizando a Tabela Critério (Tabela 4.3).
Identificar a percepção da unidade de análise sobre os benefícios da simulação.			X	<ul style="list-style-type: none"> Como a simulação virtual pode beneficiar o PDP? A questão apresenta 05 benefícios onde o entrevistado deve responder se concorda / discorda ou se é indiferente.
Levantar as dificuldades para o uso efetivo da simulação virtual.	X	X*	X**	<ul style="list-style-type: none"> * Existe alguma restrição ou limitação da simulação para substituição do protótipo físico pelo virtual, em relação aos testes <i>roof crush</i>, <i>stiffness</i>, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura? ** Quais as dificuldades existentes para o uso efetivo da simulação como ferramenta de redução de protótipos? A questão apresenta várias respostas e o entrevistado pode assinalar mais que uma resposta. A substituição total do protótipo físico pela simulação virtual é possível?
Identificar os fatores que podem contribuir para a melhoria da confiabilidade e capacidade de simulação.		X		<ul style="list-style-type: none"> Quais são os fatores que podem contribuir para a melhoria da confiabilidade e capacidade de simulação para os testes: <i>roof crush</i>, <i>stiffness</i>, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura?
Análise do Perfil da unidade de análise.			X	<ul style="list-style-type: none"> Identificação da faixa etária e período de experiência na Engenharia de Produto. Os funcionários da sua área estão aptos para o trabalho em simulação virtual? A experiência dos especialistas das áreas experimentais pode ser útil na área de simulação?

4.4.5.1 Teste piloto do questionário roteiro

Com o objetivo de avaliar e validar os questionários que foram aplicados em campo, foi efetuado um teste prático da aplicação do questionário com o Gerente do Departamento de VSAS.

Com a entrevista piloto foi possível identificar quais questões não estavam suficientemente claras ou focadas na obtenção das informações necessárias para analisar os pressupostos estabelecidos. Desta forma, o questionário sofreu alterações, alguns itens foram removidos, outros adicionados e reformulados, visando maior objetividade e facilidade para a análise dos dados.

O Capítulo 4 apresentou a estratégia de pesquisa utilizada, detalhando a base para a obtenção de dados e informações. O Capítulo 5 apresenta os principais resultados da pesquisa que corresponde à análise dos dados obtidos na pesquisa de campo.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO

Este capítulo possui o objetivo de apresentar um breve histórico da empresa em estudo, o organograma simplificado da unidade de análise e o processo de desenvolvimento de produtos em uso pela empresa, seguido pela apresentação e análise dos dados obtidos na pesquisa de campo.

5.1 Apresentação do estudo de caso

A General Motors do Brasil iniciou as atividades no setor automotivo em 1925 em galpões alugados na região do Ipiranga, mas já em 1930 foi inaugurada a fábrica em São Caetano do Sul (PANORAMA, 2000).

A unidade de São Caetano do Sul comporta tanto a fábrica de montagem de veículos de passageiros assim como um complexo tecnológico, onde está localizado a Engenharia de Produtos, Engenharia de Processos, *Design*, Engenharia de Planejamento, Compras, Finanças e Vendas; as atividades de todos estes departamentos permitem o desenvolvimento e implementação de novos produtos, ou seja, adaptação de veículos europeus ou novos projetos nacionais, como exemplos de projetos completamente nacionais, tem-se o Celta e a Meriva.

A unidade de São Caetano do Sul tornou-se a matriz da General Motors do Brasil, devido à capacidade tecnológica.

Além do centro tecnológico localizado em São Caetano, a GMB também possui um campo de provas em Indaiatuba, interior de São Paulo. Neste centro de engenharia automotiva são desenvolvidos e validados os veículos marca Chevrolet, através de ensaios de laboratório e pistas de testes que reproduzem as situações mais críticas das estradas brasileiras.

A GMB conta com vários complexos industriais além da fábrica em São Caetano do Sul, as fábricas abaixo descritas foram inauguradas de acordo com um plano de

extensão da capacidade produtiva ocorrido com o decorrer das décadas (PANORAMA, 2000):

- Em 1959 entrou em operação a Planta de São José dos Campos, onde estão localizadas as fábricas de motores, veículos comerciais e de passageiros.
- Em 1999 foi a vez do Complexo de Mogi das Cruzes responsável pela produção de peças estampadas de veículos descontinuados, permitindo o aumento da produtividade da manufatura nas demais unidades industriais, onde as peças para os veículos fora de linha dividiam espaço com a produção das peças dos veículos atuais.
- Em 2000, inaugurado em Gravataí um novo e moderno complexo industrial composto pela unidade de montagem de veículos de passageiros e rede de fornecedores que fornecem as peças diretamente na linha de produção.

Atualmente, a General Motors do Brasil continua investindo no desenvolvimento de novos produtos e sistemas para ampliar seu mercado nacional e internacional; para manter-se competitiva os fatores chaves “custo, tempo e qualidade” são perseguidos em todos os projetos.

5.1.1 A unidade de análise: Engenharia de Produtos da GMB

Este trabalho focou as atividades desenvolvidas pela Engenharia de Produtos, que na GMB é formado pelos seguintes grupos: **Engenharia de Operações e Validações e Engenharia de Projetos**.

A Engenharia de Operações e Validações está composta basicamente dos seguintes departamentos: **Engenharia Experimental** – responsável pela construção e avaliação estática dos protótipos físicos, **Campo de Provas e Laboratórios** – responsável pelos testes dinâmicos e avaliação dos protótipos físicos e **Integração Protótipo e Validação** - responsável pela elaboração e consolidação do plano de ADV (Análise, Desenvolvimento e Validação) de novos programas.

A Engenharia de Projetos está composta basicamente dos seguintes departamentos: **Engenharia de Chassis, Engenharia de Carrocerias, Engenharia Elétrica** – cujas atividades estão relacionadas à especificação, projeto e desenvolvimento do produto seja na área de chassis, carroceria ou elétrica, **VSAS (Virtual Synthesis, Analysis and Simulation)** – cujas atividades estão relacionadas diretamente com o desenvolvimento do produto através do uso intensivo de simulações CAE visando a otimização do produto. A Figura 5.1 apresenta o organograma simplificado da Engenharia de Produto da GMB, os departamentos identificados com fundo laranja correspondem aos departamentos que foram entrevistadas no estudo de caso.

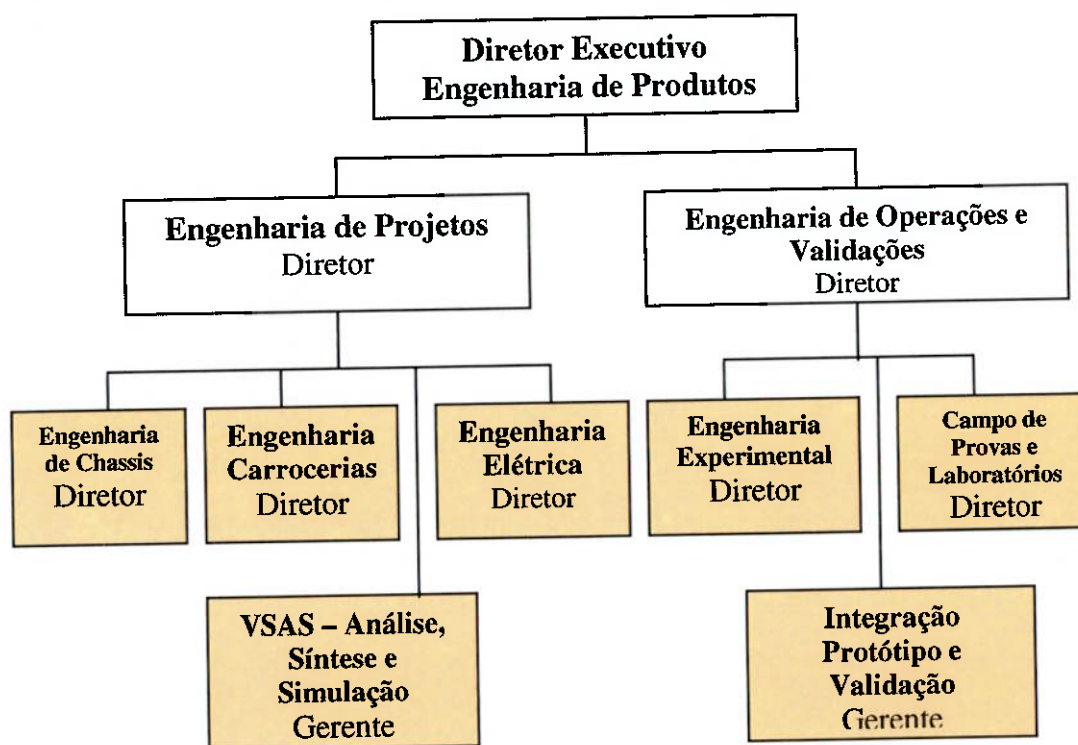


Figura 5.1- Organograma simplificado da unidade de análise do estudo de caso.

5.1.2 O processo de desenvolvimento de produtos na GMB

A GM possui um processo global de desenvolvimento de produto denominado internamente de GVDP (*Global Vehicle Development Process*) que visa garantir o desenvolvimento competitivo em todas as regiões da corporação, adotando a estratégia de compartilhamento do trabalho corporativo para facilitar a implementação das lições aprendidas por qualquer unidade da companhia.

O GVDP está baseado em vários fundamentos de desenvolvimento do veículo, como:

- A simulação virtual do produto e processo deve preceder qualquer avaliação física,
- Utilização de modelos matemáticos correlacionados e verificados como base do programa do veículo,
- Mínimo uso de protótipos físicos para as avaliações preliminares do projeto.

Portanto, para o PDP da empresa estudada o uso da simulação virtual é considerado um fator estratégico.

O processo de desenvolvimento de um veículo pode variar de acordo com a quantidade de modificações de um veículo existente ou com as características de um veículo novo, assim, as classes específicas de produtos terão processos de desenvolvimento diferenciados em função da quantidade de atividades envolvidas e tempo de desenvolvimento.

A descrição do processo geral de desenvolvimento de um novo projeto está representada de forma simplificada e adaptada na Figura 5.2.

A primeira etapa corresponde à observação do mercado, que sinalizará os novos direcionamentos e tendências mundiais nos segmentos de atuação. O passo seguinte é a realização de testes e pesquisas de mercado, previsão de vendas e estudo preliminar de viabilidade técnica e financeira de um novo veículo. Após este planejamento e aprovação para o desenvolvimento, iniciam-se os estudos da arquitetura do veículo (GENERAL MOTORS, 2003b).

Vários estudos preliminares são necessários para a escolha e aprovação da arquitetura definitiva para o programa, estes estudos podem ser feitos com a utilização de veículos existentes, bem como através de avaliações virtuais.

Após a aprovação da arquitetura, segue-se com a primeira fase de desenvolvimento, denominada neste trabalho de **Fase A**, cujo objetivo é realizar as primeiras análises virtuais de determinados componentes e subsistemas, como exemplo pode-se citar o assoalho e a estrutura do painel de instrumentos, nesta fase são esperadas as primeiras avaliações virtuais de performance direcionadas a impacto, aerodinâmica, durabilidade, fadiga e dinâmica de veículos.

Com a aprovação do tema, ou seja, definição preliminar da forma e das características do projeto, segue-se para a **Fase B**, onde análises virtuais de determinados componentes e subsistemas são realizados, como exemplo pode-se citar o assoalho, motor, transmissão, freios, suspensão, escapamento e cintos. Nesta fase, o objetivo é realizar avaliações mais completas da performance do veículo, enfatizando-se o fator de proteção ao ocupante, questões estruturais e as características de motor e transmissão.

As fases A e B correspondem ao desenvolvimento virtual, no entanto durante este período podem ser utilizados protótipos físicos preliminares para confirmação dos resultados obtidos nas avaliações virtuais. Os protótipos físicos também são utilizados para testes de performance onde a capacidade de avaliação virtual é limitada. Os protótipos relativos às fases A e B correspondem a unidades de produção retrabalhadas ou adaptadas com o objetivo de representar de forma preliminar o sistema em estudo.

Com a liberação preliminar da superfície matemática do interior e exterior do veículo segue-se com a **Fase C**, onde são realizadas as primeiras análises virtuais e físicas do veículo completo e sua funcionalidade com o objetivo de verificar os resultados de performance, análise completa do design do veículo e seqüência de montagem dos componentes e sistemas. Para a construção dos veículos desta fase, são desenvolvidos e fabricados ferramentais e dispositivos protótipos.

Com a liberação final da superfície matemática do interior e exterior do veículo, a manufatura inicia a construção dos dispositivos e equipamentos de produção, em

paralelo aos fornecedores, que também preparam seus ferramentais de produção. A **Fase D** corresponde à construção de protótipos e avaliações físicas para a validação dos processos de fabricação da manufatura e das peças finais dos fornecedores, provenientes dos ferramentais de produção. A partir da liberação final da superfície matemática, as avaliações virtuais ocorrem como melhoria contínua do projeto.

As nomenclaturas: Fase A, Fase B, Fase CI, Fase D foram adotadas neste trabalho devido ao fator “proteção à informação” e para facilidade de referência, portanto as nomenclaturas utilizadas pela unidade de análise em estudo não foram apresentadas.

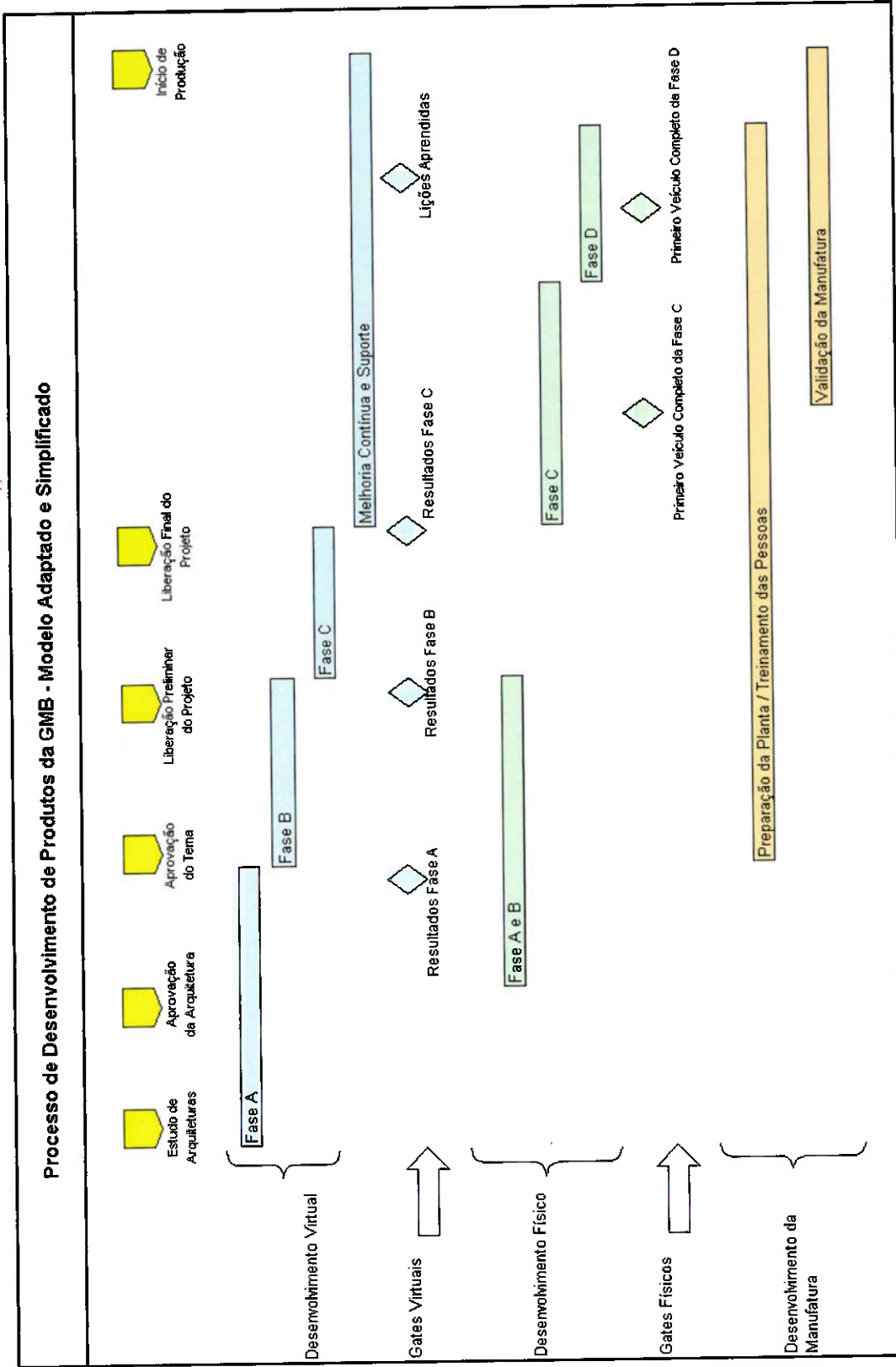


Figura 5.2- Processo de desenvolvimento de produto adaptado de General Motors (2003b).
 Nota: A Figura 5.2 não está em escala.

5.1.3 Definição da aplicação de protótipos físicos e/ou virtuais.

O processo de definição da aplicação de protótipos físicos ou virtuais no desenvolvimento do projeto demanda uma série de informações e conhecimentos técnicos para a escolha da melhor estratégia a ser adotada.

Os documentos denominados PPS (*Product Program Submission*) e VTS (*Vehicle Technical Specification*) correspondem respectivamente ao detalhamento do conteúdo do programa e características técnicas como requisitos, normas, especificações regulamentares a serem atendidas pelo programa. Estes documentos são a base para a formação do plano de análise, desenvolvimento e validação do produto. O plano é dividido por ciclos de desenvolvimento desde avaliação parcial até a validação total do veículo.

Em adição aos documentos acima descritos é essencial conhecer a disponibilidade e confiabilidade dos modelos virtuais, assim como discutir com os grupos de engenharia as experiências e as lições aprendidas com os projetos anteriores. Estas entradas permitem o julgamento adequado para a definição do uso de protótipos físicos e virtuais, conforme ilustra a Figura 5.3.

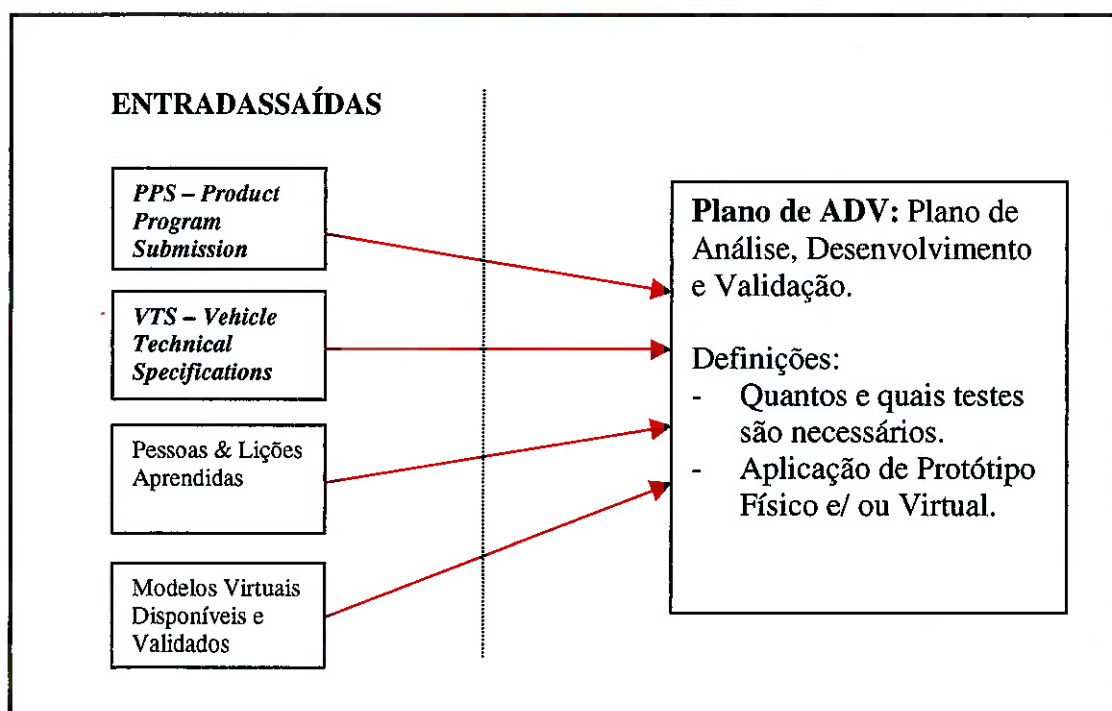


Figura 5.3- Entradas necessárias para o plano de análise, desenvolvimento e validação do veículo.

5.2 Apresentação e análise dos dados secundários

Este tópico apresenta os dados obtidos no estudo de caso através da análise de documentos, os documentos utilizados foram: relatórios, normas legais e procedimentos dos testes selecionados como objeto deste trabalho.

5.2.1 - Teste 1: *roof crush*

O teste de *roof crush* (*intrusão do teto*) corresponde a um teste estático de intrusão do teto para análise do veículo quanto ao atendimento dos requisitos de proteção ao ocupante em situações de capotamento, conforme requisitos legais. O detalhamento do teste está descrito no ANEXO C, conforme procedimento FMVSS216 (*Federal Motor Vehicle Safety Standard 216*).

5.2.1.1 – Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual.

Com a análise documental foi possível identificar as diferenças para a execução do teste físico e simulação uma vez que os equipamentos, dados de entrada e hardware são distintos para cada modalidade. A Tabela 5.1 apresenta a comparação destes recursos e informações.

Tabela 5.1- Comparação do teste físico e simulação do *roof crush*.

TESTE FÍSICO	SIMULAÇÃO VIRTUAL
EQUIPAMENTOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Cilindro hidráulico com uma placa retangular e mecanismo de ajuste de altura, • Instrumentação eletrônica e equipamento para gravar e atuar o sensor como requerido, • Computador e software para processamento das informações obtidas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador e software para realização da simulação.
HARDWARE E DADOS DE ENTRADA	
<ul style="list-style-type: none"> • Carroceria protótipo com portas completas montadas na unidade e vidro pára-brisa. • Procedimento de Teste GMI LI-1C-1(<i>General Motors International Engineering Standard LI-1C-1</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo matemático da carroceria com portas e pára-brisa baseado no modelo CAD. • Curva discretizada dos materiais que compõem as partes simuladas. • Metodologia padrão para simulação de <i>roof crush</i> baseado na norma legal FMVSS216.

Enquanto o teste físico utiliza o procedimento de teste GMI LI-1C-1, a simulação virtual utiliza uma metodologia de simulação, mas ambos estão baseados na norma legal FMVSS216 e têm o objetivo de garantir a condução do teste em concordância com os requisitos estipulados na norma legal.

O procedimento do teste físico está focado nas características dos equipamentos, dispositivos, hardware de teste, bem como no procedimento de preparação da carroceria no dispositivo de teste e medição dos resultados.

A metodologia de simulação determina as técnicas e diretrizes para a avaliação analítica da performance de intrusão do teto, como:

- Tamanho da malha do modelo,
- Representações dos pontos de solda,
- Condições de contorno,
- Conteúdo e tamanho do modelo,
- Representação do tipo de contato (coeficiente de atrito),
- Cargas e respectiva direção de aplicação,
- Reprodução dos dispositivos de teste,
- Formato da obtenção dos resultados.

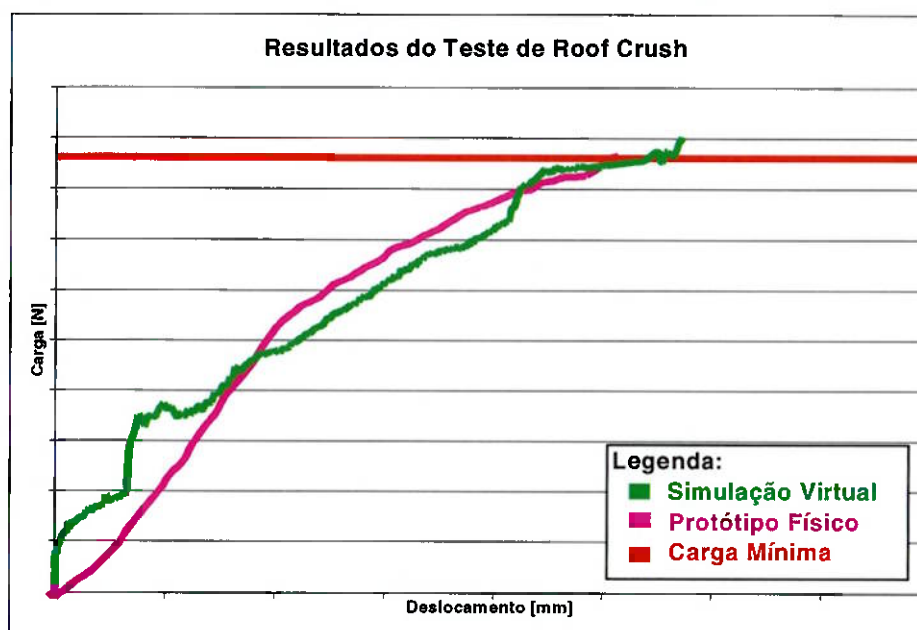
Desta forma a metodologia de simulação permite a equivalência do procedimento de teste físico para a simulação virtual.

5.2.1.2 – Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual

A análise dos resultados do teste físico com a simulação virtual indicou a precisão da simulação, concluindo que a diferença da simulação virtual para o teste de *roof crush* é menor que 10% quando comparado com o resultado do protótipo físico, conforme relatórios técnicos do projeto A (CPCA 2547/2002 e VSAS1009V).

A Figura 5.4 representa a resposta completa do teste físico e simulação de *roof crush* que corresponde ao deslocamento obtido em relação à força aplicada, possibilitando análise dos desvios de resposta entre teste físico e simulação.

Figura 5.4- Curva de resposta do teste físico e simulação do *roof crush*



Portanto, foi possível classificar o teste de *roof crush* como **Nível 04** em referência à escala de capacidade e confiabilidade da simulação apresentada pela Tabela 4.3, uma vez que a confiabilidade do teste é maior que 90%. Contudo, destaca-se que a norma legal FMVSS216 requer o uso de protótipo físico para a validação do projeto.

Tabela 5.2- Resultado da simulação do *roof crush*.

Teste	Diferença do Resultado da Simulação em relação ao Protótipo Físico	Nível de Capacidade e Confiabilidade de Simulação (Critério da Tabela 4.3)
<i>Roof Crush</i>	< 10%	Nível 4

5.2.2 - Teste 2: *torsional stiffness*

O teste *torsional stiffness* (rigidez torsional) corresponde a um teste estático de torção da carroceria que não está relacionado a nenhuma norma legal, sendo um requisito corporativo do desenvolvimento do projeto. O detalhamento do teste está descrito no ANEXO C, conforme procedimento GMI L-1-8 (*General Motors International Engineering Standards L-1-8*).

5.2.2.1 – Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual.

Seguindo a mesma estrutura de análise do teste de *roof crush*, a Tabela 5.3 apresenta a comparação dos equipamentos, hardware e dados de entrada para a execução do teste de *stiffness*.

Tabela 5.3- Comparação do teste físico e simulação de *stiffness*.

TESTE FÍSICO	SIMULAÇÃO VIRTUAL
EQUIPAMENTOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo de torção, • Células de carga, pesos de 170kg e 100 relógios comparadores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador e software para realização da simulação.
HARDWARE E DADOS DE ENTRADA	
<ul style="list-style-type: none"> • Carroceria protótipo com todos os componentes de reforço estrutural, como subframe, eixo traseiro, crossmember (parte estrutural do painel de instrumentos). • Procedimento de Teste GMI L-1-8. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo matemático da carroceria com os componentes de reforço estrutural baseado no modelo CAD. • Dados dos materiais. • Metodologia padrão para simulação de <i>stiffness</i> baseado no procedimento de Teste GMI L-1-8.

O procedimento do teste físico GMI L-1-8 está focado nas características dos equipamentos, dispositivos, hardware de teste assim como na preparação da carroceria no dispositivo de teste, aplicação das cargas e medição dos resultados. Já a metodologia de simulação determina as técnicas e diretrizes para a avaliação analítica do *torsional stiffness*, permitindo a equivalência do procedimento de teste físico para a simulação virtual.

5.2.2.2 – Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual

Conforme dados obtidos através dos relatórios técnicos do projeto B (CPCA 427/00), foi possível classificar o teste de *torsional stiffness* como **Nível 05** de acordo com a

escala de capacidade e confiabilidade de simulação apresentada pela Tabela 4.3; isto devido à precisão do resultado da simulação ser maior que 95% quando comparado com o resultado do protótipo físico.

Tabela 5.4- Resultado da simulação de *stiffnes*.

Teste	Diferença do Resultado da Simulação em relação ao Protótipo Físico	Nível de Capacidade e Confiabilidade de Simulação (Critério da Tabela 4.3)
<i>Stiffness</i>	< 5%	Nível 5

5.2.3 - Teste 3: impacto lateral

O teste de impacto lateral corresponde a um requisito legal, onde é verificado se o veículo possui proteção eficiente ao ocupante em caso de colisão lateral. O detalhamento do teste está descrito no ANEXO C, conforme procedimento de teste ECE-R95.01 (*Economic Commission European R95.01*).

5.2.3.1 – Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual.

Da mesma maneira como apresentado nos tópicos 5.2.2.1 e 5.2.1.1 segue a comparação dos equipamentos, hardware e dados de entrada para a realização do teste de impacto lateral.

Tabela 5.5- Comparação do teste físico e simulação de impacto lateral.

TESTE FÍSICO	TESTE VIRTUAL
EQUIPAMENTOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Barreira Móvel Deformável • <i>Dummy</i> (esqueleto metálico e plástico que representa o corpo humano). • Instrumentação para aquisição de dados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador e software para realização da simulação.
HARDWARE E DADOS DE ENTRADA	
<ul style="list-style-type: none"> • Veículo protótipo completo com todos os componentes. • Procedimento de teste ECE – R95.01 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo matemático do veículo completo baseado no modelo CAD. • Curva discretizada do material • Metodologia padrão para simulação de impacto lateral baseado no procedimento de Teste ECE- R95.01.

A metodologia de simulação de impacto lateral permite a análise estrutural do teste de impacto, mas a simulação virtual não possui a mesma versão de *dummy* (esqueleto metálico e plástico que representa o corpo humano) utilizado no teste físico impedindo a comprovação de acelerações e deflexões entre *dummy* real e virtual.

Portanto, a comparação dos resultados do teste físico com a simulação virtual mencionada no tópico 5.2.3.2 foi feita apenas em relação à deformação estrutural.

5.2.3.2 – Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual

Conforme dados obtidos através da análise documental do projeto C, o teste de impacto lateral é melhor classificado como Nível 03 na escala de capacidade e confiabilidade de simulação apresentada pela Tabela 4.3; para este teste é requerido protótipo físico para validação devido requisito legal e limitações do método de simulação, e a diferença do resultado de simulação em relação ao protótipo físico é menor que 15%.

Tabela 5.6- Resultado da simulação de impacto lateral.

Teste	Diferença do Resultado da Simulação em relação ao Protótipo Físico	Nível de Capacidade e Confiabilidade de Simulação (Critério Tabela 4.3)
Impacto Lateral	< 15%	Nível 3

5.2.4 - Teste 4: penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar

O teste de penetração de água é realizado para determinar se o sistema de admissão de ar ingerirá água sob condições de pista alagada. O detalhamento do teste está descrito no ANEXO C, conforme procedimento R.AB.06.090 (Teste de rodagem abusivo 06.090).

5.2.4.1 – Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual.

Da mesma maneira como apresentado nos tópicos anteriores 5.2.3.1, 5.2.2.1 e 5.2.1.1, segue a comparação dos equipamentos, hardware e dados de entrada para a realização do teste de penetração de água, conforme mostra a Tabela 5.7.

Tabela 5.7- Comparação do teste físico e simulação de penetração de água.

TESTE FÍSICO	SIMULAÇÃO VIRTUAL
EQUIPAMENTOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo Detector d'água • Pista de lama com determinada altura d' água. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador e software para realização da simulação.
HARDWARE E DADOS DE ENTRADA	
<ul style="list-style-type: none"> • Veículo completo com todos os componentes. • Procedimento de teste R.AB.06.090. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo matemático da parte frontal do veículo baseado no modelo CAD. • Procedimento de teste R.AB.06.090 (não há metodologia padrão para simulação)

Para o caso específico do teste de intrusão de água, a simulação virtual utiliza o elemento ar para representar o fluxo de água, prevendo se haverá passagem de água

pelo sistema de admissão de ar do motor. No entanto, não é possível determinar a quantidade de água que passa pelo elemento filtrante nem a umidade na saída de ar do filtro, conforme requisito do procedimento de teste, devido falta de software de simulação desenvolvido para esta aplicação.

A simulação virtual permite uma análise preliminar do sistema, mas não tem correlação quantitativa com o teste físico. Para que a simulação tenha equivalência com o teste físico é preciso desenvolver um software que simule a entrada de água e o movimento de componentes do compartimento do motor uma vez que são fatores determinantes no fluxo de entrada de água no sistema de admissão de ar.

5.2.4.2 – Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual

Como a simulação virtual não permite correlação quantitativa com o teste físico para o teste de penetração de água, a Tabela 5.8 compara os resultados dos testes de forma qualitativa.

Conforme dados obtidos através da análise documental do projeto D, o teste de penetração de água foi classificado como **Nível 02** em referência à escala de capacidade e confiabilidade de simulação apresentada pela Tabela 4.3, uma vez que há falta de software específico para este teste, permitindo apenas avaliação qualitativa.

Tabela 5.8- Resultado da simulação de penetração de água.

Teste	Resultado da Simulação	Resultado do Teste Físico	Nível de Capacidade e Confiabilidade de Simulação (Critério Tabela4.3)
Penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar.	Com a aplicação de defletor na região A, há indicação de redução do fluxo de água na entrada do sistema de admissão de ar.	Com o uso de defletor na região A, não há penetração de água no motor e não há umidade na saída de ar do elemento filtrante.	Nível 2

5.2.5 - Teste 5: medição de temperatura na carroceria

O teste de medição de temperatura é realizado para avaliar de forma objetiva as temperaturas da carroceria e seus componentes uma vez que as superfícies internas do veículo não devem exceder temperaturas que possam representar algum dano a pele humana. A análise refere-se à medição de temperatura do carpete do assoalho, cujo objetivo é garantir nível de conforto térmico no veículo dentro da meta estabelecida para o projeto. O detalhamento do teste está descrito no ANEXO C, conforme procedimento de teste R.AR.13.022 (Teste de rodagem de arrefecimento 13.022).

5.2.5.1 – Identificação das diferenças para execução do teste físico e simulação virtual.

Seguindo a mesma estrutura de análise dos tópicos 5.2.4.1, 5.2.3.1, 5.2.2.1 e 5.2.1.1, a Tabela 5.9 traz a comparação dos equipamentos, hardware e dados de entrada para a realização do teste de temperatura de carroceria, físico e virtual.

Tabela 5.9- Comparação do teste físico e simulação de temperatura de carroceria.

TESTE FÍSICO	SIMULAÇÃO VIRTUAL
EQUIPAMENTOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentação para aquisição de dados e termopares. • Pista de teste. • Anemômetro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador e software para realização da simulação.
HARDWARE E DADOS DE ENTRADA	
<ul style="list-style-type: none"> • Veículo completo com todos os componentes. • Procedimento de teste R.AR.13.022 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo matemático parcial do veículo baseado no modelo CAD. • Procedimento de teste R.AR.13.022 • Metodologia padrão para simulação de medição de temperatura. • Temperatura do Escapamento. • Propriedades e dados térmicos do material (aço).

Para o caso específico do teste de medição de temperatura, a simulação virtual requer como dado de entrada o valor da temperatura do escapamento, que é obtido através de medições no protótipo físico no campo de provas.

De posse da temperatura do escapamento, a simulação virtual permite a obtenção da temperatura no assoalho da região em estudo, mas não a temperatura final no carpete devido à falta de referência da perda de calor do assoalho até a superfície do carpete.

Devido às restrições apresentadas, os dados provenientes do protótipo físico são a garantia da geração de resultados refinados na simulação virtual. Neste caso, a simulação não elimina os protótipos, mas pode reduzir ciclos de avaliação física desde que os dados base como a temperatura do escapamento e perda de calor do carpete estejam disponíveis.

5.2.5.2 – Comparação dos resultados do teste físico e simulação virtual

Conforme dados obtidos através dos relatórios técnicos do projeto E (CPCA 3650/2004, VSAS AT023 e VSAS AT025), o teste de medição de temperatura da carroceria foi classificado como **Nível 03** de acordo escala de capacidade e confiabilidade de simulação apresentada pela Tabela 4.3. O resultado da simulação apresentou diferença menor que 10%, mas como depende de dados provenientes dos protótipos físicos, este teste é melhor classificado como nível 03.

Tabela 5.10- Resultado da simulação de temperatura de carroceria.

Teste	Diferença do Resultado da Simulação em relação ao Protótipo Físico	Nível de Capacidade e Confiabilidade de Simulação (Critério Tabela 4.3)
Temperatura de Carroceria	< 10%	Nível 3

5.3 Apresentação e análise dos dados primários

Este tópico apresentará os dados obtidos através das entrevistas aplicadas aos departamentos envolvidos no processo de decisão do plano de desenvolvimento e validação dos projetos.

5.3.1 Roteiro I

O roteiro I como já mencionado anteriormente foi aplicado diretamente ao Gerente do Departamento de VSAS (ver roteiro I no anexo A). Os tópicos subsequentes detalham os principais resultados obtidos com a aplicação do roteiro I.

5.3.1.1 Evolução da simulação virtual

De acordo com o critério de capacidade e confiabilidade de simulação apresentado na Tabela 4.3, os testes selecionados nesta pesquisa seguiram a evolução conforme mostrado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11- Evolução de Simulação de acordo critério da Tabela 4.3.

Descrição dos Testes	Criação do Modelo (Data)	Evolução (Critério Tabela 4.3)			
		1997	1999	2001	2004
<i>Roof Crush</i>	1999	1	2	3	4
<i>Torsional Stiffness</i>	1996	3	4	5	5
Impacto Lateral	1999	1	2	3	3
Temperatura de Carroceria	2000	1	1	2	3
Penetração de Água no Motor pelo Sistema de Admissão de Ar	2001	1	1	2	2

É importante destacar que a evolução dos testes no período analisado foi bastante expressiva. Pôde-se verificar que em 1997, as técnicas de simulação virtual não eram

aplicadas em mais da metade dos testes selecionados (60%), já em 2004 todos os testes podem ser avaliados através da simulação, embora com níveis de confiabilidade distintos.

Outro ponto observado corresponde à evolução diferenciada da capacidade de simulação para os testes selecionados, enquanto o *roof crush* migrou do nível 1 para o nível 4, no mesmo período o teste de penetração de água avançou apenas do nível 1 para o nível 2.

A Figura 5.5 relaciona a quantidade de projetos em que já foi aplicada a simulação CAE e comparada com o resultado físico. Devido ao fator “proteção à informação” não foram apresentados os valores absolutos referente à quantidade de projetos, utilizou-se como base da análise comparativa o teste de *stiffness*. O eixo das abscissas da Figura 5.5 representa os testes selecionados e sua respectiva classificação quanto à confiabilidade e capacidade de simulação conforme análise documental.

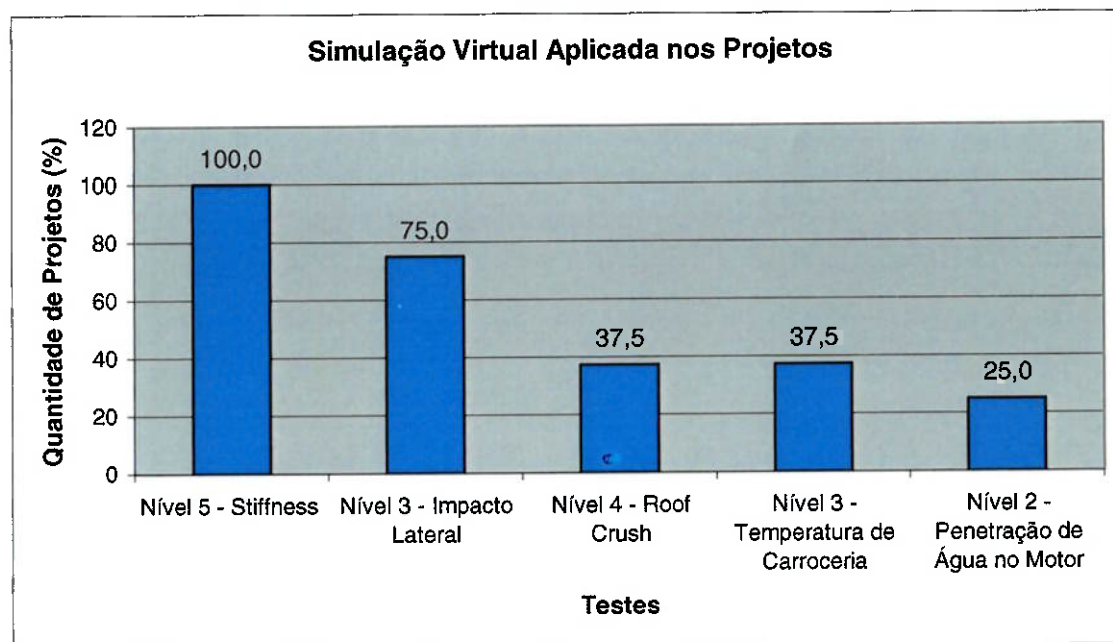


Figura 5.5- Simulação virtual aplicada nos projetos.

As comparações dos resultados da simulação com o teste físico contribuem para o alcance de uma melhor confiabilidade da resposta de simulação, permitindo o ajuste e correção da metodologia de simulação. No entanto, constatou-se que apenas a comparação com o teste físico não é suficiente para o aumento da confiabilidade da simulação. Por exemplo, a simulação de impacto lateral classificado como nível 03, já foi aplicado em um volume de projetos superior ao teste de *roof crush*, mas devido a limitações do método de simulação não foi possível alcançar maior confiabilidade. A limitação da simulação de impacto lateral é o fator responsável pela estabilização da evolução no nível 03 (conforme critério da Tabela 4.3) como apresentado nos dados da Tabela 5.11.

Para os testes de *roof crush* e *stiffness* a evolução da simulação ocorreu de forma constante no decorrer do tempo não havendo um fator limitante para a sua evolução e as quantidades de correlações com o protótipo físico contribuíram no ajuste da metodologia de simulação.

Destaca-se que não foi constatada relação direta entre a quantidade de comparações da simulação virtual com o protótipo físico e a evolução da simulação. Portanto, existem fatores específicos que influenciam a evolução de cada teste de simulação como exemplo, as restrições legais, restrições do modelo de simulação, disponibilidade de softwares, entre outros. No entanto, é necessário mencionar que a comparação permite a validação da metodologia da simulação virtual, sendo assim uma ferramenta importante para a divulgação da confiabilidade da simulação em relação ao protótipo físico.

Segundo Royde (2001a), a alta performance computacional gerou o aumento da capacidade para a realização de simulações virtuais mais complexas, desta forma os modelos de simulação podem ser feitos com maior número de elementos resultando em maior precisão dos resultados. A evolução dos testes de *roof crush*, *stiffness* e até mesmo o impacto lateral confirmaram esta referência teórica, no entanto como já mencionado há fatores específicos que estão relacionados à evolução de cada teste de simulação.

A importância da comparação do protótipo físico com a simulação virtual como ferramenta de validação da metodologia de simulação também foi confirmada pela revisão teórica, através de Pritsker (1996) e Ryan (2000).

5.3.1.2 Comparação do custo e tempo do teste físico e simulação virtual.

Neste tópico apresentam-se as diferenças de custo e tempo do teste físico e simulação. A Tabela 5.12 apresenta os fatores relacionados ao tempo e custo para a execução das duas modalidades de teste.

Tabela 5.12- Fatores relacionados ao custo e tempo do teste físico e simulação.

	TESTE FÍSICO	SIMULAÇÃO VIRTUAL
FATORES RELACIONADOS AO CUSTO	<ul style="list-style-type: none"> • Mão de obra, • Material, • Dispositivos de montagem, • Ferramental para geração de peças, • Computadores e softwares (licenças de uso). 	<ul style="list-style-type: none"> • Mão de obra, • Computadores e softwares (licenças de uso).
FATORES RELACIONADOS AO TEMPO	<ul style="list-style-type: none"> • Construção do ferramental e dispositivos, • Inspeção do ferramental e dispositivos, • Montagem da carroceria, • Pintura, • Montagem de componentes e Sistemas, • Preparação, execução do teste. • Análise dos resultados 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação do modelo, • Adaptação do modelo matemático, • Execução da simulação. • Análise dos resultados

Nota: Os dados referentes à simulação virtual foram obtidos na entrevista do roteiro I, os dados referentes ao teste físico foram obtidos por meio de análise documental.

A Tabela 5.13 apresenta a relação do custo e tempo para o protótipo físico e simulação, para este cálculo foram considerados os fatores descritos na Tabela 5.12,

exceto o custo de construção dos ferramentais e dispositivos de montagem das peças protótipos, uma vez que a redução de *hardware* por projetos não elimina a fabricação dos ferramentais e dispositivos, este custo é independente do número de protótipos.

Devido ao fator “proteção à informação” não foram apresentados os dados absolutos na Tabela 5.13, utilizou-se como base da análise comparativa o protótipo físico de maior custo e tempo, o teste de impacto lateral.

Tabela 5.13- Relação de custo e tempo para o primeiro protótipo físico e a primeira simulação.

TESTES	PRIMEIRO PROTÓTIPO FÍSICO	PRIMEIRA SIMULAÇÃO VIRTUAL
CUSTO		
<i>Roof Crush</i>	41%	17%
<i>Stiffness</i>	41%	17%
Impacto Lateral	100%	17%
Penetração de água	25%	2%
Temperatura	25%	2%
TEMPO		
<i>Roof Crush</i>	90%	43%
<i>Stiffness</i>	90%	43%
Impacto Lateral	100%	43%
Penetração de água	36%	2%
Temperatura	36%	4%

É importante ressaltar que os dados apresentados na Tabela 5.13 são apenas referenciais, que valem para projetos de médio envolvimento, ou seja, projetos cujo veículo base é existente e há modificações no capô, tampa traseira, painel lateral e alterações de acabamento externo como pára-choque, faróis e lanternas. O valor do protótipo pode variar de forma significativa segundo o porte do projeto, como referência um protótipo de um programa de grande envolvimento pode custar em torno de R\$500.000,00.

Com as informações acima, concluiu-se que é possível a redução de custo e tempo quando se utiliza a simulação virtual em relação ao protótipo físico, no entanto, para cada tipo de teste é possível notar diferentes valores dos protótipos físicos, isto devido às características exigidas para cada teste.

Os testes de *roof crush* e de *stiffness* requerem apenas a carroceria protótipo para o teste físico, já para o teste de impacto lateral é necessário o veículo protótipo completo, este é o motivo pelo qual ocorrem as diferenças de custo e tempo de preparação das unidades. Já os testes de penetração de água e de temperatura podem ser feitos com protótipos parciais, ou seja, adaptação de veículo normal de produção para representar a região de estudo.

As diferenças encontradas entre custo e tempo da simulação dos diferentes testes estão relacionadas com o nível de complexidade e precisão da construção do modelo matemático para a representação da realidade física. Os testes de penetração de água e temperatura são feitos com modelos de simulação bidimensionais e parciais, resultando menor representatividade da realidade física, menor custo e tempo.

Outro aspecto importante quando se compara custo e tempo da simulação com o protótipo físico, concerne ao número de avaliações. Supondo falha na primeira avaliação e demanda de um segundo teste, verificou-se que para a realização deste segundo teste, as diferenças de custo e de tempo foram ainda maiores entre simulação e protótipo físico. A Tabela 5.14 exemplifica esta situação com o teste de *roof crush*, foi utilizada como base da análise comparativa o protótipo físico.

Tabela 5.14- Comparação do tempo e custo do protótipo físico e simulação, para a primeira avaliação e avaliação adicional.

<i>ROOF CRUSH</i>			
Primeira Avaliação		Avaliação Adicional	
CUSTO		CUSTO	
Protótipo Físico	Simulação	Protótipo Físico	Simulação
100%	41%	100%	4%
TEMPO		TEMPO	
Protótipo Físico	Simulação	Protótipo Físico	Simulação
100%	48%	52%	5%

O custo e o tempo de uma simulação adicional apresentaram valores bem inferiores quando comparados à primeira simulação, devido ao fato do modelo de elementos finitos já estar pronto para uma avaliação adicional, requerendo apenas sua adaptação conforme solução de engenharia. Para os dados relacionados na Tabela 5.14, considerou-se como solução de engenharia a mudança de material ou espessura das peças em estudo.

Confrontando com a revisão teórica, os benefícios da simulação referente à redução de custos e tempo de implementação do produto também foram confirmados pelos autores Clark; Fujimoto (1991), Clark; Wheelwright (1992), Campbell (1998), Xu (1998), Krouse (1999) e Ryan (2000).

5.3.1.3 As restrições para a substituição total do protótipo físico e fatores para a melhoria da simulação.

A Tabela 5.15 apresenta as principais restrições para a substituição total do protótipo físico pela simulação virtual, analisando os fatores e identificando para cada tipo de teste em estudo, as potenciais melhorias do modelo de simulação que podem resultar em aumento da confiabilidade do modelo virtual e, por conseguinte, gerar maior redução de protótipos físicos.

Tabela 5.15- Restrições para substituição total do protótipo físico e fatores para a melhoria da simulação.

Testes	Restrições para Eliminação Total do Protótipo Físico	Fatores para Melhoria da Simulação & Redução de Protótipos			
		Desenvolver software de simulação	Melhorar modelo de simulação, garantindo a representação fiel da realidade física.	Ajustar o modelo de simulação, através de comparações dos resultados dos testes dos protótipos físicos	Aceitação dos órgãos governamentais da simulação virtual como validação
Nível 4: <i>Roof Crush</i>	Requisito Legal requer protótipo físico de validação.			SIM	SIM
Nível 3: Impacto Lateral	Há limitação do modelo de simulação (representação do <i>dummy</i>) e requisito legal requer protótipo físico de validação.		SIM	SIM	SIM
Nível 5: <i>Torsional Stiffness</i>	Não há restrições				
Nível 2: Penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar.	Falta software de simulação que represente o sistema de análise.	SIM	SIM	SIM	
Nível 3: Temperatura de Carroceria	Dificuldade em obter os dados de entrada. / Faltam mais correlações com os resultados dos testes físicos			SIM	

Pode-se verificar que o teste de intrusão do teto – *roof crush* atualmente não é substituído totalmente pela simulação virtual devido à restrição dos requisitos legais de órgãos governamentais, portanto, atualmente o grande potencial de redução de protótipos está na fase de desenvolvimento do projeto. Não obstante, pode-se ainda melhorar o nível atual de confiabilidade da simulação que está faixa de 90 a 95%, promovendo maior número de comparações com o protótipo físico. A redução total

de protótipos para este teste está vinculada à aceitação dos órgãos governamentais dos resultados do teste de simulação como validação do projeto.

Para o teste de impacto lateral embora se tenha o requisito de protótipo físico devido normas legais, vários passos devem ser tomados anteriormente à aceitação dos órgãos governamentais da simulação como resultado de teste, como melhoria do modelo de simulação para representar fielmente a realidade física e ajuste do modelo de simulação de acordo com os resultados dos protótipos físicos.

5.3.2 Roteiro II

O roteiro II como já mencionado anteriormente foi aplicado diretamente aos gerentes e diretores dos departamentos que compõem a unidade de análise (ver roteiro II no anexo B).

5.3.2.1 Perfil dos entrevistados.

Para a identificação do perfil dos entrevistados foram colhidos dados referentes à idade e ao tempo de experiência na área de Engenharia de Produtos, os resultados são apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7, onde concluiu-se que a maioria dos entrevistados possuía mais de 41 anos, com mais de 16 anos de experiência na Engenharia de Produtos.

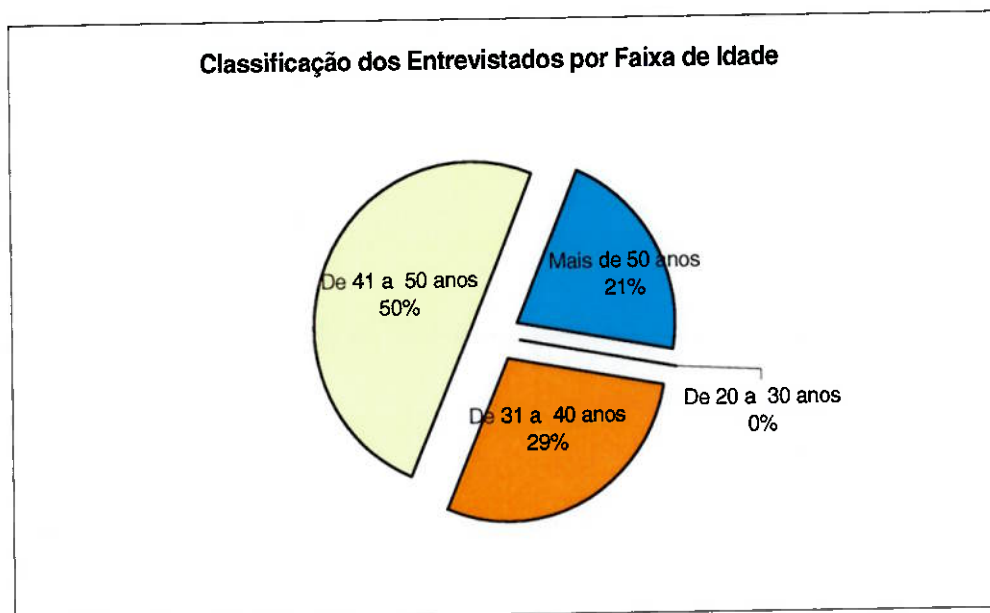


Figura 5.6- Classificação geral dos entrevistados por faixa de idade

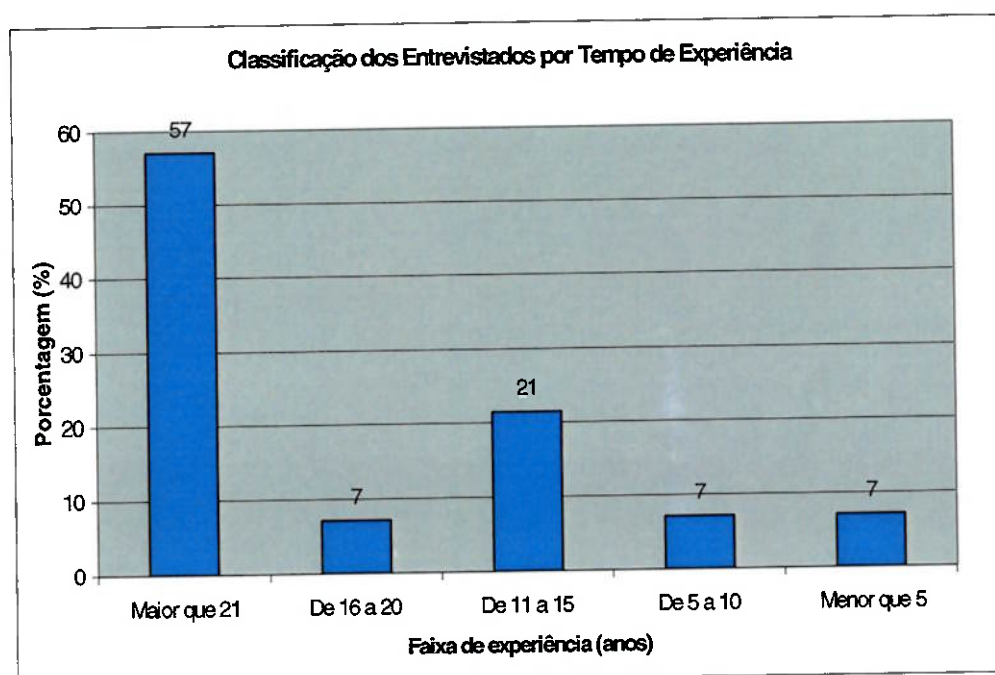


Figura 5.7- Classificação geral dos entrevistados por tempo de experiência

Para complementar o perfil dos entrevistados, alguns dados referentes à interação das áreas experimentais com a simulação foram levantadas. Para a unidade de análise o conhecimento teórico e prático das áreas experimentais, as quais são responsáveis pela construção e avaliação dos protótipos físicos, foi considerado como fator decisivo para o bom desenvolvimento e uso de simuladores. Os engenheiros de testes

físicos além de participarem de grupos multifuncionais para o desenvolvimento de simuladores, também são requisitados em transferências internas, migrando da área de testes físicos para a simulação virtual. No entanto, para que os funcionários estejam aptos a trabalhar em simulação, é requerido treinamento específico. Desta forma, a unidade de análise se mostrou aberta para a tendência de migração das atividades físicas para as virtuais.

5.3.2.2 Percepção dos usuários quanto à capacidade e confiabilidade da simulação.

Para identificar o ponto de vista dos entrevistados quanto à capacidade da simulação virtual, o roteiro II questionou a classificação dos testes selecionados quanto à capacidade de simulação. O objetivo desta pergunta era confrontar a percepção dos entrevistados com os resultados da análise documental. Os resultados obtidos pela entrevista são apresentados na Figura 5.8, onde foi constatado uma dispersão de respostas, o teste de *stiffness*, por exemplo, foi classificado como nível 3, 4 e 5 pelos entrevistados, enquanto que a análise documental classificou como nível 5. Na Figura 5.8, no eixo das abscissas está a descrição do teste com a classificação da capacidade de simulação de acordo análise documental.

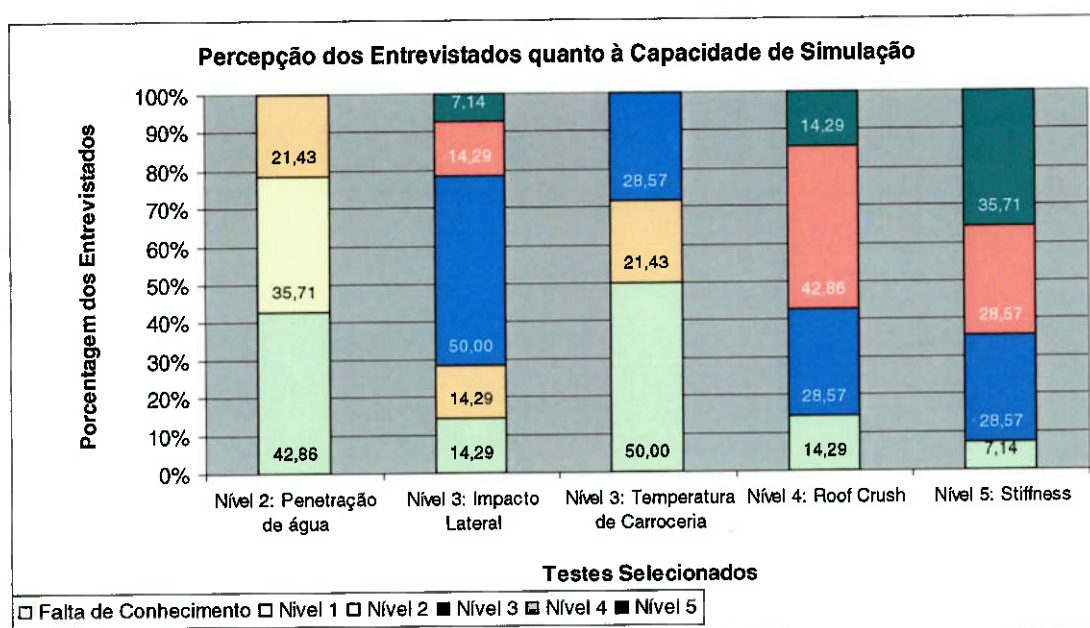


Figura 5.8- Percepção dos entrevistados quanto à capacidade de simulação.

Por outro lado, embora houve dispersão de respostas, observou-se que a maior parte dos entrevistados classificou o teste conforme resultados obtidos na análise documental. A única exceção foi o teste de penetração de água, cuja classificação majoritária dos entrevistados foi nível 1, enquanto a análise documental apontou para o nível 2.

Para a maioria dos entrevistados que responderam falta de conhecimento do nível de capacidade de simulação (a Figura 5.8 apresenta a porcentagem relativa à “Falta de Conhecimento”), observou-se que o desconhecimento estava relacionado aos testes que estavam fora da área de atuação de cada entrevistado. No entanto, os dados obtidos também apontaram que os testes de penetração de água e temperatura de carroceria foram os que atingiram maior índice de desconhecimento do grupo pesquisado, concluindo-se que há campo para divulgação da capacidade e confiabilidade da simulação para a unidade de análise.

Os dados provenientes da Engenharia de Projetos e da Engenharia de Operações e Validações apresentaram praticamente as mesmas dispersões quanto a classificação do nível da simulação, não permitindo a caracterização dos grupos como mais entusiastas ou céticos quanto ao uso da simulação.

5.3.2.3 Benefícios da simulação no PDP

Quanto aos benefícios do uso da simulação virtual, o resultado do roteiro II mostrou a concordância da unidade de análise como um todo quanto aos itens listados como benefícios do uso da simulação no processo de desenvolvimento de produto. É importante mencionar que os entrevistados tiveram como opções de resposta uma escala de Likert: concordo plenamente, concordo parcialmente, indiferente, discordo parcialmente e discordo totalmente; no entanto não houve incidência das respostas discordo parcialmente e discordo plenamente pelos entrevistados. A Figura 5.9 apresenta o resultado das entrevistas.

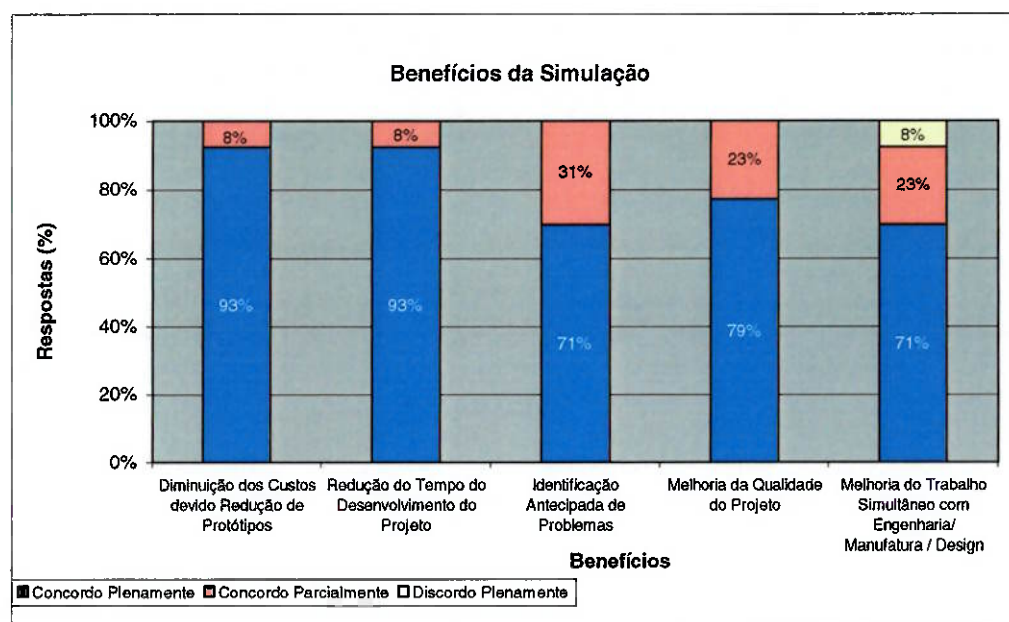


Figura 5.9- Benefícios da simulação no PDP.

Portanto, os benefícios apontados pela unidade de análise estão em concordância com a revisão teórica:

- Rozenfeld; Zancul (1999) apontaram as ferramentas CAD e CAE como facilitadores da aplicação da engenharia simultânea, uma vez que o acesso aos dados e informações de produtos e processos contribui para a integração entre departamentos.
- Clark; Fujimoto (1991), Clark; Wheelwright (1992), Campbell (1998), Xu (1998), Krouse (1999) e Ryan (2000) apresentaram como benefícios da simulação as reduções de custo e do tempo de desenvolvimento do projeto.
- Royde (2001a) mencionou o benefício de alta qualidade do projeto com o uso da simulação.
- O fator identificação antecipada de problemas, também foi apresentado na revisão teórica através de Campbell (1998), Xu (1998) e Krouse (1999), confirmando que as análises virtuais identificam melhorias nos componentes ou sistemas do projeto previamente à validação do protótipo físico.

Concluiu-se que a unidade de análise está ciente dos benefícios e possui uma postura positiva para o uso da ferramenta de simulação.

5.3.2.4 Dificuldades existentes para o uso efetivo da simulação no PDP.

A pesquisa de campo revelou que dentre as dificuldades existentes para o uso efetivo da simulação, o fator *falta correspondência do teste físico com o virtual e falta de softwares* foi levantado por 78,6% dos entrevistados como fator limitador do uso da simulação como ferramenta de redução de protótipos físicos.

O segundo item mais votado pelos entrevistados corresponde à *dificuldade de obtenção dos dados de entrada para o programa de simulação*, que englobam principalmente as informações provenientes de fornecedores, características de novos materiais e geometria das peças.

O fator *barreira cultural* foi apontado por 42,9% dos entrevistados como fator de restrição do uso da simulação. O costume de desenvolver e validar produtos durante décadas com o uso da ferramenta física representa, sob o ponto de vista dos entrevistados, uma barreira para a migração ao uso efetivo da simulação virtual.

A Figura 5.10 apresenta os principais fatores indicados pela unidade de análise como dificuldade para o uso da simulação.

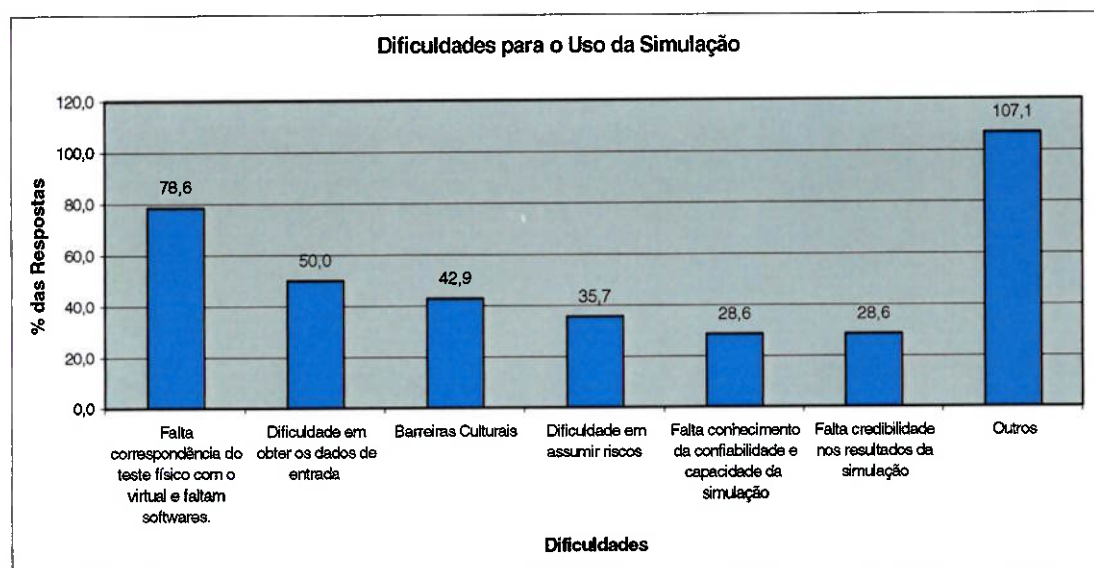


Figura 5.10- Dificuldades para o uso da simulação.

O item *falta de conhecimento da confiabilidade e capacidade da simulação* embora esteja em quinta posição, considera-se um item de grande relevância uma vez que esta resposta não estava induzida no questionário do roteiro II, e apareceu de forma espontânea no quesito outros em vários entrevistados. Portanto, julgou-se adequado separá-lo da categoria outros.

O conteúdo do item *outros*, mencionado na Figura 5.10 está desmembrado abaixo, com a correspondente porcentagem de respostas dos entrevistados em parênteses:

- Dificuldade da análise de resultados (21%),
- Falta de treinamento para a Engenharia de Produtos (21%),
- Diferenças das liberações de geometria CAD (21%),
- Falta de geometria CAD dos projetos antigos (14%),
- Falta de equipamentos mais atualizados (7%),
- Expansão do grupo de simulação para aumento da capacidade de demanda (7%),
- Falta consolidação da validação da simulação pela Engenharia de Produto (7%),
- Expansão do grupo de simulação para ampliar as ferramentas de simulação (7%).

Não foi identificada a correlação da quantidade de dificuldades apontadas com a faixa etária e período de experiência do entrevistado, não evidenciando diferentes posturas por faixa etária.

Embora atualmente existam alguns fatores que restringem o uso da simulação como ferramenta efetiva de substituição de protótipos, a unidade de análise visualiza que em um prazo médio de 15 anos a substituição dos protótipos físicos pela simulação é viável na fase de desenvolvimento de produto, requerendo apenas um ciclo de protótipos para a validação do projeto principalmente devido aos fatores relacionados a segurança, requisitos legais e qualidade percebida.

Confrontando com a revisão teórica, os principais fatores apontados por Krouse (1999) para a implementação da simulação com sucesso convergem para o mesmo conjunto de quesitos identificados pela maioria dos entrevistados. Desta forma, vencer as barreiras culturais, garantir a alta qualidade dos dados de entrada e investir em hardware e software tenderá a tornar mais efetivo o uso da simulação virtual.

O fator barreira cultural como limitador do uso da simulação também foi apresentado por Ryan (2000).

Murphy; Perera (2002) indicaram como fatores de sucesso para a prática da simulação a garantia da integridade e gerenciamento dos dados de entrada e quesitos relacionados à base de conhecimento. Foram destacados por Murphy; Perera (2002), a formação de um time estruturado de simulação, a difusão do conhecimento e dos benefícios da simulação, a troca de experiências entre os usuários de simulação, o envolvimento de todos os membros do time de projeto em todas as fases de análises virtuais permitindo o suporte da gerência e engenheiros.

Portanto, os apontamentos de Murphy; Perera (2002) convergem principalmente para os seguintes resultados da pesquisa de campo: barreiras culturais, falta de conhecimento da confiabilidade e capacidade da simulação, falta de credibilidade, dificuldade em assumir riscos e dificuldade de obtenção dos dados de entrada como fatores limitadores do uso da simulação.

5.4 Análise dos resultados da pesquisa de campo face às proposições da pesquisa.

Neste tópico será apresentada a análise conjunta dos dados secundários e primários, verificando a convergência dos dados quanto aos pressupostos adotados neste trabalho.

A primeira análise é referente à questão da pesquisa, 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 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. A classificação obtida pela análise documental indicou que todos os testes estudados permitem a redução de protótipo físico, mas

em diferentes proporções, refletindo de maneira geral em menor custo e tempo de implementação do projeto.

Para os testes cuja confiabilidade da simulação é baixa ou média, é requerida a combinação de protótipos físicos com a simulação virtual, como constatado para os testes de impacto lateral, de temperatura de carroceria e de penetração de água.

Já para os testes de alta confiabilidade como *stiffness*, a simulação virtual é suficiente para a avaliação do projeto, não requerendo protótipo físico.

O roteiro I através da comparação dos custos e tempo de execução dos protótipos físicos com a simulação virtual dos testes selecionados, confirmou os benefícios da simulação, além disto o roteiro I apresentou a evolução da simulação indicando o avanço crescente da ferramenta.

O roteiro II apresentou o ponto de vista dos entrevistados da unidade de análise, onde houve a concordância por mais de 70% dos entrevistados quanto aos benefícios referentes à redução do tempo, à redução de custo, à melhoria de qualidade, à identificação antecipada de problemas e melhoria do trabalho simultâneo entre áreas.

Portanto, com os dados primários e secundários obtidos, concluiu-se que os benefícios da simulação são reais e a unidade de análise está consciente dos benefícios e há uma postura positiva quanto ao uso da simulação no desenvolvimento e validação do projeto.

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.

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 item “*Falta de correspondência do teste físico com o virtual e falta de softwares*”, coincidindo com os resultados obtidos do roteiro I, onde foram identificados para os

testes selecionados de penetração de água e impacto lateral, as restrições de falta de software e limitação do modelo de simulação respectivamente.

O item “*Dificuldade em obter os dados de entrada*” identificado no roteiro II, foi classificado por 50% dos entrevistados como fator de restrição para o uso efetivo da simulação em relação à substituição de protótipos, também coincidindo com os resultados obtidos do roteiro I, onde foi identificado para o teste específico de medição de temperatura a dificuldade em obtenção dos dados de entrada, para o teste de simulação.

O item “*Barreiras Culturais*”, apontado por 42,9% dos entrevistados do roteiro II, demonstrou a necessidade de divulgação e conscientização do uso da simulação como ferramenta para o desenvolvimento e validação do projeto.

Destacou-se o fator “*Falta de Conhecimento da Capacidade e Confiabilidade de Simulação*”, que foi apresentada de forma espontânea por aproximadamente 30% dos entrevistados. Somando a este dado os resultados do roteiro II, onde foi identificada a dispersão de respostas dos entrevistados em relação aos resultados da análise documental, evidenciou-se uma oportunidade para a difusão do conhecimento na unidade de análise.

Os fatores “*Dificuldade em Assumir Riscos*” e “*Falta de Credibilidade nos Resultados da Simulação*” também foram apontados pela unidade de análise através do roteiro II por 35,75 e 28,6% dos entrevistados.

Finalmente, a análise documental e o roteiro I apresentaram o fator requisito legal como limitador para a substituição de protótipos físicos para os testes específicos de *roof crush* e de 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.

Desta forma, concluiu-se que o crescimento do uso da simulação virtual não está relacionado apenas a barreiras culturais, mas também a outros fatores como: restrições das ferramentas de simulação virtual como falta de software e limitação do modelo de simulação, falta de dados de entrada, falta de conhecimento da capacidade e confiabilidade da simulação, dificuldade em assumir riscos, falta de credibilidade nos resultados da simulação e obrigatoriedade de executar o teste físico devido requisito legal.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho estão relacionadas às questões centrais e suas respectivas proposições que direcionaram o desenvolvimento desta pesquisa. Para tanto, serão apresentados neste capítulo as análises finais do trabalho englobando a revisão teórica, metodologia de pesquisa e a pesquisa de campo.

6.1 Conclusões finais

Como apresentado no capítulo 05, o primeiro pressuposto – o uso da simulação virtual no PDP contribui para a redução de custos e tempo de implementação do projeto - foi confirmado tanto pela revisão teórica através dos autores Clark; Fujimoto (1991), Clark; Wheelwright (1992), Campbell (1998), Xu (1998), Krouse (1999) e Ryan (2000); como através da pesquisa de campo pela análise documental, entrevista focal e entrevistas tipo levantamento. É importante ressaltar que além dos benefícios apresentados no pressuposto, também foram identificadas outras vantagens como: qualidade do projeto, identificação antecipada de problemas e melhoria do trabalho simultâneo tanto na pesquisa de campo como na revisão teórica.

O segundo pressuposto – o crescimento da simulação virtual está relacionado ao rompimento de barreiras culturais – também foi confirmado tanto pela revisão teórica através dos autores Krouse (1999), Ryan (2000) e Murphy; Perera (2002) 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.

Portanto, os fatores limitantes mais apontados pela unidade de análise e suportados pela revisão teórica foram: falta de softwares e limitação dos modelos de simulação, dificuldade de obtenção dos dados de entrada, barreiras culturais, falta de conhecimento da capacidade e confiabilidade da simulação, dificuldade em assumir riscos e falta de credibilidade nos resultados da simulação, os mesmos devem ser trabalhados para o alcance do uso efetivo da simulação como ferramenta de substituição de protótipos físicos.

Embora não mencionado na revisão teórica, o fator “requisito legal” levantado pela pesquisa de campo e análise documental pode ser o limitador para substituição de protótipos físicos para alguns testes específicos.

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.

6.2 Limitação da pesquisa

A limitação desta pesquisa é referente à metodologia adotada de estudo de caso, onde os resultados não podem ser generalizados. Para o desenvolvimento do estudo de caso, a pesquisa foi limitada a uma unidade de análise, no entanto os resultados podem ser aproveitados para trabalhos futuros, principalmente se voltados para a solução de problemas da referida unidade de análise ou de empresas do mesmo setor.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Esta pesquisa confirmou as proposições levantadas, mas além das confirmações obtidas esta pesquisa apresentou dados mais abrangentes tanto para os benefícios como para as dificuldades do uso da simulação como ferramenta de redução de protótipos.

Portanto, o autor indica como sugestão de trabalho futuro os seguintes temas:

1. Identificação das prioridades a serem implementadas na unidade de análise com o objetivo de proporcionar maior redução de protótipos físicos.

Com os dados obtidos na pesquisa de campo e suportado pela revisão teórica, obteve-se os fatores que são limitadores para o uso efetivo da simulação, portanto o

confronto dos objetivos da unidade de análise com a relação de custo e benefício de cada proposta permitirá a identificação das prioridades a serem implementadas.

2. Desenvolver um processo para gerar uma base de dados viva com informações sobre a capacidade e confiabilidade adquirida da simulação virtual, correlacionando resultados de testes físicos e virtuais para cada projeto aplicado, permitindo a identificação da evolução da simulação pela unidade de análise.

Como foi apresentado neste trabalho, a dificuldade para o uso efetivo da simulação está relacionada à vários fatores, sendo que a falta de conhecimento da simulação, barreiras culturais, falta de credibilidade nos resultados da simulação e dificuldade em assumir riscos podem ser minimizados com o desenvolvimento de um banco de dados, contribuindo para a difusão do conhecimento e aumento do interesse na capacidade de simulação.

ANEXO A – Roteiro I: Questionário para pesquisa de campo.

Método: entrevista focal com o gerente do departamento VSAS.

Prezado Sr(a):

A pesquisa a seguir faz parte do trabalho de dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva que será submetida à análise da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o objetivo desta pesquisa é obter dados para análise da utilização de simulações virtuais no processo de desenvolvimento de produtos.

As respostas coletadas serão divulgadas de forma consolidada, portanto serão mantidas em sigilo as respostas individuais.

A entrevista corresponde à caracterização de simulações específicas (testes selecionados) para comparação com o protótipo físico.

1. Caracterização Específica da Aplicação de Simulação

1.1 Classificar as simulações de acordo com o critério descrito neste item, sinalizando a evolução da simulação nos últimos anos. Preencher a tabela abaixo.

Tabela a ser preenchida:

Testes Específicos - Simulação	1997	1999	2001	2003
<i>Roof Crush</i>				
<i>Torsional Stiffness</i>				
Impacto Lateral				
Temperatura de Carroceria				
Penetração de água no motor pelo sistema de admissão de ar				

Tabela Critério:

Critério	Capacidade e Confiabilidade da Simulação Virtual	Necessidade de Protótipo Físico		
		Protótipo de Desenvolvimento	Protótipo de Validação	Validação do Modelo Matemático
1	Não existe correlação virtual com protótipo físico, não há capacidade virtual para aplicação.	SIM	SIM	NÃO APLICÁVEL
2	Há limitação do software de simulação, é possível fazer avaliações do projeto, mas confiabilidade é menor que 80%. É possível reduzir alguns ciclos de desenvolvimento com hardware.	SIM	SIM	SIM
3	Há capacidade virtual mas depende da validação do modelo matemático. A simulação virtual pode requerer dados provenientes de protótipos físicos, e a confiabilidade está entre 80 e 90%.	NÃO	SIM	SIM
4	Resultados da simulação estão bem próximos do teste físico, confiabilidade entre 90% e 95%.	NÃO	SIM	NÃO
5	Resultados de simulação tão bons quanto o teste físico. Confiabilidade maior que 95%.	NÃO	NÃO	NÃO

1.2 Como são determinados os custos relacionados a realização de simulação dos específicos testes: *roof crush*, *stiffness*, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura de carroceria?

1.3 Quais são os fatores que determinam o tempo necessário para a realização do teste virtual, como calcula-se o tempo de execução dos seguintes testes virtuais: *roof crush*, *stiffness*, impacto lateral, penetração de água e teste de temperatura de carroceria?

1.4 Indicar a data de criação do modelo de simulação e em quantos projetos já foram aplicados a simulação virtual para os testes mencionados abaixo.

Descrição dos Testes	Data de criação do modelo de	Em quantos projetos já foram aplicados a
<i>Roof Crush</i>		
<i>Torsional Stiffness</i>		
Impacto Lateral		
Temperatura de Carroceria		
Penetração de Água no Motor pelo Sistema de Admissão de Ar		

1.5 Existe alguma restrição ou limitação da simulação para substituição total do protótipo físico pelo virtual, para os testes em estudo (*roof crush, stiffness, impacto lateral, temperatura e penetração de água*)?

- Requisito legal requer validação em protótipo físico
- Limitação de Softwares
- Outros _____

1.6 Quais são os fatores que podem contribuir para a melhoria da confiabilidade da simulação, para os testes: *roof crush, stiffness, impacto lateral, penetração de água e temperatura* ? _____

Obrigada pela colaboração em responder esta pesquisa.

Ana Cristina M. Martin

ANEXO B – Roteiro II: Questionário para pesquisa de campo.

Método: entrevista tipo levantamento com gerentes e diretores da Engenharia de Produtos.

Prezado Sr(a):

A pesquisa a seguir faz parte do trabalho de dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva que será submetida à análise da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o objetivo desta pesquisa é obter dados para identificar o ponto de vista das áreas de Engenharia de Projeto e Engenharia de Operações e Validações sobre o uso da simulação e o potencial para substituição dos protótipos físicos.

As respostas coletadas serão divulgadas de forma consolidada, portanto serão mantidas em sigilo as respostas individuais.

A entrevista está dividida em duas partes, a primeira corresponde à identificação do entrevistado e área de atuação e a segunda corresponde a análise do uso da simulação virtual .

1. Identificação do entrevistado e respectivo departamento

1.1 Nome do Entrevistado _____

1.2 Departamento _____

1.3 Área de Trabalho _____

1.4 Faixa Etária do Entrevistado:

- De 20 a 30 anos
- De 31 a 40 anos
- De 41 a 50 anos
- Mais de 50 anos.

1.5 Quantos anos de experiência na área de atuação (Engenharia de Produtos)?

- Menos de 05 anos.
- Entre 5 e 10 anos.
- Entre 11 e 15 anos.
- Entre 16 e 20 anos.
- Mais de 21 anos.

1.6 Os funcionários da sua área estão aptos para o trabalho em simulação virtual?

1.7 No seu ponto de vista, a experiência dos especialistas das áreas experimentais (testes físicos) podem ser úteis na área de simulação?

2. Análise do uso da simulação virtual

2.1 Utilizando a Tabela Critério, identifique o nível de capacidade e confiabilidade de simulação para os 05 testes específicos listados abaixo.

Tabela Critério:

Critério	Capacidade e Confiabilidade da Simulação Virtual	Necessidade de Protótipo Físico		
		Protótipo de Desenvolvimento	Protótipo de Validação	Validação do Modelo Matemático
1	Não existe correlação virtual com protótipo físico, não há capacidade virtual para aplicação.	SIM	SIM	NÃO APLICÁVEL
2	Há limitação do software de simulação, é possível fazer avaliações do projeto, mas confiabilidade é menor que 80%. É possível reduzir alguns ciclos de desenvolvimento com hardware.	SIM	SIM	SIM
3	Há capacidade virtual mas depende da validação do modelo matemático. A simulação virtual pode requerer dados provenientes de protótipos físicos, e a confiabilidade está entre 80 e 90%.	NÃO	SIM	SIM
4	Resultados da simulação estão bem próximos do teste físico, confiabilidade entre 90% e 95%.	NÃO	SIM	NÃO
5	Resultados de simulação tão bons quanto o teste físico. Confiabilidade maior que 95%.	NÃO	NÃO	NÃO

Tabela a ser preenchida:

ÁREAS DE APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO	CRITÉRIO					
	1	2	3	4	5	Não sei
<i>Roof Crush</i>						
<i>Torsional Stiffness</i>						
Impacto Lateral						
Penetração de Água no Motor pelo Sistema de Admissão de ar						
Temperatura de Carroceria						

2.2 Como a simulação virtual pode beneficiar o processo de desenvolvimento de produto? Preencha a tabela abaixo com a sua opinião.

BENEFÍCIOS DA SIMULAÇÃO VIRTUAL	Concordo Plenamente	Concordo Parcialmente	Indiferente	Discordo Parcialmente	Discordo Plenamente
Diminuição dos custos de desenvolvimento devido à redução de protótipos físicos.					
Redução do tempo de desenvolvimento do projeto.					
Melhoria do Trabalho Simultâneo com as diversas áreas de Engenharia.					
Identificação antecipada de problemas.					
Melhoria da qualidade do projeto.					

2.4 Quais as dificuldades existentes para o uso efetivo da simulação virtual como ferramenta de redução de protótipos?

- Diferenças das liberações da geometria CAD devido atualizações constantes,
- Dificuldade da análise de resultados,
- Falta de informação para os dados de entrada do programa de simulação,
- Falta de Treinamento na Engenharia de Produtos,
- Faltam equipamentos mais atualizados,
- Falta correspondência do teste físico com a simulação virtual e faltam softwares,
- Barreiras culturais,
- Dificuldade em assumir riscos,
- Falta credibilidade nos resultados da simulação.

Outros _____

2.5 A substituição total do protótipo físico pela simulação virtual é possível?

Obrigada pela colaboração em responder esta pesquisa.

Ana Cristina M. Martin

ANEXO C – Descrição simplificada dos procedimentos de testes

TESTE 1: *ROOF CRUSH*

Dados Gerais:

Classificação da capacidade e confiabilidade da simulação conforme análise documental do projeto A: Nível 4

Objetivo:

Para limitar a intrusão do teto no compartimento de passageiros em situações de capotamento, o teste de segurança veicular denominado como Federal Motor Vehicle Safety Standard 216 "*Roof Crush Resistance*" requer que veículos de passageiros atendam certos requisitos de carga estática.

Procedimento de Teste:

Corresponde na aplicação de uma força equivalente à 1,5 vezes o peso do veículo na extremidade do teto, onde o deslocamento do dispositivo de teste não deve ultrapassar a 127 mm. O valor obtido da relação da força aplicada e deslocamento permitirá a avaliação do resultado do teste, portanto estes dados são gravados durante a execução do teste permitindo a elaboração do diagrama e conseqüente análise dos dados obtidos.

O dispositivo de teste corresponde a um sistema hidráulico com bloco retangular rígido de 762mm por 1905mm que deve estar orientado em ângulo de 25° na vista frontal e 5° na vista lateral, a ilustração 1 apresenta a vista frontal do procedimento de teste.

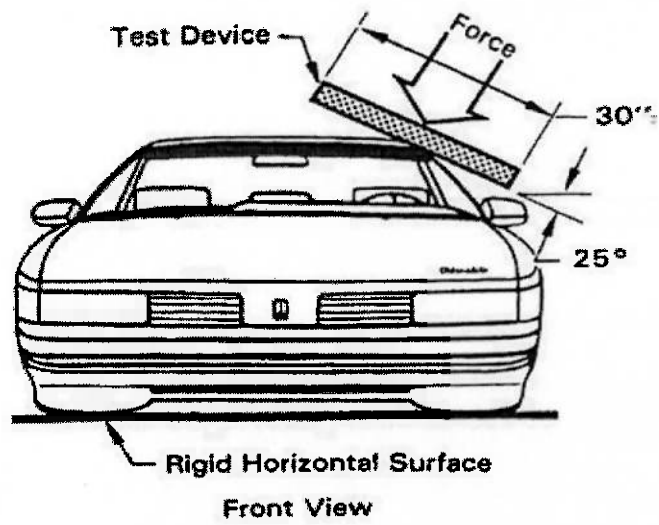


Ilustração 1: Vista frontal do procedimento do teste de *roof crush*.

TESTE 2: *TORSIONAL STIFFNESS*

Dados Gerais:

Classificação da capacidade e confiabilidade da simulação conforme análise documental do projeto B: **Nível 5**.

Objetivo:

Este teste é utilizado para a determinação da deformação torsional de uma carroceria; é aplicado para projetos que possuem alterações na carroceria, seja na abertura de portas, painel lateral, teto e outros. O *stiffness* corresponde a um procedimento de teste corporativo e não está relacionado a um requisito legal, no entanto os projetos são submetidos a esta norma interna, cujos resultados de testes devem ser comparados com as metas estabelecidas para cada projeto.

Procedimento de teste:

Conforme procedimento GMI L-1-8, cargas são aplicadas na torre da suspensão dianteira cujo sentido de aplicação ocorre primeiramente no sentido horário e posteriormente no sentido anti-horário, medições são feitas após cada aplicação de carga. A ilustração 2 apresenta a aplicação das cargas na região dianteira e os pontos de apoio da região traseira para o teste de *stiffness*.

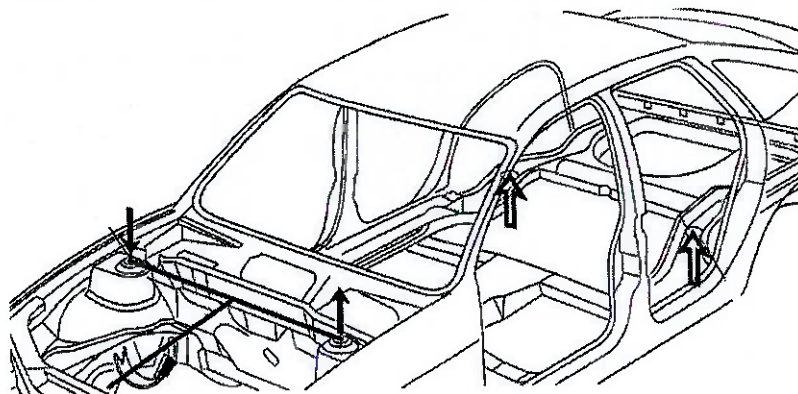


Ilustração 2: Aplicação de cargas e pontos de apoio para o teste de *stiffness*

A preparação para o teste corresponde à fixação da carroceria no dispositivo de teste assim como localização de relógios comparadores em toda extensão da longarina

dianteira, longarina traseira e *rocker* para se obter a leitura das deformações. Para as regiões de abertura da carroceria são feitas medições através de leitura de diagonais, como a região de abertura da porta, capô, tampa traseira e pára-brisa. A ilustração 3 representa a preparação da carroceria para a realização do teste físico conforme procedimento.



Ilustração 3 - Preparação da carroceria no dispositivo de teste de *torsional stiffness* .

TESTE 3 – IMPACTO LATERAL

Dados Gerais:

Classificação da capacidade e confiabilidade da simulação conforme análise documental do projeto C: **Nível 3**.

Objetivo do Teste:

O teste de impacto lateral é conduzido para garantir que o veículo possua proteção eficiente ao ocupante em caso de colisão lateral com outro veículo. Neste estudo de caso, o teste legal de segurança é denominado como *Economic Commission European R95.01*, onde requisitos de proteção ao ocupante devem ser atendidos. Este teste é aplicado quando há alterações da carroceria como exemplo: alterações no painel lateral e colunas.

Procedimento de teste:

O procedimento de teste de impacto lateral utiliza uma barreira móvel deformável de massa equivalente à $920\text{Kg} \pm 20\text{kg}$, distância entre eixos de $3000 \pm 10\text{mm}$ e está a $500 \pm 30\text{mm}$ do nível do piso. A face de impacto da barreira possui as seguintes medidas: 1500mm por 500mm e a barreira é acionada para atingir a velocidade de 50km/h .

O teste é realizado com um *dummy* com o cinto de segurança, posicionado no banco frontal do lado a sofrer a colisão, o *dummy* corresponde a um modelo instrumentado de estrutura plástica e metálica com o objetivo de representar as dimensões e massa médias de um adulto masculino, permitindo leitura das acelerações e deflexões de determinadas regiões do corpo humano quando submetidos ao teste de impacto lateral.

O veículo a sofrer a colisão fica parado quando a barreira móvel é acionada numa trajetória perpendicular ao veículo estacionário atingindo a velocidade de 50km/h no

momento do impacto. A ilustração 4 apresenta a vista superior do procedimento de teste.

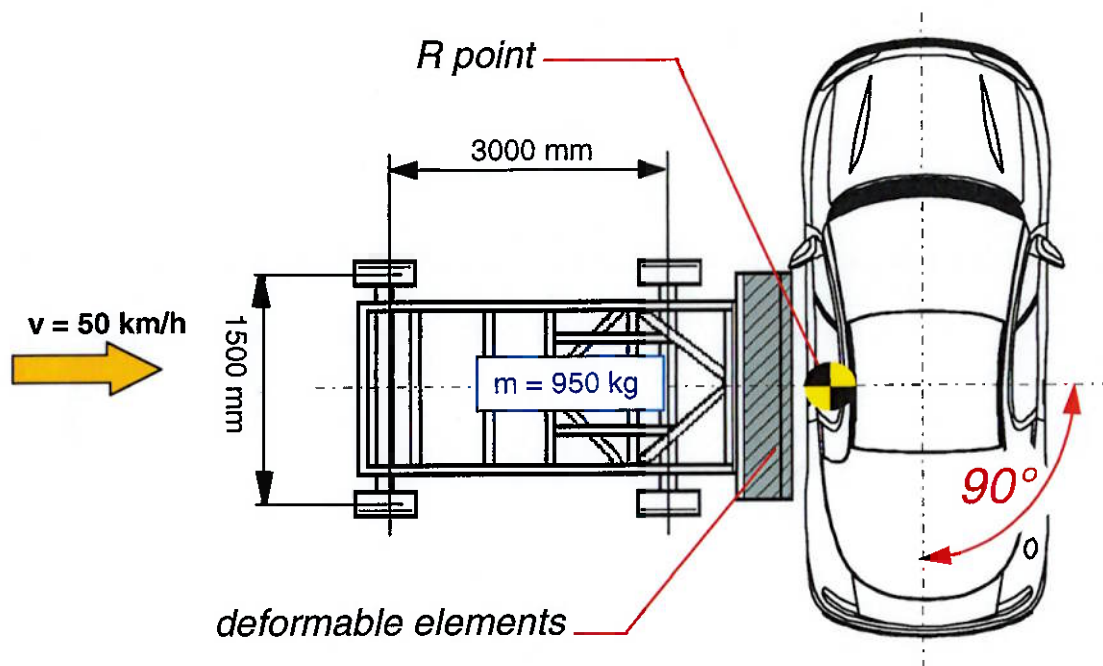


Ilustração 4- Vista superior do procedimento de teste de impacto lateral.

TESTE 4 – TESTE DE PENETRAÇÃO D'ÁGUA NO MOTOR PELO SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR

Dados Gerais:

Classificação da capacidade e confiabilidade da simulação conforme análise documental do projeto D: **Nível 2**.

Objetivo do Teste:

O teste de penetração d'água é realizado para determinar se o sistema de admissão de ar ingerirá água sob condições de pista alagada.

Procedimento de teste:

Conforme o procedimento R.AB.06.090, o teste de penetração d'água utiliza placas do dispositivo detector d'água na face de saída de ar do elemento filtrante, o veículo é conduzido a velocidade de 20km/h através de uma altura d'água estabelecida em uma extensão de 500m. Para atender o requisito de teste, o filtro de ar não deve apresentar umidade na saída do ar filtrado, portanto não deve haver presença de água no óleo do motor. A ilustração 5 apresenta o veículo em teste de penetração de água.



Ilustração 5- Veículo em teste de penetração de água.

TESTE 5 – MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NA CARROCERIA

Dados Gerais:

Classificação da capacidade e confiabilidade da simulação conforme análise documental do projeto E: Nível 3.

Objetivo do Teste:

O teste de medição de temperatura têm o objetivo de efetuar uma avaliação objetiva das temperaturas em carrocerias de veículos e seus componentes. Os valores obtidos de temperatura são confrontados com a meta estabelecida para o respectivo projeto.

Procedimento de teste:

Conforme procedimento de teste R.AR.13.022, a unidade de teste é primeiramente instrumentada para permitir controle do teste e a aquisição de dados e são instalados termopares nas regiões determinadas para a medição da temperatura.

Condições ambientais como temperatura mínima de 32° C e velocidade do vento menor que 4 m/s são requeridos para execução do teste. O veículo é avaliado em velocidade específica que corresponde à condição mais crítica para o modelo de teste e o mesmo é conduzido até a estabilização da temperatura da água de arrefecimento, do óleo do motor e da transmissão. A condição mais crítica mencionada acima corresponde à velocidade de uso do veículo onde se alcança a maior temperatura de estabilização.

As temperaturas da carroceria e/ou componentes são obtidas através da leitura dos dados provenientes dos termopares instalados na unidade de teste, os dados são gerados durante o período de teste. A ilustração 6 apresenta uma unidade de teste com termopar instalado na mangueira de arrefecimento para obtenção da temperatura de estabilização.



Ilustração 6 – Veículo de teste instrumentado

LISTA DE REFERÊNCIAS

- BATHE, K.J. **Finite element procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 1996, 1037p.
- BRASIL. Universidade de São Paulo. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses**. 2.ed. São Paulo: 2001. 39p. Disponível em: <<http://www.poli.usp.br/bibliotecas/publicacoesonline/diretrev1.pdf>>. Acesso em: 13 Out. 2003.
- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London: Routledge, 1989, 283p.
- BUCK, F.C. **Roof crush strenght resistance**. Indaiatuba: campo de provas de Cruz Alta, 2002. (Relatório de Teste, CPCA 2547/2002)
- BUCK, F.C. **Global Stiffness**. Indaiatuba: campos de provas de Cruz Alta, 2000. (Relatório de Teste, CPCA 427/00).
- CAMPBELL, R. M. Smarter to market: how automotive engineering teams use virtual prototypes in design and testing. USA, 1999. Disponível em <<http://www..adams.com/solutions/auto>>. Acesso em: 26 Out. 2003.
- CAMPBELL, R.M. Analysis – when and when Not. SAE technical paper series, Milwaukee, Wisconsin, n. 982011, p.1-6, Set. 1998.
- CARVALHO, J. Prototipagem rápida. Núcleo de manufatura avançada. São Carlos, 1999. Disponível em <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/prototipagem.html>. Acesso em: 31 Jan. 2003.
- CARVALHO, M. M. **QFD: uma ferramenta de tomada de decisão em projeto**. 1997. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistema,

Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. Disponível em: <www.eps.ufsc.br/teses97/marly/index.html>. Acesso em: 10 Jul. 2004.

CARVALHO, M. M. Qualidade em projeto. In: NETO, J.A. **Manufatura classe mundial: conceitos, estratégias e aplicações**. São Paulo: 2001. p.131-145.

CCS ENGENHARIA. São Paulo. Apresenta produtos para avaliação virtual dos processos de estampagem. Disponível em: <www.cad.com.br/engenharia/produtos/autoform.shtm>. Acesso em: 30 de Jun. 2004.

CHANG, D. C. Synthesis, analysis and simulation: a key enabler of concurrent product systems engineering. International journal of vehicle design. USA: Inderscience Enterprises Ltd, vol 21, n. 4/5, p315-324, 1999.

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.

CLARK, K.B.; WHEELWRIGHT, S. C. **Revolutioning product development: quantum leaps in speed, efficiency and quality**. New York: The Free Press, 1992, 364p.

DIAS, F.T.; BORGES C. On the determination of the optimal modelling conditions for higher performance finite element analyses. Finite elements in analysis and design, USA: Ed. Elsevier, n.39, p207-216, 2003.

EVERSHEIM, W. Models and methods for an integrated design of products and process. European journal of operation research, Germany: Ed. Elsevier, n. 100, p251-252, 1997.

GENERAL MOTORS. **A Guide to federal motor vehicle safety standards & regulations:** 216. Germany, 1995. 1p.

GENERAL MOTORS. **Measurement of torsional stiffness:** GMI L-1-8. Germany, 1996. 14p.

GENERAL MOTORS. **Roof crush resistance test:** GMI LI-1C-1. Germany, 1997. 7p.

GENERAL MOTORS. Apresenta informações sobre utilização de ferramentas virtuais no desenvolvimento de produto. Disponível em: <<http://engineering.gm.com/asb/engp001.nsf/public/conferencematerials>>. Acesso em: 15 de Out. 2002a.

GENERAL MOTORS. **Summary of requirements document: occupant protection in the event of a lateral collision:** ECE R 95.01. 2002b. 3p.

GENERAL MOTORS. Apresenta informações sobre a ferramenta fábrica virtual. Disponível em: <http://manufacturing.gm.com/globalmfg/Common_Prosesse/Virtual_Factory.htm>. Acesso em: 21 de Out. 2003a.

GENERAL MOTORS. Apresenta informações sobre o processo global de desenvolvimento de produtos da General Motors. Disponível em: <http://199.228.25.35/capi_gm> Acesso em: 24 de Out. 2003b.

GENERAL MOTORS DO BRASIL LTDA. **Sistema de arrefecimento do motor – desenvolvimento de componentes:** R.AR.13.022. Indaiatuba, 1996a. 15p.

GENERAL MOTORS DO BRASIL LTDA. **Teste de penetração d'água no motor através do sistema de admissão de ar:** R.AB.06.090. Indaiatuba, 1996b. 3p.

HORTA, L.C.; ROZENFELD H. CAD (Computer Aided Design). Núcleo de manufatura avançada. São Carlos, 1999. Disponível em http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/cadv2.html>. Acesso em: 31 Nov. 2003.

HUEBNER K.H.; THORNTON E.A.; BYROM T.G. **The finite element method for engineers**. New York : Wiley Interscience Publication, 1995, 627p.

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.

LAURINDO, F.J.B.; CARVALHO, M.M. Technology enhancing new product development in a Brazilian company. In: EUROMA2002 – European Operations Management Association – 9th International Annual Conference: “Operations Management and the New Economy”, Copenhagen, Dinamarca, 2002. **Proceedings**. Dinamarca: 2002. p. 843-854.

MACCORMACK, A.; VERGANTI, R.; IANSITI, M. Developing products on “internet time”: the anatomy of a flexible development process. Management Science, vol. 47, n.1, p.133-150, 2001.

MURPHY, D.; UCCELLO, T.; NAFARA, F. **The CNC version 2.0. An introduction to computer numerical control**. Prentice Hall, 1996, 350p.

MURPHY, S. P.; PERERA, T. Successes and failures in UK/US development of simulation. Simulation practice and theory, n.9, p.333-348, 2002.

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: 1996. CD-ROM.

NETTO, A.V.; MACHADO, L.D.S; OLIVEIRA, M.C.F. Realidade virtual – definições, dispositivos e aplicações. Disponível em: <www.icms.sc.usp.br/~sce5799/nocoessobrerv.pdf>. Acesso em: 30 Set. 2002.

NETTO, A.V. Realidade virtual economiza tempo e dinheiro na cadeia automotiva. Engenharia automotiva e aeroespacial, São Paulo, ano 2, n.9, p.32-37, 2002.

PANORAMA. São Caetano do Sul: Diretoria de assuntos corporativos da General Motors do Brasil, ano 38, n.1, jan. 2000. 47p.

PRITSKER, A.A.B. **Introduction to simulation and SLAM II**. 3ed. New York: Systems Publishing Corporation, 1986.

PUGH, S. **Total design: integrated methods for successful product engineering**. Addison-Wesley Publishing Company, 1991. 277p.

QUIM, N. **Roof crush simulation versus experimental results correlation analysis**. São Caetano do Sul, jan. 2003. (Simulation Report, VSAS 1009V).

QUIM, N. **GMB VSAS One Page Assessment – Floor Temperature**. São Caetano do Sul, jan. 2004. (Simulation Report, VSAS AT023).

QUIM, N. **GMB VSAS One Page Assessment – Floor Temperature**. São Caetano do Sul, jan. 2004. (Simulation Report, VSAS AT025).

ROHDE, S. M. GM's virtual vehicle revolutionizes product design. In: DHBA's Annual Conference, USA, 2001a. Disponível em: <www.dhbrown.com/cffiles/RPPage.cfm?ID=101>. Acesso em: 30 Set. 2002.

ROHDE, S. M. GM's Journey to Math – The virtual vehicle. In: DHBA's Annual Conference, USA, 2001b. Disponível em: <www.dhbrown.com/dhbrown/superd/jan02/rohde.pdf>. Acesso em: 30 Set. 2002.

ROSENFELD, H.; ZANCUL, E. Engenharia simultânea. Núcleo de manufatura avançada. São Carlos, 1999. Disponível em http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/engsimul_v2.html>. Acesso em: 31 Jan. 2003.

ROSENTHAL, S.R. **Effective product design and development: how to cut lead time and increase customer satisfaction.** Homewood: Business One Irwin, 1992, 341p.

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.

SILVA E.C.N. CAD/CAE/CAM. Mecatrônica Atual, São Paulo, n1, p38-47, Nov. 2001.

SILVA, M. A. **Levantamento térmico na região do carpete.** Indaiatuba: campo de provas de Cruz Alta, 2004. (Relatório de Teste, CPCA 3650/2004)

VALERI, S. G. **Estudo do processo de revisão de fases no processo de desenvolvimentos de produtos em uma indústria automotiva.** 2000. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.

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.

YIN, R.K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205p.