1 Introdução

Em uma sociedade na qual estruturas concebidas pelo homem são encontradas em toda parte, é indiscutível a importância de se prever o comportamento estrutural destas quando submetidas a diversos tipos de carregamento. Por isto à disposição dos engenheiros e especialistas, existem várias técnicas de análise elástica e plástica, incluindo o comportamento dinâmico das estruturas quando sujeitas a impacto visando projeto de equipamentos e componentes mais leves e seguros.

Entre as estruturas de bastante interesse estão os veículos, que ultimamente tendem a ficar cada vez mais leves para redução do consumo de combustível diminuindo assim as emissões de gases poluentes e agressões ao meio ambiente. O desafio encontra-se em se projetar veículos cada vez mais leves sem diminuir sua rigidez e conseqüentemente a segurança proporcionada aos seus ocupantes, quando estes estiverem envolvidos em colisões.

O aumento do número de veículos nas ruas é evidente a cada ano que passa e uma das conseqüências deste fato é também o crescente número de acidentes. Segundo o anuário estatístico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes comparando os anos de 1995 e 2007 observa-se um aumento de 34,5% no número de colisões ocorridas em rodovias federais. Segundo estatísticas, os acidentes envolvendo veículos mais relevantes em relação à frequência e ao número de vítimas e/ou gravidade das lesões são as colisões frontais, conforme a Tabela 1. Com isso, é compreensível a necessidade de se estudar o comportamento dinâmico de estruturas veiculares submetidas a impacto com a finalidade de projetos mais eficientes em relação à segurança dos passageiros.

Tipo de Acidente	Acidentes		Feridos		Mortos		Mortes / 100 acidentes
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%	
Colisão frontal	4.538	4,0	7.395	11,2	1.508	24,6	33,23
Atropelamento pedestre	3.996	3,6	3.581	5,4	1.170	19,1	29,28
Colisão lateral	19.118	17,0	9.323	14,1	600	9,8	3,14
Colisão traseira	27.124	24,1	9.710	14,7	550	9,0	2,03
Saída de pista	14.574	13,0	8.903	13,5	507	8,3	3,48
Colisão transversal	7.982	7,1	6.567	9,9	472	7,7	5,91
Capotamento	7.353	6,5	7.470	11,3	449	7,3	6,11
Outros	6.311	5,6	2.863	4,3	336	5,5	5,32
Colisão com objeto fixo	10.430	9,3	4.730	7,2	281	4,6	2,69
Tombamento	6.418	5,7	4.362	6,6	162	2,6	2,52
Atropelamento animais	3.479	3,1	812	1,2	54	0,9	1,55
Engavetamento	1.134	1,0	401	0,6	30	0,5	2,65
Total	112.457	100,0	66.117	100,0	6.119	100,0	5,44

Fonte: PRF/MJ, Coordenação Geral de Operações, Divisão de Planejamento Operacional, Núcleo de Estatística, Datatran 2004.

Tabela 1 – Estatísticas envolvendo tipos de colisões diferentes.

Com o objetivo de reduzir o número de vítimas fatais e/ou severidade das lesões provocadas pelas colisões, departamentos de Engenharia de Segurança Veicular das empresas automotivas vêm desenvolvendo pesquisas com o intuito de avaliar o desempenho dos componentes estruturais do veículo por meio de testes de impacto conhecido por *crash tests*.

Os *crash tests* são realizados pelas empresas automotivas com a finalidade de avaliar a segurança de seus passageiros em seus veículos e também por instituições governamentais que visam verificar se as normas de projeto estão sendo cumpridas e consequentemente orientar os consumidores finais sobre quais são os veículos mais seguros no mercado.

Os testes de impacto proporcionam a avaliação do comportamento do veículo através de vários parâmetros. Entre eles pode-se citar o termo conhecido atualmente na indústria automotiva, em inglês ainda sem tradução adequada, por *crashworthiness*. *Crashworthiness* ou resistência ao impacto é a capacidade de uma estrutura de absorver energia oriunda do impacto por meio de deformações plásticas, mantendo o colapso sob controle, e desta forma manter a integridade no espaço dos ocupantes.

Além de itens como dirigibilidade, freios ABS, *air bag*, cintos de segurança, entre outros, a habilidade na absorção controlada de energia é um fator muito importante para a segurança veicular, pois quanto maior a energia absorvida pela estrutura do veículo, menor a transferência para os passageiros e, sendo assim, menor a severidade dos danos causados.

1.1 Testes de Impacto (Crash Tests)

Os testes de impacto realizados em estruturas tais como veículos, embarcações, aeronaves, trens, entre outros meios de transporte têm o objetivo de avaliar o comportamento de seus componentes na questão de absorção de energia cinética devida ao impacto. Componentes estruturais tais como painéis, colunas, tubos, entre outros perfis têm a função de se deformarem o suficiente, de forma plástica, enquanto absorvem energia sem perda de estabilidade estrutural (colapso controlado). Em relação aos veículos em geral, o conjunto estrutural deve se deformar de maneira controlada sem que ocorra penetração excessiva do espaço reservado aos ocupantes, preservando assim a integridade dos mesmos.

Não há dúvidas sobre a importância dos testes de impacto na segurança veicular, porém estes ainda são muito onerosos e de difícil repetibilidade já que são realizados com réplicas em tamanho real ou em escala. Como alternativa para redução significativa dos custos surgiu a possibilidade da reprodução do impacto por meio de técnicas de análise computacional como, por exemplo, o Método de Elementos Finitos (MEF).

As análises computacionais não substituem definitivamente os testes de impacto, apenas contribuem no projeto das estruturas dando uma previsão da resposta das mesmas quando sujeitas a impacto, que deverão ser confirmadas com os *crashes tests* reais. A grande contribuição dos recursos computacionais vem da alta repetibilidade, o que permite alterações no projeto promovendo quantas simulações forem necessárias antes de se partir para o teste de impacto propriamente dito.

1.2 Análise do Problema

A bandeira do desenvolvimento sustentável, nos últimos anos, vem se difundindo por todo o planeta. As dificuldades em se adquirir um automóvel nos últimos anos estão menores. Segundo o jornal O Estado de São Paulo (07/2009) o número de veículos vendidos em junho de 2009, informados pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), foi de 300.157 unidades, o que significa um aumento de 21,5% quando comparado ao mês anterior e um acréscimo de 17,2% em relação ao mesmo período do ano de 2008.

A expansão da indústria automotiva representa uma boa notícia para a economia do país, mas ao mesmo tempo é um motivo de preocupação para as autoridades no que diz respeito à possibilidade de aumento no número de mortos e feridos em acidentes devido à grande concentração de veículos nas ruas e estradas do país.

Diante a este cenário de crescimento da indústria automotiva, e por meio deste trabalho pretende-se contribuir no estudo de impacto de estruturas com o objetivo de agregar informações à análise de reconstituição de acidentes, na qual a partir de uma estrutura deformada pode-se saber as condições do impacto na sua iminência. Este trabalho será desenvolvido através das seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica sobre impacto e absorção da energia;
- Simulação por MEF da estrutura que representa de forma simplificada a parte frontal de um veículo;
- Execução de Testes de Impacto na estrutura similar;
- Determinação de parâmetros da absorção de energia do impacto;
- Interpretação de resultados e comparação entre o método numérico e experimental.

Em concordância com o mencionado anteriormente, no presente trabalho pretende-se apresentar uma metodologia que sirva de base para pesquisas posteriores, mais complexas, que empreguem esta mesma abordagem.

1.3 Objetivo da Dissertação

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para, a partir de parâmetros conhecidos de um impacto, tais como velocidade, energia cinética, dados de geometria, propriedades mecânicas do material, condições de carregamento, se estimar a resposta de uma estrutura em relação à absorção da energia do impacto. Para esta finalidade, o trabalho envolverá uma parte numérica e uma parte experimental. A parte experimental terá início com ensaios de tração, em corpos de prova devidamente fabricados segundo norma específica, para determinação das propriedades mecânicas do material tais como módulo de elasticidade, alongamento e limite de escoamento.

Após os ensaios de tração se realizará a análise numérica pelo método de elementos finitos e após a conclusão desta serão feitos os ensaios de impacto por queda de peso. Para a realização dos ensaios de impacto, deverão ser construídas estruturas simplificadas representativas de um pára-choque frontal de um veículo, assim como seu sistema de fixação na máquina de ensaio.

A análise numérica da estrutura será feita por *programas* comerciais que utilizam o método de elementos finitos. Os programas escolhidos são os *CosmosWorks Advanced Professional* desenvolvido pela *Mechworks Corporation* e também o Ansys LS-Dyna.

Cabe ressaltar que os trabalhos desenvolvidos sobre o assunto relatam em sua maioria estudos experimentais e/ou numéricos de impacto em elementos tubulares provocado por carregamento axial. Devido aos estudos serem realizados em uma estrutura maciça, este trabalho apresentará uma comparação entre os resultados numérico e experimental, visando estabelecer um procedimento para análises posteriores.

1.4 Descrição da Dissertação

O presente trabalho está formatado em sete capítulos, conforme descrito a seguir. No *Capítulo I, Introdução*, apresenta-se alguns tópicos relevantes que explicitam a importância em se estudar os fenômenos associados ao impacto, a

análise do problema, os objetivos desta dissertação seguida da relação de publicações imprescindíveis ao desenvolvimento do trabalho.

No *Capítulo II, Estudos de Interesse Publicados*, se encontra um breve resumo de estudos relacionados ao tema publicados recentemente que foram de fundamental importância na realização desta dissertação.

O *Capítulo III* consiste em apresentar conceitos relacionados aos possíveis tipos de carregamentos mecânicos, explicando o caso particular do carregamento dinâmico impulsivo com todas as variáveis envolvidas tais como energia de impacto, modos de absorção da energia, deformação, comportamento mecânicos de material, entre outros. Neste capítulo também se abordam os possíveis ensaios de impacto para caracterização de material e também os testes de impacto veiculares. Também se encontra os fundamentos do Método de Elementos Finitos. E finalmente se apresenta os conceitos relacionados a análise de similaridade.

O *Capítulo IV, Metodologia Empregada*, parte central do trabalho; explicam-se as metodologias desenvolvidas para a análise dinâmica da estrutura similar, demonstrando o procedimento a ser seguido para se estimar o comportamento de uma estrutura veicular em tamanho natural.

O *Capítulo V, Resultados dos Testes e Comentários*, apresenta os resultados obtidos nas simulações e nos experimentos, realizando uma comparação destes para verificar a concordância entre os mesmos.

O *Capítulo VI, Conclusões e Sugestões*, são apresentadas as conclusões e algumas recomendações visando a continuidade deste trabalho a partir de outros temas que abordem esta teoria.

O *Capítulo VII, Referências Bibliográficas*, são apresentadas as referências das informações consultadas para a realização deste trabalho.

1.5

Revisão Bibliográfica

Para realização deste trabalho, alguns artigos contribuíram no que diz respeito à apresentação de informações importantes ao estudo do tema abordado. A seguir será apresentado um descritivo breve destes artigos.

Meyers (1994) aborda a diferença no comportamento dos materiais, quando estes são submetidos a carregamento estático ou dinâmico, conceitua taxa

de deformação e classifica os impactos de acordo com a taxa de deformação provocada na estrutura em impacto quase-estático, de dinâmica baixa, de dinâmica alta e de alta velocidade.

Carneiro (1996) aborda o uso da teoria da similaridade para o estudo de fenômenos de engenharia. A teoria da similaridade é baseada no princípio da homogeneidade dimensional que vem da condição de que toda equação, ou seja, toda relação funcional que expresse um processo físico não deve variar independente de qualquer mudança no sistema de unidades. Pela similaridade, o estudo do fenômeno é realizado com modelos devido a diversas razões como, por exemplo, o alto custo envolvido para montagem de um experimento para reprodução do fenômeno com o sistema de interesse (protótipo). Nesta análise considera-se que o modelo é homólogo (correspondente) ao protótipo e por isso este é capaz de prever a resposta do protótipo (sistemas equivalentes). Com os conceitos da homogeneidade dimensional e de similaridade, o estudo de um fenômeno de engenharia composto por n variáveis é feito com uma quantidade reduzida de números adimensionais, formados pelo produto de potências das variáveis originais, denominados números π , que representam de maneira adequada à área de interesse em questão.

Langseth e Hopperstad (1996) descrevem o estudo experimental realizado em perfis de alumínio extrudados de seção quadrada e paredes finas, motivado pela necessidade das indústrias automotivas em reduzir o consumo de combustível dos veículos e conseqüentemente as emissões de dióxido de carbono (CO₂). O estudo consiste no ensaio estático e dinâmico de ligas de alumínio de diferentes graus de têmpera, espessura de parede e velocidade de impacto com o objetivo de se conhecer as propriedades mecânicas do alumínio e as diferenças de comportamento mecânico dos perfis extrudados.

Jones (1997) é uma referência que contribui bastante no estudo de impacto estrutural. Neste encontram-se informações sobre comportamento mecânico de perfis como chapas e vigas quando submetidos a carregamento dinâmico. Aborda a influência das características do material (sensibilidade a taxa de deformação imposta no carregamento) no comportamento dinâmico das estruturas e também os possíveis modos de deformação dos perfis necessários a absorção de energia de impacto (flambagem progressiva, flambagem plástica e flambagem global).

Cunat (2000) conceitua *crashworthiness* como a capacidade do veículo fornecer proteção aos seus ocupantes durante o impacto por meio da absorção de energia. Também relata a influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas de um material e conseqüentemente na resistência ao impacto.

Em Alghamdi (2000) se encontra uma descrição da forma dos absorvedores de energia mais comuns verificados em estruturas submetidas a impacto, tais como veículos e aeronaves, navios e trens, associados aos tipos de carregamentos mais predominantes. Neste artigo também se estuda como os elementos estruturais se deformam, absorvendo energia do impacto.

Karagiozova e Alves (2004) relatam aspectos referentes aos modos de deformação de estruturas tubulares de ligas de alumínio submetidas a carregamento dinâmico de impacto e demonstra que os modos de deformação não são predominantes sob determinadas condições. Neste artigo verifica-se que o aumento da velocidade de impacto associado ao aumento do comprimento do tubo, que antes se deformava apenas pelo modo de deformação por flambagem global faz com que o mesmo tubo apresente um modo de deformação por flambagem dinâmica progressiva.

Birch (2005) destaca a importância da pesquisa sobre o impacto veicular e apresenta o termo *crashworthiness*; atualmente bastante comum em pesquisas associadas ao impacto. Neste artigo também são mostradas as possibilidades de estudo do impacto por análise numérica, a descrição do absorvedor de energia considerado ideal junto com fatores de influência na absorção de energia e as considerações básicas para um projeto de estruturas “*crashworthy*”, ou seja, estruturas com capacidade de absorção de energia suficiente para manter a integridade dos ocupantes e/ou cargas.

Edwards *et al.* (2005) aborda aspectos relacionados à colisão frontal entre veículos. Neste artigo encontra-se uma descrição dos fatores que possuem bastante influência na severidade de uma colisão entre veículos como, por exemplo, a relação entre as massas dos veículos envolvidos e a condição de interação estrutural entre os mesmos (características geométricas).

No trabalho publicado por Haenchen *et al.* (2005) encontram-se definições importantes sobre o tema compatibilidade entre veículos. A compatibilidade entre veículos submetidos a impacto atualmente vem sendo conceituada como a proteção oferecida aos passageiros por um veículo submetido a impacto sem

causar grandes danos aos outros passageiros do outro veículo envolvido na colisão. Também se verifica neste artigo fundamentos teóricos relacionados a colisão veicular.

Smerd *et al.* (2005) encontram-se os resultados obtidos de um ensaio de tração a altas taxas de deformação de ligas de alumínio utilizado na industria automotiva. A realização dos ensaios tem como objetivo estudar a influência da taxa de deformação no comportamento mecânico do alumínio, considerado pouco sensível a taxa de deformação. Neste artigo verifica-se que o comportamento mecânico de um material também pode ser modelado pela equação constitutiva de Johnson - Cook, na qual percebe-se a influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas.

Dimas e Soares (2009) abordam o estudo numérico e experimental de uma viga engastada duplamente impactada na direção transversal por uma massa de 10,9 kg com velocidade inicial conhecida. Descreve o aparato experimental necessário ao impacto e as variáveis principais para a definição da intensidade do impacto tais como massa do impactador, velocidade do impacto, energia cinética e energia absorvida. Também menciona a análise dinâmica realizada pelo método de elementos finitos através do programa LS-Dyna.