



**Gilvania Terto Alves**

**Avaliação de Absorção de Energia de Impacto  
Uma Abordagem Baseada em Testes Com  
Estruturas Similares**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009



**Gilvania Terto Alves**

## **Avaliação da Absorção de Energia de Impacto. Uma Abordagem Baseada em Testes com Estruturas Similares**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Ronaldo Domingues Vieira**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Marcos Venicius Soares Pereira**

Departamento de Materiais – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de setembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Gilvania Terto Alves**

Graduou-se em Engenharia Mecânica no CEFET-RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca) em 2003. Especialista em Eng.<sup>a</sup> do Petróleo pela UNESA em 2005 e Prof.<sup>a</sup> do Ensino Básico Técnico e Tecnológico da Coordenadoria de Desenho (2008).

#### Ficha Catalográfica

Alves, Gilvania Terto

Avaliação de absorção de energia de impacto uma abordagem baseada em testes com estruturas similares / Gilvania Terto Alves ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2009.

153 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Impacto. 3. Energia. 4. Velocidade de impacto. 5. Deformação. 6. Absorção de energia. 7. Crashworthiness. 8. Colisão veicular. 9. Estruturas similares. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para meus pais, Osvaldo e Maria José,  
e meu esposo Marcio, pelo apoio e confiança.

## Agradecimentos

Aos meus pais, meu esposo Marcio e ao meu amigo Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega por terem-me incentivado a realizar este curso de Mestrado.

Ao professor Marco Antonio Meggiolaro e Mauro Speranza Neto pela orientação e constante incentivo.

Ao professor Ronaldo Domingues Vieira pela colaboração e disponibilidade nos momentos difíceis.

Aos Professores participantes da Comissão examinadora.

À CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus colegas da PUC-Rio, pelo incessante apoio, funcionários da Nuclep S.A.

A Deus, pela conclusão deste trabalho com êxito e a todos os amigos e familiares.

## Resumo

Alves, Gilvania T.; Meggiolaro, Marco Antonio. **Avaliação de Absorção de Energia de Impacto. Uma Abordagem baseada em Testes Com Estruturas Similares**, 2009. 153p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diversas estruturas projetadas pelo homem estão suscetíveis a impacto e quando se menciona impacto mecânico, pensa-se em um esforço de natureza dinâmica, na qual a carga é aplicada repentinamente e rapidamente. O impacto é um fenômeno de bastante complexidade, pois estão envolvidos o módulo da força, duração da aplicação desta e velocidade do impacto, além do comportamento mecânico do material. O impacto pode ser encontrado em diversas situações, entre elas se pode citar o projeto de ferramentas, explosões, artilharia, segurança no armazenamento de substâncias perigosas, colisões entre meios de transporte tais como aeronaves, carros, trens, etc. O carregamento aplicado associado à velocidade fornece o que é chamado de energia de impacto, que dependendo de sua amplitude pode provocar grandes prejuízos estruturais, ao meio ambiente ou ainda ao ser humano. Por isso devem-se prover meios de absorção desta energia para reduzir suas consequências. O comportamento da estruturas mecânicas submetidas ao impacto é um tema de bastante relevância e atualmente vem sendo frequentemente discutido devido às colisões de veículos. Neste trabalho, foram realizadas simulações de carregamentos dinâmicos em estruturas similares representando componentes veiculares através do método de elementos finitos seguidos de testes de impacto por queda de peso com medição das deformações, registradas por um extensômetros conectado a um sistema de aquisição de sinais, de modo a se estabelecer um método para cálculo da energia absorvida pela estrutura.

## Palavras-chave

Impacto; Energia; Velocidade de Impacto; Deformação; Absorção de Energia; Crashworthiness; Colisão veicular, Estruturas Similares.

## Abstract

Alves, Gilvania Terto; Meggiolaro, Marco Antonio (Adviser). **Evaluation of Absorption of Impact Energy: An Approach Based on Impact Tests in Similar Structures**. Rio de Janeiro, 2009. 153p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Several man-made structures are susceptible to impact forces. Mechanical impact is associated with an effort of dynamic nature, in which the load is suddenly and quickly applied. Impact is a complex phenomenon, because of the intensity of the force, duration of its application, and impact speed involved, which influence the mechanical behavior of the material. Impact can be found in several situations, e.g. in tool design, explosions, artillery, safety systems for dangerous substance storage, collisions between transport vehicles such as aircraft, cars, trains, etc. The applied loading associated to high speeds supplies the so-called impact energy. Depending on its intensity, impact can cause large structural damage, to the environment, or even to a human being. Therefore, ways to absorb this energy must be provided to reduce its consequences. The behavior of mechanical structures submitted to impact is a highly relevant issue. Nowadays, it is frequently discussed in the context of vehicle collisions. In this work, simulations of dynamic loading are carried through, in similar structures representing components of a vehicle, through the Finite Elements Method. Impact tests using a drop weight machine are performed to measure deformations using strain gauges connected to a system signal acquisition system, in order to establish a method to calculate the impact energy absorbed by the structure.

## Keywords

Impact; Energy; Velocity of Impact; Strain; Energy Absorption; Crashworthiness; Vehicle Collision, Similar Structures.

## Sumário

1. Introdução	16
1.1 Testes de Impacto ( <i>Crash Tests</i> )	18
1.2 Análise do Problema	19
1.3 Objetivo da Dissertação	20
1.4 Descrição da Dissertação	20
1.5 Revisão Bibliográfica	21
 2. Conceitos Importantes no Estudo de Impacto	 25
2.1 Carregamento Estrutural Dinâmico	25
2.2 Ensaio de Materiais	33
2.3 Testes de Impacto em Veículos ( <i>Crash Tests</i> )	41
2.4 Variáveis e Características do Impacto	44
2.5 Comportamento Dinâmico dos Materiais	54
2.6. Método de Elementos Finitos Aplicados aos Problemas de Impacto	 60
2.7 Análise de Similaridade	67
 3 Metodologia Empregada para Análise de Impacto	 91
3.1 Determinação de Propriedades Mecânicas do Material	92
3.2 Especificação do Dispositivo de Impacto	99
3.3 Especificação do Sistema de Instrumentação / Medição	102
3.4 Procedimento de Análise	102
3.5 Análise da Estrutura “L”	104
3.6 Análise da Estrutura “U”	107
 4. Resultado dos Testes e Comentários	 118
4.1 Teste n.º 1	118
4.2 Teste n.º 2	123
4.3 Teste n.º 3	126
4.4 Influência da Taxa de Deformação nos Fatores de Escala da Análise por Similaridade	 131
4.5 Análise de Similaridade Para Determinação da	



Taxa de Deformação Imposta ao Protótipo	133
4.6 Análise da Absorção de Energia pela Estrutura “U”	136
5. Conclusões e Sugestões	141
6. Referências Bibliográficas	144
Apêndice A	149

## Lista de Figuras

Figura 1 – Viga bi-apoiada submetida a carregamento estático concentrado	25
Figura 2 – Impacto em viga bi-engastada devido à queda de massa M	26
Figura 3 – Esquema de um extensômetro de resistência elétrica	28
Figura 4 – Esquema de medição da deformação por extensômetro	29
Figura 5 – Influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas de um aço de médio carbono obtidas em ensaio de tração	33
Figura 6 – Entalhes recomendados pela ASTM E -23 para ensaio de impacto tipo Charpy.	34
Figura 7 – Corpo de prova entalhado para ensaio de impacto	34
Figura 8 – Máquina tipo pêndulo para ensaio de impacto	35
Figura 9 – Entalhes recomendados pela ASTM E -23 para ensaio de impacto tipo Izod	35
Figura 10 – Máquina tipo pêndulo para ensaio de impacto IZOD	36
Figura 11 – Energia absorvida na fratura em função da temperatura	37
Figura 12 – Influência do teor de carbono na temperatura dúctil-frágil do aço	38
Figura 13 – Navio Liberty partido em dois após falha repentina (frágil) resultante de carregamento dinâmico de baixo grau significativo	39
Figura 14 – Esquema de uma máquina Drop Weight	39
Figura 15 – Máquina hidráulica para ensaios de materiais	40
Figura 16 – Equipamento utilizado para ensaio de materiais por barra de Hopkinson	41
Figura 17 – Etapas de um <i>crash</i> em VW Gol segundo FMVSS 208	43
Figura 18 – Esquema de um pára-choque	45
Figura 19 – Diferença de altura dos elementos absorvedores de energia nos veículos	46
Figura 20 – Esquema de atuação da força sob a estrutura frontal de um veículo	47
Figura 21 – Impacto axial de elemento absorvedor de energia	50

Figura 22 – Padrão de deformação ideal para elementos tubulares	50
Figura 23 – Flambagem dinâmica progressiva para elementos de seção tubular	51
Figura 24 – Flambagem dinâmica progressiva em um tubo quadrado	52
Figura 25 – Flambagem dinâmica plástica para elementos de seção tubular	52
Figura 26 – Flambagem global de elementos de seção tubular	53
Figura 27 (a), (b), (c) – Diferença na flambagem global de elementos de seção tubular	54
Figura 28 – Curva tensão x deformação de um certo material	55
Figura 29(a) – Modelo de comportamento rígido perfeitamente plástico	56
Figura 29(b) – Modelo de comportamento elástico perfeitamente plástico (elásto-plástico)	57
Figura 29(c) – Modelo rígido com endurecimento linear	57
Figura 29(d) – Modelo elástico com endurecimento linear	57
Figura 30 – Comparação do resultado previsto pelo modelo de Johnson-Cook com resultado experimental	60
Figura 31 – Etapas da análise por elementos finitos	60
Figura 32(a), (b) – Elementos sólidos linear e parabólico. Elementos de casca linear e parabólico	64
Figura 33 – Elemento solid 164 do LS-Dyna	66
Figura 34 – Esquema de impacto tipo charpy de componente veicular	88
Figura 35(a), (b) – Estrutura frontal de veículo. Estrutura simplificada em “U”	92
Figura 36 – Especificação de corpo de prova para tração	93
Figura 37 - Corpo de Prova preparado para o ensaio de tração	93
Figura 38 – Máquina universal para ensaio de tração	94
Figura 39 – Curva tensão x deformação convencional de uma liga de alumínio 6351-T6	94
Figura 40 – Comparação das curvas tensão x deformação de um aço SAE 1020 obtida por controle de taxa de deformação e por controle de velocidade.	95
Figura 41 – Variação das propriedades mecânicas de um aço SAE 4340 com o aumento da taxa de deformação	96

Figura 42 – Comparação das curvas tensão x deformação de um aço inoxidável SAE 304 obtidas com ensaios de tração controlados por taxa de deformação e velocidades	96
Figura 43(a) – Perfil das curvas tensão x deformação do alumínio para diferentes níveis de taxa de deformação	97
Figura 43(b) – Perfil das curvas tensão x deformação do alumínio para diferentes níveis de controle de velocidade	97
Figura 44(a),(b) - Perfil das curvas tensão x deformação do latão para diferentes níveis de taxa de deformação e velocidades de ensaio	98
Figura 45 – Máquina de queda de peso utilizada no impacto do “U” e esquema do teste.	99
Figura 46 – Massa de 48,3 kg e colunas guias da máquina de queda de peso	100
Figura 47(a), (b) – Dispositivo de liberação / içamento da massa. Escala graduada em centímetros	100
Figura 48 – Base para montagem da estrutura em “U”	101
Figura 49 – Motor elétrico para acionamento da máquina de queda de peso	101
Figura 50 – Esquema de um pórtico em “L”. Curvadora manual para conformação mecânica das barras	104
Figura 51 – Estrutura discretizada e submetida a carregamento estático	106
Figura 52 – Esquema do carregamento estático no “L”	107
Figura 53 – Dimensões da estrutura em “U”	108
Figura 54 – Pórtico em “U” instrumentado com extensômetro	108
Figura 55 – Estrutura deformada após colisão com massa de 48,3 kg	109
Figura 56 – Etapas para um ajuste linear de uma curva utilizando o programa Excel	111
Figura 57 – Esquema de teste usado para estimativa da duração de impacto	112
Figura 58 – Sinal registrado pelo aquisitor de sinais	112
Figura 59 – Dados de entrada utilizados pelo programa	113

Figura 60 – Curva tensão x deformação verdadeira utilizados na simulação	114
Figura 61 – Duração e Amplitude de impacto	115
Figura 62 – Pórtico discretizado por elementos finitos	116
Figura 63 – Deflexão vertical sofrido pelo ponto médio pela estrutura	117
Figura 64 – Estrutura em “U” após impacto a 13,32km/h	119
Figura 65 – Gráfico deformação x tempo da estrutura impactada a 13,32 km/h obtido experimentalmente	119
Figura 66 – Ajuste da curva com qualidade de 96% para obtenção da taxa de deformação experimental	120
Figura 67 – Gráfico da aceleração em função do tempo obtido numericamente	120
Figura 68 – Perfil da deformação em função do tempo obtido numericamente	121
Figura 69 – Ajuste da curva numérica deformação x tempo com qualidade de 97%	122
Figura 70 – Estruturas deformadas experimentalmente e numericamente. Velocidade de impacto de 3,7 m/s (13,32 km/h)	122
Figura 71 – Estrutura em “U” após impacto a 15,84 km/h	123
Figura 72 – Gráfico deformação x tempo da estrutura impactada a 15,84 km/h, obtido experimentalmente	123
Figura 73 – Ajuste da curva experimental deformação x tempo com qualidade de 98%	124
Figura 74 – Gráfico da aceleração em função do tempo obtido numericamente	124
Figura 75 – Perfil da deformação em função do tempo obtido numericamente	125
Figura 76 – Ajuste da curva numérica deformação x tempo com qualidade de 99%	125
Figura 77 – Estruturas deformadas experimentalmente e numericamente. Velocidade de impacto de 4,4 m/s (15,84 km/h)	126
Figura 78 – Estrutura em “U” após impacto a 19,44 km/h	126
Figura 79 – Gráfico deformação x tempo da estrutura impactada a 19,44 km/h	127

Figura 80 – Ajuste da curva experimental deformação x tempo com qualidade de 98%	127
Figura 81 – Gráfico da aceleração em função do tempo obtido numericamente	128
Figura 82 – Perfil da deformação em função do tempo obtido numericamente	128
Figura 83 – Ajuste da curva numérica deformação x tempo com qualidade de 95%	129
Figura 84 – Estruturas deformadas experimentalmente e numericamente. Velocidade de impacto de 5,4 m/s (19,44 km/h)	129
Figura 85 – Gráfico da força em função do deslocamento (deflexão vertical)	138
Figura 86 – Gráfico da força em função do deslocamento dividido em seis partes	139
Figura 87 – Ajuste da curva do gráfico F x d referente ao trecho A com qualidade de 100%	139

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estatísticas envolvendo tipos de colisões diferentes	17
Tabela 2 – Técnicas de testes de acordo com a taxa de deformação	32
Tabela 3 – Coeficientes experimentais da equação constitutiva de Cowper-Symonds	59
Tabela 4 – Fatores de escala de variáveis submetidas a cargas dinâmicas segundo teoria da similaridade direta	75
Tabela 5 – Exemplos de unidades secundárias com suas respectivas dimensões	78
Tabela 6 – Fatores de escala corrigidos	86
Tabela 7 – Influência da taxa de deformação nos fatores de escalas corrigidos	89
Tabela 8 – Comparação entre fatores de escala	89
Tabela 9 - Grau de sensibilidade de alguns materiais à taxa de deformação e à variação de velocidade no ensaio de tração	98
Tabela 10 – Comparação de resultados de deflexão estática entre os métodos analítico, numérico e experimental	107
Tabela 11 – Deslocamento vertical experimental dos pontos médios das estruturas em função da velocidade de impacto	130
Tabela 12 – Comparação entre as deflexões verticais, experimental e numérica, dos pontos médios das estruturas em “U”	130
Tabela 13 – Parâmetros de aceleração e força obtidos pela simulação por elementos finitos	131
Tabela 14 – Comparação entre as taxas de deformação, experimental e numérica, dos pontos médios das estruturas em “U”	131
Tabela 15 – Fatores de escala corrigidos para estrutura de alumínio	132
Tabela 16 – Comparação entre fatores de escala de altas taxas de deformação	132