

# MODELAMENTO DE COLISÃO USANDO ANÁLISE NÃO LINEAR

**César Antonio Aparício S.**

**João Lirani**

**Jonas de Carvalho**

Departamento de Energia Mecânica, Universidade de São Paulo – São Carlos

Av. do Trabalhador São-carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos – SP. E-mail:

aparicio@sc.usp.br.

## Resumo

O comportamento estrutural de veículo ou de sistemas mecânicos decorrente de uma colisão é um evento muito complexo. Para analisar tal comportamento é preciso submeter veículos ou parte deles a ensaios de colisão, conhecidos como *crash test* que são realizados para determinar o comportamento de estruturas e componentes assim como medir a capacidade ou habilidade de uma estrutura em absorver energia cinética decorrente de uma colisão, parâmetro conhecido como *crashworthiness*. Estes ensaios podem ser realizados através de modelos físicos ou de simulação computacional implementada com o método de elementos finitos. Neste trabalho a colisão de um *container*, típico para armazenamento de material radiativo, em queda livre conta uma superfície rígida é simulada utilizando análise dinâmica explícita transiente com software de elementos finitos ANSYS/LS DYNA 3D.

**Palavras-chave:** *Crashworthiness*, FEM, *Crash test*, CAD, CAE.

## 1. INTRODUÇÃO:

No projeto de veículos um item de extrema importância é o que diz respeito à segurança do(s) ocupante(s) quando ocorre uma colisão. Para que um veículo seja considerado seguro, ele deve satisfazer dois parâmetros fundamentais: prevenir o envolvimento em colisões e, minimizar o grau de lesões quando este se envolver numa.

O envolvimento em colisões veiculares é, em muitos casos, decorrente de fatores que não podem ser controlados, como por exemplo: acidentes ocasionados por imprudência própria ou de terceiros, falhas mecânicas, entre outros. Quando uma colisão ocorre o comportamento do veículo é analisado através de um parâmetro chamado *Crashworthiness*; conceituado como a capacidade ou habilidade de estrutura ou parte do veículo de absorver a energia cinética resultante de uma colisão e manter a integridade no espaço do(s) ocupante(s). Esta característica visa prevenir da melhor maneira o(s) ocupante(s) de lesões graves decorrentes de um acidente, minimizar segundas colisões dentro do veículo, prevenir ejeção e reduzir risco de fogo. Devemos esclarecer que *crashworthiness* e veículo seguro não são a mesma coisa. Estes dois tópicos devem ser distinguidos. A segurança oferecida por um veículo depende tanto do *crashworthiness* como características que evitem o envolvimento em acidentes tais como: freios ABS, dirigibilidade, pneus largos, etc. Um veículo pode ser mais seguro do que outro porem, possuir defeito de *crashworthiness*.

No estudo de *crashworthiness* estão envolvidas principalmente as áreas de, engenharia mecânica, naval e aeronáutica; devido a que dependem de esta característica para cumprirem normas e requisitos inerentes ao projeto tanto de veículos como de componentes. Alguns destes estudos são feitos por organismos governamentais com o objetivo de orientar às pessoas sobre quais veículos cumprem as normas e quais são mais seguros. Outros trabalhos envolvem a área médica onde, são expostos dados importantes sobre tipos e gravidade de lesões decorrentes de colisões devido a eficiência do comportamento *crashworthiness* de

veículos. Todas estas pesquisas tem como objetivo principal, avaliar o grau de segurança de veículos quando da ocorrência de colisões, o que é importante quando se tenta salvar vidas e evitar acidentes com lesões graves.

## 2. TESTE DE CRASHWORTHINESS

Na construção de veículos, aeronaves, navios e plataformas as estruturas são normalmente formadas utilizando-se colunas de paredes finas e juntas, as quais podem ser de vários tipos de materiais, formas e tamanhos. Estes componentes estruturais são os que absorvem a maior quantidade de energia de impacto durante uma colisão. O objetivo é permitir que a estrutura se deforme o necessário para manter o colapso sobre controle enquanto suficiente energia do impacto é absorvida sem que se penetre no espaço de sobrevivência e sem gerar desacelerações muito elevadas às quais o ocupante possa ser exposto. Uma grande quantidade de trabalhos de pesquisa tem por objetivo o estudo do comportamento *crashworthiness* deste tipo de componentes.

Para avaliar o comportamento estrutural de um veículo e saber se este é seguro, é preciso submeter este a um ensaio de colisão.

Até muito recente o único método de se fazer ensaios de colisão era através de testes físicos. Testes físicos são feitos utilizando-se modelos reais completos ou parciais, os quais podem ser de tamanho real ou escala. Porém este tipo de teste resulta caro devido ao custo do modelo e a impossibilidade de reutilização. Devido a isto e, à redução do ciclo de desenvolvimento de produtos, nos últimos anos surgiu a alternativa do teste com auxílio de ferramentas de análise computacional CAD (*computer aided design*) e CAE (*computer aided engineering*) em projeto e performance de colisão. Uma das ferramentas analíticas mais utilizadas é o método de elementos finitos (FEM – *Finite Elements Modeling*).

## 3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (HISTÓRICO)

As idéias e teorias base que deram origem ao que hoje conhecemos como método de elementos finitos surgiram no início deste século. Não se atribui a ninguém especificamente a autoria deste método, nem a data precisa em que surgiu. Contudo, Matemáticos, Físicos e Engenheiros trabalharam desde o início na elaboração e evolução do método e, de acordo com os seus pontos de vista, cada um justifica e reclama para si sua autoria.

Segundo Huebner (1982) “em engenharia este método foi usado pela primeira vez em 1960 por Clough num estudo sobre problemas de elasticidade plana”. Originalmente o método foi implementado no estudo de tensões em aeronaves. A partir do trabalho de Clough no início dos anos 60, o método de elementos finitos foi usado extensivamente para análise de tensões lineares, deflexão e vibração em diversas áreas da engenharia, já que na época começava-se a reconhecer a eficácia do método. Mesmo assim, seu uso em análise de *crashworthiness* era muito limitado até poucos anos atrás.

O método dos elementos finitos em simulação de colisão teve grande evolução nos últimos anos devido à evolução paralela da computação (que disponibilizou novos programas e hardware compatível), um melhor entendimento do comportamento de plasticidade de chapas metálicas e o surgimento de novos materiais. Desde então o método tem sido utilizado extensivamente em análise de tensões, deformações, vibração, condução de calor, problemas lineares e não lineares e *crashworthiness* entre outros.

Para Huebner (1982) “FEM é uma técnica de análise numérica para se obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas de engenharia”. Gandhi (1996) afirma que “A maior vantagem deste método é a capacidade de representar detalhes geométricos, materiais da estrutura, assim como a aplicação de múltiplos conceitos de projeto. Sua maior

desvantagem é o custo/tempo”. Desenvolver um modelo típico de choque frontal pode levar de 2 a 4 meses e, cada simulação de 10 a 20 horas de CPU aproximadamente em estações de trabalho.

### 3.1 Descrição de análise por método de elementos finitos

De acordo com Huebner (1982) o método de elementos finitos pode ser resumido essencialmente em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

O Pré-processamento é a etapa onde prepara-se o problema que será solucionado. Modela-se o fenômeno, introduzem-se condições iniciais e de contorno, carregamentos, escolhem-se os elementos, propriedades dos materiais e são feitas simplificações que venham a facilitar a análise sem influir negativamente nos resultados. Esta etapa subdivide-se em:

- Discretização do modelo: subdivisão em elementos finitos;
- Seleção das funções de interpolação.

A Solução ou *Solver* é baseada num algoritmo numérico que visa solucionar da maneira mais rápida e acurada, uma equação diferencial com condições de contorno e/ou condições iniciais impostas ao modelo na etapa anterior. Esta etapa subdivide-se em:

- Obtenção da matriz de rigidez elementar;
- Montagem das equações algébricas para todo o domínio;
- Soluções para os deslocamentos desconhecidos;
- Cálculo das deformações e tensões elementares a partir dos deslocamentos nodais.

O Pós-processamento é a última etapa. Depende somente das necessidades do engenheiro que está modelando o problema. Pode fornecer dados como:

- Deslocamentos nodais;
- Deformações da geometria;
- Gradientes de tensão de acordo com o critério de resistência escolhido;
- Gradientes de temperatura;
- Deslocamentos nodais ao longo do tempo;
- Freqüências naturais e modos de vibrar da estrutura.

### 3.2 Análise dinâmica explícita transiente

O ANSYS/LS-DYNA 3D é um software de elementos finitos com capacidade de realizar simulações dinâmicas que utiliza a equação do movimento (1) para solução de problemas dinâmicos não lineares:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (1)$$

Onde:  $[M]$  matriz de massa,  $[C]$  matriz de amortecimento,  $[K]$  matriz de rigidez,  $\{\ddot{u}\}$  vetor aceleração,  $\{\dot{u}\}$  vetor velocidade,  $\{u\}$  vetor deslocamento,  $\{F^a\}$  vetor de forças aplicadas.

Este software usa o método de integração de Newmark para solucionar problemas. Usando expansão de diferenças finitas no intervalo  $\Delta t$ , no qual é assumido que:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1 - \delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (2)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \alpha \right) \{\ddot{u}_n\} + \delta \{\ddot{u}_{n+1}\} \right] \Delta t \quad (3)$$

Onde:  $\alpha, \delta$  são parâmetros de integração de Newmark,  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ ,  $\{u_n\}$  vetor nodal de deslocamento no instante  $t_n$ ,  $\{\dot{u}_n\}$  vetor nodal de velocidade no instante  $t_n$ ,  $\{\ddot{u}_n\}$  vetor nodal de aceleração no instante  $t_n$ ,  $\{u_{n+1}\}$  vetor nodal de deslocamento no instante  $t_{n+1}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  vetor nodal de velocidade no instante  $t_{n+1}$ ,  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$  vetor nodal de aceleração no instante  $t_{n+1}$ .

Como o objetivo é achar o deslocamento  $\{u_{n+1}\}$ , a equação (1) no instante  $t_{n+1}$  fica:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F^a\} \quad (4)$$

A solução para o deslocamento no instante  $t_{n+1}$  é obtida rearranjando as equações (2) e (3):

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = a_0(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2\{\dot{u}_n\} - a_3\{\ddot{u}_n\} \quad (5)$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + a_6\{\ddot{u}_n\} - a_7\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (6)$$

Onde:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha \Delta t^2}, & a_1 &= \frac{\delta}{\alpha \Delta t^2}, & a_2 &= \frac{1}{\alpha \Delta t}, & a_3 &= \frac{1}{2\alpha} - 1, \\ a_4 &= \frac{\delta}{\alpha} - 1, & a_5 &= \frac{\Delta t^2}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right), & a_6 &= \Delta t(1 - \delta), & a_7 &= \delta \Delta t \end{aligned}$$

$\{\ddot{u}_{n+1}\}$  da equação (5) pode ser substituído dentro da equação (6) e  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  pode ser expressado apenas em termos dos desconhecidos  $\{u_{n+1}\}$ . As equações resultantes são combinadas com a equação (4), que fica:

$$\begin{aligned} (a_0[M] + a_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} &= \{F^a\} + [M](a_0\{u_n\} + a_2\{\dot{u}_n\} + a_3\{\ddot{u}_n\}) + \\ [C](a_4\{u_n\} + a_4\{\dot{u}_n\} + a_5\{\ddot{u}_n\}) \end{aligned} \quad (7)$$

Uma vez que é obtida a solução para  $\{u_{n+1}\}$ , as velocidades e acelerações são atualizadas como descrito nas equações (5) e (6).

O método de Newmark é incondicionalmente estável para:

$$\alpha \geq \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} + \delta \right)^2, \quad \delta \geq \frac{1}{2}, \quad \frac{1}{2} + \delta + \alpha > 0 \quad (8)$$

Junto com o método de Newmark o software utiliza o método de Newton Raphson para convergir e chegar a solução de problemas não lineares.

## 4. SIMULAÇÃO DE COLISÃO DE *CONTAINER*

Como parte do nosso trabalho simulamos e analisamos o impacto de um modelo simplificado de *container* em queda livre de dez metros contra uma superfície rígida. Foi usado como referência o artigo de Gruda e York (1996). Para a simulação utilizamos o software de elementos finitos ANSYS/DYNA 3D. Utilizamos análise dinâmica explícita.

O objetivo da simulação é verificar a absorção do impacto pela estrutura e verificar se ocorrem danos à cápsula (componente crítico) interna do *container* quando o modelo colide contra a superfície.

### 4.1 Descrição do modelo

O *container* tem diâmetro de 0,5 m e altura de 0,76 m. Foi modelado com os seguintes componentes: Cilindro formado por chapas de alumínio de 2mm de espessura que formam uma cavidade preenchida com espuma de poliuretano, tampas superior e inferior de alumínio com espessura de 2mm, inserto superior e inferior formado por chapas de alumínio de 2mm de espessura que formam uma cavidade preenchida com espuma de poliuretano e cápsula feita de alumínio. As dimensões são mostradas na figura (1).

Foram escolhidos três tipos diferentes de materiais e dois tipos de elementos. A modelagem foi realizada usando 2027 elementos no total, sendo 1002 elementos *shell* e 1025 elementos sólidos. A tabela (1) mostra os materiais e elementos escolhidos da biblioteca do ANSYS/LS-DYNA 3D para cada um dos componentes do *container*.

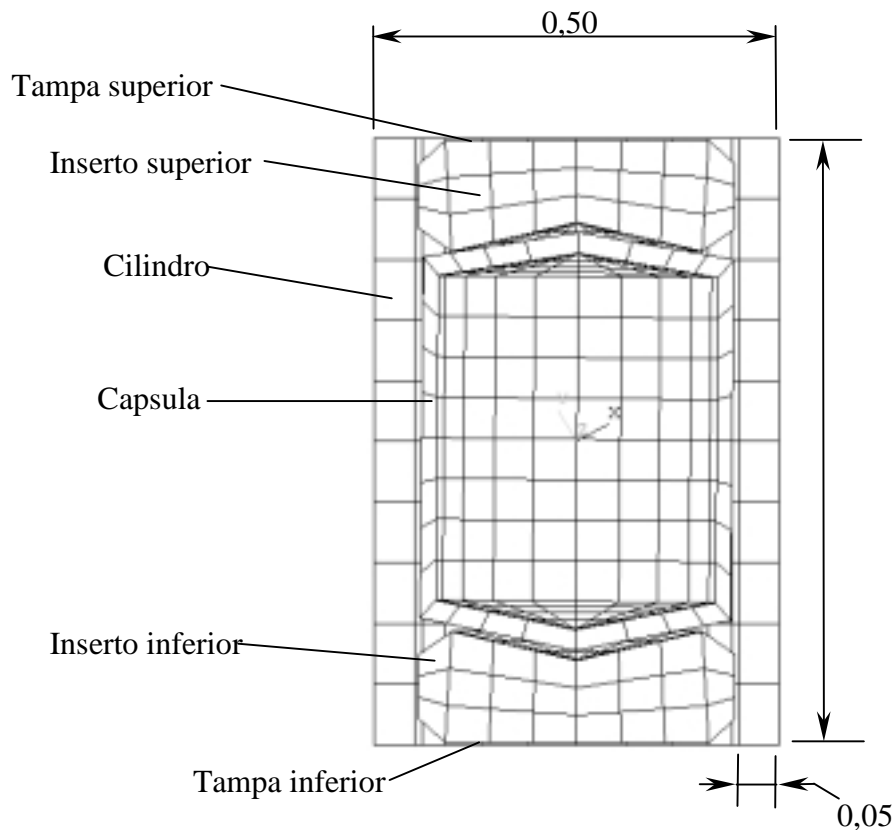


Figura 1: Corte transversal do *container* onde são mostrados seus componentes e as dimensões do modelo em metros.

Tabela 1: Materiais e elementos utilizados nos componentes do container.

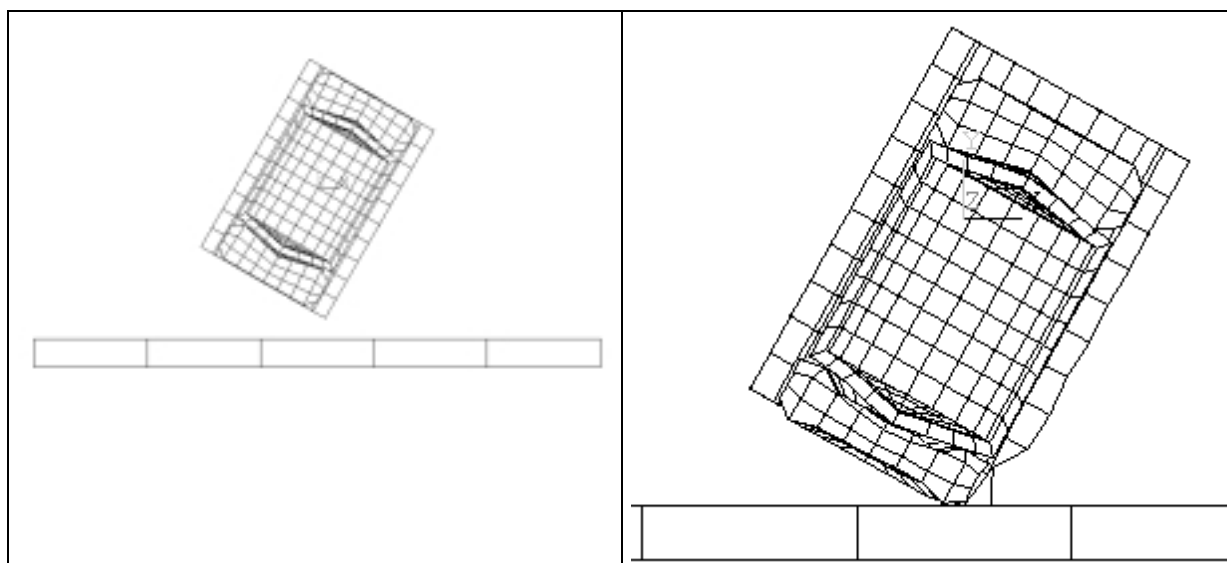
Componente	Material	Elemento - Tipo
<b>Cilindro</b>	<b>Alumínio 2320</b>	<b>Shell 163 - tetraedro</b>
	<b>Espuma</b>	<b>Sólido 164 - hexaedro</b>
<b>Tampas</b>	<b>Alumínio 2320</b>	<b>Shell 163 - tetraedro</b>
<b>Insertos</b>	<b>Alumínio 2320</b>	<b>Shell 163 - tetraedro</b>
	<b>Espuma</b>	<b>Sólido 164 - hexaedro</b>
<b>Cápsula</b>	<b>Alumínio 2320</b>	<b>Sólido 164 - hexaedro</b>
<b>Superfície</b>	<b>Aço 1020</b>	<b>Sólido 164 - hexaedro</b>

Devido a que o modelo é composto por vários componentes e estes na simulação colidem contra uma superfície rígida, foram utilizados 3 tipos de contatos entre eles, sugeridos por Hallquist (1993) tabela (2).

Tabela 2: Definição de contatos dinâmicos explícitos. \*Inclui tampas \*\*Inclui cilindro, tampas, insertos e cápsula.

Tipo de contato	Componente contator	Componente alvo
Contato Automático de Superfície	Inserto superior	-----
	Inserto inferior	-----
	Cilindro*	-----
	Cápsula	-----
Contato automático de nós conta superfície	Inserto inferior	Cilindro*
	Inserto superior	Cilindro*
	Tudo**	Superfície
	Cápsula	Cilindro*
Contato geral de nós conta superfície	Cápsula	Inserto superior
	Inserto inferior	Cápsula

## 5. RESULTADOS



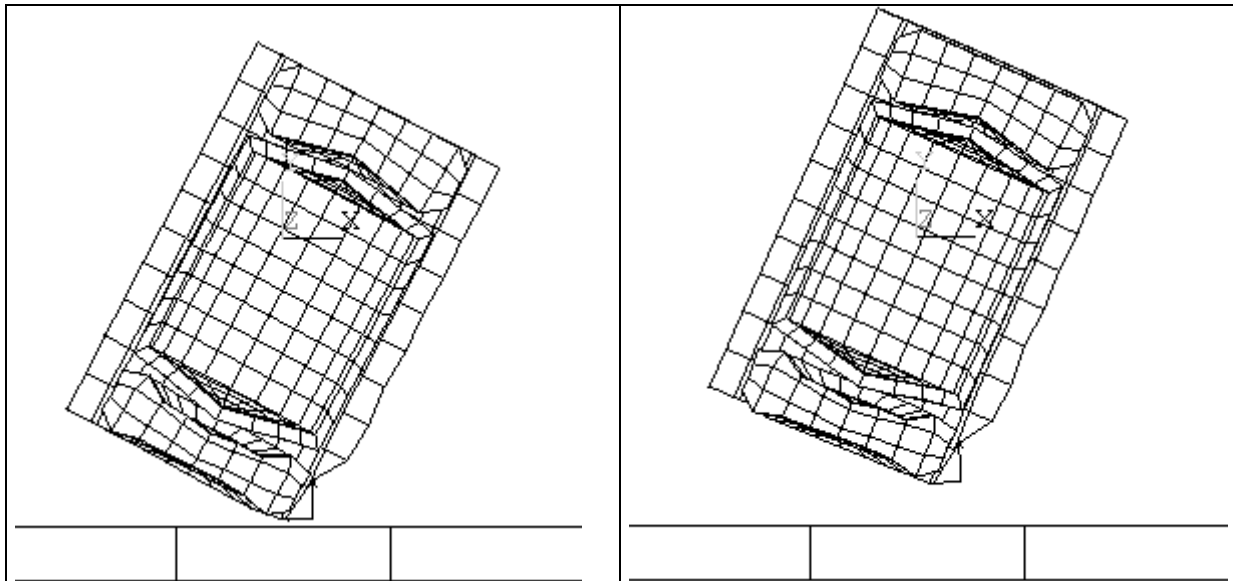


Figura (2): Sequência de simulação do container

A estrutura composta por cilindro, tampas e insertos deformou-se o suficiente absorvendo a maior parte da energia do impacto, o componente cápsula não chegou a se deformar; com isto o objetivo de proteger a cápsula interna do container foi alcançado.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível com auxílio do software ANSYS/LS-DYNA 3D aplicarmos conceitos de engenharia, modelarmos e simularmos diversas vezes, coisa que não teria sido viável por médio de testes físicos. Assim o software mostrou-se uma ferramenta poderosa e eficaz para o estudo de problemas complexos de engenharia.

Para se interpretar de forma coerente os resultados obtidos é necessário aliar a experiência em engenharia a um amplo conhecimento da teoria por trás dos programas que executam este tipo de análise.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq e à USP pela oportunidade oferecida.

## 8. REFERENCIAS

- Council, F.; Stewart, J.; Cox, C. 1997. "A new method for predicting crashworthiness". Accident analysis and prevention. Vol. 29, n. 1, pp. 109-123.
- Gandhi, U.; Hu, J. 1996. "Data-based approach in modeling automobile crash". International journal of impact engineering. Vol. 16, n. 1, pp. 95-118.
- Gruda, J.; York, A., 1996. "Crashworthiness of the AT-400A shipping container". Development, validation, and application of inelastic methods for structural analysis and design, ASME. Vol. 343.
- Hallquist, J., 1993. "ANSYS/LS-DYNA 3D theoretical manual". Livermore software technology corporation, Livermore.
- Huebner, K.; Thornton, E. 1982. "The finite element method for engineers". Ed. John Wiley & Sons, New York, 622p.
- Jones, N.; Wierzbicki, T. 1993. "Structural crashworthiness and failure. London", Elsevier.

- Kecman, D. 1997. "An engineering approach to crashworthiness of thin-walled beams and joints in vehicle structures". *Thin-walled structures*. Vol. 28, n. 3-4, pp.309-320.
- Mamalis, A.; Robinson, M.; et al. 1997. "Crashworthy capability of composite material structures". *Composite structures*. Vol. 37, pp. 109-134.
- Miller, PP.; Carney, J. 1997. "Computer simulations of roadside crash cushion impacts". *Journal of transportation engineering – ASCE*. Vol. 123i5, pp. 270-376.
- Reid, J.; Sicking, D.; Paulsen, G. 1996. "Design and analysis of approach terminal sections using simulation". *Journal of transportation engineering – ASCE*. Vol. 122i5, pp. 399-405.
- Reid, J. 1996. "Towards the understanding of material property influence on automotive crash structures". *Thin-walled structures*. Vol. 24, pp. 285-313.
- Thacker, J.; Reagan, J.; et al. 1998. "Experiences during development of a dynamic crash response automobile model". *Finite elements in analysis and design*; Vol. 30, pp. 279-295.