

# IMPACTO LATERAL EM TUBOS PRESSURIZADOS DE MATERIAIS COMPOSTOS COM FIBRA DE VIDRO E RESINA EPÓXI

**Rafael Celeghini Santiago**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas  
rafael.celeghini@gmail.com

**Resumo:** Neste trabalho será realizado o estudo do fenômeno de impacto contra estruturas tubulares de fibra de vidro e resina epóxi, para isso será utilizada uma abordagem numérico-experimental. Será desenvolvido um aparato para a realização de ensaios de queda de peso utilizando o martelo de impacto do Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas, sendo neste realizado o estudo do fenômeno em questão. Os resultados provenientes dos ensaios experimentais serão confrontados com os resultados oriundos da simulação numérica do experimento. Objetiva-se, com isso, a definição do comportamento do material ao impacto e o desenvolvimento de um modelo numérico para o fenômeno. O desenvolvimento do ensaio experimental e do modelo numérico foram realizados com sucesso. O modelo numérico apresentou resultados significativamente semelhantes aos ensaios experimentais. Numericamente, foi possível identificar o fenômeno de colapso de um duto pressurizado, quando submetido ao impacto lateral.

**Palavras chave:** Impacto, materiais compostos, queda de peso, fibra de vidro, filamento contínuo, método dos elementos finitos.

## 1. Introdução

A opção recentemente escolhida pelo Brasil para o desenvolvimento da economia é com investimento em infraestrutura a fim de se propiciar um ambiente favorável ao recebimento de investimentos e indústrias oriundas do exterior. Os investimentos nesse setor têm como um dos objetivos a manutenção da auto-suficiência na produção de petróleo obtida pelo país e a redução da dependência externa no atendimento à demanda de gás natural. Para seguir o crescente consumo de petróleo e gás natural observado pelo mercado e com previsto investimento na sua exploração e transporte, serão necessários gastos maciços nos sistemas de armazenamento, captação e transportes desses insumos. Desse modo, os sistemas de tanques, dutos e risers já são focos para pesquisas desenvolvidas pela PETROBRAS nos últimos anos, visando o desenvolvimento de equipamentos com melhor desempenho e maior confiabilidade.

Historicamente acidentes envolvendo o setor de petróleo e gás natural geram grandes perdas de recursos ambientais, humanos e econômicos, sendo a causa destes muitas vezes ligadas a falhas e rompimentos nos sistemas de dutos. Com base em Mesquita (2002), o dano causado pelo impacto em dutos por pequenos objetos pode causar uma pequena falha local no elemento impactado. Neste trabalho, mostra-se que quando o mesmo está submetido a uma pressão, este fato pode dar início ao processo de propagação da falha, que é diretamente relacionada com a magnitude do dano causado, a geometria e as características do material do duto. Uma vez iniciada a falha, a pressão mínima necessária para a propagação dessa pode chegar a 20% da pressão de colapso. Propagando-se a falha e atingindo um tamanho crítico, o duto pode falhar causando o vazamento do fluido ou explosão.

Com relação ao setor de petróleo e gás natural, nota-se uma tendência ao uso intensivo de materiais compostos, como fibra de vidro, carbono ou kevlar, em estruturas sofisticadas. Por exemplo, a plataforma P-17, Fig. 1, é a primeira no mundo a utilizar risers fabricado com material composto de fibra de vidro e carbono sendo estes mais baratos, leves e resistentes à corrosão e solicitações mecânicas.



Figura 1 - À esquerda, plataforma P-40, semelhante à plataforma P-17, e à direita, riser fabricado em fibra de carbono.

Em julho de 2007, houve o contato telefônico com o Dr. César Del Vecchio, engenheiro responsável pelo setor de materiais compostos e não-metálicos da PETROBRAS. Contato de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto de pesquisa aqui apresentado. Atualmente, a PETROBRAS possui um centro de pesquisa voltado para esse tipo de material e utiliza materiais compostos como fibra de vidro e resina epóxi, e materiais compostos combinados entre fibra de vidro e fibra de carbono. A utilização mais expressiva desse material encontra-se em partes integrantes de risers, conexões e tubulações de transporte. Além disso, objetiva-se uma utilização extensiva destes materiais para o futuro.

Com relação ao estudo de impacto contra tais estruturas, foi demonstrado grande interesse por parte da empresa, em função deste estudo ser de importância significativa para a indústria de petróleo e gás natural, sendo, porém, pouco pesquisada pelo setor até então.

## 2. Desenvolvimento do aparato experimental de impacto

Nesta seção serão apresentados os métodos utilizados para a realização do ensaio experimental de queda de peso em tubos de fibra de vidro, assim como sensoriamento desenvolvido neste.

### 2.1. O martelo de impacto

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizado o martelo de impacto desenvolvido pelo Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas. O mesmo é capaz de realizar impacto de queda de peso com energia de até 15 KJ. O mesmo utiliza massas de 30 Kg a 250 Kg, com altura de queda de até 6 m de altura. Tal equipamento encontra-se em condições operacionais e em ambiente seguro. O martelo de impacto é utilizado em ensaios de flambagem axial em tubos metálicos, impacto mecânico em pneus automobilísticos e impacto de baixa velocidade em chapas metálicas. Com o elemento integrante do martelo de impacto, há um dispositivo também desenvolvido pelo grupo de pesquisa para a fixação de tubos junto ao martelo de impacto, desenvolvido em Zanata (2007), a fim de que estes sejam impactados lateralmente. Este equipamento é aplicado para tubulações com diâmetro externo máximo de 20 mm e possibilita a aplicação de pressão interna nestas.

Observou-se, no entanto, que a mínima massa possível de ser utilizada no martelo de impacto, 30 kg, mesmo para altura de queda mínima, ainda representava um excesso de carga para a estrutura analisada, não possibilitando um estudo consistente de impacto para a mesma. Lançando mão das normas ASTM-D5628 e ASTM-D2444, foi objetivado o desenvolvimento de um equipamento de queda de peso (“*Falling Weight Test*”), sendo constituído como uma adaptação do martelo de impacto.

### 2.2. Projeto e desenvolvimento da solução escolhida

O projeto do equipamento foi realizado utilizando o programa CAD-3D Inventor 2008 Versão Estudantil, sendo possível realizar neste todas as etapas de projeto, como o projeto inicial, modificações, simulações e geração de plantas. Na Fig. 2 está apresentado o equipamento desenvolvido para impacto por queda de peso.

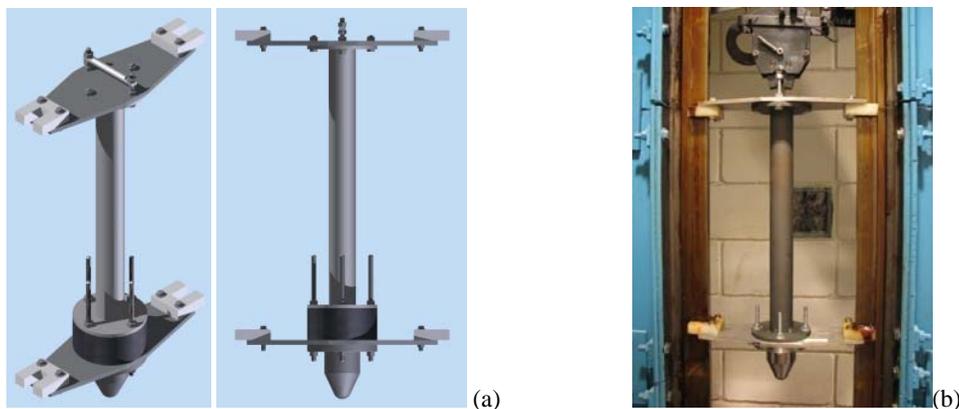


Figura 2 - Imagens do equipamento desenvolvido para impacto por queda de peso. Projeto em CAD-3D (a) e equipamento desenvolvido (b)

O equipamento desenvolvido consiste em um identador, massas de impacto, extensor, suportes horizontais, engate, guias e elementos de união, sendo tais elementos descritos a seguir:

- *Identador*: Elemento do equipamento desenvolvido responsável pelo contato com o espécime ensaiado, no caso, tubos de fibra de vidro. A geometria deste é definida pela norma ASTM-D2444.
- *Massa de impacto*: Elementos responsáveis pela definição da massa utilizada para o ensaio de queda de peso. A massa de cada elemento é pré-definida em duas configurações, sendo estas de 1 kg e 0,5 Kg.
- *Extensor*: Elemento desenvolvido a fim de evitar o travamento do equipamento, uma vez que este, mesmo estando em queda livre, estará em contato com os trilhos-guia do martelo de impacto.
- *Suporte horizontal*: Elemento cuja função é garantir o alinhamento do equipamento e o seu contato com os trilhos-guia.

- *Engate*: Elemento desenvolvido para possibilitar o engate do equipamento com o sistema de alinhamento e posicionamento do martelo de impacto.
- *Guias*: Elementos desenvolvidos a fim de reduzir o atrito entre o equipamento e os trilhos-guia. Observa-se que estes elementos têm possibilidade de regulagem de seu posicionamento horizontal cujo objetivo é propiciar o controle do contato entre as duas partes.
- *Elementos de união*: São parafusos, porcas e roscas-sem-fim, cuja função está em garantir a fixação entre as partes.

### 2.3. Fabricação do equipamento desenvolvido

Sendo definida a configuração do equipamento desenvolvido, geradas as plantas de fabricação e especificados os materiais a serem utilizados, deu-se início aos processos de fabricação e montagem do equipamento. Os elementos do equipamento desenvolvido foram usinados utilizando processos de corte, torneamento, fresamento, furação, soldagem e retificação. A fim de minimizar efeitos de corrosão no equipamento desenvolvido, todos os elementos desenvolvidos, com exceção do identador, foram submetidos à fosfatização.

Após a finalização do processo de usinagem do identador, o mesmo foi submetido à têmpera com resfriamento à água. O mesmo não foi submetido à fosfatização, pois este processo associado à têmpera causa a geração de micro-trincas na superfície do elemento, facilitando a geração futura de trincas.

Para o processo de têmpera, inicialmente o identador foi colocado no interior de um forno à temperatura de 650°C durante 6h a fim de que fosse obtido o equilíbrio térmico no interior do material. Após esse período, o elemento foi resfriado abruptamente com agitação em uma solução de água e fluido antioxidante. Os parâmetros para a realização do tratamento térmico, como temperatura, tempo de homogeneização e procedimento para resfriamento foram obtidos de Callister (2002). Com este tratamento térmico foi possível praticamente dobrar a dureza do material, passando de 15 HC, antes do tratamento, para 35 HC, após este procedimento.

O equipamento desenvolvido apresentou um funcionamento satisfatório, capaz de realizar os ensaios experimentais objetivados.

### 2.4. Sensoriamento do experimento

Para o monitoramento do experimento, foram utilizados diversos sensores e sistemas de condicionamento de sinais, sendo estes descritos a seguir:

- *Placa de aquisição de sinais analógicos e digitais National Instruments modelo PCI-6110 e quadro de conexões BNC-2110*. Este equipamento é utilizado junto a um computador pessoal para a obtenção de sinais provenientes de diversos sensores descritos a seguir. Este é utilizado junto ao programa comercial MatLab 7.0 e apresenta uma acuracidade de 1,2 mV.
- *Vibrômetro laser Polytec modelo OFV-323 e controlador modelo OFV-3020*. Mesmo sendo um vibrômetro, equipamento destinado a medição de vibrações, o mesmo é capaz de atuar como sensor de velocidade para deslocamentos de até 2 m. Este apresenta um limite de medição de 20 m/s e acuracidade de 1,2%.
- *Filtro analógico passa-baixa e amplificador Fylde modelo FE-301 SF*. Este foi utilizado com o intuito de diminuir ruídos existentes no processo de medição provenientes do sensor de velocidade. Este foi utilizado com uma frequência de corte de 100 Hz, sem a observação de perdas no sinal medido. Quando mostrou-se necessário o aumento de resolução durante a medição de ensaios de baixa energia de impacto, o sinal proveniente do sensor de velocidade foi amplificado com este equipamento.
- *Câmera de alta velocidade Photron modelo Fastcam-APX RS*. Este equipamento possibilita uma análise qualitativa do evento, possibilitando a filmagem deste com alta frequência de aquisição de imagens.
- *Sensor apalpador Solartron modelo LE25*. Este sensor possibilita a medição do perfil do tubo após o impacto. Este elemento tem precisão mínima de 0,4  $\mu m$ .

Com a gama de sensores utilizados para a mensuração do ensaio experimental, objetiva-se obter conclusões substanciais do evento estudado e também obter parâmetros confiáveis a fim de possibilitar a comparação com as simulações numéricas do fenômeno.

Para a obtenção e tratamento dos sinais obtidos com o sensor de velocidade foi desenvolvida uma sub-rotina no programa comercial Matlab7.0. A partir deste, foi possível obter as relações de velocidade, aceleração e deslocamento ao longo do tempo, assim como diversas análises apresentas no decorrer deste trabalho.

## 3. Descrição do material ensaiado

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados tubos de fibra de vidro e resina epóxi fabricados com técnica de filamento contínuo. Deve-se frisar que o aparato para fixação e pressurização de tubos utiliza apenas tubos com diâmetro externo de 20 mm. Lançando mão do catálogo da empresa Ameron Internacional, fornecedora de tubos de materiais compostos para a PETROBRAS, foi definido o diâmetro interno do tubo a ser ensaiado de modo a este

constituir um modelo escalonado de um dos produtos comercializados por esta empresa. Foi definido o diâmetro interno de 17 mm para o espécime a ser ensaiado, constituindo, assim, uma escala aproximada de 1:2 do tubo SP1500 comercializado por esta empresa, conforme apresentado na Tab. 1. O ângulo de enrolamento da fibra foi definido como 55°, conforme dados do fabricante. Foram adquiridos 100 espécimes de acordo com as especificações apresentadas, sendo fabricados pela empresa MCS Industrial Ltda.

Tabela 1 – Especificações do tubo a ser ensaiado.

	Tubo em estudo	Tubo Ameron mod. SP 1500
<b>Diâmetro interno (mm)</b>	17 mm	40 mm
<b>Espessura de parede (mm)</b>	1,5 mm	2,3 mm
<b>Material</b>	Fibra de vidro com resina epóxi	Fibra de vidro com resina epóxi
<b>Ângulo de enrolamento da fibra</b>	55°	55°

Para a fabricação de dutos ou peças de revolução em materiais compostos, o método mais utilizado é a técnica do filamento contínuo. Neste caso, a peça é envolvida por um fio contínuo de fibra de alta resistência impregnada com resina polimérica contendo um ângulo de avanço bem definido. Assim, há a organização das fibras em direções principais, porém não há a formação de lâminas, como no caso da laminação. Normalmente esta técnica não é atrelada a aplicação de pressão externa e controle de temperatura para cura do material. Uma representação esquemática dessa técnica está apresentada na Fig. 3.

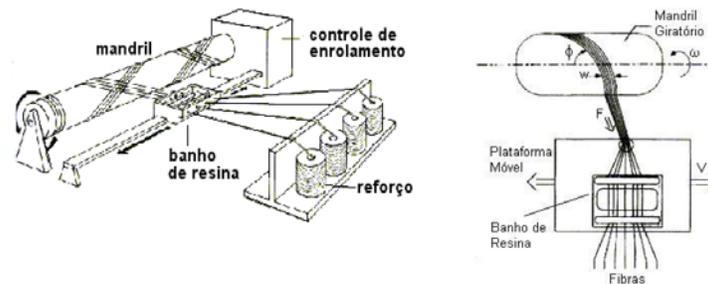


Figura 3 - Técnica de fabricação de dutos por filamento contínuo.

#### 4. Desenvolvimento do modelo numérico

Para o desenvolvimento do modelo numérico, foi utilizado o programa LS-Dyna v.970 e o pacote comercial Altair Hyperworks 7.0 para pré e pós-processamento. Como modelo de material, foi utilizado o material MAT54-55, denominado MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE, material largamente utilizado para simulações de materiais compostos. Este possibilita a utilização da Teoria Clássica da Laminação e considera dois critérios de falha possíveis para este.

Para a modelagem do espécime estudado, foram considerados elementos de casca que possibilitam a aplicação da Teoria Clássica da Laminação em sua formulação. Nestes foram definidas 10 camadas de 0,15 mm, contendo direções intercaladas de +55° e -55°. A espessura de camada considerada é indicada pela literatura em Schwartz (1984) para a técnica do filamento contínuo. O modelo desenvolvido está apresentado na Fig. 4.

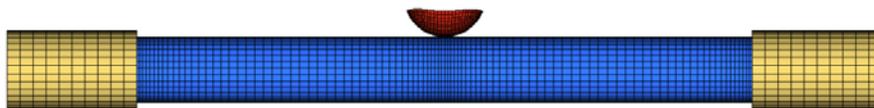


Figura 4 – Modelo numérico desenvolvido.

O modelo desenvolvido consiste em um tubo com as mesmas propriedades geométricas dos espécimes descritos no item 3, o identador e as fixações nas extremidades do tubo.

Objetivando maior compromisso com a realidade, não foram definidas condições de contorno para o tubo. Assim, foram desenvolvidas partes rígidas nas extremidades deste, representando a base fixadora deste junto ao martelo de impacto. Nota-se refino da malha na região de contato entre as partes do modelo.

Os elementos das extremidades têm limitações de deslocamento e rotações em todas as direções e são constituídos por elementos sólidos perfeitamente rígidos, com propriedades comuns de aço-carbono ABNT1020. Desse modo, as condições de contorno efetivas ao tubo são oriundas do contato entre este e as extremidades rígidas. Deve-se frisar que é necessário definir uma condição de contato entre estes elementos e, principalmente, o atrito entre as superfícies.

O indentador desenvolvido é constituído apenas pela extremidade do indentador real, sendo esta uma calota esférica de raio 12,5mm. Este elemento é constituído por elementos de casca perfeitamente rígidos com propriedades comuns de aço-carbono ABNT1020.

O modelo desenvolvido é utilizado para a simulação do primeiro impacto, não levando em consideração efeitos gravitacionais ou amortecimentos. Sob o indentador é aplicada a condição inicial de velocidade obtida nos ensaios experimentais. Quando necessário, será também aplicada pressão interna ao espécime estudado.

Para o modelo de material utilizado, são disponíveis os critérios de falha de Chang-Chang e Tsai-Wu. Nestes, há um parâmetro denominado  $\beta$  associado à participação da tensão de cisalhamento na falha da lâmina. Este parâmetro deve ser definido para cada condição de utilização. Neste caso a definição do modelo de falha e parâmetro  $\beta$  será realizada de modo interativo.

Os parâmetros utilizados para a definição do comportamento do material foram retirados da literatura e trabalhos recentes envolvendo estruturas de materiais compostos semelhantes.

Como o modelo desenvolvido é constituído por três partes, há a necessidade da definição das condições de contato entre elas. Estas condições de contato definem e as forças de contato entre as superfícies e força de atrito entre as partes. Para todas as partes, foram definidas as condições de contato do tipo SURFACE\_TO\_SURFACE, sendo as condições de contato definidas por superfícies que englobam os nós externos de cada parte. Além desta condição, por peculiaridade do evento simulado, há a possibilidade de contato entre partes diferentes do mesmo elemento, como, por exemplo, durante a dobra do espécime ao longo do impacto. Assim foi definida a condição de auto-contato (SINGLE\_SURFACE) para a superfície do tubo. Nas condições de contato, foram definidos os coeficientes de atrito estático de 0,3 e dinâmico de 0,25.

Para a minimização de efeitos oriundos de erros numéricos, houve a definição de um controle de erro numérico denominado Hourglass. Este erro é oriundo de problemas numéricos no cálculo da energia global do modelo e ocorreu principalmente em modelos pouco refinados. Para o controle deste erro, foi utilizada a técnica de Flanagan-Belytschko, sendo esta, segundo manual teórico do programa, mais eficaz e abrangente.

## 5. Resultados obtidos e comparações numérico-experimentais

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos das análises desenvolvidas no modelo numérico e nos ensaios experimentais. Será realizada também a comparação e discussão entre estes resultados. As análises desenvolvidas foram para determinar o comportamento mecânico do espécime ao impacto, os efeitos da velocidade de impacto e os efeitos da adição de pressão interna.

### 5.1. Comportamento mecânico do espécime

Para a simulação numérica do comportamento mecânico do espécime, foram consideradas as energias de impacto de 1J e 23J, sendo 0,64 m/s e 2,87 m/s as respectivas velocidades de impacto. Deve-se frisar que estas foram obtidas a partir de medições realizadas durante os ensaios experimentais. A massa de impacto em ambos os casos é de 5,41 Kg, e quando necessário, os ensaios foram repetidos até quatro vezes.

Na Fig. 5 é realizada a análise qualitativa do fenômeno de impacto de 23J realizado durante o ensaio experimental e a partir do modelo numérico. Nota-se a grande semelhança entre estas. No impacto de 23J, tanto nos ensaios experimentais e no modelo numérico, é claramente observada a formação de rotulas plásticas nas regiões de contato e engastamento.



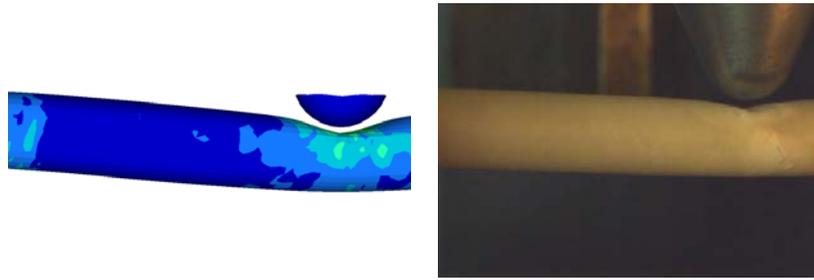


Figura 5 – Comparação qualitativa dos experimentos e modelo numérico.

Na Fig. 6a estão apresentados os perfis de velocidade durante o primeiro contato para o impacto de 1J, obtidos a partir do ensaio experimental e do modelo numérico. Neste, foram analisadas quatro condições de critérios de falha, sendo o critério de falha de Tsai-Wu com efeitos de cisalhamento o que apresentou resultados mais próximos dos resultados experimentais. Para este caso, o erro absoluto na estimativa da velocidade de residual do identador foi de 4,1%.

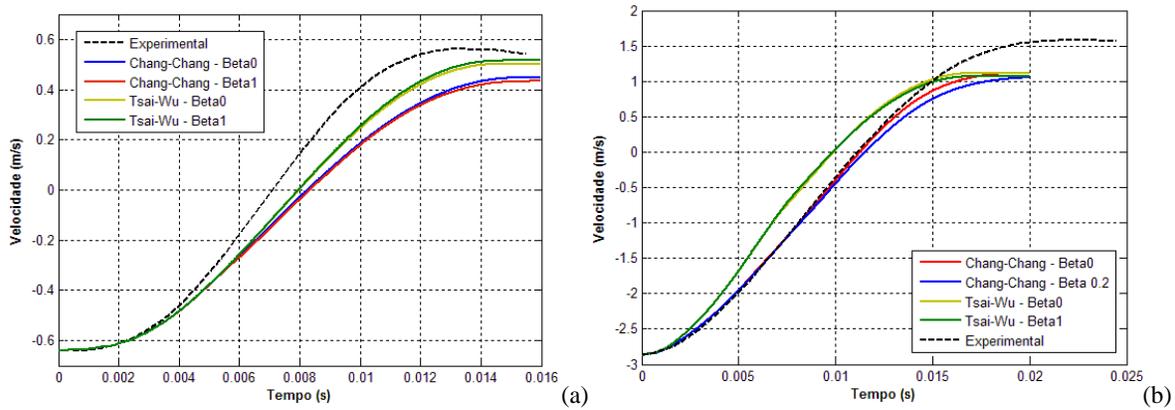


Figura 6 – Comparação numérico-experimental para impacto de 1J (a) e 23J (b).

Na Fig. 6b estão apresentados os perfis de velocidade durante o primeiro contato para o impacto de 23J, obtido a partir do ensaio experimental e do modelo numérico. Neste, foram analisadas quatro condições de critérios de falha, sendo o critério de falha de Tsai-Wu sem efeitos de cisalhamento o que apresentou resultados mais próximos de velocidade residual, no entanto o resultado obtido com o critério de Chang-Chang sem efeitos de cisalhamento apresentou um comportamento muito semelhante ao resultado experimental até 12,5 ms. No entanto, todos os critérios de falha apresentaram resultados de velocidade residual próximas, sendo de 10,3% o erro absoluto no cálculo desta com relação ao resultado obtido no ensaio experimental.

No impacto de 23J, por haver maior intensidade de falhas no modelo, os efeitos de cisalhamento acabaram sendo muito significativos nos resultados do modelo numérico, chegando a apresentar resultados não pertinentes com o observado nos ensaios experimentais, como o caso apresentado na Fig. 7. Observa-se neste a facilidade com que o tubo sofre cisalhamento, sendo este parcialmente penetrado pelo identador.

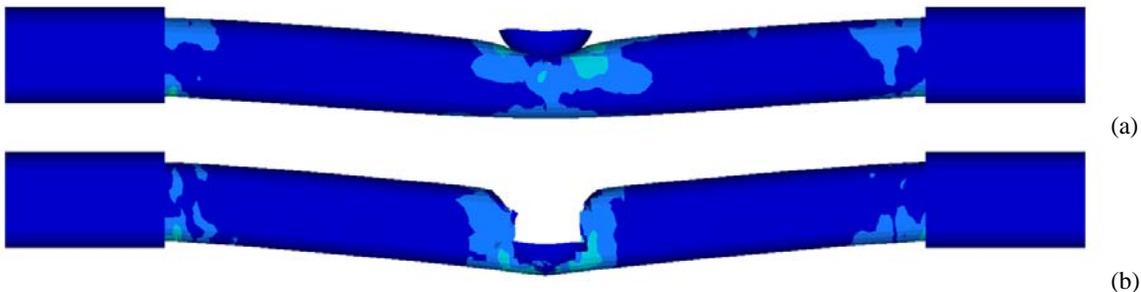


Figura 7 – Resultado no modelo numérico para o critério de falha de Tsai-Wu sem efeitos de cisalhamento (a) e com efeitos de cisalhamento (b).

O modelo desenvolvido apresentou resultados próximos aos resultados experimentais tanto para o impacto de 1J e 23 J. Em função da maior proximidade para o cálculo da velocidade residual para o impacto de 23J, o critério de falha

de Tsai-Wu sem efeitos de cisalhamento foi considerado como mais eficiente, sendo este utilizado para as análises seguintes. No entanto acredita-se que com um processo de caracterização do material e obtenção de alguns parâmetros, haverá uma melhor proximidade dos resultados, possivelmente com outros critérios de falha, como por exemplo, o critério de Chang-Chang sem efeitos de cisalhamento.

## 5.2. Efeitos de taxa de deformação

É sabido que um fator de grande importância para o estudo do fenômeno de impacto é o comportamento do material sob este regime, ou seja, a diferenciação do comportamento do material quando este é solicitado sob taxas de deformação fora do regime estático ou quase-estático. Segundo estudos anteriores do autor, em Santiago et al. (2007), foi observado que o material composto com fibra de vidro e resina epóxi é sensível à taxa de deformação. Neste estudo, o material apresentou um comportamento substancialmente diferenciado quando este foi solicitado sob regime quase-estático ou sob elevadas velocidades (ou altas taxas de deformação).

Para a identificação dos efeitos de taxa de deformação no experimento, foram realizados eventos de impacto com a mesma energia, porém com velocidades de impacto diferentes. Foram realizados impactos de 40 J com velocidades de 3,52 m/s e 2,49 m/s. Como critério de falha, foi considerado o critério de Tsai-Wu sem efeitos de cisalhamento.

Na Fig. 8 apresenta a relação força-deslocamento para os ensaios de impacto de 40J. Conforme esperado, o modelo numérico não considera efeitos de taxa de deformação, uma vez que o comportamento de ambas as curvas são praticamente semelhantes. Nesta, também se observa a semelhança entre os resultados numéricos e experimentais. Acredita-se que a diferença existente entre estes resultados seja minimizada com a caracterização mecânica do material do espécime.

A partir da análise dos resultados experimentais, observa-se a diferenciação do comportamento do material quando solicitado sob diferentes taxas de deformação, como indicado na literatura. No entanto, segundo Santiago et al. (2007), espera-se um aumento da rigidez do material quando a taxa de deformação deste é aumentada, no entanto, a Fig. 7 apresenta um comportamento oposto a este. Este fato não pode ser ocasionado por imprecisões no processo de medição, uma vez que sua variação é maior que a incerteza das medições de deslocamento e força, que são respectivamente 0,25mm e 50N. Além disso, observa-se a repetibilidade ocorrida no experimento.

Deve-se observar ainda que o nível de carga máxima suportada pelo tubo é semelhante, ou seja, a resistência do material permanece a mesma em ambas as taxa de deformação, o que não é esperado pela literatura e em Santiago et al. (2007). Segundo tais fontes, o aumento da taxas de deformação causa um aumento da tensão máxima suportada pelo material composto. Por outro lado, sabe-se que o efeito de taxa de deformação é pouco significativo para eventos de impacto de baixa velocidade, como o fenômeno aqui estudado.

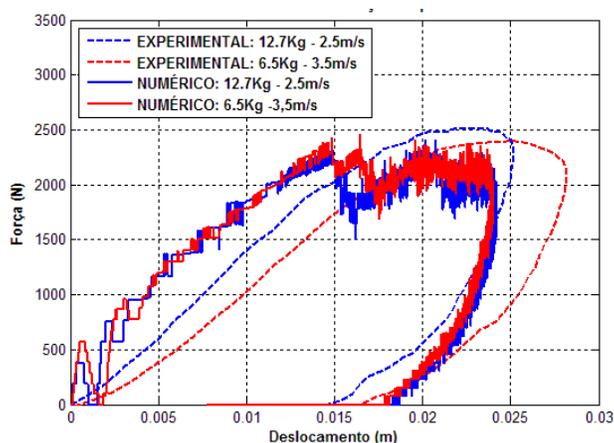


Figura 8 – Análise numérico-experimental da relação força-deslocamento para impacto de 40J.

Considerando o modelo numérico, observa-se uma variação do resultado maior do que a diferenciação obtida no ensaio experimental. Isso remete a concluir que esta diferenciação é pouco significativa para o ensaio realizado e confirma o fato de que os efeitos de taxa de deformação podem ser desconsiderados, em concordância com a literatura.

## 5.2. Efeitos da adição de pressão interna

Para a identificação do efeito da adição de pressão interna no modelo numérico, foi realizada a simulação numérica dos fenômenos de impacto de 5J. A massa de impacto foi definida como 5,41 Kg e velocidade de impacto de 1,3 m/s. Este evento de impacto foi simulado com dois níveis de pressão interna ao tubo, sendo estes de 0 lb/in<sup>2</sup> (sem pressão interna) e 80 lb/in<sup>2</sup> (0,8 MPa). Como critério de falha para o modelo numérico, foi considerado o critério de Tsai-Wu sem efeitos de cisalhamento. A comparação dos resultados numéricos e experimentais é apresentada na Fig. 9.

Qualitativamente, assim como nos ensaios experimentais, não foi possível identificar diferenciações nos ensaios com pressão interna e sem pressão interna. Possivelmente este fato se deve ao baixo nível de pressão interna submetido

ao espécime. Quantitativamente, observa-se um aumento discreto na velocidade residual do identador tanto nos ensaios experimentais quanto no modelo numérico. Este aumento foi de 7,9%, no ensaio experimental, e de 6,4%, no modelo numérico. Este fato remete uma grande proximidade dos resultados numérico e experimentais, podendo tal diferenciação ser ainda minimizada com a caracterização do material.

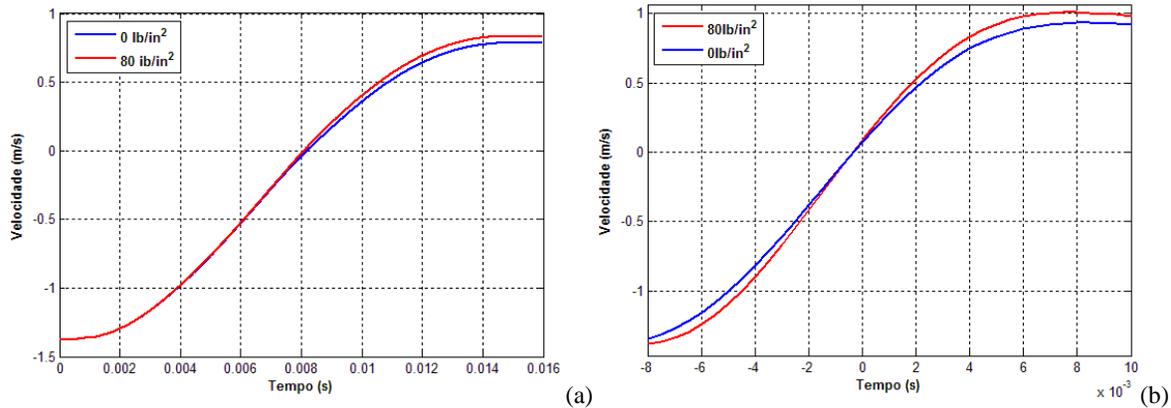


Figura 9 – Comparação dos resultados numéricos obtidos para o impacto com pressão interna (a) e resultados experimentais do evento (b).

### 5.3. Fenômeno de colapso estrutural causado pelo impacto em tubos pressurizados

A fim de identificar melhor os efeitos da adição de pressão interna, foi realizada a simulação numérica do fenômeno de colapso estrutural identificado por Kaneko et al. (2008). Segundo o autor, quando um vaso de pressão está submetido a um nível de pressão levemente menor que o máximo por este suportado e o mesmo é submetido a um impacto, este fato pode desencadear um colapso no elemento. Este fenômeno é de fundamental importância para a segurança de dutos submetidos a elevados níveis de pressão, uma vez que o impacto contra este pode, de algum modo, causar um dano estrutural e prejudicar a segurança do elemento. Deve-se frisar que para este fenômeno, as solicitações não causam o colapso quando ocorrem em separado. Assim, o nível de pressão interna submetido ao vaso de pressão, mesmo sendo elevado, é suportado pelo mesmo, e o fenômeno de impacto, quando ocorre sem a adição de pressão interna, não causa o colapso do vaso de pressão.

Para a realização da simulação deste fenômeno, foi inicialmente determinada a pressão de colapso do espécime, sendo realizadas sucessivas simulações numéricas do tubo sem impacto com o aumento gradual da pressão interna. Na Fig. 9 estão apresentadas as diversas simulações numéricas realizadas. Conforme apresentado, foi considerado 12,5 MPa como pressão de colapso para o espécime.

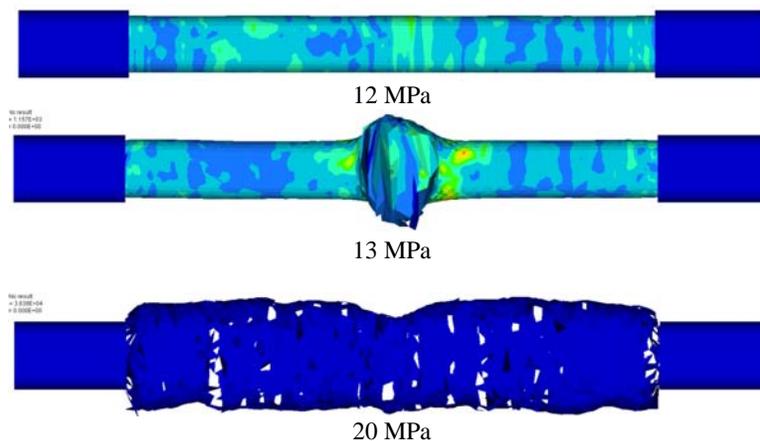


Figura 9 – Simulações numéricas realizadas para a definição da pressão de colapso.

Tendo definida a pressão de colapso do tubo, foi considerado um fenômeno de impacto de 40J contra um espécime com 10 MPa de pressão interna, ou seja, um nível de pressão levemente abaixo da pressão de colapso. O resultado deste evento está apresentado na Fig. 10, assim como o espécime apenas com a adição de pressão interna e apenas o evento de impacto.

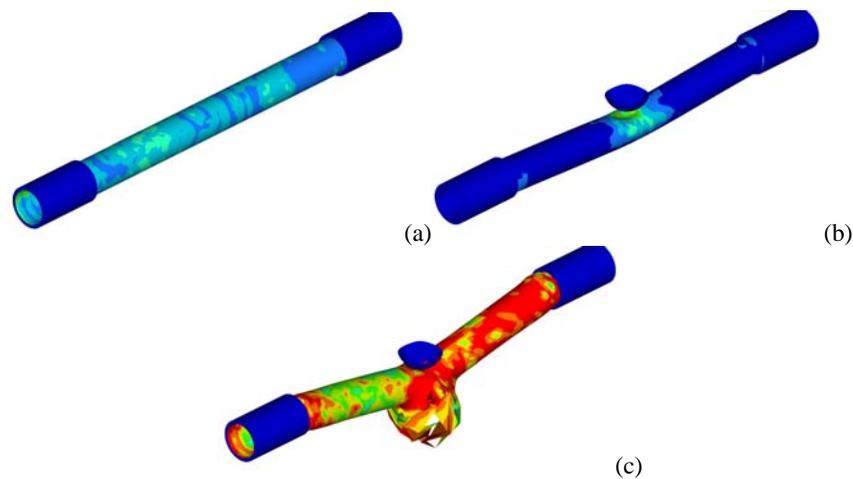


Figura 10 – Resultado da simulação numérica para avaliação do colapso estrutural. Tubo com 10 MPa de pressão interna, sem impacto (a). Tubo sem aplicação de pressão interna e impacto de 40 J (b) e tubo com pressão interna e impacto de 40J (c).

Conforme observado na Fig. 10, o tubo sofre o colapso estrutural após o impacto de 40 J quando o mesmo está submetido à pressão interna. Note que caso o tubo seja submetido apenas à pressão interna ou apenas ao impacto mecânico, não é observado o colapso. Desse modo, observa-se que a adição de pressão interna intensifica a falha do material, causando o colapso estrutural do duto, mesmo quando o mesmo é submetido a um nível de pressão menor que o máximo suportado por este.

Desse modo, o modelo de material desenvolvido, mostrou-se coerente com a realidade, sendo possível a representação do fenômeno aqui descrito e identificado em outros trabalhos.

## 6. Conclusões

Com o trabalho apresentado, pode-se concluir que:

- Foi desenvolvido um aprato para a realização de ensaios de impacto baseado na norma ASTM-D2444, sendo fabricado e instalado com sucesso, e estando este apto para o desenvolvimento dos ensaios experimentais.
- Uma série de sensores foi instalada junto ao experimento, apresentando um funcionamento satisfatório.
- Foi desenvolvido um modelo numérico do fenômeno de impacto analisado, utilizando o programa comercial LS-Dyna. Foram utilizados elementos de casca com a formulação da Teoria Clássica da Laminação e o modelo de material denominado MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE. Foram analisados diversos critérios de falha, sendo o que melhor representou o experimento foi o critério de Tsai-Wu sem efeitos de cisalhamento.
- Foi identificado o comportamento mecânico do espécime estudado durante o ensaio de impacto desenvolvido. Numericamente, foi observado um comportamento semelhante ao experimental, fornecendo erros de 4,1% a 10,5% na definição da velocidade residual do indentador.
- Os efeitos de taxa de deformações mostraram-se pouco evidentes no experimento desenvolvido assim como no modelo numérico, em concordância com a literatura a respeito de impacto de baixa velocidade.
- Por impossibilidades técnicas, praticamente não foi possível identificar os efeitos da adição de pressão interna ao tubo durante os experimentos. No entanto, numericamente foi possível representar o fenômeno de colapso estrutural quando o duto pressurizado é impactado.
- O modelo numérico desenvolvido mostrou-se válido, fornecendo resultados semelhantes aos obtidos nos ensaios experimentais, no entanto, quantitativamente o modelo ainda apresenta diferenciações dos resultados experimentais. Porém, acredita-se que tal diferenciação deva ser sanada com a devida caracterização do material considerado.

Como uma visão geral, o trabalho realizado possibilitou o desenvolvimento de uma metodologia numérica capaz de representar o fenômeno de impacto de queda de peso aqui analisado. Diversas etapas ainda devem ser desenvolvidas a fim de definir a aplicabilidade deste em outros modos de impacto e a acuracidade dos seus resultados, no entanto, o desenvolvimento aqui realizado, representa um início do desenvolvimento de uma metodologia numérica para a simulação de fenômenos de impacto contra estruturas de materiais compostos, possuindo nesta um embasamento experimental.

O estudo realizado possibilitou o desenvolvimento de etapas teóricas, numéricas e experimentais para o estudo proposto, possibilitando um grande aprendizado e crescimento para o autor.

## 5. Agradecimentos

A todo o Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas e a Agência Nacional de Petróleo (ANP) junto ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) com o Programa para Recursos Humanos (ANP/MCT-PRH-19) pelo apoio financeiro ao autor.

## 6. Referências

- Ávila, A., Soares, M. and Silva, A., 2005, “An experimental investigation on nanocomposites under impact loading”, *Impact Loading of Lightweight Structures*, Ed. WIT Press, Florianopolis, Brasil, pp.89-103.
- Callister, W. D., 2002, “Ciência e engenharia de materiais: uma introdução”, Ed. LTC- Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 5a ed., p. 589.
- Kaneko, T., Sadayuki, U., Hidetoshi, Y., Shusuke, I. “Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transverse impact loading”. *Thin-Walled Structures*, vol. 46, 2008, p. 898-904.
- Mendonça, P. T., 2005, “Materiais compostos & estruturas sanduíche”, Ed. Manole, Barueri, Brasil, 1ª Ed, 625p.
- Mesquita, T. L., 2002, “Propagação de colapso em dutos submarinos”, *Boletim Técnico da Petrobrás*, Rio de Janeiro, Brasil, vol. 45, pp. 177-215.
- Santiago, R. C.; Azevedo, R.; Alves, M., 2007, “Mechanical characterization of a glass/epoxy composite material with nanoclays”. In: *19o International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília. Anais do congresso.
- Schwartz, M. M., 1984, “Composite materials handbook”, Ed. McGraw-Hill, Nova York, 1a ed., 651 p.
- Zanata, D., 2007, “Estudo experimental de impacto lateral em tubos pressurizados”, *Relatório de Iniciação Científica*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p.49.

## 7. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# LATERAL IMPACT ON GLASS/EPOXY COMPOSITE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

## Rafael Celeghini Santiago

Polytechnical School of University of São Paulo  
Group of Solids Mechanical and Structural Impact  
rafael.celeghini@gmail.com

**Abstract:** *This work presents the study of the impact phenomena against glass/epoxy composite pipes, using numerical and experimental methods. The main propose of the study is to analyze the mechanical behavior of composite material under the impact, as well as the development of a numerical method to represent the impact phenomena. The equipment to develop the falling weight tests on the specimens has been build using the hammer impact installed on Group of Solids Mechanical and Structural Impact. A numerical model has been developed on LS-Dyna finite element code. The experimental tests were compared to the numerical models, providing similar results. The numerical model could represent the structural collapse of a pressurized pipe during a lateral impact.*

**Keywords:** *Impact, composite materials, falling weight, glass/epoxy, filament winding, finite element method*