

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

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

Rafael Celeghini Santiago

**São Paulo
2008**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

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

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica de Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia.

Rafael Celeghini Santiago

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Alves

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Santiago, Rafael Celeghini
Impacto lateral em tubos pressurizados de materiais compósitos com fibra de vidro e resina epóxi
/ R.C. Santiago. -- São Paulo, 2008. p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Estruturas (Impacto) 2.Materiais compósitos 3.Método dos elementos finitos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares Roberto, Inês e Mariana, pelo apoio sempre presente durante todos os momentos e escolhas de minha graduação. Sem o apoio destes, tudo seria muito mais difícil ou até mesmo impossível. Agradeço ao apoio e paciência de minha namorada, Danielle, também sempre presente e compreensiva. Ao professor Marcílio Alves, pelo crescimento ético e profissional desenvolvido ao longo destes quatro anos de trabalho. Ao apoio e atenção da professora Larissa Dremeier, do professor Ricardo Azevedo, do professor Hernani Brinatti e do pesquisador Jairson de Lima.

Aos amigos Lino Umberto Marques Júnior, Francisco Profito, Rafael Cavalcanti e João Dozzi e Giovani Amanti pelas inúmeras aventuras acadêmicas. Aos amigos do Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas (GMSIE): André Saikai, Rafael Moura, Renato Ramires, Renato Yamasaki, Thiago Traue, Roberto Oshiro e Giancarlo Barbosa.

Pelo apoio da empresa Galvanoplastia União e Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), e pelo apoio técnico de Fidel Vicente de Paula, Renato Yamasaki e Nelson da Silva.

Pelos conselhos de Marcos Ceze e Marcos Rabelo.

Agradeço a Agencia Nacional de Petróleo (ANP), ao Ministério de Minas e Energia (MME) e ai Ministério de Ciências e Tecnologia (MCT) pelo apoio financeiro através do Programa de Recursos Humanos número 19 (PRH-19), fundamental para o desenvolvimento deste projeto.

Errar é humano, mas para fazer uma
grande besteira, basta usar o
computador.

(Autor desconhecido).

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. Foi desenvolvido um aparto 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 mo ensaio experimental e do modelo numérico foram realizados com sucesso. O modelo numérico apresentou resultados qualitativamente e qualitativamente semelhantes aos ensaios experimentais. Numericamente, foi possível identificar o fenômeno de colapso de um duto pressurizado, quando submetido ao impacto lateral.

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 propose a 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 using finite element method on LS-Dyna v.970. 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.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Acidente da Cidade do México com dutos de gás liquefeito de petróleo..... | 20 |
| Figura 2 - A esquerda, plataforma P-40, semelhante à plataforma P-17, e a direita, riser fabricado em fibra de carbono..... | 21 |
| Figura 3 - O Martelo de impacto..... | 25 |
| Figura 4 - Exemplos de experimentos realizados com o martelo de impacto..... | 25 |
| Figura 5 - Exemplo de equipamento proposto para o ensaio de queda de peso..... | 27 |
| Figura 6 - Secção de revolução para a geometria do identador..... | 28 |
| Figura 7 - Esboço da solução 2..... | 30 |
| Figura 8 - Esboço da solução3..... | 31 |
| Figura 9 - Imagens do equipamento desenvolvido para impacto por queda de peso..... | 32 |
| Figura 10 – O identador..... | 33 |
| Figura 11 – As massas de impacto..... | 33 |
| Figura 12 – O extensor..... | 34 |
| Figura 13 – O suporte horizontal..... | 34 |
| Figura 14 – O engate..... | 35 |
| Figura 15 – O guia..... | 35 |
| Figura 16 - Elementos de fixação do equipamento desenvolvido..... | 36 |
| Figura 17 - Processo de têmpera do identador..... | 39 |
| Figura 18 - Equipamento desenvolvido instalado no martelo de impacto..... | 40 |
| Figura 19 - Elemento para fixação e pressurização de tubos..... | 41 |
| Figura 20 – Espigão instalado na base para fixação e pressurização de tubos..... | 42 |
| Figura 21 - Base para a fixação e pressurização de tubos pronta para a realização de ensaios..... | 42 |
| Figura 22 - Elementos do martelo de impacto..... | 43 |
| Figura 23 - Base para a fixação e pressurização de tubos..... | 44 |
| Figura 24 - Compressor volumétrico de ar utilizado para os ensaios e sistema de regulação de pressão..... | 45 |
| Figura 25 - Sensor de velocidade a laser Polytec OFV-323, à direita, e controlador OFV3020, à esquerda..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 - Velocidade de queda do identador..... | 47 |
| Figura 27 - Deslocamento do elemento impactante..... | 48 |
| Figura 28 – Aceletação do identador, à esquerda, e força aplicada no mesmo, à direita. | 49 |
| Figura 29 - Espectro de freqüência do sinal obtido do sensor de velocidade..... | 50 |
| Figura 30 - Sinal obtido com e sem filtro passa-baixa de 100 Hz. | 51 |
| Figura 31 - Fluxograma dos equipamentos utilizados para a medição da velocidade de queda do identador..... | 52 |
| Figura 32 - Célula de carga PCB 200C02 fixada junto ao equipamento de ensaio de queda de peso. | 53 |
| Figura 33 - Câmera de alta velocidade..... | 54 |
| Figura 34 - Sensor de posição apalpador LE-25. | 55 |
| Figura 35 - Medições da velocidade durante a queda do elemento..... | 56 |
| Figura 36 - Resultados obtidos para o deslocamento durante a queda do elemento. | 57 |
| Figura 37 - Resultados obtidos para aceleração durante a queda do elemento..... | 58 |
| Figura 38 - Dinâmica do identador no instante anterior (a) e posterior (b) ao impacto..... | 59 |
| Figura 39 - Absorção percentual da energia de impacto ao longo dos sucessivos contatos entre do tubo e o identador. | 60 |
| Figura 40 - Resultados obtidos com o ensaio com a célula de carga. | 61 |
| Figura 41 - Perfil da deformada do tubo após o impacto..... | 62 |
| Figura 42 - Sequencia qualitativa dos danos ao tubo após o impacto. | 63 |
| Figura 43 - Deformação de um laminado no plano xz (Mendonça, 2005). | 67 |
| Figura 44 - Representação esquemática do laminado (Mendonça, 2005). | 69 |
| Figura 45 - Exemplo de tubos fabricado pela Ameron Inc..... | 71 |
| Figura 46 - Técnica de fabricação de dutos por filamento contínuo..... | 72 |
| Figura 47 - Perfil do tubo ensaiado após o térmido do experimento realizado sob impacto de 1,5 J; 23..... | 74 |
| Figura 48 - Perfil do tubo ensaiado após o término do experimento realizado, sob impacto de 1,5 J, 23 J e 68 J. | 74 |
| Figura 49 - Espécimes após o ensaio de caracterização do comportamento mecânico. Vista superior (a) e vista lateral (b). | 75 |

| | |
|--|-----|
| Figura 50 - Perfil de deslocamento do identador durante o primeiro impacto para impacto de 5J (a) e 49J (b)..... | 76 |
| Figura 51 - Perfil de velocidade do identador durante o primeiro impacto para impacto de 5J (a) e 49J (b)..... | 77 |
| Figura 52 – Observação dos locais de vazamento de fluido durante o impacto..... | 78 |
| Figura 53 – Comportamento do espécime sob duas taxas de deformação distintas..... | 80 |
| Figura 54 - Resultado experimental, à esquerda, e numérico, à direita (Tasdermirci, et al., 2006)..... | 84 |
| Figura 55 - Exemplo de simulação numérica desenvolvida..... | 86 |
| Figura 56 – Geometria desenvolvida para o modelo numérico (a) e (b), e experimento real (c)..... | 88 |
| Figura 57 – Definição da direção principal do elemento sólido (Livermore Software Technology Corporation, 2003)..... | 90 |
| Figura 58 – Resultados da simulação utilizando elementos sólidos e MAT59. Um exemplo de erros numérico (a) e detalhe da utilização de elementos sólidos (b)..... | 90 |
| Figura 59 – Representação esquemática das camadas do composto utilizado no elemento de casca..... | 91 |
| Figura 60 – Modelo desenvolvido utilizando MAT22 e elementos de casca (a). Exemplo de instabilidade obtida após a falha de um elemento (b)..... | 92 |
| Figura 61 – Modelo desenvolvido utilizado MAT54-55 e elementos de casca..... | 93 |
| Figura 62 – Malha desenvolvida para o espécime estudado..... | 94 |
| Figura 63 – Comparação qualitativa dos resultados numérico-experimentais para o impacto de 23J..... | 100 |
| Figura 64 – Comparação numérico-experimental do impacto de 1J..... | 101 |
| Figura 65 - Comparação numérico-experimental do impacto de 23J..... | 102 |
| Figura 66 – Resultado obtido para a simulação de impacto de 23J, com critério de falha de Chang-Chang, considerando efeitos de cisalhamento..... | 102 |
| Figura 67 – Relação força-deslocamento para identificação dos efeitos de taxa de deformação..... | 103 |
| Figura 68 – Análise numérico-experimental da relação força-deslocamento. | 104 |
| Figura 69 - Comparação dos resultados numéricos obtidos para o evento com pressão interna (a) e resultados experimentais do evento (b)..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 70 – Simulações numéricas realizadas para a definição da pressão de colapso..... | 107 |
| Figura 71 – Resultado da simulação numérica para definição do efeito de 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)..... | 108 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Parâmetros definidos para a implementação ao martelo de impacto..... | 28 |
| Tabela 2 - Materiais escolhidos para cada elemento do equipamento desenvlido..... | 37 |
| Tabela 3 - Massa de cada elemento do equipamento (configuração mínima). | 41 |
| Tabela 4 - Especificações técnicas da placa de aquisição PCI-6110 e conecções BNC-2110..... | 45 |
| Tabela 5 - Especificações técnicas do sensor de velocidade OFV-323 e controlador OFV-3020 (Polytec Deutschland, 2002)..... | 47 |
| Tabela 6 - Especificações técnicas do filtro FE-301 SF (Flyde Eletronic Laboratories Ltd.)..... | 50 |
| Tabela 7 - Especificações técnicas do amplificador FE-351-UA (Flyde Eletronic Laboratories Ltd.)..... | 52 |
| Tabela 8 - Fator de escala resultante com a utilização do amplificador..... | 52 |
| Tabela 9 - Especificações técnicas da celula de carga PCB 200C20(PCB Piezotronics - Force/Torque division, 2004)..... | 53 |
| Tabela 10 - Especificações técnicas da câmera Fastcam-APX RS (Photron USA Inc., 2005)..... | 54 |
| Tabela 11 - Especificações técnicas do sensor apalpador LE-25 (Solartron Metrology)..... | 54 |
| Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos de velocidade..... | 56 |
| Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos de deslocamento. | 57 |
| Tabela 14 - Medições realizadas com o sensor LE-25..... | 62 |
| Tabela 15 – Especificações do tubo a ser ensaiado. | 71 |
| Tabela 16 - Análise qualitativa do comportamento mecânico do tubo ensaiado sob diferentes cargas de impacto..... | 73 |
| Tabela 17 - Alguns modelos de materiais aplicados a materiais compostos..... | 87 |
| Tabela 18 – Parâmetros do material utilizados no modelo numérico..... | 96 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|-------------------------------|
| V | Velocidade |
| V_0 | Velocidade inicial |
| a | Aceleração |
| t | Tempo |
| s | Deslocamento |
| F | Força |
| m | Massa |
| E_{cin} | Energia cinética |
| E_{pot} | Energia potencial |
| E_{imp} | Energia de impacto |
| $E_{imp,tot}$ | Energia de impacto total |
| g | Aceleração da gravidade local |
| h | Altura de queda |
| h_{ref} | Altura de referência |
| v_1 | Velocidade de impacto |
| v_2 | Velocidade residual |
| h_l | Altura de impacto |
| v_2 | Altura residual |
| u,v,w | Deslocamentos do laminado |
| u^o, v^o | Deslocamento de membrana |
| ψ | Distorção |

| | |
|---|---|
| $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ | Deformações |
| $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ | Distorções |
| $\varepsilon_x^o, \varepsilon_y^o, \gamma_{xy}^o$ | Deformações e distorções de membrana |
| $k, k_x, k_y, k_z,$ | Curvatura |
| $[\bar{Q}]$ | Matriz de rigidez |
| σ_x, σ_y | Tensões normais |
| τ_{xy} | Tensões de cisalhamento |
| N_x, N_y, N_z | Solicitações normais no laminado |
| M_x, M_y, M_z | Solicitações de flexão no laminado |
| H | Espessura do laminado |
| N | Número de laminas do laminado |
| θ | Direção das fibras |
| [A] | Matriz de rigidez extensional |
| [B] | Matriz de rigidez de acoplamento |
| [D] | Matriz de rigidez à flexão |
| E_l ou E_a | Módulo de elasticidade da lâmina unidirecional |
| E_b | Módulo de elasticidade na direção ortogonal às fibras |
| ν_l ou ν_{ab}, ν_{ba} | Coeficiente de Poisson da lâmina unidirecional |
| G_l ou G_{ab} | Módulo de cisalhamento de lâmina unidirecional |
| σ_{aa} | Tensão na direção das fibras |
| σ_{bb} | Tensão na direção ortogonal às fibras |
| σ_{ab} | Tensão de cisalhamento no laminado |

| | |
|-----------|---|
| X_t | Resistência à tração na direção das fibras |
| X_c | Resistência à compressão na direção das fibras |
| Y_t | Resistência à tração na direção ortogonal às fibras |
| Y_c | Resistência à compressão na direção ortogonal às fibras |
| S_c | Resistência ao cisalhamento do laminado |
| $S_{c,m}$ | Resistência ao cisalhamento da matriz |
| β | Coeficiente de cisalhamento |
| e | Coeficiente de falha |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 | A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPOSTOS NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL..... | 20 |
| 1.2 | OBJETIVO DO TRABALHO..... | 23 |
| 2 | DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE IMPACTO | 24 |
| 2.1 | O MARTELO DE IMPACTO..... | 24 |
| 2.2 | ANÁLISE DAS NORMAS TÉCNICAS REFERENTE AO EXPERIMENTO | 27 |
| 2.3 | DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA O ENSAIO DE QUEDA DE PESO..... | 29 |
| 2.3.1 | Escolha da configuração do equipamento de impacto | 29 |
| 2.3.2 | Projeto do equipamento para ensaios de impacto..... | 32 |
| 2.3.3 | Fabricação do equipamento para ensaios de impacto | 38 |
| 2.3.4 | Modificação no aparato experimental existente | 41 |
| 2.4 | DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL | 42 |
| 2.4.1 | O martelo de impacto..... | 42 |
| 2.4.2 | Elemento impactante | 43 |
| 2.4.3 | Base para a fixação e pressurização de tubos | 44 |
| 2.4.4 | Sistema de pressurização | 44 |
| 2.4.5 | Sistema de aquisição de sinais | 45 |
| 2.4.6 | Sensor de velocidade | 46 |
| 2.4.7 | Amplificador de sinais | 51 |
| 2.4.8 | Célula de carga..... | 53 |
| 2.4.9 | Câmera de alta velocidade | 53 |
| 2.4.10 | Sensor apalpador | 54 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5 | REALIZAÇÃO DE ENSAIOS PRELIMINARES | 55 |
| 2.5.1 | Ensaios com o sensor de velocidade | 55 |
| 2.5.2 | Ensaios com a célula de carga | 60 |
| 2.5.3 | Ensaio com o sensor apalpador | 61 |
| 2.5.4 | Ensaio de vazamento do sistema pneumático | 62 |
| 2.5.5 | Desenvolvimento de ensaios qualitativos..... | 63 |
| 2.6 | DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 64 |
| 3 | OS MATERIAIS COMPOSTOS..... | 65 |
| 3.1 | OS MATERIAIS COMPOSTOS | 65 |
| 3.2 | TEORIA CLASSICA DA LAMINAÇÃO..... | 66 |
| 3.3 | DEFINIÇÃO DO MATERIAL A SER ENSAIADO..... | 70 |
| 4 | RESULTADO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS | 73 |
| 4.1 | COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ESPÉCIME..... | 73 |
| 4.2 | EFEITO DA ADIÇÃO DE PRESSÃO INTERNA | 75 |
| 4.3 | EFEITO DA VELOCIDADE DE IMPACTO | 79 |
| 5 | DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE NUMÉRICA..... | 82 |
| 5.1 | O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 82 |
| 5.2 | UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM MATERIAIS COMPOSTOS | 83 |
| 5.3 | DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO | 85 |
| 5.3.1 | Definição da malha do modelo numérico..... | 87 |
| 5.3.2 | Desenvolvimento do primeiro modelo numérico: MAT59 e elementos sólidos..... | 89 |
| 5.3.3 | Desenvolvimento do segundo modelo numérico: MAT22 e elementos de casca. | 91 |
| 5.3.4 | Desenvolvimento do terceiro modelo numérico: MAT54-55 e elementos de casca. | 92 |
| 5.3.5 | Detalhamento do modelo do modelo numérico utilizado..... | 93 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES | 98 |
| 6.1 | COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ESPÉCIME..... | 98 |
| 6.2 | EFEITOS DE VELOCIDADE DE IMPACTO | 103 |
| 6.3 | EFEITOS DA ADIÇÃO DE PRESSÃO INTERNA | 105 |
| 6.3.1 | Fenômeno de colapso estrutural causado pela adição de pressão interna..... | 106 |
| 7 | CONCLUSÃO..... | 110 |
| 7.1 | POSSIBILIDADES PARA CONSECUÇÃO..... | 111 |
| | REFERÊNCIAS..... | 112 |
| | APENDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO ELEMENTO IMPACTANTE | 116 |

1 INTRODUÇÃO

A opção recentemente escolhida pelo Brasil para o desenvolvimento da economia é o investimento em infra-estrutura a fim de se propiciar um ambiente favorável ao recebimento de investimentos e indústrias oriundos do exterior. Apresentado no início de 2007, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) é um conjunto de medidas que visa garantir tais elementos, investido na recuperação da infra-estrutura existente, como ferrovias, rodovias e setor energético; e viabilizando novos empreendimentos, como investimento externo e a instalação de empresas, gerando retornos econômicos e sociais para o país.

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. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2006, observa-se que de 1996 a 2005 houve a quadriplicação no consumo total de gás natural no país, tal fato deve-se principalmente a proliferação do uso deste em indústrias, termoelétricas e pelo setor de transportes.

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 perda de recursos ambientais, humanos e econômicos, sendo a causa destes muitas vezes ligadas a falhas e rompimentos nos sistemas dutoviários. Segundo (CETESB/SP, 2007), um exemplo desses catastróficos acontecimentos ocorreu em 1984 na Cidade do México, apresentado na Figura 1. Na madrugada do dia 19 de novembro houve o vazamento de 11.000m³ de gás liquefeito de petróleo (GLP) armazenados na empresa Pemex. O gás vazou por cerca de 5 a 10 min acarretando a ocorrência de sucessivas explosões e formações de “bleves”¹. A origem do incidente foi identificada numa ruptura de uma tubulação que transportava

¹ *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* - Fenômeno decorrente da explosão catastrófica de um reservatório, quando um líquido nele contido atinge uma temperatura bem acima da sua temperatura de ebulação.

o gás entre reservatórios desta empresa. Os trabalhos de extinção das chamas levaram cerca de 17 horas, resultando na morte de 650 pessoas e mais de 6.000 feridos.



Figura 1 - Acidente da Cidade do México com dutos de gás liquefeito de petróleo.

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, pode ocorrer a propagação de tal falha. Tal fato está diretamente relacionado 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, pressão comumente submetida a tais tubulações. Propagando-se a falha e atingindo um tamanho crítico, o duto pode falhar causando o vazamento do fluido ou mesmo explosão.

Considerando os fatos acima e objetivando contextualizar este projeto de pesquisa, durante o período de 2002 a 2008, o Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas desenvolveu diversos equipamentos para a realização de ensaios de impacto sob diferentes velocidades e energias. Entre os equipamento, o grupo desenvolveu um martelo de impacto que possibilita a realização de impacto por queda de peso com até 20KJ de energia.

1.1 A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPOSTOS NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

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, Figura 2, 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 2 - A esquerda, plataforma P-40, semelhante à plataforma P-17, e a direita, riser fabricado em fibra de carbono.

Desse modo, o estudo de materiais compostos é de fundamental importância para a indústria de petróleo e gás natural, uma vez que a utilização destes vem crescendo vertiginosamente desde o início do seu desenvolvimento, durante a Segunda Guerra Mundial. A utilização de materiais composto é motivada, entre outros motivos, por sua:

- *Elevada resistência à corrosão e abrasão*, uma vez que este tipo de material é facilmente oxidado e pode apresentar elevada dureza superficial.
- *Elevada relação resistência-peso*, possibilitando desenvolver estruturas e componentes com elevada resistência mecânica, atribuída de um peso estrutural reduzido.
- *Elevada resistência à fadiga*, praticamente infinita.
- *Facilidade de manutenção e reparação*.

Em julho de 2007, houve o contato telefônico com o Dr. César Del Véccio, engenheiro responsável pelo setor de materiais compostos e não-metálicos da Petrobrás. 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 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.

Uma tubulação de material composto utilizada pela PETROBRAS está instalada no nordeste do país e em algumas plataformas da Bacia de Campos – RJ. Estes são fabricadas pela técnica de filamento contínuo e constituídas por fibra de vidro e resina epóxi. Tais componentes são fabricados pelas empresas Fiberbond e Ameron Composite Pipes. Os diâmetros utilizados são de 75 mm e seu nível de pressão interna está na ordem de 7 a 10 Bar.

No segundo semestre de 2008, foram identificados na Bacia de Santos, no sudeste brasileiro, poços de petróleo situados abaixo da camada de sal do subsolo marinho. Estes poços encontram-se a uma profundidade de até 7000m abaixo do nível do mar. Desse modo, a extração e produção petrolífera destes constituem-se como grandes desafios tecnológicos sendo também objetivada a utilização de dutos de materiais compostos em função do grande nível de pressão submetida a tais tubulações. Outra característica fundamental para a tubulação a ser utilizada é a resistência a corrosão destas, uma vez que se almeja a utilização sistemas de injeção de água e gás carbônico como estímulo a tais poços. Nota-se que na mistura de água com gás carbônico há a formação do ácido carbônico, altamente corrosivo para materiais metálicos.

Em setembro de 2008, ocorreu na cidade do Rio de Janeiro a maior feira da América Latina para o setor de petróleo e gás, denominada Rio Oil&Gas. Em função da crescente demanda por dutos de materiais compostos por este setor, foi observada a recente instalação de diversas indústrias produtoras de dutos de materiais compostos no Brasil, entre elas encontram-se as multinacionais NOV Fiber Glass Systens L.P. e Ameron Fiberglass-Composite Pipe, e as nacionais, Interfibra e LevFort Fibrasynthetica do Brasil.

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

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Tendo em vista o tema apresentado anteriormente, esse trabalho tem como objetivo o estudo do fenômeno de impacto contra tubos de fibra de vidro com resina epóxi submetidos a cargas de impacto lateral.

Para este estudo será abordada uma análise numérico-experimental. Serão realizados ensaios de queda de peso contra tais estruturas utilizando o martelo de impacto desenvolvido pelo Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas. Os resultados obtidos em tais experimentos serão confrontados com o resultado proveniente das simulações numéricas do fenômeno em questão.

Este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa junto ao Programa para Recursos Humanos, PRH-19, da Agência Nacional de Petróleo, ANP, e Ministério da Ciência e Tecnologia, possibilitando o apoio financeiro ao autor durante o seu desenvolvimento.

Este relatório apresenta o desenvolvimento trabalho proposto, sendo apresentado o projeto do aparato experimental de queda de peso, descrição do material a ser estudado, desenvolvimento dos ensaios experimentais e início do processo de simulação numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos.

2 DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE IMPACTO

Nesta seção serão apresentados os métodos utilizados para a realização do ensaio experimental de queda de peso contra tubos de fibra de vidro, assim como a apresentação de alguns resultados preliminares até então obtidos.

Será apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do equipamento, seu projeto e fabricação. O material a ser ensaiado será devidamente especificado e por fim serão apresentados os ensaios preliminares realizados.

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 20 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. Na Figura 3 e Figura 4 está apresentado o equipamento referenciado, assim como exemplo de trabalhos neste desenvolvidos. Maiores detalhes a respeito do martelo de impacto serão apresentados no item 2.4.1



Figura 3 - O Martelo de impacto.

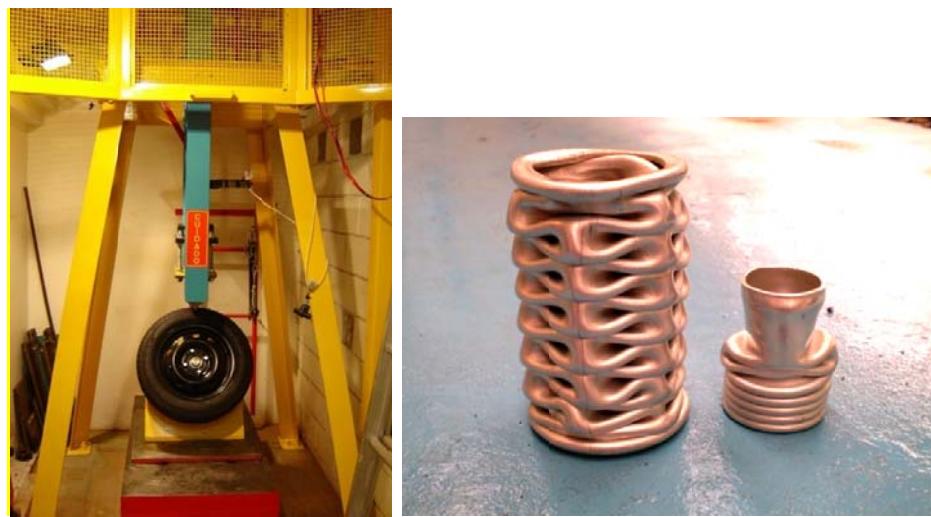


Figura 4 - Exemplos de experimentos realizados com o martelo de impacto.

O equipamento consiste em dois trilhos verticais, uma base rígida para fixação do elemento estudado, um elemento impactante constituído por um conjunto de massa fixa a um identador² e uma garra para o lançamento e posicionamento da massa.

Com elemento integrante do martelo de impacto, há um dispositivo também desenvolvido pelo grupo de pesquisa, desenvolvido em (Zanata, 2007), para a fixação de tubos junto ao martelo de impacto, 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. Este equipamento será utilizado para a fixação dos tubos de materiais compostos para os ensaios de impacto almejados.

No entanto, 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 em para a estrutura analisada, não possibilitando um estudo consistente de impacto sob a mesma. Nesta configuração, por exemplo, não seria possível a utilização de configurações de massa menores com maiores alturas de queda, a fim de manter constante a quantidade de energia de impacto. Isso se deve ao fato de o equipamento utilizado para o estudo é freqüentemente utilizado para o estudo de impacto evolvendo maiores magnitudes de energia do que a necessária para o estudo proposto.

Em contatos do autor com diferentes pesquisadores e profissionais da área de materiais compostos, foi observado que, para estudos de impacto em materiais compostos, freqüentemente são utilizados menores condições de energia, em um ensaio denominando Ensaio de Queda de Peso (ou “*Falling Weight Test*”), com características semelhantes ao martelo de impacto, porém envolvendo menores massas impactantes. Objetivou-se, portanto, a desenvolvimento de um equipamento similar ao ensaio de Queda de Peso para impactos com baixa energia podendo este consistir em uma adaptação ao martelo de impacto.

² Elemento que entra em contato com o espécime estudado.

2.2 ANÁLISE DAS NORMAS TÉCNICAS REFERENTE AO EXPERIMENTO

Para o estudo das normas técnicas referentes ao ensaio objetivado, foi utilizado o trabalho de (Ávila, et al., 2005), no qual são realizados diversos ensaios de queda de peso contra chapas de materiais compostos. Foi lançado mão das normas ASTM-D5628 e ASTM-D2444, para ensaios de impacto sob queda de peso em chapas e tubos, respectivamente. Na Figura 5, está apresentado um exemplo que um equipamento de queda peso proposto pela norma.

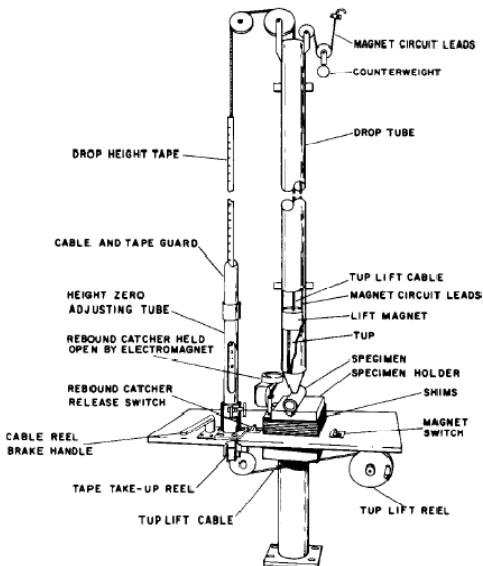


Figura 5 - Exemplo de equipamento proposto para o ensaio de queda de peso.

O objetivo em utilizar tais normas consiste em obter parâmetros para o desenvolvimento do equipamento de impacto. Não se objetiva, portanto, a certificação do experimento. Com o estudo detalhado das normas técnica, foram tomados os seguintes parâmetros relevantes para o projeto da modificação proposta:

- Altura máxima de queda: 3,7 m.
- Massa de impacto propostas: 2,7 Kg; 5,4 Kg; 9,1 Kg; e 13,6 Kg (respectivamente 6 lb, 12 lb, 20 lb e 30 lb).
- A norma propõe três diferentes geometrias para o identador.

Observa-se que a altura de queda proposta pela norma é satisfeita pela altura de queda disponível no martelo de impacto. Por simplificações no processo de fabricação e facilitação nas combinações entre altura de queda e massa impactante optou-se em utilizar massas de queda de 3 a 14 kg, variando-as em unidades de 0,5 kg e 1 kg. A geometria do espécime escolhida para o indentador em função da simplicidade geométrica está apresentada na Figura 6. Os parâmetros definidos para o aparto a ser desenvolvido estão sintetizados na Tabela 1.

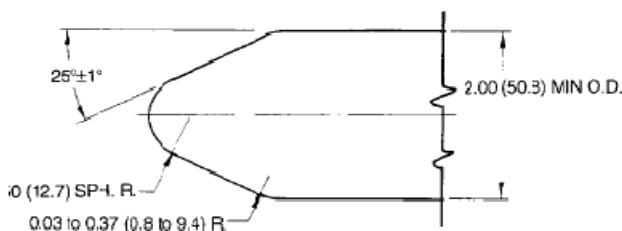


Figura 6 - Secção de revolução para a geometria do indentador.

Tabela 1 - Parâmetros definidos para a implementação ao martelo de impacto.

| | |
|-------------------------|--|
| Altura máxima de queda | Máximo de 6 m |
| Massa de impacto | De 3 Kg a 14 Kg variando em unidade de 0,5 Kg e 1 Kg |
| Geometria do indentador | Apresentada na Figura 6 |

Deve-se frisar também que a norma alerta para a repetição do experimento, uma vez que os resultados obtidos após o impacto são estocásticos e freqüentemente podem apresentar variações mesmo quando realizados sob mesmas condições. Nota-se que este fato tende a se tornar mais intenso quando se trabalha com materiais compostos em função de heterogeneidades internas ao material (com a existência de matriz e fibras internamente) e mesmo diferenciações existentes entre os espécimes. A solução proposta pela norma é a repetição dos experimentos a fim de se obter um comportamento médio do evento, fato que deve ser levado em consideração nos experimentos a serem realizados.

2.3 DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA O ENSAIO DE QUEDA DE PESO

Neste item será apresentado o projeto e fabricação de um equipamento para a realização de ensaios de queda de peso contra tubos de fibra de vidro. Serão apresentadas as soluções desenvolvidas, o desenvolvimento da solução escolhida, especificações e fabricação do mesmo. Por final, serão apresentadas as modificações necessárias no martelo de impacto e base fixadora para a sua instalação.

2.3.1 Escolha da configuração do equipamento de impacto

Após o devido estudo das normas técnicas referentes ao ensaio objetivado foram desenvolvidas três configurações de equipamentos para ensaios de queda de peso, sendo brevemente descritas a seguir:

- *Solução 1: Equipamento proposto pela norma.*

Esta solução, apresentada na Figura 5, consiste em um elemento impactante percorrendo o interior de um tubo-guia, incidindo perpendicularmente no material ensaiado. Elementos simples adicionados ao equipamento possibilitam o lançamento e posicionamento do peso. Esta solução não consiste em uma adaptação ao martelo de impacto, sendo, portanto, um novo equipamento a ser integralmente desenvolvido.

- *Solução 2: Adaptação da solução proposta pela norma ao martelo de impacto.*

Este solução consiste em desenvolver no martelo um tubo-guia por onde o elemento impactante percorre a trajetória em queda livre perpendicularmente ao material ensaiado. Nesta solução, os trilhos do martelo de impacto têm apenas uma função estrutural de manter o tubo-guia alinhado, e impossibilita a utilização de recursos

existentes no martelo de impacto, como o lançamento e posicionamento via computador. Um esboço desta solução esta apresentada na Figura 7.

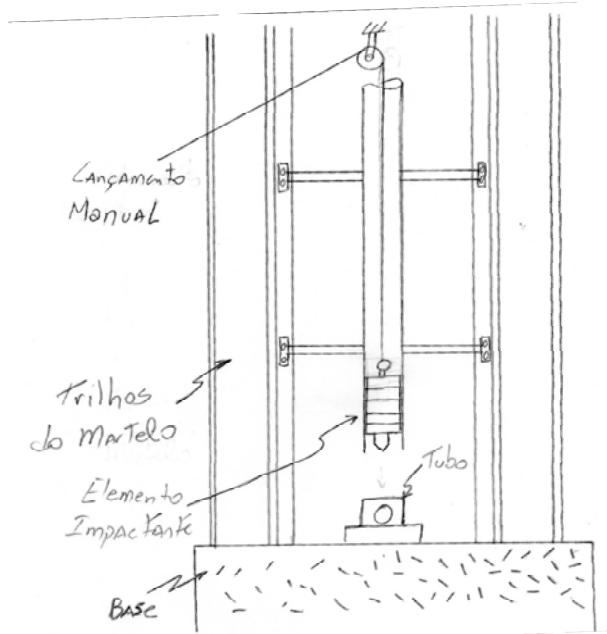


Figura 7 - Esboço da solução 2.

- Solução 3: Desenvolvimento de um novo elemento impactante para o martelo de impacto.

Esta solução consiste no desenvolvimento de um elemento impactante para o martelo de impacto cujo peso mínimo seja de 3 kg, satisfazendo os parâmetros definidos anteriormente. Este elemento irá utilizar os trilhos do martelo de impacto como guia durante a queda livre, e poderá utilizar o sistema de posicionamento e lançamento existentes no martelo de impacto. A fim de possibilitar a redução de peso necessária, serão necessárias a integração de diferentes partes, utilização de materiais leves, como alumínios e polímeros, e desenvolvimento de elementos que evitem o travamento do elemento impactante durante a sua queda. Um esboço dessa solução está apresentado na Figura 8.

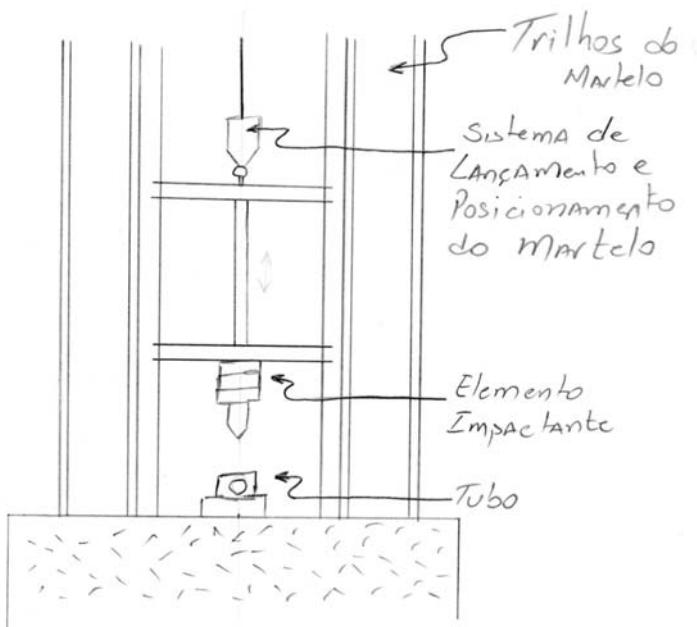


Figura 8 - Esboço da solução3.

Tendo em vista as propostas apresentadas anteriormente, optou-se pela utilização da solução 3 em virtude dessa estar completamente integrada aos elementos existentes no martelo de impacto, como o sistema de posicionamento, lançamento e trilhos-guia.

A solução 1 não foi aceita em virtude dessa consistir no desenvolvimento de um novo equipamento. A solução 2, mesmo sendo parcialmente integrada ao martelo de impacto, não possibilita a utilização de todas suas funcionalidades, o que possibilitou sua reprovação.

Mesmo sendo escolhida, a solução 3 apresenta quesitos críticos que podem impossibilitar o funcionamento correto do mesmo, sendo estes:

- O elemento impactante deve satisfazer a condição mínima de peso de aproximadamente 3 Kg.
- Em virtude energia reduzida de impacto, deve-se atentar aos efeitos viscosos decorrentes a fricção do elemento impactante e os trilhos-guia.
- O elemento impactante não pode travar ou gerar solavancos durante a queda do mesmo.

Desse modo, tendo em vista os quesitos apresentados, deverão ser realizadas as análises e modificações pertinentes do elemento impactante, a fim de possibilitar o correto funcionamento do mesmo.

2.3.2 Projeto do equipamento para ensaios de impacto

Sendo definida a configuração da adaptação a ser desenvolvida no martelo de impacto, deu-se início ao desenvolvimento da mesma. Para tanto se utilizou o programa CAD-3D Inventor 2008 Versão Estudantil, sendo possível realizar neste todas as etapas de projeto como o projeto inicial, modificações no projeto, simulações e geração de plantas. Na Figura 9 está apresentado o equipamento desenvolvido para impacto por queda de peso.

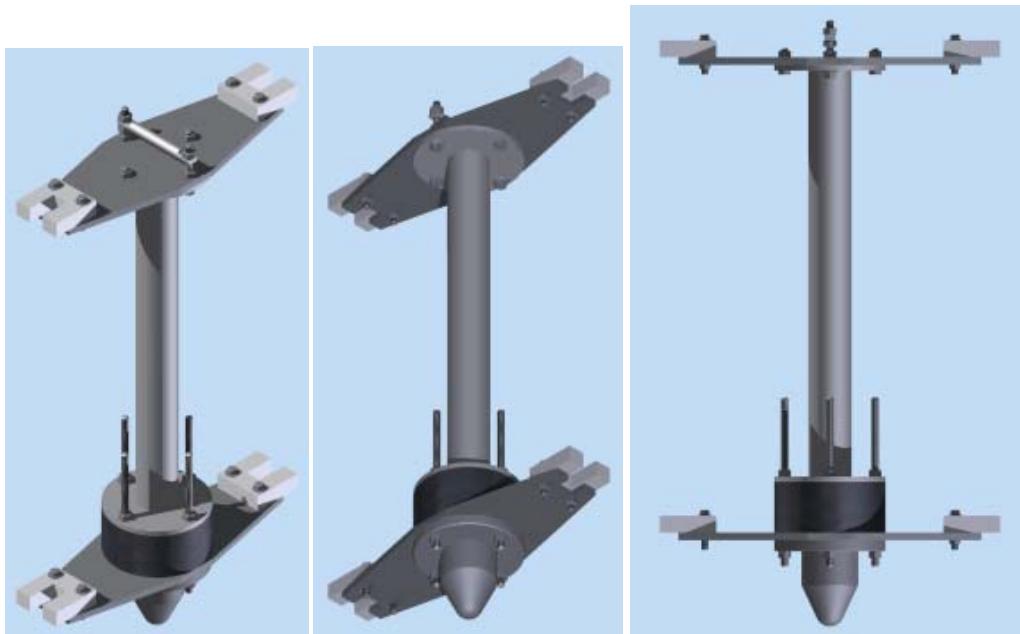


Figura 9 - Imagens do equipamento desenvolvido para impacto por queda de peso.

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. Conforme

apresentado na Figura 6, a geometria deste é definida pela norma ASTM-D2444 (Figura 10).

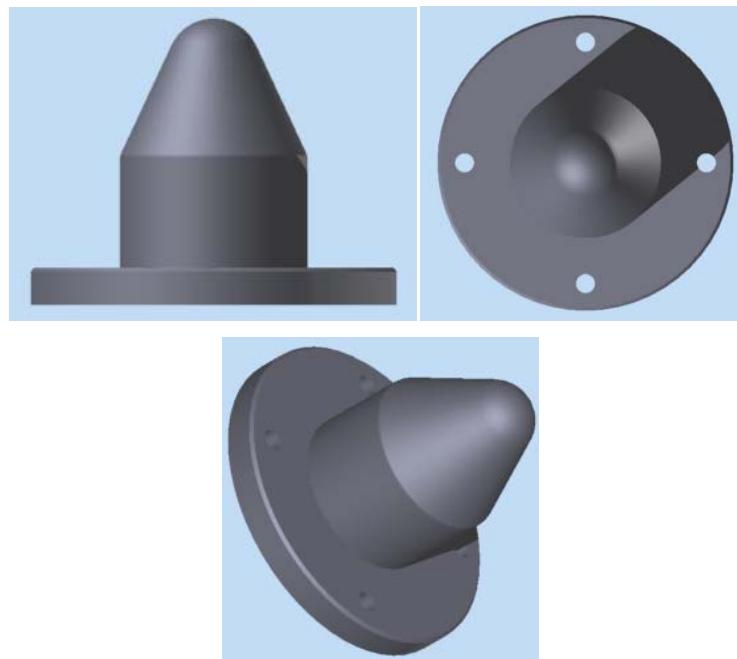


Figura 10 – O identador.

- *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 (Figura 11).



Figura 11 – As massas de impacto.

- *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 (Figura 12).



Figura 12 – O extensor.

- *Suporte horizontal:* Elemento cuja função é garantir o alinhamento do equipamento e o seu contato com os trilhos-guia (Figura 13).

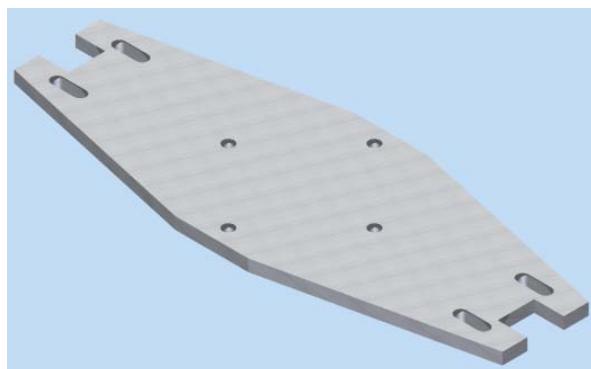


Figura 13 – O suporte horizontal.

- *Engate:* Elemento desenvolvido para possibilitar o engate do equipamento com o sistema de alinhamento e posicionamento do martelo de impacto (Figura 14).

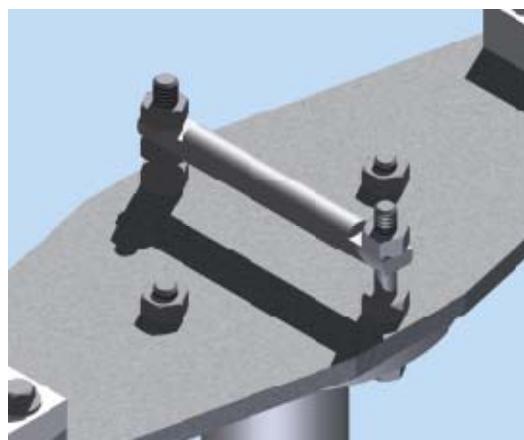


Figura 14 – O engate.

- *Guias:* Elementos desenvolvidos a fim de reduzir o atrito entre o equipamento e os trilhos-guia. Observa-se que estes elementos têm possibilidade da regulagem de seu posicionamento horizontal cujo objetivo é propiciar o controle do contato entre as duas partes (Figura 15).

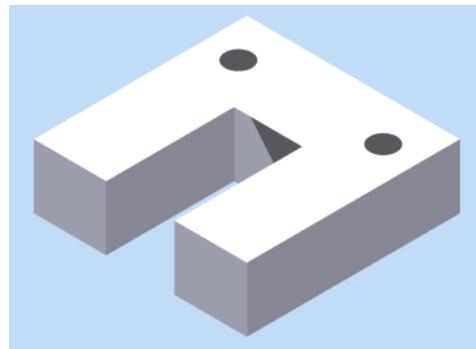


Figura 15 – O guia.

- *Elementos de união:* São parafusos, porcas e rosca-sem-fim, cuja função está em garantir a fixação entre as partes.

O equipamento desenvolvido tem funcionamento semelhante aos demais elementos de impacto utilizado no martelo de impacto. O sistema de posicionamento fixa o equipamento a uma altura pré-definida pelo usuário e, quando desejado, o mesmo abre, possibilitando a queda do mesmo.

A adição de massa é feita fixando acima do identador a quantidade de massas de impacto desejada, utilizando parafusos ou rosca-sem-fim desenvolvidos para esta

finalidade. Os guias podem ser posicionados horizontalmente conforme a distância entre os trilhos e a distância desejada entre os guias e trilhos.

Deve-se observar que com a utilização do programa CAD-3D foi possível o controle do peso do equipamento, sendo satisfeita a condição de peso mínimo de aproximadamente 3 Kg. Esta condição é obtida com a utilização de nenhuma massa de impacto, sendo decorrente do somatório do peso dos demais elementos. Observa-se que em função de propiciar a redução do peso estrutural, foi encolhido o alumínio com material para a fabricação dos suportes horizontais, em função de sua menor massa específica.

O tamanho do extensor foi encolhido como aproximadamente 1,5 a distância entre os trilhos guia, a fim de evitar o travamento do equipamento ou solavancos durante a queda livre do mesmo. Além disso, o desenho simétrico do equipamento, a lubrificadas das guias e o pequeno jogo destas com os trilhos-guia contribuem para a minimização deste efeito, uma vez que evitam a “tendência à rotação” do equipamento.

Nota-se também que todos os elementos do equipamento desenvolvido são fixados com uma quantidade elevada de parafusos (normalmente quatro). Este fato se deve em função de garantir a integridade do mesmo durante o impacto. Nota-se que em função da utilização da grande quantidade de parafusos, todos os elementos são facilmente desmontáveis. Na Figura 16 são apresentado exemplos de utilização dos parafusos no equipamento: o sistema de conexão entre o equipamento e o sistema de posicionamento e lançamento do martelo, a fixação das massas de impacto e identador, e fixação e regulagem das guias.

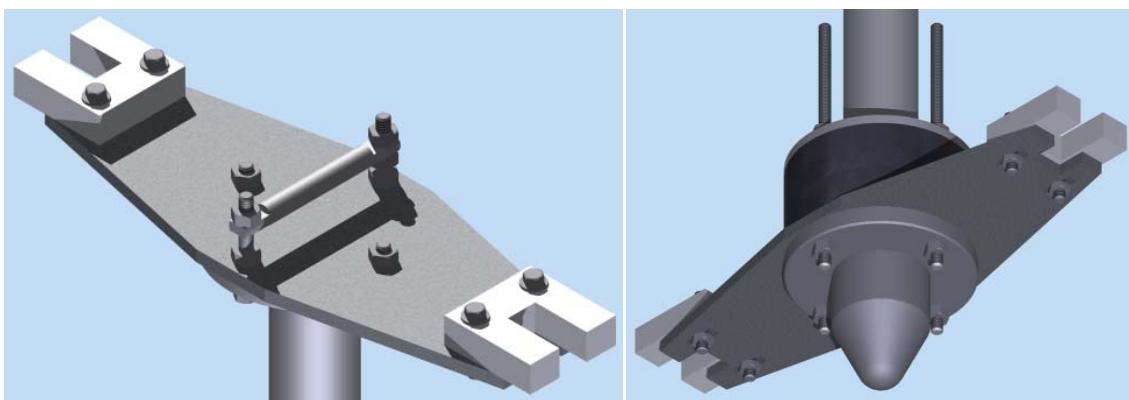


Figura 16 - Elementos de fixação do equipamento desenvolvido.

Os desenhos de fabricação produzidos equipamento desenvolvido e utilizados para sua fabricação estão apresentados em APÊNDICE A. Os materiais escolhidos para a fabricação de cada elemento e a justificativa para sua utilização então apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Materiais escolhidos para cada elemento do equipamento desenvolvido.

| Elemento | Material | Justificativa |
|--------------------------------------|---------------------------|---|
| Identador | Aço ABNT-1045 (temperado) | Elevada dureza e resistência mecânica, e plastificação reduzida. |
| Suporte horizontal | Alumínio | Pequena massa específica |
| Guias | Nylon | Pequena massa específica e baixo coeficiente de atrito com o aço. |
| Massas de impacto, extensor e engate | Aço ABNT-1020 | Elementos sem função estrutural. Material de baixo custo e de fácil usinagem. |

Observa-se que o material escolhido para a fabricação do identador é o aço ABNT-1045 temperado. Por este ser um elemento freqüentemente submetido a cargas de impacto e por não ser aceito que o mesmo sofra deformações permanentes, há necessidade da utilização de um material com elevada resistência mecânica e pequenos efeitos de escoamento (deformações plásticas). O material escolhido é um tipo de aço comumente utilizado, apresenta uma elevada resistência mecânica e possibilita o tratamento térmico de têmpera.

O tratamento térmico da têmpera, por reduzir o tamanho médio dos grãos do material e dificultar a movimentação das imperfeições internas do material, possibilita o aumento da resistência mecânica, aumento do campo elástico deste, e diminuindo efeitos de escoamento (deformações permanentes). Deve-se frisar que o material por se ter reduzido seus efeitos de escoamento e aumentada a resistência mecânica, o mesmo, após ser submetido à têmpera, pode romper-se rápido e intensamente durante o impacto, ao invés de sofrer deformações permanentes localizadas.

2.3.3 Fabricação do equipamento para ensaios de impacto

Sendo definida a configuração do equipamento desenvolvido, geradas as plantas de fabricação apresentadas no APÊNDICE A e especificados os materiais a serem utilizados, deu-se início aos processos de fabricação e montagem do equipamento, descritos nos itens a seguir.

2.3.3.1 Usinagem do equipamento

Sendo adquiridos os materiais brutos especificados na Tabela 2, os elementos do equipamento desenvolvido foram usinados pelo técnico Fidel Vicente de Paula utilizando processos de corte, torneamento, fresamento, furação, soldagem e retificação.

Deve-se frisar que as massas de impacto foram desenvolvidas com o objetivo de facilitar a fabricação das mesmas, uma vez que estas possuem o mesmo diâmetro externo e furos de fixação, possibilitando a usinagem externa de todas as peças em um mesmo processo, sendo posteriormente cortadas e retificadas com a altura especificadas.

2.3.3.2 Aplicação da proteção contra corrosão

A fim de minimizar efeitos de corrosão no equipamento desenvolvido, todos os elementos desenvolvidos, com exceção do identador, foram submetidos à fosfatização. Este processo foi realizado como cortesia pela empresa Galvanoplastia União Ltda., sediada na cidade de São Paulo, SP.

2.3.3.3 Tratamento térmico do identador

Após a finalização do processo de usinagem do identador, o mesmo foi submetido à tempera 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 (informação informal)³.

Para o desenvolvimento do procedimento de têmpera, inicialmente o identador foi colocado no interior de um forno à temperatura de 650°C durante 6h a fim de que seja obtido o equilíbrio térmico no interior do material. Após esse período, o elemento foi resfriado abruptamente com agitação em uma solução de água com fluído antioxidante. Após a têmpera, foram retiradas as escórias decorrentes do aquecimento e realizado o acabamento da peça.

Os parâmetros para a realização do tratamento térmico, como temperatura, tempo de homogeneização e procedimento para resfriamento foram obtidos de (Callister, 2002). O procedimento realizado está apresentado na Figura 17.

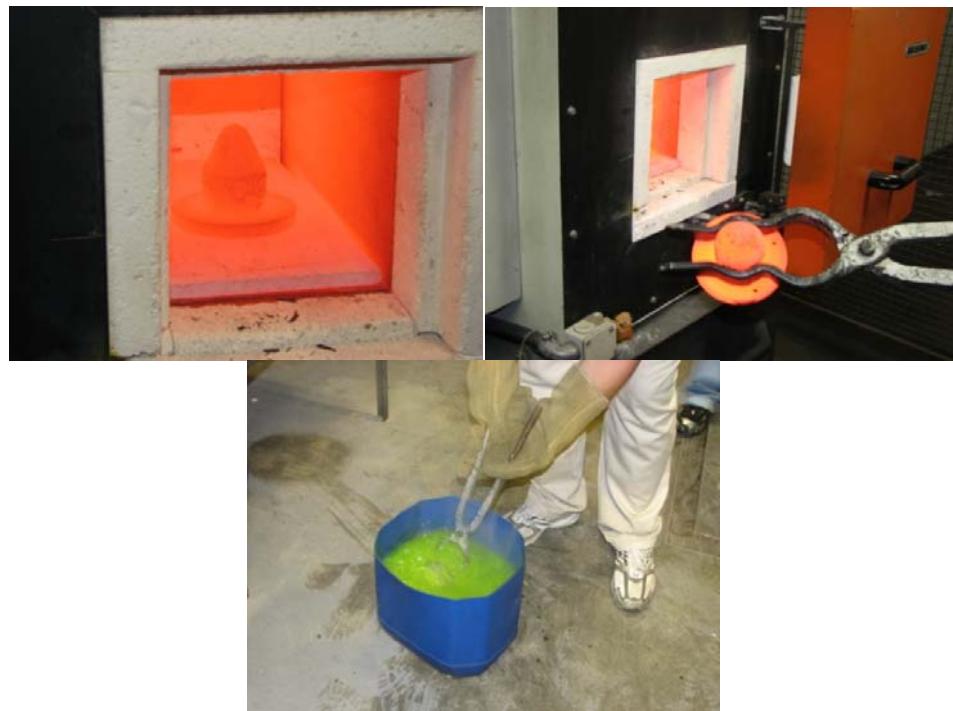


Figura 17 - Processo de têmpera do identador.

Foi possível realizar a medição da dureza superficial do material antes e depois da têmpera. 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. Deve-se frisar que o tratamento térmico não foi totalmente eficiente,

³ Informação fornecida pelo técnico Jovanio de Oliveira do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica de USP (LFS).

pois, segundo (Callister, 2002), a dureza superficial do aço ABNT-1045 pode alcançar 80 HC. Este fato possivelmente ocorreu em virtude da qualidade do material utilizado.

Este procedimento foi realizado junto ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) de Escola Politécnica da USP.

2.3.3.4 Montagem do equipamento

Após a usinagem, tratamento térmico e proteção contra corrosão do equipamento, o mesmo foi montado, apenas necessitando de pequenas modificações, como alargamento dos furos. O equipamento montado e instalado no martelo de impacto está apresentado na Figura 18.

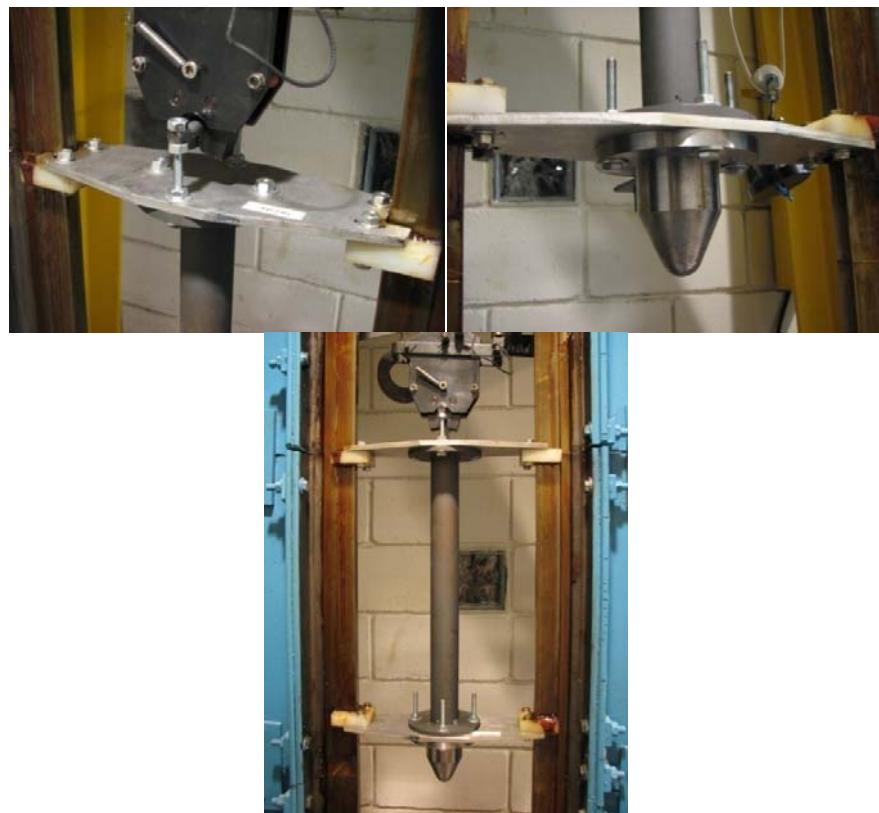


Figura 18 - Equipamento desenvolvido instalado no martelo de impacto.

Em virtude da utilização do programa CAD-3D, foi possível obter a aproximação relativamente precisa da massa do equipamento durante o projeto do mesmo.

Buscou-se desse modo satisfazer a condição imposta inicialmente no projeto, sendo esta a limitação de peso mínimo em 3 Kg. Na Tabela 3, estão apresentados os valores medidos de massa para o equipamento desenvolvido, considerando todos os elementos que constituem a configuração mínima. Observa-se que o peso mínimo obtido de 3,2 Kg é substancialmente próximo da condição imposta no projeto, o que reafirma a qualidade no projeto e fabricação do equipamento.

Tabela 3 - Massa de cada elemento do equipamento (configuração mínima).

| Elemento | Peso (Kg) |
|-------------------------------------|--------------|
| Identador | 1,095 |
| Extensor | 0,843 |
| Suporte Horizontal | 0,468 |
| Engate | 0,044 |
| Elementos de Fixação (parafusos) | 0,168 |
| Guias | 0,032 |
| Total | 3,214 |

2.3.4 Modificação no aparato experimental existente

Após o desenvolvimento do elemento impactante e antes do início dos experimentos, foi necessária a realização de modificações no aparato experimental existente no laboratório desenvolvido em (Zanata, 2007).

A fim de propiciar a ligação do ramal de ar pressurizado ao aparato de fixação e pressurização de tubos foi necessária a fixação de um espigão para a conexão de uma mangueira. Em virtude do mesmo freqüentemente rasgar os anéis de vedação internos durante a instalação dos espécimes. Também foram retirados os cantos vivos existentes nos terminais de vedação do equipamento. Na Figura 19 está apresentado um esquema do aparto fixador e pressurizador de tubos. O espigão instalado no mesmo está apresentado na Figura 20.



Figura 19 - Elemento para fixação e pressurização de tubos.



Figura 20 – Espigão instalado na base para fixação e pressurização de tubos.

Também foi necessária a redefinição do sistema de fixação deste elemento na massa rígida do martelo de impacto. O elemento pronto para a realização dos ensaios experimentais está apresentado na Figura 21.



Figura 21 - Base para a fixação e pressurização de tubos pronta para a realização de ensaios.

2.4 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do dos ensaios experimentais, além do equipamento desenvolvido, há necessidade de utilização um sistema para a realização e mensuração do evento a ser estudado. Tal sistema constitui da utilização conjunta de diversos equipamentos, sendo estes descritos nos itens a seguir.

2.4.1 O martelo de impacto

O martelo de impacto, conforme apresentado no Item 2.1, consiste em um equipamento desenvolvido pelo Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em

Estruturas para a realização de ensaios de impacto por queda de peso, possibilitando energia de impacto de até 20KJ.

O mesmo é constituído por dois trilhos-guia verticais, uma massa rígida para fixação do espécime, o elemento impactante, um sistema de posicionamento e lançamento da massa e elementos de segurança. Tal equipamento está apresentado na Figura 22

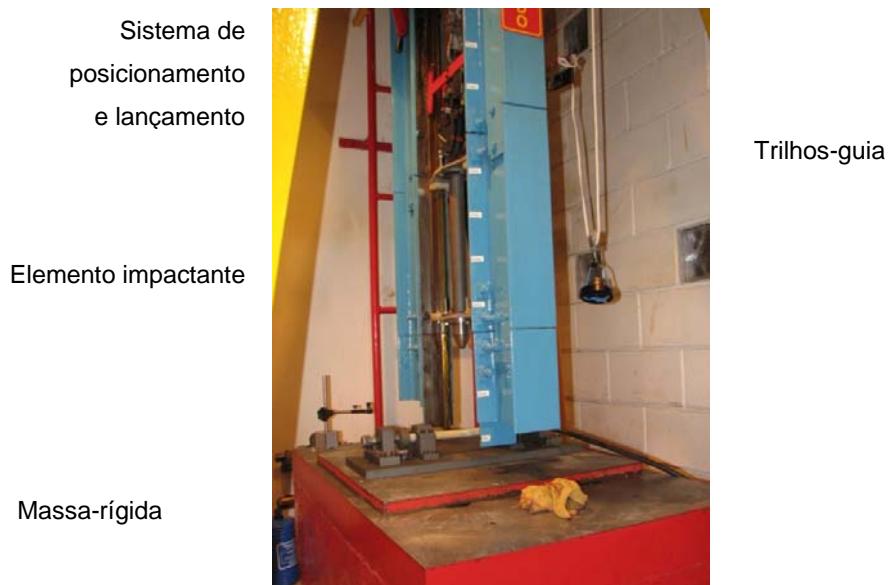


Figura 22 - Elementos do martelo de impacto.

O sistema de posicionamento e lançamento deste equipamento consiste em um guincho posicionado no topo do equipamento que possibilita o levantamento da carga de impacto com a utilização de um cabo de aço. Para o lançamento, o mesmo possui um sistema de abertura, possibilitando a soltura da carga de impacto e sua queda. Tanto o sistema de posicionamento e lançamento são controlados em um ambiente seguro, com um programa desenvolvido em ambiente MS-DOS.

2.4.2 Elemento impactante

Elemento cujo desenvolvimento foi apresentado no item 2.3 para a realização de ensaios de queda de peso com baixa velocidade, possibilitando a utilização de 3Kg

até 14 Kg como massa de impacto. Este equipamento está apresentado na Figura 18.

2.4.3 Base para a fixação e pressurização de tubos

A base utilizada para ensaios com tubos no martelo de impacto constitui um elemento desenvolvido anteriormente pelo Grupo de Mecânica do Sólidos e Impacto em Estruturas cuja função é possibilitar a fixação de tubos e pressurização interna do mesmo. A este elemento, foram necessárias modificações para o desenvolvimento deste trabalho, conforme apresentado no item 2.3.4.

O mesmo é desenvolvido para fixação de tubos com 20 mm de diâmetro externo, possibilitando a aplicação de até 200 psi de pressão interna no espécime. Este elemento está apresentado na Figura 23.



Figura 23 - Base para a fixação e pressurização de tubos.

2.4.4 Sistema de pressurização

Para a pressurização do tubo a ser ensaiado serão utilizados ar como fluído pressurizador. O mesmo será pressurizado com um compressor volumétrico de ar, fabricado por Turbo Pressure, com reservatório de 130 litros e vazão de tantos 5,3 ft³/min. O mesmo possibilita aplicação de uma pressão máxima de 7,2 bar, e está apresentado na Figura 24.

Para o controle da pressão aplicada, foi utilizada uma válvula reguladora de pressão PUMA modelo FRP-14. Para a análise o vazamento do tubo, foi instalado no ramal

uma válvula para o fechamento da mesma. A medição da pressão é realizada com um manômetro Parker com resolução de 0,25 bar. Estes equipamentos também estão apresentados na Figura 24.



Figura 24 - Compressor volumétrico de ar utilizado para os ensaios e sistema de regulação de pressão.

2.4.5 Sistema de aquisição de sinais

Conforme serão apresentados nos itens a seguir, para a medição de velocidade e carga serão utilizados sensores com saída analógica. Para tanto é necessária a utilização de um sistema para a aquisição de tais sinais.

Para a obtenção de sinais será utilizado uma placa de aquisição de sinais analógicos e digitais National Instruments modelo PCI-6110 e um quadro de conexões BNC-2110. As especificações técnicas relevantes destes equipamentos estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas da placa de aquisição PCI-6110 e conexões BNC-2110
(National Instruments Corporate Headquarters, 2002).

| | |
|---|--|
| Quantidade de entradas/saídas analógicas | 4 pseudo-diferenciais |
| Máxima freqüência de aquisição | 5 MHz |
| Voltagem de entrada | - 11 V / +11 V |
| Acoplamento | DC/AC |
| Acuracidade | Média de 1,2 mV para entrada de ± 10 V |
| Resolução | 12 bits |
| Ruído | 1 mV _{RMS} |

Estes equipamentos de aquisição estão instalados em um computador pessoal com processador Pentium D 2,66 GHz e 512 Mb de memória flutuante. Para a obtenção

dos sinais foi desenvolvido uma sub-rotina no programa comercial MatLab7.0, melhor apresentada melhor apresentada no item 2.4.6.1.

2.4.6 Sensor de velocidade

Para a qualidade do ensaio realizado é necessária a medição de diversos parâmetros, como por exemplo, como velocidade, deslocamento e energia ao longo de todo o ensaio. Para isso optou-se pela utilização de um vibrômetro laser Polytec modelo OFV-323 e um controlador modelo OFV-3020. Mesmo sendo um vibrômetro, equipamento destinado a medição de vibrações, trabalhos do Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas mostram que para deslocamentos de até 2 m, o mesmo é capaz atuar como sensor de velocidade (informação informal)⁴. Tal equipamento está apresentado na Figura 25.



Figura 25 - Sensor de velocidade a laser Polytec OFV-323, à direita, e controlador OFV3020, à esquerda.

O princípio de funcionamento do sensor consiste na utilização do Efeito Doppler para a propagação de ondas eletromagnéticas. Este efeito consiste na variação da frequência de uma onda conforme a velocidade relativa entre o emissor e o receptor, conforme apresentado no trabalho (Santiago, et al., 2007). As especificações técnicas relevantes para a realização do experimento estão apresentadas na Tabela 5.

⁴ Informação fornecida pelo Prof. Marcílio Alves, orientador deste trabalho.

Tabela 5 - Especificações técnicas do sensor de velocidade OFV-323 e controlador OFV-3020
(Polytec Deutschland, 2002).

| | |
|---|---|
| Saída | Analógica, BNC, 20 V _{p-p} |
| Freqüência de corte do filtro Bessel 3^a Ordem | 5kHz, 20kHz, 100kHz, ajustável |
| Fator de escala para velocidade | 2, 10, 50, 250 e 2000 (mm/s)/V, ajustável |
| Acuracidade | ± 1,2 % da voltagem pico-a-pico medida |
| Padrão de segurança do Laser | II |

Para a medição da velocidade, foi necessária a instalação de um anteparo no elemento impactante, sendo a este fixado um adesivo reflexivo para o correto funcionamento do sensor, conforme apresentado na Figura 25.

2.4.6.1 Desenvolvimento de uma sub-rotina para aquisição dos sinais do sensor de velocidade

Para a obtenção dos sinais de velocidade obtidos com o sensor descrito no item anterior foi desenvolvida uma sub-rotina no programa comercial MatLab7.0. Na Figura 26 estão apresentados os valores obtidos com a medição de velocidade de queda do identador.

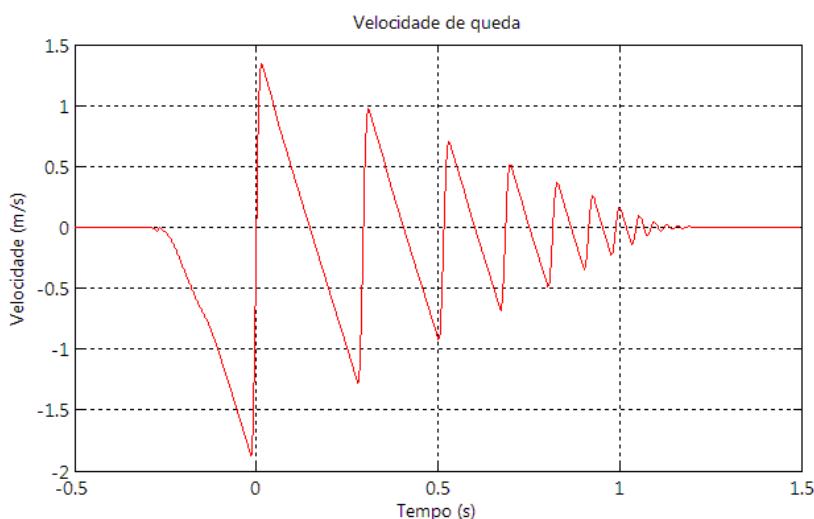


Figura 26 - Velocidade de queda do identador.

A partir da análise da Figura 26, é possível observar os sucessivos impactos do identador com o tubo estudado. Observa-se a variação linear da velocidade com tempo, conforme esperado pela equação do movimento uniformemente acelerado, Equação (1).

$$V = V_0 + a \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = a \text{ (cte)}$$

Integrando a medição realizada na Figura 26, é possível obter valores do deslocamento do identador, sendo este apresentado na Figura 27, considerando a Equações (2) e (3). Observa-se o perfil do deslocamento parabólico do deslocamento ao longo do tempo, o que demonstra a coerência com as Equações de Movimento.

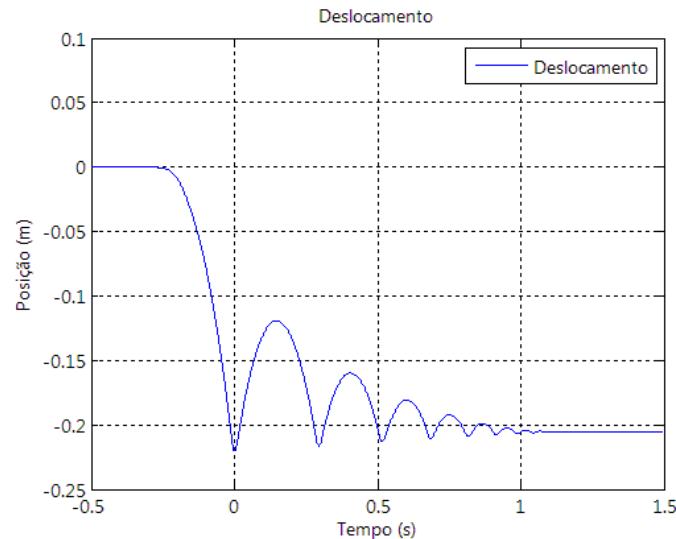


Figura 27 - Deslocamento do elemento impactante.

$$s = \int V dt \quad (2)$$

$$s = s_0 + V_o \cdot t + \frac{at^2}{2} \quad (3)$$

Derivando a medição obtida na Figura 26, é possível obter valores de aceleração do elemento impactador. Em virtude da derivação de um sinal analógico amplificar o

ruído nele existente, o procedimento utilizado para a minimização do ruído, está em obter a segunda derivada do deslocamento, procedimento utilizado para a obtenção dos resultados apresentados na Figura 28, considerando a Equação (4). A obtenção da força aplicada no identador é obtida através da 2^a Lei de Newton, apresentada na Equação (5), multiplicando-se a aceleração pela massa do equipamento, também apresentado na Figura 28.

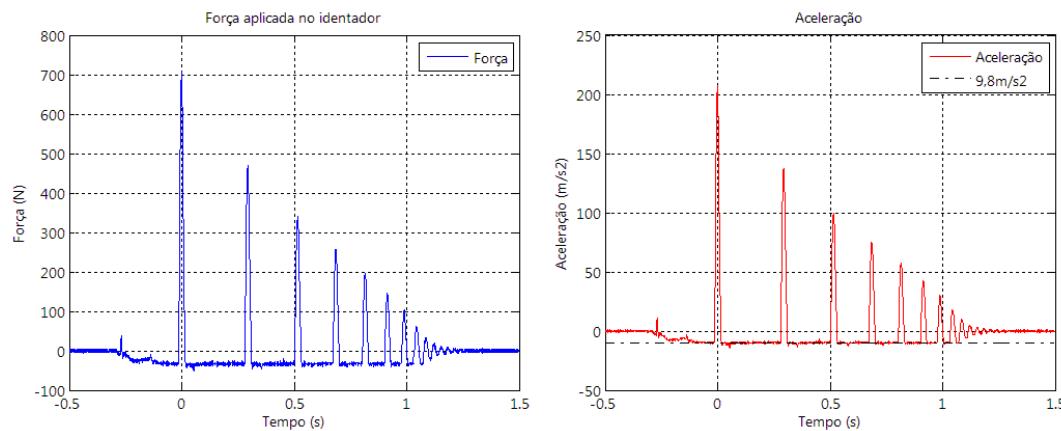


Figura 28 – Aceletação do identador, à esquerda, e força aplicada no mesmo, à direita.

$$a = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

$$a = \frac{d^2s}{dt^2}$$

$$F = m \cdot a \quad (5)$$

A Energia Cinética e Potencial podem ser obtidas a partir das Equações (6) e (7) respectivamente e com as medições de velocidade e deslocamento apresentadas anteriormente. No item 2.5.1.4 será realizada a discussão de tais equações, assim como o desenvolvimento de um método para a obtenção de tais energias com menor influência de efeitos dissipativos.

$$E_{cin} = \frac{mV^2}{2} \quad (6)$$

$$E_{pot} = mgh \quad (7)$$

2.4.6.2 Seleção de um filtro para a obtenção dos sinais do sensor de velocidade

Em virtude da existência de interferências eletromagnéticas externas causadas por diversos motivos, como utilização de cabos de baixa qualidade ou utilização de equipamentos eletrônicos próximos ao sistema de medição, foi observado a existência de ruídos durante o processo de medição. Tais ruídos reduzem a qualidade do processo de medição e tornam inutilizáveis os resultados aceleração.

Para a solução deste problema optou-se pela utilização de um filtro analógico passa-baixa Fylde modelo FE-301 SF, cujas especificações técnicas relevantes para o desenvolvimento deste trabalho estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas do filtro FE-301 SF (Fylde Electronic Laboratories Ltd.).

| | |
|---------------------------------|--|
| Tipo de filtro | Butterworth passa-baixa |
| Tensão máxima de entrada | $\pm 10 \text{ V}_{\text{p-p}}$ |
| Freqüências de corte | 100 Hz, 300 Hz, 1KHz, 3 KHz, 10 KHz e 30 KHz |

Para a definição da freqüência de corte, foi definido um espectro de freqüência utilizando a Transformada Rápida de Fourier (“*Fast Fourier Transform*”) de um sinal de velocidade obtido, sendo este apresentado na Figura 29.

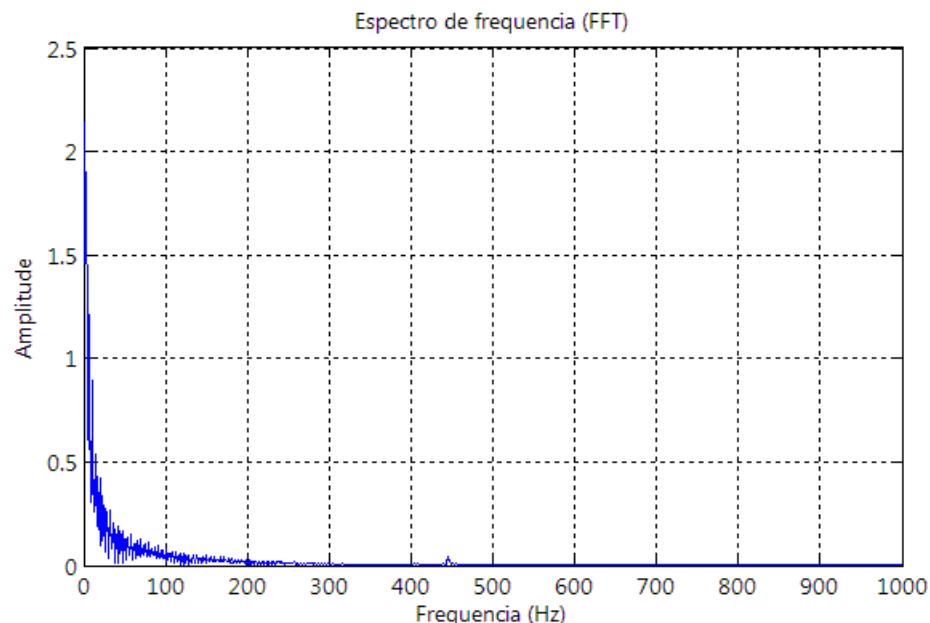


Figura 29 - Espectro de freqüência do sinal obtido do sensor de velocidade.

Observa-se a partir da Figura 29 que após as freqüências maiores que 100Hz têm pouca influência no sinal obtido, sendo que freqüências acima dessa sejam geradores ruídos no sinal, em virtude se sua pequena amplitude. Medições foram realizadas com e sem o filtro passa baixa de 100Hz e nenhuma diferenciação no sinal principal foi notada, além da redução significativa do ruído, conforme apresentado na Figura 30, onde é apresentado a aquisição de sinais do eventos semelhantes, com e sem a utilização do filtro passa-baixa.

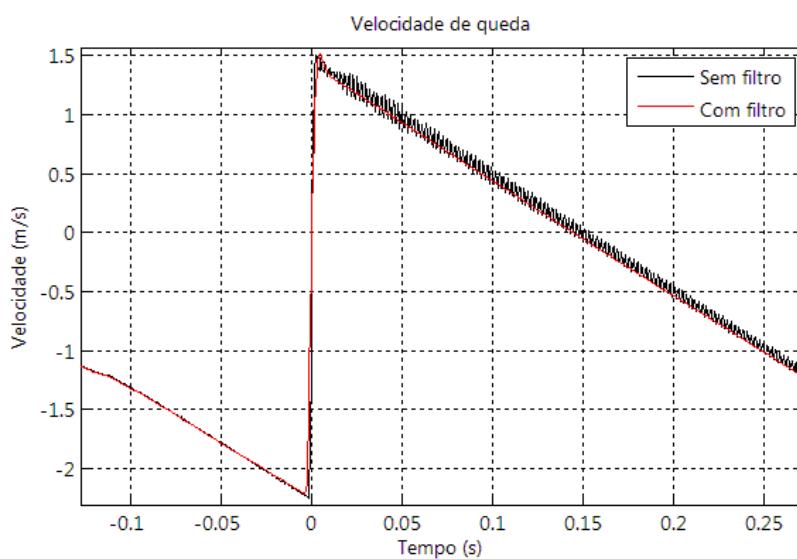


Figura 30 - Sinal obtido com e sem filtro passa-baixa de 100 Hz.

As medições a serem realizadas nos ensaios experimentais serão realizadas utilizando o filtro passa-baixa com freqüência de corte de 100 Hz.

2.4.7 Amplificador de sinais

Foi observado que para altura de quedas intermediárias, os fatores de escala possíveis oriundos do sensor de velocidade, conforme apresentado na Tabela 5. Neste caso, caso seja utilizado um fator de escala de 250 (mm/s)/V, ocorre a saturação do sinal medido, obtendo o valor de tensão maior que o limite máximo de medição do sensor. Por sua vez, quando é utilizado um fator de escala de 2000 (mm/s)/V, o sinal proveniente do sensor é obtido com baixa resolução em função da precisão da placa de aquisição utilizada. Este fato prejudica o processo de medição,

em especial no processo de derivação do sinal a fim de obter a aceleração e força aplicada no identador.

Desse modo, houve a necessidade da utilização de um amplificado de sinais a fim possibilitar a variação do fator de escala do sensor de velocidade. Foi utilizado um amplificador universal Flyde FE-351-UA, cujas especificações técnicas relevantes para o trabalho estão apresentadas na Tabela 7. Na Tabela 8 são apresentados os fatores de escala resultantes possíveis com a utilização do amplificador descrito anteriormente, quando o fator de escala do sensor de velocidade está definido para 2000 (mm/s)/V.

Tabela 7 - Especificações técnicas do amplificador FE-351-UA (Flyde Eletronic Laboratories Ltd.).

| Tipo de entradas | BNC |
|------------------|----------------------------|
| Ganho | 1, 2,5, 10 e 20; ajustável |
| Erro | 0,01% |

Tabela 8 - Fator de escala resultante com a utilização do amplificador.

| Fator de escala do sensor de velocidade (mm/s)/V | Ganho do amplificador | Fator de escala resultante (mm/s)/V |
|--|-----------------------|-------------------------------------|
| 2000 | 1 | 2000 |
| 2000 | 2 | 1000 |
| 2000 | 5 | 400 |
| 2000 | 10 | 200 |

Este procedimento possibilitou mais precisão no resultado de medição realizado e será utilizado para a realização dos ensaios experimentais. Na Figura 31, é apresentado um fluxograma dos equipamentos utilizados para a medição da velocidade de queda do identador.



Figura 31 - Fluxograma dos equipamentos utilizados para a medição da velocidade de queda do identador.

2.4.8 Célula de carga

Com o objetivo de obter a magnitude de carga obtido no ensaio de queda de peso, foi instalado no mesmo uma célula de carga PCB modelo 200C20 e um amplificador modelo 480C02. Este elemento foi fixado entre o identador e a massa de inércia, conforme apresentado na Figura 32.

O princípio de funcionamento deste equipamento está na utilização de cristais piezoeletricos. As especificações técnicas relevantes desse equipamento estão apresentadas na Tabela 9.



Figura 32 - Célula de carga PCB 200C02 fixada junto ao equipamento de ensaio de queda de peso.

Tabela 9 - Especificações técnicas da celula de carga PCB 200C20(PCB Piezotronics - Force/Torque division, 2004).

| | |
|--------------------------|--------------|
| Limite de carga | 133 kN |
| Limite de medição | 89 kN |
| Fator de escala | 56,2 mV/kN |
| Saída | De 0 V a 6 V |

2.4.9 Câmera de alta velocidade

Com o objetivo de obter uma seqüência de imagens do fenômeno de impacto, foi utilizada uma câmera de alta velocidade Photron modelo Fastcam-APX RS. Com tais imagens, é possível analisar o modo de falha do tubo e a movimentação do mesmo durante o ensaio. As especificações técnicas do equipamento relevantes para o

experimento estão apresentadas na Tabela 10. A câmera está apresentada na Figura 33.

Tabela 10 - Especificações técnicas da câmera Fastcam-APX RS (Photron USA Inc., 2005).

| | |
|--------------------------------------|---|
| Resolução | De 128x16 a 1024x1024 pixels, de acordo com a freqüência de quadros utilizada |
| Freqüência de quadros | De 50 a 250000 quadro por segundo, de acordo com a resolução utilizada |
| Gravação | Monocromática ou Colorida |
| Conexão com o microcomputador | Fibra ótica via hardware PCI |
| Memória Interna | 2,6 Gb |



Figura 33 - Câmera de alta velocidade.

2.4.10 Sensor apalpador

Com o objetivo de obter o perfil deformado do tubo após o impacto, será utilizado um sensor apalpador que possibilita a descrição com precisão da posição do tubo. O sensor utilizado é um encolder linear Solartron modelo LE25. As especificações técnicas relevantes do equipamento estão apresentadas na Tabela 11. O modo de operação desse sensor está apresentado na Figura 34.

Tabela 11 - Especificações técnicas do sensor apalpador LE-25 (Solartron Metrology).

| | |
|-------------------------------------|--|
| Curso máximo | 25 mm |
| Resolução | De 0,4 μm a 0,0125 μm |
| Conexão como microcomputador | Plataforma Orbit, desenvolvida pelo fabricante |



Figura 34 - Sensor de posição apalpador LE-25.

2.5 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS PRELIMINARES

Em virtude da grande quantidade elementos que constituem o aparato experimental, é fundamental garantir o correto funcionamento de cada elemento antes do início dos experimentos. Com esse objetivo foram realizados ensaios preliminares observando o funcionamento em separado de cada equipamento. Como análises complementares também são obtidos alguns resultados e análises referentes ao experimento.

O material utilizado para estes experimentos constituem-se em tubos de fibra de vidro e resina epóxi fabricado pela técnica do filamento contínuo, sendo estes melhor descritos no item 3.3.

A seguir serão apresentados ensaios com o sensor de velocidade e a sub-rotina desenvolvida, a célula de carga e com o sensor apalpador. Por final será apresentado um série de ensaios realizados qualitativamente.

2.5.1 Ensaios com o sensor de velocidade

A seguir serão apresentados os ensaios preliminares realizados com o vibrômetro Polytec modelo OFV-323 e a sub-rotina desenvolvida em MatLab7.0 para a aquisição dos sinais deste sensor com a utilização da placa de aquisição National Instruments PCI-6110.

2.5.1.1 Análise da velocidade do elemento impactador

Para a análise da velocidade de queda do elemento impactador, foi realizada a medição de velocidade do peso por uma altura de queda de $200,0 \pm 1,0$ mm. Considerando o ensaio como um evento conservativo e toda a energia potencial é transformada em energia cinética, a partir das Equações (6) e (7), se obtém a relação:

$$V_{imp} = \sqrt{2gh} = 1,97 \text{ m/s} \quad (8)$$

Na Figura 35 são apresentados os resultados obtidos para as medições de velocidade de queda do elemento impactante. Na Tabela 12, é realizada a comparação entre os resultados experimental e o teórico.

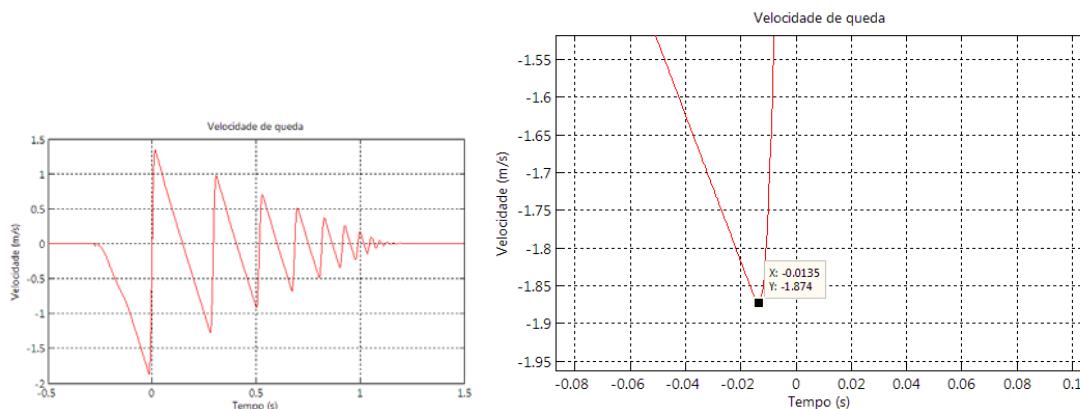


Figura 35 - Medições da velocidade durante a queda do elemento.

Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos de velocidade.

| | |
|---|---|
| Obtido a partir da Equação (9) | $1,979 \pm 0,005 \text{ m/s}$ |
| Obtida pelo sensor de velocidade | $1,874 \text{ m/s}$ |

Com resultado dessa análise tem-se que os valores medidos estão condizentes com o esperado pela teoria utilizando as relações de conservação de energia, no entanto há uma variação entre os resultados experimental e teórico substancialmente significante, o que mostra que os efeitos dissipativos de energia não são

desprezíveis neste experimento, devendo ter desenvolvido técnicas para a minimização destes efeitos, melhor apresentada no item 2.5.1.4.

2.5.1.2 Análise do deslocamento do elemento impactador

Para a análise do deslocamento durante a queda do elemento impactador, foi realizada a mesma medição de velocidade do anterior por uma altura de queda de $200,0 \pm 1,0$ mm. Conforme será apresentado no item 2.5.3, foi observado um deslocamento de $5,4 \pm 0,0$ mm na região do impacto.

Na Figura 36 são apresentados os resultados obtidos para o deslocamento do elemento impactador. Na Tabela 13 é realizada a comparação entre os resultados.

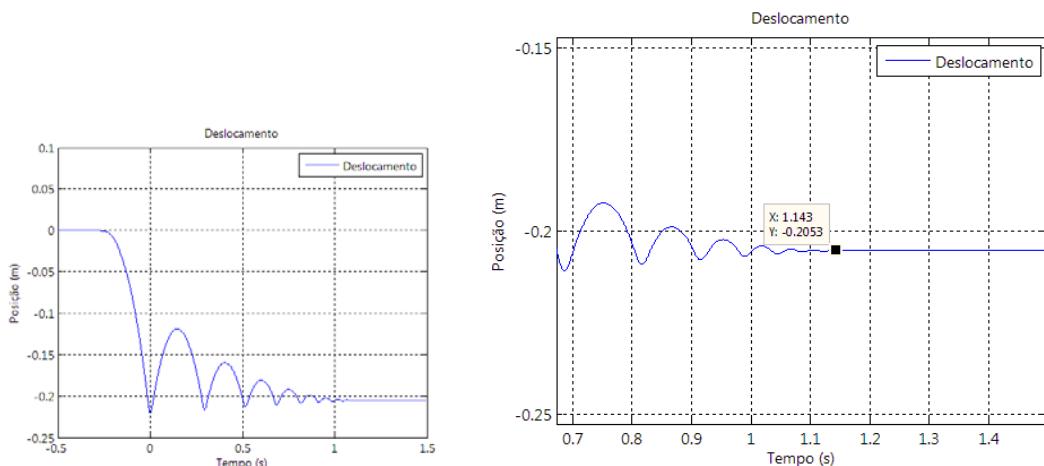


Figura 36 - Resultados obtidos para o deslocamento durante a queda do elemento.

Tabela 13 - Comparaçāo dos resultados obtidos de deslocamento.

| | |
|--|---------------------|
| Deslocamento medido | $205,4 \pm 1,0$ mm |
| Deslocamento obtido pelo sensor | $205,3 \pm 0,0$ |
| Variação | $0,004 \pm 0,005$ % |

A partir dos resultados apresentados na Tabela 13, observa-se que os valores obtidos através do sensor de velocidade apresentam valores de deslocamento praticamente coincidentes com medido experimentalmente. Este fato demonstra o bom desempenho do método de integração utilizado no sinal de velocidade adquirido.

2.5.1.3 Análise da aceleração do elemento impactador

Considerando ainda o mesmo ensaio com altura de queda de $200,0 \pm 1,0$ mm, observa-se que, conforme apresentado na Figura 37, os valores de aceleração nos instantes de queda livre, apesar do ruído existente, tendem para o valor de $9,8 \text{ m/s}^2$, o valor da aceleração da gravidade local.

Este fato demonstra que as forças dissipativas têm pouco efeito no ensaio realizado, no entanto notou-se que este fato está atrelado à distância entre os guias e os trilhos do equipamento, quantidade de lubrificação nos trilhos e configuração de massa do elemento impactante. Desse modo, mesmo tendo pouco efeito dos efeitos dissipativos, optou-se pela utilização da metodologia que minimize tais efeitos.

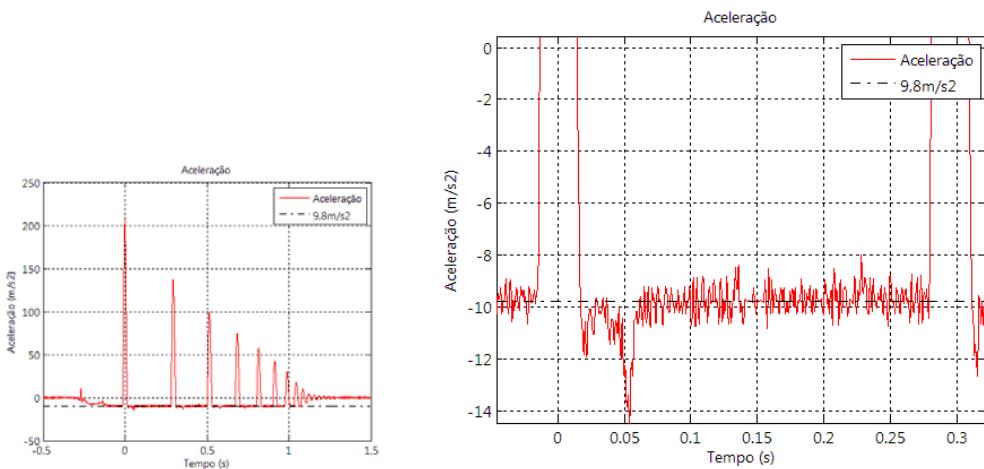


Figura 37 - Resultados obtidos para aceleração durante a queda do elemento

2.5.1.4 Análise da energia de impacto

Para a obtenção da energia de impacto relacionada aos sucessivos impactos entre o identador e tubo estudado, utiliza-se as Equação (10), considerando apenas os instantes anterior e posterior ao contato entre o tubo e o identador, conforme representado na Figura 38. Neste caso, utiliza-se para tanto uma posição de referência (lançamento) e a velocidade e posição, nos instantes anterior e posterior ao impacto, obtidos a partir dos sinais obtidos com o sensor de velocidade.

Deve-se frisar que esta técnica foi utilizada em virtude de reduzir efeitos dissipativos no fenômeno estudado, aumentando a confiabilidade no processo de medição. Nota-se que no equipamento desenvolvido, a massa de impacto não se encontra totalmente em queda livre, pois a mesma mantém contato com os trilhos-guia durante o experimento gerando. Em virtude de não serem observadas deformações plásticas no identador, tal energia está relacionada com deformações plásticas e propagação de falhas no tubo estudado.

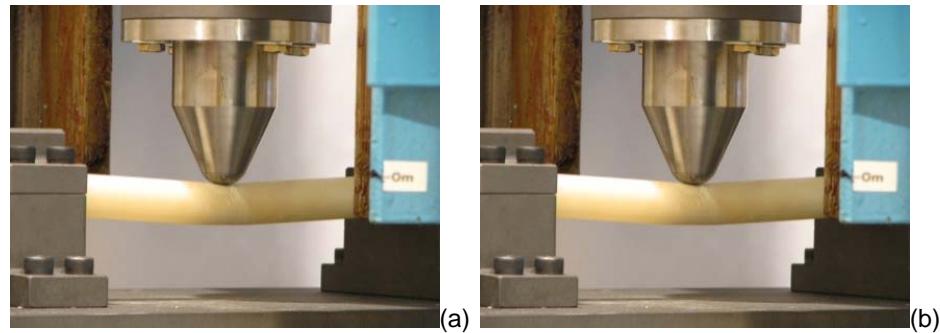


Figura 38 - Dinâmica do identador no instante anterior (a) e posterior (b) ao impacto.

Foi observado que os efeitos dissipativos são mais significantes quanto menor a energia de impacto considerado no fenômeno em estudo. Na Figura 39, são apresentadas a absorção percentual da energia de impacto ao longo dos sucessivos contatos entre do tubo e o identador. Observa-se que para um impacto de baixa energia, como 1,5 J, apenas cerca de 40% da energia de impacto está relacionada com o contato entre o identador e tubo. Por sua vez, quando a energia de impacto é elevada para 70 J, tal percentual chega a 98%. Deve-se frisar que é considerado um impacto relevante para o experimento quando a energia absorvida por este é maior que 2% da energia de impacto.

$$E_{imp} = \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(H_2 - H_1) \quad (9)$$

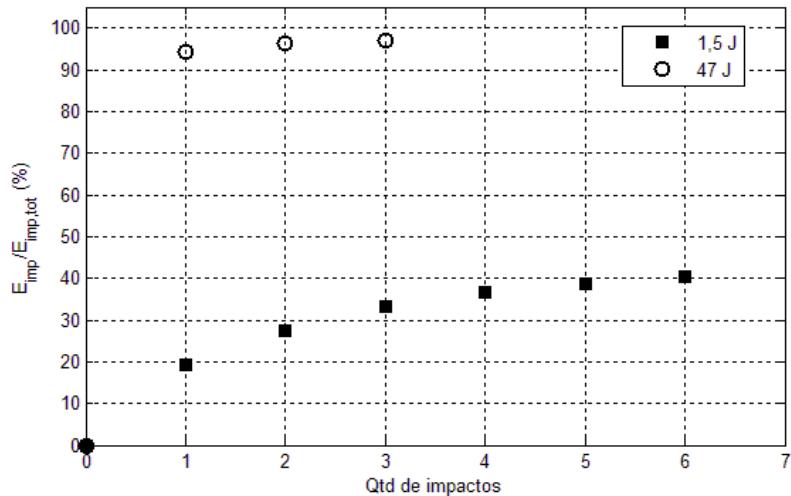


Figura 39 - Absorção percentual da energia de impacto ao longo dos sucessivos contatos entre do tubo e o identador.

Nota-se também que, mesmo sendo pouco significante, conforme apresentado na Equação (10), são considerados efeitos potenciais relativos à posição da massa para a definição da energia de impacto.

Deve-se frisar que o equipamento desenvolvido e o método de medição utilizado fornecem parâmetros do ensaio mais confiáveis e com menor influência de efeitos dissipativos. Tal técnica será utilizada para o desenvolvimento dos ensaios experimentais.

2.5.2 Ensaios com a célula de carga

Com o objetivo de analisar o funcionamento da célula de carga instalada no equipamento desenvolvido, foi realizado um ensaio apresentado na Figura 32. Os sinais deste sensor foram adquiridos com a placa de aquisição PCI-6110. Os resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na Figura 40.

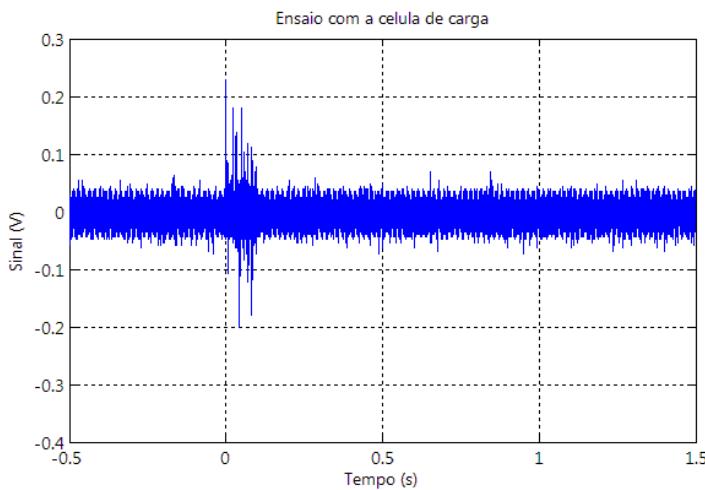


Figura 40 - Resultados obtidos com o ensaio com a célula de carga.

Analizando os resultados apresentados na Figura 40, observa-se que o sinal de interesse que foi adquirido tem intensidade muito próxima do ruído existente durante a medição. Tal fato ocorre em função de que o nível de carga veiculada nos ensaios estudado é substancialmente menor que o valor de carga máxima suportado pela mesma. Desse modo, a tensão de saída relacionada a tal carga é substancialmente pequena, sendo da ordem de grandeza do ruído, conforme observado.

Tendo em vista a qualidade dos sinais obtidos pela célula de carga, este elemento não será utilizado nos ensaios experimentais.

2.5.3 Ensaio com o sensor apalpador

Objetiva-se com este ensaio a obtenção do perfil do tubo após a realização do impacto contra o mesmo. Para esse ensaio, o senso LE-25 foi fixado junto a uma base magnética a fim de melhor fixá-lo junto ao elemento a ser medido. Foram definidas as posições de medição ao longo do tubo de apenas um lado. Como o identador está perfeitamente alinhado com eixo central do tubo e este incide com precisão no centro do tubo, foi considerada que o perfil da deformada do tubo é simétrico, a fim de facilitar o processo de medição.

Sendo realizado o impacto contra um espécime do material ensaiado, foram definidas cinco posições distanciadas de 20 mm iniciando na extremidade livre do tubo onde serão realizadas a medição do perfil. Tal procedimento está apresentado

na Figura 34. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 14 e representados na Figura 41.

Tabela 14 - Medições realizadas com o sensor LE-25.

| Posição (mm) | Deslocamento vertical (mm) |
|--------------|----------------------------|
| 0 | 0,00000 |
| 20 | -1,03085 |
| 40 | -2,24695 |
| 60 | -3,53075 |
| 80 | -5,48240 |

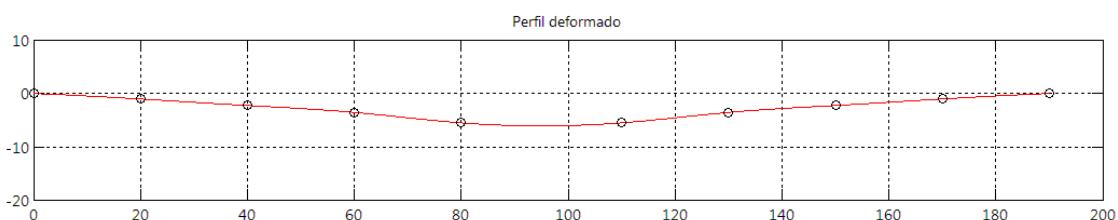


Figura 41 - Perfil da deformada do tubo após o impacto.

Os resultados obtidos com estes ensaios também fornecem valores resultados importantes para serem comparados com as simulações numéricas a serem realizadas.

2.5.4 Ensaio de vazamento do sistema pneumático

Antes que sejam iniciados os ensaios experimentais, é importante busca sanar vazamentos no sistema de pressurização dos espécimes, uma vez que objetiva analisar a queda de pressão e vazamento do tubo.

Para este ensaio, o tubo foi pressurizado com a pressão máxima disponível, de 7,8 bar, e observou-se qual o tempo necessário para o sistema sofrer 50% de queda de pressão. Foi observado que o sistema levou cerca de 23 horas para que a pressão no interior do tubo chegasse a menos de 4 bar.

O resultado do ensaio foi satisfatório, uma vez que esse tempo é muito maior que o tempo esperado que ocorra o vazamento do tubo após o impacto.

2.5.5 Desenvolvimento de ensaios qualitativos

A fim de conhecer o comportamento do material quando solicitado a cargas de impacto, foram realizados alguns ensaios com diferentes energias de impacto procurando identificar o comportamento do material estudado.

A seguir, será apresentado o comportamento do tubo de fibra de vidro sujeito a cargas de impacto com energia sucessivamente crescente:

1. Inicialmente não é observado nenhum tipo de alteração no espécime.
2. Inicia-se a formação de delaminações na região do impacto.
3. Inicia-se a formação de delaminações na região oposta ao impacto.
4. Vazamento do ar comprimido existente no interior do tubo, ocorrendo na região de impacto.
5. Inicia-se a formação de delaminações nas extremidades de tudo e observam-se deformações permanentes significativas.
6. Rompimento do tubo na região central ou nas extremidades.

Uma seqüência visual do comportamento do tubo de vibra de vidro sujeito ao impacto na região central está apresentada na Figura 42.

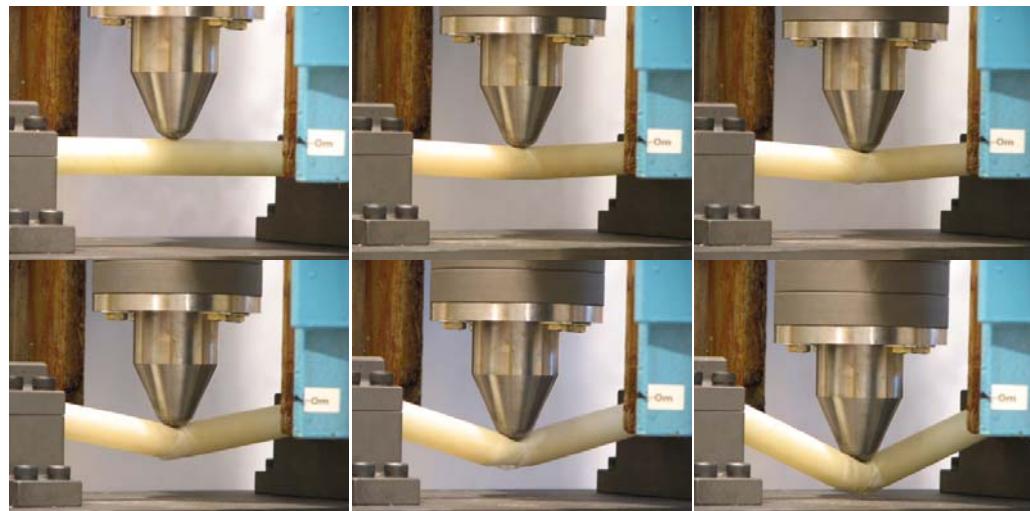


Figura 42 - Sequencia qualitativa dos danos ao tubo após o impacto.

2.6 DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A definição de um procedimento experimental é importante por minimizar a possibilidade de erro durante a realização dos ensaios experimentais e, assim, minimizar a decorrente perda de recursos humanos e financeiros com isso. As etapas definidas no procedimento experimental devem ser seguidas do mesmo modo e na mesma seqüência durante a realização dos experimentos.

Tendo em vista todos os elementos que constituem o aparto experimental, foi formulado o seguinte procedimento experimental:

1. Instalação e fixação do espécime junto à base para fixação e pressurização utilizada no martelo de impacto.
2. Pressurização do espécime com magnitude referente ao ensaio desenvolvido e fechamento da válvula.
3. Realização do ensaio de impacto.
4. Medição dos efeitos relevantes para o experimento
5. Obtenção do perfil do espécime após o impacto.
6. Registro do ensaio realizado.
7. Retirada do espécime do martelo de impacto e identificação do mesmo.

Após a realização dos ensaios experimentais, serão escolhido cerca de cinco tipos de resultados qualitativos diferentes e estes serão repetidos a fim de que sejam registrados através da câmera de alta velocidade.

Até o início da realização dos experimentos, estes procedimentos experimentais podem ser alterados convenientemente.

3 OS MATERIAIS COMPOSTOS

Neste item será realizada uma breve apresentação dos materiais compostos, ou compósitos, assim com a definição do espécime a ser utilizado para o estudo. Também será realizada uma breve apresentação da Teoria Clássica da Laminação.

3.1 OS MATERIAIS COMPOSTOS

Segundo (Mendonça, 2005), o material composto é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem com uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta. Deste modo, muitos materiais comuns enquadram-se como materiais compostos, como por exemplo, ossos animais, madeiras e concreto. No entanto, entende-se neste trabalho como material composto, ou compósito, como os materiais plásticos modernos ou plásticos reforçados com fibra de alta resistência.

Em geral, neste material encontram-se duas fases, uma polimérica, geralmente em maior volume denominada resina ou matriz. Esta fase geralmente é constituída por um polímero de base fenólica, epoxídica ou poliéster, apresentando propriedades mecânicas comuns a este tipo de materiais plásticos e basicamente garante a adesão entre os elementos de segunda fase: as fibras de alta resistência.

Esta segunda fase é geralmente a responsável pela elevada resistência mecânica do composto, sendo geralmente constituídas por materiais cerâmicos, como fibra de carbono, vidro ou aramida (Kevlar®). Geralmente no material compostos há a formação de camadas ou lâminas sobrepostas de fibras impregnadas com a resina. A aplicação destes materiais geralmente encontram-se em estruturas otimizadas como aeronaves, carros de corrida ou barcos, em virtude de sua elevada relação resistência-peso, possibilitando o desenvolvimento de estruturas leves e altamente resistentes.

Outra aplicação crescente deste material encontra-se em ambientes adversos, como sob condições de elevada temperatura, pressão ou corrosão, em função de seus

constituintes geralmente não serem metálicos e inertes. Nota-se a aplicação deste material em condições habituais para a indústria de petróleo e gás, como:

- O ambiente marítimo é seu elevado nível de corrosão existente neste ambiente;
- Os níveis geralmente elevados de pressão e temperatura dentro de um poço de petróleo
- Os sistemas de re-injeção de água e gás carbônico, também altamente corrosivo para materiais metálicos;
- Os sistemas de escoamento multifásicos, entre outros.

Conforme a descrição apresentada dos materiais compostos, pode-se concluir que os mesmos apresentam heterogeneia e anisotropia, uma vez que estes são constituídos por pelo menos dois elementos, a fibra e a matriz, e por possuírem suas propriedades mecânicas dependentes da direção de solicitação. Assim, a análise estrutural deste tipo de material acaba se tornando uma atividade não trivial.

3.2 TEORIA CLASSICA DA LAMINAÇÃO

A técnica comumente utilizada para o dimensionamento e análise de um material composto é denominada Teoria Clássica da Laminação. Neste item será apresentada um breve apresentação desta, não sendo escopo do trabalho, o detalhamento de seu desenvolvimento.

A Teoria Clássica da Laminação consiste na modelagem do comportamento macromecânico do material em regime elástico-linear, supondo-se conhecidas as propriedades mecânicas de cada lâmina. Esta teoria leva em consideração as hipóteses de Kirchhoff, sendo estas:

- O laminado é constituído por lâminas perfeitamente aderidas, sem deslizamento entre estas;
- A camada de resina entre as lâminas é infinitesimalmente fina, sendo desconsiderada na espessura do laminado;

- O laminado é considerado delgado, sendo o comprimento do mesmo muito maior que a espessura deste;
- O laminado é considerado sob o estado plano de deformações. Desse modo não há distorções e deformações fora do plano do laminado. Pode-se concluir, portanto, que as secções transversais das camadas do laminado permanecem paralelas entre si e perpendiculares a uma superfície de referência após a solicitação.

Tomando como base a Figura 43 e as hipóteses consideradas, podem-se considerar os deslocamentos conforme as Equações (11), (12) e (13).

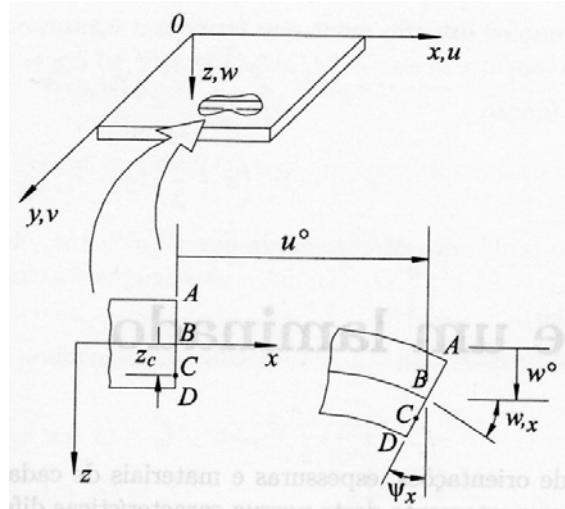


Figura 43 - Deformação de um laminado no plano xz (Mendonça, 2005).

$$u(u, y, z) = u^o(x, y) + z\psi_x(x, y)$$

$$v(u, y, z) = v^o(x, y) + z\psi_y(x, y)$$

$$\psi_x = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad \psi_y = -\frac{\partial w}{\partial y}$$

$$u(u, y, z) = u^o(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial x}(x, y) \quad (11)$$

$$v(u, y, z) = v^o(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial y}(x, y) \quad (12)$$

$$w(x, y, z) = w(x, y) \quad (13)$$

Considerando as relações de deformações e distorções, podem-se definir as deformações e distorções da lâmina a partir dos deslocamentos u , v e w , conforme apresentado nas Equações (14), (15) e (16). A partir da interpretação física dos termos de tais equações, podem-se definir as deformações de membrana, $\{\varepsilon^o\}$, estando esta relacionada às deformações coplanares na lâmina, e as curvaturas, $\{k\}$, relacionada à flexão da lâmina. Ambas as deformações estão apresentadas respectivamente nas Equações (17) e (18).

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$$

$$\varepsilon_x(x, y, z) = \frac{\partial u^o(x, y)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} \quad (14)$$

$$\varepsilon_y(x, y, z) = \frac{\partial v^o(x, y)}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} \quad (15)$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z) = \frac{\partial u^o(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v^o(x, y)}{\partial x} - z 2 \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x \partial y} \quad (16)$$

$$\{\varepsilon^o\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} \frac{\partial u^o}{\partial x} \\ \frac{\partial v^o}{\partial y} \\ \frac{\partial u^o}{\partial y} + \frac{\partial v^o}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$\{k\} = \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \equiv - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Considerando a relação de rigidez apresentada na Equação (19), a relação de rigidez da lâmina é definida na Equação (20). É comum a considerar a lâmina em estado plano de tensão, sendo para este caso definida a matriz de rigidez da lâmina, $[\bar{Q}]$, pelas Equações (21), sendo θ a direção principal da fibra em cada lâmina.

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}] \{\varepsilon\} \quad (19)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^o\} + z\{k\}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^k = \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{31} & \bar{Q}_{32} & \bar{Q}_{33} \end{Bmatrix}^k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_1 \cos^4 \theta + 2(Q_2 + 2Q_3) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_2 \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{22} &= Q_1 \sin^4 \theta + 2(Q_2 + 2Q_3) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_2 \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{33} &= 2(Q_1 - Q_2 - Q_3) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_3 (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{12} &= \bar{Q}_{21} = (2Q_1 - 4Q_3) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_2 (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{13} &= \bar{Q}_{31} = (Q_1 - Q_2 - 2Q_3) \sin \theta \cos^3 \theta + 2Q_3 \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{23} &= \bar{Q}_{32} = (Q_1 - Q_2 - 2Q_3) \sin^3 \theta \cos \theta + 2Q_3 \sin \theta \cos^3 \theta \end{aligned} \quad (21)$$

$$Q_1 = \frac{E_l}{1 - \nu_l^2} \quad Q_2 = \frac{\nu_l E_l}{1 - \nu_l^2} \quad Q_3 = \frac{E_l}{2(1 - \nu_l)} = G_l$$

Considerando z_k como a cota do plano médio da lâmina k , conforme apresentado na Figura 44. Pode-se observar que as solicitações no laminado podem ser obtidas a partir da integração das relações de rigidez de cada lâmina, conforme apresentado nas Equações (22) e (23).

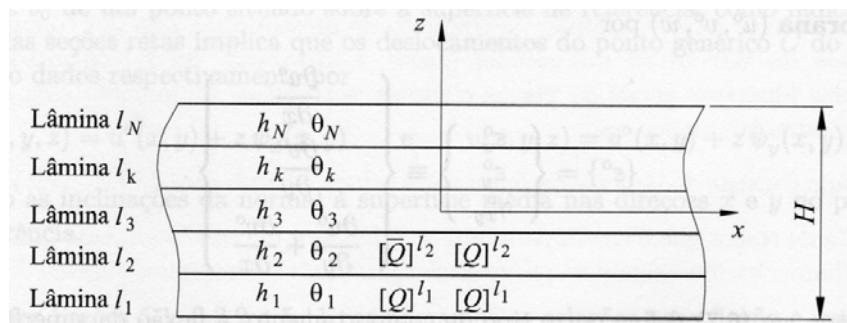


Figura 44 - Representação esquemática do laminado (Mendonça, 2005).

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xz} \end{Bmatrix} = \int_{-H/2}^{H/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^{l_k} dz \quad (22)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xz} \end{Bmatrix} = \int_{-H/2}^{H/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} z \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^{l_k} dz \quad (23)$$

Substituindo a Equação (20) nas Equações (22) e (23) e desenvolvendo as integrações e somatórios, se obtém a Equação (24).

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & B_{11} & B_{21} & B_{31} \\ A_{21} & A_{22} & A_{32} & B_{21} & B_{22} & B_{32} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ B_{11} & B_{21} & B_{31} & D_{11} & D_{21} & D_{31} \\ B_{21} & B_{22} & B_{32} & D_{21} & D_{22} & D_{32} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k - z_{k-1}) \quad B_{ij} = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \right] \quad D_{ij} = \frac{1}{3} \left[\sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \right]$$

Com esta relação, obtém-se o comportamento macromecânico do material a partir das solicitações no laminado e das propriedades geométricas e mecânicas das lâminas. Pode-se definir a matriz de rigidez extensional, $\{A\}$, a matriz de acoplamento entre flexão e extensão, $\{B\}$, e a matriz de rigidez à flexão, $\{D\}$.

Deve-se frisar que a Teoria Clássica da Laminação apresentada é válida apenas para o material em regime elástico-linear, não sendo esta formulação, diretamente aplicável em condição de falha parcial ou total das camadas do laminado.

3.3 DEFINIÇÃO DO MATERIAL A SER ENSAIADO

Para a realização dos ensaios experimentais serão utilizados tubos de fibra de vidro e resina epóxi fabricados com técnica de filamento contínuo. Em virtude do aparato

para fixação de tubos no martelo de impacto, os tubos utilizados devem apresentar diâmetro externo de 20 mm. Lançando mão do catálogo da empresa Ameron Fiberglass-Composite Pipes, fornecedora de tubos de materiais compostos para a PETROBRAS.

Optou-se por definir o diâmetro interno do tubo a ser ensaiado como um modelo escalonado de um dos produtos comercializados por esta empresa. Foi definido, portanto, o diâmetro interno de 17 mm para o espécime, sendo assim, uma escala aproximada de 1:2 do produto SP1500 fornecido por esta, conforme apresentado na Tabela 15. O ângulo enrolamento da fibra foi definido como $+55^\circ$ e -55° , conforme dados do fabricante. O motivo deste deve-se, segundo a empresa, a uma melhor relação de resistência à pressão interna e resistência mecânica do duto. Um exemplo desse tipo de tubulação está apresentado na Figura 45.

Tabela 15 – Especificações do tubo a ser ensaiado.

| | Tubo em estudo | Tubo Amerom mod. SP 1500 |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Diâmetro interno (mm) | 17 mm | 40 mm |
| Espessura de parede (mm) | 1,5 mm | 2,3 mm |
| Material | Fibra de vidro com resina epóxi | Fibra de vidro com resina epóxi |
| Ângulo de enrolamento da fibra | $+/-55^\circ$ | $+/-55^\circ$ |



Figura 45 - Exemplo de tubos fabricado pela Ameron Fiber-glass composites pipes.

Junto à empresa MCS Industrial, foram adquiridos 100 espécimes conforme as especificações definidas na Tabela 15, sendo estes fabricados pela técnica do filamento contínuo, a mesma utilizada pelo fornecedor desses produtos para a PETROBRAS.

A técnica mais utilizada para a fabricação de dutos ou peças em revolução com materiais compostos é o filamento contínuo. Neste caso, a peça é enrolada por um fio contínuo de fibra de alta resistência impregnada com resina polimérica contendo um ângulo de avanço bem definido. Neste caso há a organização das fibras em direções principais e a formação de camadas unidirecionais com direções alternadas. Para este trabalho, estas camadas não serão denominadas de lâminas a fim de evitar um mau entendimento com relação à laminação, outro processo de fabricação de materiais compostos.

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 Figura 46.

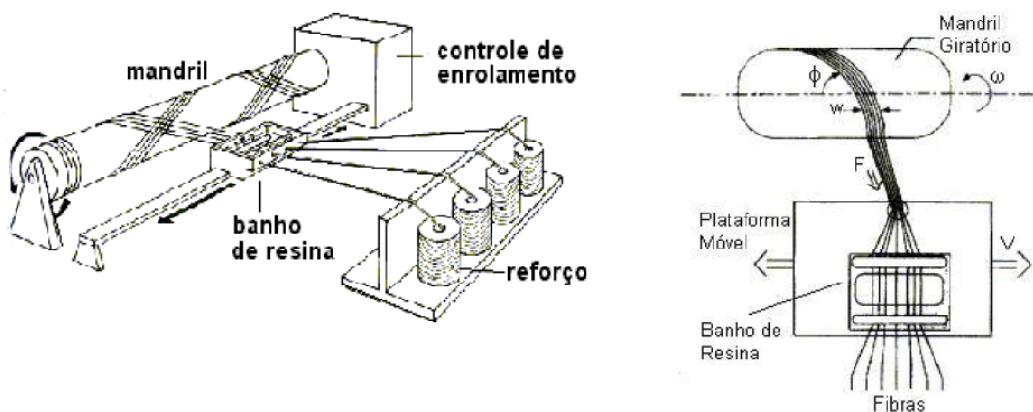


Figura 46 - Técnica de fabricação de dutos por filamento contínuo.

4 RESULTADO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste item será apresentada a realização dos ensaios experimentais, assim como a descrição dos seus objetivos e resultados neste obtidos.

Os ensaios experimentais realizados objetivaram analisar:

- O comportamento mecânico do espécime submetido ao impacto;
- Os efeitos da pressão interna no fenômeno de impacto;
- Os efeitos da velocidade de impacto no elemento estudado.

4.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ESPÉCIME

Para a realização dos ensaios de definição do comportamento mecânico do espécime, foram realizados sucessivos ensaios de impacto contra os tubos ensaiados tomando energia crescente. A massa de impacto foi mantida constante com 5,4 kg e a altura de impacto foi aumentada sucessivamente. Os ensaios foram repetidos em até quatro vezes quando julgado necessário.

Segundo o experimento desenvolvido, se observou falhas na região impactada e nas extremidades do material ensaiado, fenômeno característico de impacto com baixa velocidade. Segundo o experimento, a análise qualitativa do comportamento mecânico do tubo de material composto ensaiado após o término do experimento está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Análise qualitativa do comportamento mecânico do tubo ensaiado sob diferentes cargas de impacto.

| Energia de impacto | Descrição do comportamento |
|--------------------|--|
| Até 3 J | Nada aparentemente. |
| 6 J | Formação de delaminações na região de contato. |
| 13 J | Formação de delaminações na região oposta ao contato. |
| 37 J | Formação de delaminações nas extremidades e formação de deformações permanentes. |
| 47 J | Rompimento do tubo na região central. |
| 68 J | Rompimento do tubo nas extremidades. |

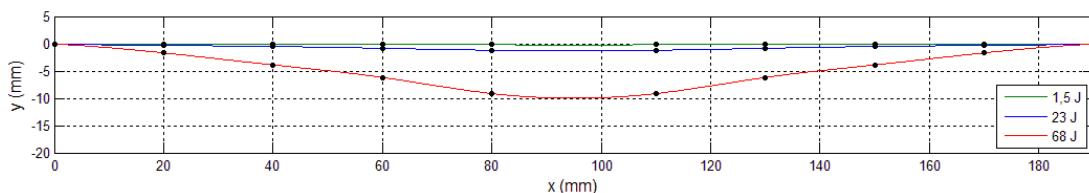


Figura 47 - Perfil do tubo ensaiado após o térmido do experimento realizado sob impacto de 1,5 J; 23

O perfil do tubo após o experimento sob três diferentes cargas de impacto está apresentado na Figura 47. Observa-se, nesta figura, o aumento da deformação do perfil do duto após o impacto. Observa-se também a formação de núcleo de deformações plásticas na região de impacto e engastamentos. O perfil de absorção de energia ao longo dos sucessivos contatos entre o tubo e o identador está apresentado na Figura 48.

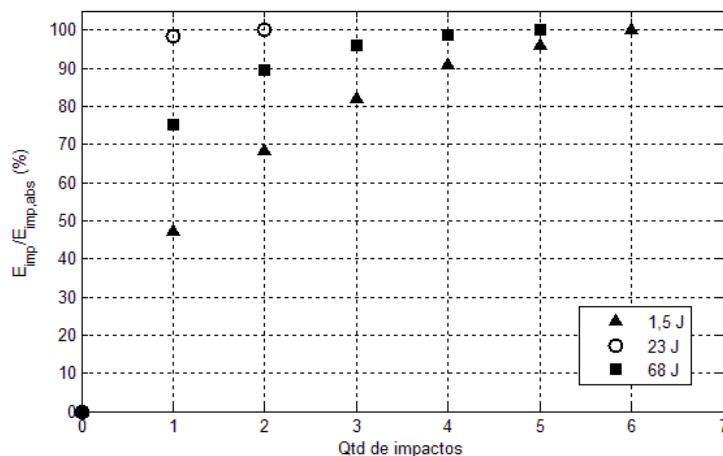
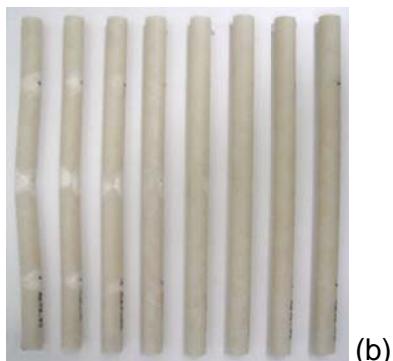


Figura 48 - Perfil do tubo ensaiado após o término do experimento realizado, sob impacto de 1,5 J, 23 J e 68 J.

Nota-se que para o impacto de baixa energia, como 1,5 J, há uma maior quantidade de contatos entre o tubo e o identador e a absorção de energia é crescente ao longo destes. Neste experimento não são observadas falhas, deformações permanentes ou delaminações significativas, o que demonstra um comportamento mais próximo ao regime elástico do material. Por sua vez, quando há o impacto sob elevada energia, como 68 J, há um número reduzido de contatos entre o tubo e o identador e a maior parte da energia de impacto (cerca de 98%) é absorvida no primeiro contato. Neste experimento são observados o rompimento do tubo, delaminações significantes e deformações permanentes.

O resultado deste ensaio sob alguns espécimes está apresentado na (a)



(b)

Figura 49.



(a)



(b)

Figura 49 - Espécimes após o ensaio de caracterização do comportamento mecânico. Vista superior (a) e vista lateral (b).

Este experimento foi observado com auxílio da câmera de alta velocidade, mensurado com o sensor de velocidade a laser e perfil do tubo foi adquirido com o sensor apalpador, possibilitando a obtenção de parâmetros de comparação para futuras simulações numéricas do fenômeno em questão.

Deve-se frisar que os parâmetros aqui obtidos são relativos ao experimento de impacto desenvolvido e não é escopo deste trabalho a extração destes resultados para tubulações reais e maiores.

4.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE PRESSÃO INTERNA

Para a realização dos ensaios para avaliação do efeito da adição de pressão interna durante o fenômeno de impacto, foram realizados ensaios de queda de peso sob

níveis de energia de 5J e 49J. A massa de impacto utilizada foi de 5,4 kg e sob estes níveis de energia de impacto, foram considerados dois níveis de pressão interna, sendo estes 80 lb/in² (0,8 MPa) e pressão atmosférica (sem pressão efetiva), totalizando quatro experimentos realizados. Os ensaios foram repetidos em até quatro vezes quando julgado necessário.

Os resultados de deslocamento e velocidade para o primeiro impacto dos experimentos descritos acima estão apresentados nas Figura 50 e Figura 51. Qualitativamente não foi possível observar diferenças entre os ensaios realizados.

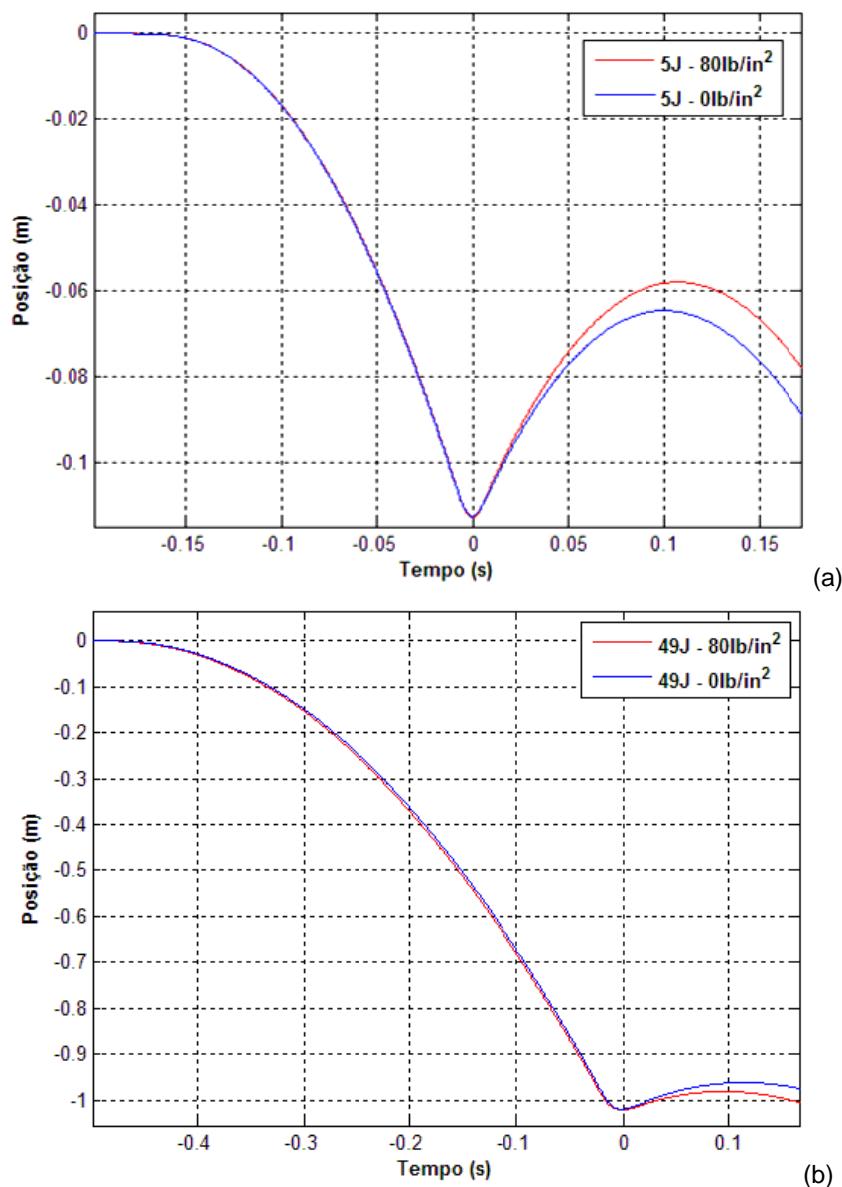


Figura 50 - Perfil de deslocamento do identador durante o primeiro impacto para impacto de 5J (a) e 49J (b).

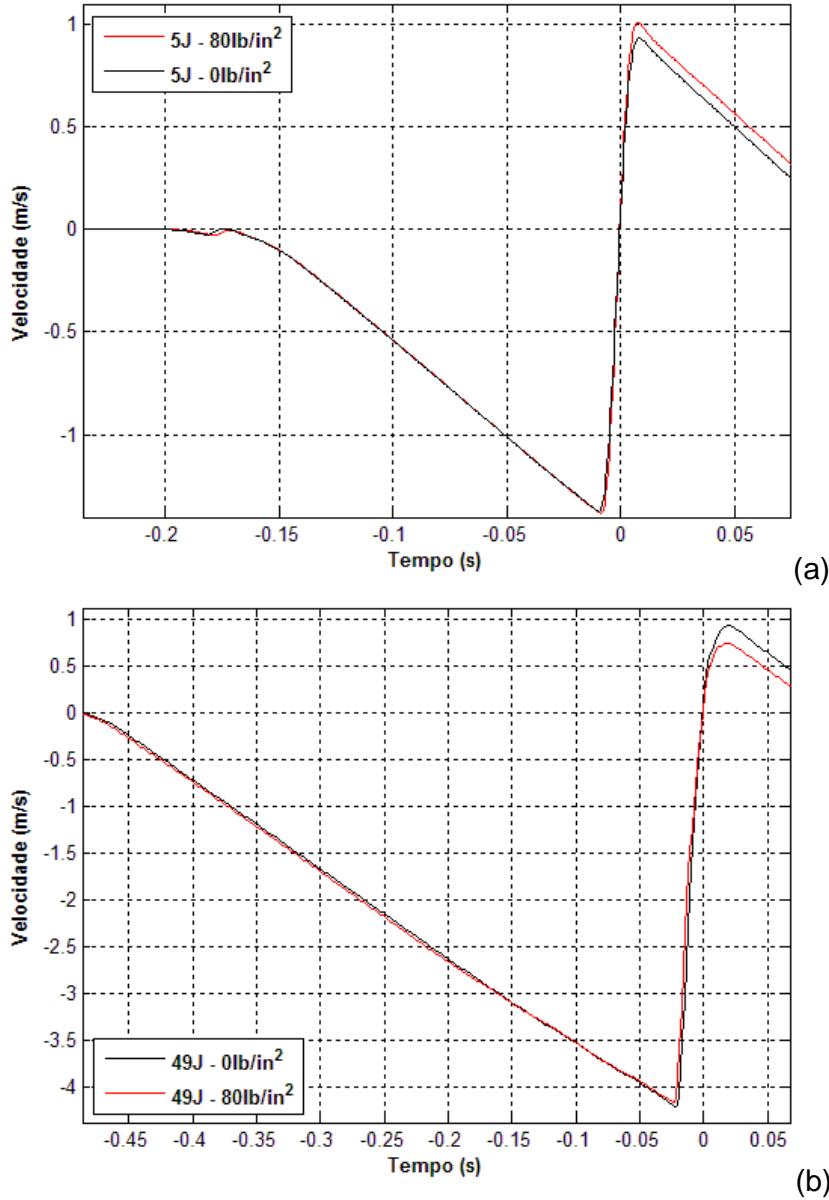


Figura 51 - Perfil de velocidade do identador durante o primeiro impacto para impacto de 5J (a) e 49J (b).

Com o impacto de 1J, não é observado falha no duto, sendo este um experimento basicamente elástico. A partir a análise da Figura 50, é possível observar que a adição de pressão interna intensifica a velocidade de retorno do identador após o primeiro impacto. Neste caso, por não ocorrer falha no espécime, a adição de pressão interna no duto aumenta a rigidez do sistema.

Com o impacto de 49J, é observada a falha do espécime ensaiado, por não haver o retorno significativo do identador após o impacto, conforme pode ser observado na Figura 50. Nota-se ainda que, para este experimento, a adição de pressão interna

fez o identador ter uma velocidade menor após o impacto, o que pode ser causado pela intensificação da falha do material com a adição deste, no entanto neste experimento não foi observado o colapso do duto.

Fenômeno semelhante é descrito em (Kaneko, et al., 2008). Neste caso, quanto o duto de material composto é submetido a uma pressão interna próxima de sua pressão de colapso, um impacto contra este duto pode intensificar a falha do mesmo, causando colapso prematuro da estrutura. Por impossibilidade de aplicação de maiores níveis de pressão interna no espécime, não foi possível a realização deste experimento, porém este fenômeno será foco de estudo com o desenvolvimento do modelo numérico do experimento.

Com o auxílio da câmera de alta velocidade e a adição de pressão interna ao espécime, foi possível observar os locais de vazamento de fluido interno no duto após o impacto. Observa-se na Figura 52, que há o vazamento intenso do fluido na região de fixação do tubo e menos intensamente na região central, tanto na face superior, onde ocorre o impacto, ou na face inferior, oposta ao impacto. Nesta imagem, o gás pressurizante possui a coloração esbranquiçada por ter sido adicionado talco a este para melhor visualização.



Figura 52 – Observação dos locais de vazamento de fluido durante o impacto.

4.3 EFEITO DA VELOCIDADE DE IMPACTO

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), 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 variação da taxa de deformação do espécime estudado, foram realizados ensaios de queda de peso com mesma energia de impacto, porém sob diferentes velocidades de impacto. Na Equação 25 é apresentada a metodologia utilizada para a definição deste experimento.

$$E_{cin} = \frac{mv^2}{2}$$

$$E_{pot,1} = E_{pot,2}$$

$$m_1v_1^2 = m_2v_2^2 \quad (25)$$

Nestes experimentos foi objetivada a realização de impacto com 40J, utilizando massa de impacto de 6,5 Kg e 12,7Kg e velocidade de impacto de 3,5m/s e 2,5 m/s, respectivamente, totalizando dois experimentos realizados. Os ensaios foram repetidos em até quatro vezes quando julgado necessário. Na Figura 53 é apresentado o comportamento de dois espécimes estudado sob tais condições. Qualitativamente não foi possível observar diferenças entre os ensaios realizados.

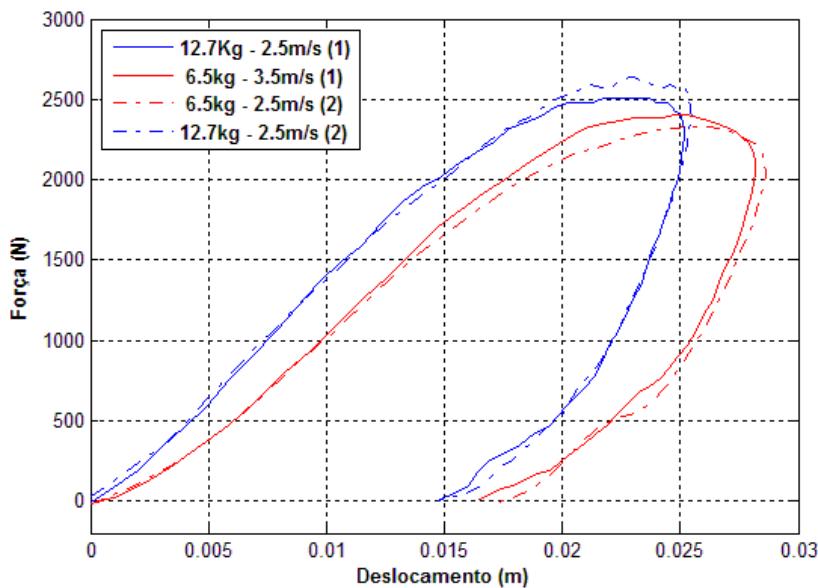


Figura 53 – Comportamento do espécime sob duas taxas de deformação distintas.

A partir da análise da figura, observa-se a diferenciação do comportamento do material quando solicitado sob diferentes taxas de deformação, assim como esperado pela literatura. No entanto, segundo (Santiago, et al., 2007), espera-se o aumento da rigidez do material quando a taxa de deformação deste é aumentada, no entanto, a Figura 53 mostra 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.

No entanto, esta variação pode ser considerada pouco significante para o fenômeno, uma vez que o nível de carga máxima suportada pelo tubo é semelhante, ou seja, a resistência do material permanece a mesma em ambas as taxas de deformação, o que não é esperado pela literatura e em (Santiago, et al., 2007). Segundo tais fontes, o aumento da taxa de deformação causa um aumento da tensão máxima suportada pelo material composto. Além disso, sabe-se que o efeito de taxa de deformação é pouco significante para eventos de impacto de baixa velocidade, como o fenômeno aqui estudado.

Outra possível causa para a contraposição aqui encontrada pode estar relacionada com a existência e propagação de falhas e a dependência destas com a taxa de deformação.

No item 6.3, será realizada a análise numérica do efeito da taxa de deformação fenômeno de impacto em questão e maiores discussões a respeito deste efeito.

5 DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE NUMÉRICA

Nesta secção será apresentada uma breve apresentação dos métodos dos elementos finitos, assim como sua utilização em engenharia. Posteriormente será descrito o desenvolvimento do modelo numérico utilizado para o estudo do fenômeno de impacto em questão.

5.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos por essência consiste em uma ferramenta matemática para a solução de equações diferenciais de ordem elevada. Em engenharia, tem-se que o equilíbrio de diversos tipos de estruturas é obtido através de equações diferenciais cuja solução analítica muitas vezes é inexistente. Desse modo, o Método dos Elementos Finitos tem-se mostrado como uma ferramenta de grande valia para a solução destes problemas, principalmente após o desenvolvimento e melhoria da capacidade computacional disponíveis.

Matematicamente, o método basicamente consiste na discretização do espaço amostral no qual a equação diferencial é aplicável. Nesta discretização, definem-se nós (pontos) no espaço amostral e elementos, a união de uma quantidade definida de nós. Sob os nós são aplicadas as condições de contorno desejadas à equação diferencial, e sob elementos, são definidas condições de continuidade entre estes e é a própria equação diferencial. Desse modo, a solução é obtida a partir da solução da equação em cada elemento e a respectiva continuidade imposta a estes.

A aplicação física deste método consiste na idealização da estrutura analisada, como, por exemplo, em treliças, vigas, cascas ou sólidos. Em decorrência dessa idealização, defini-se a equação diferencial governante deste modelo, o tipo de elemento a ser utilizado, o modo de interpolação entre estes e a matriz de rigidez do sistema. O espaço amostral em que se deseja a análise consiste no próprio componente a ser analisado, como por exemplo, uma peça de um motor, uma ponte rodoviária ou um avião. Estes exemplos, principalmente com o auxílio de ferramentas CAD (“Computer Aided Design”), são facilmente discretizados, possibilitando a aplicação do método e facilitando a visualização dos resultados.

Pode-se notar que, em muitos casos, um dos principais limitantes deste método acaba sendo apenas a capacidade de processamento. Freqüentemente, há a união do Método de Elementos Finitos com ferramentas de desenho CAD também é denominada de CAE, ou “Computer Aided Engineering”.

O uso do Método dos Elementos Finitos em engenharia tem se intensificado também com o advento de programas comerciais de análise estrutural que utilizam esta ferramenta e principalmente após a validação de resultados obtidos através destes. Com isso, empresas e projetistas têm a possibilidade da realização de ensaios numéricos e a diminuição de gastos com recursos destinados ao desenvolvimento de ensaios experimentais, que têm se mostrado intensamente onerosos e de alto custo financeiro.

No entanto deve-se frisar que o Método dos Elementos Finitos consiste em uma ferramenta matemática, e a representação de diversos efeitos reais, como o comportamento real do material e imperfeições, acabam sendo onerosas ou muitas vezes impossíveis. Além disso, por se tratar de uma ferramenta numérica, esta está sujeita a diversos erros de origem computacional, sem possuírem uma interpretação física. Agravando ainda mais este quadro, tem-se que as interfaces geradas por programas CAE comerciais são extremamente amigáveis e de fácil entendimento, o que possibilita virtualmente a qualquer pessoa a realização de uma análise estrutural, estando esta habilitada ou não.

Desse modo, a utilização de ferramentas numéricas deve ser realizada com cautela e critério, sendo esta devidamente conhecida, estudada e, de preferência, baseada em estudos experimentais que validem ou geram um grau de confiabilidade em seus resultados.

5.2 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM MATERIAIS COMPOSTOS

A utilização do Método dos Elementos Finitos em estruturas de materiais compostos tem se mostrado crescente a cada vez mais confiável, principalmente com relação aos fenômenos de impacto sob tais estruturas.

Em (Tasdermirci, et al., 2006) é realizada a caracterização e simulação de uma fibra de vidro tipo S2 com resina epóxi utilizando a Barra de Hopkinson (*Split Pressure Hopkinson Bar – SPHB*), equipamento capaz realizar a caracterização mecânica do material sob elevadas taxas de deformação. Este experimento basicamente consiste em um evento de impacto. Neste, a simulação numérica é realizada utilizando o programa LS-Dyna, obtendo resultados consistentes com os obtidos nos ensaios experimentais. Na Figura 54 é apresentada uma comparação entre um espécime utilizado na SPHB e sua respectiva simulação numérica, sendo possível observar sua significativa semelhança. Observa-se a delaminação na simulação numérica, sendo esta o modo de falha em material composto onde ocorre a separação entre as camadas do laminado e muito complexo de ser obtido em modelos numéricos de simulação de materiais compostos.

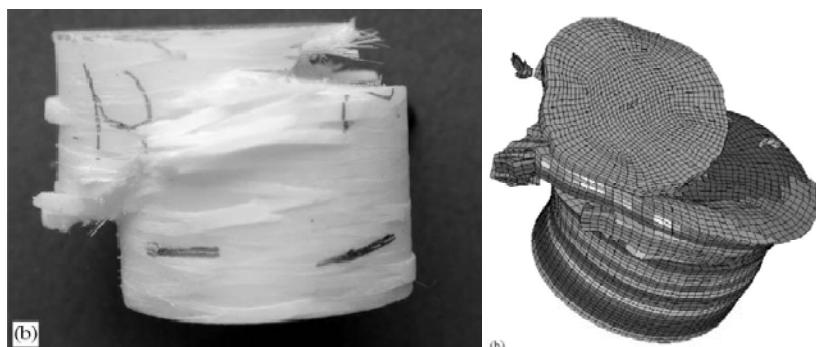


Figura 54 - Resultado experimental, à esquerda, e numérico, à direita (Tasdermirci, et al., 2006).

Neste trabalho foi realizada a simulação numérica de modo explícito utilizando o modelo de material MAT162 recentemente incorporado ao LS-Dyna v.970, que considera efeitos de dano progressivo e delaminação para materiais compostos. Neste trabalho são utilizados elementos sólidos para a simulação.

Em trabalho recente do grupo de pesquisa (Azevedo, et al., 2007), no qual o autor teve participação ao longo do ano de 2006, foi realizada o estudo de impacto de pássaros em estruturas aeronáuticas de materiais compostos. Para esta análise, foi utilizado o programa comercial LS-Dyna v.970, obtendo resultados qualitativamente semelhantes com a realidade.

Em (Murray, et al., 1993), é apresentado que a utilização de elementos de casca para a simulação de materiais compostos não apresenta a mesma qualidade dos resultados obtidos para as simulações com materiais elásticos e lineares, sendo

mais indicada a utilização de materiais sólidos para o trabalho com materiais compostos. No entanto, esta configuração demanda uma maior capacidade computacional.

Em (Kaneko, et al., 2008) é realizada simulação numérica de impacto contra um vazo de pressão fabricado com materiais compostos pela técnica do filamento contínuo. Numericamente foi possível observar o fenômeno de colapso da estrutura (ou explosão) quando esta é pressurizada em um nível pressão próximo ao máximo suportado e sofre um impacto mecânico.

5.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

Para o inicio das atividades em ambiente numérico optou-se por realizar o aprendizado do pacote comercial Altair Hyperworks 7.0, software comercial de elementos finitos que será utilizado para os estudos numéricos do fenômeno de impacto objetivado. O aprendizado foi realizado de forma auto-didática, utilizando tutoriais obtidos a partir de pesquisas realizadas na internet e outras apostilas desenvolvidas por alunos do mesmo grupo de pesquisa. Foi objetivado o aprendizado dos programas Hypermesh, gerador de malhas, HyperWiew, visualizador de resultados e LS-Dyna, processador utilizado para os estudos de elementos finitos.

Com relação ao programa HyperMesh, utilizando o tutorial referente ao guia do usuário, foi possível a assimilação com a interface gráfica do programa e localização das funções relevantes para o desenvolvimento do projeto. Com relação ao programa HyperWiew, utilizando o guia do usuário e o tutorial de aprendizado básico foi possível assimilar algumas funções relevantes para o desenvolvimento do projeto.

Foi estudado também um tutorial de compatibilidade entre o pacote comercial HyperWorks e o processador LS-Dyna, configuração a ser utilizada para os estudos numéricos, podendo identificar a metodologia a ser seguida para a correta assimilação destas duas interfaces, reduzido problemas referentes a compilação e geração dos códigos necessários.

No tutorial (Gomes, 2007) é desenvolvido um modelo numérico de impacto de esfera rígida contra uma placa de alumínio, utilizando os programas HyperMesh,

HyperView e Ls-Dyna, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto de pesquisa. Um exemplo de simulação numérica desenvolvida está apresentado da Figura 55.

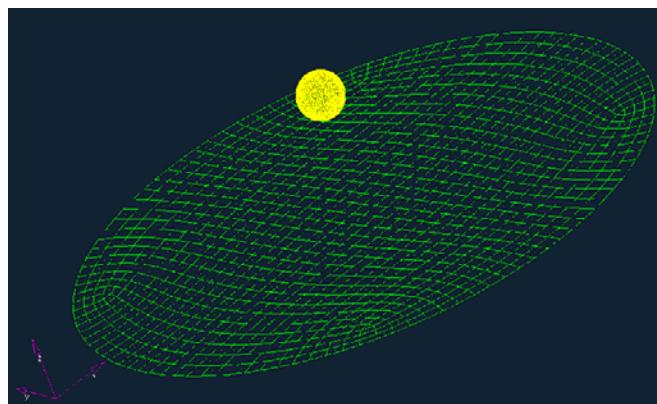


Figura 55 - Exemplo de simulação numérica desenvolvida.

O programa comercial de elementos finitos utilizado, o LS-Dyna, possibilita a utilização de modelos de materiais definidos, sendo estes desenvolvidos por importantes pesquisadores do assunto e validados em publicações internacionais. A estes modelos, devem ser definidos os parâmetros do material estudado. A maioria dos modelos de materiais compostos deste programa possibilita a escolha do tipo de elemento a ser utilizado na análise, como por exemplo, elementos de casca ou sólidos. Além destas definições, no programa deve ser definidos cartões de controle, que possibilitam o controle de erros numéricos, a monitorações de grandezas ou elementos, entre outras definições.

Conjuntamente ao aprendizado do software de elementos finitos foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de observar o “estado da arte” referente a simulações numéricas de impacto em materiais compostos utilizando como processador o programa LS-Dyna. Com esta atividade, buscou-se definir alguns parâmetros para a simulação numérica, como modelo de material, critérios de falha e modelos de elementos.

Em trabalho recente do grupo de pesquisa (Azevedo, et al., 2007), no qual o autor teve participação ao longo do ano de 2006, foi realizada a comparação entre alguns modelos de materiais aplicados a materiais compostos disponíveis para a utilização. A Tabela 17 relaciona alguns modelos de material para a simulação numérica de

materiais compostos utilizando elementos de casca levando em consideração a possibilidade de uso, efeitos de taxa de deformação.

Tabela 17 - Alguns modelos de materiais aplicados a materiais compostos.

| Modelo | Elementos de casca | Efeitos de taxa de deformação | Falha |
|---------|--------------------|-------------------------------|-------|
| MAT 22 | Sim | Não | Sim |
| MAT 54 | Sim | Não | Sim |
| MAT 55 | Sim | Não | Sim |
| MAT 59 | Sim | Não | Sim |
| MAT 161 | Não | Sim | Sim |

Em alguns estudos, como (Azevedo, et al., 2007) e (Rilard, et al., 2001), foi utilizado o critério de falha de Chang e Chang para o desenvolvimento das simulações numéricas, obtendo bons resultados.

Outra solução para a escolha do modelo de material é a utilização dos materiais MAT41 a MAT55, sendo estes modelos abertos a serem desenvolvidos pelo usuário.

Este trabalho é complexo e oneroso, não sendo escopo deste projeto de pesquisa.

Por definição, nos elementos de casca a tensão normal é desconsiderada em virtude da pequena espessura do mesmo. Deste modo a simulação da delaminação fica prejudicada ou até inviabilizada. Uma possível solução para a modelagem da delaminação com a utilização de elementos de casca é utilizar o cartão de contato CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK, gerando uma condição de adesão entre diferentes camadas de elementos de casca.

5.3.1 Definição da malha do modelo numérico

Para o estudo numérico, foi desenvolvida a geometria apresentada na Figura 56. Buscou-se simular a estrutura como um todo, não realizado a análise em apenas em metade ou um quarto da estrutura, aproveitando alguma simetria existente no problema.

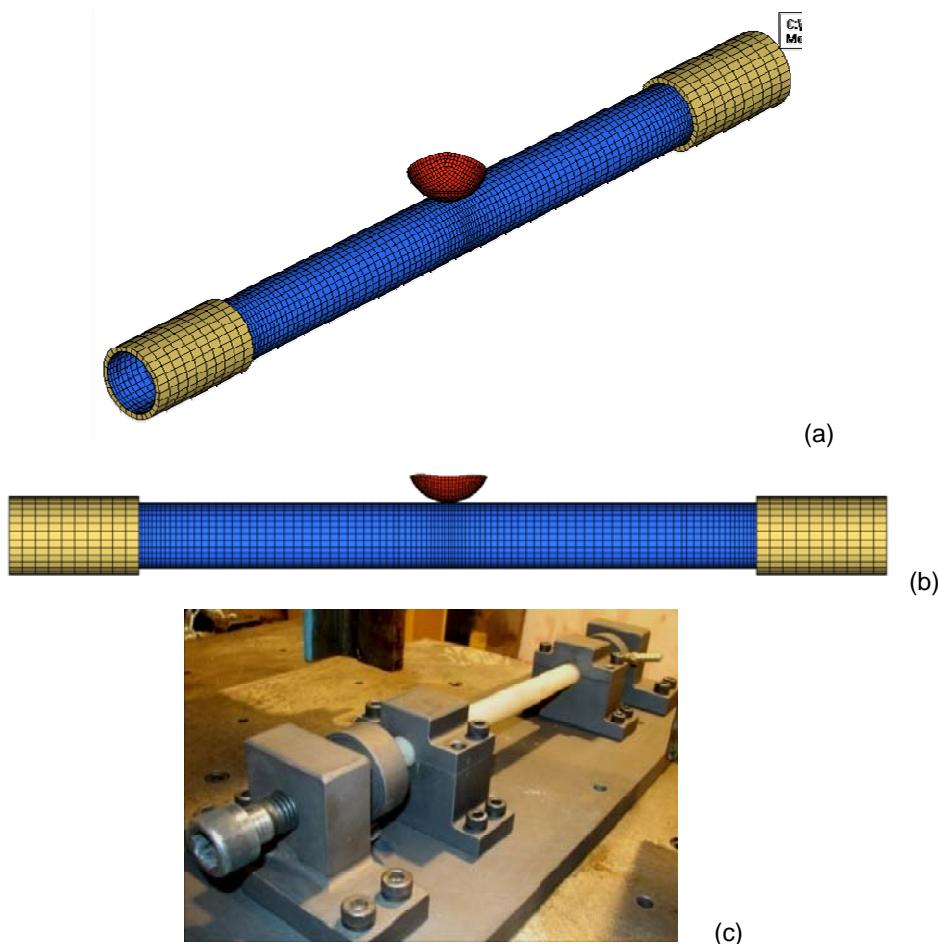


Figura 56 – Geometria desenvolvida para o modelo numérico (a) e (b), e experimento real (c).

O modelo desenvolvido consiste em um tubo com as mesmas propriedades geométricas dos espécimes descritos no item 3.3. Objetivando maior compromisso com a realidade, não foram definidas condições de contorno ao tubo. Com este fim, foram desenvolvidas partes nas extremidades deste, representando a base fixadora deste junto ao martelo de impacto.

Estes elementos 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 identador desenvolvido é constituído apenas pela extremidade do identador real, sendo esta uma calota esférica de raio 12,5mm. Este elemento é constituído por

elementos de casca perfeitamente rígido com propriedades comuns de aço-carbono ABNT1020. Na mesma Figura 56 é possível observar a semelhança entre o modelo desenvolvido e a realidade.

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

Uma vez desenvolvida a malha do evento a ser estudado, iniciou-se o processo de desenvolvimento de modelos numéricos, escolhendo a combinação de modelo de material e tipo de elemento do tubo que satisfaça os objetivos do projeto, mantendo, porém, um compromisso com a simplicidade do mesmo. A seguir serão apresentados os modelos desenvolvidos, assim como o procedimento para escolha do modelo utilizado.

5.3.2 Desenvolvimento do primeiro modelo numérico: MAT59 e elementos sólidos.

O desenvolvimento do primeiro modelo numérico foi baseado na utilização de elementos sólidos, uma vez destes, segundo (Murray, et al., 1993) representarem melhor o comportamento de materiais compostos. Além disso, o programa comercial utilizado disponibiliza apenas para elementos sólidos a utilização da simetria cilíndrica para a definição de uma única direção principal dos elementos, sendo neste caso o caso, a direção das fibras.

Na Figura 57, observa-se a condição de simetria disponibilizada pelo programa, sendo o vetor \vec{v} e o ponto P definidos pelo eixo de axial do tubo, e o vetor \vec{a} , a única direção do elemento. Nota-se que por esta metodologia, não é possível definir as duas direções principais das fibras do espécime e as camadas constituintes do material.

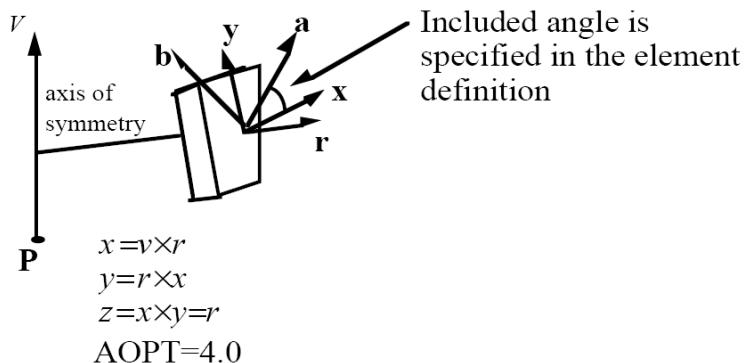


Figura 57 – Definição da direção principal do elemento sólido (Livermore Software Technology Corporation, 2003).

Para a definição do modelo de material, buscou-se utilizar o modelo mais simples que satisfaça a condição de utilização do elemento descrito anteriormente. Neste caso, utilizou-se o material MAT59, denominado MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL para o desenvolvimento do modelo. As propriedades preliminares do material foram definidas a partir de (Kaneko, et al., 2008) e (Mendonça, 2005).

O modelo desenvolvido está apresentado na Figura 58, no entanto os resultados obtidos não se mostravam válidos ou pertinentes com a realidade.

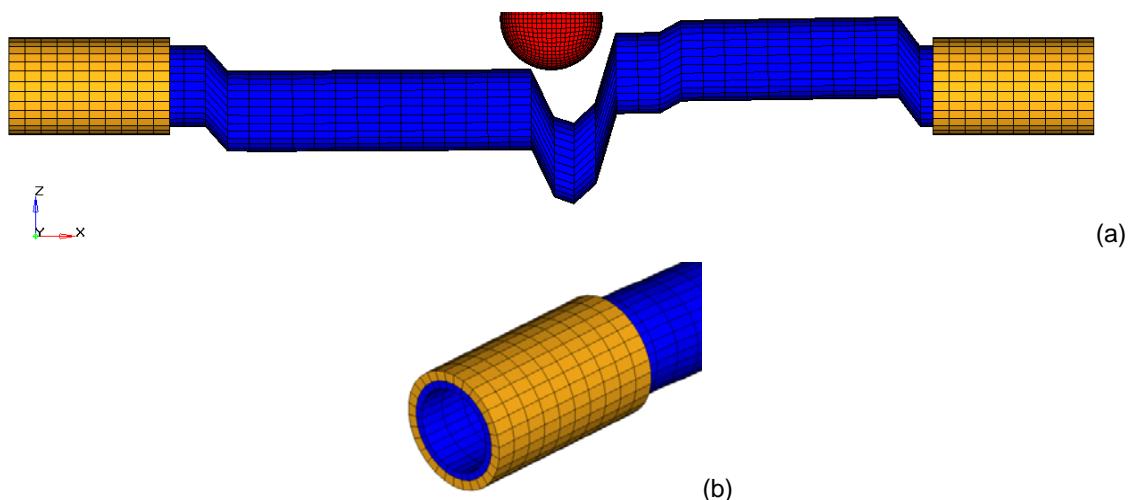


Figura 58 – Resultados da simulação utilizando elementos sólidos e MAT59. Um exemplo de erros numérico (a) e detalhe da utilização de elementos sólidos (b).

O modelo de material utilizado apresentava pouco ou nenhum embasamento teórico fornecido pelo programa, além disso, este demandava uma maior capacidade computacional do que havia disponível para o desenvolvimento deste trabalho. Notou-se também que o modelo mostrava-se excessivamente sucinto a erros numéricos. Desse modo, esse modelo exigia um controle rígido para minimização dos efeitos decorrentes destes. Um exemplo de erro numérico está apresentado na Figura 58.

Pelo diversos motivos descritos anteriormente, este modelo foi desconsiderado, dando início ao desenvolvimento de outros. Buscou-se, no entanto, um novo estudo sobre a utilização de materiais compostos no programa LS-Dyna.

5.3.3 Desenvolvimento do segundo modelo numérico: MAT22 e elementos de casca.

Para o desenvolvimento do segundo modelo numérico, foi observado que programa utilizado disponibilizava diversos recursos para a modelagem numérica de materiais compostos, utilizando elementos de casca, mesmo estes não serem diretamente indicados para este fim.

Utilizando elementos de casca, ao ativar a função LAMSHT, a Teoria Clássica da Laminação, apresentada no item 3.2, é adicionada à formulação do elemento de casca. Neste caso, o programa interpreta cada ponto de integração na espessura do elemento com sendo uma camada do composto, sendo possível definir a direção principal de cada uma destas. Na Figura 59 está apresentada uma representação esquemática das camadas do composto consideradas para o elemento de casca

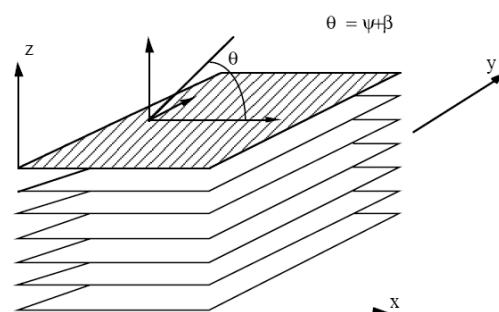


Figura 59 – Representação esquemática das camadas do composto utilizado no elemento de casca.

O modelo de material para material composto mais simples que possibilita a utilização do elemento de casca conforme descrito anteriormente é o modelo de material MAT22, denominado MAT_COMPOSITE_DAMAGE. As propriedades preliminares utilizadas neste modelo foram retiradas de (Kaneko, et al., 2008) e (Mendonça, 2005). Este modelo considera a ocorrência de falha no material.

O modelo desenvolvido, apresentado na Figura 60, forneceu resultados mais próximos dos obtidos nos ensaios experimentais, no entanto este modelo apresentava instabilidades dos resultados a partir do momento em que ocorria a falha de um elemento, conforme apresentado na Figura 60. Este fato prejudicava a análise em regime de grande energia de impacto e foi considerado como uma limitação do modelo, em virtude de sua simplicidade.

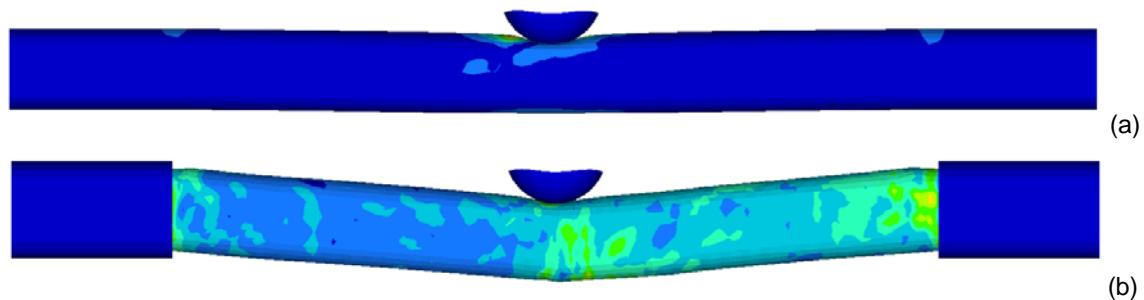


Figura 60 – Modelo desenvolvido utilizando MAT22 e elementos de casca (a). Exemplo de instabilidade obtida após a falha de um elemento (b).

Este fato levou a exclusão deste modelo, no entanto pode-se obter maior confiabilidade na utilização de elementos de casca, uma vez que foi possível atribuir ao modelo diversas propriedades ignoradas pelos elementos sólidos, como a quantidade e as duas direções possíveis das camadas. Além disso, o modelo numérico desenvolvido como elementos de casca demandava menores recursos computacionais e uma maior robustez a erros numéricos.

5.3.4 Desenvolvimento do terceiro modelo numérico: MAT54-55 e elementos de casca.

Com as limitações obtidas com a utilização do modelo de material MAT22, optou-se por desenvolver um modelo de material com maior grau de complexidade, porém

mantendo a utilização de elementos de casca, semelhantes ao modelo anterior. Desse modo, lançou-se mão da utilização do modelo de material MAT54-55, denominado MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE.

Este material constitui-se como um aprimoramento do modelo de material MAT22 e possibilita a consideração de dois critérios de falha: o critério de falha de Chang-Chang (MAT54) de Tsai-Wu (MAT55). Deve-se frisar que ambos os materiais são idênticos, sendo apenas o critério de falha como a única diferenciação entre eles.

Em exemplo de resultado obtido com este modelo está apresentado na Figura 61. Foram observados resultados qualitativamente e quantitativamente compatíveis com a realidade. Os resultados obtidos não apresentavam instabilidades, como o modelo anteriormente desenvolvido, e a capacidade de processamento mostrou-se compatível com o disponível para o trabalho.

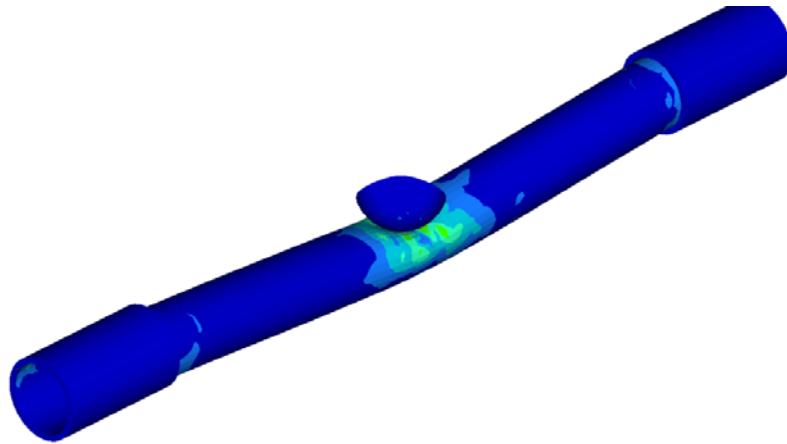


Figura 61 – Modelo desenvolvido utilizado MAT54-55 e elementos de casca.

Desse modo, este modelo foi escolhido para o desenvolvimento da análise numérica deste trabalho. A seguir, será realizada a descrição, apresentando detalhes do modelo de material, coeficientes e cartões de controle utilizados.

5.3.5 Detalhamento do modelo do modelo numérico utilizado

A modelagem do tubo de material composto foi realizada utilizando elementos de casca, sendo atribuída a Teoria Clássica da Laminação, apresentada no item 3.2, junto à formulação destes. O programa permite a definição da quantidade de

camadas e sua respectiva direção principal de fibras. Deste modo, foram consideradas 10 camadas ao longo da espessura, sendo estas intercaladas com direções de $+55^\circ$ e -55° . Segundo (Schwartz, 1984), a espessura de camada de 0,1 mm a 0,2 mm é indicada para o processo de fabricação por filamento contínuo. Neste caso, foi utilizado 0,15 mm, pertinente com a referência.

Na Figura 62 é apresentada a malha desenvolvida para o modelo do tubo. O tamanho do elemento foi definido em função da capacidade computacional disponível para a realização da simulação, estabilidade e compromisso dos resultados com a realidade. Nota-se o refino da malha nas regiões de falha identificadas na Figura 52, sendo estas as extremidades do tubo e na região central. Além deste motivo, estas regiões são locais de contato entre diferentes elementos, o que também motiva o refino desta.

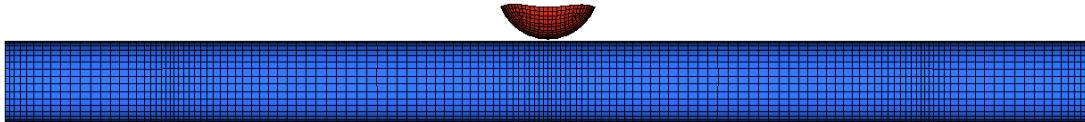


Figura 62 – Malha desenvolvida para o espécime estudado.

O modelo de material utilizado possibilita a escolha entre dois modelos de falha para o material composto, sendo estes o critério de Chang-Chang (MAT54) e critério de Tsai-Wu (MAT55). Segundo o critério de Chang-Chang, a falha na lâmina ocorre dos seguintes modos:

- Falha na fibra por tração ($\sigma_{aa} > 0$)

$$\text{Se } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases},$$

então $E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0$.

- Falha na fibra por compressão ($\sigma_{aa} < 0$)

$$\text{Se } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases},$$

então $E_a = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0$.

- Falha na matriz por tração ($\sigma_{bb} > 0$)

$$\text{Se } e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases},$$

então $E_b = \nu_{ba} = G_{ab} = 0$.

- Falha na matriz por tração ($\sigma_{bb} < 0$)

$$\text{Se } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases},$$

então $E_b = \nu_{ab} = \nu_{ba} = G_{ab} = 0$
 $X_c = 2Y_c$.

Segundo o critério de Tsai-Wu, a falha na lâmina ocorre dos seguintes modos:

- Falha na fibra por tração ($\sigma_{aa} > 0$)

$$\text{Se } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases},$$

então $E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0$.

- Falha na fibra por compressão ($\sigma_{aa} < 0$)

$$\text{Se } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases},$$

então $E_a = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0$.

- Falha na matriz, sendo

$$e_{md}^2 = \frac{\sigma_{bb}^2}{Y_t Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t) \sigma_{bb}}{Y_t Y_c} - 1 \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow \text{Falha} \\ < 0 \Rightarrow \text{Regime Elástico} \end{cases}.$$

Nota-se que tais critérios de falha referem-se à ocorrência de falha na lâmina. Conforme apresentado anteriormente, em um mesmo elemento de casca são

definidas diversas lâminas (ou camadas, para o caso estudado). Assim, segundo (Livermore Software Technology Corporation, 2003), o elemento apenas será considerado como falhado quando todas as suas camadas sofreram algum dos critérios de falha descritos, no entanto o mesmo sofre um decaimento de suas propriedades conforme são ocorridas falhas em suas lâminas.

Tanto no critério de Chang-Chang e Tsai-Wu há um parâmetro β que relaciona a participação da tensão de cisalhamento na falha da lâmina. Este parâmetro não é relacionado na literatura e deve ser definido para cada condição de utilização. Neste caso, na análise realizada do material estudado, a definição do modelo de falha e parâmetro β será realizada de modo interativo. Uma melhor discussão a respeito destes critérios será realizada no item 6.1.

Os parâmetros utilizados para a definição do comportamento do material foram retirados literatura e trabalhos recentes envolvendo estruturas de materiais compostos semelhantes. Estas estão apresentadas na Tabela 18, assim como a referência utilizada para sua obtenção.

Tabela 18 – Parâmetros do material utilizados no modelo numérico.

| Parâmetro | Valor | Referência |
|---|-------------------------|--------------------------|
| ρ | 2,031 kg/m ³ | (Kaneko, et al., 2008) |
| E_a | 46,3 GPa | (Kaneko, et al., 2008) |
| E_b | 11,6 GPa | (Kaneko, et al., 2008) |
| E_c | 11,6 GPa | (Kaneko, et al., 2008) |
| v_{ab} | 0,25 | (Kaneko, et al., 2008) |
| v_{bc} | 0,062 | (Kaneko, et al., 2008) |
| v_{ac} | 0,39 | (Kaneko, et al., 2008) |
| G_a | 4,28 GPa | (Kaneko, et al., 2008) |
| G_b | 4180 GPa | (Kaneko, et al., 2008) |
| G_c | 4,28 GPa | (Kaneko, et al., 2008) |
| $S_{c,m}$ | 0.08 | (Kaneko, et al., 2008) |
| Deformação máxima da fibra sob tensão pura | 0.0211 | (Santiago, et al., 2007) |
| Deformação máxima da fibra sob compressão pura | -0,10 | (Santiago, et al., 2007) |
| X_c | 610 MPa | (Mendonça, 2005) |
| X_t | 1062 MPa | (Mendonça, 2005) |
| Y_c | 118 MPa | (Mendonça, 2005) |

| | | |
|-------|--------|------------------|
| Y_t | 31 MPa | (Mendonça, 2005) |
| S_c | 72 MPa | (Mendonça, 2005) |

Como o modelo desenvolvido é constituído por três partes, sendo estas o tubo, o identador e os engastes, há a necessidade da definição das condições de contato entre estas partes. Estas condições de contato definem as forças de contato entre as superfícies e força de atrito entre as partes. Além desta condição, quando há possibilidade de contato entre partes diferentes do mesmo elemento, como, por exemplo, durante a dobra do espécime, há também a necessidade da definição de uma condição de contato para este caso. Para o modelo numérico, foram definidas duas condições de contato, sendo estas:

- *Contato entre superfícies (SURFACE_TO_SURFACE)*: Definido entre todos os elementos do modelo numérico. Nesta condição, as interações entre superfícies são definidas a partir de uma superfície que engloba todos os nós externos das partes. Foram definidos nesta condição de contato os coeficientes de atrito estático de 0,3 e dinâmico de 0,25.
- *Contato entre uma mesma superfície (SINGLE_SURFACE)*: Definido apenas para a malha do tubo, esta condição mostrou-se válida quando há falha de elementos por compressão e o esmagamento de uma determinada região. Neste caso, a compressão entre diferentes regiões da mesma parte. A utilização ou não desta condição de contato apresentou diferenciação significativa para os modelos onde houve a existência de falhas no material.

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 (Livermore Software Technology Corporation, 2003), mais eficaz e abrangente.

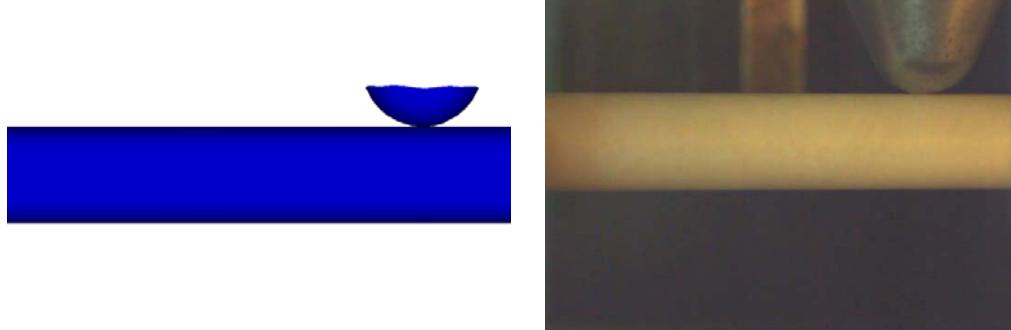
6 RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES

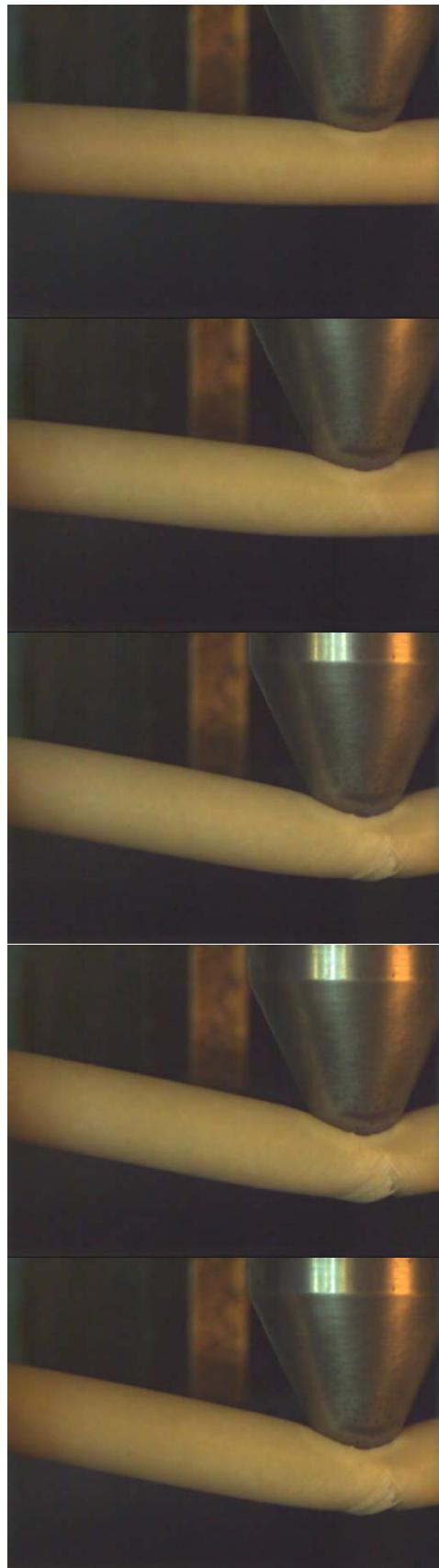
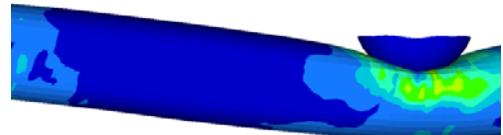
A seguir, serão apresentados os resultados obtidos das análises desenvolvidas no modelo numérico assim como a comparação e discussão destes resultados com os resultados experimentais. As análises desenvolvidas foram de comportamento mecânico do espécime ao impacto, efeitos da velocidade de impacto e efeitos da adição de pressão interna.

6.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ESPÉCIME

Para a simulação numérica do comportamento mecânico do espécime foram consideradas as energia 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 Figura 63 é realizada a análise qualitativa do fenômeno de impacto realizado durante o ensaio experimental e a partir do modelo numérico, para um impacto de 23J. Nota-se a grande semelhança entre estas. No impacto de 1J, praticamente não são observadas grandes deformações ou deformações permanentes. Nota-se um comportamento basicamente elástico do material. 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.





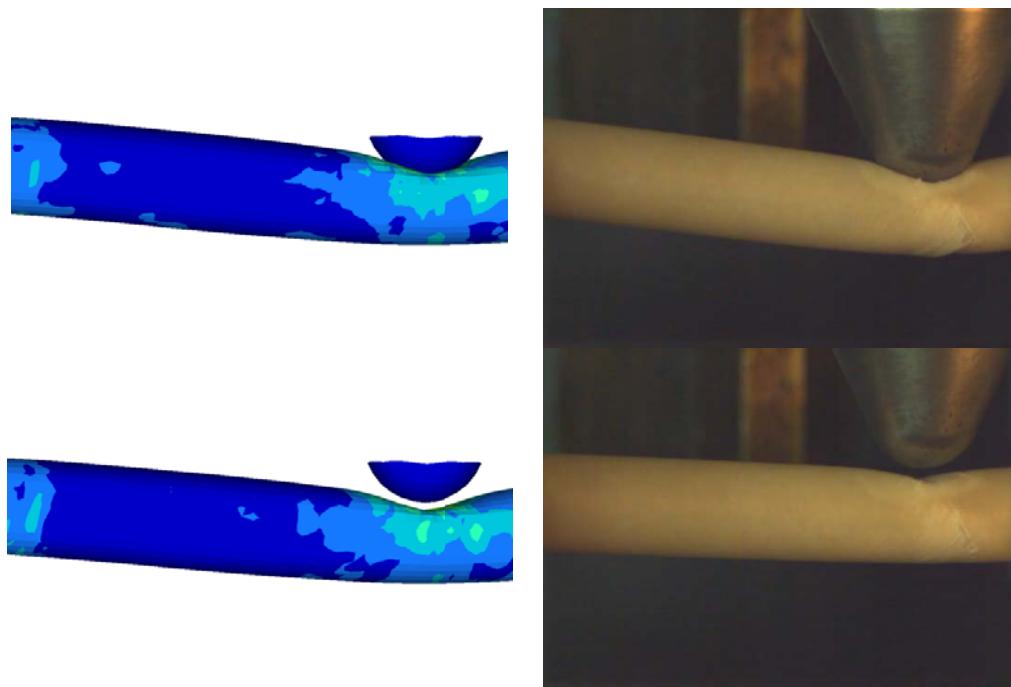


Figura 63 – Comparaç \~ao qualitativa dos resultados num $\text{\'er}ico-experimentais para o impacto de 23J.$

Na Figura 64 est ao apresentados os perfis de velocidade durante o primeiro contato para o impacto de 1J, obtidos a partir do ensaio experimental e do modelo num $\text{\'er}ico. Neste, foram analisadas quatro condi $\text{c}\mathop{\text{o}}es de crit $\text{e}rios de falha, sendo o crit $\text{e}rio de falha de Tsai-Wu com efeitos de cisalhamento que apresentou resultados mais p $\text{r}oximos dos resultados experimentais. Para este caso, o erro absoluto na estimativa da velocidade de residual do identador foi de 4,1%.$$$$$

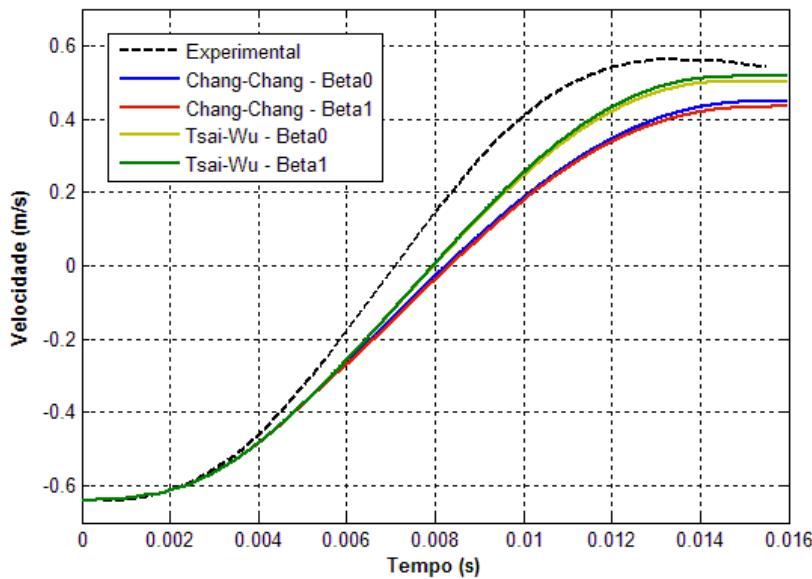


Figura 64 – Comparação numérico-experimental do impacto de 1J.

Na Figura 65 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 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.

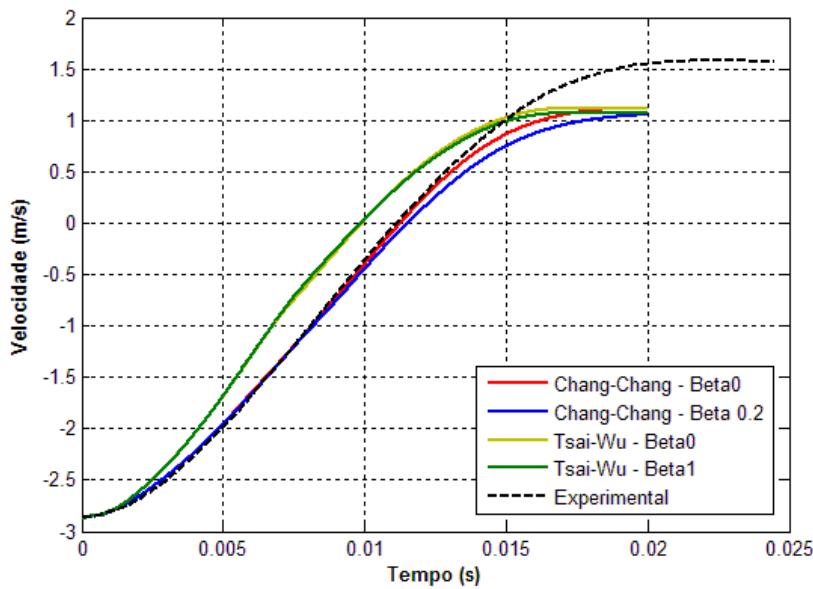


Figura 65 - Comparação numérico-experimental do impacto de 23J.

No impacto de 23J, por haver maior intensidade de falhas no modelo, os efeitos de cisalhamento acabaram sendo muitos significativos nos resultados do modelo numérico, chegando a apresentar resultados não pertinentes com o observado nos ensaios experimentais, como o caso apresentado na Figura 66. Observa-se neste a facilidade como que o tubo sofre cisalhamento, sendo este parcialmente penetrado pelo identador.

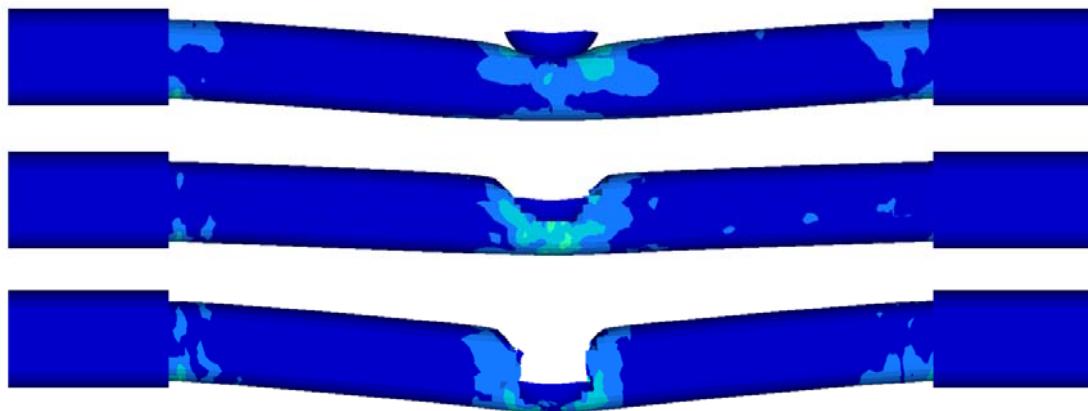


Figura 66 – Resultado obtido para a simulação de impacto de 23J, com critério de falha de Chang-Chang, considerando efeitos de cisalhamento.

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, 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.

6.2 EFEITOS DE VELOCIDADE DE IMPACTO

Para a identificação dos efeitos de velocidade de impacto, ou taxa de deformação, foram realizadas as simulações dos ensaios descritos no item 4.3. Estes ensaios são fenômenos de impacto de 40 J e com velocidade de impacto 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 Figura 67 está apresenta a relação força deslocamento para os ensaios de impacto de 40J. Conforme esperado, o modelo de material não considera efeitos de taxa de deformação, uma vez que é observado que o comportamento de ambas as curvas são praticamente semelhantes.

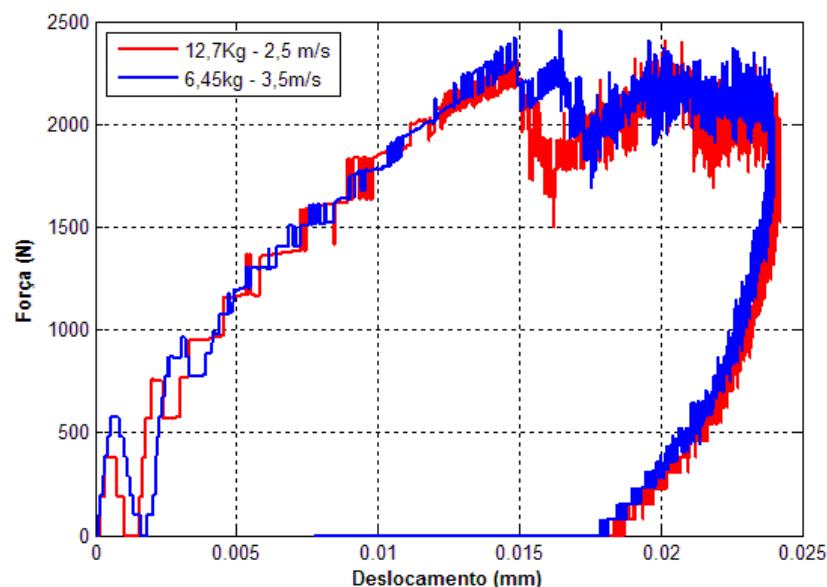


Figura 67 – Relação força-deslocamento para identificação dos efeitos de taxa de deformação.

Na Figura 68, é realizada a comparação dos resultados numéricos e experimentais da curva força-deslocamento dos eventos analisados. Observa-se 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.

Com relação à discussão dos resultados realizada no item 4.3, mesmo que experimentalmente seja observada uma diferenciação entre os eventos de impacto com velocidades diferentes, o modelo numérico apresenta uma variação do resultado maior do que a diferenciação obtida no ensaio experimental. Isso remete a concluir que esta diferenciação é pouco significante para o ensaio realizado e confirma o fato de que os efeitos de taxa de deformação podem ser desconsiderados para o fenômeno de impacto de baixa velocidade.

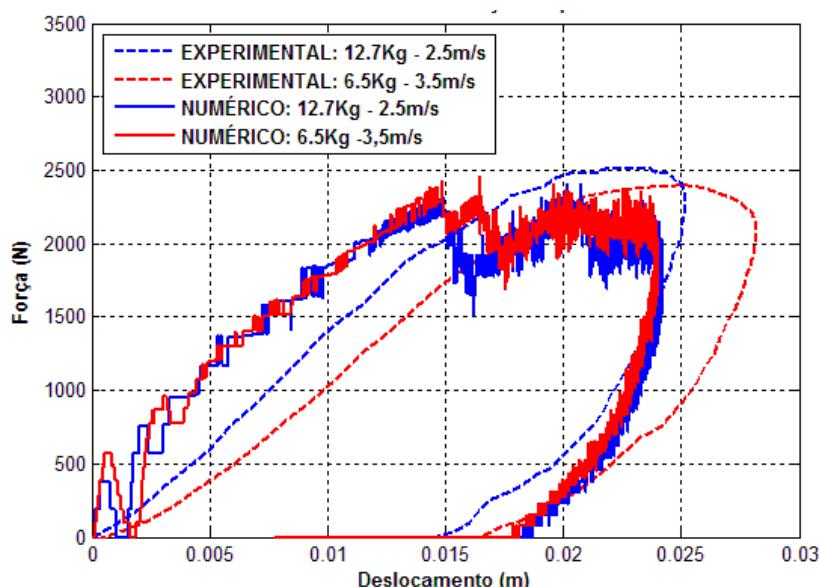
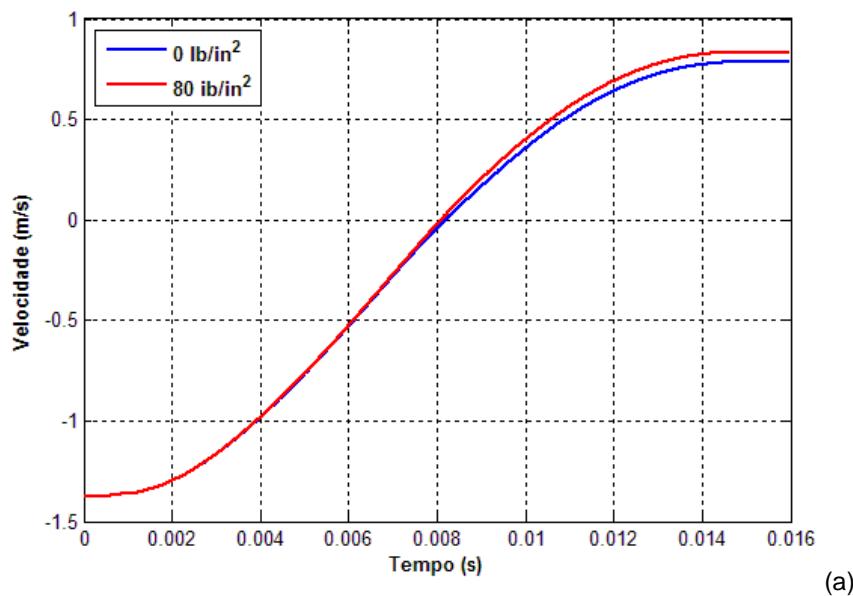


Figura 68 – Análise numérico-experimental da relação força-deslocamento.

Os resultados obtidos para identificação dos efeitos de velocidade de impacto para o modelo numérico apresentam resultados coerentes com a literatura e, tanto o modelo numérico quanto o experimento, mostraram-se não influenciados pela taxa de deformação.

6.3 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 apresentados no item 4.2. 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 este 0 lb/in² (sem pressão interna) e 80 lb/in² (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 estão apresentadas na Figura 69.



(a)

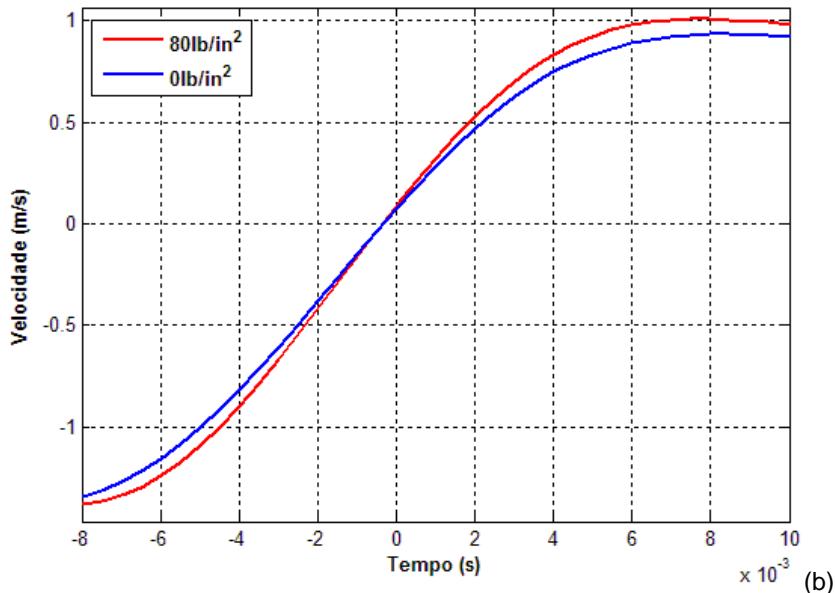


Figura 69 - Comparação dos resultados numéricos obtidos para o evento com pressão interna (a) e resultados experimentais do evento (b).

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 ocorrente 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.

6.3.1 Fenômeno de colapso estrutural causado pela adição de pressão interna

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) e mencionada no item 4.2.

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 quando ocorrem em separado, não causam o colapso. Assim, o nível de pressão interna submetido ao vazo de pressão, mesmo sendo elevado, é suportado pelo mesmo, e o fenômeno, 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 Figura 70 estão apresentadas as diversas simulações numéricas realizadas. Conforme observado, foi considerado 12,5 MPa como pressão de colapso.

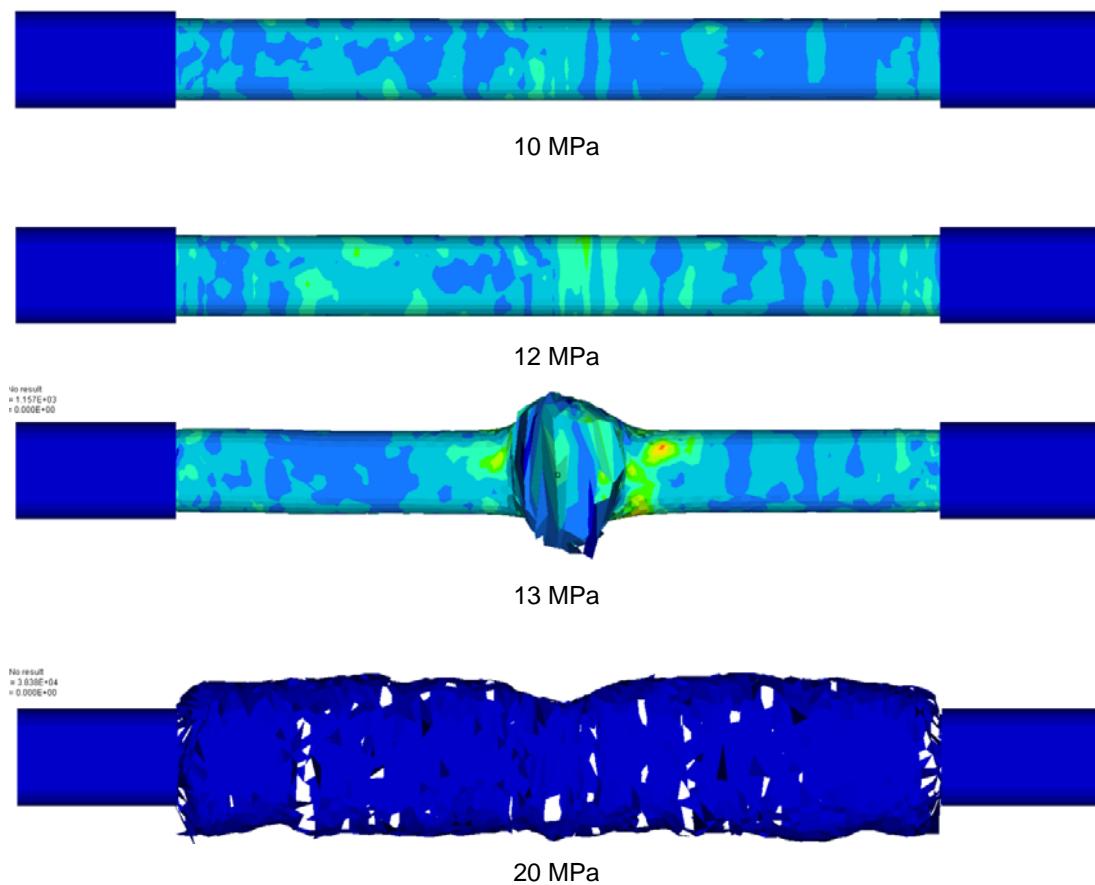


Figura 70 – Simulações numéricas realizadas para a definição da pressão de colapso.

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 pressão levemente abaixo da pressão de colapso. O resultado deste evento está apresentado na Figura 71, assim como o espécime apenas com a adição de pressão interna e apenas o evento de impacto.

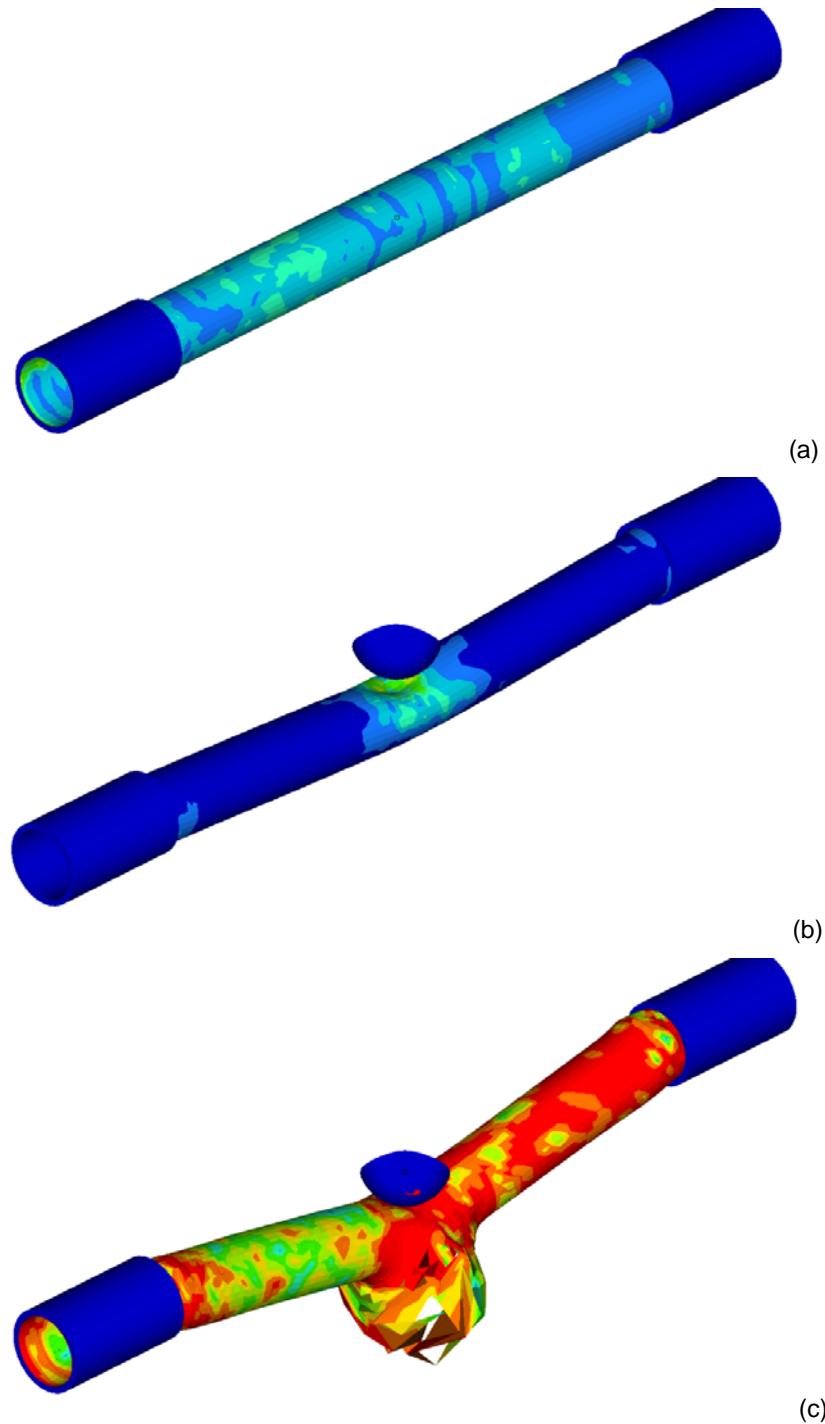


Figura 71 – Resultado da simulação numérica para definição do efeito de colapso estrutural. Tubo com 10 MPa de pressão interna, sem impacto (a). Tubo sem aplicação de pressão interna e impacto de 40 J (b) e tubo com pressão interna e impacto de 40J (c).

Conforme observado na Figura 71, 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 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.

7 CONCLUSÃO

A partir das atividades desenvolvidas, pode-se concluir diretamente que:

- Foi desenvolvido um aparto 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 desenvolvida uma técnica de obtenção da energia de impacto levando em consideração apenas os instantes anterior e posterior ao contato entre o identador e espécime, minimizando efeitos dissipativos no fenômeno estudado.
- Foi desenvolvido um modelo numérico do fenômeno de impacto analisado, utilizando o programa comercial LS-Dyna. 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 identador.
- 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 ferramenta 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 o inicio desenvolvimento de uma ferramenta numérica tendo o embasamento experimental do fenômeno para a simulação de eventos de impacto contra estruturas de materiais compostos.

O estudo realizado possibilitou o desenvolvimento de etapas teóricas, numéricas e experimentais para o estudo proposto, possibilitando um grande aprendizado para o autor. Além disso, o estudo de métodos numéricos atrelados à mecânica de materiais compostos representa um desenvolvimento tecnológico de grande importância para o país.

7.1 POSSIBILIDADES PARA CONSECUÇÃO

Para o prosseguimento do trabalho aqui desenvolvido, existem as seguintes possibilidades de pesquisa:

- Estudo de métodos de caracterização de estruturas tubulares de materiais compostos;
- Caracterização do material utilizando processos de otimização;
- Desenvolvimento de um modelo de material que considere a existência das fibras no material composto, e não apenas os efeitos causados por estas;
- Estudo de propriedades mecânicas residuais em materiais compostos;
- Aplicabilidade do modelo desenvolvido para outros tipos de impacto em estruturas de materiais com compostos.

REFERÊNCIAS

ALTAIR ENGINEERING INC., Altair HyperMesh 6.0 Advanced Tutorials. [s.l.], 2003. 178 p.

ALTAIR ENGINEERING INC., Altair HyperMesh 6.0 Basic Tutorials. [s.l.], 2003. 128 p.

ALTAIR ENGINEERING INC., Altair HyperMesh 6.0 LS-DYNA Cards. [s.l.], 2004. 152 p.

ALTAIR ENGINEERING INC., Altair HyperMesh 6.0 User's Guide. [s.l.], 2003 45 p.

AMERICAN STANDARDS TEST METHODS INTERNATIONAL. D2444-99: Standards test method for determination of the impact resistance of thermoplastic pipe and fittings by means of a tup (Falling Weight Test). West Conshohocken, 2005. 8p.

AMERICAN STANDARDS TEST METHODS INTERNATIONAL. D5628-07: Standard test method for impact resistance of flat, rigid plastic specimens by means of a falling dart (Tup or Falling Mass). West Conshohocken, 2005. 8p.

AMERON INTERNATION. Series 2000MP Fiberglass Pipe and Fittings. [s.l.], 2007 2 p.

ÁVILA, A.; SOARES, M.; SILVA, A. An experimental investigation on nanocomposites under impact loading. **Impact Loading of Lightweight Structures**, v.1, pp. 89-103, 2005. Apresentado a Impact Loading of Lightweight Structures, Florianópolis - SC, 2005.

AZEVEDO R. L., ALVES M. Numerical Simulation of bird strike impact against balanced fiber glass/epoxy composite plastes. In: 19º International Congress of Mechanical Engineering, Brasília – DF, 2007. Anais do congresso.

CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5a Edição LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 2002. 589 p.

CETESB - COMPANHIA TECNOLOGICA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. São Paulo. Grandes acidentes: Cidade do México. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/riscos/acidentes/mexico.asp>> Acesso em: 30 maio de 2007.

FLYDE ELETTRONIC LABORATORIES LTD., User Manual: Blue Panel Modules [s.l.], 2003. 57 p.

GOMES, A. S. Tutorial para geração de malhas. São Paulo: Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas, 2007. 15 p.

GOMES, A. S. Tutorial para pós processamento. São Paulo: Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas, 2007. 15 p.

KANEKO, T.; SADAYUKI, U.; HIDEOTOSHI, Y.; SHUSUKE, I. Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transversal impact loading. **Thin-Walled Structures**, 46, pp. 898-904, 2008.

LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION. LS-Dyna v.970 Keyword User's Manual. [s.l.], 2005. 205 p.

MENDONÇA, P. T. Materiais compostos & estruturas-sanduíche. 1ª Edição. Editora Manole, Barueri, 2005, 625 p.

MESQUITA T. L. Propagação de colapso em dutos submarinos. Rio de Janeiro: Boletim técnico da Petrobrás, v. 45, pp. 177-215, 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Medidas do Balanço Energético Nacional de 2006. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/site/news/detail.do?newsId=11679>> Acesso em: 1 fev. 2007.

MURRAY, Y. D.; SCHWER, L. E. Verification of a general-purpose laminated composite shell element implementation: comparisons with analytical and experimental results. **Finite Elements in Analysis and Design**, 12, pp. 1-16, 1993.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATE HEADQUARTERS. Instalation Guide: BNC-2110. Austin, 2002, 78p.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATE HEADQUARTERS. User Manual: NI PCI-6110. Austin, 2002, 87p.

PCB PIEZOTRONICS - ELETROONICS DIVISION. Installation and Operating Manual: Model 480C02. Nova York, 2004, 20 p.

PCB PIEZOTRONICS - ELETROONICS DIVISION. Instalation and Operation Manual: model 200C20. Nova York, 2004, 12 p.

PETROBRÁS S.A. Área de atuação: Dutos. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/portugues/ads/ads_Tecnologia.html> Acesso em: 1 fev. 2007.

PHOTRON USA INC. Hardware Manual: Fastcam-APX RS. San Diego, 2005, 127 p.

POLYTEC DEUTSCHLAND. User manual: Laser Doppler Vibrometer. Waldbronn, 2002, 72 p.

RILARD, B.; LARSGUNNAR, N.; SIMONSSON, K. Simulation of delamination in fibre composites with discrete cohesive failure model. **Composites Science and Technology**, v. 61, pp. 667-677, 2001.

AZEVEDO R. L., ALVES M. Numerical Simulation of bird strike impact against balanced fiber glass/epoxy composite plastes. In: 19o International Congress of Mechanical Engineering, Brasília – DF, 2007. Anais do congresso.

SANTIAGO, R. C.; AZEVEDO, R.; ALVES, M. Mechanical characterization of a glass/epoxy composite material with nanoclays. In: 19o International Congress of Mechanical Engineering, Brasília – DF, 2007. Anais do congresso.

SANTIAGO, R. C.; PROFITO, F. J.; SOUZA, R. C. Utilização de um vibrômetro a laser Polytec para analisar a vibração de uma placa sujeita a impacto, São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007.

SCHWARTZ, M. M. Composite materials handbook. 1a Edição. McGraw-Hill, Nova York, 1984, 651 p.

SOLARTRON METROLOGY. User manual: Linera Encoder with TTL Output. [s.l.], 2003. 15 p.

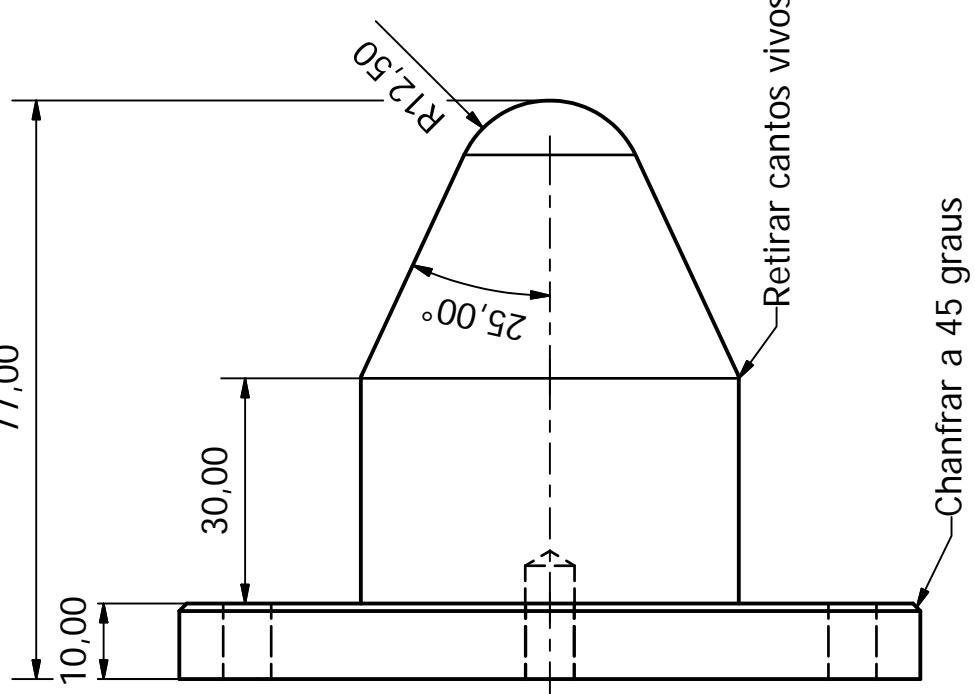
TASDERMIRCI, A.; HALL, I. W. Numerical and experimental studies of damage generation in a polymer composite material at high strain rates. **Polymer Testing**, v. 25, pp. 797-806, 2006.

SANTIAGO, R. C.; PROFITO, F. J.; SOUZA, R. C. Utilização de um vibrômetro a laser Polytec para analisar a vibração de uma placa sujeita a impacto, São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007.

ZANATA, D. Estudo experimental de impacto lateral em tubos pressurizados. São Paulo: Relatório de iniciação científica / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007, 49 p.

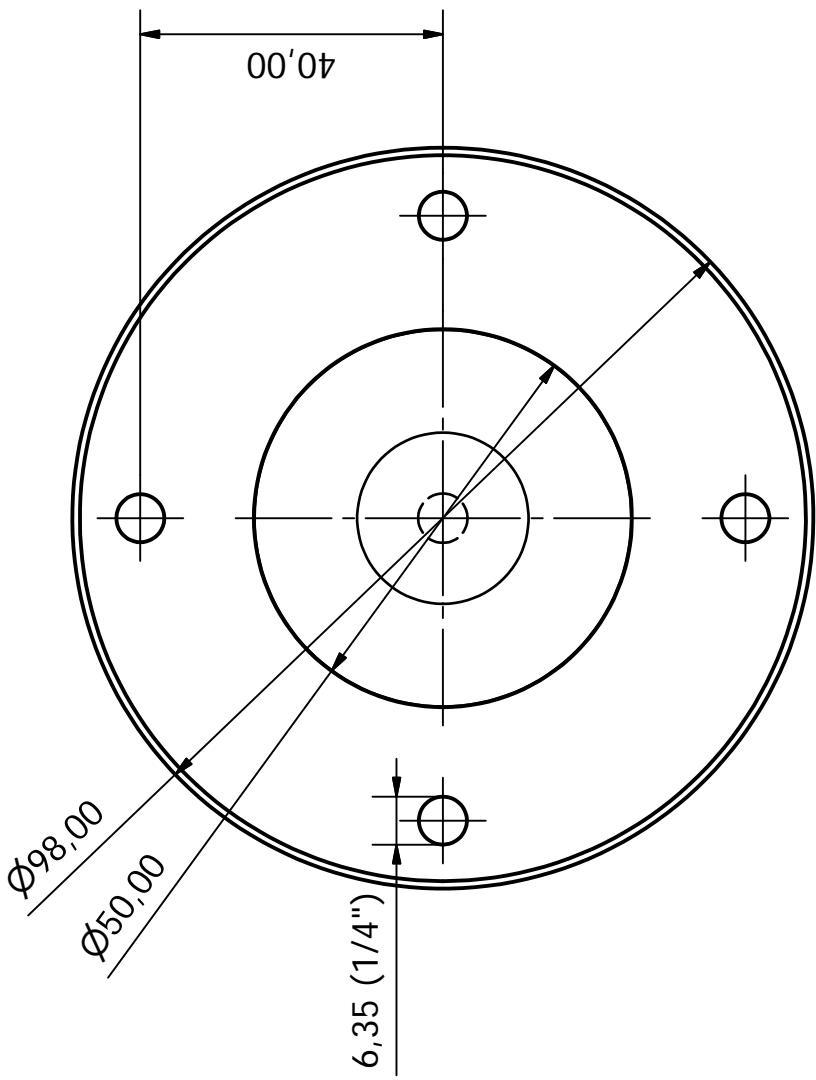
APÊNDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO ELEMENTO IMPACTANTE

A seguir, serão apresentados os desenhos de fabricação desenvolvidos no programa CAD-3D Inventor 2008 utilizado para a construção desse equipamento utilizado para a realização dos ensaios de queda de peso.



Chanfrar a 45 graus

Retirar cantos vivos



Material: Tarugo 4" aço ABNT-1045

Quantidade: 1 peça

| | | |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| Designed by Rafael Celeglini | Units mm | Approved by |
|---------------------------------|-------------|-------------|

| |
|--------------------|
| Date 12/02/2008 |
|--------------------|

Indentador

Escala 1:1

Desenho 1

Edition
1 / 1

18,00

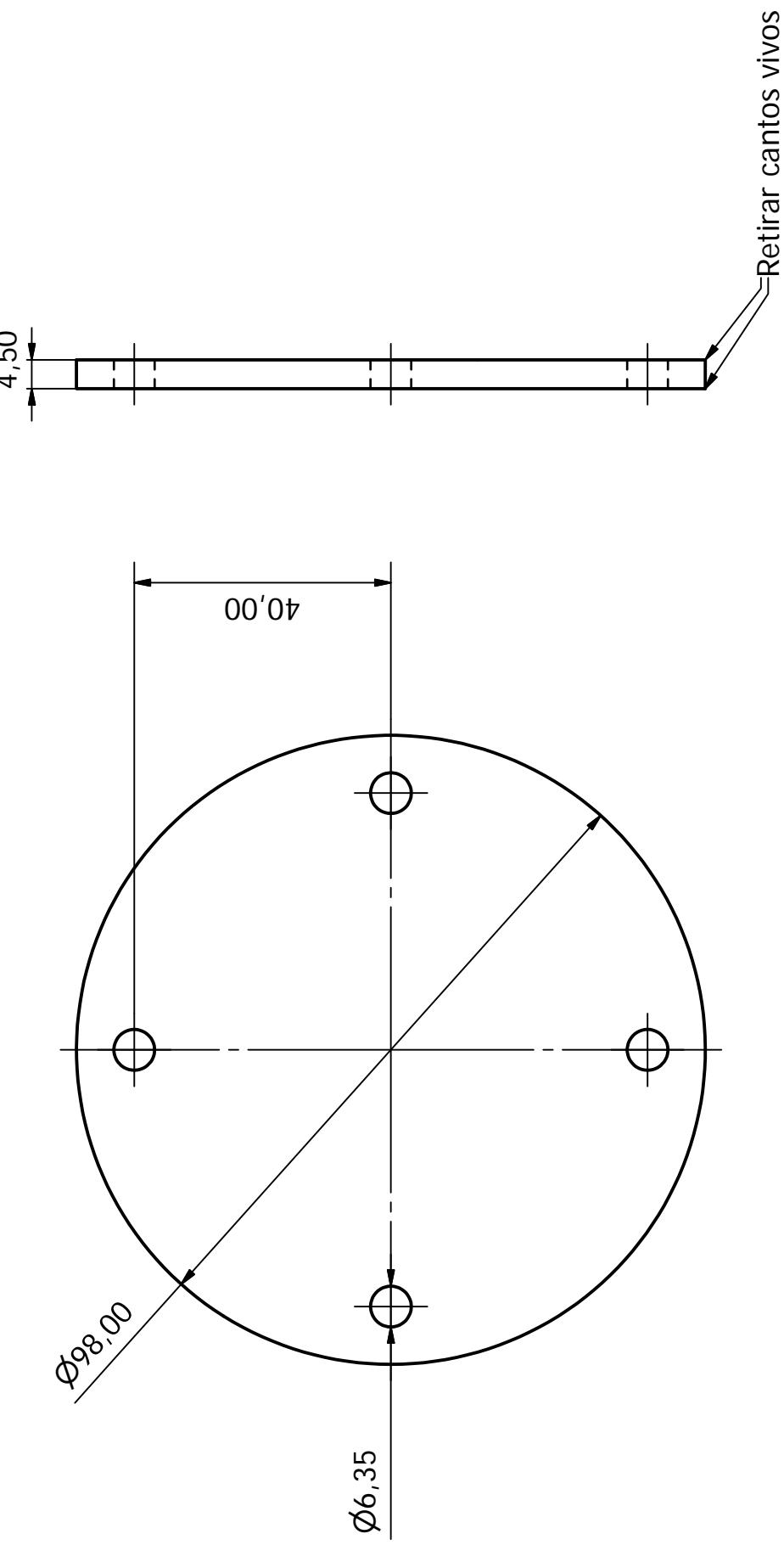
40,00

 $\emptyset 98,00$ $\emptyset 6,35 \text{ (} 1/4 \text{")}$

Retirar cantos vivos

Material: Tarugo 4" aço ABNT-1045
Quantidade: 10 peças

| | | | |
|---------------------------------|-------------|-------------|--------------------|
| Designed by Rafael Celeghini | Units mm | Approved by | Date 12/02/2008 |
| Peso 1 kg | | | Escala 1:1 |
| Desenho 2 | | | Sheet 1 / 1 |



Material: Tarugo 4" aço ABNT-1045

Quantidade: 1 peça

| | | |
|------------------|-------|-------------|
| Designed by | Units | Approved by |
| Rafael Celeglini | mm | |

Peso 500 g

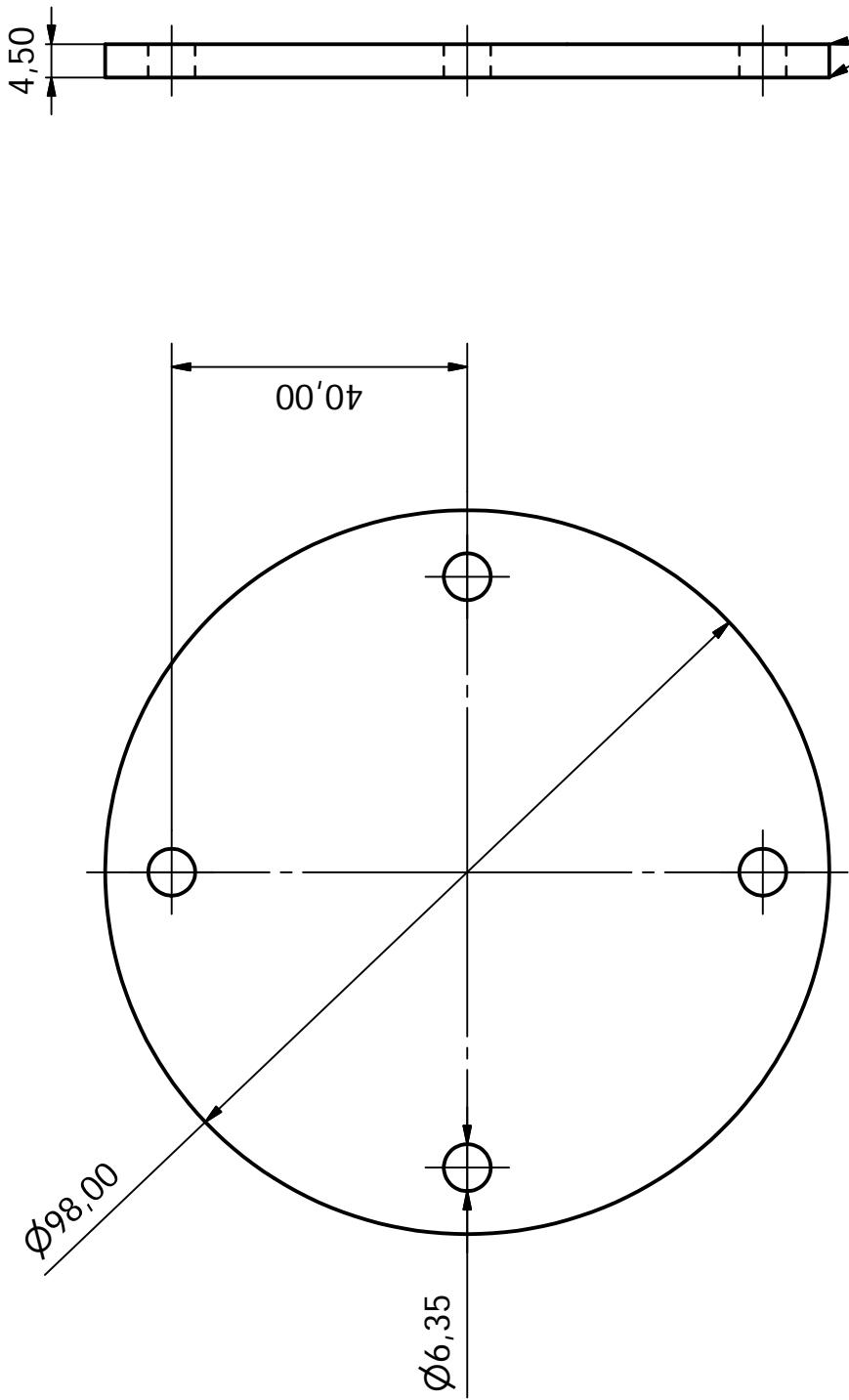
Date 12/02/2008

Escala 1:1

Desenho 3

Edition

Sheet 1 / 1



Material: Tarugo 4" aço ABNT-1045

Quantidade: 1 peça

| | | |
|------------------|-------|-------------|
| Designed by | Units | Approved by |
| Rafael Celeglini | mm | |

Date 12/02/2008

Peso 250 g

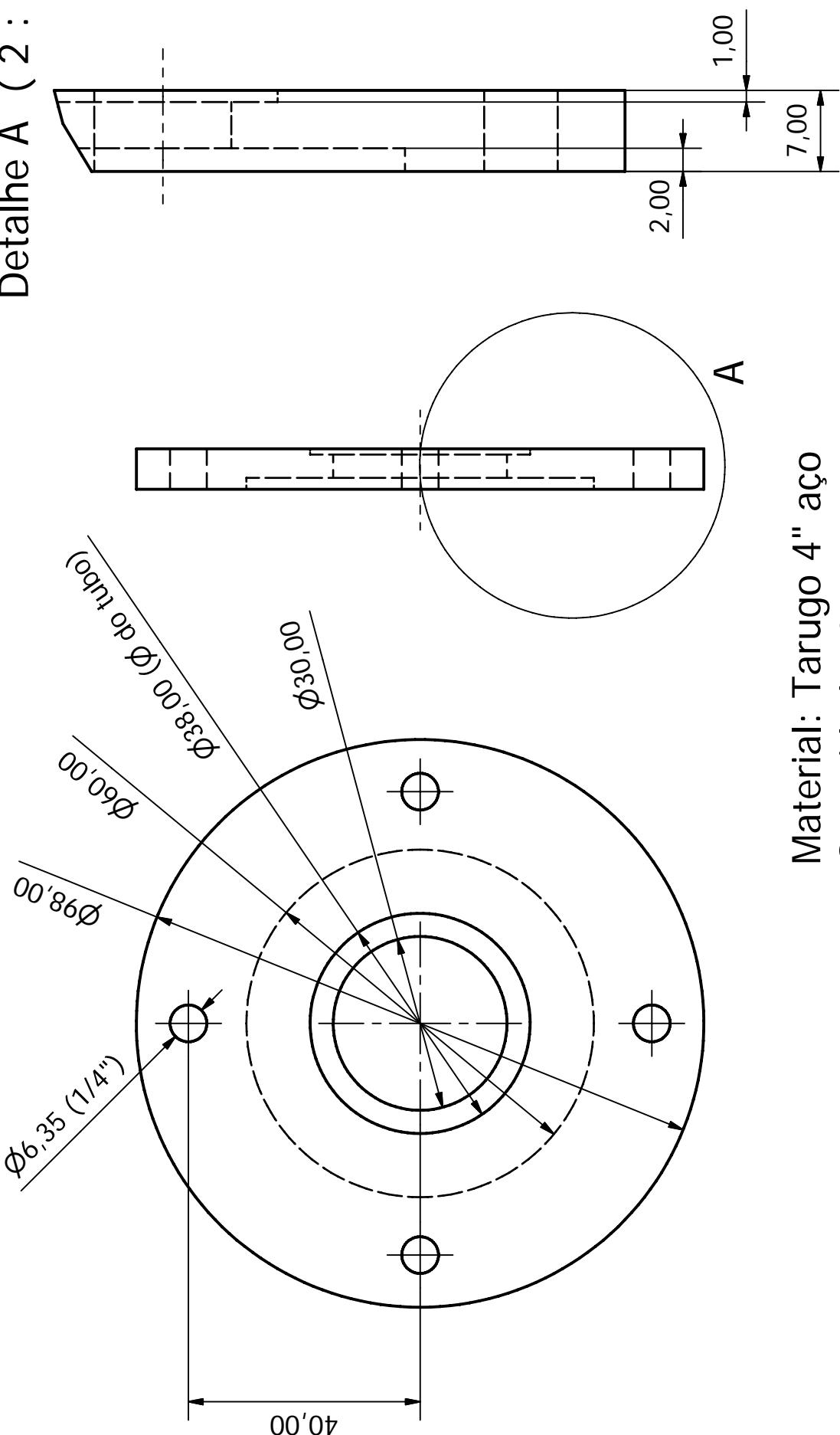
Escala 1:1

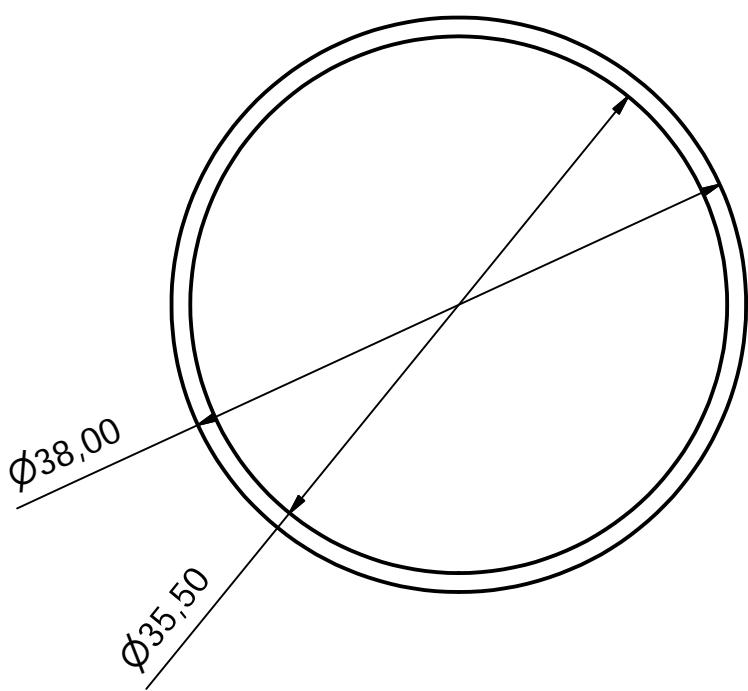
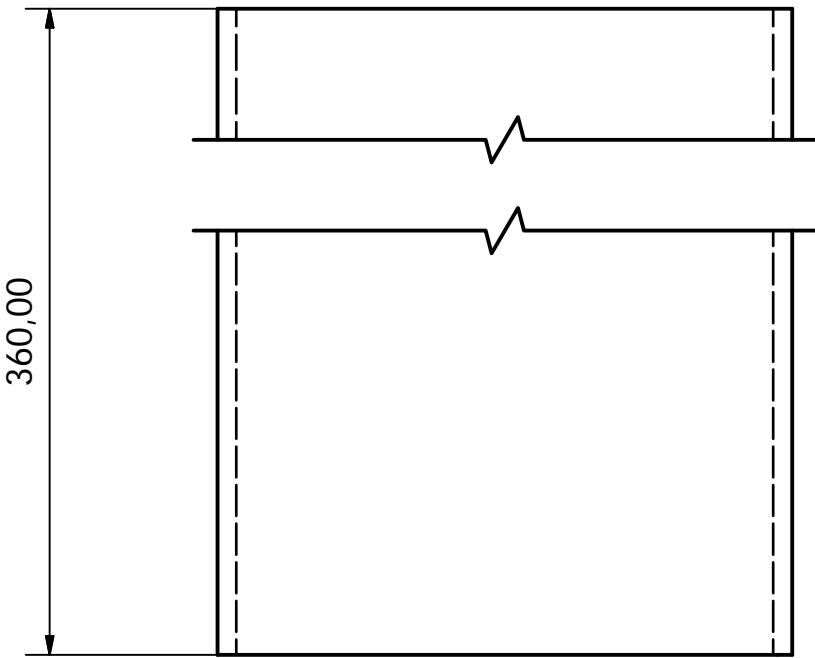
Desenho 4

Edition

Sheet 1 / 1

Detalhe A (2 : 1)





Material: Tubo entregue
Quantidade: 1 peça

| | | |
|------------------|-------|-------------|
| Designed by | Units | Approved by |
| Rafael Celeghini | mm | |

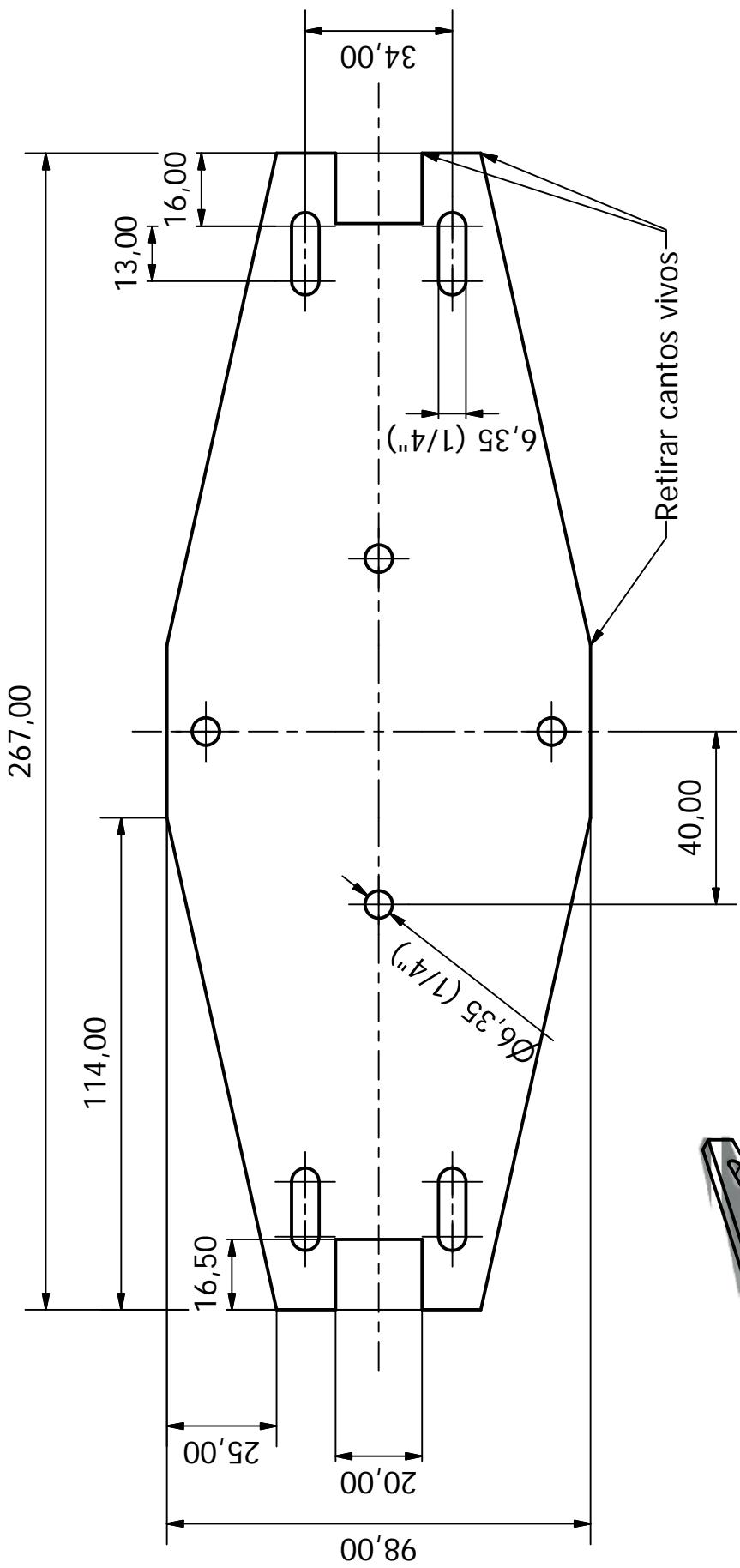
Date 12/02/2008

Escala 2:1

Desenho 6 Edition

Sheet 1 / 1





Material: Chapa de alumínio 6,4 mm de espessura.
Quantidade: 2 peças.

| Designed by | Units | Approved by |
|-----------------|-------|-------------|
| Rafael Celegini | mm | |

Date 12/02/2008

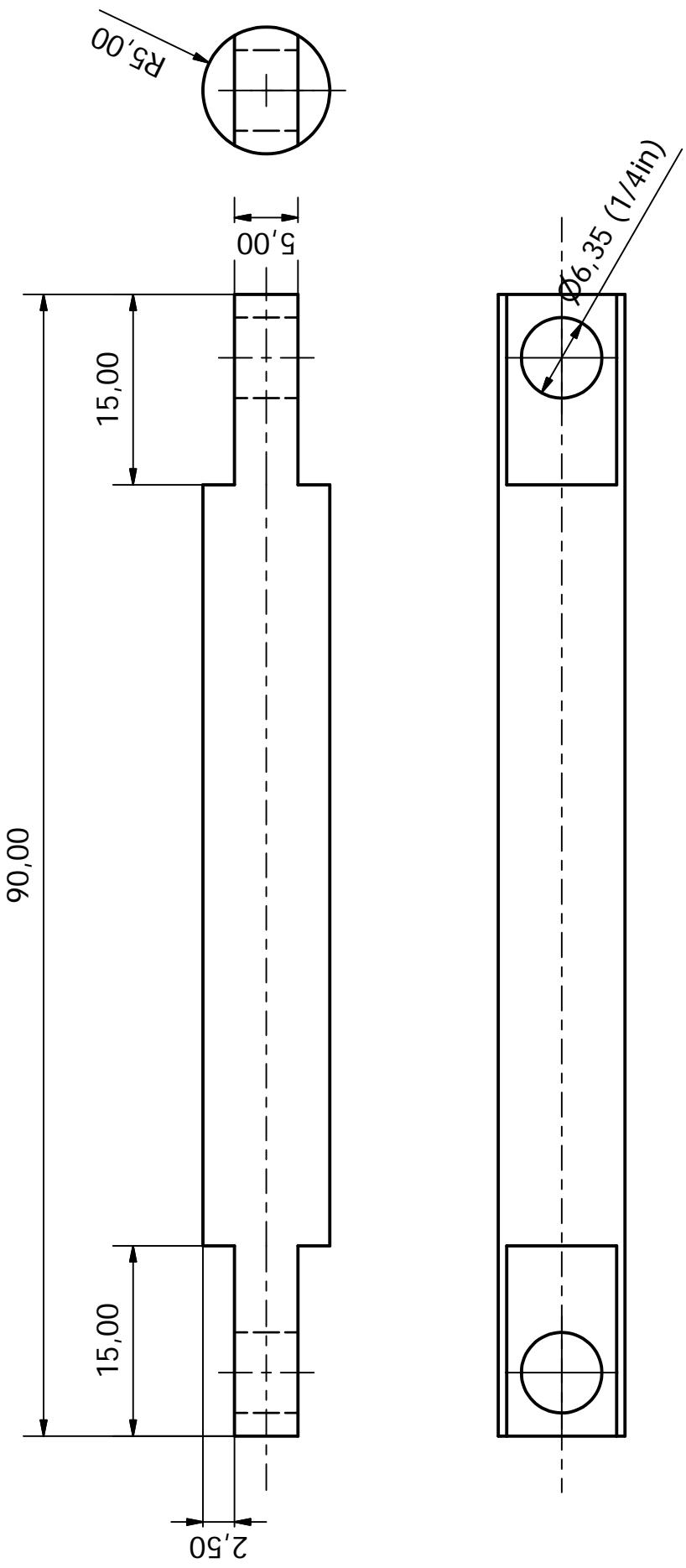
Escala 1:1,5

Desenho 7

Edition

Sheet 1 / 1

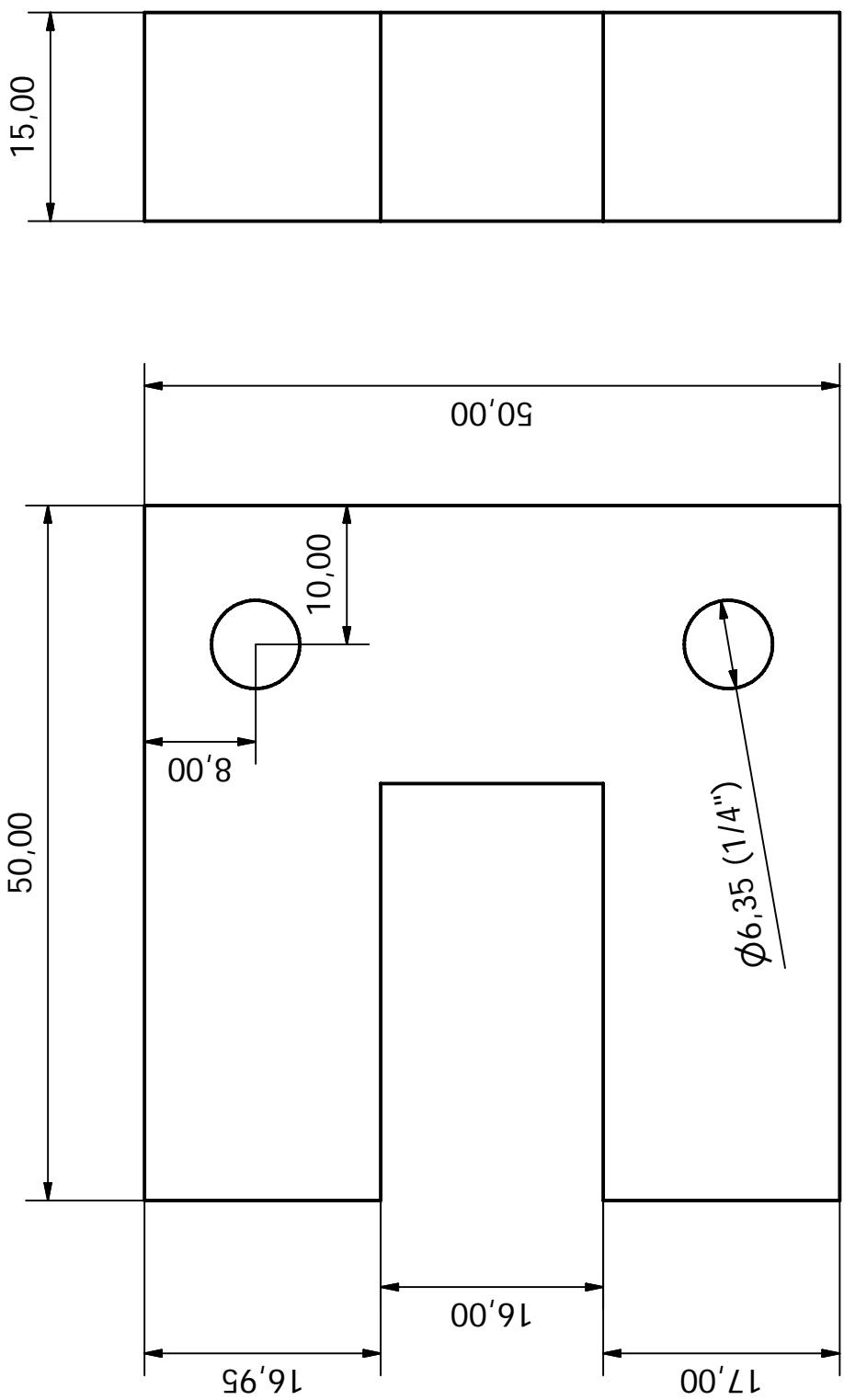
Supporto Horizontal



Material:

Quantidade: 1 peça.

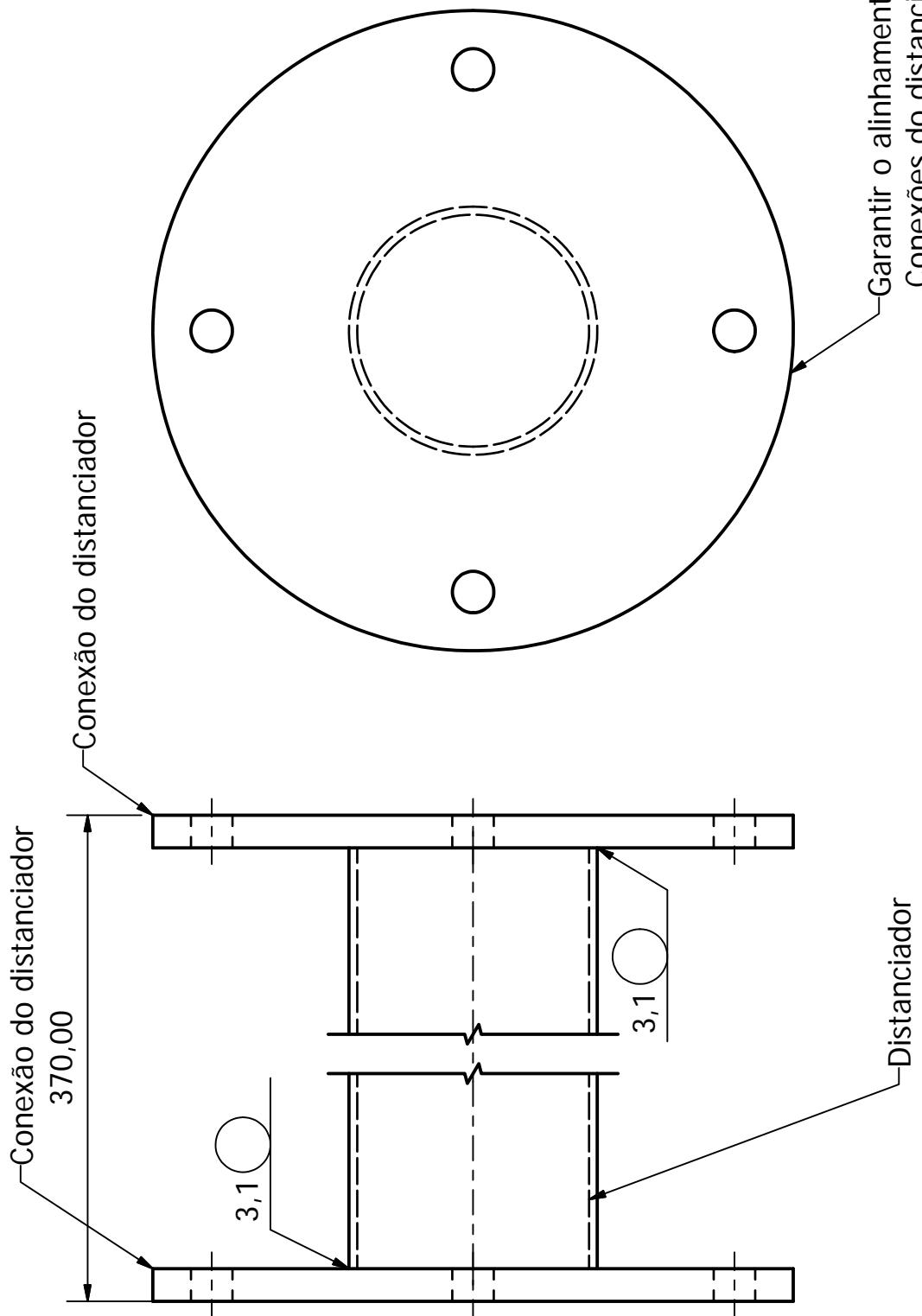
| | | | |
|---------------------------------|-------------|-------------|--------------------|
| Designed by Rafael Celeglini | Units mm | Approved by | Date 12/02/2008 |
| Engate | | | Escala 1:1 |
| | | Desenho 8 | Edition |
| | | | Sheet 1 / 1 |



Observação: Retirar
todos os cantos vivos.

Material: Nylon
Quantidade: 4 peças.

| | | | | | |
|-------------|------------------|------------|----|-------------|------------|
| Designed by | Rafael Celeglini | Units | mm | Approved by | Date |
| | | | | | 12/02/2008 |
| Guia | | Escala 2:1 | | | |
| Desenho 9 | | Edition | | | |
| Sheet 1 / 1 | | | | | |



Garantir o alinhamento das duas Conexões do distanciador.

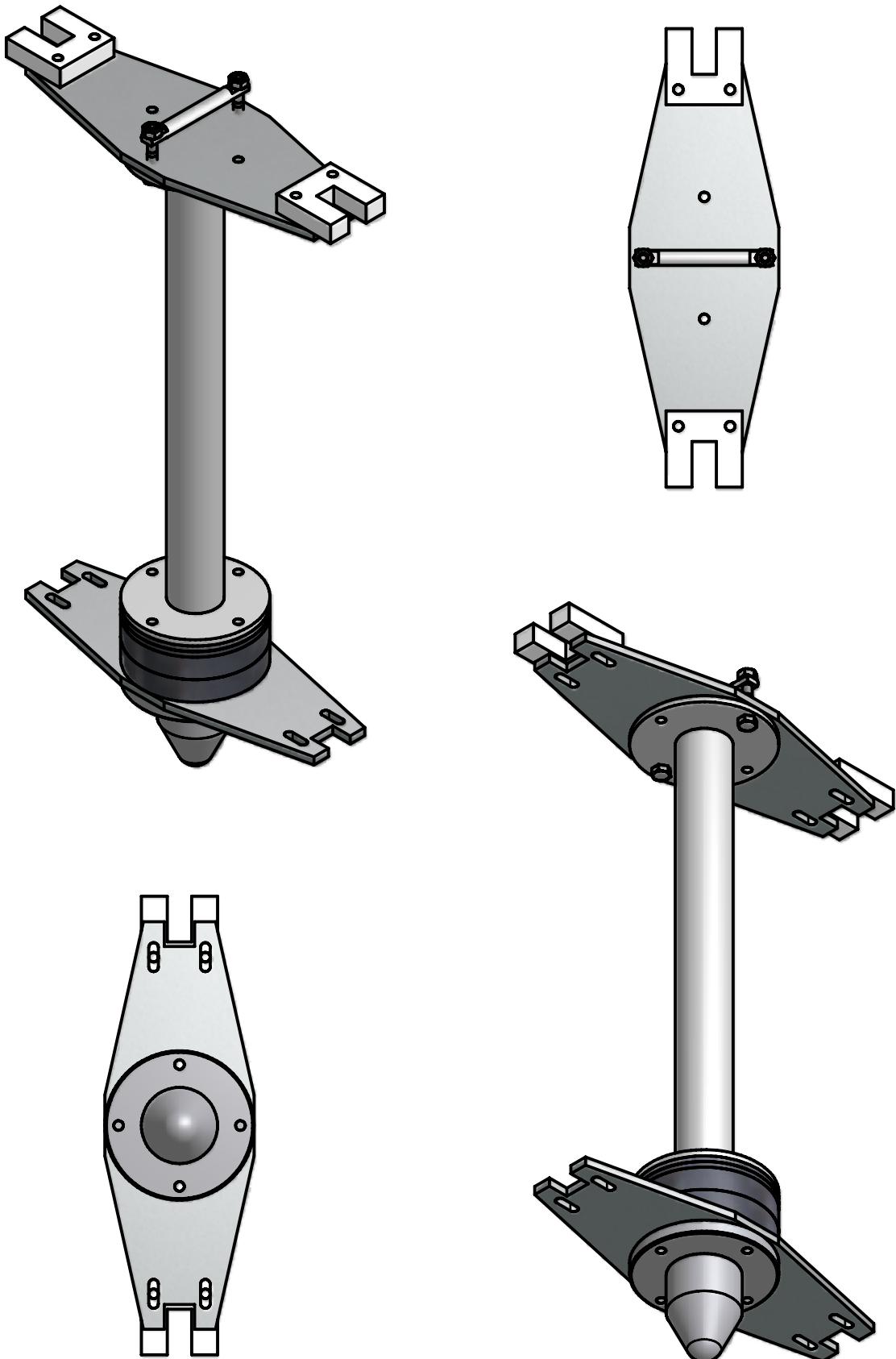
Obs.: Se possível, realizar a primeira solda na oficina e a segunda com o equipamento montado no martelo de impacto a fim de obter um melhor alinhamento. Consultar o aluno.

Montagem do Espaçador

Escala 2:1

| | | |
|---------------------------------|-------------|-----------------|
| Designed by Rafael Celeghini | Units mm | Approved by |
| | | Date 12/02/2008 |

| | |
|------------|-------------|
| Desenho 10 | Sheet 1 / 1 |
| Edition | |



| | | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| Designed by Rafael Celeghini | Units mm | Approved by | Date 12/02/2008 |
| Imagens do equipamento | | Escala 1:4 | |
| Desenho 11 | | Edition | Sheet 1 / 1 |