

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**FRANCISCO GALDINO JUNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE IMPACTO  
POR QUEDA DE PESO PARA MATERIAIS COMPÓSITOS**

Campina Grande – PB

Agosto/2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

## **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO PARA MATERIAIS COMPÓSITOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande, em exigência a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Agência Financiadora: Capes

Campina Grande – PB

Agosto/2014

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G149d Galdino Junior, Francisco.  
Desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos / Francisco Galdino Junior. – Campina Grande, 2014.  
192 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior".  
Referências.

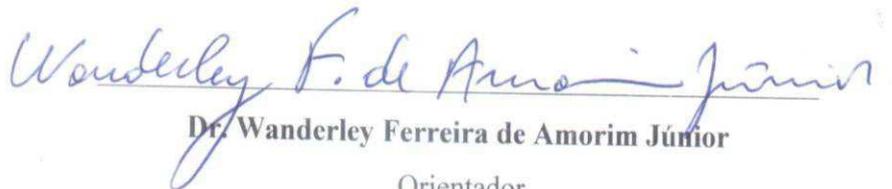
1. Materiais Compósitos. 2. Queda de Peso. 3. Impacto. 4. Resistência ao Dano. I. Amorim Junior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 621.01(043)

“DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO  
PARA MATERIAIS COMPÓSITOS”.

**FRANCISCO GALDINO JÚNIOR**

Dissertação Aprovada em 28/08/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes  
membros:



**Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



**Dr. Walman Benício de Castro**

Examinador Externo

UFCG/CCT/UAEM



**Dr. Sebastião Araújo Coutinho**

Examinador Externo

SUNA ENGENHARIA



**Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior**

Examinador Externo

UFRN

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Francisco e Fátima, ao meu irmão Tarcísio e a minha amada Mariana pelo incentivo, apoio, compreensão em todos os momentos desta e outras caminhadas, a minha eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus acima de tudo, pois sem ele nada seria possível.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade de adquirir novos conhecimentos e obter o título de mestre em Engenharia Mecânica.

Em especial ao professor Wanderley Ferreira de Amorim Júnior meus sinceros agradecimentos, toda minha admiração e eterna gratidão, não apenas pela orientação, mas pela amizade, pela confiança, pela constante dedicação, paciência, incentivo e pelos ensinamentos dignos de um verdadeiro orientador.

Aos que fazem parte do Laboratório de Projetos e Instrumentos (LPI).

A empresa SUNA ENGENHARIA pela parceria no projeto de instrumentação da máquina de impacto.

A Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA., por ter fabricado as placas compósitas usadas nos ensaios.

A empresa Armtec pelo apoio prestado durante a execução deste trabalho.

Ao aluno do Grupo PET de Engenharia Mecânica Joseph Almeida pela ajuda fundamental na realização dos ensaios.

Ao meu grande amigo Engenheiro Mecânico Leonardo Pereira pelos conselhos e compartilhamento do seu conhecimento que foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas que conheci durante esses dois anos de pesquisa, com os quais tive grandes aprendizados e que me ajudaram quando tive necessidade.

Aos amigos da Compesa que sempre me apoiaram e incentivaram no decorrer deste trabalho.

A todos que direto ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O crescente desenvolvimento de materiais compósitos reforçados nos últimos anos tem propiciado novas alternativas para solucionar diversos problemas acerca da necessidade de novos materiais com combinações de propriedades. Para utilizarmos tais materiais, devemos realizar vários ensaios mecânicos, como: tração, compressão, flexão e principalmente de impacto. Para isso, foram realizados estudos específicos sobre materiais compósitos e impactos em estruturas laminadas. Através desses estudos e de um levantamento do estado da arte acerca do projeto de diversas máquinas de impacto por queda de peso, foi projetada e fabricada uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos de simples concepção. A máquina desenvolvida possui um intervalo de energia de impacto entre 20J e 96J, obtida através de variação da massa de queda de impacto. Foi desenvolvido também um sistema instrumentação para aquisição da força de impacto e da energia absorvida pelo corpo de prova, além de um sistema anti rebote eletromecânico. Para a validação do equipamento foram realizados ensaios de impacto por queda de peso em placas compósitas de fibra de vidro com 8, 10, 12 e 14 camadas e analisado os danos causados nas mesmas, através de software de análise de imagem. A partir de um software de análise de vídeo foi possível calcular a velocidade de impacto e a energia de impacto nos ensaios e comparar com o método teórico e o instrumentado.

**Palavras-chaves: materiais compósitos, ensaio impacto por queda de peso, impacto, resistência ao dano.**

## ABSTRACT

The increasing development of reinforced composite materials in recent years has provided new alternatives to solve various problems about the need for new materials with combinations of properties. For such materials we use, we conduct various mechanical tests, such as tensile, compression, bending and mainly impact. For this, specific studies on composite materials, and impact on laminate structures were performed. Through these studies and a survey of state of the art about the project in several of drop impact weight machines, is designed and manufactured a machine to drop impact weight for composites of simple design. The machine has developed a range of impact energy of 20J, and 96J, obtained by varying the mass of the drop impact. One instrumentation system for the acquisition of the impact force and energy absorbed by the specimen was also developed, and an anti rebound electromechanical system. To validate the equipment impact tests were performed by weight loss in composite plates with glass fiber 8, 10, 12 and 14 layers and analyzed the damage caused in the same via image analysis software. From a software video analysis it was possible to calculate the impact velocity and impact energy in the tests and compare with the theoretical method and instrumented.

**Keywords: composite materials, impact testing for drop weight, impact, damage resistance.**

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	20
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Justificativa.....	21
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Geral.....	21
1.2.2 Específicos.....	21
CAPÍTULO 2.....	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Materiais compósitos.....	23
2.2 Ensaio em compósitos.....	25
2.3 Ensaio de Impacto em Compósitos.....	25
2.3.1 Impacto de alta velocidade.....	26
2.3.1.1 Barra de Hopkinson.....	25
2.3.1.2 Impacto balístico.....	26
2.3.2 Impacto de média velocidade.....	29
2.3.3 Impacto de baixa velocidade.....	29
2.4 Equipamentos para teste.....	30
2.4.1 Ensaio Charpy.....	30
2.4.2 Ensaio Izod.....	31
2.4.3 Ensaio de Impacto por queda de peso.....	32
2.5 Tipos de falha nos materiais compósitos submetidos ao impacto de baixa velocidade.....	38
2.5.1 Dano na matriz.....	39
2.5.2 Delaminação.....	40
2.5.3 Rompimento da fibra.....	41
2.5.4 Penetração.....	41
2.6 Resistência residual no pós-impacto.....	42
CAPÍTULO 3.....	44
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	44
3.1 Materiais.....	44
3.1.1 Fabricação das placas compósitas.....	44
3.1.2 Metodologia de corte das placas compósitas.....	45

3.1.3 Cálculo da massa dos compósitos.....	45
3.1.4 Cálculo das dimensões dos compósitos.....	46
3.2 Metodologia de projeto para o desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	48
3.3 Metodologia para análise do dano por delaminação nas placas compósitas.....	49
3.4 Metodologia para o cálculo da velocidade de impacto nos ensaios.....	51
CAPÍTULO 4 .....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 Projeto informacional de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	53
4.1.1 Norma ASTM D7136/D7136M-07 – Método padrão para medir a resistência ao dano de impacto por queda de peso em um compósito de matriz polimérica reforçado por fibra.....	53
4.1.2 Instron CEAST 9310.....	58
4.1.3 Instron CEAST 9340.....	59
4.1.4 Instron CEAST 9350 padrão.....	61
4.1.5 Instron CEAST 9350 com opcionais.....	62
4.1.6 Wance DIT183E.....	63
4.1.7 Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.....	68
4.1.8 Projeto e fabricação de uma máquina de ensaio de impacto por queda de peso na Universidade de Ciência e Tecnologia do Irã.....	70
4.1.9 Projeto de uma máquina de queda de peso para ensaio de impacto em materiais compósitos da Universidade de Bologna na Itália.....	72
4.1.10 Projeto e fabricação de um equipamento para teste a baixa velocidade em painéis sanduíches compósitos no Instituto de Tecnologia PES na Índia.....	75
4.1.11 Estudo experimental de baixa velocidade de impacto em placas compósitas laminadas no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade de Dumlupinar na Turquia.....	77
4.1.12 Ensaio de queda de peso em materiais compósitos laminados de alumina/alumínio na Universidade de Economia e Tecnologia TOBB na Turquia.....	81
4.1.13 Desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso da Faculdade de Mecânica e Engenharia Aeroespacial na Indonésia.....	82
4.1.14 Inovação no ensino de tecnologia de compósitos na Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade Técnica de Praga na República Tcheca.....	84
4.1.15 Dispositivo de ensaio de impacto vertical Patente N° US 6523391 B1.....	87

4.1.2 Especificação da energia de impacto da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	89
4.2 Projeto conceitual de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	91
4.2.1 Subsistema estrutural da máquina.....	92
4.2.2 Subsistema fixação da estrutura da máquina no solo.....	95
4.2.3 Subsistema base da máquina.....	97
4.2.4 Subsistema de Fixação do corpo de prova.....	100
4.2.5 Subsistema guia de deslizamento dos pesos.....	102
4.2.6 Subsistema peso de impacto.....	104
4.2.7 Subsistema impactador .....	106
4.2.8 Subsistema de travamento e liberação do impactador.....	108
4.2.9 Subsistema elevação do conjunto massa/impactador.....	110
4.2.10 Subsistema Anti rebote.....	112
4.3 Projeto preliminar de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	116
4.3.1 Projeto preliminar do subsistema base da máquina.....	116
4.3.2 Projeto preliminar do subsistema impactador.....	118
4.3.3 Projeto preliminar do subsistema pesos de impacto.....	119
4.3.4 Projeto preliminar do subsistema estrutural da máquina.....	125
4.3.5 Projeto preliminar do subsistema de fixação do corpo de prova.....	125
4.3.6 Projeto preliminar do subsistema anti rebote.....	126
4.3.7 Projeto preliminar do subsistema guia deslizamento dos pesos.....	126
4.3.8 Projeto preliminar do subsistema de fixação da estrutura da máquina no solo.....	126
4.3.9 Projeto preliminar do subsistema de travamento e liberação do impactador.....	127
4.3.10 Projeto preliminar do subsistema elevação do conjunto massa/impactador.....	128
4.3.11 Simulação computacional da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	128
4.4 Projeto detalhado de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	130
4.5 Fabricação de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	130
4.6 Testes da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	134

4.6.1 Análise do dano por delaminação nas placas compósitas através do software IMAGE J.....	136
4.6.2 Análise da velocidade de impacto nos ensaios através do software TRACKER.....	141
4.7 Melhorias na máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	142
4.7.1 Desenvolvimento do subsistema anti rebote e da instrumentação da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	142
4.7.2 Cálculos para determinação das variáveis de interesse.....	146
4.7.3 Princípio de funcionamento da instrumentação e do subsistema anti rebote.....	148
4.7.4 Seleção do acelerômetro.....	148
4.7.5 Seleção do medidor de velocidade.....	152
4.7.6 Seleção dos eletroímãs.....	152
4.7.7 Seleção do sistema de aquisição de dados.....	153
4.7.8 Seleção do software de processamento.....	155
4.7.9 Anti rebote eletromecânico.....	155
4.8 Fabricação da instrumentação e do anti rebote automatizado.....	158
4.9 Testes da máquina de impacto por queda de peso com a instrumentação.....	161
4.10 Problemas encontrados na máquina de impacto por queda de peso.....	162
4.10.1 Substituição das buchas de deslizamento.....	162
4.10.2 Retificação da abertura de fixação do corpo de prova.....	163
4.10.3 Flutuação dos pesos.....	164
4.10.4 Equipamento saltando do solo.....	165
4.11 Máquina de Impacto por queda de peso para materiais compósitos desenvolvida.....	166
CAPÍTULO 5 .....	168
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	168
5.1 Conclusões.....	168
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	169
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170
ANEXO A.....	174
ANEXO B.....	176
ANEXO C.....	187

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Gráfico da evolução dos materiais de engenharia ao longo do tempo.....	24
Figura 2.2 - Dano causado em função da velocidade de impacto. ....	25
Figura 2.3 - Barra de Hopkinson .....	27
Figura 2.4 - Barra de Hopkinson utilizada em ensaio de impacto.....	26
Figura 2.5 - Ensaio de Impacto balístico .....	28
Figura 2.6 - Ensaio de impacto balístico utilizando arma de gás de alta pressão.....	28
Figura 2.7 - Ensaio de impacto Charpy. ....	31
Figura 2.8 - Ensaio de impacto Izod.....	32
Figura 2.9 - Equipamento de ensaio por queda de peso instrumentado. ....	33
Figura 2.10 - Esquema representativo do ensaio de impacto por queda de peso. ....	34
Figura 2.11 - Dispositivo para evitar o segundo impacto.....	35
Figura 2.12 - Compósito laminado sem perfuração do corpo de prova. ....	35
Figura 2.13 - Compósito laminado com perfuração do corpo de prova. ....	36
Figura 2.14 - Parâmetros para análise do dano causado em materiais compósitos .....	37
Figura 2.15 - Tipos de danos causados na matriz compósita. ....	39
Figura 2.16 - Delaminação em placa compósita.....	40
Figura 2.17 - Rompimento das fibras de uma placa compósita.....	41
Figura 2.18 - Penetração de uma placa compósita. ....	42
Figura 2.19 - Ensaio de compressão após impacto - CAI.....	42
Figura 3.1 - Corpo de prova para ensaio de impacto por queda de peso.....	45
Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia de projeto adotada no trabalho.....	48
Figura 3.3 - Ferramentas para o cálculo da área delaminada através do software IMAGE J...	50
Figura 3.4 - Utilização de figuras geométricas para o cálculo da área delaminada. ....	50
Figura 3.5 - Calibração dos parâmetros na inicialização do software IMAGE J .....	50
Figura 3.6 - Interface do software TRACKER utilizado no cálculo da velocidade de impacto .....	52
Figura 4.1 - Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.....	54
Figura 4.2 - Impactador para ensaio de impacto por queda de peso. ....	55
Figura 4.3 - Máquina de impacto com mecanismo de guia tubular único.....	55
Figura 4.4 - Base de fixação da máquina de impacto.....	56
Figura 4.5 - Base de fixação de corpo de prova. ....	57

Figura 4.6 - Dimensões do corpo de prova.....	57
Figura 4.7 - Instron CEAST 9310 .....	58
Figura 4.8 - Instron CEAST 9340 .....	60
Figura 4.9 - Instron CEAST 9350 padrão.....	61
Figura 4.10 - Instron CEAST 9350 com opcionais .....	62
Figura 4.11 - Wance DIT183E .....	64
Figura 4.12 - Estrutura principal.....	65
Figura 4.13 - Mecanismo de elevação do impactador .....	66
Figura 4.14 - Mecanismo de trava e liberação do impactador.....	66
Figura 4.15 - Conjunto massa-impactador .....	67
Figura 4.16 - Base, sistema de fixação do corpo de provas e o sistema anti rebote.....	67
Figura 4.17 - Sistema anti rebote.....	68
Figura 4.18 - Desenho esquemático e a foto do equipamento utilizado no ensaio.....	69
Figura 4.19 - Impactador utilizado nos ensaios.....	69
Figura 4.20 - Dimensões do corpo de prova e os suportes rígidos de fixação com parafusos.	70
Figura 4.21 - Máquina de impacto por queda de peso projetado e fabricado na pesquisa. ....	71
Figura 4.22 - Atuador pneumático a) sistema de liberação b) sistema de amortecimento. ....	72
Figura 4.23 - (a) desenho concebido (b) equipamento fabricado.....	73
Figura 4.24 - Conjunto massa impactador (A) célula de carga (B) Estrutura de alumínio (C) Eletroímã (D) barras guias.....	74
Figura 4.25 - Base de fixação do corpo de prova. ....	75
Figura 4.26 - Máquina de impacto por queda de peso desenvolvida. ....	76
Figura 4.27 - (a) montagem do impactador (b) corpo de prova fixada na base.....	77
Figura 4.28 - Máquina de impacto por queda de peso: 1) base em forma de L de chapa de aço, 2) uma torre de queda de peso, 3) um elevador, 4) uma unidade de controle e 5) um sistema de freio.....	78
Figura 4.29 - Base do equipamento.....	78
Figura 4.30 - Componentes da torre de queda de peso; 1) impactador 2) sensor de força 3) peso de queda 4) Eletroímã.....	79
Figura 4.31 - Sistema anti rebote.....	80
Figura 4.32 - Conjunto massa impactador.....	80
Figura 4.33 - Desenho esquemático da máquina de impacto por queda de peso desenvolvida. .....	81
Figura 4.34 - Máquina de impacto desenvolvida na pesquisa.....	83

Figura 4.35 - Desenho esquemático do equipamento desenvolvido. ....	85
Figura 4.36 - Máquina de impacto por queda de peso desenvolvida. ....	86
Figura 4.37 - (a) Fixação do corpo de prova por grampos (b) base do equipamento. ....	86
Figura 4.38 - Conjunto massa/impactador. ....	87
Figura 4.39 - Desenho esquemático do equipamento desenvolvido. ....	88
Figura 4.40 - Gráfico da energia de impacto das máquinas pesquisadas. ....	90
Figura 4.41 - Gráfico das máquinas de impacto por queda de peso com energia de impacto. ....	91
Figura 4.42 - Esboço da concepção do subsistema estrutural da máquina. ....	95
Figura 4.43 - Esboço da concepção do subsistema fixação da estrutura da máquina no solo. ....	97
Figura 4.44 - Esboço da concepção do subsistema base da máquina. ....	99
Figura 4.45 - Esboço da concepção do subsistema fixação do corpo de prova. ....	101
Figura 4.46 - Esboço da concepção do subsistema guia de deslizamento dos pesos. ....	104
Figura 4.47 - Esboço da concepção do subsistema peso de impacto. ....	106
Figura 4.48 - Esboço da concepção do subsistema impactador. ....	108
Figura 4.49 - Esboço da concepção do subsistema de travamento e liberação do impactador. (a) Placa selecionadora de pesos (b) Pino de liberação do impactador. ....	110
Figura 4.50 - Esboço da concepção do subsistema elevação do conjunto massa/impactador. ....	112
Figura 4.51 - Esboço da concepção do Subsistema anti rebote. ....	114
Figura 4.52 - Esboço da concepção do final do equipamento. ....	116
Figura 4.53 - Base de fixação. ....	117
Figura 4.54 - Impactador para ensaio de impacto por queda de peso. ....	118
Figura 4.55 - Amortecedor de vibração selecionado para a fixação da estrutura no solo. ....	127
Figura 4.56 - Placa selecionadora de pesos. ....	128
Figura 4.57 - Análise de tensão máxima na máquina de impacto. ....	129
Figura 4.58 - Análise da deformação máxima na máquina de impacto. ....	130
Figura 4.59 - Estrutura da máquina soldada, base e os amortecedores de vibrações. ....	131
Figura 4.60 - Impactador de ponta semiesférica em aço SAE 4340. ....	132
Figura 4.61 - Placa selecionadora de pesos com os pesos de impacto. ....	132
Figura 4.62 - Estrutura da máquina soldada. ....	133
Figura 4.63 - Tubos cilíndricos utilizados como guias de deslizamento dos pesos. ....	133
Figura 4.64 - Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos desenvolvida. .....	134
Figura 4.65 - Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos. ....	135
Figura 4.66 - Área delaminada inferior para energia de impacto de 96J (a) P14. (b) P8. ....	136

Figura 4.67 - Área delaminada frontal para energia de impacto de 96J (a) P14. (b) P8 .....	137
Figura 4.68 - Gráfico da área do dano em função da energia de impacto nas placas P8. ....	139
Figura 4.69 - Gráfico da área do dano em função da energia de impacto nas placas P10. ....	139
Figura 4.70 - Gráfico da área do dano em função da energia de impacto nas placas P12. ....	140
Figura 4.71 - Gráfico da área do dano em função da energia de impacto nas placas P14. ....	140
Figura 4.72 - Máquina de impacto por queda de peso. (a) sem instrumentação (b) com instrumentação e sistema anti rebote. ....	146
Figura 4.73 - Osciloscópio utilizado nos ensaios .....	150
Figura 4.74 - Gráfico para definição da tensão. ....	151
Figura 4.75 - Gráfico para definição da aceleração G. ....	152
Figura 4.76 - Funcionamento do sistema de aquisição de dados.....	153
Figura 4.77 - Sistema anti rebote desenvolvido. ....	155
Figura 4.78 - Detalhe da mola de torção utilizada na fixação do sistema anti rebote. ....	156
Figura 4.79 - Sistema anti rebote automatizado (a) antes do ensaio (b) pronto para o ensaio (c) após o ensaio evitando o segundo impacto .....	157
Figura 4.80 - Suporte do medidor de velocidade.....	158
Figura 4.81 - Fixação do acelerômetro no peso.....	158
Figura 4.82 - Suporte de fixação dos eletroímãs .....	159
Figura 4.83 - Batentes em nylon do sistema anti rebote.....	159
Figura 4.84 - Placa condicionadora de dados e a placa eletrônica de controle. ....	160
Figura 4.85 - (a) Máquina de impacto montada (b) Detalhe da caixa com o sistema de aquisição de dados (c) Detalhe do sistema anti rebote automatizado.....	160
Figura 4.86 - Gráficos da força de impacto em função do tempo (a) Teórico (b) Obtido nos ensaios.....	161
Figura 4.87 - Buchas de nylon desgastadas. ....	163
Figura 4.88 - Novas buchas de bronze para o deslizamento dos pesos. ....	163
Figura 4.89 - Placa de fixação do corpo de prova após o alargamento da abertura. ....	164
Figura 4.90 - Flutuação dos pesos durante os ensaios. ....	164
Figura 4.91 - Equipamento. (a) antes do ensaio (b) após o impacto .....	166
Figura 4.92 - Máquina de impacto por queda de peso desenvolvida na pesquisa. ....	167

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.....	23
Tabela 3.1 - Codificação das placas utilizadas nos ensaios.....	44
Tabela 3.2 - Medida da massa dos corpos de provas submetidos a impacto por queda de peso. .....	45
Tabela 3.3 - Média das medidas dos corpos de provas submetidos a impacto por queda de peso. .....	47
Tabela 4.1 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema estrutural da máquina.....	93
Tabela 4.2 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema estrutural da máquina.....	96
Tabela 4.3 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema base da máquina.....	98
Tabela 4.4 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema fixação do corpo de prova. ....	100
Tabela 4.5 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema guia de deslizamento dos pesos.....	102
Tabela 4.6 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema peso de impacto.....	105
Tabela 4.7 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema impactador. .....	107
Tabela 4.8 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema de travamento e liberação do impactador. ....	109
Tabela 4.9 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema elevação da carga.....	111
Tabela 4.10 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema anti rebote. .....	113
Tabela 4.11 - Matriz morfológica com as concepções do projeto.....	114
Tabela 4.12 - Matriz morfológica com os princípios de solução escolhidos para o projeto. .	115
Tabela 4.13 - Níveis de energia de impacto. ....	123
Tabela 4.14 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P8.....	137
Tabela 4.15 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P10.....	138

Tabela 4.16 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P12.....	138
Tabela 4.17 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P14.....	138
Tabela 4.18 - Comparação do método teórico e da análise de vídeo da velocidade e da energia de impacto.....	141
Tabela 4.19 - Comparação do método teórico e do método instrumentado da velocidade e da energia de impacto.....	162
Tabela 4.20 - Comparação dos métodos de cálculo da velocidade e da energia de impacto.	162

## SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

### *Letras Latinas*

W	Largura
L	Comprimento
$E_f$	Módulo de flexão
t	Espessura do corpo de prova,
d	Diâmetro do impactador
m	Massa
g	Aceleração da gravidade
H	Altura de impacto
v	Volume
r	Raio semiesfera impactador
h	Comprimento impactador
Hc	Altura do corpo de prova
Ea	Energia absorvida no tempo
I	Impulso da força
Q	Quantidade de movimento
E	Energia de impacto
V	Velocidade de impacto
Fp	Força peso
HRC	Dureza Hockwell C

*Letras Gregas*

$\varepsilon_c$	Deformação de compressão
$\tau$	Tensão de cisalhamento interlaminar,
$\Sigma$	Resistência a flexão
$\gamma$	Energia de fratura,
$\delta(t)$	Deformação do impactador no instante t
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\rho$	Massa específica

*Abreviações*

ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of Automotive Engineers - EUA
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
CAI	Compression After Impact

*Siglas*

P8	Placa compósita com manta de fibra de vidro (8 camadas)
P10	Placa compósita com manta de fibra de vidro (10 camadas)
P12	Placa compósita com manta de fibra de vidro (12 camadas)
P14	Placa compósita com manta de fibra de vidro (14 camadas)

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos em projetos estruturais vem crescendo nos dias atuais e sua aplicação esta sendo feita em diversas áreas da engenharia. Um dos principais fatores da escolha desse tipo de material é que nem sempre as ligas de metais convencionais são capazes de satisfazer a necessidade dos projetistas.

Os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras ou partículas são amplamente utilizados e surgem rapidamente como possíveis substitutos para materiais metálicos convencionais em partes estruturais e em diversas aplicações industriais. Os engenheiros da indústria aeronáutica estão constantemente procurando materiais estruturais que possuam entre outras características alta resistência e /ou alta rigidez em relação ao seu peso, apresentem resistência à abrasão e ao impacto, e que ao mesmo tempo sejam resistentes a corrosão. Esta é uma combinação de características desejáveis. Com frequência, os materiais mais resistentes são relativamente densos e um aumento da resistência ou da rigidez resulta, em geral, em uma diminuição da resistência ao impacto. Assim, devido essa condição o uso de materiais compósitos tem sido utilizado em grande escala com as mais diversas possibilidades de aplicações na engenharia de materiais (D'ALMEIDA; MONTEIROB, 1997).

O compósito de fibra de carbono, por exemplo, vem sendo empregado em vários componentes das aeronaves, desde simples painéis dos interiores até as estruturas primárias e secundárias das fuselagens, empenagens verticais e horizontais, e também dos painéis de comandos primários de vôo.

A utilização dos materiais compósitos dentro da indústria automobilística é bem mais recente do que na área aeronáutica. Inicialmente, eram produzidos somente pára-choques e tetos de automóveis. Atualmente, o material compósito é utilizado para a fabricação de capôs, carter de óleo, colunas de direção, árvores de transmissão, molas laminadas, painéis, entre outras aplicações.

Entretanto, o compósito não possui uma grande ductilidade e grande absorção da energia de pequenos impactos através de deformações locais como alguns metais conseguem. Na melhor das situações ele consegue absorver grandes quantidades de energia de impacto, porém por mecanismos que degradam e danificam o compósito (POTTER, 1997). Vários

podem ser os motivos que levam a ocorrência desse impacto, como por exemplo, a queda acidentalmente de uma ferramenta sobre uma estrutura ou alguma peça que esteja na pista e seja arremessada pela roda do trem de pouso contra a estrutura durante a decolagem e pouso de um avião.

Quantificar e avaliar as consequências desse impacto se torna então necessário uma vez que é preciso prever se determinado impacto irá ou não inviabilizar o material utilizado. Dois tipos de ensaios de impacto são utilizados, sendo eles: o ensaio feito com pequenas massas sob alta velocidade, denominado de “gas-gun” e o ensaio de um projétil de massa maior sob baixa velocidade denominado de queda-livre ou “drop-test”, sendo que neste trabalho será estudado o segundo caso, ou seja, o impacto de baixas velocidades.

## **1.1 Justificativa**

Os materiais compósitos geralmente absorvem a energia de pequenos impactos, porém tem-se uma mudança de suas características causadas pelos danos, que muitas vezes são imperceptíveis a olho nu. Com isso, tem-se que o estudo desse fenômeno é de suma importância para a indústria de desenvolvimento de novos materiais e para a sociedade, visto que existe uma redução significativa das propriedades mecânicas do material, e conseqüentemente a confiabilidade de um componente fabricado em material compósito é afetada negativamente.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

- O desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

### **1.2.2 Específicos**

- Estudo das máquinas de impacto por queda de peso para materiais compósitos disponíveis no mercado;
- Aprender o princípio de funcionamento de todos os componentes do equipamento;

- Utilizar a metodologia de projeto para o desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos;
- Avaliar os danos causados pelo impacto por queda de peso em materiais compósitos.

## CAPÍTULO 2

### 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Materiais compósitos

Define-se material “composto”, ou “compósito” – o segundo é o termo de uso consagrado – como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem, resultando em um material de melhor desempenho do que se fosse exclusivamente com uma fase (CALLISTER, 2002). Trata-se, portanto, de uma classe de materiais heterogêneos cujo objetivo é a obtenção de um material que, combinando as características dos seus componentes de maneira adequada, apresente um desempenho estrutural melhor que se comparado a outros materiais, sob condições específicas de utilização.

Um material compósito é basicamente o produto da combinação de um reforço (em geral fibras) com uma fase ligante, conhecida como matriz, sobre uma superfície de um molde que define sua forma. A fase ligante é responsável pela união dos constituintes, tendo a função de transmitir o esforço entre as fibras, além de mantê-las protegidas do meio. Segundo Callister (2002) as fibras têm a função de melhorar o desempenho mecânico da matriz através do aumento da resistência e da rigidez mecânica, podendo se apresentar de forma contínua ou de forma descontínua (picada). A tabela 2.1 mostra um quadro com as principais vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.

**Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.**

Vantagens	Desvantagens
1. Elevada rigidez específica	1. Grande dispersão nas propriedades
2. Elevada resistência específica	2. Sensibilidade aos processos de produção
3. Elevada resistência à fadiga	3. Análise complexa necessária
4. Boa resistência à corrosão	4. Fratura e sensibilidade ao dano
5. Estabilidade térmica e baixa condutibilidade	5. Reparação complexa
6. Condutibilidade elétrica variável com o projeto	6. Descarte pode ser difícil
7. Amortecimento de vibrações	7. Custo de matéria prima e fabricação

**Fonte: (COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, 2002)**

Dentre as matrizes mais empregadas estão às poliméricas, cerâmicas e metálicas. As fibras mais empregadas para reforço em compósitos são as fibras de vidro, de boro, de sisal, de quartzo, de carbono entre outras (BAERE; PAEPEGEM; DEGRIECK, 2007).

Na figura 2.1 tem-se a evolução dos materiais compósitos e seu ritmo crescente desde a pré-história (> 10.000 AC, a Idade da Pedra) até as perspectivas futuras 2020. Com o domínio do fogo e consequentemente da metalurgia a partir de 4000 AC o homem utilizou o cobre, o bronze e o ferro, para fabricação de armas, ferramentas, objetos de arte entre outros utensílios, estimulando enormes avanços em tecnologia, deixando assim os materiais compósitos em segundo plano. A partir da década de 1960 os engenheiros foram desenvolvendo os “materiais de engenharia” com resistência e qualidade igual aos dos metais. A taxa de desenvolvimento de novas ligas metálicas era lenta, a demanda por aço e ferro em alguns países diminuiu. As indústrias de polímeros e compósitos, por outro lado aumentaram rapidamente, assim como as projeções para o crescimento desta nova tecnologia de alto desempenho. Havia também a evolução das outras classes de materiais como, por exemplo, cimentos, refratários, vidros, borracha, baquelite e polietileno.

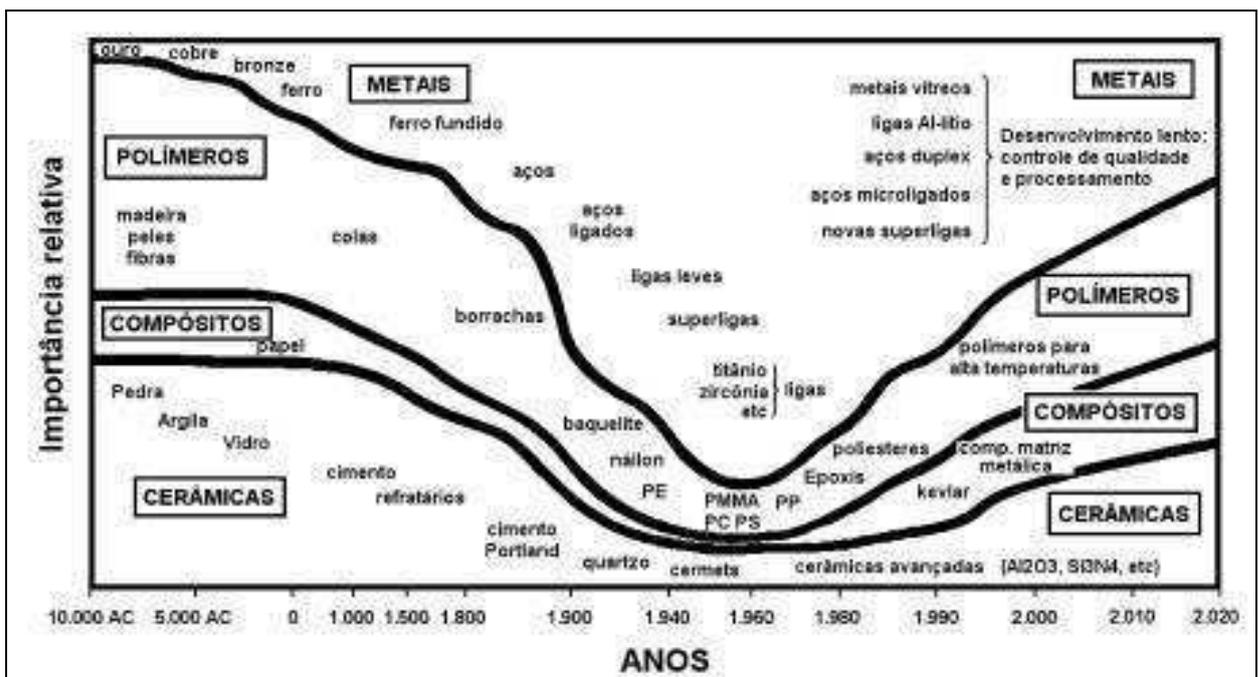


Figura 2.1 - Gráfico da evolução dos materiais de engenharia ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado (ASHBY, 2005)

## 2.2 Ensaios em compósitos

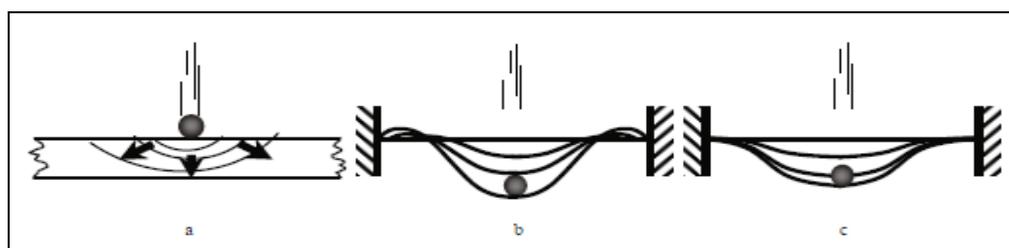
Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Entre as principais propriedades dos materiais obtidas por ensaio, podem-se citar: resistência, elasticidade, plasticidade, resiliência, e tenacidade (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

Nos materiais compósitos é muito importante conhecer as propriedades mecânicas do material da matriz, pois se uma propriedade deve ser melhorada, a seleção adequada de um material para a matriz pode ser suficiente para resolver este problema. Por exemplo, a utilização de uma matriz com um módulo de elasticidade ligeiramente maior pode reduzir um problema na fibra de microflambagem para um nível aceitável (COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, 2002).

## 2.3 Ensaio de Impacto em Compósitos

O ensaio de impacto consiste numa carga aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martetele ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas no ensaio são intercambiáveis, possuem diferentes pesos e podem cair de alturas variáveis. Como resultado do ensaio, obtém-se a energia absorvida pelo material, força de impacto, entre outras variáveis.

Segundo Abrate (2005) o impacto em materiais compósitos pode ser classificado em baixa velocidade, velocidade intermediária, alta velocidade (balística) e regimes de hipervelocidade. A figura 2.2 ilustra o dano causado em função da velocidade de impacto.



**Figura 2.2 - Dano causado em função da velocidade de impacto.**

**Fonte: (ABRATE, 2005)**

O primeiro caso (a) ilustra o impacto de alta velocidade, geralmente é resultado do impacto de pequenos fragmentos causado por armas de fogo (balística) ou fragmentos de ogivas explosivas. Este impacto ocorre pela propagação da onda de tensão através da espessura do material, em que a estrutura não tem tempo de responder, levando a um dano localizado. Impactos de alta velocidade variam de 50m/s a 1.000 m/s; O segundo caso (b) caracteriza o dano causado por impacto de velocidade intermediária que ocorrem na faixa entre 10 e 50m/s, esse impacto pode ser classificado tanto como impacto de baixa ou alta velocidade, objetos lançados por um furacão ou tornado, e objetos estranhos em estradas lançados contra veículos são exemplo de impacto de velocidade intermediária; O terceiro caso (c) caracteriza o impacto de uma massa em um material compósito, também conhecido como impacto de baixa velocidade pode-se citar, por exemplo, a queda de uma ferramenta, onde normalmente ocorrem em velocidades inferiores a 10 m/s.

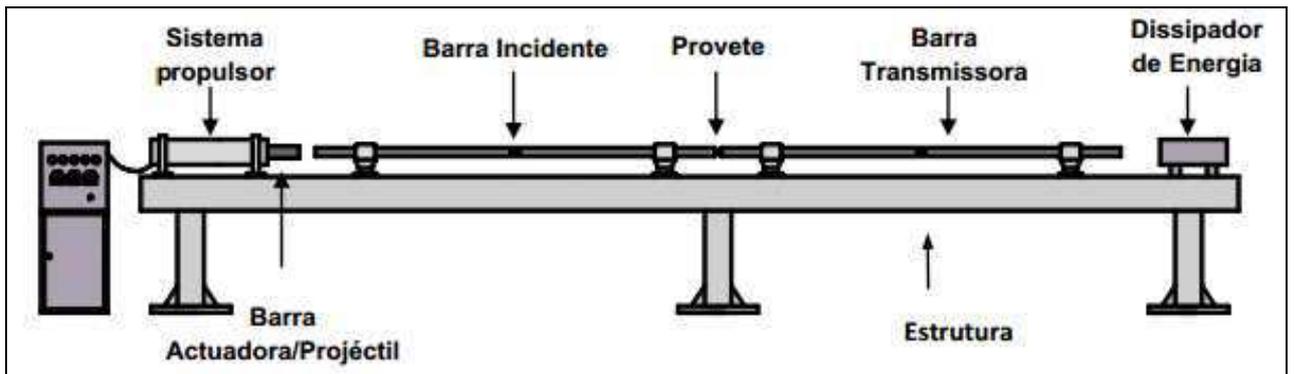
Existe ainda o impacto de hipervelocidade com velocidades de 2 a 5 km/s, neste caso o projétil está se movendo em velocidades muito altas e o material alvo se comporta como um fluido. Este tipo de impacto é mais frequentemente estudado no desenvolvimento de proteção das espaçonaves contra o impacto de micrometeoritos, que pode causar grandes danos à estrutura.

### **2.3.1 Impacto de alta velocidade**

Segundo Abrate (2005), o ensaio de impacto de alta velocidade varia de 50 a 1000m/s, existem vários métodos que determinam as propriedades mecânicas dos materiais compósitos nesse ensaio, entre eles os mais utilizados são a barra de Hopkinson e o impacto balístico.

#### **2.3.1.1 Barra Hopkinson**

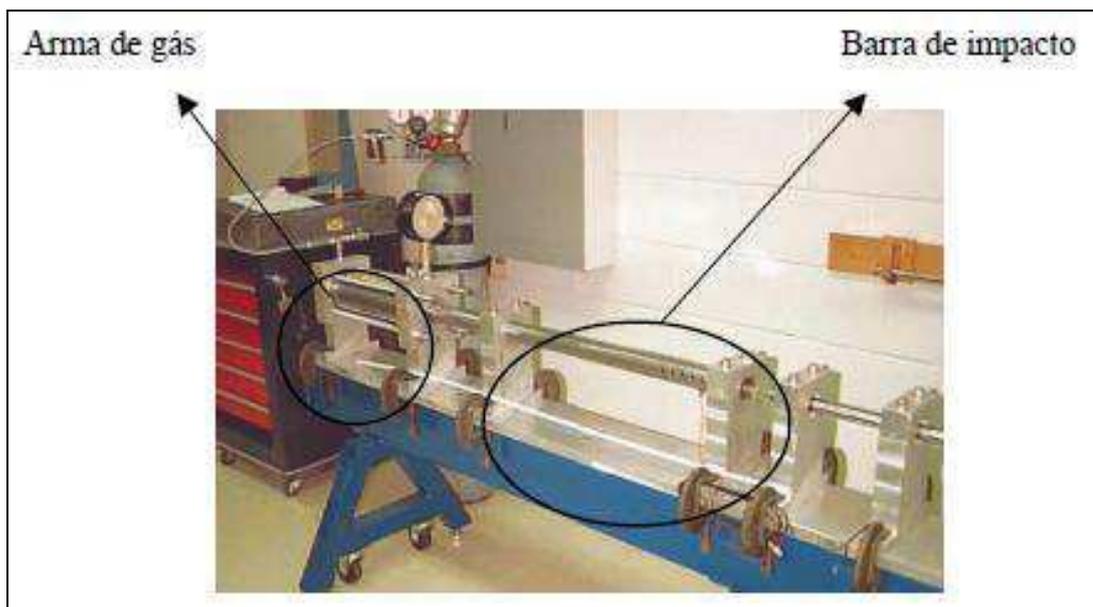
A barra Hopkinson é um dispositivo desenvolvido para caracterizar mecanicamente materiais a elevadas velocidades de deformação. O modo de utilização mais conhecido da barra de Hopkinson está mostrado na Figura 2.3. Esta consiste em duas longas barras cilíndricas com o mesmo diâmetro, designadas por barra incidente e barra transmissora, e uma barra cilíndrica de menor comprimento, designada por barra de impacto ou barra projétil, normalmente impulsionada por uma arma de pressão de ar comprimido contra a barra incidente. O ar é normalmente fornecido através de um reservatório de alta pressão e a pressão do disparo é controlada através de válvulas. (Pinto, 2009).



**Figura 2.3 - Barra de Hopkinson.**

Fonte: (PINTO, 2009)

Segundo Kaiser (1998) existem diferentes tipos de barra Hopkinson como: a barra de compressão, a barra Hopkinson com carregamento de soco, a barra de tração e a barra Hopkinson para testes de cisalhamento. A figura 2.4 mostra a foto de uma barra Hopkinson utilizado para ensaio de impacto.

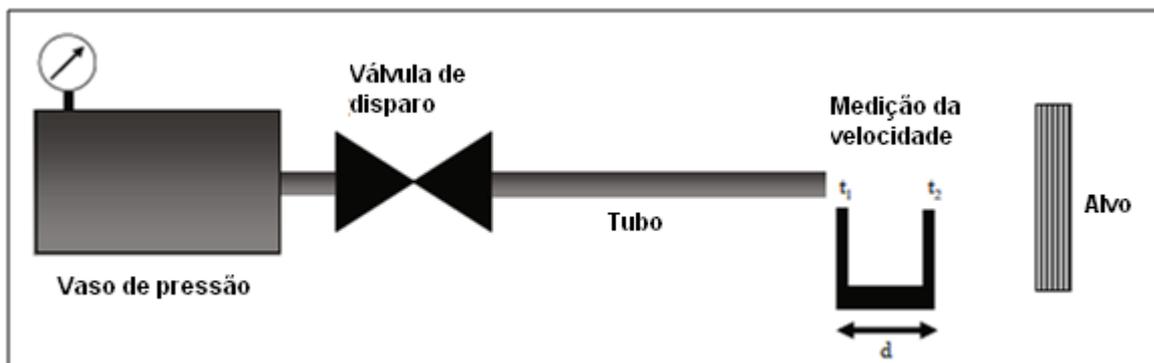


**Figura 2.4 - Barra Hopkinson utilizada em ensaio de impacto.**

Fonte: Adaptado (KAISER, 1998)

### 2.3.1.2 Impacto balístico

O ensaio de Impacto balístico pode ser feito utilizando uma arma de gás de alta pressão, tal como o mostrado na figura 2.5. Geralmente o gás nitrogênio é armazenado em um vaso de pressão acoplado a um tubo onde o projétil se desloca. Quando o gás atingir a pressão determinada pelo usuário do equipamento, uma válvula de ação rápida é acionada liberando o disparo contra o corpo de prova.

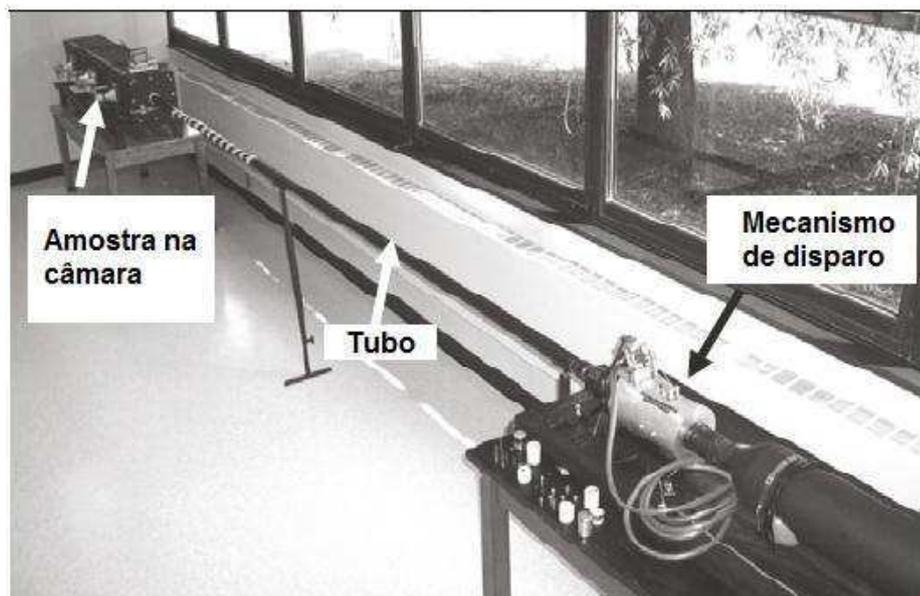


**Figura 2.5 - Ensaio de Impacto balístico.**

**Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)**

Geralmente, este ensaio não destrói o corpo de prova completamente, mas resulta em danos em grande escala ou perfuração da amostra. Esse ensaio pode ser instrumentado, permitindo que sejam obtidos, por exemplo, gráficos dos parâmetros de força de impacto, energia absorvida ou velocidade de impacto no corpo de prova, com isso, é possível a análise do impacto em mais detalhes.

A figura 2.6 mostra o ensaio de impacto balístico utilizando arma de gás de alta pressão.



**Figura 2.6 - Ensaio de impacto balístico utilizando arma de gás de alta pressão.**

Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)

### 2.3.2 Impacto de média velocidade

Segundo Abrate (2005) o impacto de média velocidade está compreendido entre os regimes de alta e baixa velocidade. Esse impacto ocorre numa faixa de velocidade entre 20 e 100 m/s geralmente sem danificar o impactador. Dependendo da massa do projétil, um grande dano pode ocorrer na amostra testada nessa velocidade de ensaio. Este tipo de impacto pode ocorrer, por exemplo, no lançamento de detritos contra um carro em movimento numa estrada, sendo a velocidade do impactador menor que a velocidade de uma bala, o impacto de granizo ou o impacto de um taco de baseball contra uma bola. A importância desse método não é somente a caracterização do dano, mas também investigar a dissipação da energia e o mecanismo de falha.

O equipamento utilizado para este ensaio geralmente é o mesmo utilizado no ensaio para teste balístico, ou seja, com armas de gás de alta pressão.

### 2.3.3 Impacto de baixa velocidade

Os materiais compósitos são suscetíveis a danos causados por impacto de baixa velocidade. Em muitos casos o dano não é aparente na superfície, entretanto o dano interno pode ser significativo, reduzindo a resistência residual e a vida útil da estrutura compósita. Estudos do dano causado por impacto em materiais compósitos tem focado em impactos

dinâmicos, mecanismo do dano, caracterização das propriedades residuais após o impacto e resistência ao dano (ABRATE, 2005).

Cantwell et al. (1991) classifica como de baixa velocidade impactos com velocidade até 10 m/s. Liu e Malvern (1987) sugere que o tipo de impacto pode ser classificado de acordo com o dano causado no corpo de prova. Já Abrate (2005) e Robinson e Davies (1992) definem o impacto de baixa velocidade como sendo uma onda de tensão que se propaga através da espessura do corpo de prova e não desempenha um papel significativo na distribuição tensões e sugere um modelo de transição para a alta velocidade. Uma zona cilíndrica embaixo do impactador é submetida a uma deformação uniforme, enquanto a onda de tensão se propaga através da placa, o que resulta numa deformação de compressão  $\varepsilon_c$  conforme a equação 2.1 a seguir.

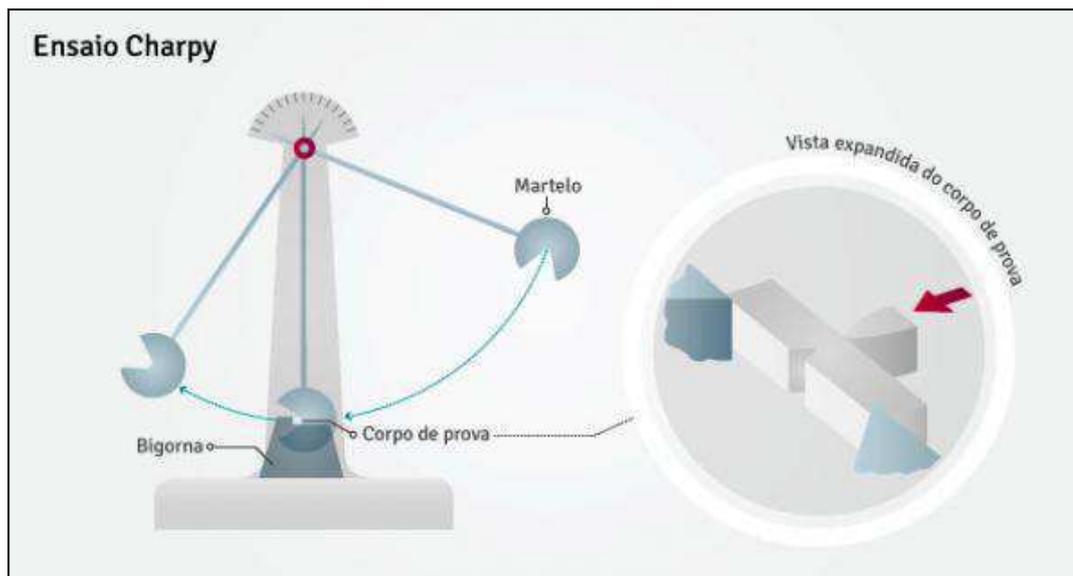
$$\varepsilon_c = \frac{\textit{Velocidade de impacto}}{\textit{Velocidade de som do material}} \quad \text{Equação 2.1}$$

As tensões de falhas entre 0,5 e 1% para materiais compósitos de epóxi resulta em uma transição de onda de tensão para ensaios com velocidade de impacto entre 10 e 20 m/s.

## 2.4 Equipamentos para teste

### 2.4.1 Ensaio Charpy

Muitos dos primeiros estudos de impacto sobre materiais compósitos foram realizados usando o método de ensaio Charpy originalmente desenvolvido para ensaios de metais. A razão para esta escolha foi o fato de que o ensaio Charpy é simples de usar e pode ser instrumentado, portanto, pode produzir informações sobre os processos de absorção e dissipação de energia em compósitos. O corpo de prova tem o formato de uma barra de seção transversal quadrada com uma entalhe em forma de V no seu ponto médio, como mostrado na figura 2.7. O corpo de prova é fixado em um plano horizontal e impactado pela oscilação de um pêndulo, também chamado de martelo.



**Figura 2.7 - Ensaio de impacto Charpy.**

**Fonte:** Disponível em: < <http://www.area42.com.br/ciencia-tecnologia/dossie-rms-titanic/attachment/ensaio-charpy>> Acesso em: 20/04/2013.

A energia dissipada durante o impacto geralmente é registrada por um mostrador no aparelho de ensaio. Mais informações podem ser obtidas na instrumentação do pêndulo com um extensômetro, permitindo assim a determinar a variação da força de impacto com o tempo, a energia absorvida durante o impacto também pode ser determinada pela integração do sinal de força versus o tempo.

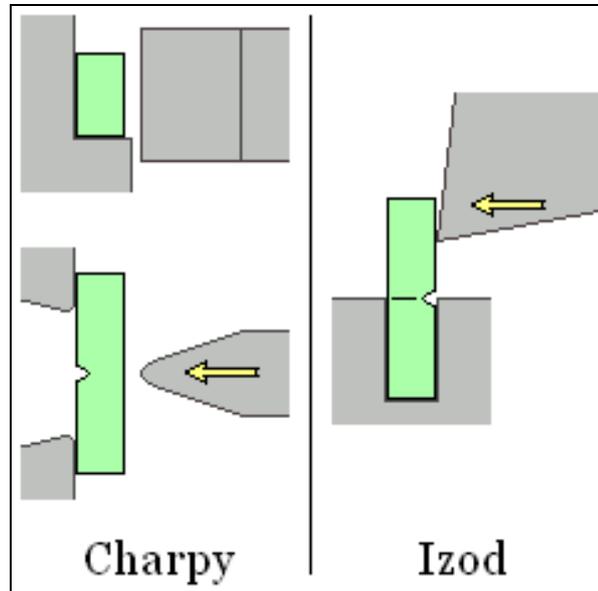
Segundo Cantwell et al. (1991) o ensaio Charpy sofre algumas desvantagens, tais como o fato de que as curvas de força versus o tempo, muitas vezes contêm alta oscilações harmônicas de frequência resultantes da resposta natural do pêndulo. Além disso, o teste é destrutivo, induzindo modos de falha que não são necessariamente observadas no impacto de baixa velocidade em estruturas operacionais.

O teste Charpy só é adequado para classificação de impacto dos compósitos de fibra contínua e como uma primeira etapa para determinar a resistência dinâmica destes materiais.

#### **2.4.2 Ensaio Izod**

O ensaio de impacto Izod é mostrado esquematicamente na figura 2.8. O procedimento para o teste é semelhante aos descrito no ensaio Charpy. A diferença está na forma de montagem do corpo de prova e na face do entalhe, localizado ou não na região de impacto, sendo que o corpo de prova do ensaio Izod é fixado no plano vertical com a face do entalhe

voltada para o pêndulo. O teste sofre problemas semelhantes aos relatados no ensaio Charpy e também é mais indicado como uma ferramenta para a classificação da resistência ao impacto de materiais compósitos.



**Figura 2.8 - Ensaio de impacto Izod.**

**Fonte: Disponível em:**

**<[http://enciclopedia.us.es/index.php/Archivo:Ensayos\\_Charpy\\_e\\_Izod.png](http://enciclopedia.us.es/index.php/Archivo:Ensayos_Charpy_e_Izod.png)>. Acesso em: 20/04/2013.**

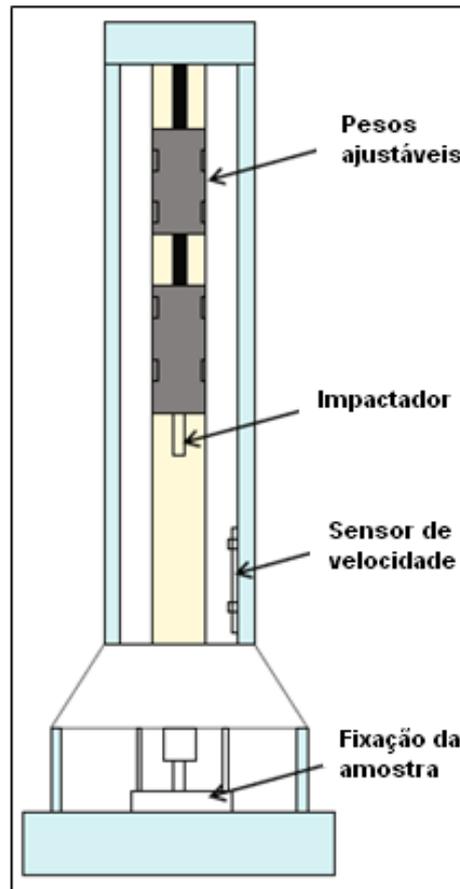
### **2.4.3 Ensaio de Impacto por queda de peso**

O ensaio de impacto por queda de peso consiste na queda de um peso a partir de uma altura pré-determinada atingindo o corpo de prova apoiado no plano horizontal. Em geral, o impacto não causa a perfuração do corpo de prova, assim pode-se determinar a energia residual se necessário.

Quando a massa está suspensa ela possui uma energia potencial que será convertida em energia cinética quando a massa for liberada. Uma vantagem desse método é a liberdade de trabalhar com corpo de provas de diversas formas ou até mesmo com a própria peça a ser estudada, sendo altamente reprodutível e com uma excelente precisão.

A velocidade do impactador pode ser determinada a partir das equações de movimento ou utilizando sensores ópticos localizados logo acima do corpo de prova. Geralmente, o impactador é instrumentado, permitindo a obtenção de gráfico da força versus o tempo, como pode conter também um transdutor de deslocamento, a fim de permitir a determinação da

dissipação de energia durante o impacto. A figura 2.9 ilustra a máquina utilizada no impacto por queda de peso.



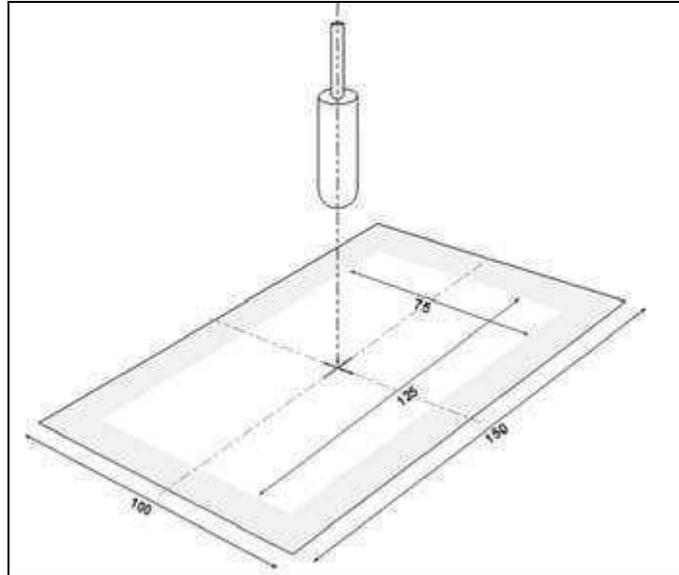
**Figura 2.9 - Equipamento de ensaio por queda de peso instrumentado.**

**Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)**

Outra vantagem desse ensaio em relação aos ensaios Charpy e Izod é que uma grande variedade de geometrias de impactador pode ser utilizada, permitindo assim que componentes com geometrias complexas possam ser testadas, embora a norma ASTM D7136/D7136M-07 sugere que o ensaio seja realizado utilizando um impactador com ponta semiesférica. Variações sobre o ensaio de queda de peso incluem o Teste de Gardner onde um impactador semiesférico se desloca dentro de um tubo guia e atinge uma placa circular pequena e o teste com dardo semiesférico que penetra no corpo de prova a partir de uma altura predeterminada.

A norma ASTM D7136/D7136M-07 determina a resistência ao dano em materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras em ensaios de impacto por queda de peso. Segundo a norma, uma placa plana retangular de material compósito é sujeita a um impacto concentrado provocado por um peso ligado a um impactador semiesférico, conforme

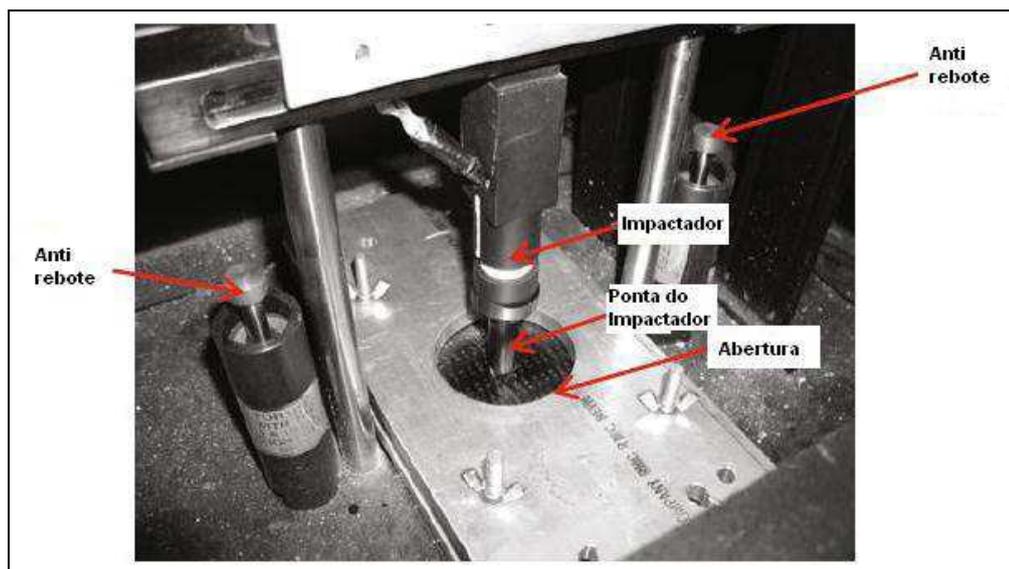
ilustrado na figura 2.10. A norma específica que o tamanho da placa deve ser de 100 x 150 mm, pois este corpo de prova pode ser utilizado no teste CAI (Compressão após Impacto) onde esse ensaio é utilizado para avaliar a resistência residual dos materiais compósitos após serem submetidos ao impacto de baixa velocidade como pode ser visto na seção 2.5.



**Figura 2.10 - Esquema representativo do ensaio de impacto por queda de peso.**

**Fonte: (SILVA, 2011)**

No ensaio de impacto por queda de peso pode ocorrer que o impactador atinja o corpo de prova várias vezes, causando um dano excessivo que não é representativo de um único impacto. Para evitar impactos repetidos, o equipamento para realização do ensaio de impacto por queda de peso é equipado com um dispositivo para evitar o segundo impacto que consiste de dois atuadores pneumáticos em ambos os lados do corpo de prova, que atua após a ocorrência do primeiro impacto. Este dispositivo pode ser visualizado na figura 2.11.



**Figura 2.11 - Dispositivo para evitar o segundo impacto.**

**Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)**

O ensaio de impacto por queda de peso instrumentado fornece dados importantes para avaliar o dano causado nos materiais compósitos, como por exemplo, o gráfico da força de impacto em função do tempo ou da deformação e da energia absorvida em função do tempo são alguns dos parâmetros que podem ser medidos. O gráfico da força de impacto em função do tempo é medido a partir do ponto inicial de contato do impactador com o corpo de prova e se prolonga por toda a espessura do corpo de prova. A energia absorvida é calculada a partir da integração do sinal da força de impacto em função do tempo.

O gráfico da força de impacto em função do tempo é um bom indicador para avaliar a progressão do dano em materiais compósitos. A figura 2.12 mostra um gráfico típico da força de impacto e da energia absorvida em função do tempo do ensaio realizado em um compósito laminado que não teve perfuração do corpo de prova. Percebe-se que o dano causado no corpo de prova foi mínimo e que a curva da força de impacto em função do tempo no gráfico é simétrica tanto ascendente como descendente. A energia do impacto é devolvida ao impactador, como evidenciado pela curva descendente do gráfico da energia absorvida em função do tempo após a força máxima.

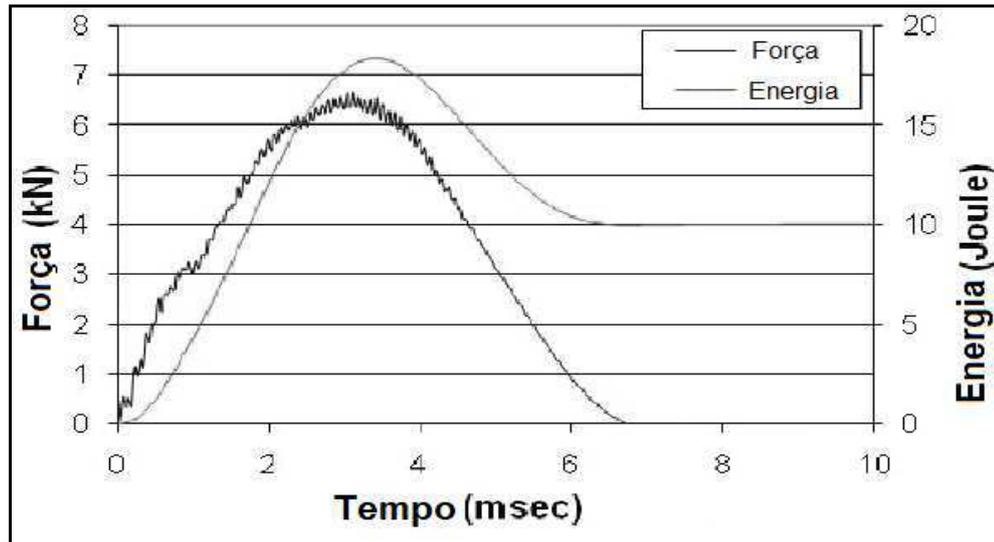


Figura 2.12 - Compósito laminado sem perfuração do corpo de prova.

Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)

Na figura 2.13 tem-se uma curva típica do ensaio de impacto por queda de peso em um compósito laminado que teve o corpo de prova perfurado. Percebe-se que a curva da força de impacto em função do tempo é assimétrica e a oscilação da curva representa o dano de impacto no corpo de prova. Como houve perfuração do corpo de prova, toda a energia do impacto é absorvida pela amostra, percebe-se também que a curva de energia é constante ao longo do tempo após a força de impacto máxima.

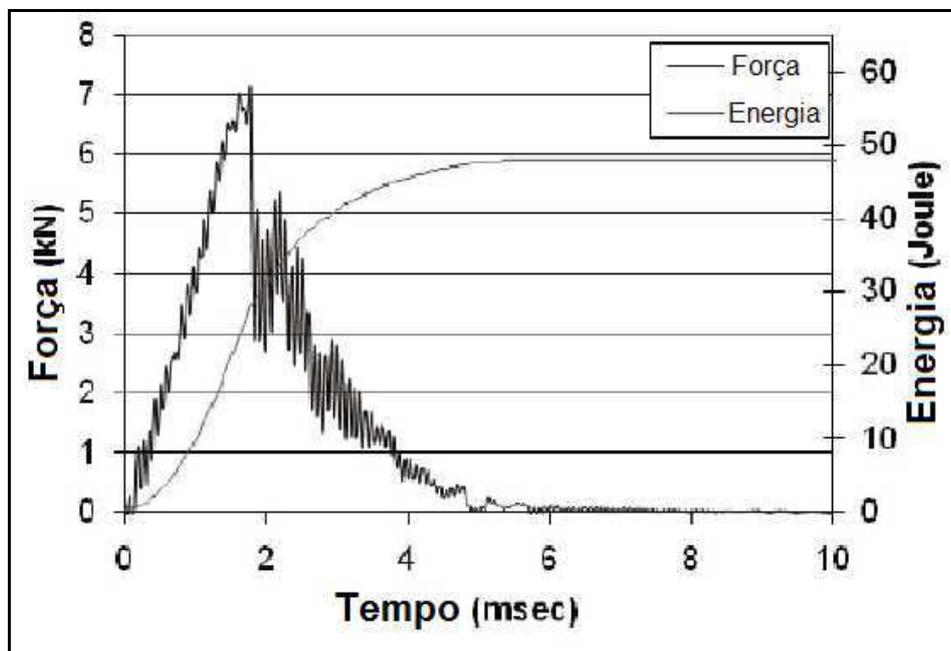
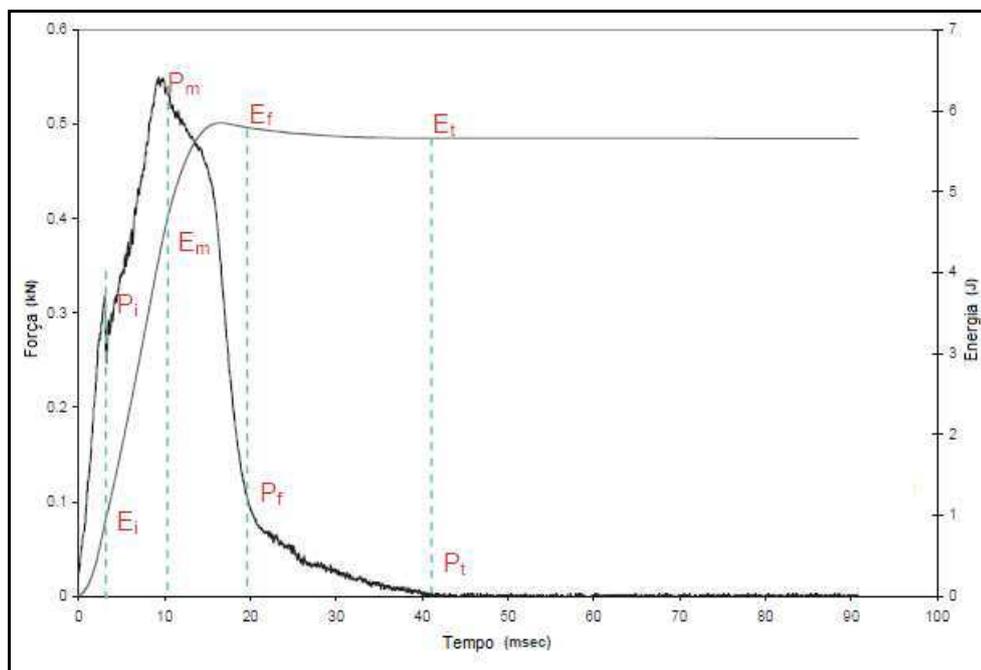


Figura 2.13 - Compósito laminado com perfuração do corpo de prova.

Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)

O ensaio de queda de peso fornece vários parâmetros para análise do dano causado em materiais compósitos como, por exemplo, ponto do início do dano ( $P_i$ ), ponto da força de impacto máxima ( $P_m$ ), ponto da força de falha ( $P_f$ ), ponto da força de impacto total ( $P_t$ ), ponto do início da energia absorvida ( $E_i$ ), energia absorvida no ponto de força de impacto máxima ( $E_m$ ), Energia no ponto de falha ( $E_f$ ) e a energia absorvida ( $E_t$ ) como pode ser visto na figura 2.14.



**Figura 2.14 - Parâmetros para análise do dano causado em materiais compósitos.**

**Fonte: Adaptado (ABRATE, 2005)**

O ponto do início do dano ( $P_i$  e  $E_i$ ) é o primeiro desvio significativo ou descontinuidade da curva do gráfico da força de impacto em função do tempo. Estes pontos significam microfissuras perceptíveis na matriz, dano na fibra, descolamento ou ruptura das camadas em compósitos sanduiche.

O ponto de força de impacto máxima ( $P_m$ ) e energia absorvida no ponto de força de impacto máxima ( $E_m$ ) significa a máxima penetração do impactador e o início do seu rebote. Em muitos casos o ponto inicial do dano coincide com o ponto de força máxima.

Os pontos da força de falha ( $P_f$ ) e da energia de falha ( $E_f$ ) representam a resposta do corpo de prova na fase final do ensaio a partir do início do rebote do impactador.

O fim do ensaio é representado pela força de impacto total ( $P_t$ ) e a energia absorvida ( $E_t$ ).

Todos esses parâmetros são influenciados por vários fatores, como a espessura e geometria do material, orientação das fibras, progressão e acumulação do dano, e a geometria do impactador.

## **2.5 Tipos de falha nos materiais compósitos submetidos ao impacto de baixa velocidade**

Os materiais compósitos reforçados com fibras possuem propriedades heterogêneas e anisotrópicas devido a organização, fração volumétrica e distribuição das fibras, bem como a orientação do carregamento possui influência significativa nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos, assim esses materiais possuem diferentes modos de falhas.

Segundo Romariz (2008) as cargas de impacto podem induzir um dano local ou global na estrutura. No caso de danos globais podemos citar um martelo quando cai de certa altura sobre uma asa de avião, afetando toda a estrutura da asa. Para o caso local temos como exemplo uma peça que se desprenda da aeronave e arremessada pelo trem de pouso acertará a estrutura da aeronave, afetando apenas o local onde a peça atingiu.

Extensas pesquisas foram feitas a respeito dos danos causados por impacto em placas de materiais compósitos. Os principais parâmetros que precisam ser conhecidos para analisar o dano causado são: material, geometria, massa, velocidade, energia cinética do impactador e a máxima força de contato. Apenas quando esses aspectos são definidos podemos analisar realmente quais os efeitos e consequências de um impacto em um compósito.

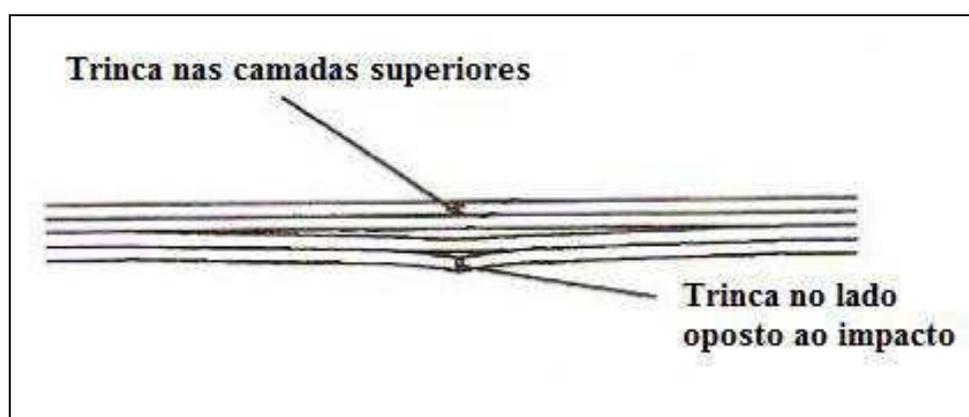
Deve-se analisar o possível modo de falha durante o impacto, onde ele poderá causar falhas dos seguintes tipos:

- Dano no lado do impacto na camada superior da placa (Causado por tensões de contato).
- Rachaduras na matriz (Causadas por tensões de cisalhamento).
- Delaminação (Causada por tensões de cisalhamento).
- Dano no lado oposto do impacto na camada inferior da placa (Causado por flexão).
- Perfuração (Normalmente um efeito balístico).

### 2.5.1 Dano na matriz

O dano na matriz é causado devido ao impacto de baixa velocidade transversalmente ao corpo de prova, nesse caso geralmente ocorre a quebra da matriz, deslocamento da fibra da matriz e o início da delaminação. Os danos poucos visíveis ocorrem em baixos níveis de energia de impacto entre 1 e 5 J. A quebra ou trinca da matriz ocorre geralmente em planos paralelos à direção das fibras nos materiais compósitos com o arranjo das fibras orientadas unidirecionalmente (ABRATE, 2005).

A figura 2.15 mostra os tipos de danos causados na matriz de um material compósito.



**Figura 2.15 - Tipos de danos causados na matriz compósita.**

**Fonte: Adaptado de (POTTER, 1997).**

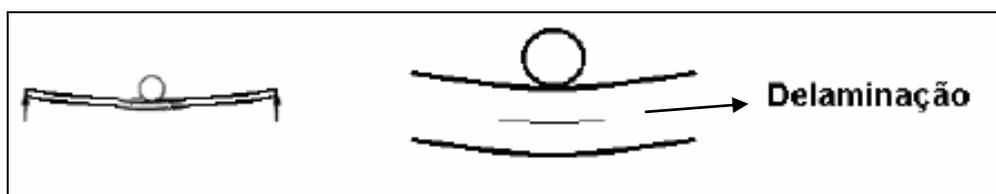
As trincas da matriz nas camadas superiores iniciam nas bordas de contato do impactador, que são formadas pela alta tensão de cisalhamento transversal através do material. As tensões de cisalhamento transversais estão relacionadas com a força de contato e a área de contato.

As trincas no lado oposto ao impacto são denominadas trincas de flexão, pois são causadas por grandes tensões de tração perpendicular ao corpo de prova. O tipo de quebra da matriz é dependente das características globais das amostras impactadas, onde as trincas de flexão nas camadas inferiores ocorrem em corpos de provas longos e finos devido a deflexão transversal excessiva, enquanto que os corpos de provas espessos e curtos são mais rígidos e necessitam de maior força de contato do impactador para produzir o mesmo fenômeno.

### 2.5.2 Delaminação

A delaminação é a separação das camadas do material compósito, é resultado da incompatibilidade de rigidez de flexão entre as camadas adjacentes, isto é, as diferentes orientações de fibras entre as camadas.

Área de delaminação possui uma forma retangular alongada, com o seu eixo principal coincidente com a orientação das fibras da camada abaixo da interface. As tensões de flexão são a principal causa da delaminação. A figura 2.16 ilustra um exemplo de delaminação em uma placa compósita durante o ensaio de impacto.



**Figura 2.16 - Delaminação em placa compósita.**

**Fonte: Adaptado de (ROMARIZ, 2008)**

Liu e Malvern (1987) define um coeficiente de incompatibilidade flexão entre dois laminados adjacentes. Quanto maior for a incompatibilidade, maior é a área de delaminação. Este coeficiente depende também das propriedades do material, sequência de empilhamento e espessura do laminado.

Segundo Abrate (2005) uma relação empírica para estimar energia de deformação elástica e a energia absorvida no ponto de falha da delaminação sob o impacto transversal é dada pela equação 2.2:

$$E = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t}$$

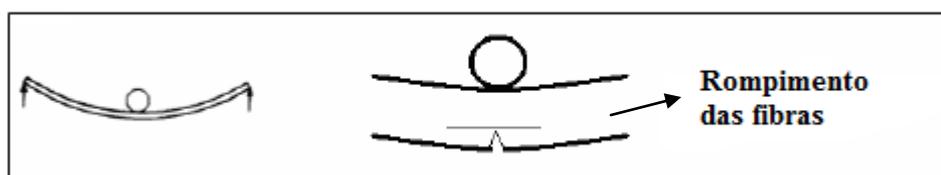
Equação 2.2

Onde  $t$ =espessura do corpo de prova,  $\tau$ =tensão de cisalhamento interlaminar,  $w$ =largura,  $L$ =comprimento e  $E_f$ = módulo de flexão.

### 2.5.3 Rompimento da fibra

O rompimento da fibra ocorre depois da trinca na matriz e da delaminação no processo de fratura. O rompimento da fibra ocorre abaixo do impactador devido as elevadas tensões no local, e na face que não sofre impacto devido as elevadas tensões de flexão. O rompimento da fibra precede o modo de penetração total do corpo de prova, causando danos catastróficos (ABRATE, 2005).

A figura 2.17 ilustra como ocorre esse processo do rompimento das fibras de uma placa compósita durante o ensaio de impacto.



**Figura 2.17 - Rompimento das fibras de uma placa compósita.**

Fonte: Adaptado de (ROMARIZ, 2008)

Segundo Abrate (2005) a energia necessária para o rompimento da fibra devido à flexão do corpo de prova é dada pela equação a seguir:

$$E = \frac{\sigma^2 wtL}{18E_f} \quad \text{Equação 2.3}$$

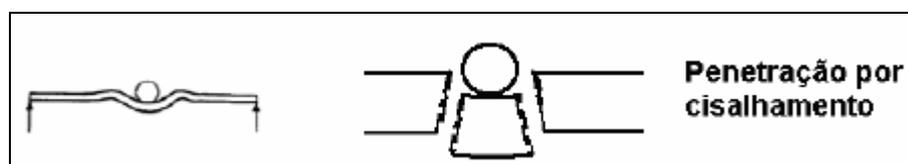
Onde  $\sigma$ = resistência a flexão,  $E_f$ = módulo de flexão,  $w$ = largura,  $L$ =comprimento e  $t$ =espessura do corpo de prova

### 2.5.4 Penetração

A penetração é de um modo de falha macroscópico e ocorre quando o rompimento das fibras atinge um ponto crítico, permitindo que o impactador penetre completamente no corpo de prova. A energia de impacto para penetrar o corpo de prova aumenta de acordo com a espessura da amostra.

Nos casos em que não há penetração total do corpo de prova a penetração máxima pode ser mensurável quando a velocidade do impactador se torna igual a zero. (BELINGARD; VADORI, 2002)

A figura 2.18 ilustra a penetração de uma placa compósita durante o ensaio de impacto.



**Figura 2.18 - Penetração de uma placa compósita.**

Fonte: (ROMARIZ, 2008)

Segundo Abrate (2005) as principais formas de absorção de energia durante a penetração em materiais compósitos laminados são: cisalhamento fora do plano, delaminação e flexão elástica. Dessas formas, o cisalhamento fora do plano corresponde de 50 a 60%, dependendo da espessura do corpo de prova. Vários fatores, incluindo o dimensionamento e a orientação da fibra, tipo de matriz e a interface fibra-matriz tem uma influência significativa na penetração da amostra.

Um modelo para análise da energia absorvida na penetração é sugerido

$$E = \pi\gamma^2td \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde  $\gamma$ = energia de fratura,  $d$ = diâmetro do impactador e  $t$ = espessura do corpo de prova.

## 2.6 Resistência residual no pós-impacto

Os materiais compósitos muitas vezes são sensíveis ao dano por impacto, assim tem-se uma redução drástica na resistência residual do material, e com isso uma perda da sua integridade estrutural. O termo *tolerância ao dano* se refere a capacidade de materiais compósitos manter suas propriedades mecânicas após o impacto.

Segundo Abrate (2005) os danos por impactos pouco visíveis podem causar reduções na resistência residual de até 50%, onde a resistência residual em tensão, compressão, flexão e fadiga serão reduzidas em graus variáveis dependendo do tipo de danos causado.

O ensaio de compressão após impacto - CAI é um dos meios mais comuns de avaliar as propriedades residuais dos materiais compósitos laminados, a figura 2.19 mostra os equipamentos utilizados nos ensaios.



**Figura 2.19 - Ensaio de compressão após impacto - CAI**

**Fonte: (LARSOON; SVENSSON, 2002)**

O impacto de baixa energia pode causar delaminação em materiais compósitos causando grandes reduções na resistência a compressão do material. A delaminação divide o laminado em sub-laminados que têm uma rigidez à flexão menor do que o laminado original e são menos resistentes à cargas de flambagem.

O corpo de prova sob uma carga de compressão pode sofrer flambagem em três modos: flambagem total, flambagem do laminado e flambagem local (flambagem do mais fino sub-laminado), ou uma combinação das opções acima.

O modo de falha geralmente muda de total, para local ou para um modo misto, quando o comprimento de delaminação aumenta.

Em alguns casos, guias anti flambagem são usadas para suportar a amostra para evitar a flambagem total, mas ao mesmo tempo não deve impedir a flambagem local (ABRATE, 2005).

## CAPÍTULO 3

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Fabricação das placas compósitas

Os corpos de provas utilizados nos ensaios de impacto por queda de peso foram fabricados pela técnica de laminação manual. As placas possuem manta de fibra de vidro-E como reforço para o material compósito. Esse material foi fornecido pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA., localizada no Distrito Industrial da cidade de Campina Grande. A gramatura da manta foi de 450 g/m<sup>2</sup>. A resina utilizada como matriz do compósito foi a resina poliéster.

Para o desenvolvimento dos materiais compósitos (placas) foi utilizada a técnica de laminação manual como forma de processamento. O processo ocorreu da seguinte forma: a manta de fibra de vidro E nas dimensões de 300 x 300 mm foi empilhada, e em seguida o processamento com a resina poliéster foi realizado manualmente.

A Tabela 3.1 especifica as placas compósitas utilizadas no ensaio de impacto por queda de peso e o número de camadas.

**Tabela 3.1 - Codificação das placas utilizadas nos ensaios.**

<b>Placas para Ensaio de Impacto</b>	
Placas de Manta	Nº de camadas
P8	8
P10	10
P12	12
P14	14

### 3.1.2 Metodologia de corte das placas compósitas

A placa compósita fabricada foi utilizada para confecção dos corpos de prova para o ensaio de impacto por queda de peso, onde a mesma foi cortada nas dimensões próximas definidas pela norma ASTM D7136/D7136M-12, em que o corpo de prova tem 100 mm de largura por 150 mm de comprimento. A figura 3.1 mostra uma foto do corpo de prova.

Os cortes das placas nas dimensões requeridas foram realizados com uma serra manual, onde esta operação foi realizada na Oficina Mecânica da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande.



**Figura 3.1 - Corpo de prova para ensaio de impacto por queda de peso.**

### 3.1.3 Cálculo da massa dos compósitos

Foi realizado o cálculo da massa dos corpos de provas utilizados nos ensaios de impacto por queda de peso, utilizando uma balança digital com precisão de 5g. A tabela 3.2 apresenta as medidas da massa dos corpos de prova utilizado nos ensaios com os seus respectivos níveis de energia de impacto.

**Tabela 2.2 - Medida da massa dos corpos de provas submetidos a impacto por queda de peso.**

Ensaio com energia de impacto de 20 J	
Placas	Massa (g)
P8	128,62
P10	180,25
P12	215,31
P14	231,71

<b>Ensaio com energia de impacto de 39 J</b>	
Placas	Massa (g)
P8	129,57
P10	190,39
P12	207,73
P14	234,81
<b>Ensaio com energia de impacto de 58 J</b>	
Placas	Massa (g)
P8	128,41
P10	185,71
P12	203,89
P14	237,32
<b>Ensaio com energia de impacto de 77 J</b>	
Placas	Massa (g)
P8	130,44
P10	175,76
P12	210,39
P14	236,67
<b>Ensaio com energia de impacto de 96 J</b>	
Placas	Massa (g)
P8	125,25
P10	176,48
P12	205,87
P14	235,32

### 3.1.4 Cálculo das dimensões dos compósitos

Foi realizada em cada corpo de prova, 5 medidas referentes a largura, altura (comprimento) e espessura. A partir desses dados, foi calculada a média de cada uma dessas medidas. A Tabela 3.3 apresenta esses resultados.

Tabela 3.3 - Média das medidas dos corpos de provas submetidos a impacto por queda de peso.

<b>Ensaio com energia de impacto de 20 J</b>			
Placas	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
P8	98,34	148,25	5,30
P10	96,83	146,86	6,49
P12	98,27	148,12	8,23
P14	97,63	146,93	9,35
<b>Ensaio com energia de impacto de 39 J</b>			
Placas	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
P8	98,85	147,29	5,13
P10	96,61	146,91	6,47
P12	97,53	147,58	7,88
P14	99,17	147,05	9,38
<b>Ensaio com energia de impacto de 58 J</b>			
Placas	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
P8	98,65	147,02	5,03
P10	98,93	148,18	6,59
P12	97,40	146,51	7,86
P14	98,97	147,85	9,14
<b>Ensaio com energia de impacto de 77 J</b>			
Placas	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
P8	99,34	146,52	5,15
P10	96,77	147,47	6,48
P12	98,00	147,02	7,97
P14	99,03	147,98	9,23
<b>Ensaio com energia de impacto de 96 J</b>			
Placas	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
P8	98,77	146,92	5,42
P10	96,49	146,76	6,32
P12	97,00	147,68	8,19
P14	98,16	148,45	9,41

### 3.2 Metodologia de projeto para o desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos

O projeto de um dispositivo é um processo especializado na resolução de problemas. No caso desse trabalho, o processo desenvolveu-se através de uma série de fases principais e em sequência cronológica.

Na figura 3.2 está esquematizado o fluxograma da metodologia de projeto com suas fases principais.

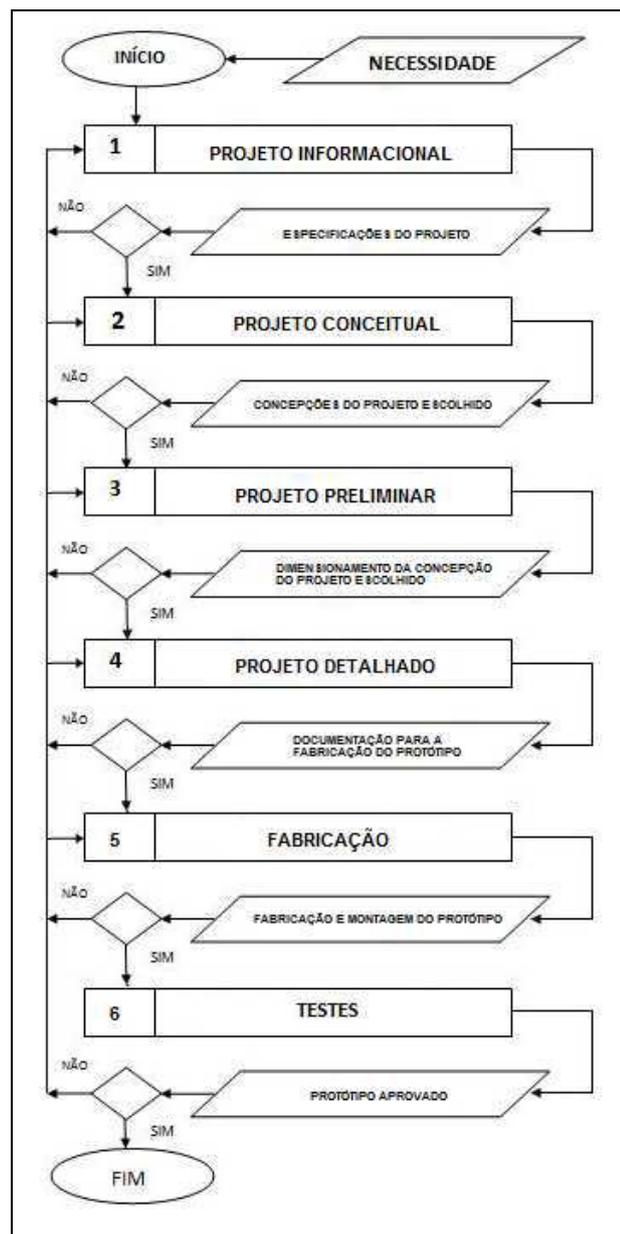


Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia de projeto adotada no trabalho.

- Definição do Problema (Projeto Informacional): é a interpretação e a limitação dos requisitos disponíveis de forma clara e objetiva. Para tanto, reuniram-se todas as possíveis informações necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Foi realizada uma pesquisa buscando informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo a ser desenvolvido.
- As fontes de informação foram: levantamento bibliográfico em revistas e livros especializados; levantamento de equipamentos já existentes focalizando os aspectos funcionais e de projeto;
- Projeto Conceitual: busca-se apresentar na forma de croquis, diagramas, desenhos esquemáticos a visualização da(s) ideia(s) que melhor atendem a demanda de projeto;
- Projeto Preliminar: busca-se estabelecer materiais e espessuras que resistam aos esforços solicitados em conformidade
- Projeto Detalhado: com os processos de fabricação e as normas vigentes no país, quanto à segurança operacional e a confiabilidade do produto, detalhando a documentação para a construção do protótipo;
- Construção do Protótipo: faz-se uso dos recursos disponíveis em termos de fabricação e montagem, para a obtenção da forma física estabelecida e dimensionada nas fases anteriores;
- Teste de Validação: para saber se atende às especificações de projeto e, conseqüentemente, a demanda inicial.

Todos os desenhos feitos na parte de concepção do equipamento foram realizados com auxílio do software Autodesk Inventor 2013 – Licença Estudante.

### **3.3 Metodologia para análise do dano por delaminação nas placas compósitas**

Após os ensaios foi realizado o cálculo da área impactada através da utilização do software aberto IMAGE J, mostrado na figura 3.3. O software apresenta uma metodologia de aproximação de resultados, onde a área a ser calculada é delimitada através de figuras geométricas, como pode ser visto na figura 3.4. O software IMAGE J requer calibração de parâmetros a cada inicialização do programa, como por exemplo, o tamanho real da placa e a unidade de medida utilizada, figura 3.5.

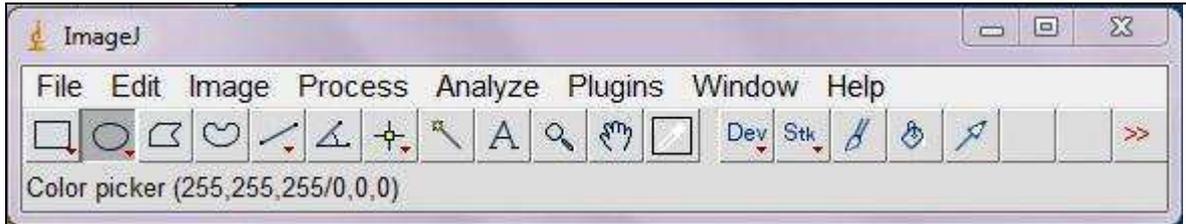


Figura 3.3 - Ferramentas para o cálculo da área delaminada através do software IMAGE J.

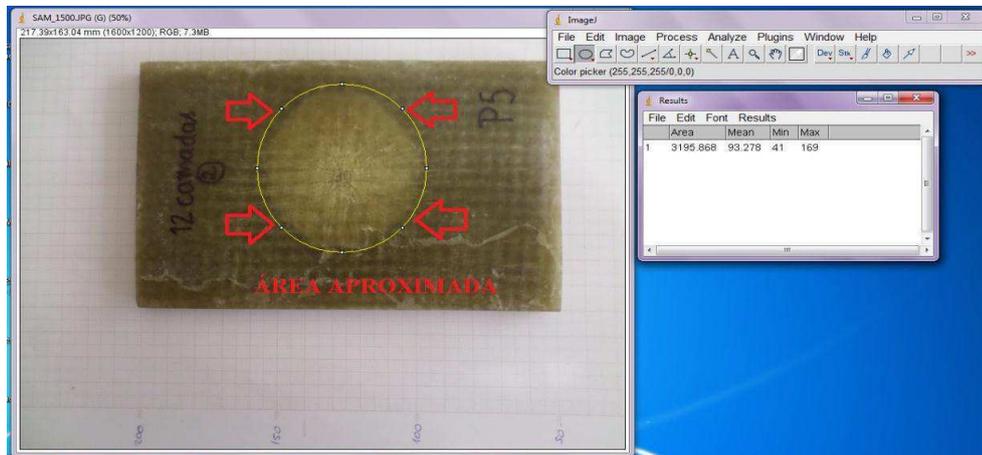


Figura 3.4 - Utilização de figuras geométricas para o cálculo da área delaminada.

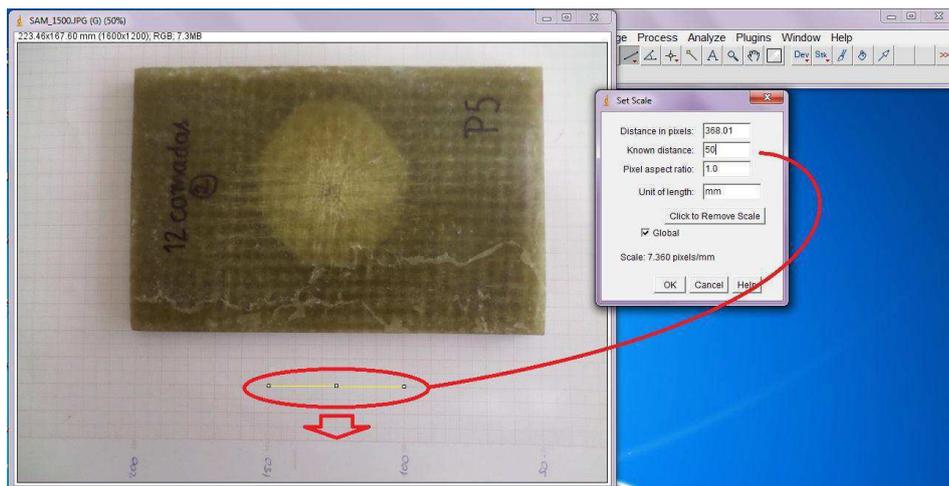


Figura 3.5 - Calibração dos parâmetros na inicialização do software IMAGE J.

A utilização do software IMAGE J facilitou muito o trabalho, visto que os softwares mais conhecidos existentes no mercado requeriam um grande tempo de processamento para o mesmo tipo de atividade desenvolvida, que foram os cálculos das áreas impactadas e delaminadas em cada placa.

### 3.4 Metodologia para o cálculo da velocidade de impacto nos ensaios

Todos os ensaios realizados foram filmados com uma câmera digital de 16 MP, a fim de poder realizar análises posteriores das imagens e perceber erros que não foram detectados no momento dos ensaios.

A partir dos vídeos, foi possível calcular a velocidade de impacto com a utilização do software TRACKER. O software é um programa gratuito e aberto, possui uma ferramenta de análise de imagens e de vídeos. Foi desenvolvido pelo Open Source Physics, ou OSP, que é um projeto patrocinado pela Fundação Nacional de Ciência e Colégio Davidson nos Estados Unidos. A partir de um vídeo de um objeto em movimento, o software TRACKER é capaz de analisar a posição, a velocidade e a aceleração desse objeto, além da criação de gráficos dessas variáveis em função do tempo. Este software foi projetado para ser utilizada em laboratórios de ensino de física em faculdades.

O software possui uma interface bem simples e didática, para a realização da análise do vídeo. Uma das análises realizadas foi o cálculo da velocidade de impacto de uma massa de 1,5 kg, caindo a uma altura de 1,3 metros, como pode ser observado na figura 3.6.

Para a realização desta tarefa, seguiu-se os seguintes passos:

1. Instalou-se o software TRACKER no computador;
2. Exportou-se o vídeo do ensaio a ser analisado para o software;
3. Fez-se a calibração do vídeo, onde nessa etapa definiu-se a altura de impacto em 1,3 metros;
4. O vídeo possuía um tempo total de 2 segundos, mas a fim de facilitar a análise o software dividiu o mesmo em 47 steps, a partir disso, foi-se avançando o vídeo a cada step e marcando a posição do impactador através dos marcadores em formato de losango vermelho;
5. O software automaticamente gera uma tabela com as variáveis de interesse do usuário, como por exemplo, o deslocamento do impactador nos eixos x e y, a velocidade e aceleração do mesmo;
6. Percebe-se que o ponto de numero 21 é o que está mais próximo do corpo de prova, assim a velocidade nesse ponto representa a velocidade de impacto na amostra. Portanto, como pode ser visto na tabela da figura 24, este valor é de 4,85 m/s.

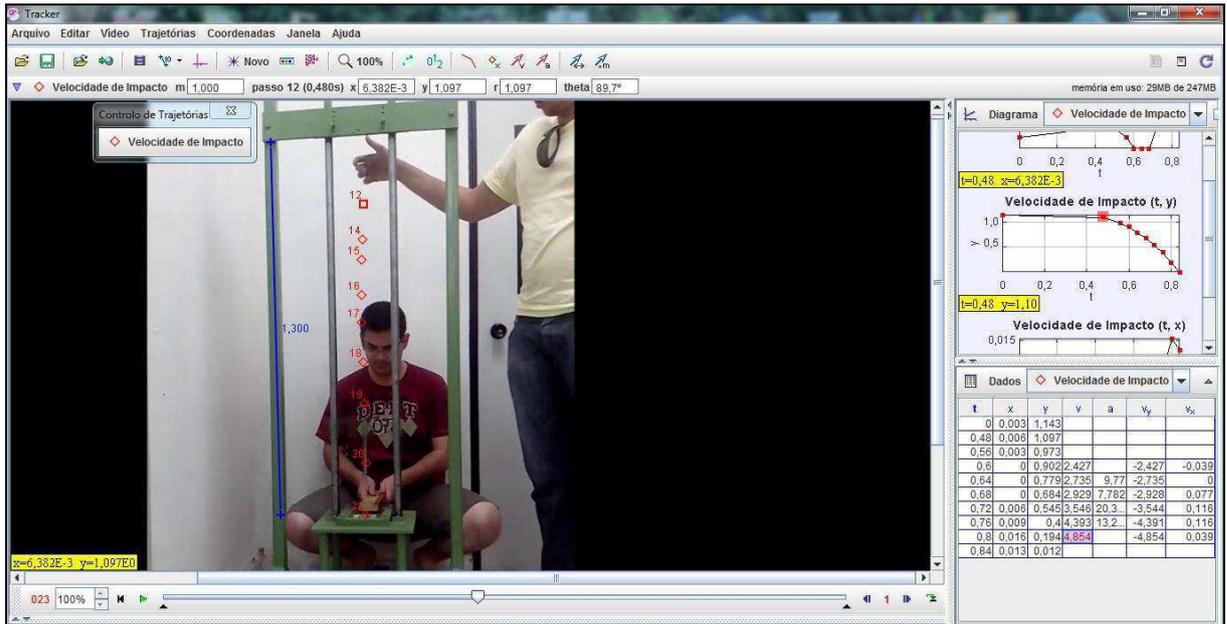


Figura 3.6 - Interface do software TRACKER utilizado no cálculo da velocidade de impacto.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **4.1 Projeto informacional de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

Foi definido como objetivo da dissertação o projeto e a construção de uma máquina de impacto por queda de peso, que esteja de acordo com a norma ASTM D7136/D7136M-07 e que seja de baixo custo e fácil fabricação. Os requisitos técnicos desejados para essa máquina são: seja compacta, facilmente transportável, capaz de suportar os esforços provenientes dos sucessivos impactos e que possua instrumentação para uma análise mais detalhada dos ensaios realizados. Para o desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso foram estudadas diversas normas, patentes, fabricantes do equipamento, teses de doutorado, dissertações de mestrado, artigos científicos entre outros.

A partir desse ponto no trabalho em cada tópico será discutido um equipamento que de alguma forma contribuiu para a concepção do equipamento.

##### **4.1.1 Norma ASTM D7136/D7136M-07 – Método padrão para medir a resistência ao dano de impacto por queda de peso em um compósito de matriz polimérica reforçado por fibra**

Um dos principais trabalhos estudados foi a norma ASTM D7136/D7136M-07 que apresenta todos os requisitos técnicos para o ensaio de impacto por queda de peso.

A norma específica que a máquina utilizada para o ensaio de impacto por queda de peso deve conter no mínimo uma base rígida, um impactador acoplado ao peso de impacto, um dispositivo anti rebote e um mecanismo de guia. O dispositivo anti rebote é uma trava inicialmente ativada que após o primeiro impacto trava o deslocamento do impactador, impedindo o segundo impacto no corpo de prova. O dispositivo anti rebote não deve afetar o movimento do impactador, até o instante em que o impactador tenha perdido o contato com o corpo de prova após o primeiro impacto.

Se a máquina de impacto não tiver um sistema anti rebote, pode-se utilizar uma peça de deslizamento rígida, como por exemplo, madeira ou metal, entre o impactador e o corpo de

prova, que deve impedir o segundo impacto após o impactador atingir a superfície do corpo de prova.

Dispositivos mais complexos podem incluir travamento e guincho para içamento dos pesos, blocos de parada ou amortecedores, e a instrumentação para determinar a velocidade do impactador e a força de impacto. O uso da instrumentação é recomendado para uma análise mais detalhada dos ensaios realizados, mas não imposto por esta norma.

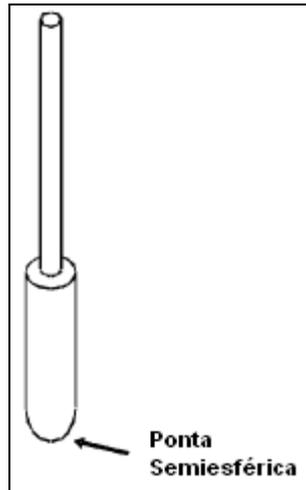
A ASTM D7136/D7136M-07 especifica que a máquina de ensaio de queda de peso utilizada nos testes de impacto é composta dos seguintes componentes estruturais: mecanismo de guias; mecanismo de travamento; peso associado a um fixador para o impactador; impactador; detector de velocidade; bloco de parada para evitar o segundo impacto no corpo de prova e base para a fixação do corpo de prova, como pode ser observado na figura 4.1.



**Figura 4.1 - Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.**

**Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).**

O impactador deve ter uma massa de 5,5 kg, e a ponta deve ser semiesférica com diâmetro de 16 mm e uma dureza entre 60 e 62 HRC. Se for utilizado um impactador diferente no ensaio, em relação a forma, as dimensões e a massa esses dados devem ser anotados e os resultados serão apresentados como fora do padrão. A figura 4.2 mostra a forma do impactador sugerido pela norma.

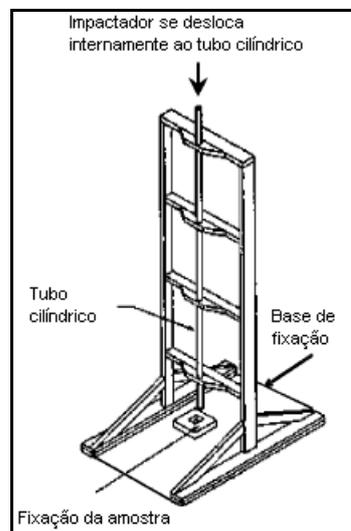


**Figura 4.3 - Impactador para ensaio de impacto por queda de peso.**

**Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).**

Os mecanismos de guias de orientação do impactador incluem um tubo cilíndrico através do qual um impactador cilíndrico se desloca, como ilustrado na figura 27, ou mecanismo de guias composto de dois tubos cilíndricos, onde um impactador acoplado aos pesos se desloca, conforme a figura 4.3. A altura do mecanismo de guia deve ser suficiente para permitir o ensaio de queda de peso para o nível de energia de impacto desejado. Para o mecanismo de guia tubular único, a folga entre o impactador e o diâmetro interno do tubo não deve exceder 1 mm.

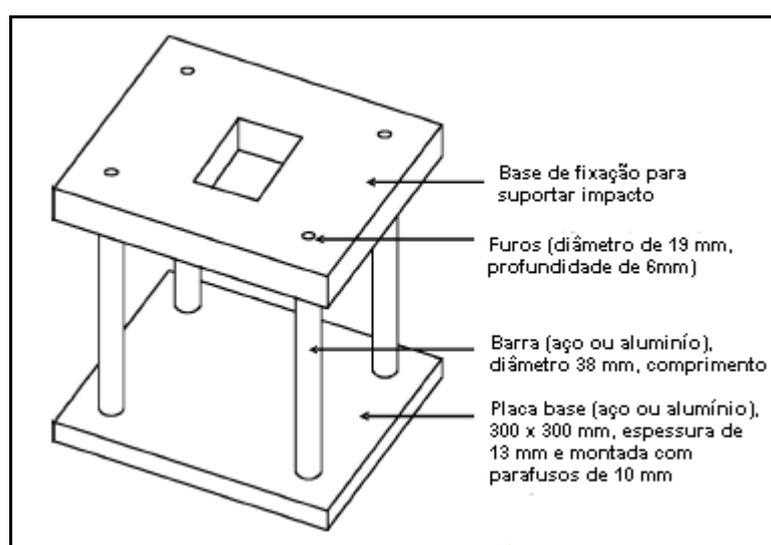
Em todos os mecanismos de guia de deslizamento, o atrito entre os componentes deve ser insignificante.



**Figura 4.3 - Máquina de impacto com mecanismo de guia tubular único.**

**Fonte: Adaptado (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).**

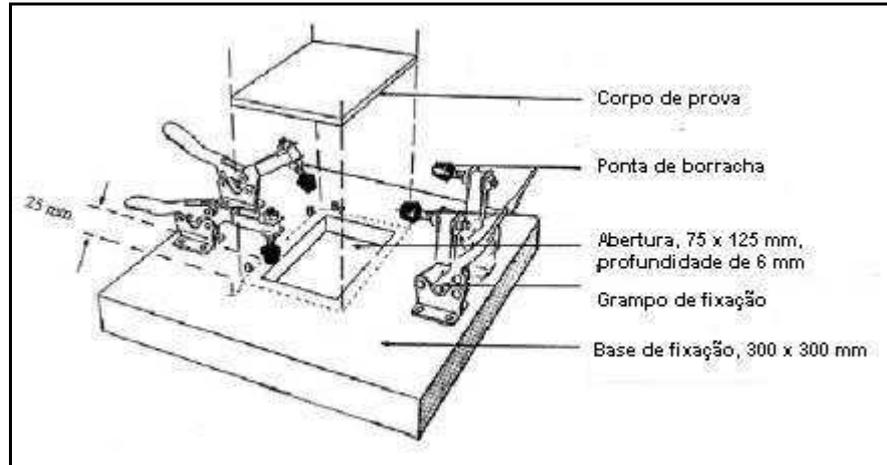
A norma ASTM D7136/D7136M-07 sugere a base de fixação para suportar o impacto, como mostrado na figura 4.4. Deve-se utilizar uma chapa de pelo menos 20 mm de espessura de alumínio ou aço. A chapa deve ter uma abertura no centro com dimensões de 75x125 mm, esta abertura é necessária para o caso do impactador perfurar o corpo de prova. A norma especifica que a base de fixação deve ser composta por duas chapas quadrada, com 300 mm de lado, e quatro barras cilíndricas de aço ou alumínio, com diâmetro de 38 mm e comprimento de 300 mm. A fixação desses componentes deve ser realizada com parafusos de 10 mm de diâmetro.



**Figura 4.4 - Base de fixação da máquina de impacto.**

**Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).**

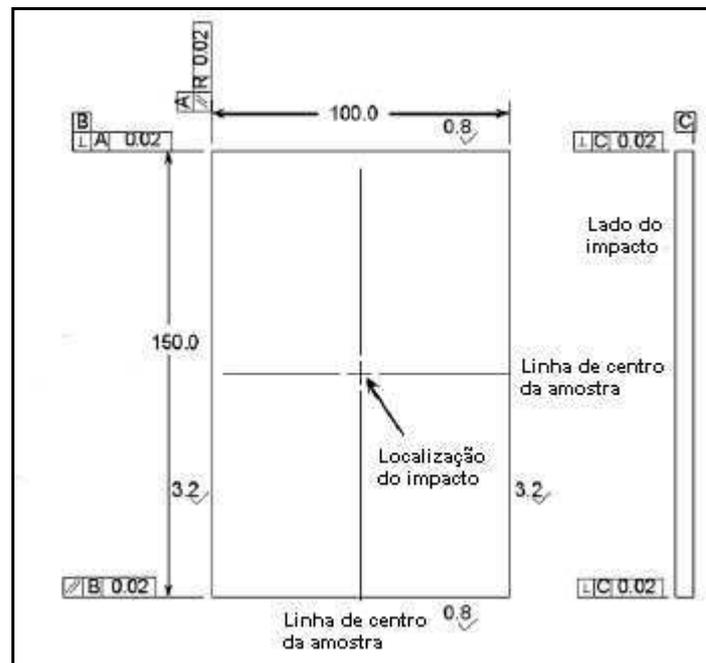
Os grampos de fixação devem estar localizados de tal forma que o corpo de prova esteja posicionado centralmente sobre a abertura da chapa. Devem ser utilizados quatro grampos para fixar o corpo de prova durante o impacto. Os grampos terão uma capacidade mínima de retenção de 1100 N. As pontas dos grampos devem ser feitas de borracha neoprene com uma dureza de entre 70 e 80 Shore A. O equipamento deve ser alinhado a base de fixação do corpo de prova com parafusos ou grampos, um sugestão de projeto para a base de fixação é mostrada na figura 4.5.



**Figura 4.5 - Base de fixação de corpo de prova.**

Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).

A norma especifica as dimensões do corpo de prova a ser ensaiado, conforme a figura 4.6. Percebe-se que o corpo de prova possui geometria retangular com dimensões de 100x150mm. A rugosidade da superfície nas bordas do corpo de prova pode ser de  $3,2 \mu\text{m}$  se a mesma não for utilizada posteriormente no ensaio de compressão após impacto (CAI), pois a norma ASTM D7136/D7136M-12 especifica que o lado maior deve ter rugosidade de  $3,2 \mu\text{m}$  e o lado menor rugosidade de  $0,8 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.6 - Dimensões do corpo de prova.**

Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).

#### 4.1.2 Instron CEAST 9310

No desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos foi realizada também uma pesquisa de mercado dos equipamentos disponíveis para venda. A empresa americana Instron é uma das principais empresas que fabricam este equipamento.

Um dos equipamentos estudados foi a Instron CEAST 9310, figura 4.7, este equipamento é utilizado nos ensaios de impacto de baixa velocidade, esta máquina é utilizada para níveis de energia de impacto entre 0,15 e 20,4 Joules. A máquina tem a função de ajuste da altura de queda dos pesos, que neste caso pode ser de 0,03 a 0,70 m. A velocidade de impacto varia de 0,77 a 3,71 m/s e a massa de impacto varia de 0,5 a 3,0 kg com incrementos de 0,05 kg.



Figura 4.7 - Instron CEAST 9310.

Fonte: Disponível em: <<http://www.instron.com.br/wa/library/streamFile2.aspx?sdoc=1232>>

Acesso em: 25/05/2013.

Este modelo é um dos mais simples que a empresa produz, pode ser usado para verificar a qualidade de matérias primas de produtos acabados ou semi acabados. O modelo padrão CEAST 9310 não é instrumentado para ensaios mais simples de impacto por queda de peso, mas é possível adicionar a instrumentação para investigar problemas técnicos mais complexos, através de gráficos.

A Instron CEAST 9310 possui as seguintes características:

1. Porta de proteção transparente que permite maior segurança para o operador do equipamento;
2. Trava dupla para evitar que os pesos caiam sem o comando do operador, garantindo assim maior segurança e evitando acidentes;
3. Os pesos de queda possuem formato cilíndrico e são responsáveis pelo dano causado ao corpo de prova, dependendo da energia de impacto;
4. O impactador pode ser substituído por outra peça para a realização de outro teste, como por exemplo, ensaio Charpy;
5. O equipamento possui uma escala para o ajuste da altura de queda;
6. O sistema anti rebote acionado pneumáticamente é responsável pelo impactador atingir o corpo de prova somente uma vez, após a ocorrência do primeiro impacto, o anti rebote é acionado e trava o impactador;
7. Base de fixação do corpo de prova;
8. Furos com rosca para a fixação de outros componentes que possam ser utilizados nos ensaios.

#### **4.1.3 Instron CEAST 9340**

Outro equipamento estudado foi a Instron CEAST 9340, figura 4.8, esta máquina possui níveis de energia de impacto entre 0,30 e 405 Joules. A altura de queda dos pesos varia entre 0,03 a 1,10 m, a velocidade de impacto varia de 0,77 a 4,65 m/s e a massa de impacto varia entre 1,0 a 37,5 kg com incrementos de 0,5 kg.

O modelo padrão inclui instrumentação básica e um controlador da máquina, que permite o operador executar movimentos de deslocamento dos pesos e coletar dados básicos, como nível de energia de impacto, altura e massa de queda. O equipamento CEAST 9340 é adequado para uma variedade de ensaios incluindo o ensaio de tração, ensaios de penetração em placas e filmes, além dos ensaios de impacto Izod e Charpy.



**Figura 4.8 - Instron CEAST 9340.**

**Fonte:** Disponível em: <<http://www.instron.com.br/wa/library/streamFile2.aspx?sdoc=1232>>

**Acesso em:** 25/05/2013.

A Instron CEAST 9340 possui as seguintes características:

1. Sistema de posicionamento da massa de queda motorizado, ou seja, não é necessário que o operador ajuste a altura de queda manualmente;
2. A massa de impacto possui forma de blocos retangulares;
3. O impactador pode ser substituído por outra peça para a realização de outro ensaio;
4. Sistema anti rebote acionado pneumaticamente;
5. Área de realização do ensaio isolada do ambiente externo, com a possibilidade de controle da temperatura do corpo de prova;
6. Fixação do corpo de prova para outros ensaios, como tração e Charpy por exemplo.

#### 4.1.4 Instron CEAST 9350 padrão

A Instron CEAST 9350 padrão, figura 4.9, é um sistema projetado para oferecer níveis de energia de impacto entre 0,59 e 757 Joules. A altura de queda dos pesos varia entre 0,03 a 1,10 m. A velocidade de impacto varia entre 0,77 e 4,65 m/s e a massa de impacto varia de 2,0 a 70,0 kg com incrementos de 0,5 kg.

Este modelo inclui o sistema de software de impacto e de aquisição de dados para fazer análise dos ensaios realizados. Este equipamento pode ser usado para testar qualquer coisa a partir de produtos acabados em materiais compósitos, e é adequado para uma variedade de aplicações de impacto incluindo o impacto de tração, perfuração, Izod e Charpy.



Figura 4.9 - Instron CEAST 9350 padrão.

Fonte: Disponível em: <<http://www.instron.com.br/wa/library/streamFile2.aspx?sdoc=1232>>

Acesso em: 25/05/2013.

A Instron CEAST 9350 padrão possui as seguintes características

1. Sistema de posicionamento da massa de queda motorizado, ou seja, não é necessário que o operador ajuste a altura de queda manualmente;
2. Pesos intercambiáveis, com a possibilidade de adicionar maior quantidade de massa;
3. O impactador pode ser substituído por outra peça para a realização de outro ensaio;
4. Área de realização do teste isolada do ambiente externo, com a possibilidade de controle da temperatura do corpo de prova.

#### 4.1.5 Instron CEAST 9350 com opcionais

A Instron CEAST 9350 com opcionais, figura 4.10, é semelhante ao equipamento padrão, sendo que apresentam alguns adicionais, a energia de impacto varia entre 0,59 e 1800 Joules. A altura de queda dos pesos varia entre 0,03 a 29,4 m (simulado). A velocidade de impacto varia de 0,77 a 24,0 m/s e a massa de impacto varia 2,0 a 70,0 kg com incrementos de 0,5 kg.



**Figura 4.10 - Instron CEAST 9350 com opcionais.**

Fonte: Disponível em: <<http://www.instron.com.br/wa/library/streamFile2.aspx?sdoc=1232>>

Acesso em: 25/05/2013.

A Instron CEAST 9350 com opcionais possui as seguintes características:

1. Configuração para alta energia de impacto, até 1800 Joules;
2. Sistema de pesagem das massas de queda e inserção do impactador;
3. Sistema de lubrificação automático entre as guias de deslizamento e a massa de impacto;
4. Sistema anti rebote, prevenindo o corpo de prova do segundo impacto;
5. Sistema automático de troca dos corpos de provas, podendo ensaiar de 60 a 120 corpos de prova por hora;
6. O sistema de alimentação ensaia até 10 corpos de provas em sequência dentro da câmara ambiental;
7. Câmara ambiental com controle da temperatura do corpo de prova entre -70°C e 150°C.

#### **4.1.6 Wance DIT183E**

Outra empresa consultada para o desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos foi o fabricante chinês Wance que vende equipamentos no mercado para diversos tipos de ensaios.

O equipamento analisado foi o DIT183E, figura 4.11, possui características semelhantes a Instron CEAST 9350 com opcionais, este equipamento pode realizar ensaios de impacto com energia de 0,59 a 1800 joules, velocidade de impacto entre 0,77 e 24 m/s, altura de queda entre 0,03 e 1,2 metros e massa de impacto variando entre 2,0 e 70 kg com incrementos de 0,5 kg.

As principais características da Wance DIT183E é:

1. Controle motorizado por computador;
2. Painel de controle dos parâmetros sensível ao toque com ajuste da altura de queda, definição da massa de impacto e liberação do impactador;
3. Elevador automático;
4. Sistema anti rebote para evitar segundo impacto;
5. Detecta porta de segurança aberta ou fechada;
6. Câmara de controle de temperatura do corpo de prova.

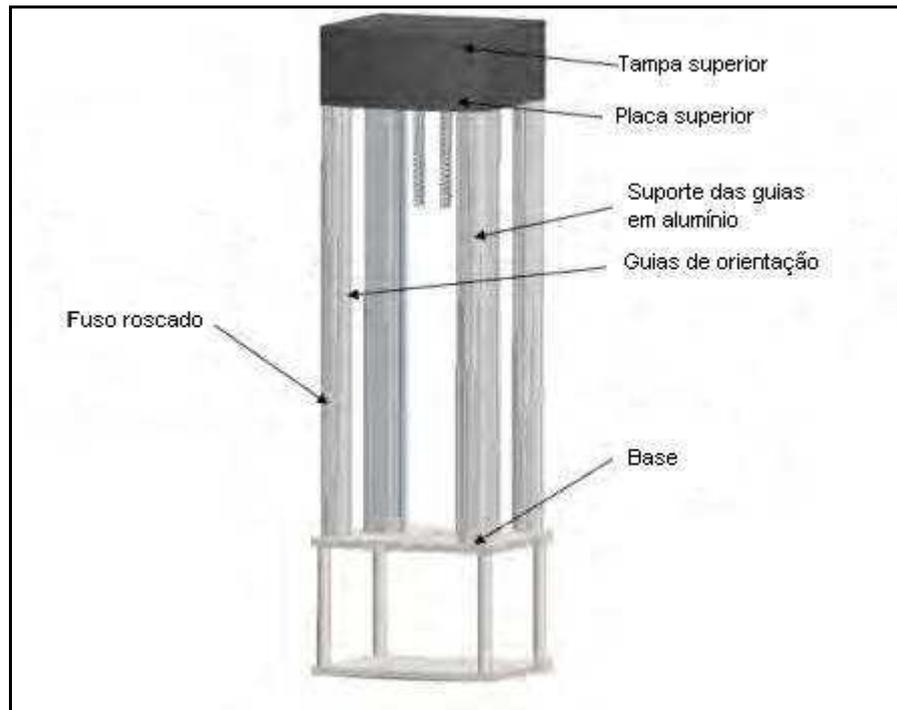
7. Aquisição de dados, como velocidade de impacto antes e depois e gráficos da energia absorvida, força de impacto e deslocamento em função do tempo.



**Figura 4.11 - Wance DIT183E.**

**Fonte: Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.**

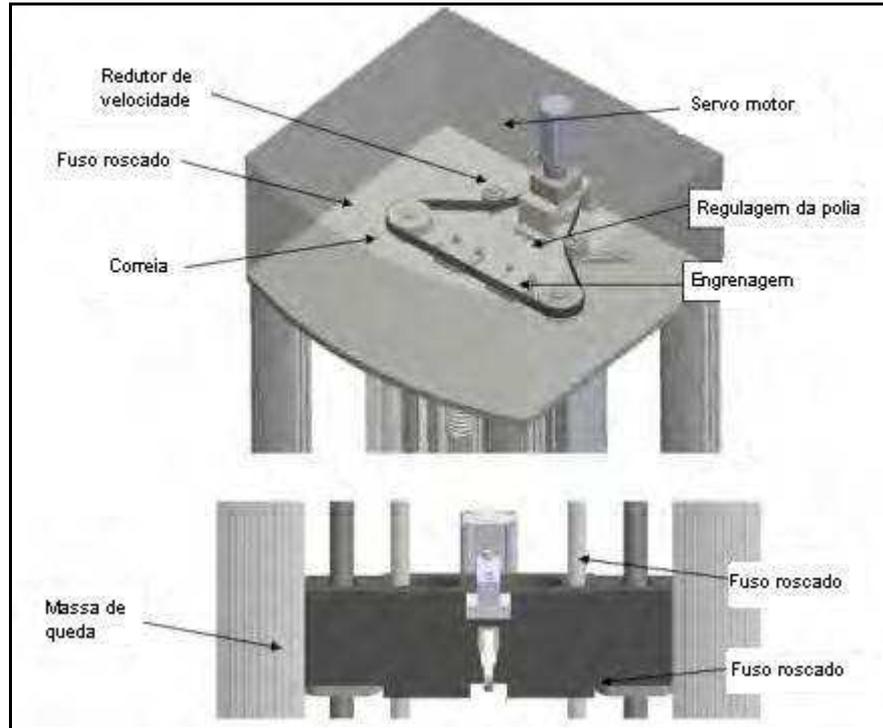
A Estrutura principal da máquina de impacto por queda de peso da Wance DIT183E consiste em base, placa superior, colunas de orientação e colunas de suporte, como pode ser visto na figura 4.12. A base e as hastes de apoio são de chapa de aço e podem acomodar diferentes tipos de corpo de provas para diferentes ensaios. As colunas de suporte são de tubos de aço para garantir a rigidez da estrutura. As uniões das colunas de suporte, placa superior e base são realizadas com flanges. As colunas de orientação são lisas e cromadas. As extremidades superiores e inferiores estão ligadas por meio de um parafuso para assegurar a rigidez do conjunto.



**Figura 4.12 - Estrutura principal.**

**Fonte: Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.**

O mecanismo de elevação do impactador da Wance DIT183E consiste de servo motor, redutor de velocidade, correia, engrenagem, parafuso de avanço e cruzeta, como pode ser observado na figura 4.13. O servo motor fornece controle do sistema com precisão de um milímetro.



**Figura 4.13 - Mecanismo de elevação do impactador**

**Fonte:** Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.

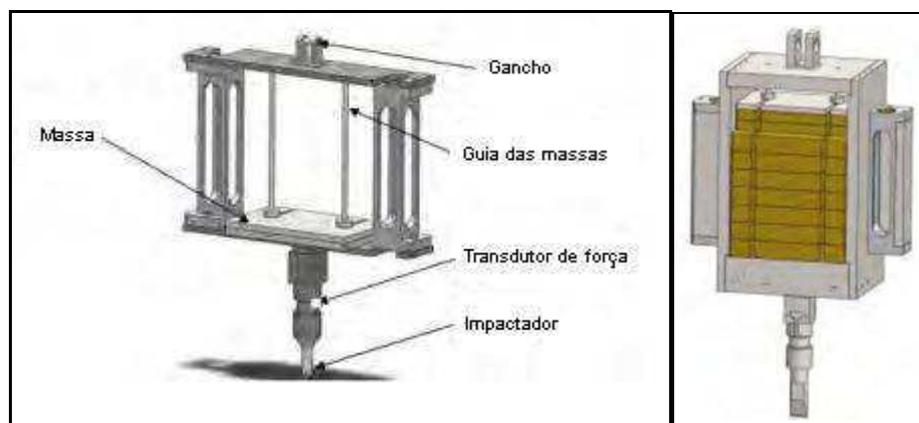
O mecanismo de trava e liberação do impactador da Wance DIT183E é composto de um transdutor de massa para escolha da massa de impacto, gancho de travamento, cruzeta e cilindro pneumático, como pode ser visto na figura 4.14.



**Figura 4.14 - Mecanismo de trava e liberação do impactador**

**Fonte:** Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.

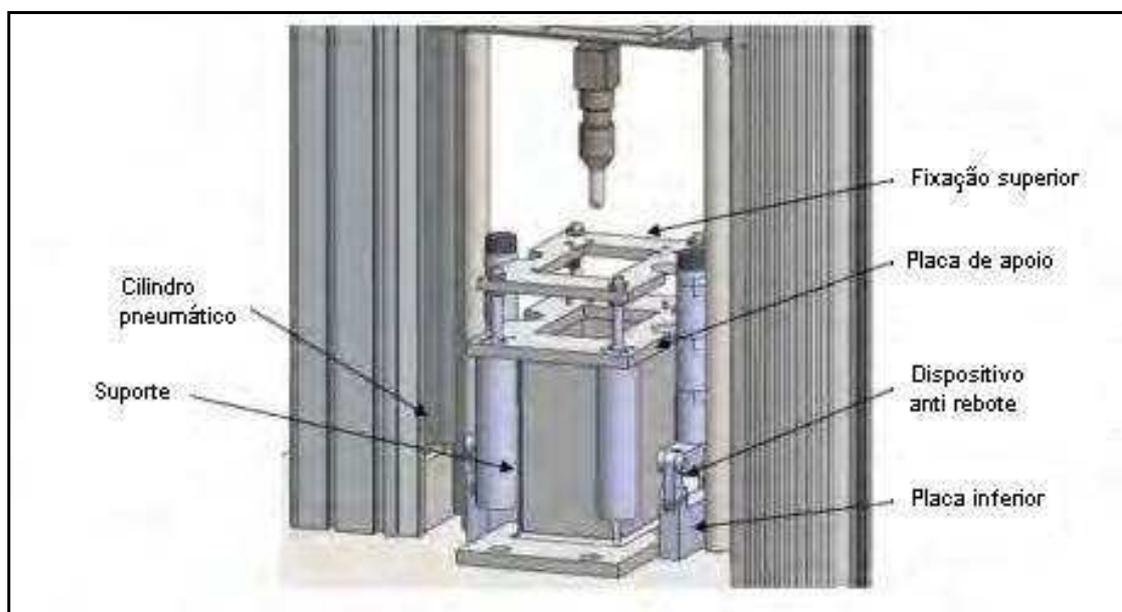
A figura 4.15 mostra como é a estrutura do conjunto massa-impactador da Wance DIT183E que é constituído de suporte para o gancho de travamento, guias com bucha, massa de impacto, transdutor de força e o impactador.



**Figura 4.15 - Conjunto massa-impactador.**

**Fonte:** Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.

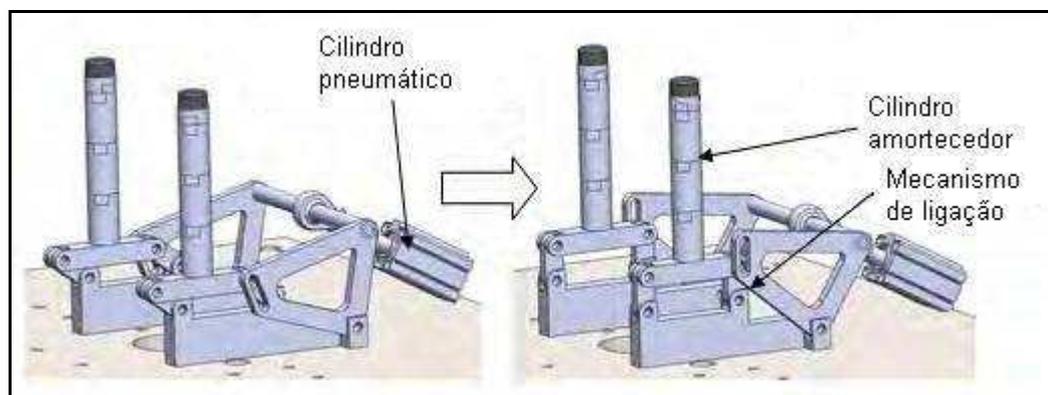
Como pode ser observado na figura 4.16, os componentes da parte inferior da máquina de impacto Wance DIT183E, como a base, o sistema de fixação do corpo de prova e o sistema anti rebote.



**Figura 4 - Base, sistema de fixação do corpo de provas e o sistema anti rebote.**

**Fonte:** Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.

O sistema anti rebote da Wance DIT183E utilizado para evitar o segundo impacto no corpo de prova está ilustrado na figura 4.17. O sistema é composto de cilindro pneumático, mecanismo de ligação e blocos de parada com amortecimento.



**Figura 57 - Sistema anti rebote.**

**Fonte:** Disponível em: <[http://www.wance.net/product/product\\_81.html?typeid=12](http://www.wance.net/product/product_81.html?typeid=12)> Acesso em: 01/03/2013.

#### **4.1.7 Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**

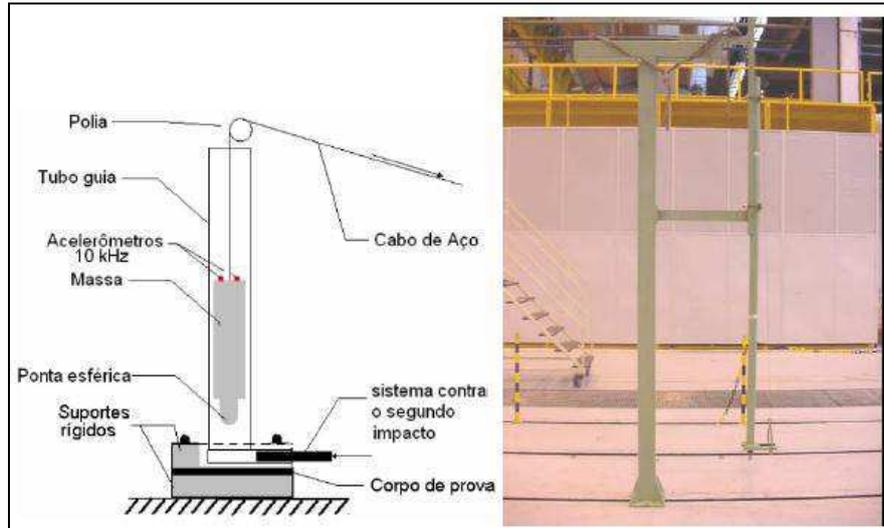
Na dissertação de mestrado de Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Romariz (2008) desenvolveu o estudo de placas laminadas devido ao impacto de baixa velocidade causado pela queda de uma massa.

Neste trabalho foram realizados ensaios experimentais e a simulação numérica através do método de elementos finitos. Os ensaios foram realizados com energia de impacto variando entre 5 e 94J e com velocidades inferiores a 6m/s.

O equipamento utilizado nos ensaios de Romariz possui baixo custo de fabricação e operação do equipamento simples, mas que pode fornecer resultados das propriedades mecânicas dos materiais compósitos através de gráficos e tabelas.

A norma utilizada como base para o desenvolvimento desse trabalho foi a ASTM D2628-96 (2001) que determina a energia de resistência ao impacto de placas por meio de uma massa em queda livre para a formação de trincas ou a sua ruptura.

A figura 4.18 mostra um desenho esquemático e a foto do equipamento utilizado no ensaio.

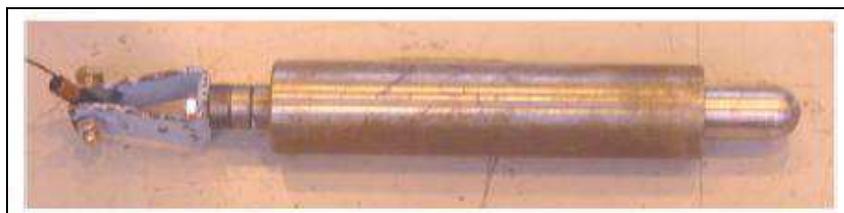


**Figura 6 - Desenho esquemático e a foto do equipamento utilizado no ensaio.**

**Fonte: (ROMARIZ, 2008)**

Neste equipamento percebe-se que a massa de impacto é apenas o impactador cilíndrico com ponta semiesférica que se desloca por um tubo guia. Acelerômetros são instalados para medir a velocidade de impacto e a força de contato com a placa, gerando assim gráficos que podem ser analisados posteriormente, determinando a resistência ao impacto das placas compósitas. O sistema anti rebote contra o segundo impacto é manual, ou seja, um obstáculo é colocado manualmente entre a ponta do impactador e o corpo de prova após a ocorrência do primeiro impacto. O equipamento possui cabo de aço para o içamento e o ajuste da altura de queda do impactador, variando assim a energia de impacto que será realizado o ensaio.

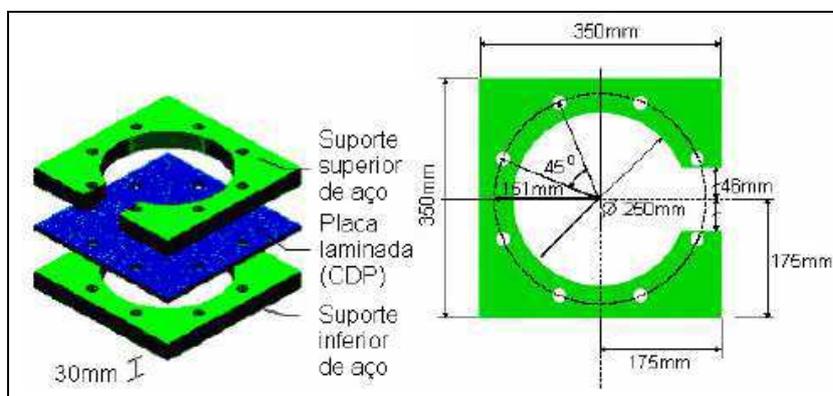
A figura 4.19 mostra o impactador utilizado nos ensaios, neste equipamento não existe a adição de massa complementar, assim somente a massa do impactador é responsável pelo dano causado no corpo de prova. A variação da energia de impacto é obtida com o ajuste da altura de queda do impactador.



**Figura 7 - Impactador utilizado nos ensaios.**

**Fonte: (ROMARIZ, 2008)**

Romariz (2008) utilizou placas com dimensões maiores que as propostas pela ASTM D5628-96 (2001). O motivo da não conformidade com a norma foi que estava previsto o ensaio destas placas em um equipamento que proporciona alta velocidade de impacto e que posteriormente poderia comparar os resultados experimentais. A figura 4.20 mostra as dimensões do corpo de prova e os suportes rígidos de fixação com parafusos.



**Figura 8 - Dimensões do corpo de prova e os suportes rígidos de fixação com parafusos.**

**Fonte: (ROMARIZ, 2008)**

A fixação do corpo de prova é realizada através de duas placas de aço com oito furos de 24 mm, o corpo de prova fica compreendido entre essas duas placas de aço. O conjunto é montado com parafusos. A desvantagem deste método de fixação é a furação em todos os corpos de prova, que deve ser coincidentes com os furos dos suportes de aço para que se tenha uma união perfeita entre os componentes, acarretando em maior dificuldade na preparação do corpo de prova a ser ensaiado.

#### **4.1.8 Projeto e fabricação de uma máquina de ensaio de impacto por queda de peso na Universidade de Ciência e Tecnologia do Irã**

Esse artigo é um trabalho de desenvolvimento e fabricação de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos que foi desenvolvida na Universidade de Ciência e Tecnologia do Irã, por Taheri-Behrooz; Shokrieh; Abdolvand (2013). O equipamento pode realizar ensaios com energia de impacto de até 240 joules e velocidade de impacto abaixo de 5 m/s.

Este equipamento mede a absorção de energia de impacto em materiais compósitos. A máquina fornece gráficos da força de impacto em função do tempo e calcula a quantidade de

energia absorvida pelo corpo de prova. A máquina foi equipada com vários sensores que medem a velocidade do impactador pouco antes de atingir o corpo de prova e a quantidade de força de impacto no corpo de prova. O equipamento possui um sistema de aquisição de dados para registrar a força de impacto ao longo do tempo.

A máquina de impacto por queda de peso desenvolvida é composta dos seguintes componentes, tais como: mecanismo de impacto, sistema de elevação, sistemas de fixação do corpo de prova, sistema de proteção do operador, sistema pneumático (freio e sistema de liberação do impactador), painel de controle e instrumentação. A Figura 4.21 mostra o equipamento projetado e fabricado na pesquisa.



**Figura 9 - Máquina de impacto por queda de peso projetado e fabricado na pesquisa.**

**Fonte: (TAHERI-BEHROOZ; SHOKRIEH; ABDOLVAND, 2013).**

Dois atuadores pneumáticos foram selecionados para os sistemas de liberação do impactador e para o sistema anti rebote, de forma a evitar o segundo impacto. Um atuador pneumático com diâmetro externo de 10 mm é utilizado para liberação do impactador em qualquer altura admissível enquanto o outro atuador pneumático de diâmetro externo de 40 mm é utilizado para proteger a corpo de prova do segundo impacto quando o primeiro impacto for realizado. A pressão de funcionamento dos atuadores é de 10 bar. As figuras 4.22-a e 4.22-b mostram os atuadores pneumáticos em detalhes.



(a)

(b)

**Figura 10 - Atuadores pneumáticos (a) sistema de liberação (b) sistema de amortecimento.**

**Fonte: (TAHERI-BEHROOZ; SHOKRIEH; ABDOLVAND, 2013).**

O sistema de parada do impactador pode atuar de acordo com duas possibilidades:

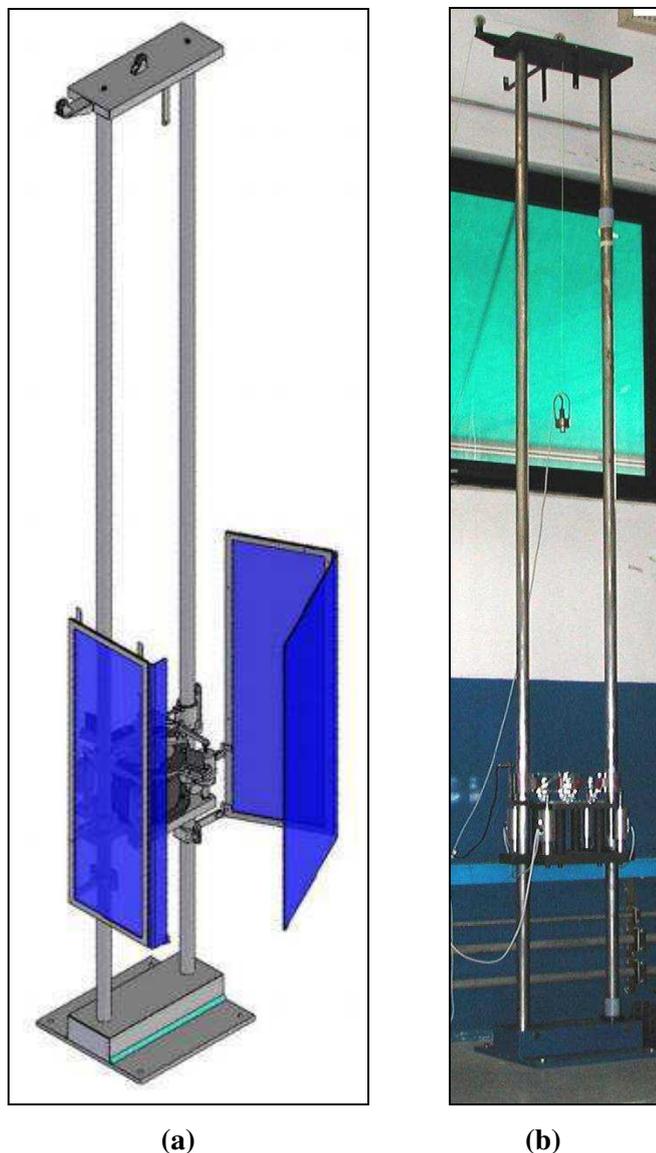
1. O corpo de prova é perfurado pelo impactador, neste caso os atuadores de amortecimento não funcionam e o impactador perfura a corpo de prova e pára.
2. Se o impactador atinge a corpo de prova e retorna, uma célula fotoelétrica localizada próxima do corpo de prova registra esta situação e envia um sinal para os atuadores amortecedores. Depois de receber o sinal, amortecedores evitam que o impactador desça e atinjam a corpo de prova novamente.

#### **4.1.9 Projeto de uma máquina de queda de peso para ensaio de impacto em materiais compósitos da Universidade de Bologna na Itália**

Outro artigo que foi de grande valia na pesquisa foi o trabalho publicado no 5º Congresso Internacional da Sociedade Croata de Mecânica por Minak e Ghelli (2006) que projetaram uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos. O equipamento projetado possui uma velocidade máxima de impacto de 7,9 m/s e a energia de impacto de 39 joules. Entretanto é possível acrescentar um bloco de aço, aumentando-se assim a massa de queda e consequentemente a energia de impacto que passa a ser 400 joules.

A figura 4.23 mostra o desenho concebido no projeto e a máquina após o processo de fabricação. O equipamento possui as seguintes características: duas barras cilíndricas

paralelas com diâmetro de 50 milímetros e 4 metros de comprimento. A distância entre as barras é de 400 milímetros. A função dessas barras é orientar o impactador, para que o mesmo sempre se desloque com movimento vertical. As barras são fixadas por meio de duas placas de aço que ficam localizadas na base e no topo do equipamento.



**Figura 11 - Máquina de impacto por queda de peso. (a) Desenho concebido (b) equipamento fabricado.**

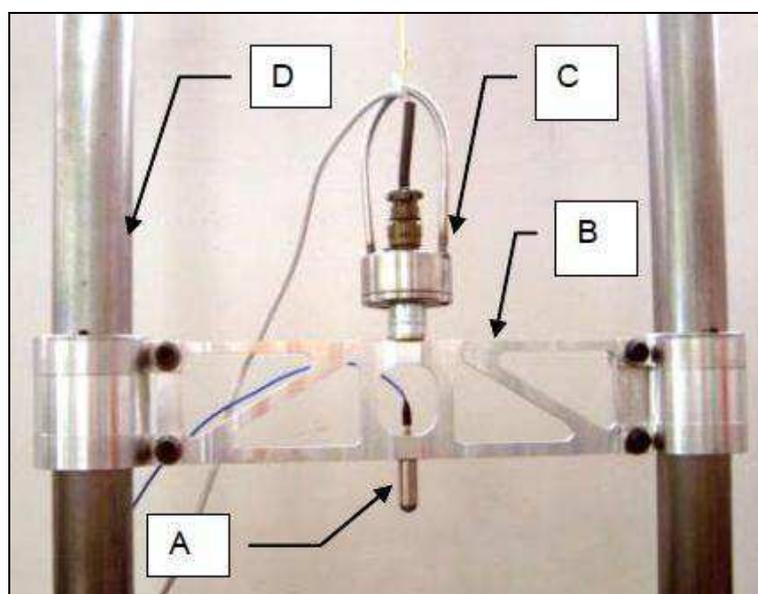
**Fonte: (MINAK; GHELLI 2006)**

A base e o topo do equipamento são fixados por meios de parafusos no chão e na parede respectivamente, de forma a não ter movimentos durante a realização dos ensaios. A desvantagem dessa fixação é a dificuldade para realizar um possível deslocamento do

equipamento. Uma placa de aço é montada para fixar a corpo de prova e os instrumentos. Esta placa não se move durante o impacto, mas pode ajustar a altura do corpo de prova do chão.

Uma porta de acrílico foi montada na máquina, para proteger o operador no caso em que pequenos fragmentos se soltem do corpo de prova e voem causando acidentes.

Como pode ser visto na figura 4.24, o impactador consiste numa célula de carga piezoelétrica com diâmetro semiesférico de 12,7 mm de diâmetro fixada em uma simples estrutura de alumínio que foi usinada a partir de uma única placa, a movimentação do impactador é realizada através de dois rolamentos lineares fixados entre a estrutura e as barras. A estrutura em alumínio pode ser içada manualmente através de um arame que foi acoplado ao eletroímã. Este eletroímã é responsável por manter a estrutura na altura requerida antes do teste, sendo que, o impacto acontece quando é cessada a energia do eletroímã, causando o dano no corpo de prova.



**Figura 12 - Conjunto massa impactador (A) célula de carga (B) Estrutura de alumínio (C) Eletroímã (D) barras guias.**

**Fonte: (MINAK E GHELLI 2006)**

A figura 4.25 mostra a base de fixação do corpo de prova, percebe-se que a geometria e as dimensões são iguais a norma ASTM D7136 (mais detalhes em 4.1.1). A figura mostra ainda que a máquina possui um sistema eletromagnético que evita o segundo impacto no corpo de prova. O sistema funciona com duas barras de aço pequenas que são colocadas transversalmente entre as guias de deslizamento verticais, para que eles possam parar o impactador após a atingir a corpo de prova. Cada barra é apoiada por dois dispositivos

eletromagnéticos, que enquanto estão ligados, mantém as barras em uma posição mais baixa, de tal forma que a célula de carga atinge a corpo de prova antes da estrutura em alumínio do impactador atingir as barras. Quando o fornecimento de corrente aos eletroímãs é interrompido, uma mola contida em cada um dos dispositivos se desloca para cima, levantando barras para a posição mais elevada, parando a estrutura do impactador, impossibilitando a célula de carga atingir a corpo de prova novamente.

No caso de ocorrer a penetração do impactador no corpo de prova, o impactador é simplesmente extraído pelas barras do sistema anti rebote quando elas forem levantadas.



**Figura 13 - Base de fixação do corpo de prova.**

**Fonte: (MINAK E GHELLI 2006)**

#### **4.1.10 Projeto e fabricação de um equipamento para teste a baixa velocidade em painéis sanduíches compósitos no Instituto de Tecnologia PES na Índia**

O trabalho de Sharna e Raghupathy (2011) desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica no Instituto de Tecnologia PES em Bangalore na Índia foi outro trabalho de fundamental importância, pois foi projetado e fabricado um equipamento de impacto de baixa velocidade para ensaio de materiais compósitos com características semelhantes ao objetivo desta pesquisa.

O equipamento é capaz de realizar ensaios em placas quadradas de material compósito de painéis sanduíche ou laminadas com dimensões de 150 x 150 mm e espessura entre 16 – 25 mm. A velocidade do impactador está compreendida entre 2 – 6m/s, com massa entre 2,5 e

12,5 kg. O equipamento possui dois tipos de impactadores que podem ser utilizados, um de forma semiesférica com diâmetro de 12,5 mm e outro de forma quadrada de 25 x 25 mm. A altura máxima de queda é de 1,5 m, causando uma energia máxima de impacto de 180 joules.

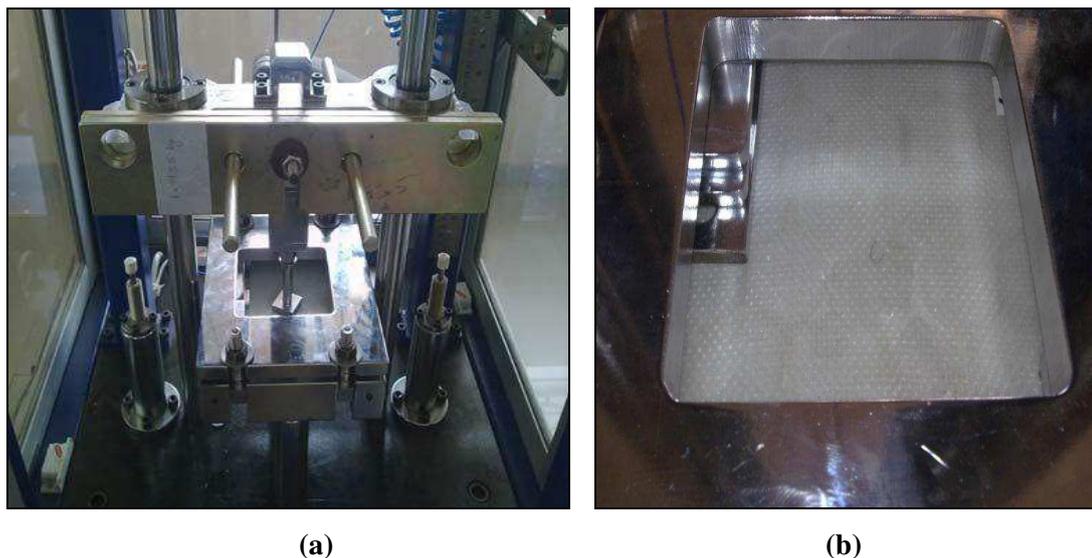
A figura 4.26 mostra o equipamento desenvolvido.



**Figura 4.26 - Máquina de impacto por queda de peso desenvolvida.**

**FONTE: (SHARNA; RAGHUPATHY, 2011)**

Na figura 4.27, é possível ver em detalhes o mecanismo de impacto da máquina que consiste em duas guias cilíndricas verticais em aço, que são montadas em uma base de aço. Sob a base está uma chapa de aço de 20 milímetros de espessura, que tem uma abertura retangular no centro. Nesta abertura a corpo de prova é fixado por meio de parafusos de ajuste. O impactador foi montado de forma a deslizar ao longo das guias cilíndricas em aço que minimizam o atrito. O impactador foi fabricado em aço inoxidável com a ponta semiesférica de 12,5 mm diâmetro e 50 mm de comprimento que está fixada por meio de parafusos. Outro impactador de 25 x 25 mm com forma quadrada foi também utilizado para o ensaio.



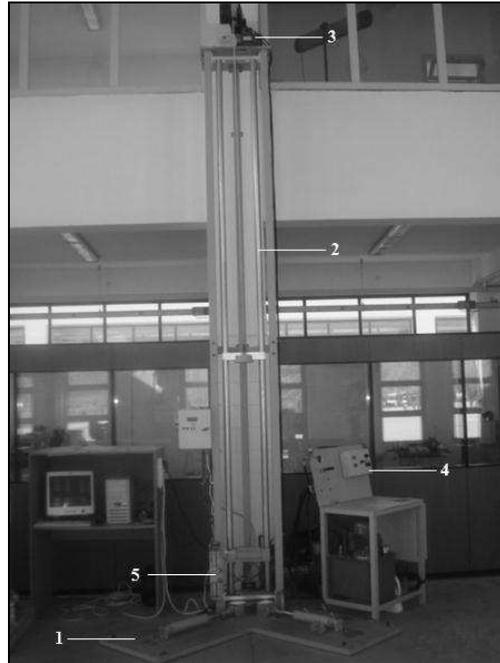
**Figura 4.27 - (a) montagem do impactador (b) corpo de prova fixada na base.**

**Fonte: (SHARNA E RAGHUPATHY, 2011)**

#### **4.1.11 Estudo experimental de baixa velocidade de impacto em placas compósitas laminadas no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade de Dumlupinar na Turquia**

O trabalho de Akin e Senel, (2010) desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade de Dumlupinar na Turquia foi de grande importância para o desenvolvimento desse projeto. O equipamento realiza ensaios em placas quadradas de material compósito laminado com dimensões de 140 x 140 mm com 8 camadas.

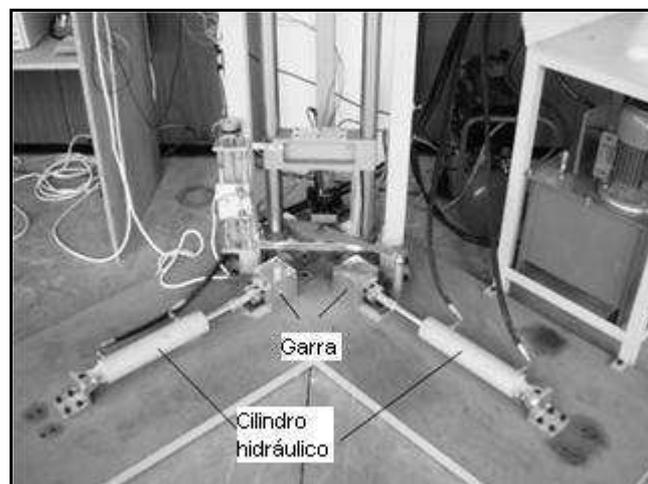
Para os ensaios de impacto foi utilizada uma máquina de ensaio de queda de peso vertical, especialmente projetada e fabricada para este fim. A máquina consiste de cinco componentes principais, como pode ser observado na figura 4.28: uma base em forma de L de chapa de aço, uma torre de queda de peso, um elevador, uma unidade de controle e um sistema de freio.



**Figura 4.28 - Máquina de impacto por queda de peso: 1) base em forma de L de chapa de aço, 2) uma torre de queda de peso, 3) um elevador, 4) uma unidade de controle e 5) um sistema de freio.**

**Fonte: (Akin e Senel, 2010)**

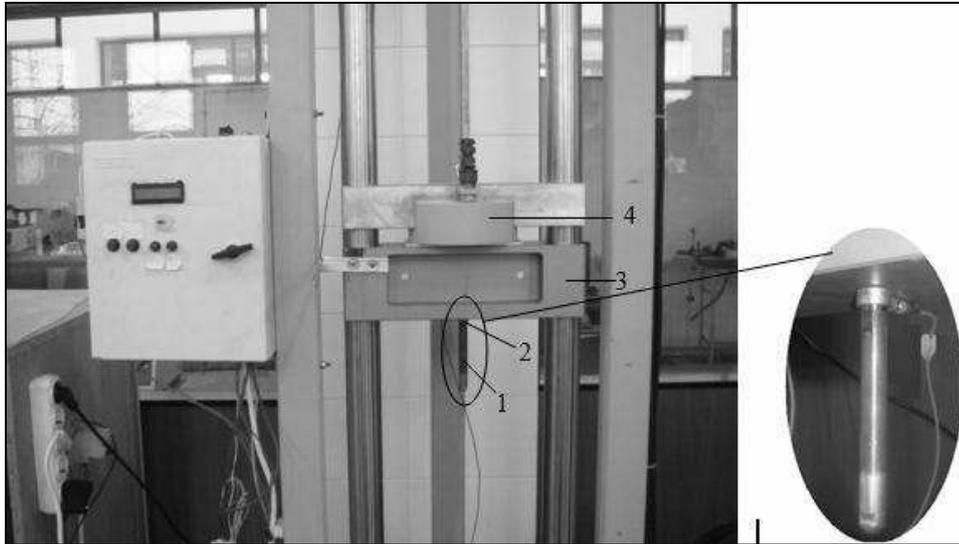
A base da máquina de impacto é em forma de L e consiste em uma placa de aço com 50 mm de espessura parafusada ao chão. Quatro cantoneiras e dois pistões hidráulicos são montados na placa. Duas cantoneiras montadas nos pistões hidráulicos são móveis e as outras duas são fixas onde os corpos de prova são fixados com estas cantoneiras como pode ser observado na Figura 4.29.



**Figura 4.29 - Base do equipamento.**

**Fonte: (Akin e Senel, 2010)**

A torre de queda de peso é constituída por duas barras de aço retangulares, e duas guias de deslizamento cilíndricas em aço que são responsáveis pelo deslocamento do peso de impacto, as barras possuem 5 m de altura (Figura 4.28). Além disso, dois eletroímãs são montados com rolamentos sobre as guias de deslizamento. Estes eletroímãs soltam o peso de impacto que tem um sensor de força acoplado no impactador conforme figura 4.30.

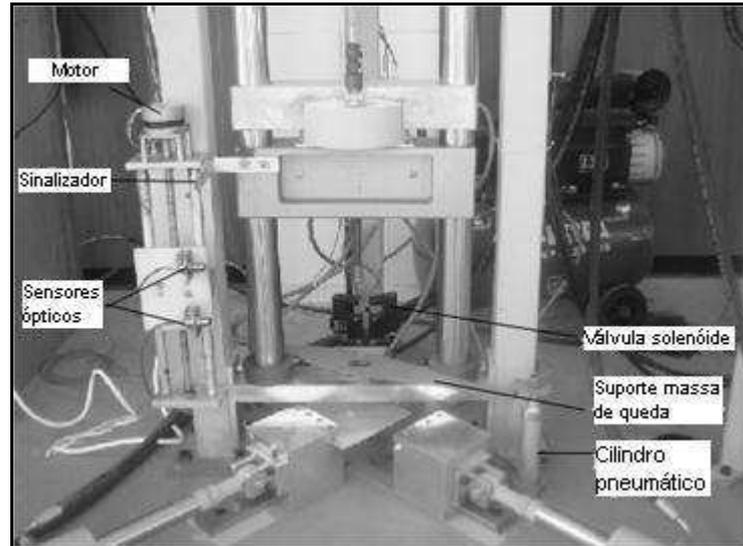


**Figura 4.30 - Componentes da torre de queda de peso; 1) impactoador 2) sensor de força 3) peso de queda 4) Eletroímã.**

**Fonte: (Akin e Senel, 2010)**

O sistema de elevadores possui um motor, cabos e um eletroímã. O motor está localizado na torre. O motor eleva o eletroímã com um cabo de aço até a altura apropriada. A unidade de controle gerencia o sistema de elevador, sistema hidráulico para fixação do corpo de prova e o eletroímã (Figura 4.28).

O sistema anti rebote impede que vários impactos ocorram no corpo de prova. Se o impactoador retornar após o primeiro impacto, o sistema de freio é ligado e trava o impactoador imediatamente, com o acionamento de dois pistões pneumáticos que elevam o suporte dos pesos e não deixa que o impactoador atinja o corpo de prova novamente. Dois sensores ópticos, um sinalizador, um suporte para os pesos, dois pistões pneumáticos, uma válvula solenoide e um compressor são usados no sistema conforme mostra a Figura 4.31.



**Figura 4.31 - Sistema anti rebote.**

**Fonte: (Akin e Senel, 2010)**

O impactador foi usinado a partir de uma barra cilíndrica sólida, possui 12 milímetros de diâmetro e a ponta semiesférica. O impactador foi acoplado na parte inferior do peso de queda. O sensor de força foi montado entre impactador e o peso de queda como pode ser observado na Figura 4.32. Antes da realização do ensaio, o sistema foi calibrado e a massa total do conjunto impactador/peso utilizada na máquina foi 3,1 kg.



**Figura 4.32 - Conjunto massa impactador.**

**Fonte: (Akin e Senel, 2010)**

#### 4.1.12 Ensaio de queda de peso em materiais compósitos laminados de alumina/alumínio na Universidade de Economia e Tecnologia TOBB na Turquia

UBEYLI et al (2005) da Universidade de Economia e Tecnologia TOBB na Turquia realizaram ensaio de queda de peso em compósitos laminados de alumina/alumínio. O equipamento utilizado para os ensaios foi construído em um estudo anterior no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Técnica do Oriente Médio (ÇOLAKOĞLU, 2002). Este equipamento primeiramente foi desenvolvido para conformação e corte de metais, tais como chapas e barras de corte. No entanto, em um estudo posterior Şimşri (2002) redesenhou o equipamento para fins de caracterização de ensaio de baixa velocidade.

A Figura 4.33 representa uma vista esquemática da máquina de impacto por queda de peso de baixa velocidade.

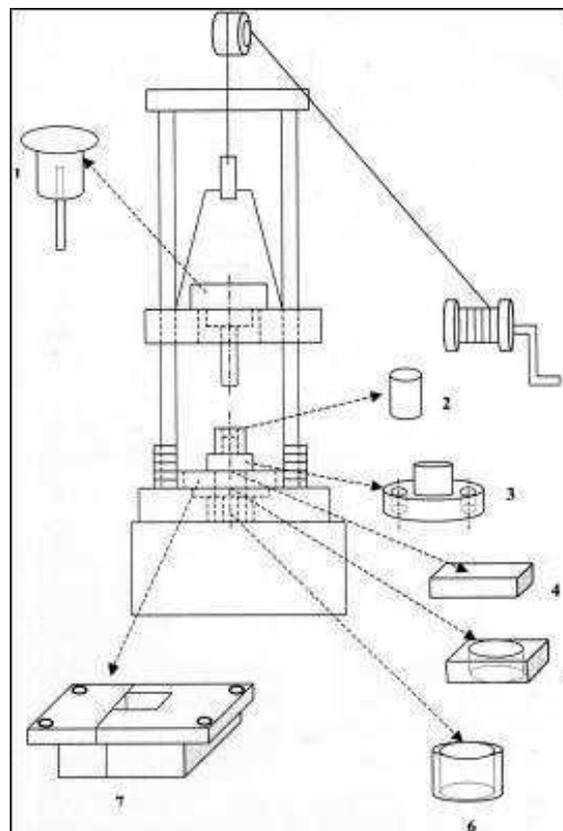


Figura 4.33 - Desenho esquemático da máquina de impacto por queda de peso desenvolvida.

Fonte: (UBEYLI et al 2005)

Para utilizar a máquina para este fim, seis novas peças foram projetadas e fabricadas. As modificações são especificadas a seguir:

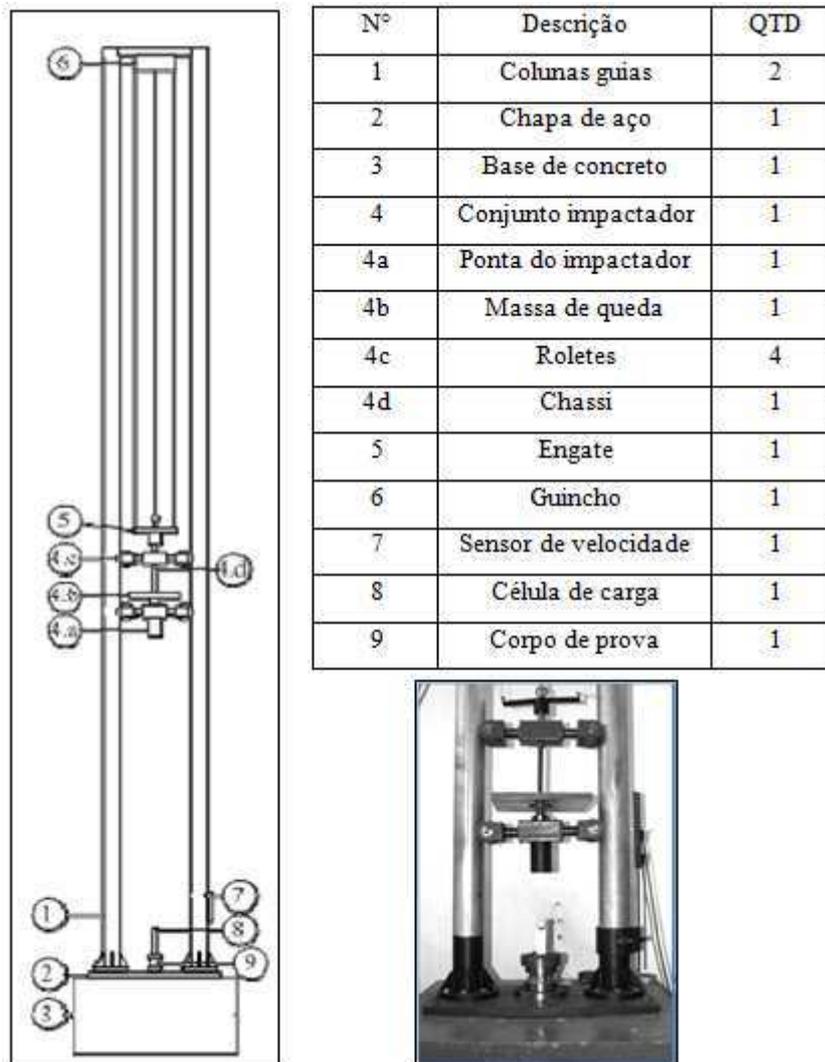
- (1) Massa de impacto: Uma peça de aço com oito quilogramas foi utilizada como a massa de impacto. Um impactador com um diâmetro de 8 milímetros é fixado na parte inferior da peça, por meio do qual é obtido o impacto sobre o corpo de prova;
- (2) Amortecedor: Um tubo de alumínio de 50 mm de diâmetro, comprimento de 55 milímetros e 2 mm de espessura é utilizado para absorver o excesso de energia do peso de queda, após o impacto;
- (3) Fixação da placa: A finalidade da placa de fixação é para segurar o tubo de alumínio e para fixar a corpo de prova.
- (4) Corpo de prova: O corpo de prova é colocado no interior da cavidade da placa de fixação inferior que é fabricada com dimensões ligeiramente maiores em comparação com ao corpo de prova;
- (5) Placa de fixação inferior: Uma placa de aço retangular com dimensões de 50 × 50 × 20 mm com um furo de 20 mm de diâmetro no centro é utilizada para fixar o corpo de prova. O furo é utilizado caso o impactador perfure o corpo de prova;
- (6) Suporte: Um cilindro de aço com furo de 20 mm é usado como suporte, de modo que o impactador possa ser parado pelo tubo de Alumínio;
- (7) Placa base: Esta parte é composta de duas partes. Uma placa de aço é fixada à base da máquina através de quatro parafusos e uma caixa retangular para que todos os pedaços do corpo de prova sejam recuperados após a perfuração.

#### **4.1.13 Desenvolvimento da máquina de impacto por queda de peso da Faculdade de Mecânica e Engenharia Aeroespacial na Indonésia**

Gunawan et al (2011) projetaram e construíram uma máquina de ensaio de impacto por queda de peso na Faculdade de Mecânica e Engenharia Aeroespacial na Indonésia. A máquina foi equipada com sensores para medir a velocidade do impactador antes de atingir o corpo de prova e a força de impacto no corpo de prova, além de um sistema de aquisição de dados para análise posterior dos ensaios realizados. O processo de desenvolvimento do equipamento inclui o desenho, a fabricação, e os testes.

A Figura 4.34 mostra esquematicamente o desenho da máquina de ensaio de impacto desenvolvida, que pode ser dividida em quatro subsistemas: a estrutura que consiste em

colunas guia, chapa de aço e de bloco de concreto; o conjunto peso/impactador que consiste no chassi, impactador, roletes e a massa de queda; engate e um mecanismo de elevação da massa; e o sistema de instrumentação.



**Figura 4.34 - Máquina de impacto desenvolvida na pesquisa.**

**Fonte: (GUNAWAN et al, 2011)**

As colunas da máquina de impacto foram concebidas para funcionar como um guia para movimento do impactador. O projeto com duas colunas foi selecionado entre três alternativas: nenhuma coluna, uma coluna e duas colunas. O projeto de duas colunas foi escolhido devido à sua segurança, preço moderado e facilidade de operação. As colunas foram fabricadas com 6 m de comprimento com tubo de aço inoxidável, diâmetro externo de 11,4 mm e espessura da parede de 6 mm. As colunas foram montadas em cima de uma placa de aço com 3 cm de espessura. A placa foi fixada em um bloco de concreto com as seguintes

dimensões 1 x 1 x 2 m. O bloco de concreto foi parcialmente enterrado em um buraco quadrado com largura de 1,2 m e profundidade de 1,7 m no chão. O buraco foi inicialmente preenchido com 0,2 m de areia grossa e, em seguida, o bloco de concreto foi colocado dentro do buraco. Finalmente, os espaços vazios entre o buraco e bloco de concreto foram preenchidos com areia. A areia é utilizada para isolar o choque e as vibrações durante o experimento.

O conjunto impactador consiste em um chassi, um impactador, as massas de queda e roletes. Os roletes foram ligados ao chassi e cada rolete foi equipado com uma mola de pressão que manteve os roletes sempre em contato com a coluna de guia. Este mecanismo garantiu que o movimento do conjunto impactador ao longo da coluna guia durante os ensaios.

A massa do chassi, roletes e do impactador, sem as massas de queda foram de 20 kg. A massa do conjunto impactador pode ser modificada pela adição de várias massas de queda e assim a massa total do conjunto impactador pode ser até 150 kg.

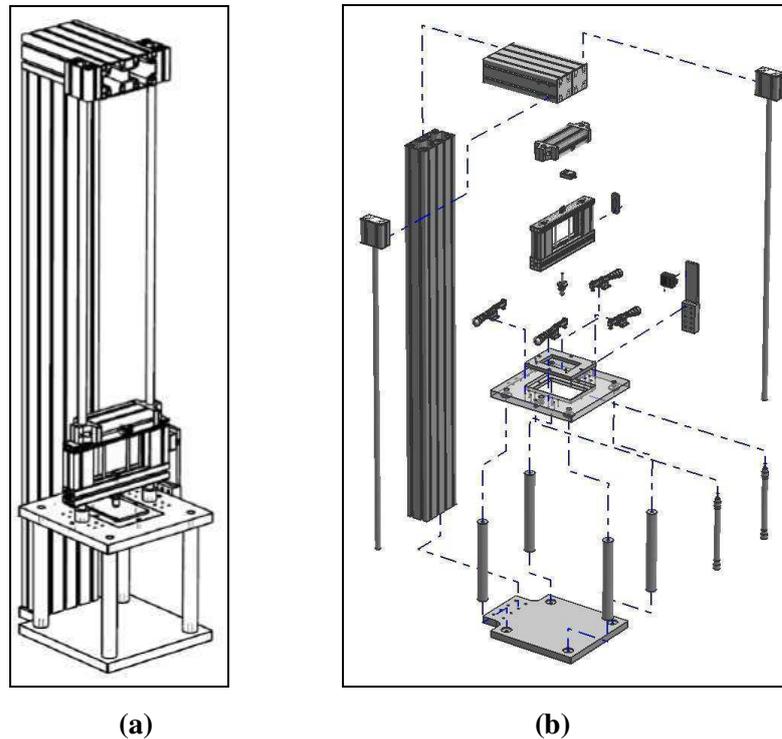
Embora o comprimento das colunas guias sejam de 6 m, a altura máxima de queda do impactador foi inferior, pois deve ser fornecido um espaço para a corpo de prova, a célula de carga, o guincho e o engate para montagem do impactador. A altura máxima efetiva de impacto foi de 5 m, que corresponde a uma velocidade de impacto máxima de 9,9 m/s. A energia cinética máxima do impactador com massa máxima de 150 kg foi de 7350 J.

O mecanismo de fixação foi projetado para prender e soltar o conjunto impactador com peso máximo de 150 kg. Um guincho foi usado para levantar o mecanismo de fixação juntamente com o conjunto impactador a uma determinada altura que é relacionada com a velocidade de impacto desejada. O operador do equipamento é responsável pela configuração do ensaio de impacto requerido, relacionando a massa e a altura de impacto. Após essa etapa, o ensaio é realizado liberando o conjunto impactador que atinge o corpo de prova.

#### **4.1.14 Inovação no ensino de tecnologia de compósitos na Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade Técnica de Praga na República Tcheca.**

Outro trabalho estudado foi o de (kučera, 2008) desenvolvido no Departamento de Engenharia Aeroespacial da Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade Técnica de Praga na República Tcheca. O trabalho teve como base o estudo teórico e prático do comportamento estático dos materiais compósitos, além do problema da carga dinâmica influenciar diretamente sobre a resistência e a absorção de energia dos compósitos.

A figura 4.35 mostra o equipamento desenvolvido em ambiente CAD (a) e a todos os componentes de montagem do equipamento (b).



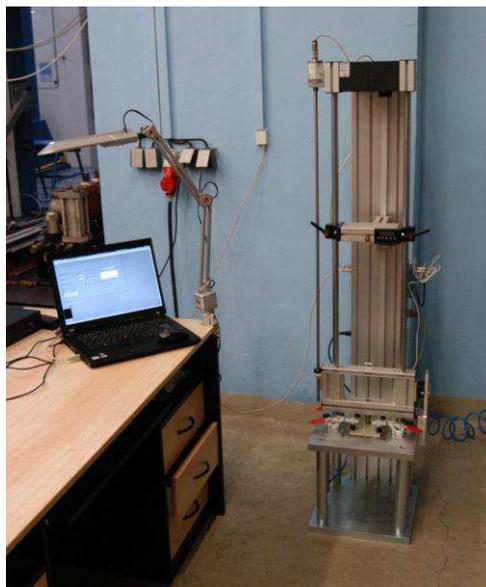
**Figura 4.35 - Desenho esquemático do equipamento desenvolvido.**

**Fonte: (KUČERA, 2008)**

A construção da máquina de impacto por queda de peso foi projetada de acordo com a norma ASTM D7136/D7136M-07.

Na fabricação do equipamento foi utilizado o máximo de componentes disponíveis no mercado, a fim de reduzir os custos de produção. O comprimento das colunas guias foi projetado para 870 milímetros e com a massa total de queda de 22 kg é possível alcançar teoricamente energias máximas de impacto de 188J.

O equipamento foi projetado de forma que a base fosse aparafusada com os perfis de duralumínio. As colunas guias foram montadas através de encaixe no topo do equipamento e na base. A figura 4.36 mostra o equipamento construído.

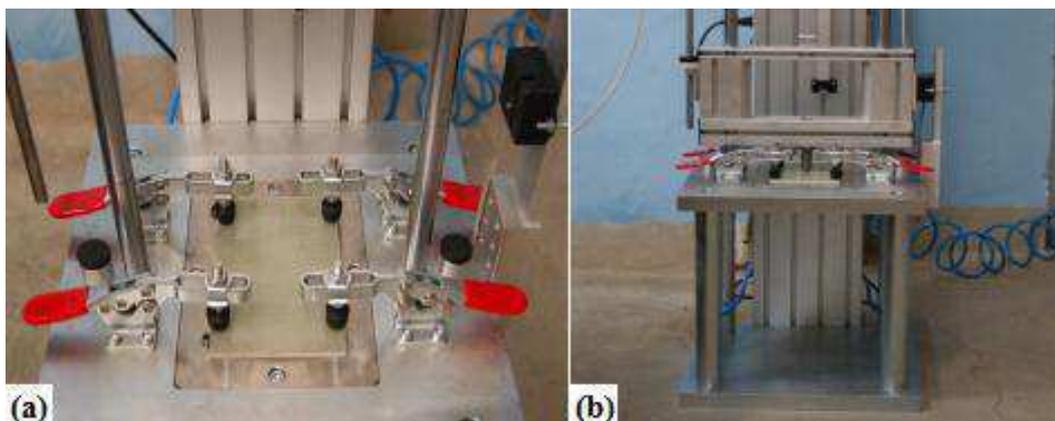


**Figura 4.314 - Máquina de impacto por queda de peso desenvolvida.**

**Fonte: (KUČERA, 2008)**

O corpo de prova e o sistema anti rebote foram alocados em cima da base do equipamento. A massa de queda e o impactador foram montados nas colunas guias através de rolamentos lineares. O corpo de prova é um painel retangular 100x150 mm com seis milímetros de espessura. O impactador possui uma ponta semiesférica lisa com um diâmetro de 16 mm e dureza entre 60 e 62 HRC. Na base do equipamento dois pistões pneumáticos são responsáveis pelo sistema anti rebote que impede que o impactador atinja a corpo de prova mais de uma vez.

A figura 4.37 mostra detalhes da fixação do corpo de prova por grampos (a) e base do equipamento (b).

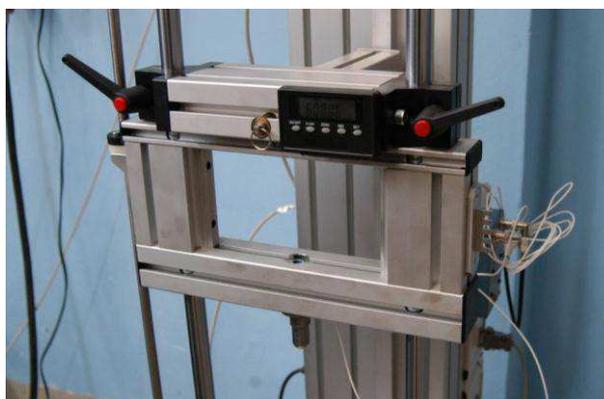


**Figura 4.37 - (a) Fixação do corpo de prova por grampos (b) base do equipamento.**

**Fonte: (KUČERA, 2008)**

O conjunto massa/impactador foi concebido de forma única, ou seja, sem a possibilidade de adicionar massa de queda. O peso do conjunto massa/impactador é de 22 kg.

Nas guias de deslizamento dos pesos foi montado um mecanismo de trava, onde o operador pode ajustar a altura de impacto e, conseqüentemente a energia de impacto. A figura 4.38 mostra o conjunto massa/impactador.



**Figura 4.38 - Conjunto massa/impactador.**

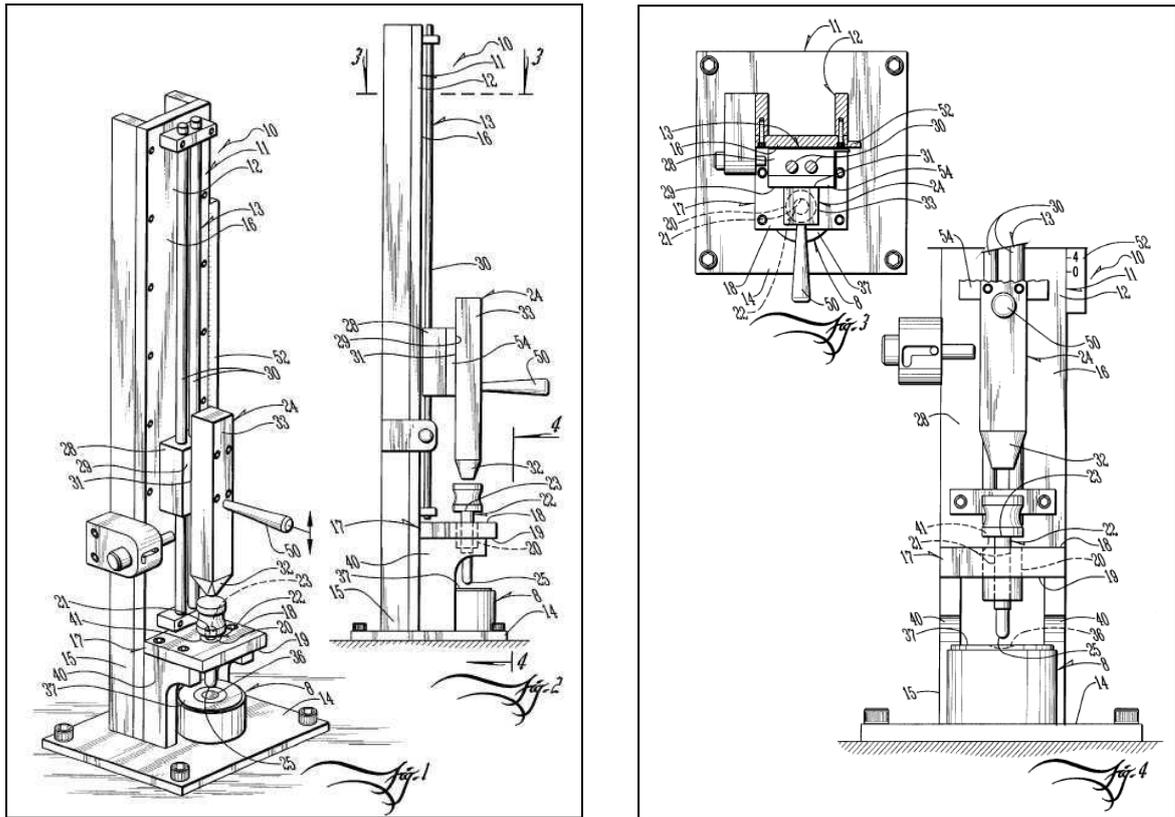
**Fonte: (KUČERA, 2008)**

#### **4.1.15 Dispositivo de ensaio de impacto vertical Patente N° US 6523391 B1**

Uma patente consultada para a elaboração do projeto foi a de Knox et al (2003) que projetou uma máquina de impacto vertical por queda de peso.

Os principais objetivos da invenção é o desenvolvimento de um equipamento de ensaio para medições precisas da resistência ao impacto de um corpo de prova, que seja fácil de manusear e de eficiente operação capaz de realizar ensaios em uma variedade de materiais, como por exemplo, PVC, outros plásticos, alumínio e outros materiais.

O equipamento desenvolvido compreende uma estrutura rígida, uma base ligada à estrutura, um dardo posicionado por cima da base, e um mecanismo de queda de peso que desliza pela estrutura como pode ser observado na figura 4.39.



**Figura 4.39 - Desenho esquemático do equipamento desenvolvido.**

**Fonte: (KNOX ET AL 2003)**

A estrutura é constituída por uma coluna vertical, de uma base, e um trilho de guia. A coluna vertical possui uma distância suficiente para suportar de forma segura um conjunto de peso que pode impactar um corpo de prova a partir de diferentes alturas.

Para facilitar o deslocamento do mecanismo de queda de peso na orientação vertical, um bloco guia foi acoplado de forma que o mecanismo deslize sobre o trilho, onde esse movimento é possível graças a rolamentos lineares.

O dardo é fixado por um suporte parafusado a estrutura, o acoplamento entre esses elementos é através de um rolamento que assegura o impacto do dardo com o corpo de prova será sempre no plano vertical e sem inclinação. O dardo possui um corpo com uma extremidade superior que recebe o impacto da força do peso de queda e uma extremidade inferior que transmite a força de impacto para o corpo de prova.

A base da estrutura do equipamento é fixada no chão através de parafusos, de forma a minimizar os efeitos de vibrações. Montada sobre a base da estrutura existe um bloco onde é fixado o corpo de prova, esse bloco possui uma cavidade para caso o dardo perfure o corpo de prova.

#### **4.1.2 Especificação da energia de impacto da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

Depois de estudos sobre materiais compósitos, ensaio de impacto por queda de peso e equipamentos para realização do ensaio, percebeu-se que os materiais compósitos são anisotrópicos, ou seja, a organização, fração volumétrica e a distribuição das fibras, assim como a orientação do carregamento possuem uma influência significativa nas propriedades mecânicas do material compósito, principalmente na resistência mecânica. O resultado dessa grande variação nas propriedades dos materiais compósitos leva a uma grande variação no nível de energia de impacto nas máquinas estudada.

A norma ASTM D7136/D7136M-07 não especifica a energia de impacto que a corpo de prova estará sujeito, assim foi realizado um estudo das máquinas de impacto por queda de peso para materiais compósitos existentes no mercado, definindo o intervalo de energia que essas máquinas utilizam em seus ensaios, figura 4.40. Esses dados foram obtidos de 19 equipamentos desenvolvidos por universidades e por empresas de ao redor do mundo.

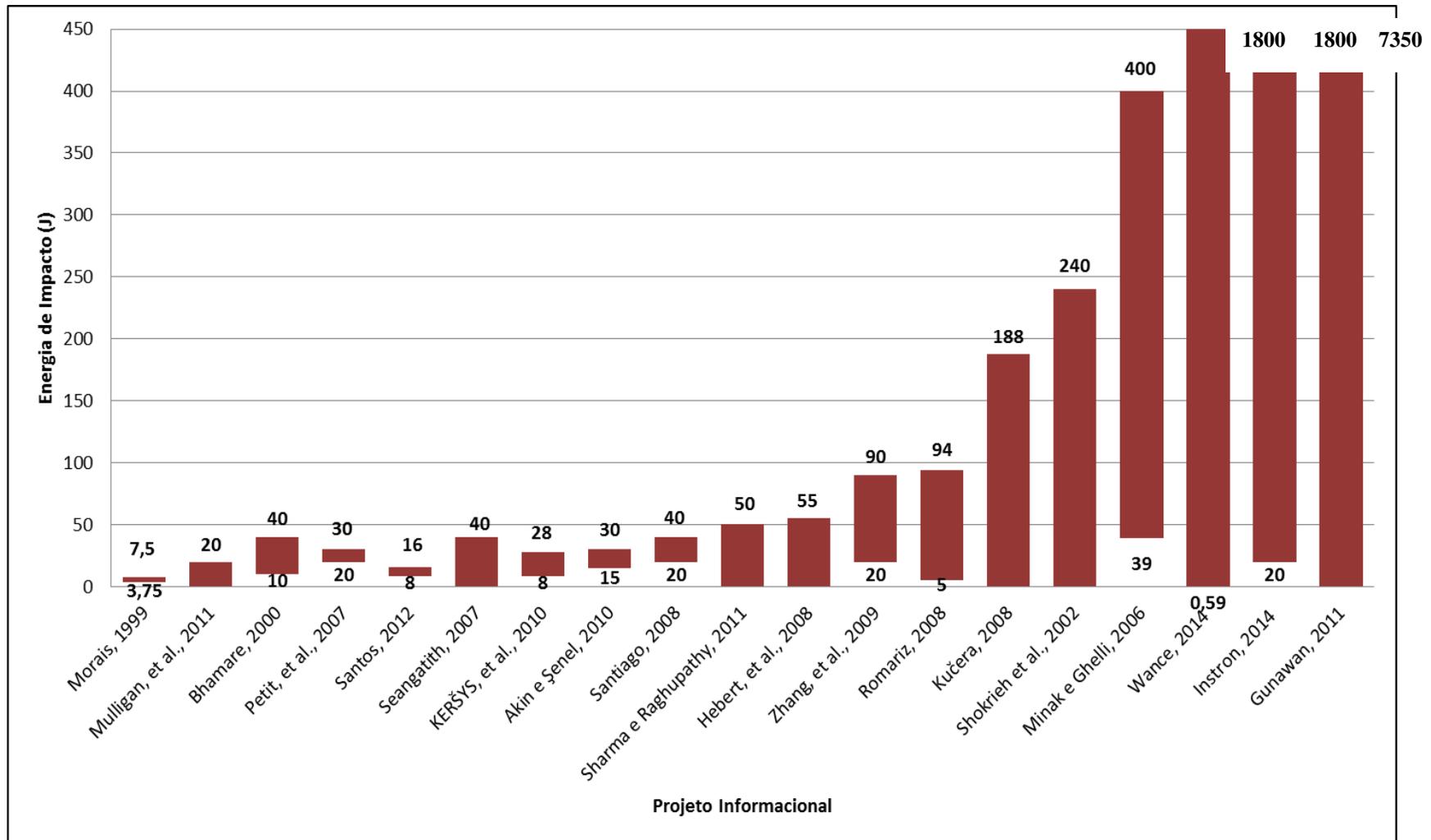
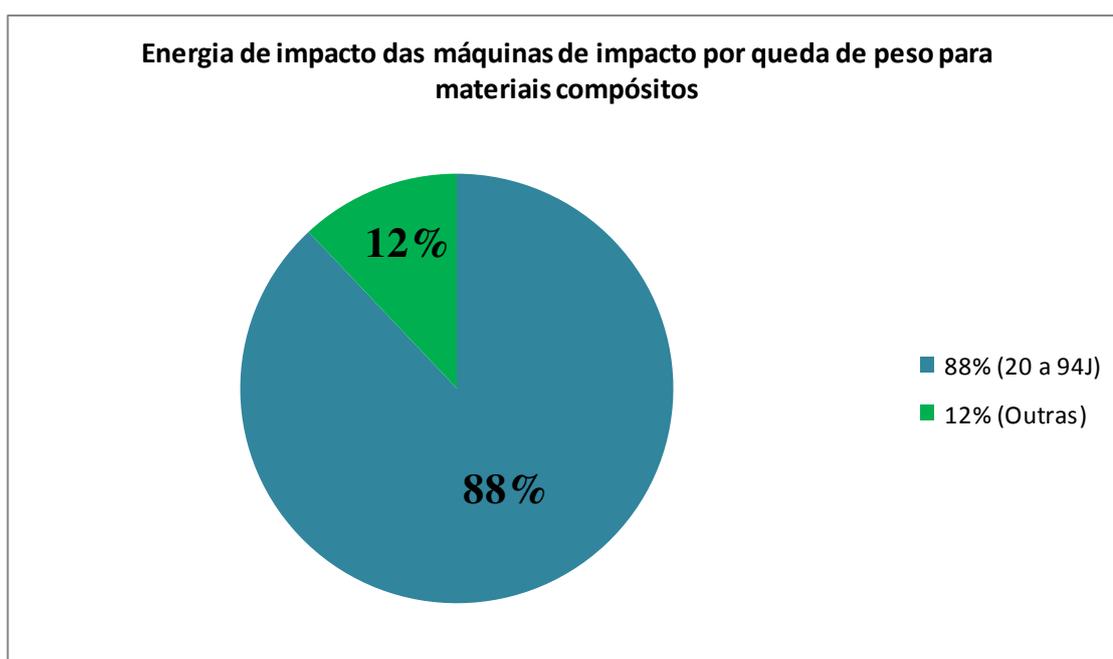


Figura 4.40 - Gráfico da energia de impacto das máquinas pesquisadas.

Para esse estudo foram desconsideradas as máquinas de impacto por queda de peso das empresas Instron e Wance, além do trabalho de Gunawan (2011), pois trabalham com níveis acima de 1800J de energia de impacto, caracterizando impacto de alta velocidade.

Foi possível observar então que a maioria das máquinas de impacto por queda de peso para materiais compósitos, cerca de 88%, possui um intervalo de energia de impacto variando entre 20 e 94J, como mostra a figura 4.41.

O intuito deste trabalho é investigar diversos tipos de materiais compósitos, assim foi definido um intervalo de energia de impacto entre 20J e 94J, pois a maioria das falhas nos compósitos ocorre nesse intervalo. Outro aspecto importante no estudo do ensaio é a velocidade de impacto, entretanto como definimos que o ensaio seria de baixa velocidade, ou seja, a velocidade de impacto estará abaixo de 5 m/s.



**Figura 4.41 - Gráfico das máquinas de impacto por queda de peso com energia de impacto.**

## **4.2 Projeto conceitual de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

Após a finalização do projeto informacional, foi iniciado o desenvolvimento da concepção da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos. O mesmo foi caracterizado pelo estudo de livros, vídeos, artigos, teses, patentes e catálogos de

fabricantes de equipamentos onde desses foram analisados os que apresentavam maior relevância para o presente trabalho.

Uma constante entre todos os trabalhos é a falta de detalhamento do projeto dessa máquina, o que nos obriga a pesquisar e conceber diferentes soluções para a mesma.

A partir dos estudos realizados da norma ASTM D7136/D7136M-07, é possível perceber que para o projeto de uma máquina de impacto de queda de peso, é de grande importância o estudo dos seguintes sistemas que compõem a mesma:

1. Subsistema estrutural da máquina;
2. Subsistema de fixação da estrutura da máquina no solo;
3. Subsistema de base da máquina;
4. Subsistema de fixação do corpo de prova;
5. Subsistema guia deslizamento dos pesos;
6. Subsistema pesos de impacto;
7. Subsistema impactador;
8. Subsistema de travamento e liberação do impactador;
9. Subsistema elevação do conjunto massa/impactador;
10. Subsistema anti rebote;
11. Subsistema de instrumentação e controle.

Passaremos a análise de cada subsistema separadamente, com as vantagens e desvantagens de cada um.

#### **4.2.1 Subsistema estrutural da máquina**

A estrutura da máquina de impacto por queda de peso corresponde ao chassi do equipamento, onde todos os outros subsistemas são acoplados. Dessa forma, a estrutura deve ser rígida, para que não sofra nenhum dano ou vibre durante os ensaios, influenciando negativamente os resultados dos ensaios.

No projeto informacional foram estudadas diversas concepções de estrutura da máquina de impacto por queda de peso, e as concepções com características mais relevantes estão apresentadas na tabela 4.1.

O princípio de solução adotado pela Instron CEAST 9310 é o E1, que utiliza uma estrutura do tipo torre. As vantagens dessa solução é que possui simples fabricação em aço carbono e fácil montagem que pode ser parafusada na base do equipamento. As desvantagens dessa solução é que a estrutura é muito estreita, impossibilitando a montagem da estrutura com a base sugerida pela norma ASTM D7136/D7136M-07, além de não existir proteção para o operador, podendo causar acidentes.

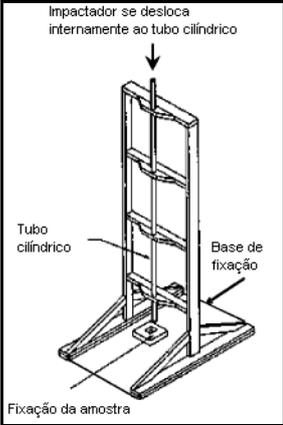
Outro princípio de solução estudado foi o E2 adotado pela Instron CEAST 9340, que utiliza uma estrutura tipo caixa. A vantagem desta solução é que o equipamento possui uma caixa que isola a área do ensaio do meio externo, assim garantindo a proteção do operador do equipamento, além da possibilidade da realização do ensaio com controle da temperatura do corpo de prova. A desvantagem dessa solução é que os ensaios não seriam realizados com variação de temperatura.

Outra solução estudada foi a E3 desenvolvida na Universidade Técnica de Praga, a estrutura tipo torre é fabricada em duralumínio e posicionada atrás das guias, com isso é possível utilizar a base sugerida pela norma ASTM D7136/D7136M-07. A desvantagem dessa solução é que também não possui proteção para o operador do equipamento.

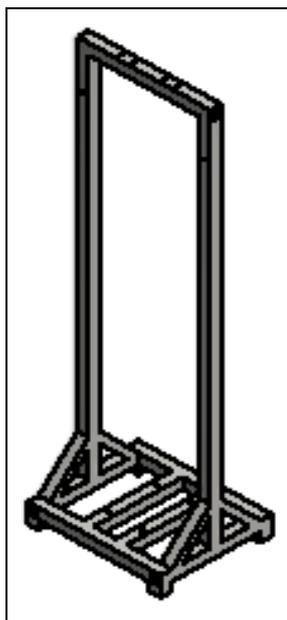
A última solução que consta na tabela 4.1 é a E4 sugerida pela norma ASTM D7136/D7136M-07, que possui uma estrutura simétrica, de formatação simples e de fácil construção. Assim como as outras soluções E2 e E3 não possui proteção para o operador do equipamento.

**Tabela 4.1 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema estrutural da máquina.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Instron CEAST 9310		<b>E1</b> – Estrutura do tipo torre, sem proteção para o operador.

Instron CEAST 9340		<b>E2</b> – Estrutura do tipo caixa, com proteção para o operador e ambiente sob temperatura controlada.
Universidade Técnica de Praga – (Kucera, 2008)		<b>E3</b> – Estrutura fabricada em duralumínio, posicionada atrás das guias. (Tipo Torre).
Norma ASTM D7136/D7136M-07		<b>E4</b> – Estrutura simétrica, de formatação simples e de fácil construção.

A concepção E4 foi a escolhida para o subsistema estrutural da máquina neste projeto, a figura 4.42 mostra um esboço da concepção escolhida. O motivo desta escolha é que essa concepção possui fácil fabricação, confiabilidade e baixo custo. O material utilizado na fabricação foram tubos industriais quadrados, mais conhecidos como metalon, que foram soldados formando a estrutura da máquina.



**Figura 4.42 - Esboço da concepção do subsistema estrutural da máquina.**

#### **4.2.2 Subsistema fixação da estrutura da máquina no solo**

O subsistema de fixação da estrutura da máquina no solo é muito importante, pois este subsistema deve ser capaz de absorver todo o impacto do ensaio sem que haja nenhum tipo de influência nos ensaios, como por exemplo, equipamento desnivelado, vibração da estrutura, saltos da base após a ocorrência do impacto, dentre outros fenômenos indesejáveis. Vale ressaltar que quanto maior for a energia de impacto, maior deve ser a rigidez da estrutura, de forma que o ensaio não tenha influência dos problemas expostos. A tabela 4.2 mostra as concepções estudadas no projeto informacional deste projeto.

A Instron CEAST 9350 padrão utiliza o princípio de solução FE1, que possui amortecedores de vibrações na fixação da estrutura da máquina no solo, este equipamento realiza ensaios com energia de impacto de até 1800 Joules, o que pode-se considerar que este sistema é confiável.

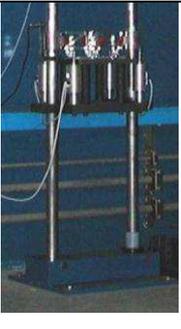
Outro princípio de solução estudado foi o FE2 desenvolvido na Universidade de Bologna na Itália, o equipamento é capaz de realizar ensaios de até 400 Joules de energia de impacto. Os projetistas definiram que a estrutura da máquina fosse parafusada no solo. Esta solução possui o inconveniente da perda de mobilidade do equipamento, caso necessite o transporte para outro local.

O princípio de solução FE3 desenvolvido na Faculdade de Engenharia Mecânica e Aeroespacial da Indonésia definiu que a estrutura deve ser fixada no solo com concreto

devido a alta energia de impacto, devido a máquina de impacto por queda de peso realizar ensaios de até 7350 Joules. Assim como na FE2, o equipamento não pode ser movido para outro local facilmente.

Já o princípio de solução FE4 adotado na Universidade Técnica de Praga, que possui um equipamento capaz de realizar ensaios com energia de impacto de até 188 Joules, não utiliza fixação da estrutura da máquina no solo, ou seja, o próprio peso do equipamento é capaz de absorver toda a energia de impacto sem transmitir nenhum tipo de perturbação para os resultados dos ensaios.

**Tabela 4.2 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema estrutural da máquina.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Instron CEAST 9350 com opcionais		FE1 – Estrutura da máquina com amortecedores de vibrações.
Universidade de Bologna, Itália – (Ghelli e Minak, 2011)		FE2 – Estrutura fixada no solo com parafusos.
Faculdade de Engenharia Mecânica e Aeroespacial, Indonésia (Gunawan et al, 2011)		FE3 – Estrutura fixada no solo com concreto.

Universidade Técnica de Praga – (Kucera, 2008)		FE4 – Estrutura sem fixação com o solo.
--	---	---

O princípio de solução para o subsistema de fixação da estrutura da máquina no solo foi o FE1, visto que a Instron utiliza este sistema para seus equipamentos com capacidade de realizar ensaios com energia de impacto de até 1800 Joules. Assim, foi verificado que esta solução atenderia o que foi solicitado ao projeto, ou seja, é um sistema confiável, capaz de absorver a energia de impacto sem que se tenha problemas que interfiram nos resultados dos ensaios. A figura 4.43 ilustra um esboço da concepção escolhida.

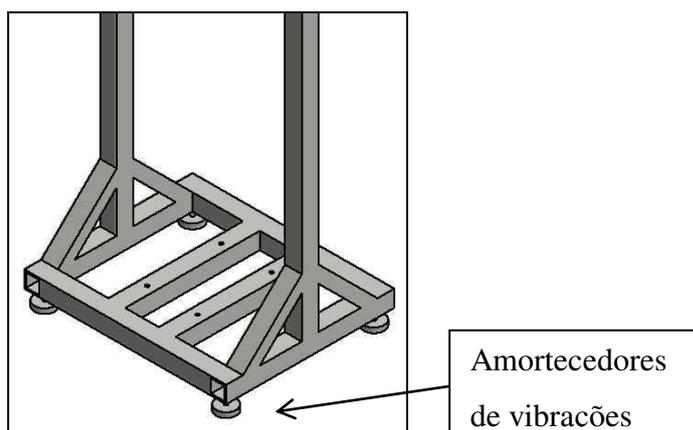


Figura 4.43 - Esboço da concepção do subsistema fixação da estrutura da máquina no solo.

#### 4.2.3 Subsistema base da máquina

A base da máquina é responsável por absorver o impacto do ensaio e a fixação do corpo de prova. Assim, a base deve ser uma estrutura rígida que não se deforme devido aos constantes impactos que sofrerá, além de não vibrar, o que pode influenciar negativamente nos resultados gráficos.

Foram estudadas diversas concepções para a base da máquina de impacto por queda de peso, e as concepções com características mais relevantes estão apresentadas na tabela 4.3.

A base B1 é sugerida pela norma ASTM D7136/D7136M-07 e conforme foi especificada no projeto informacional devem ser fabricadas com chapas de alumínio ou aço,

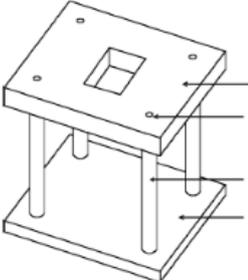
barras cilíndricas de aço ou alumínio e a fixação desses componentes deve ser realizada com parafusos. A base deve ter uma abertura no centro para caso de o impactador perfure a corpo de prova.

A base B2 desenvolvida na Universidade Técnica de Praga é semelhante a indicada na norma ASTM D7136/D7136M-07 sendo que o material utilizado na fabricação é o duralumínio.

A base B3 desenvolvida na Universidade de Pune também é semelhante a indicada na norma ASTM D7136/D7136M-07, mas sendo que a diferença entre as concepções é o sistema para fixação do corpo de prova.

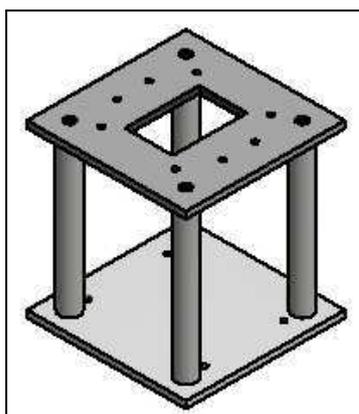
A base B4 adotada pela Instron CEAST 9340 é isolada do ambiente externo, com a possibilidade de controle da temperatura do corpo de prova. A desvantagem dessa solução foi o alto custo para esta concepção, fugindo do objetivo do projeto que era a concepção de um equipamento de baixo custo.

**Tabela 4.3 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema base da máquina.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Norma ASTM D7136/D7136M-07		<b>B1</b> – Base de fixação fabricação e montagem em aço ou alumínio.
Universidade Técnica de Praga – (Kucera, 2008)		<b>B2</b> – Base fabricada em duralumínio.

<p>Universidade de Pune, Índia – (Bhamare, 2000)</p>		<p><b>B3</b> – Base fabricada em aço.</p>
<p>Instron CEAST 9340</p>		<p><b>B4</b> – Base isolada do ambiente externo, com a possibilidade de controle da temperatura do corpo de prova.</p>

A concepção escolhida para o subsistema base da máquina foi a B1, ilustrada na figura 4.44. Esta escolha foi motivada devido a norma ASTM D7136/D7136M-07 sugerir esta concepção, assim como o fato desta concepção ser de fácil fabricação, montagem, não utilizar controle de temperatura nos ensaios e ser de baixo custo. O material utilizado na fabricação foi o aço carbono 1020.



**Figura 4.44** - Esboço da concepção do subsistema base da máquina.

#### 4.2.4 Subsistema de Fixação do corpo de prova

A fixação do corpo de prova é responsável por conter a corpo de prova durante o ensaio. A fixação deve ser tal que não mova ou danifique o corpo de prova e que seja de fácil ajuste. Concepções para a fixação do corpo de prova estão apresentadas na tabela 4.4.

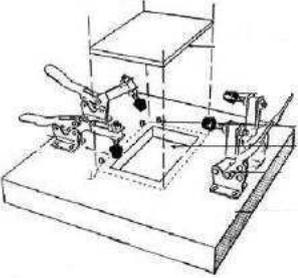
O princípio de solução sugerido pela norma ASTM D7136/D7136M-07 é o F1, que possui grampos de fixação localizados de tal forma que a corpo de prova esteja posicionada centralmente sobre a abertura da chapa. Esta concepção é de simples fabricação, montagem e fácil operacionalidade.

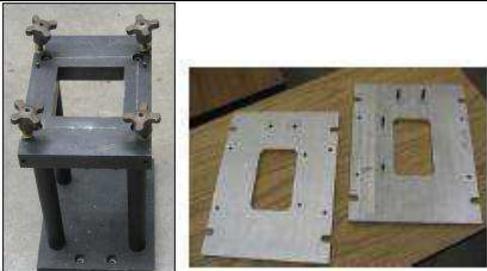
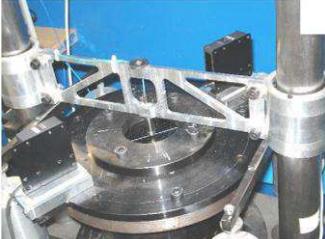
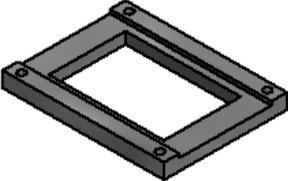
O princípio de solução F2 adotada pela Universidade de Pune é semelhante a solução sugerida por F1, sendo que são utilizadas duas placas de aço para fixação do corpo de prova e parafusos para o aperto e fixação do conjunto.

O princípio de solução F3 desenvolvido pela Universidade de Bologna é semelhante a solução sugerida por F2, sendo que é utilizada uma placa de aço circular para fixação do corpo de prova e parafusos para o aperto e fixação do conjunto. Percebe-se que na fixação do corpo de prova é necessária ferramentas para o aperto, acarretando em maior dificuldade operacional.

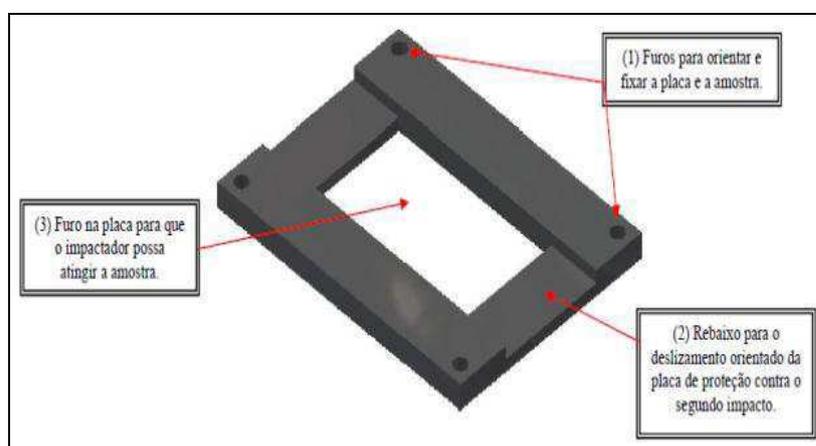
O princípio de solução F4 foi desenvolvido neste projeto que constitui de uma placa com abertura central para fixação do corpo de prova. A fixação do corpo de prova é realizada por interferência nessa abertura. A vantagem desta concepção é a possibilidade de utilizar o sistema anti rebote manual.

**Tabela 4.4 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema fixação do corpo de prova.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Norma ASTM D7136/D7136M-07		<b>F1</b> – Fixação do corpo de prova por grampos nas bordas.

<p>Universidade de Pune, Índia – (Bhamare, 2000)</p>		<p><b>F2</b> – Fixação por parafusos e por uma placa colocada sobre o corpo de prova.</p>
<p>Universidade de Bologna, Itália – (Ghelli e Minak, 2011)</p>		<p><b>F3</b> – Fixação por parafusos e por uma placa circular colocada sobre o corpo de prova.</p>
<p>Concepção própria</p>		<p><b>F4</b> – Fixação por interferência</p>

Para o subsistema fixação do corpo de prova foi escolhida a concepção F4, devido o sistema anti rebote utilizado ser manual. O subsistema é constituído de uma placa com abertura central que possui as dimensões padrões do corpo de prova 100 x 150 mm. A fixação do corpo de prova é realizada por interferência nessa abertura. A placa conta com quatro parafusos para a fixação na base do equipamento, além de um rebaixo, para o deslizamento de um obstáculo que evita o segundo impacto, após o impactador atingir o corpo de prova. A figura 4.45 ilustra o esboço da concepção adotada neste projeto.



**Figura 4.45 - Esboço da concepção do subsistema fixação do corpo de prova.**

#### 4.2.5 Subsistema guia de deslizamento dos pesos

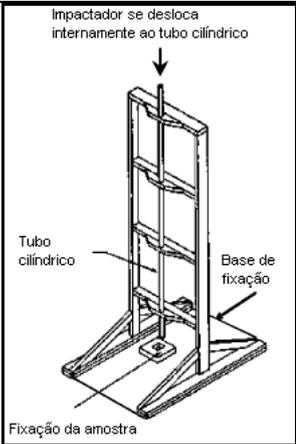
A função da guia de deslizamento é orientar o impactador e a carga de impacto para atingir o corpo de prova. Este componente deve ser rígido e o atrito entre os elementos que deslizam entre si deve ser mínimo para que se tenha um bom funcionamento do conjunto. A tabela 4.5 mostra as concepções estudadas a partir de diversos equipamentos.

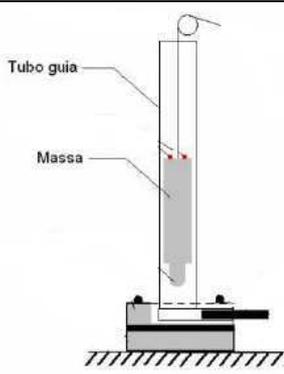
O princípio de funcionamento G1 é sugerido pela norma ASTM D7136/D7136M-07 e constitui de um impactador em forma de um tubo guia que se desloca pela estrutura e atinge o corpo de prova. Esta concepção é o menos usual dentre os equipamentos estudados, e possui a desvantagem de não poder variar a massa de impacto.

O princípio de funcionamento G2 também é sugerido pela norma ASTM D7136/D7136M-07 que constitui de duas guias colunas para um impactador montado acoplado aos pesos de impacto de forma que o corpo de prova fique entre as guias. Estas guias são fixadas por parafusos na base e na estrutura superior do equipamento. Possui a possibilidade de adicionar massa ao impactador para variar a energia de impacto.

O princípio de solução G3 adotado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo constitui de um tubo guia único, com o impactador se deslocando internamente ao tubo. Esta solução possui a desvantagem de que se o operador necessitar variar a energia de impacto terá que confeccionar outro impactador com massa diferente para alterar a configuração do ensaio.

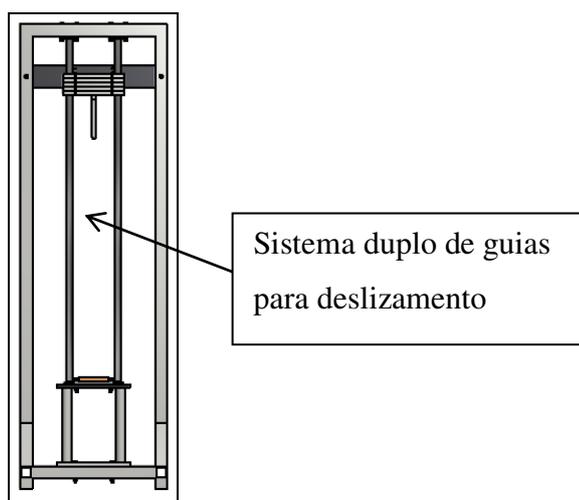
**Tabela 4.5 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema guia de deslizamento dos pesos.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
<p>Norma ASTM D7136/D7136M-07</p>	 <p>Impactador se desloca internamente ao tubo cilíndrico</p> <p>Tubo cilíndrico</p> <p>Base de fixação</p> <p>Fixação da amostra</p>	<p><b>G1</b> – Guia única, fixada pela estrutura.</p>

<p>Norma ASTM D7136/D7136M-07</p>		<p><b>G2</b> – Duas guias de aço, posicionadas de forma que o corpo de prova fique entre elas.</p>
<p>Escola politécnica da universidade de São Paulo (Romariz, 2008)</p>		<p><b>G3</b> – Tubo guia único, com a massa de queda interna ao tubo.</p>

No início do projeto foi percebido que a máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos seguiria a concepção sugerida pela norma ASTM D7136/D7136M-07, com o sistema duplo de guias para deslizamento de pesos como sendo o subsistema desse equipamento. Essa decisão foi concretizada quando percebeu-se que o sistema duplo de guias para deslizamento de pesos estava presente na maioria dos equipamentos estudados no projeto informacional.

Assim, definiu-se que o G2 seria a concepção escolhida para este projeto, como pode ser observado na figura 4.46. As guias de deslizamento utilizadas foram tubos cilíndricos com costura em aço carbono 1020.



**Figura 4.46 - Esboço da concepção do subsistema guia de deslizamento dos pesos.**

#### **4.2.6 Subsistema peso de impacto**

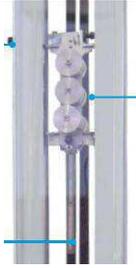
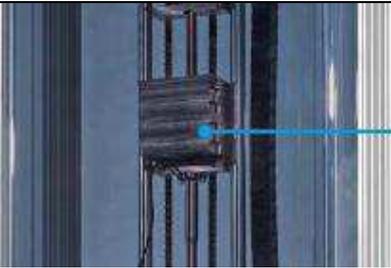
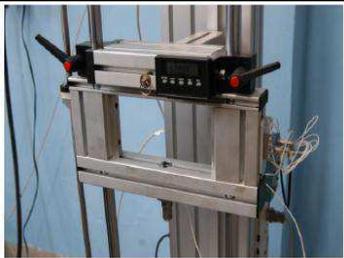
O subsistema de peso de impacto é responsável pela energia de impacto que o corpo de prova sofrerá. Assim, é de suma importância definir no momento da realização do ensaio a massa e a altura de queda dos pesos. Na tabela 4.6 constam concepções encontradas nos trabalhos estudados com suas características.

A Instron CEAST 9310 adota o princípio de solução P1, que são pesos cilíndricos colocados acima do impactador, onde é possível variar a massa e a altura de queda dos pesos, consequentemente variando também a energia de impacto. O acoplamento dos pesos com as guias de deslizamento é realizado através de buchas.

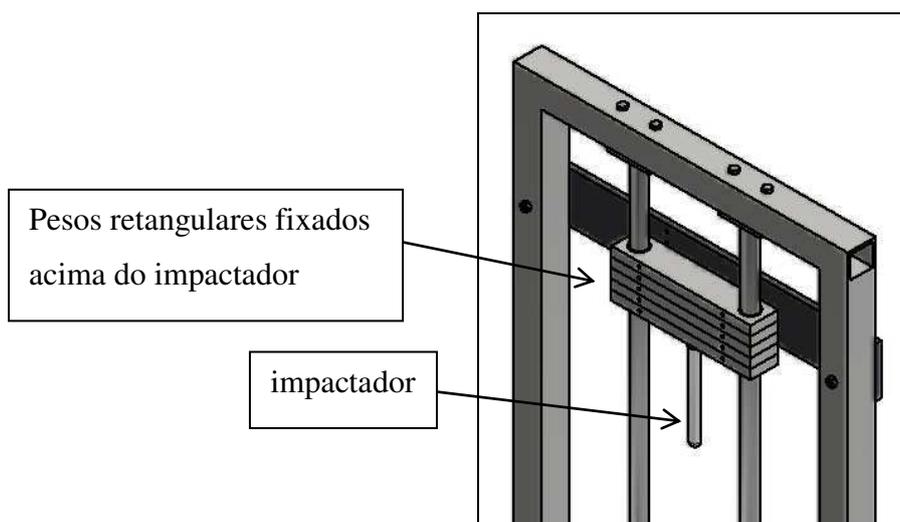
A Instron CEAST 9340 adota o princípio de solução P2 que é semelhante ao utilizado em P1, a diferença está na forma do peso de impacto que são retangulares e fixados acima do impactador. Da mesma forma que P1 é possível variar a massa e a altura de queda dos pesos, consequentemente variando também a energia de impacto. Assim como em P1 o acoplamento dos pesos com as guias de deslizamento é realizado através de buchas.

O princípio de solução P3 desenvolvido na Universidade Técnica de Praga possui um peso fixo vazado acoplado ao impactador. Para variar a energia de impacto é preciso alterar a altura de queda do conjunto massa/impactador o que pode ser inconveniente para ensaios com elevada energia de impacto, pois é preciso ter uma grande altura de queda. O acoplamento dos pesos de queda com as guias de deslizamento é realizado por meio de rolamentos lineares para que haja um perfeito funcionamento do conjunto.

**Tabela 4.6 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema peso de impacto.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Instron CEAST 9310		<p><b>P1</b> – Pesos cilíndricos colocados acima do impactador e facilmente permutáveis e ajustáveis.</p>
Instron CEAST 9340		<p><b>P2</b> – Pesos retangulares fixados acima do impactador e facilmente ajustáveis e permutáveis.</p>
Universidade Técnica de Praga – (Kucera, 2008)		<p><b>P3</b> – Peso fixo vazado, acoplado ao impactador.</p>

A concepção escolhida para o subsistema peso de impacto foi a P2, pois o projeto desenvolvido possuía o pré-requisito de ser compacto, ou seja, o operador do equipamento deve utilizá-lo sem dificuldades em relação a dimensões de altura. Assim, como o equipamento a ser desenvolvido deveria ter energia de impacto entre 20 e 94 Joules, foi percebido que era mais vantajoso variar a massa de queda do que a altura de queda, pois para realizar o ensaio com energia de impacto de 94 Joules e utilizando o impactador sugerido pela norma ASTM D7136/D7136M-07 com massa de 5,5 kg era preciso uma altura de 1,78 metros, o que causaria um grande inconveniente para o operador do equipamento, pois o pino de liberação do conjunto massa/impactador estaria a uma altura de 2,20 metros. A figura 4.47 mostra o esboço da concepção utilizada no projeto.



**Figura 4.47 - Esboço da concepção do subsistema peso de impacto.**

#### **4.2.7 Subsistema impactador**

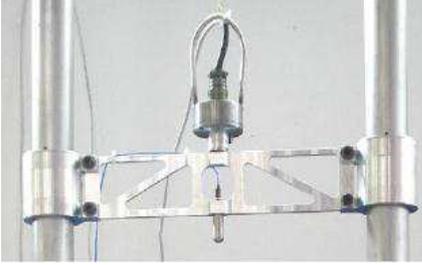
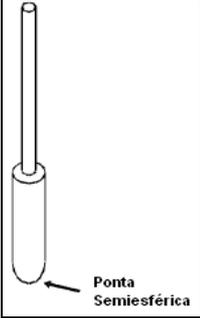
O subsistema impactador é responsável pelo dano que ocorrerá no corpo de prova, assim é preciso que o mesmo seja bastante rígido e que não se danifique devido ao grande número de impactos que sofrerá. A tabela 4.7 mostra as diferentes concepções encontradas para o subsistema impactador com suas características.

O princípio de solução I1 adotado pela Universidade de Bologna foi o da célula de carga de impacto piezoelétrica semiesférica com diâmetro de 12,7 mm fixada em uma estrutura de alumínio. Esta é a solução mais sofisticada, pois a célula de carga faz parte de um conjunto de instrumentação que gera gráficos para análise do dano ocorrido no corpo de prova. O grande inconveniente dessa solução foi o custo da célula de carga que não foi compatível com o orçamento deste projeto.

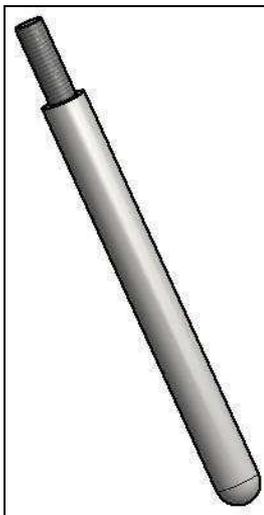
O princípio de solução I2 sugerido pela norma ASTM D7136/D7136M-07 deve conter a ponta semiesférica lisa com diâmetro de 16 mm, a massa deve ser de 5,5 kg e a dureza entre 60 e 62 HC. Esta foi a solução mais encontrada nos equipamentos estudados no projeto informacional.

O princípio de solução I3 desenvolvido na Faculdade de Engenharia Mecânica e Aeroespacial da Indonésia possui um impactador com ponta chata. Este modelo foi pouco encontrado na literatura estudada.

Tabela 4.7 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema impactador.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Universidade de Bologna, Itália – (Ghelli e Minak, 2011)		I1 - célula de carga piezoelétrica
Norma ASTM D7136/D7136M-07		I2 - impactador fabricado em aço com ponta hemisférica
Faculdade de Engenharia Mecânica e Aeroespacial, Indonésia (Gunawan et al, 2011)		I3 – impactador com ponta chata.

Para o subsistema impactador foi escolhida a concepção I2 sugerida pela Norma ASTM D7136/D7136M-07, essa escolha se deve ao fato que a maioria dos equipamentos estudados segue esta concepção, além do mais possui fácil fabricação e baixo custo em comparado a célula de carga especificada em I1. A fabricação seguiu o indicado pela Norma e possui ponta semiesférica lisa com 16 mm de diâmetro, confeccionado em aço carbono SAE 4340 com dureza média de 57 HC. A massa do impactador foi reduzida para 0,5 kg devido as condições do projeto que foi exposto no item 4.2.6. A figura 4.48 mostra a concepção do subsistema impactador utilizada neste trabalho.



**Figura 4.48 - Esboço da concepção do subsistema impactador.**

#### **4.2.8 Subsistema de travamento e liberação do impactador**

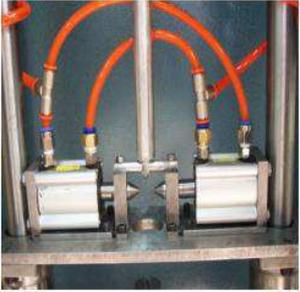
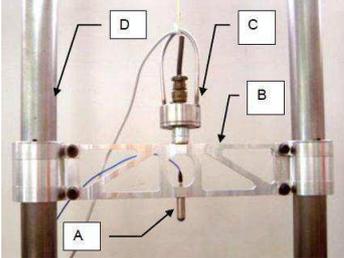
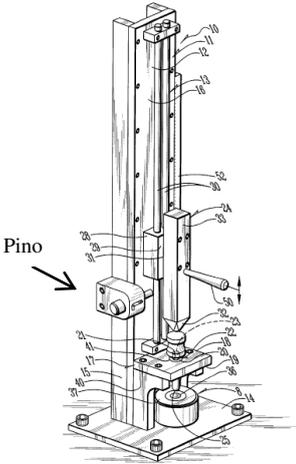
Este subsistema é responsável pela trava e liberação do conjunto massa/impactador para a realização do ensaio. Este sistema deve ser confiável, de forma que não destrave ou trave em momento inoportuno, pois podem ocorrer acidentes. A tabela 4.8 mostra as diferentes concepções encontradas no projeto informacional.

O princípio de solução T1 desenvolvido na Universidade de Ciência e Tecnologia do Irã é composto de atuadores pneumáticos com diâmetro de 10 mm que são capazes de manter o impactador a qualquer altura admissível, assim como, a liberação da massa para a realização do ensaio. Esta solução possui um alto custo para este projeto devido a aquisição dos componentes pneumáticos, como atuadores e o compressor de ar pneumático estarem fora do orçamento.

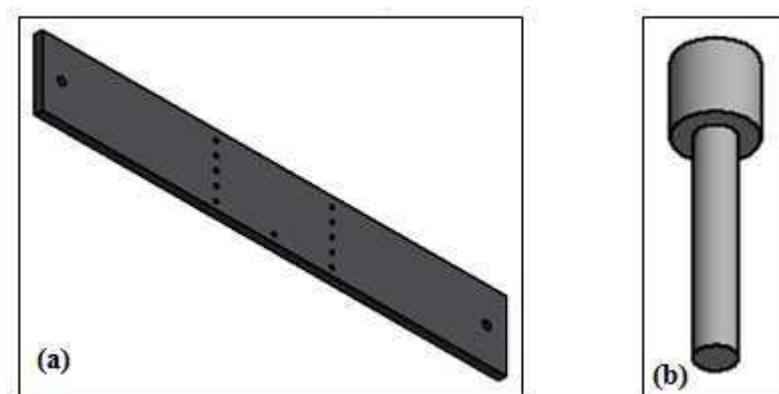
O princípio de solução T2 desenvolvido na Universidade de Bologna possui um sistema com eletroímã. Este eletroímã é responsável por manter o conjunto massa/impactador na altura requerida antes do ensaio, sendo que, o impacto acontece quando é cessada a energia do eletroímã, causando o dano no corpo de prova.

O princípio de solução T3 desenvolvido na Patente N° US 6523391 B1 no projeto de um dispositivo de ensaio de impacto vertical utiliza um sistema com pino de travamento e liberação da carga manual. A vantagem deste sistema é a simplicidade, assim como o baixo custo do componente.

**Tabela 4.8 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema de travamento e liberação do impactador.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Universidade de Ciência e Tecnologia do Irã, (TAHERI-BEHROOZ; SHOKRIEH; ABDOLVAND 2013).		T1 – Sistema pneumático
Universidade de Bologna, Itália – (Ghelli e Minak, 2011)		T2 – Sistema com eletroímã
Patente N° US 6523391 B1– Dispositivo de ensaio de impacto vertical (knox et al 2003)		T3 – sistema com pino de travamento e liberação da carga manual

No subsistema de travamento e liberação do impactador foi escolhida a concepção T3 que possui um sistema manual devido a fácil fabricação do componente, fácil operacionalidade e baixo custo em comparado às outras concepções T1 e T2. A figura 4.49 mostra a concepção desenvolvida neste projeto, que consta com uma placa para seleção da massa de queda e o pino responsável pelo travamento e a liberação do impactador na realização do ensaio.



**Figura 4.49 - Esboço da concepção do subsistema de travamento e liberação do impactador.**

**(a) Placa selecionadora de pesos (b) Pino de liberação do impactador.**

#### **4.2.9 Subsistema elevação do conjunto massa/impactador**

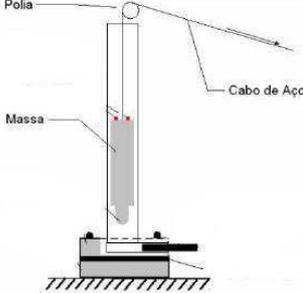
O subsistema para elevação da carga é responsável pelo içamento do conjunto massa/impactador. Este subsistema deve ser confiável, de forma que não solte o conjunto, podendo causar danos no corpo de prova ou acidentes operacionais. A tabela 4.9 mostra as concepções que foram estudadas no projeto informacional.

A Instron CEAST 9350 possui o princípio de solução EC1, que é um sistema de elevação e posicionamento motorizado, capaz de posicionar o conjunto massa/impactador na altura desejada pelo operador. A desvantagem desta solução é o custo desse componente, sendo inviável para este projeto.

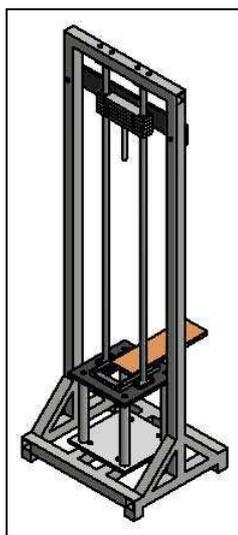
A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desenvolveu o princípio de solução EC2, que é um sistema simples com cabo de aço e polia para o içamento do impactador.

Uma forma mais simples foi utilizada pela Universidade Técnica de Praga, que não possui nenhum sistema de içamento, sendo que o próprio operador do equipamento eleva o conjunto massa/impactador para a altura desejada para a realização do ensaio.

**Tabela 4.9 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema elevação da carga.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Instron CEAST 9350	 <p>CEAST 9350 Standard Features</p> <p>(1) Sistema de posicionamento motorizado</p>	<b>EC1</b> – Sistema de elevação e posicionamento motorizado
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Romariz, 2008)	 <p>Polia</p> <p>Massa</p> <p>Cabo de Aço</p>	<b>EC2</b> – Sistema de elevação com cabo de aço e polia
Universidade Técnica de Praga – (Kucera, 2008)		<b>EC3</b> – Sistema de elevação da carga manualmente

Para a concepção do subsistema de elevação do conjunto massa/impactador foi escolhido o princípio de solução EC3, devido ser o mais simples e com menor custo, além do mais o peso total do conjunto massa/impactador é de 7,5 kg não sendo necessária a utilização de uma solução mais sofisticada como detalhado em EC1 e EC2, visto que o operador do equipamento pode içar os pesos manualmente, pois os pesos possuem massa de 1 e 1,5 kg. A figura 4.50 mostra a concepção desenvolvida.



**Figura 4.50 - Esboço da concepção do subsistema elevação do conjunto massa/impactador.**

#### **4.2.10 Subsistema Anti rebote**

O subsistema anti rebote é um dos mais importantes, pois não é desejável que o impactador atinja o corpo de prova mais de uma vez. Assim, é de suma importância que este subsistema funcione de maneira confiável, para que não ocorra alguma falha e o ensaio tenha que ser descartado. A tabela 4.10 mostra as diferentes concepções estudadas no projeto informacional.

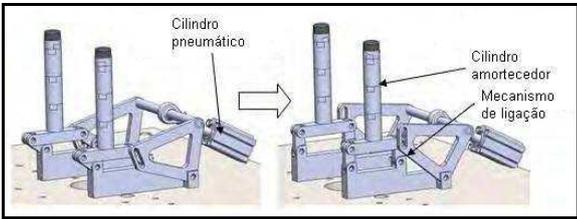
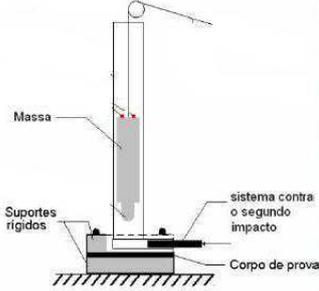
O princípio de solução S1 adotado pela Wance D1T183E é composto de um sistema pneumático que é acionado por um comando elétrico, ou seja, quando o impactador atinge o corpo de prova um sensor aciona o cilindro pneumático que impede que o conjunto massa/impactador atinja o corpo de prova novamente. Este sistema possui um custo relativamente alto devido a aquisição dos componentes pneumáticos, como por exemplo, compressor de ar comprimido, cilindros pneumáticos, válvulas, mangueiras, conexões, etc.

O princípio de solução S2 desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo é manual, ou seja, o operador deve evitar o segundo impacto através de um obstáculo (placa) que é colocado manualmente entre a ponta do impactador e o corpo de prova após a ocorrência do primeiro impacto. Esta é a solução mais simples e de menor custo para este subsistema.

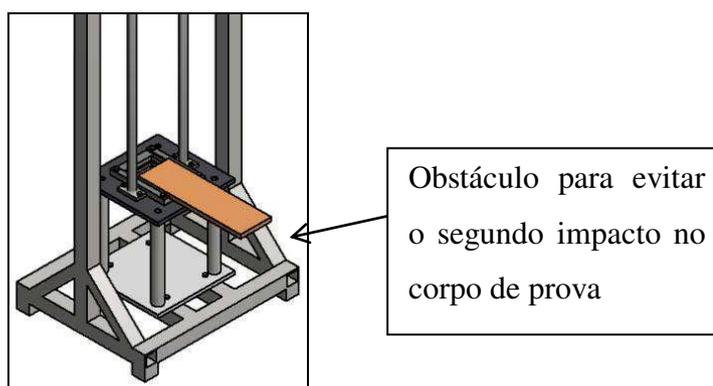
O princípio de solução S3 desenvolvido na Universidade de Bologna possui um sistema eletromagnético que evita o rebote do impactador evitando vários impactos no corpo de prova. Os dispositivos eletromagnéticos, que enquanto estão ligados, matem duas barras

em uma posição mais baixa, de tal forma que ocorre o impacto no corpo de prova. Após o impacto, o fornecimento de corrente aos eletroímãs é interrompido e uma mola contida em cada um dos dispositivos eletromagnéticos se desloca para cima, levantando as barras para uma posição mais elevada, parando a estrutura do impactador, impossibilitando que a célula de carga atinja o corpo de prova novamente. Assim como S1 esta solução possui um custo alto para aquisição dos componentes, inviabilizando o seu uso neste trabalho.

**Tabela 4.10 - Quadro comparativo entre as diferentes soluções para o subsistema anti rebote.**

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Wance DIT183E	 <p>O diagrama ilustra um mecanismo de anti-rebote. À esquerda, um cilindro pneumático está em uma posição baixa. À direita, após o impacto, o cilindro pneumático se deslocou para cima, elevando o mecanismo de ligação. As etiquetas incluem: Cilindro pneumático, Cilindro amortecedor e Mecanismo de ligação.</p>	<p><b>S1</b> – Sistema pneumático com acionamento por comando elétrico.</p>
Escola politécnica da universidade de São Paulo (Romariz, 2008)	 <p>O diagrama mostra um sistema manual de anti-rebote. Uma massa é suspensa por um fio. Abaixo dela, há um sistema contra o segundo impacto que impede a queda da massa. O corpo de prova está posicionado abaixo do sistema. As etiquetas incluem: Massa, Suportes rígidos, sistema contra o segundo impacto e Corpo de prova.</p>	<p><b>S2</b> – O sistema para evitar o segundo impacto manual</p>
Universidade de Bologna, Itália – (Ghelli e Minak, 2011)	 <p>A fotografia mostra um sistema de anti-rebote montado em uma estrutura metálica. O sistema utiliza eletroímãs para controlar o movimento das barras após o impacto. Há dois cilindros pneumáticos visíveis na base do equipamento.</p>	<p><b>S3</b> – Sistema com eletroímãs com acionamento por comando elétrico.</p>

O princípio de solução S2 manual foi o adotado neste trabalho para a concepção do subsistema anti rebote, devido ser o mais simples e com menor custo de fabricação. A figura 4.51 ilustra o esboço da concepção que foi adotada neste projeto, onde o operador do equipamento é responsável por evitar o segundo impacto com inserção de um obstáculo colocado entre o corpo de prova e o impactador após a ocorrência do primeiro impacto.



**Figura 4.51 - Esboço da concepção do Subsistema anti rebote**

A concepção da máquina de impacto de queda de peso para materiais compósitos dá-se pelo estudo do projeto conceitual. Na Tabela 4.11 apresenta-se a matriz morfológica do projeto, onde são destacados os componentes da máquina de impacto, e os princípios de solução gerados e pesquisados para atender a demanda inicial.

#### 4.2.11 Subsistema de instrumentação e controle.

Devido ao baixo orçamento do projeto, não foi possível o desenvolvimento desse subsistema, mas segundo a norma ASTM D7136/D7136M-07 a máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos pode ser utilizada sem a instrumentação.

**Tabela 4.11 - Matriz morfológica com as concepções do projeto.**

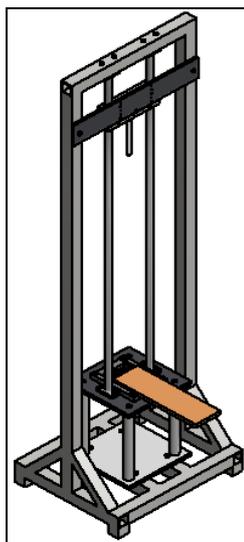
	SUBSISTEMA	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO (P.S.)			
		P.S.1	P.S.2	P.S.3	P.S.4
<b>MÁQUINA DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO</b>	Estrutural da máquina	E1	E2	E2	E4
	Fixação da estrutura da máquina no solo	FE1	FE2	FE3	FE4
	Base da máquina	B1	B2	B3	B4
	Fixação do corpo de prova	F1	F2	F3	F4
	Guia deslizamento dos pesos	G1	G2	G3	-
	Pesos de impacto	P1	P2	P3	-
	Impactador	I1	I2	I3	-
	Travamento e liberação do impactador	T1	T2	T3	-
	Elevação do conjunto massa/impactador	EC1	EC2	EC3	-
	Anti rebote	S1	S2	S3	-

A Matriz morfológica apresentada na tabela 4.11 permite ao projetista diversas opções de concepção do projeto. No entanto, é preciso analisar o custo e a disponibilidade do material que possa suprir a fabricação do projeto sem gastos e tempo excessivo. Assim sendo, foram estabelecidos os princípios de solução destacados na matriz morfológica mostrada na tabela 4.12.

**Tabela 4.12 - Matriz morfológica com os princípios de solução escolhidos para o projeto.**

	SUBSISTEMA	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO (P.S.)			
		P.S.1	P.S.2	P.S.3	P.S.4
<b>MÁQUINA DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO</b>	Estrutural da máquina	E1	E2	E2	<b>E4</b>
	Fixação da estrutura da máquina no solo	<b>FE1</b>	FE2	FE3	FE4
	Base da máquina	<b>B1</b>	B2	B3	B4
	Fixação do corpo de prova	F1	F2	F3	<b>F4</b>
	Guia deslizamento dos pesos	G1	<b>G2</b>	G3	-
	Pesos de impacto	P1	<b>P2</b>	P3	-
	Impactador	I1	<b>I2</b>	I3	-
	Travamento e liberação do impactador	T1	T2	<b>T3</b>	-
	Elevação do conjunto massa/impactador	EC1	EC2	<b>EC3</b>	-
	Anti rebote	S1	<b>S2</b>	S3	-

Após o estudo em separado de cada subsistema que compõem a máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos, a concepção escolhida para este projeto foi a E4/FE1/B1/F4/G2/P2/I2/T3/EC3/S2. A figura 4.52 mostra a concepção do equipamento projetado em ambiente CAD com todos os subsistemas.



**Figura 4.52 - Esboço da concepção do final do equipamento.**

### **4.3 Projeto preliminar de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

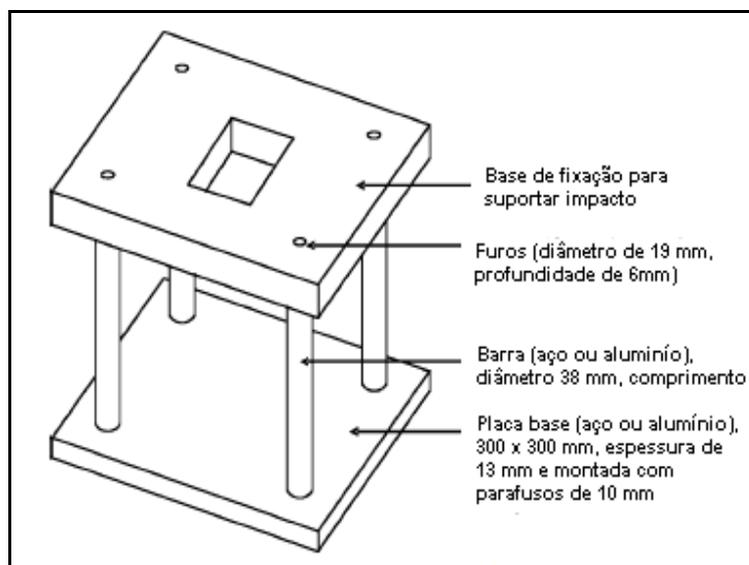
Após a aprovação da concepção, dá-se início a fase de dimensionamento de projeto. Para o dimensionamento deste projeto, foi tomada como base principalmente a norma ASTM D7136/D7136M-07, quando a norma não especificava algum subsistema ou componente, passou-se a analisar os outros meios de pesquisas como, por exemplo, fabricantes do equipamento, patentes e trabalhos acadêmicos.

No projeto preliminar foi realizado o dimensionamento, a escolha do material para fabricação, desenho e cotação do equipamento, simulação computacional de esforços de natureza crítica de alguns componentes.

Assim, será realizado a seguir projeto preliminar para cada subsistema da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

#### **4.3.1 Projeto preliminar do subsistema base da máquina**

Conforme exposto no projeto conceitual, o princípio de solução adotado neste projeto para o subsistema base da máquina será o sugerido pela norma ASTM D7136/D7136M-07, conforme ilustra a figura 4.53.



**Figura 4.53 - Base de fixação.**

**Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).**

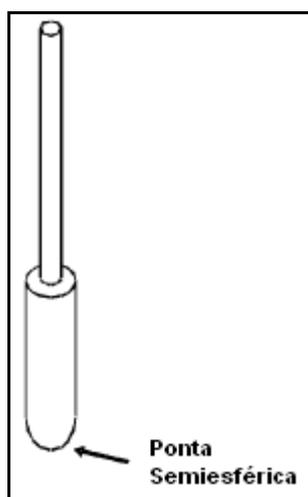
A norma específica os seguintes componentes para a fabricação da base com as seguintes dimensões:

- Duas chapas de aço quadrada com 300 mm de lado e 20 mm de espessura;
- A chapa superior deve ter uma abertura no centro com dimensões de 75x125 mm;
- Quatro barras cilíndricas de aço com diâmetro de 38 mm e comprimento de 300 mm;
- Fixação desses componentes com parafusos de 10 mm de diâmetro.

A norma ASTM D7136/D7136M-07 não especifica o aço que deve ser utilizado na fabricação da base da máquina. Assim, depois de estudar as propriedades mecânicas dos aços, percebeu-se que o aço carbono 1020 poderia ser utilizado para esta aplicação, visto que, possuía alta tenacidade, característica esta indispensável, pois a base da máquina precisa absorver a energia do impacto que se propaga além do corpo de prova. O aço 1020 possui baixo teor de carbono, apresenta boa soldabilidade, boa forjabilidade, e média usinabilidade, este aço é indicado para uma variedade de aplicações de engenharia, além de ser um material de baixo custo.

### 4.3.2 Projeto preliminar do subsistema impactador

O princípio de solução escolhido para o subsistema impactador no projeto conceitual foi o I2 devido a ser indicado pela norma ASTM D7136/D7136M-07, a figura 4.54 mostra a concepção sugerida.



**Figura 4.54 - Impactador para ensaio de impacto por queda de peso.**

**Fonte: (ASTM D7136/D7136M-07, 2005).**

A norma específica que o impactador deve ter uma massa de 5,5 kg, e a ponta deve ser semiesférica lisa com um diâmetro de 16 mm e uma dureza de 60 a 62 HC.

Em relação a massa, conforme explanado no item 4.2.6, a energia de impacto do equipamento deveria estar compreendido entre 20 e 94 Joules, e se fosse utilizado a massa de 5,5 kg era necessária uma altura de 1,78 metro para que fosse possível realizar o ensaio com energia de impacto de 96 Joules, e com isso o pino de liberação do conjunto massa/impactador estaria a uma altura de 2,20 metros, causando um grande desconforto para o operador do equipamento. Assim, foi percebido que era mais vantajoso variar a massa de queda do que a altura de queda. Devido essas condições a massa do impactador foi reduzida para 0,568 kg (ver 4.3.3).

Outra dificuldade encontrada foi a dureza do aço que a norma ASTM D7136/D7136M-07 específica para a fabricação do impactador compreendida entre 60 e 62 HRC, pois é um aço de elevada dureza e difícil usinabilidade, além de ser pouco encontrado no mercado um aço com essas características. Devido essas dificuldades, optou-se por utilizar

o aço SAE 4340, que está mais acessível no mercado e possui características semelhantes ao requisitado. O aço SAE 4340 (composição química no anexo A) é um aço de elevada temperabilidade e forjabilidade, porém possui uma baixa usinabilidade. Consultado catálogos de fabricantes deste aço, foi verificado que a dureza média na condição temperada é de 57 HRC, que é próxima ao indicado pela norma.

### **4.3.3 Projeto preliminar do subsistema pesos de impacto**

O subsistema pesos de impacto escolhido no projeto conceitual foi o princípio de solução P2, que utiliza pesos de formato retangulares fixados acima do impactador. Com esta configuração é possível variar a massa de impacto e conseqüentemente a energia de impacto.

Para o dimensionamento dos pesos de impacto, foi preciso seguir uma série de procedimentos:

1. Definir a altura de queda dos pesos;
2. Definir a energia mínima e máxima de impacto da máquina;
3. Calcular a massa de queda para a energia mínima de impacto;
4. Calcular a massa do impactador;
5. Calcular a massa dos pesos de queda;
6. Calcular as dimensões dos pesos de queda.

#### **Definição da altura de queda**

A altura de queda foi definida em 1,3 metros, que corresponde a distância do pino de liberação dos pesos de queda até o corpo de prova. A escolha desta dimensão foi devido a qualquer pessoa possa utilizar a máquina de impacto por queda de peso e soltar o pino de liberação dos pesos, realizando assim o ensaio de impacto com sucesso.

#### **Definição a energia mínima e máxima de impacto da máquina**

A energia mínima e máxima de impacto foi definida no projeto informacional no item 4.1.2, assim tem-se que será possível realizar ensaios entre 20 e 94 Joules.

### **Cálculo da massa de queda para a energia mínima de impacto**

O cálculo da massa de queda para energia mínima de impacto que foi definido em 20 Joules é realizado a partir da Energia Potencial Gravitacional dada pela equação 4.1:

$$E_p = m \cdot g \cdot H \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

- Energia potencial gravitacional ( $E_p$ ) é a energia de impacto  $E_p = 20J$
- Aceleração da gravidade média na superfície da Terra é  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- E altura de impacto foi definida como  $H = 1,3$  metros

Assim, de posse desses dados foi realizado o cálculo da massa de impacto para energia de impacto de 20 Joules.

$$E_p = m \cdot g \cdot H$$

$$m = \frac{E_p}{gH}$$

$$m = \frac{20}{9,81 \times 1,3}$$

$$m = 1,568 \text{ kg}$$

Portanto, a massa de impacto para a energia de impacto de 20 Joules é de 1,568 kg.

### **Cálculo da massa do impactador**

O impactador será fabricado em aço carbono SAE 4340, possui a forma cilíndrica com a ponta semiesférica e diâmetro de 16 mm. Neste projeto foi considerado que a placa de aço acoplada ao impactador possuiria uma massa de 1 kg, para que se tivesse uma maior facilidade na fabricação do mesmo. Assim, consequentemente a massa do impactador deveria possuir 0,568 kg.

O cálculo da massa será em função da massa específica do impactador, dada pela equação 4.2:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

- Massa específica do aço  $\rho = 7.800 \text{ kg/m}^3$
- Massa  $m = 0,568 \text{ kg}$
- Volume  $V = (\text{m}^3)$

Para o cálculo do volume do impactador, considerou-se que o mesmo era composto da soma de dois corpos, ou seja, uma meia esfera e um cilindro ambos maciços.

$$\rho_{\text{aço}} = \frac{M_{\text{impactador}}}{V_{\text{impactador}}}$$

$$\rho_{\text{aço}} = \frac{M_{\text{impactador}}}{V_{\text{cilindro}} + V_{\text{meia esfera}}} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde,

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * r^2 * h \quad \text{Equação 4.4}$$

$$V_{\text{meia esfera}} = \frac{2}{3} * \pi * r^3 \quad \text{Equação 4.5}$$

Substituindo as equações 4.4 e 4.5 na equação 4.3, tem-se:

$$\rho_{\text{aço}} = \frac{M_{\text{impactador}}}{(\pi * r^2 * h) + \left(\frac{2}{3} * \pi * r^3\right)} \quad \text{Equação 4.6}$$

Sabendo que  $r = 16 \text{ mm}$  que é o raio da semiesfera do impactador e que  $\rho_{\text{aço}} = 7800 \text{ kg/m}^3$ , calcula-se o comprimento da parte cilíndrica do impactador denominado de  $h$ :

Realizando um arranjo matemático na equação 4.6 e isolando o comprimento h, tem-se que:

$$h = \frac{1}{\pi * r^2} * \left( \frac{M_{\text{impactador}}}{\rho_{\text{aço}}} - \left( \frac{2}{3} * \pi * r^3 \right) \right) \quad \text{Equação 4.7}$$

Substituindo os dados na equação 4.7, tem-se:

$$h = \frac{1}{\pi * 0,016^2} * \left( \frac{0,568}{7800} - \left( \frac{2}{3} * \pi * 0,016^3 \right) \right)$$

$$h \cong 80 \text{ mm}$$

Portanto, o comprimento da parte cilíndrica do impactador é de aproximadamente 80 mm, e somado ao raio da semiesfera, tem-se que o comprimento total do impactador é de 96 mm.

### **Cálculo da massa de impacto**

Para calcular a massa de impacto, falta calcular qual será o peso máximo de impacto. Assim, utilizando a equação 4.1, tem-se:

$$E_p = m \cdot g \cdot H$$

$$m = \frac{E_p}{gH}$$

$$m = \frac{94}{9,81 \times 1,3}$$

$$m = 7,38 \text{ kg}$$

Portanto, para uma energia de impacto de 94 Joules, a massa de impacto tem que ser de 7,38 kg. Verificou-se a partir desse resultado, que a máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos poderia ter cinco níveis de energia de impacto, pois basta dividir o peso de queda total de 7,38 kg em quatro pesos de 1,5 kg, um peso de 1 kg e a massa do

impactador de 0,568 kg. A soma desses pesos é igual a 7,568 kg, mas optou-se por utilizar esses pesos para facilitar a fabricação dos mesmos.

Assim, a energia de impacto para os cinco níveis de energia de impacto é mostrada na tabela 4.13.

**Tabela 4.13 - Níveis de energia de impacto.**

Níveis	Arranjo dos pesos	Massa de queda (kg)	Energia de impacto (J)
1	Impactador + peso de 1 kg	1,568	20
2	Impactador + 1 peso de 1 kg + 1 peso de 1,5 kg	3,068	39
3	Impactador + 1 peso de 1 kg + 2 peso de 1,5 kg	4,568	58
4	Impactador + 1 peso de 1 kg + 3 peso de 1,5 kg	6,068	77
5	Impactador + 1 peso de 1 kg + 4 peso de 1,5 kg	7,568	96

### **Cálculo das dimensões dos pesos de queda**

Conforme definido no projeto conceitual os pesos de queda possuem formato retangulares, então a seguir serão calculadas as dimensões dos mesmos.

#### **Peso de 1 kg:**

Considerou-se que todos os pesos possuiriam comprimento de  $C=250$  mm e largura de  $W= 50$  mm. Com isso, a partir da equação de massa específica 4.8, pode-se calcular a altura (hp) dos pesos.

$$\rho_{aço} = \frac{M_{peso}}{V_{peso}} \quad \text{Equação 4.8}$$

Sendo que  $V_{peso} = C * W * hp$ , e  $\rho_{aço} = 7.800 \text{ kg/m}^3$  então tem-se:

$$\rho_{aço} = \frac{m_{impactador}}{C * W * hp}$$

Fazendo um arranjo matemático, tem-se:

$$hp = \frac{m_{\text{impactador}}}{\rho_{\text{aço}} * C * W} \quad \text{Equação 4.9}$$

Substituindo os dados na equação 4.9, tem-se que:

$$hp = \frac{1}{7800 * 0,25 * 0,05}$$

$$hp = 10 \text{ mm}$$

Portanto, tem-se que o peso de 1 kg possui as seguintes dimensões:

- Comprimento de 250 mm
- Largura de 50 mm
- Altura de 10 mm

#### **Peso de 1,5 kg:**

Utilizando a mesma metodologia para o cálculo do peso de 1 kg, com comprimento de  $C=250$  mm, largura de  $L= 50$  mm e  $\rho_{\text{aço}} = 7.800 \text{ kg/m}^3$ . A partir da equação 4.9, calcula-se a altura (A) dos pesos de 1,5 kg.:

$$hp = \frac{m_{\text{impactador}}}{\rho_{\text{aço}} * C * W}$$

Substituindo os dados,

$$hp = \frac{1,5}{7800 * 0,25 * 0,05}$$

$$hp = 15 \text{ mm}$$

Portanto, tem-se que o peso de 1,5 kg possui as seguintes dimensões:

- Comprimento de 250 mm
- Largura de 50 mm
- Altura de 15 mm

#### **4.3.4 Projeto preliminar do subsistema estrutural da máquina**

O subsistema estrutural da máquina é um dos principais subsistemas da máquina de impacto por queda de peso, pois a estrutura deve ser dimensionada de forma que seja rígida e capaz de absorver a energia de impacto, sem que haja interferência de vibrações que possam interferir nos resultados dos ensaios.

Para a estrutura foram escolhidos tubos ocros quadrados industriais mais conhecidos como metalon, as dimensões são: 40 x 40 x 4 mm. A estrutura foi soldada pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, o eletrodo utilizado foi o E6013. A escolha deste eletrodo se deve ao fato de que pode ser utilizado em aços comuns e possui ótimo acabamento. Possui arco muito suave, soldagem com o mínimo de respingos e fumos. Este eletrodo é indicado para este tipo de serviços em estruturas metálicas.

Os tubos de aço utilizados possui designação comercial VMB 350, a escolha deste tubo foi devido possuir uma grande resistência ao escoamento e a tração, além de ser um aço muito utilizado comercialmente, tornando-o de baixo custo. As propriedades mecânicas dos tubos industriais utilizados neste projeto podem ser consultadas no ANEXO A.

#### **4.3.5 Projeto preliminar do subsistema de fixação do corpo de prova**

Para o subsistema de fixação do corpo de prova foi escolhida a concepção F4, que foi desenvolvida devido o sistema anti rebote utilizado ser manual. O subsistema é constituído de uma placa com dimensões de 210 x 160 x 20 mm (C x W x Hc). A placa possui uma abertura central que possui as dimensões padrões do corpo de prova 100 x 150 mm, onde o corpo de prova é fixado por interferência nessa abertura. Foi realizado um rebaixo 5 mm na placa para que um obstáculo, como por exemplo, uma placa de madeira com as dimensões 120 x 210 mm deslize após o impactador atingir o corpo de prova, evitando assim segundo impacto. A

placa possui ainda quatro parafusos sextavados com 10 mm de diâmetro para a fixação na base do equipamento.

#### **4.3.6 Projeto preliminar do subsistema anti rebote**

O subsistema anti rebote adotado neste projeto é manual conforme a concepção S2, assim este subsistema foi dimensionado em conjunto com o subsistema de fixação do corpo de prova, como pode ser visto em 4.3.6.

#### **4.3.7 Projeto preliminar do subsistema guia deslizamento dos pesos**

Conforme justificado no projeto conceitual, o princípio de funcionamento para o subsistema guia de deslizamento dos pesos escolhido foi G2.

Na literatura estudada não foi encontrada nenhuma especificação para o dimensionamento deste subsistema, ficou a critério do projetista o dimensionamento e os materiais utilizados.

O subsistema é constituído de duas guias de deslizamento fixadas na base e na estrutura superior do equipamento. Neste projeto foram utilizados tubos de aço carbono 1020 com costura, os tubos são ocos e possuem diâmetro externo de 1 polegada e comprimento de 1400 mm. Esta escolha foi devido ao fato que as guias não sofreram grandes esforços mecânicos, apenas o atrito do deslizamento com os pesos, assim esta solução é suficiente para esta aplicação, além de possuir baixo custo.

O deslizamento dos pesos ocorre devido ao acoplamento do tubo com buchas de nylon montadas com interferência nos pesos. A norma ASTM D7136/D7136M-07 não especifica qual o ajuste necessário entre estes componentes. Para a solução desse problema foi consultada a tabela 2.39 de (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1994). E com base nesta tabela foi definido que para esta aplicação pode ser utilizado o ajuste de precisão furo-base H7/h6. A tabela pode ser consultada no ANEXO A.

#### **4.3.8 Projeto preliminar do subsistema de fixação da estrutura da máquina no solo**

A fixação da estrutura da máquina no solo foi definida na concepção através do princípio de solução FE1, que foi o uso de amortecedores de vibrações.

O peso total do equipamento é de 150 kg, assim foi escolhido o vibra-stop mini, que possui uma carga estática por peça de 500 kg, ou seja, para os quatros apoios da máquina é possível suportar um peso de até 2000 kg, o que dá um coeficiente de segurança de 13,3 vezes.

Os amortecedores de vibrações foram parafusados na estrutura do equipamento.

O amortecedor utilizado está ilustrado na figura 4.55, e as especificações do mesmo podem ser consultadas no ANEXO A.



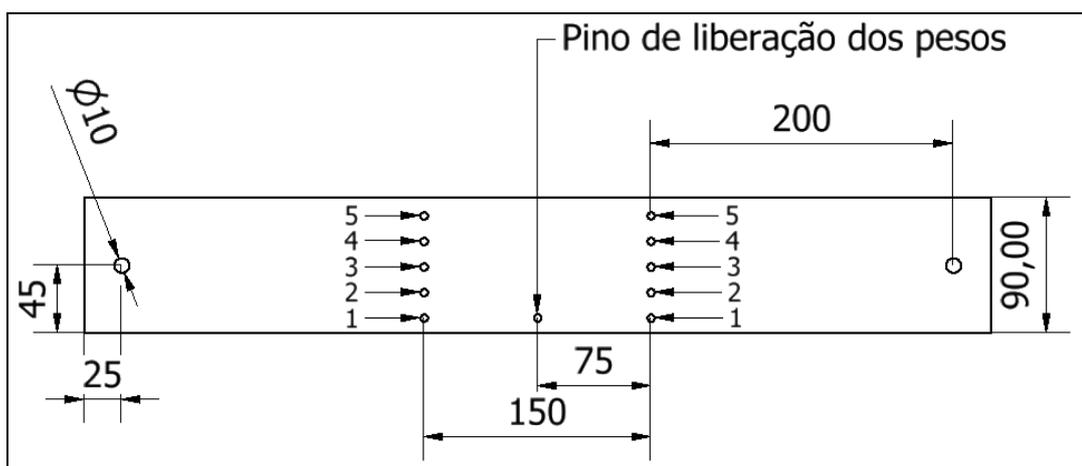
**Figura 4.55 - Amortecedor de vibração selecionado para a fixação da estrutura no solo.**

**Fonte: Disponível em: <<http://www.vibra-stop.com.br/vibra-stop/default.asp>>. Acesso em: 29/06/2013**

#### **4.3.9 Projeto preliminar do subsistema de travamento e liberação do impactador**

O subsistema de travamento e liberação do impactador foi definido no projeto conceitual como princípio de solução T3, é constituído de uma placa selecionadora de pesos e um pino para liberação do impactador, que foi fixada na estrutura da máquina a uma altura de 1,3 metros devido ser definido esta como a altura de impacto.

O dimensionamento da placa selecionadora de pesos foi realizado após o dimensionamento dos pesos de queda, a figura 4.56 mostra o detalhamento do subsistema.



**Figura 4.56 - Placa selecionadora de pesos.**

Na figura 4.56 percebe-se que a placa tem cinco níveis de energia de impacto, designado pelos números 1,2,3,4 e 5, a massa de queda para cada nível de energia de impacto pode ser consultada na tabela 4.13. A liberação da massa para impacto é realizada após o operador do equipamento puxar o pino de liberação dos pesos indicado na figura 4.56. Por exemplo, se o operador do equipamento deseja realizar o ensaio com energia de impacto nível 1, deve-se colocar os pinos de travamento nos números 2, com isso, somente a massa de queda do nível 1 atingirá o corpo de prova, após a liberação dos pesos.

#### **4.3.10 Projeto preliminar do subsistema elevação do conjunto massa/impactador**

Não houve dimensionamento para este subsistema, visto que a elevação do conjunto massa/impactador é realizada manualmente pelo operador do equipamento.

#### **4.3.11 Simulação computacional da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

A simulação de esforços para confirmar a integridade estrutural da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos foi realizada no software AUTODESK INVENTOR 2013 (Licença estudante).

Para estimar a deformação da estrutura da máquina de impacto sofreria durante a realização do ensaio com energia de impacto máxima, ou seja, 96 Joules. Utilizou-se o cálculo da força peso dada pela equação 4.10.

$$F_p = mg \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde:

- Conjunto massa/impactador possui massa total de  $m = 7,5 \text{ kg}$
- Aceleração da gravidade média na superfície da Terra é  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

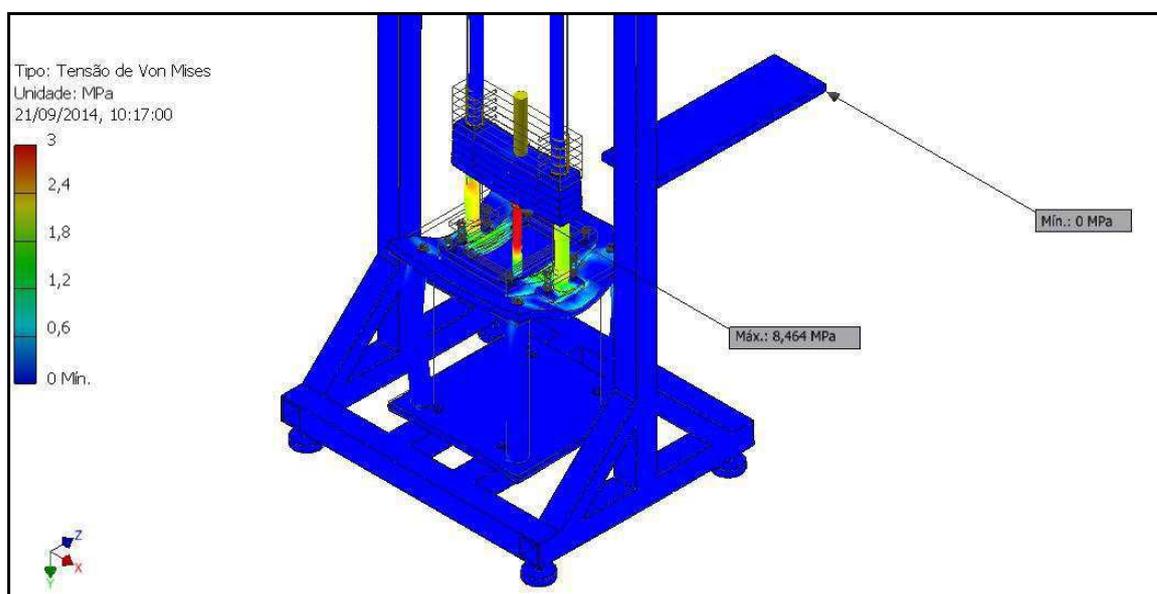
Assim, substituindo esses dados na equação 4.10 tem-se que:

$$F_p = 7,5 * 9,81$$

$$F_p = 73,58 \text{ N}$$

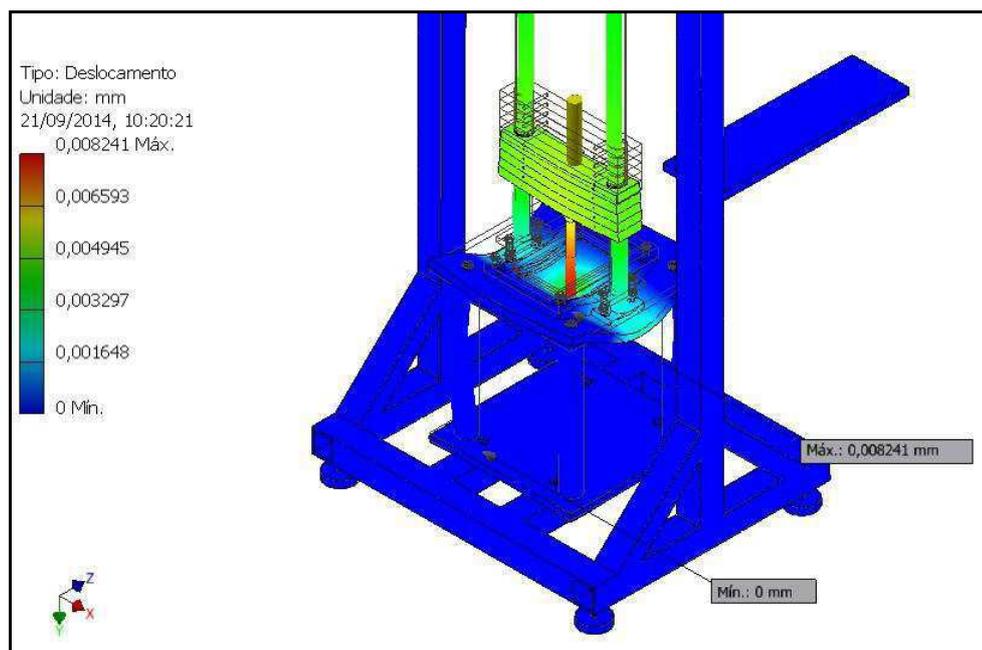
Portanto, a força estática exercida pelo conjunto massa/impactador na base da máquina de impacto por queda de peso foi de 73,58 N. Sabe-se que esta força não é representativa de um ensaio dinâmico como o de queda de peso, assim estimou-se que a força de impacto na estrutura fosse de 1000 N, ou seja, tem-se um coeficiente de segurança de 13,59 vezes ao calculado.

Percebe-se que na figura 4.57 a tensão máxima de Von Mises (8,464 MPa) se deu no impactador, o que mostra que utilizar uma aço que apresente uma tensão limite de escoamento em torno de 210 MPa irá satisfazer as necessidades do projeto, pois a tensão foi relativamente baixa.



**Figura 4.57 - Análise de tensão máxima na máquina de impacto.**

A deformação máxima observada na figura 4.58 foi de 0,007494 mm e ocorreu na base da estrutura da máquina de impacto, o valor da deformação foi muito pequeno, garantindo a confiabilidade estrutural da máquina. Outra observação é que tanto os pinos de travamento quanto os parafusos se comportaram de maneira satisfatória, isto mostra que os componentes foram bem dimensionados.



**Figura 4.58 - Análise da deformação máxima na máquina de impacto.**

#### **4.4 Projeto detalhado de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

O projeto detalhado para fabricação da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos desenvolvido neste projeto de pesquisa que consta com desenhos, dimensões e especificações dos materiais utilizados pode ser consultado no ANEXO B.

#### **4.5 Fabricação de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

Após o projeto preliminar com o dimensionamento de todos os subsistemas e o projeto detalhado com os respectivos desenhos e instruções de fabricação, foi iniciado o processo de fabricação da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

Para a fabricação do equipamento, procuraram-se oficinas mecânicas que pudessem executar o projeto. Após realizar cotação para a execução do serviço e conhecer as instalações de cinco oficinas, foi escolhida a empresa Mecânica Nossa Senhora Abadia, que fica sediada no Distrito dos Mecânicos na cidade de Campina Grande – PB.

Foi repassado para empresa o projeto detalhado do equipamento com todos os desenhos e indicações de fabricação dos subsistemas, onde a empresa se comprometeu a seguir todas as recomendações do projetista.

Durante o período de fabricação, foi realizado o acompanhamento da evolução da fabricação do equipamento na empresa com registro de fotos, com pode ser visto nas figuras a seguir.

A figura 4.59 mostra a estrutura da máquina soldada, junto com a base da máquina e os amortecedores de vibrações utilizados para a fixação no solo. Nesta etapa, faltava a montagem dos subsistemas na estrutura da máquina.



**Figura 4.59 - Estrutura da máquina soldada, base e os amortecedores de vibrações.**

A figura 4.60 mostra a foto do impactador usinado em um torno mecânico a partir de uma barra de aço SAE 4340. O impactador foi fixado no peso de 1 kg, onde um parafuso foi colocado como elemento de união entre os componentes.



**Figura 4.60 - Impactador de ponta semiesférica em aço SAE 4340.**

A figura 4.61 mostra uma foto da placa selecionadora de pesos com os pesos de impacto. A fabricação destes componentes foi a partir de chapas de aço carbono 1020 que foram seccionadas e furadas de acordo com o projeto detalhado.



**Figura 4.61 - Placa selecionadora de pesos com os pesos de impacto.**

A figura 4.62 mostra a foto da estrutura da máquina, onde o processo de fabricação se deu a partir do seccionamento dos tubos em uma máquina de serrar de fita e depois foram soldados pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo E6013.



**Figura 4.62 - Estrutura da máquina soldada.**

A figura 4.63 mostra a foto dos tubos cilíndricos ocos de 1 polegada de diâmetro utilizados como guias de deslizamento. Os tubos foram seccionados na máquina de serra de fita e montados na base e na parte superior da estrutura da máquina.



**Figura 4.63 - Tubos cilíndricos utilizados como guias de deslizamento dos pesos.**

A figura 4.64 mostra a foto da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos fabricada com todos os subsistemas especificados e apta para a realização dos ensaios.



**Figura 4.64 - Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos desenvolvida.**

#### **4.6 Testes da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

Após a fabricação da máquina de impacto por queda de peso, foi iniciada a fase de testes do equipamento, para que pudesse verificar o funcionamento do equipamento e realizar os ajustes necessários caso ocorresse algum problema que não foi previsto no projeto.

Para a realização dos ensaios foi necessário seguir alguns passos, como a preparação da máquina, corte e ajustes das placas ensaiadas. Esses passos tornaram-se imprescindíveis ao longo dos testes a fim de se obter um resultado confiável, satisfatório e comparável com os da literatura.

A figura 4.65 mostra a máquina de impacto por queda de peso utilizada nos ensaios.



**Figura 4.65 - Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.**

Os ensaios realizados tiveram as seguintes configurações:

- 5 níveis de energia de impacto: 20, 39, 58, 77 e 96 J;
- Altura de queda dos pesos de 1,3 metros;
- Impactador de ponta semiesférica com diâmetro de 16 mm e dureza 57 HRC;

Na preparação para realização do teste de impacto por queda de peso em placas compósitas foi necessária a limpeza e lubrificação das estruturas (mecanismo de guias) e o ajuste dos amortecedores de vibrações da base de sustentação da máquina para que a mesma ficasse nivelado com o solo.

Baere, Paepegem e Degrieck (2007), Romariz, (2008) e Silva et al. (2011) afirmam que no ensaio de impacto por queda de peso pode ocorrer que o impactador atinja o corpo de prova varias vezes, causando múltiplos impactos, e com isso um dano excessivo na placa que não é representativo de um único impacto, assim para se evitar esse segundo impacto um obstáculo (placa de madeira) foi colocado manualmente entre a ponta do impactador e a placa impactada após a ocorrência do primeiro impacto.

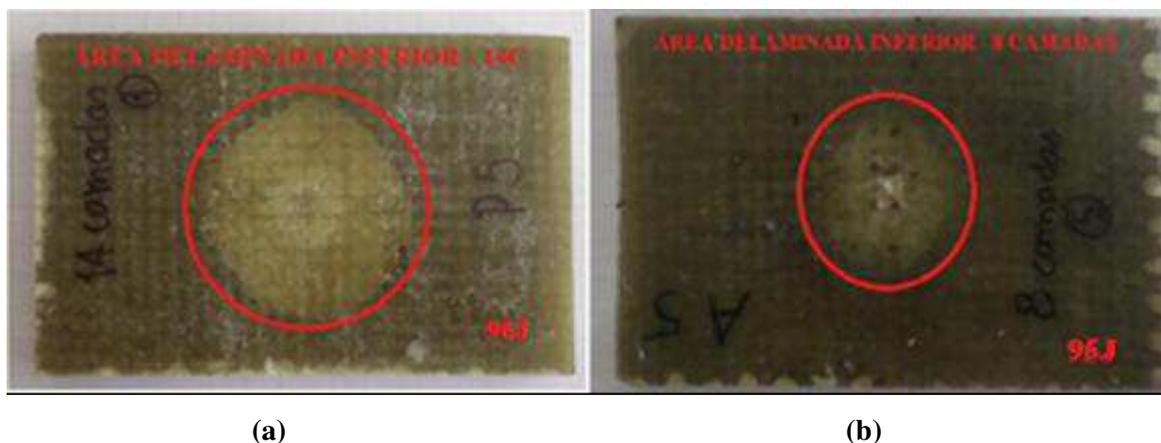
#### 4.6.1 Análise do dano por delaminação nas placas compósitas através do software IMAGE J

O desenvolvimento desse trabalho permitiu avaliar superficialmente os danos causados às placas de fibra de vidro, comparar os resultados obtidos nas diversas placas com cada nível de energia disponível e com isso limitar o campo de trabalho da pesquisa.

Vale ressaltar que os materiais compósitos por sua própria natureza são anisotrópicos, ou seja, a organização, fração volumétrica e distribuição das fibras, bem como a orientação do carregamento possuem influencia significativa nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

Foram realizados ensaios de impacto por queda de peso nas placas P8, P10, P12 e P14, sendo que cada placa sofreu uma energia de impacto de 20, 39, 58, 77 e 96 J.

Após os ensaios, as placas foram fotografadas e analisadas no software IMAGE J. A figura 4.66 mostra o resultado do dano causado pela energia de impacto de 96 J nas placas P8 e P14.

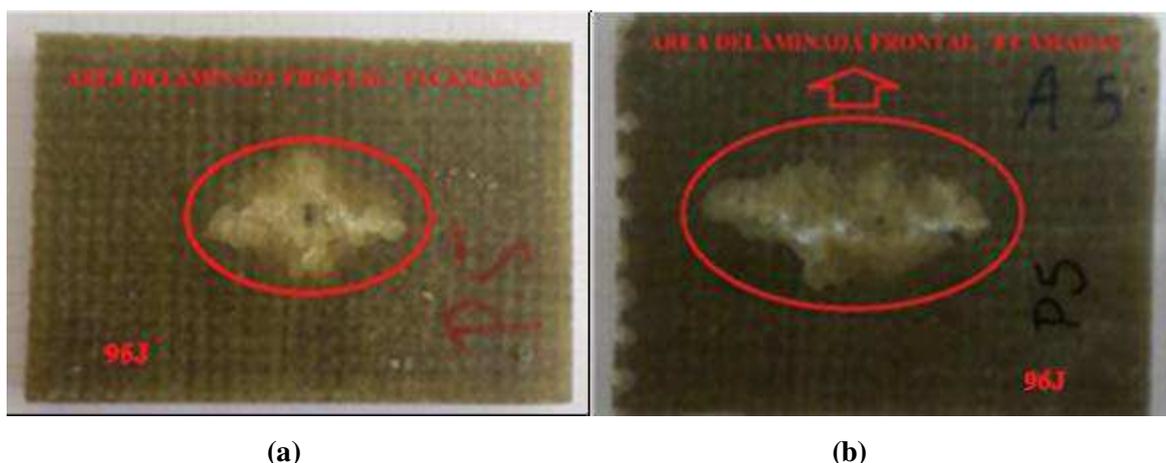


**Figura 4.66 - Área delaminada inferior para energia de impacto de 96J (a) P14 (b) P8.**

Percebe-se na figura 4.66 que a área delaminada no lado oposto ao impacto nos ensaios com a energia de impacto de 96J, a área do dano nas placas com 8 e 14 camadas foi de 1556,25 mm<sup>2</sup> e 3423,74 mm<sup>2</sup> respectivamente. Embora a área do dano no lado oposto do impacto da placa com 14 camadas tenha sido mais que o dobro da placa com 8 camadas, o impacto causou maior dano na placa de 8 camadas, que teve o rompimento das fibras,

enquanto que a placa com 14 camadas absorveu a mesma energia de impacto sem maiores danos a estrutura do compósito.

A figura 4.67 mostra a foto da área delaminada frontal para o ensaio realizado com energia de impacto de 96J, as placas tiveram um dano de perfil estelar e não é possível realizar uma aproximação satisfatória com o uso do software IMAGE J, visto que não existe nenhuma figura geométrica que consiga uma aproximação eficaz da área do dano.



**Figura 4.67 - Área delaminada frontal para energia de impacto de 96J (a) P14. (b) P8.**

As tabelas 4.14 a 4.17 mostram os resultados obtidos nos ensaios.

**Tabela 4.14 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P8.**

<b>Compósito de Fibra de Vidro laminado com 8 camadas (P8)</b>		
<b>Energia de Impacto (J)</b>	<b>Área do dano na placa</b>	
	<b>Lado impacto (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Lado oposto ao impacto (mm<sup>2</sup>)</b>
20	193,58	319,64
39	102,21	252,89
58	477,05	727,48
77	1300,57	1096,87
96	1844,17	1556,25

Tabela 4.15 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P10.

<b>Compósito de Fibra de Vidro laminado com 10 camadas (P10)</b>		
<b>Energia de Impacto (J)</b>	<b>Área do dano na placa</b>	
	<b>Lado impacto (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Lado oposto ao impacto (mm<sup>2</sup>)</b>
20	74,80	277,26
39	71,25	326,00
58	329,93	684,26
77	551,13	877,79
96	1819,54	2205,81

Tabela 4.16 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P12.

<b>Compósito de Fibra de Vidro laminado com 12 camadas (P12)</b>		
<b>Energia de Impacto (J)</b>	<b>Área do dano na placa</b>	
	<b>Lado impacto (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Lado oposto ao impacto (mm<sup>2</sup>)</b>
20	47,85	251,11
39	47,11	184,70
58	634,46	1533,45
77	805,79	1963,59
96	1536,04	3167,37

Tabela 4.17 - Ensaio de impacto por queda de peso nas placas P14.

<b>Compósito de Fibra de Vidro laminado com 14 camadas (P14)</b>		
<b>Energia de Impacto (J)</b>	<b>Área do dano na placa</b>	
	<b>Lado impacto (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Lado oposto ao impacto (mm<sup>2</sup>)</b>
20	34,26	291,81
39	45,86	214,57
58	91,21	238,57
77	94,52	271,66
96	1366,47	3423,74

Através dos ensaios realizados foi possível criar gráficos da área do dano na placa em função da energia de impacto, sendo que a área do dano foi calculada nas duas faces da placa, ou seja, o dano no lado do impacto e o dano no lado oposto ao impacto, como pode-se visualizar nas figuras de 4.68 a 4.71 a seguir.

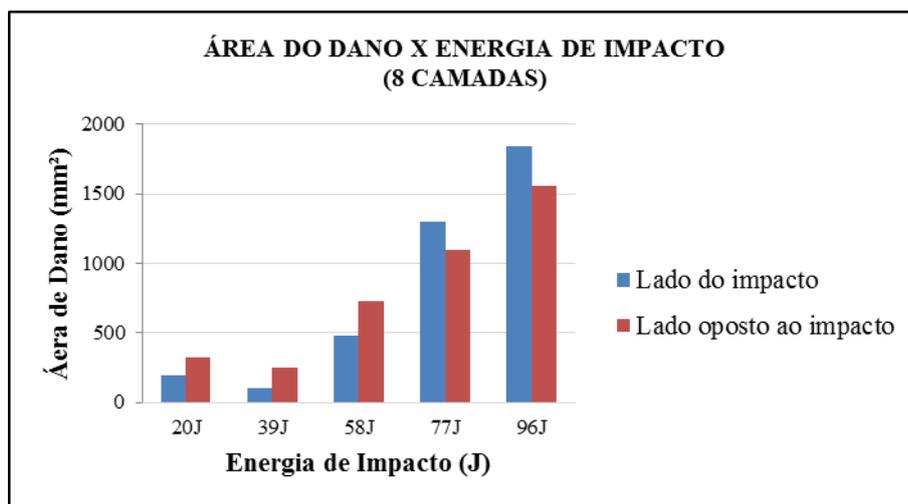


Figura 4.68 - Área do dano em função da energia de impacto nas placas P8.

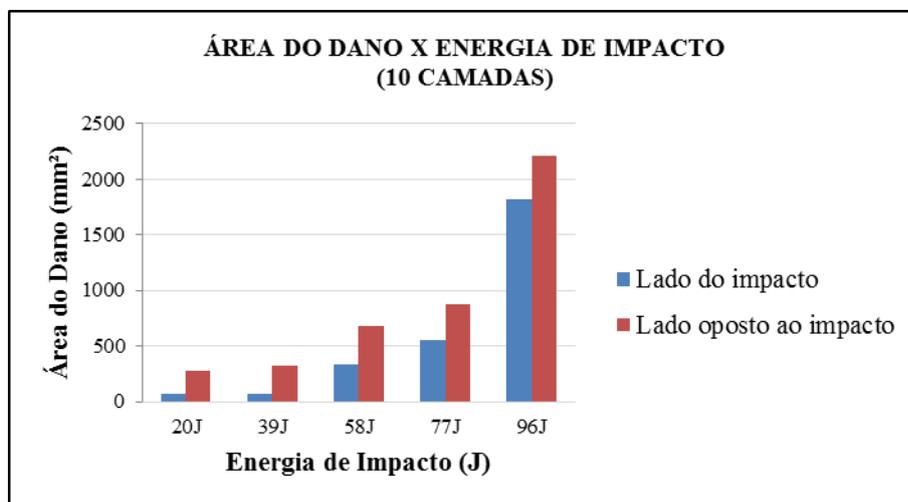
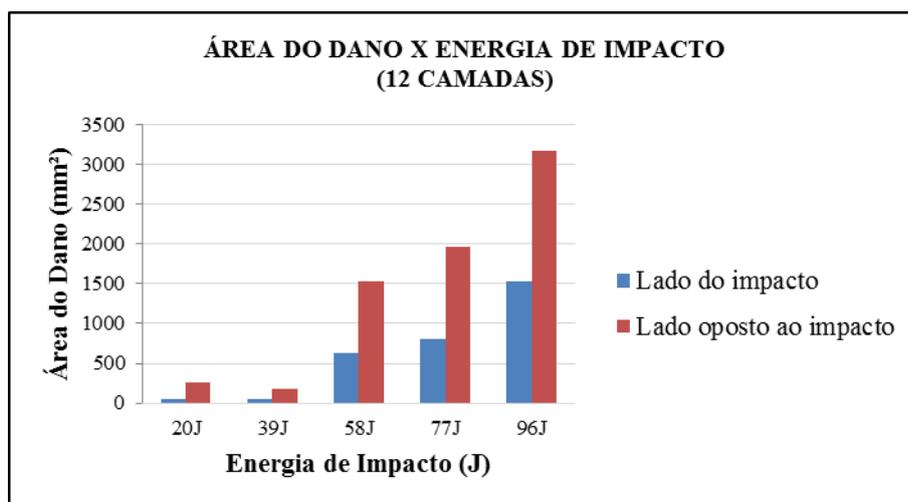
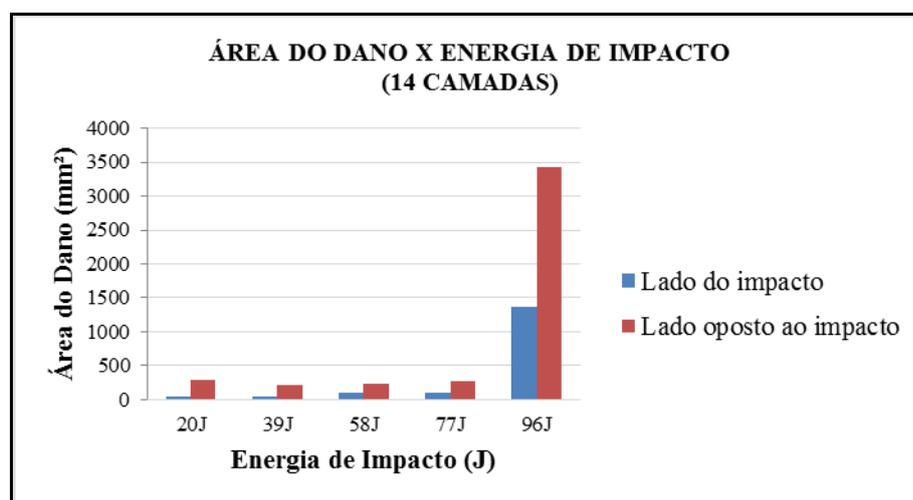


Figura 4.69 - Área do dano em função da energia de impacto nas placas P10.



**Figura 4.70 - Área do dano em função da energia de impacto nas placas P12.**



**Figura 4.71 - Área do dano em função da energia de impacto nas placas P14.**

A partir dos gráficos obtidos, notou-se uma peculiaridade em comum nas placas P12 e P14: ambas não apresentaram resultados significativos em relação aos danos causados se comparado as placas de 8 e 10 camadas. Podemos comprovar isso nas figuras 4.70 e 4.71.

A partir da análise dos resultados expostos, foi possível limitar o campo de trabalho da pesquisa na investigação do dano por impacto para placas compósitas de fibra de vidro, sendo que os danos mais significativos foram observados nos ensaios em placas P8 e P10, nas quais se encaixam placas testadas com até 7 mm de espessura (vide tabela 4.14 e 4.15).

#### 4.6.2 Análise da velocidade de impacto nos ensaios através do software TRACKER

Os ensaios de impacto por queda de peso realizados foram filmados em uma câmera digital de 16 MP.

O método da análise do vídeo calcula a velocidade a partir do software Tracker, e de posse desse parâmetro é possível calcular a energia de impacto a partir da equação 4.11:

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} m V_{\text{impacto}}^2 \quad \text{Equação 4.11}$$

O método teórico utiliza as seguintes equações para o cálculo da velocidade de impacto e da energia de impacto.

$$V_{\text{impacto}} = \sqrt{2gH} \quad \text{Equação 4.12}$$

$$E_{\text{impacto}} = mgH \quad \text{Equação 4.13}$$

Um dos vídeos analisados no software foi o ensaio de impacto por queda de peso com massa de impacto de 1,5 kg e altura de queda de 1,3 metros.

A partir desses dados, foi criada a tabela 4.18, comparando o método teórico e o método da análise de vídeo, onde foi calculado o erro percentual entre os dois métodos. Percebe-se que erro percentual entre os dois métodos foi de 3,96% para velocidade de impacto e de 7,79% para a energia de impacto.

**Tabela 4.18 - Comparação do método teórico e da análise de vídeo da velocidade e da energia de impacto**

Parâmetro	Método Teórico	Método da Análise do Vídeo	Erro (%)
V(m/s)	5,05	4,85	3,96
E(J)	19,13	17,64	7,79

#### **4.7 Melhorias na máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

Após a realização dos testes, foi verificada a necessidade de melhorias na máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos que serão detalhadas a seguir.

##### **4.7.1 Desenvolvimento do subsistema anti rebote e da instrumentação da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**

O desenvolvimento do subsistema anti rebote e da instrumentação da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos foi realizado em conjunto com a empresa Suna Engenharia. Nesta fase, coube ao projetista realizar a especificação técnica do sistema eletrônico e a empresa Suna Engenharia desenvolver o hardware e o software que atendesse a especificação técnica requerida.

O subsistema anti rebote desenvolvido para evitar o segundo impacto no corpo de prova era manual, ou seja, era necessária uma interferência humana para que esse subsistema funcionasse, o que muitas vezes causava perda dos corpos de prova, como por exemplo, erros devido o impacto ser muito rápido e o operador não possuir a agilidade suficiente para evitar o segundo impacto no corpo de prova.

Outro inconveniente do projeto era que a máquina não possuía instrumentação adequada para fazer as diversas medições características desse tipo de ensaio, limitando a análise dos corpos de prova ensaiados ao dano causado nos mesmos. Assim, com a instrumentação é possível gerar gráficos, por exemplo, da força de impacto ou da deformação ao longo do tempo e assim visualizar de fato o que ocorre com o corpo de prova durante o período de ensaio.

A partir dessa condição foi definido que era necessária a instrumentação e o desenvolvimento de um subsistema anti rebote eletromecânico que possibilitará a medição das variáveis de interesse durante o ensaio, além de permitir que o mesmo transcorra sem interferência humana, dando assim, maior confiabilidade aos ensaios.

Para o desenvolvimento da instrumentação da máquina de impacto foram tomados como base as normas ASTM D7136/D7136M-12 e ASTM D3763-10, além de dois trabalhos acadêmicos de (Ghelli e Minak, 2011) e (Minak e Ghelli, 2006).

Após o estudo desse material, foi verificado que era possível mensurar as seguintes variáveis:

- Força de contato durante o impacto;
- Deformação do corpo de prova durante o impacto;
- Energia absorvida durante o impacto;
- Velocidade no instante do impacto e velocidade de recuo.

A norma ASTM D3763-10 afirma que para a instrumentação de uma máquina de impacto por queda de peso é necessário de um medidor de força e um aparelho para registro dos dados. O medidor de força pode ser qualquer transdutor que possua os requisitos de desempenho para medição de força dinâmica, isto inclui, mas não está limitado a transdutores de força como, por exemplo, extensômetro ou piezoelétricos ou a utilização de acelerômetros. O aparelho para registro dos dados pode ser qualquer dispositivo de registro que atenda aos requisitos de aquisição de dados dinâmico, esses aparelhos podem ser osciloscópios, registradores de dados, sistemas de aquisição de dados através de computador, ou outro dispositivo que atenda os requisitos.

Para a instrumentação e desenvolvimento do subsistema anti rebote, após o estudo das normas e dos trabalhos científicos adotados como referência foi definido que os mesmos possuiriam um sistema de aquisição de dados, um transdutor de aceleração, um medidor de velocidade, um software de processamento e um dispositivo mecânico anti rebote, cujos requisitos técnicos podem ser vistos a seguir:

- Sistema de aquisição
  - Elevada frequência de Aquisição de dados;
  - Estável;
  - Arquivo de saída legível pelo Windows;
  - Realize monitoramento de todos os componentes envolvidos no ensaio;
  - Interaja com o usuário;
  - Permitir a realização dos ensaios para as várias massas;
  - Realize testes em todos os componentes antes de iniciar o ensaio;
  - Baixo custo.

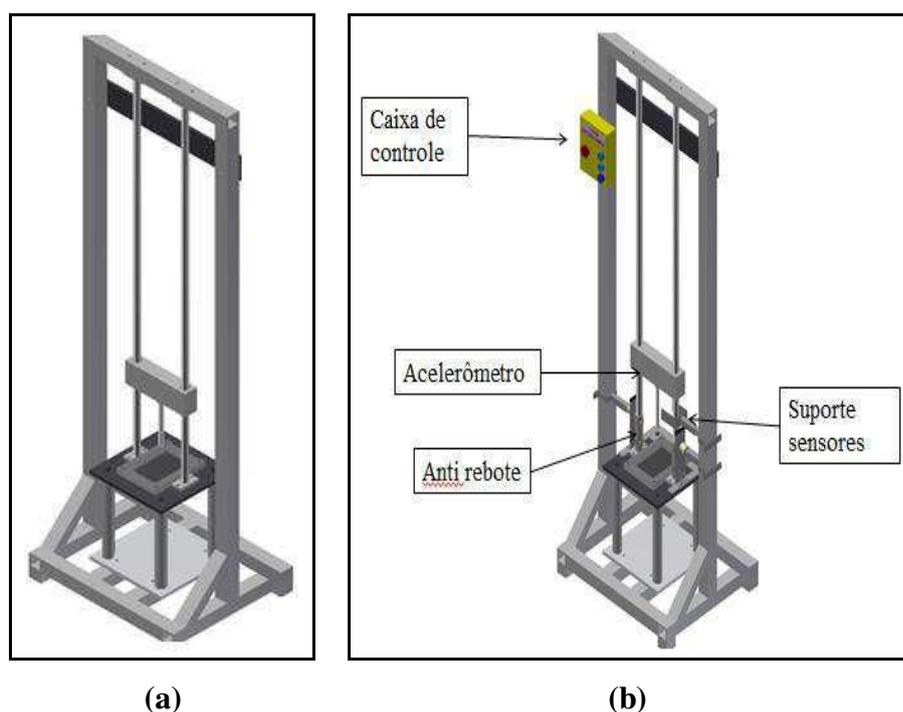
- Transdutor de aceleração
  - Altas frequências naturais;
  - Alta taxa de aquisição;
  - Ser fixado o mais próximo possível da ponta do impactador;
  - Ser fixado de maneira a suportar altos impactos;
  - Baixo custo.
  
- Medidor de velocidade
  - Trabalhar em ambiente aberto;
  - Estar localizado o mais próximo possível da superfície da corpo de prova;
  - Medir tanto a velocidade de avanço como a de retorno;
  - Erro mínimo devido ao impacto.
  
- Software de processamento
  - Armazenar e tratar os dados gerados pelos hardwares;
  - Exportar os dados para o software Excel para o usuário plotar os gráficos necessários.
  
- Anti-Rebote
  - Acionamento rápido (entre o 1º e o 2º impacto);
  - Acionado quando houver irregularidades no ensaio (segurança do operador e da corpo de prova);
  - Sistema “naturalmente travado”;
  - Alta resistência (impacto) e durabilidade;
  - Ser um “acessório” a máquina (colocação sem desmontagem).

Após a compreensão dos requisitos técnicos, foram definidas as especificações técnicas para o desenvolvimento da instrumentação e do subsistema anti rebote automatizado.

- Corpo de prova
  - Espessura: 2 – 12 mm;
  - Tempo mínimo de impacto: 0,4ms.

- Máquina
  - Altura: 1.3 m;
  - Massa máxima: 7.5 Kg;
  - Energia máxima de impacto 96 J.
  
- Sistema de Aquisição
  - Armazenas pelo menos 1000 pontos (7.6 do ASTM D7136/D7136M-12);
  - Frequência de aquisição  $\geq 20$  kHz;
  - Escrever arquivo legível pelo Microsoft Windows.
  
- Acelerômetro
  - 95% da massa do impactador acima do local de posicionamento (7.3.3 do ASTM D7136/D7136M-12);
  - Leitura de dados a uma frequência  $\geq 20$ kHz;
  - Frequência natural superior a 6kHz.
  
- Sensor de velocidade
  - Posicionado 3 a 6 mm acima do corpo de prova (7.3.4 do ASTM D7136/D7136M-12 );
  - Precisão 5 mm/s.
  
- Anti-rebote
  - Resistir a um impacto de 20 J (~30 cm) no segundo impacto;
  - Acionamento em 200 ms.

Após a especificação técnica da instrumentação e do sistema anti rebote automatizado foi realizada a nova concepção da máquina de impacto por queda de peso com as modificações a serem realizadas, como pode-se observar na figura 4.72.



**Figura 4.72 - Máquina de impacto por queda de peso. (a) sem instrumentação (b) com instrumentação e sistema anti rebote.**

#### 4.7.2 Cálculos para determinação das variáveis de interesse

- Cálculo da velocidade final teórico é dado pela equação 4.12:

$$V_{\text{impacto}} = \sqrt{2gH}$$

- Cálculo da energia de impacto teórico é dado pela equação 4.13:

$$E_{\text{impacto}} = mgH$$

- Cálculo da velocidade de impacto é dada pela seguinte equação:

$$V_i = \frac{w_{12}}{t_2 - t_1} + g \left( t_i - \frac{(t_1 + t_2)}{2} \right) \quad \text{Equação 4.14}$$

Onde:

$V_i$  – Velocidade de impacto, (m/s)

$W_{12}$  – Distância entre os dois sensores de posição, (m/s)

$t_1$  – Tempo 1, (s)

$t_2$  – Tempo 2, (s)

$g$  – Aceleração da gravidade, (m/s<sup>2</sup>)

$t_i$  – Tempo na hora do impacto, (s)

- Deformação do corpo de prova durante o ensaio

$$\delta(t) = \delta_i + V_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt$$

$$\delta(t) = \delta_i + V_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t a(t) dt \right) dt$$

Equação 4.15

$\delta(t)$  – Deformação do impactador no instante  $t$ , (m)

$\delta_i$  – Deformação de referência no instante  $t = 0$ , (m)

- Energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto

$$E_a(t) = \frac{m(v_i^2 - v(t)^2)}{2} + mg \delta(t)$$

Equação 4.16

$E_a(t)$  – Energia absorvida no tempo  $t$ , (J)

- Energia de impacto

$$E_i = \frac{mV_i^2}{2}$$

Equação 4.17

As equações 4.14 a 4.17 podem ser consultadas na norma ASTM D7136/D7136M-07.

### 4.7.3 Princípio de funcionamento da instrumentação e do subsistema anti rebote

1. Primeiramente o operador seleciona a massa de impacto que pode ser 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 ou 7,5kg a instrumentação checa todos os componentes do sistema (acelerômetro, sensores, arduíno, eletroímã, etc ).
2. Após este procedimento os eletroímãs do sistema anti rebote são energizados e o operador deve acionar o braço do anti rebote nos eletroímã, que ficaram unidos;
3. O operador está apto a soltar o pino de liberação da massa de impacto;
4. A massa de impacto cai e passa por um fotosensor infravermelho que envia um sinal elétrico para o arduíno. O arduíno por sua vez, entende esse comando e desliga a energia dos eletroímãs, e consequente
5. mente o braço do anti rebote volta a sua posição original evitando assim o segundo impacto;
6. Após o impactador passar pelo primeiro fotosensor, o arduíno passa a registrar um tempo T1, logo abaixo tem-se um segundo fotosensor, que quando o impactador passa por ele é registrado um tempo T2. Assim, com a variação do deslocamento e do tempo é possível calcular a velocidade de impacto;
7. Após o impactador passar pelo segundo fotosensor o arduíno passa a adquirir os dados do acelerômetro durante o impacto do impactador no corpo de prova e enviar estes dados para um software no computador desenvolvido pela linguagem de programação C++. O software é responsável por tratar esses dados e calcular os parâmetros de força de impacto, velocidade de impacto, deformação e energia absorvida pelo corpo de prova ao longo do tempo.
8. De posse dos parâmetros mencionados no item 6, é possível exportar a planilha do software de tratamento de dados para o software Excel, e assim o usuário pode plotar os gráficos necessários para análise do dano no corpo de prova.

### 4.7.4 Seleção do acelerômetro

Para selecionar o acelerômetro era preciso saber qual a aceleração “g” que o mesmo devia possuir. Para definir esta variável, utilizou-se a equação 4.18, onde o impulso da força (I) que atinge o corpo de prova deve ser igual a quantidade de movimento (Q).

$$I = Q \quad \text{Equação 4.18}$$

$$F\Delta t = mv$$

$$ma\Delta t = mv$$

$$a = \frac{v}{\Delta t} \quad \text{Equação 4.19}$$

Para definir a aceleração em “g”, basta dividir a equação 4.19 pela aceleração da gravidade  $g=9,81\text{m/s}^2$ , portanto a aceleração “g” é dada pela seguinte equação:

$$a = \frac{v}{g\Delta t} \quad \text{Equação 4.20}$$

Para  $v=5,05$  m/s sendo esta a velocidade teórica calculada pela equação  $V_{\text{impacto}} = \sqrt{2gH}$  com altura de queda  $H = 1,3$  m e  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>. O onde o tempo foi estimado  $\Delta t=1\text{ms}$ , a partir de trabalhos acadêmicos estudados no projeto informacional, tem-se que a partir da equação 4.20:

$$a = \frac{5,05}{9,81 * 0,001}$$

$$a = 515 \text{ g's}$$

Com isso, foi realizada uma pesquisa de mercado para a aquisição de um acelerômetro com as seguintes especificações de acordo com a norma ASTM D3763-10:

- Leitura de dados a uma frequência  $\geq 20\text{kHz}$ ;
- Frequência natural superior a  $6\text{kHz}$ ;
- Aceleração superior a  $515 \text{ g's}$ ;
- Baixo custo.

Após uma ampla pesquisa de mercado, uma empresa americana propôs-se a fornecer um acelerômetro com as seguintes especificações:

- Leitura de dados a uma frequência máxima de 10kHz;
- Frequência natural superior a 35khz
- Tensão máxima de 30 volts;
- Aceleração máxima de 3000 g's;
- Baixo custo.

Infelizmente não foi possível a aquisição de um acelerômetro com leitura de dados a uma frequência superior da 20kHz, devido ao custo elevado desse componente. Assim, era sabido que precisão dos resultados poderia ser afetada.

O acelerômetro escolhido foi o modelo 3055B1 da empresa DYTRAN INSTRUMENTS, onde todas as especificações e desenhos do mesmo encontram-se no ANEXO C.

Além dos parâmetros já mencionados na especificação técnica do acelerômetro que são a frequência de leitura de dados e a frequência natural, outros dois parâmetros são muito importantes para a calibração do acelerômetro para a realização dos ensaios, ou seja, a tensão e a aceleração g.

Para a calibração da tensão e a aceleração g do acelerômetro foram realizados ensaios com a utilização de um osciloscópio, onde foi possível obter a variação da tensão do acelerômetro em função do nível de energia de impacto, a figura 4.73 mostra a tela do osciloscópio em um dos ensaios realizado.

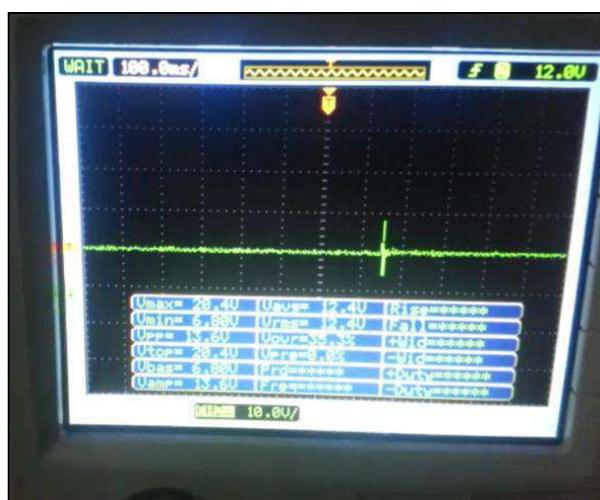
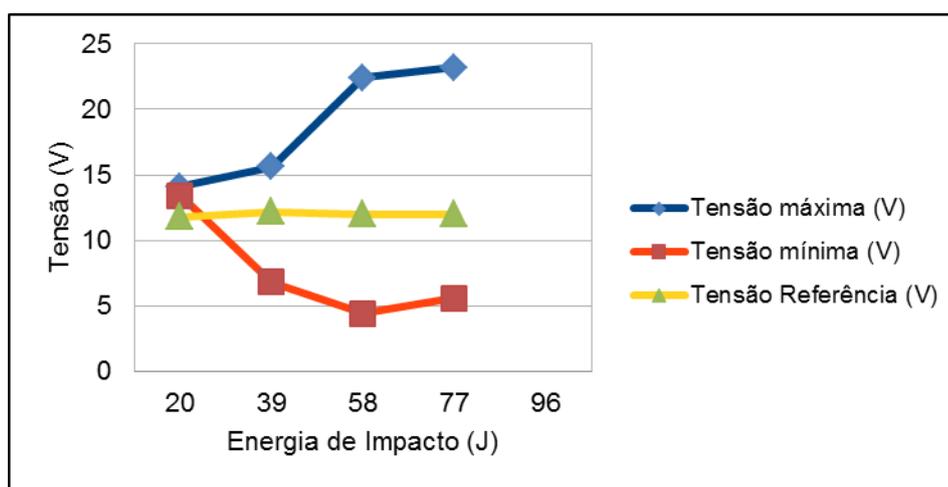


Figura 4.73 - Osciloscópio utilizado nos ensaios.

A partir dos resultados obtidos da tensão no osciloscópio foi possível criar o gráfico da figura 4.74. O gráfico possui três variáveis, a tensão de referência do osciloscópio e as tensões máximas e mínimas que foram obtidas nos ensaios de impacto. Percebe-se que a tensão máxima não ultrapassa 25 volts, parâmetro esse importante, pois o acelerômetro selecionado possui tensão máxima de 30 volts. Assim, percebe-se que o acelerômetro é capaz de suportar a tensão dos ensaios sem maiores problemas.

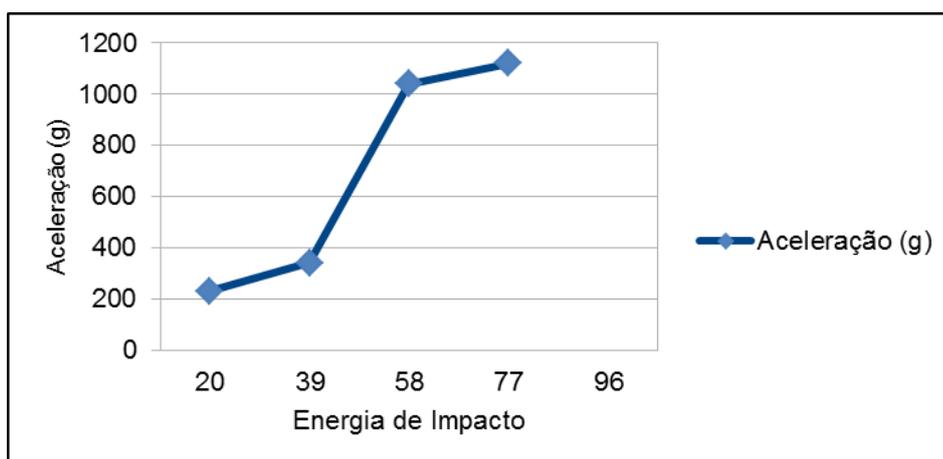


**Figura 4.74 - Gráfico para definição da tensão.**

Para o cálculo da aceleração (g) foi adotado a equação a seguir:

$$Aceleração (g) = \frac{Tensão_{máxima} - Tensão_{referência}}{Sensibilidade_{acelerômetro}} \quad \text{Equação 4.21}$$

Onde, os dados da tensão máxima e da tensão de referência foram obtidos através dos ensaios realizados com o osciloscópio. Já o valor da sensibilidade do acelerômetro utilizado foi de 10 mV/g, esse valor foi obtido no manual do acelerômetro. A partir desses dados foi possível criar um gráfico da aceleração (g) em função da energia de impacto, como pode ser visto na figura 4.75.



**Figura 4.75 - Gráfico para definição da aceleração g.**

O gráfico mostra que para um acelerômetro com sensibilidade de 10 mV/g, o valor máximo da aceleração (g) não ultrapassa 1200 g's, e como o acelerômetro selecionado possui um valor máximo de 3000 g's é possível realizar os ensaios com resultados satisfatórios.

#### **4.7.5 Seleção do medidor de velocidade**

Foi utilizado como medidor de velocidade fotosensores composto de um led emissor de infravermelho e um fototransistor como receptor.

O sistema funciona com dois fotosensores, onde o led emissor envia uma luz infravermelha para o receptor fototransistor. Quando o impactador ultrapassa pelo primeiro fotosensor, o arduíno passa a registrar um tempo T1; abaixo do primeiro fotosensor existe um segundo fotosensor a uma distancia linear de 20 mm, que quando o impactador passa por ele é registrado um tempo T2. Assim, com a variação do deslocamento e do tempo é possível calcular a velocidade de impacto no corpo de prova.

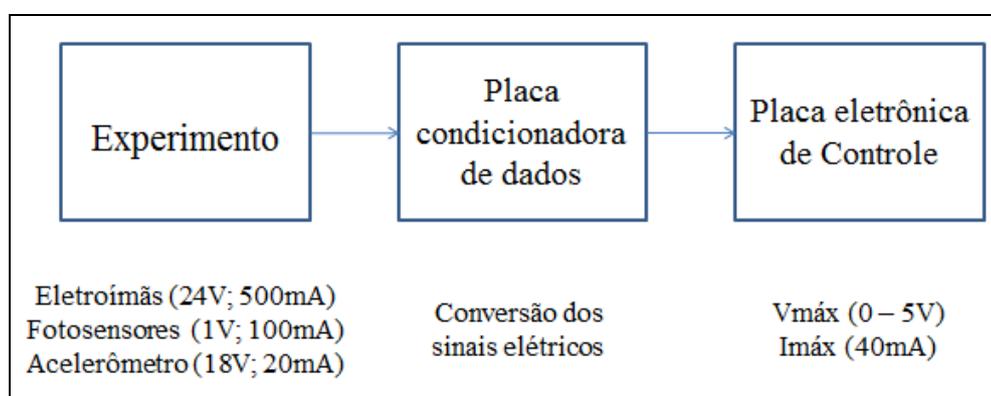
#### **4.7.6 Seleção dos eletroímãs**

Os eletroímãs são responsáveis por manter o braço do subsistema anti rebote eletromecânico em uma posição fora da trajetória do impactador, para que o mesmo atinja o corpo de prova. Para o dimensionamento dos eletroímãs procurou-se no mercado um que tivesse uma força de atração de 100 N, ou seja, esse eletroímã é capaz de levantar uma carga de até 10 kg, bem superior ao requisitado pelo braço do anti rebote. Assim, selecionou-se o eletroímã de fabricante chinês com a seguinte especificação a seguir:

- Modelo: ZYE1-P34 / 18
- Aplicações: linha de montagem, máquinas de triagem, braço mecânico, instalação experimental, etc
- Tensão de entrada: 12V CC
- Corrente: 0,42 A
- Consumo de energia: 6W
- Força de retenção: 100N / 10 kg
- Diâmetro: 34 milímetros
- Altura: 18 milímetros
- Material: Metal
- Cor: prateado

#### 4.7.7 Seleção do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados era constituído de uma placa condicionadora de dados e uma placa eletrônica de controle, que nesse caso foi utilizado uma placa de arduíno. A placa condicionadora é de suma importância para o sistema de aquisição de dados, pois é responsável por receber sinais elétricos de tensão e corrente dos componentes da instrumentação e transformá-los para que a placa eletrônica de controle possa processar esses sinais, pois a placa eletrônica utilizada suporta valores de tensão entre de 0 a 5 volts e corrente máxima de 40 mA. A figura 4.76 mostra como funciona esse sistema.



**Figura 4.76 - Funcionamento do sistema de aquisição de dados.**

A placa eletrônica de controle utilizada foi o Arduíno que é uma plataforma de hardware e software livres que simplifica a criação e prototipagem de projetos de eletrônica. Com o arduíno é possível controlar LEDs, motores, eletrodomésticos, comunicar-se com computadores através de entradas USB's, smartphones, carros, dentre muitas outras possibilidades. O controle pode ser feito utilizando uma linguagem de programação baseada em C ou C++, por exemplo.

O arduíno utilizado como placa eletrônica de controle possui a seguinte especificação:

- Modelo: Arduíno Uno
- Microcontrolador: ATmega328
- Tensão de funcionamento: 5V
- Tensão de entrada (recomendado): 7-12V
- Tensão de entrada (limites): 6-20V
- Pinos digitais I / O: 14
- Pinos de entrada analógica: 6
- Corrente CC por pino I / O: 40 mA
- Corrente CC para pino de 3.3V: 50 mA
- Memória Flash: 32 KB
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Frequência de aquisição: 16 MHz

Portanto, o sistema de aquisição de dados selecionado possui todos os requisitos técnicos que a norma ASTM D7136/D7136M-12 sugere. Infelizmente não foi possível armazenar pelo menos 1000 pontos, pois apesar do arduíno ser capaz de realizar este trabalho, o acelerômetro selecionado só permite armazenar 600 pontos, com isso, tem-se uma perda de precisão nos resultados dos ensaios realizados.

#### 4.7.8 Seleção do software de processamento

O software de processamento tem a função de armazenar e tratar os dados gerados pelos hardwares, para esta função foi desenvolvido um software com o uso da linguagem de programação C++, que é compatível com o hardware arduíno da placa de controle eletrônico.

O software calcula e armazena em formato de tabelas os parâmetros de força de impacto, velocidade de impacto, deformação e energia absorvida pelo corpo de prova ao longo do tempo. Com isso, é possível exportar os dados para o software Excel, onde o usuário pode plotar os gráficos necessários para a análise dos ensaios realizados.

#### 4.7.9 Anti rebote eletromecânico

Em paralelo ao desenvolvimento da instrumentação da máquina de impacto por queda de peso, foi desenvolvido o sistema anti rebote eletromecânico que funcionaria em conjunto com a instrumentação.

O sistema é constituído de uma base de aço para fixação do braço anti rebote, suporte com eletroímãs, suporte com fotosensores, e batentes de proteção do acelerômetro. Os desenhos técnicos da concepção podem ser consultados no ANEXO C. A figura 4.77 mostra o sistema anti rebote desenvolvida.

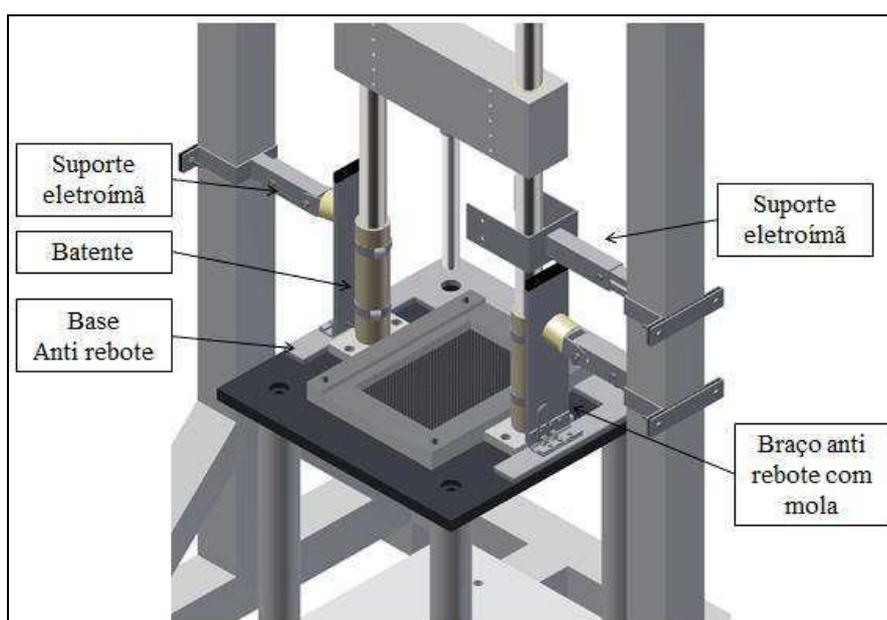
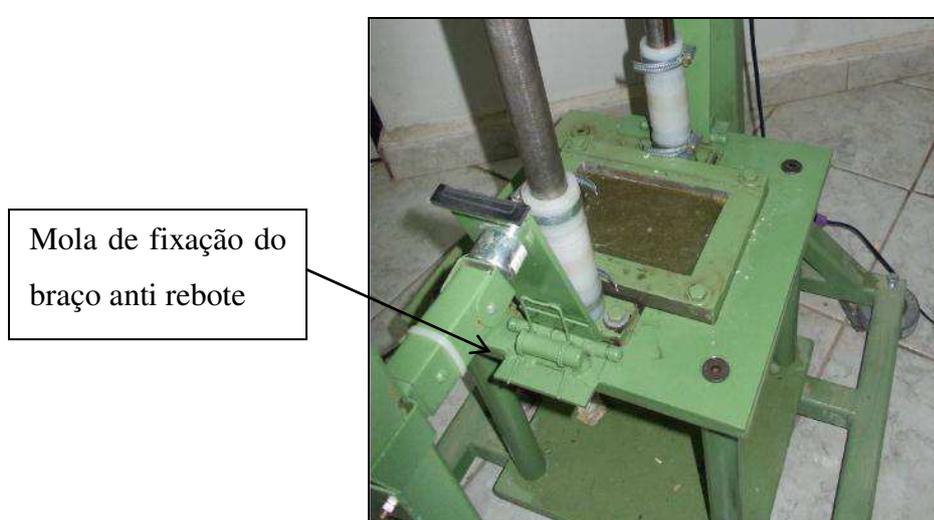


Figura 4.77 - Sistema anti rebote desenvolvido.

O sistema funciona primeiramente quando o operador do equipamento aciona o braço do anti rebote nos eletroímãs. Na realização do ensaio, o impactador passa por um fotosensor infravermelho que envia um sinal elétrico para a placa eletrônica de controle, que entende esse comando e desliga a energia dos eletroímãs, e conseqüentemente o braço do anti rebote volta a sua posição original evitando assim o segundo impacto.

A fixação do braço anti rebote, com a base e o suporte dos eletroímãs foi realizada através de uma mola de torção, para que os componentes pudessem se deslocar entre as posições de repouso e quando o sistema estivesse ativado, como pode ser visto na figura 4.78.



**Figura 4.78 - Detalhe da mola de torção utilizada na fixação do sistema anti rebote.**

Para o dimensionamento da mola era sabido que a força de atração dos eletroímãs era de 100 N e que o braço anti rebote possuía um comprimento de 175 mm. Assim utilizou-se a equação 4.22 a seguir:

$$M = Fd \quad \text{Equação 4.22}$$

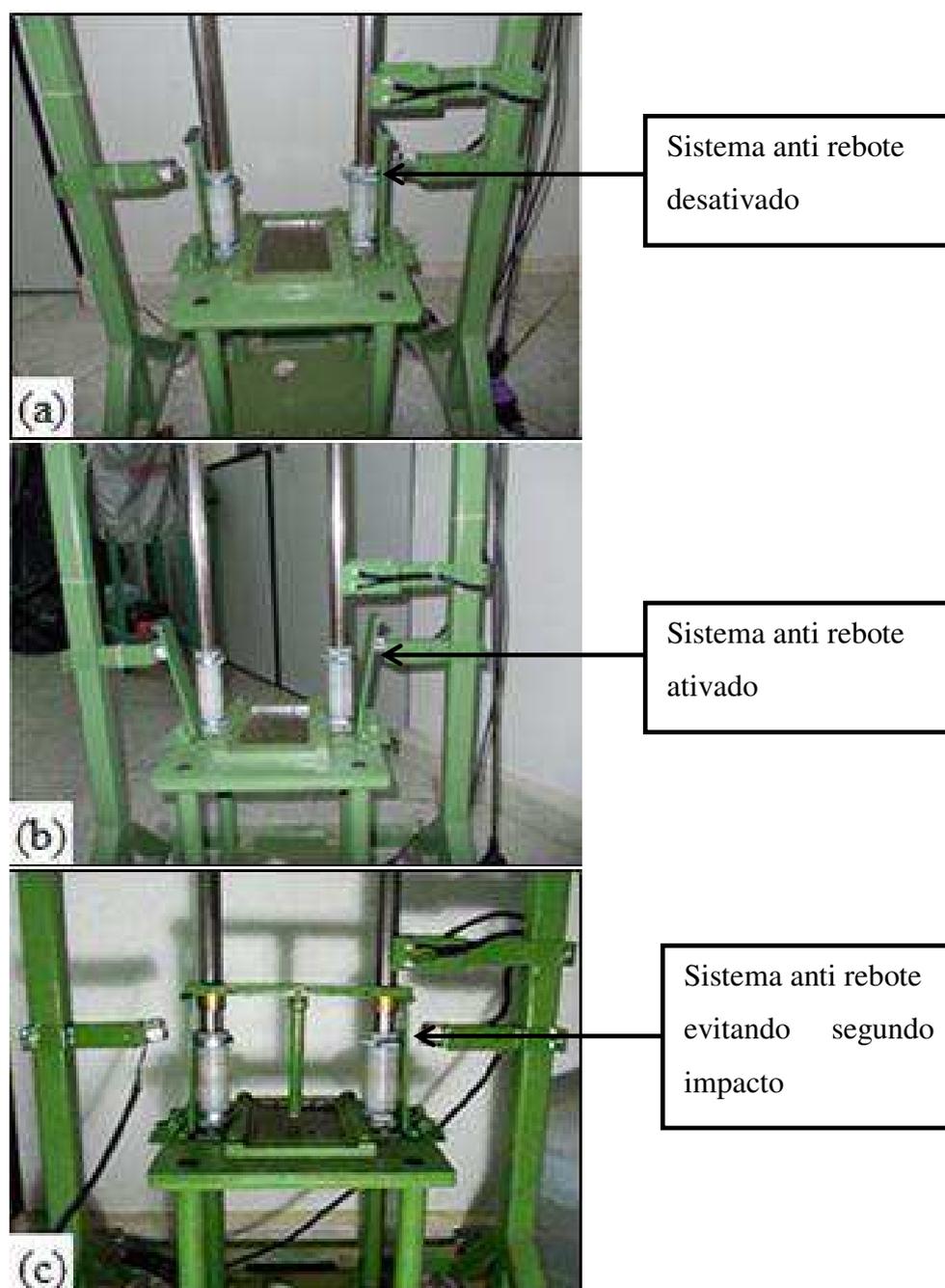
$$M = 100 * 0,175$$

$$M = 17,5 \text{ Nm}$$

Portanto, para o funcionamento do sistema era necessária uma mola helicoidal com uma força de torção menor que 17,5 Nm. Procurou-se no mercado uma mola de torção com uma força de torção de 10 Nm e não houve sucesso. Assim, foi preciso projetar e fabricar a

mola de torção na empresa Casa das Embreagens especializada na fabricação de molas no distrito dos mecânicos na cidade de Campina Grande – PB.

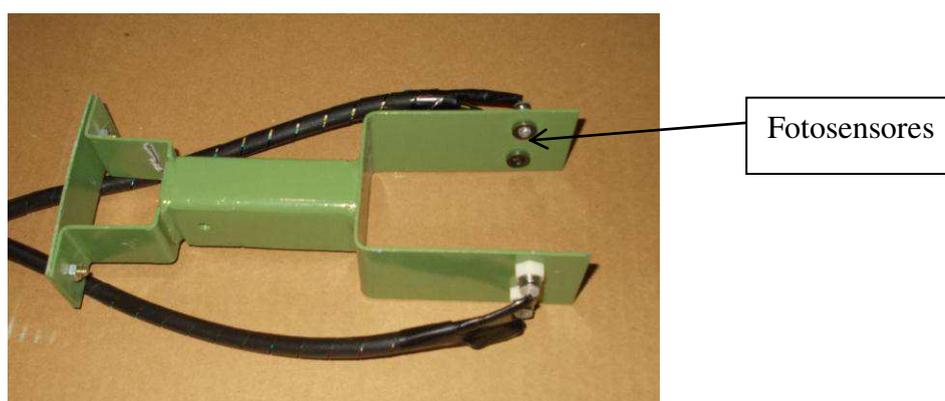
A figura 4.79 mostra a foto do sistema anti rebote automatizado em três situações, antes da realização do ensaio os braços do sistema anti rebote estão desativados (a), braços do sistema anti rebote ativado e pronto para a realização do ensaio (b) e após o impacto no corpo de prova o sistema anti rebote é ativado e evita o segundo impacto (c).



**Figura 4.79 - Sistema anti rebote automatizado (a) antes do ensaio (b) pronto para o ensaio (c) após o ensaio evitando o segundo impacto**

#### 4.8 Fabricação da instrumentação e do anti rebote automatizado

A figura 4.80 mostra a foto do suporte do medidor de velocidade com os medidores LED's, que são fixados na estrutura da máquina por parafusos, o suporte foi fabricado a partir de uma chapa de aço de 2 mm de espessura, mais detalhes da concepção pode-se consultar o desenho técnico em ANEXO C.



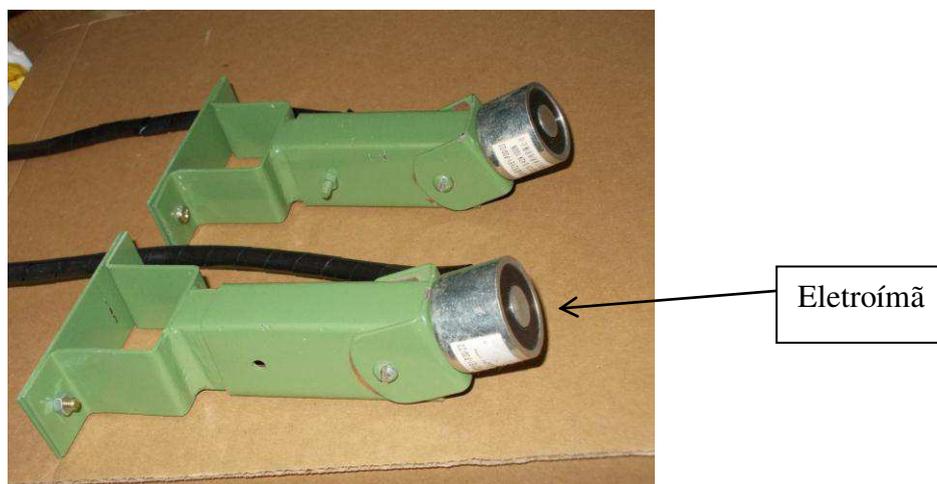
**Figura 4.80 - Suporte do medidor de velocidade.**

A figura 4.81 mostra o parafuso de fixação do acelerômetro e o furo onde o mesmo foi fixado, pela norma ASTM D7136/D7136M-12, 95% da massa do impactador deve estar acima do local de posicionamento do acelerômetro. Mas como o impactador possui a forma cilíndrica, não foi possível a fixação do mesmo. Assim, optou-se pela fixação do acelerômetro na massa de impacto que é ligada ao impactador, pois possui um perfil plano e propício para a fixação. O acelerômetro possui uma rosca para fixação no peso. Mais detalhes do tipo e espaçamento da rosca podem ser consultados no ANEXO C.



**Figura 4.81 – Parafuso de fixação do acelerômetro no peso.**

A figura 4.82 mostra os eletroímãs montados nos suportes de fixação, os suportes são fixados na estrutura da máquina. O desenho técnico dessa concepção pode ser encontrado no ANEXO C.



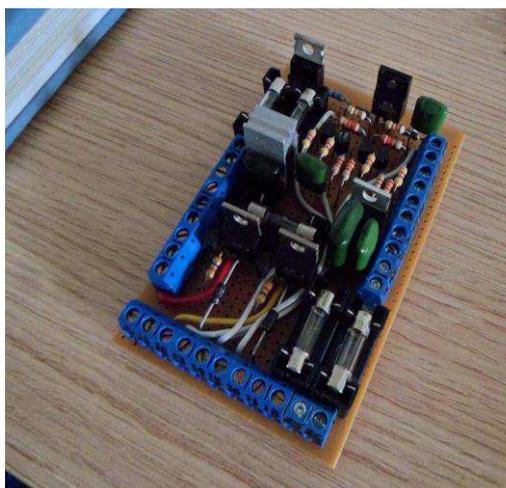
**Figura 4.82 - Suporte de fixação dos eletroímãs.**

A figura 4.83 mostra os batentes fabricados em nylon, a função desses componentes é evitar que o impactador perfure o corpo de prova, e conseqüentemente danifique o acelerômetro.



**Figura 4.83 - Batentes em nylon do sistema anti rebote.**

A figura 4.84 mostra a placa condicionadora de dados responsável pela de aquisição de dados e envio para o computador. O circuito da placa pode ser consultado no ANEXO C.



**Figura 4.84 - Placa condicionadora de dados.**

A figura 4.85 mostra a foto da máquina de impacto montada com a instrumentação e o sistema anti rebote automatizado.

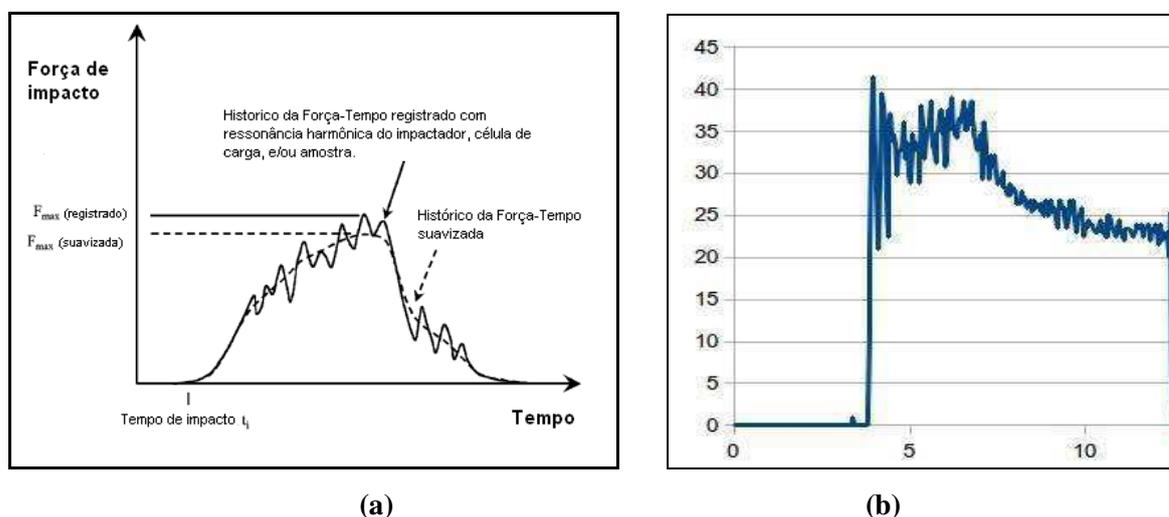


**Figura 4.85 - (a) Máquina de impacto montada (b) Detalhe da caixa com o sistema de aquisição de dados (c) Detalhe do sistema anti rebote automatizado.**

#### 4.9 Testes da máquina de impacto por queda de peso com a instrumentação

Após a fabricação da instrumentação e do sistema anti rebote eletromecânico, foi iniciada a fase de testes da máquina de impacto por queda de peso com a instrumentação.

A figura 4.86 mostra os gráficos da força de impacto em função do tempo, em (a) tem-se um exemplo da curva que consta na norma ASTM D7136/D7136M-12. Já em (b) tem-se a curva obtida nos ensaios. Comparando as curvas, percebe-se que os resultados foram bem semelhantes, apesar da precisão dos resultados terem sido afetados pelo fato do acelerômetro utilizado possuir uma frequência de leitura de dados menor que a norma ASTM D3763-10 sugere.



**Figura 4.86 - Gráficos da força de impacto em função do tempo (a) Exemplo (b) Obtido nos ensaios.**

A partir dos ensaios realizados com a máquina de impacto por queda de peso instrumentada e com o sistema anti rebote automatizado, foi possível calcular a velocidade de impacto para um ensaio com massa de 1,5 kg e altura de impacto de 1,3 m, onde de posse desses parâmetros é possível calcular a energia de impacto a partir da equação 4.23:

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} m V_{\text{impacto}}^2 \quad \text{Equação 4.23}$$

A partir desses cálculos, foi criada a tabela 4.19, comparando o método teórico e o método instrumentado, onde foi calculado o erro percentual entre os dois métodos. Percebe-se

que erro percentual entre os dois métodos foi de 1,39% para velocidade de impacto e de 2,77% para a energia de impacto.

**Tabela 4.19 - Comparação do método teórico e do método instrumentado da velocidade e da energia de impacto.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método Teórico</b>	<b>Método instrumentado</b>	<b>Erro (%)</b>
V(m/s)	5,05	4,98	1,39
E(J)	19,13	18,60	2,77

A tabela 4.20 mostra a comparação dos métodos de cálculo da velocidade de impacto e da energia de impacto para um ensaio com massa de 1,5 kg e altura de queda de 1,3 m. Percebe-se que os valores obtidos no método de análise do vídeo e no método instrumentado foram próximos aos valores teóricos. Portanto, pode-se concluir que a máquina de impacto por queda de peso desenvolvida neste trabalho teve os resultados esperados.

**Tabela 4.20 - Comparação dos métodos de cálculo da velocidade e da energia de impacto.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método Teórico</b>	<b>Método da Análise do Vídeo</b>	<b>Método instrumentado</b>
V(m/s)	5,05	4,85	4,98
E(J)	19,13	17,64	18,60

#### **4.10 Problemas encontrados na máquina de impacto por queda de peso**

Para montar a instrumentação, foi necessário desmontar a máquina de impacto por queda de peso. Com isso, foram percebidos alguns erros que serão detalhados a seguir.

##### **4.10.1 Substituição das buchas de deslizamento**

Nos ensaios foi percebido que as buchas de nylon fixadas nos pesos para que ocorra o deslizamento estavam sofrendo um grande desgaste, como pode ser visto na figura 4.87. Com isso, os pesos de impacto não estavam se deslocando livremente sem interferência, muitas vezes os pesos estavam vibrando antes de atingir o corpo de prova.



**Figura 4.87 - Buchas de nylon desgastadas.**

A solução para esse problema foi a substituição das buchas de nylon por bronze, um material com maior rigidez e mais indicado para este tipo de aplicação, a figura 4.88 mostra os pesos com as novas buchas de bronze. Foi necessário um ajuste com folga de 0,6 mm nas buchas de bronze, para que os pesos deslizassem livremente sem travamento.



**Figura 4.88 - Novas buchas de bronze para o deslizamento dos pesos.**

#### **4.10.2 Retificação da abertura de fixação do corpo de prova**

Ao fixar os corpos de prova na realização dos ensaios, percebeu-se que o fixador do corpo de prova não possuía a abertura solicitada de 100 x 150 mm, ou seja, a abertura era menor cerca de 98 x 148 mm e com isso foi necessário realizar ajustes nos corpos de prova para que os mesmos pudessem ser fixados.

A solução desse problema foi a retificação da abertura da fixação do corpo de prova, onde usinou-se a placa para que a mesma tivesse as dimensões solicitadas no projeto, ou seja, 100 x 150 mm. A figura 4.89 mostra a placa de fixação do corpo de prova depois de solucionado o problema.



**Figura 4.89 - Placa de fixação do corpo de prova após o alargamento da abertura.**

#### **4.10.3 Flutuação dos pesos**

Ao analisar os vídeos dos ensaios realizados com a máquina de impacto por queda de peso percebeu-se que os pesos não se deslocavam unidos como se pensou a priori, ou seja, durante o ensaio os pesos separavam-se e conseqüentemente tinham-se vários impactos no corpo de prova, como pode ser observado na figura 4.90.

Para a solução desse problema utilizou-se abraçadeiras de nylon para a união dos pesos antes de realizar os ensaios.

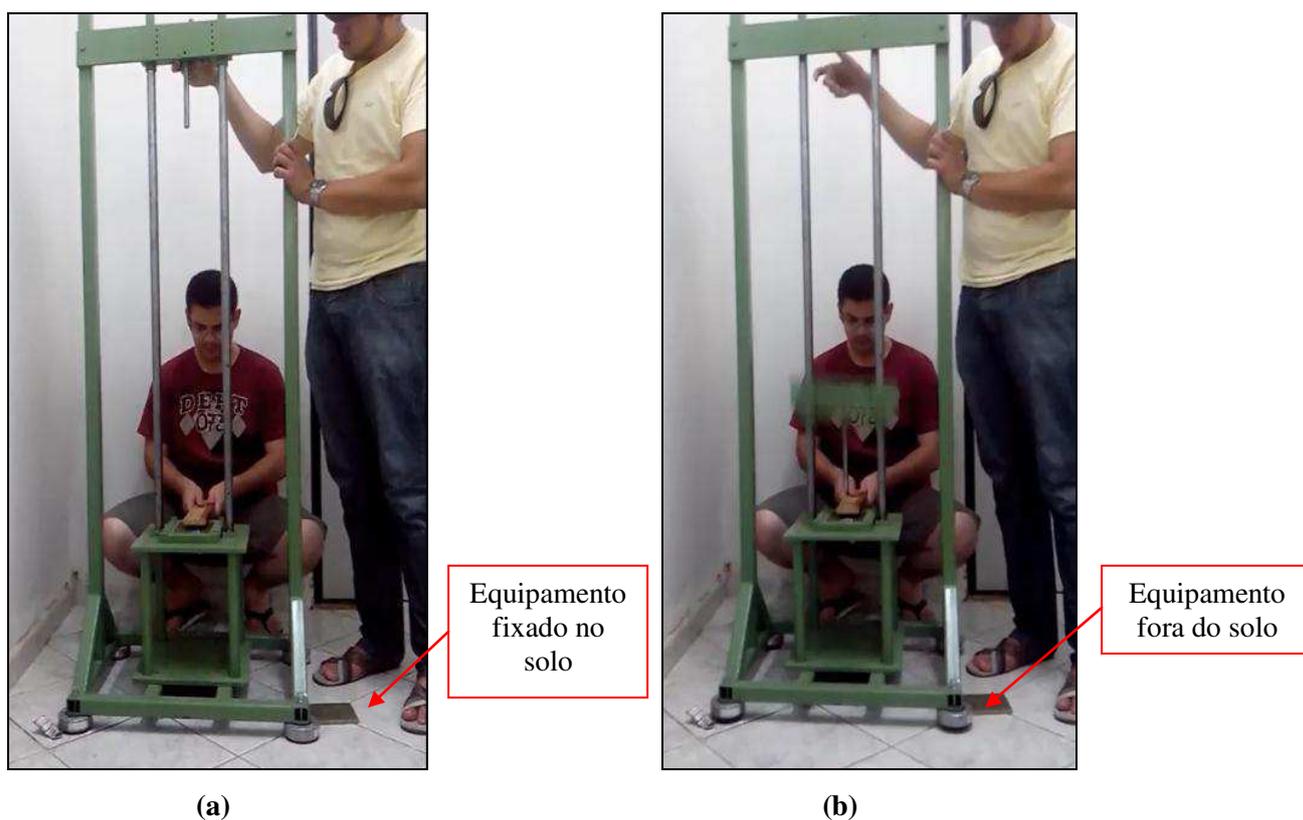


**Figura 4.90 - Flutuação dos pesos durante os ensaios.**

#### **4.10.4 Teste da máquina de impacto por queda de peso com energia de impacto máxima**

Outro problema encontrado na análise dos vídeos dos ensaios foi que a máquina de impacto por queda vibrava de modo a perder o contato com o solo quando se utilizava a energia de impacto máxima do equipamento, ou seja, 96 joules. A figura 4.91 mostra a foto do ocorrido.

Para a solução desse problema obteve-se contato com o fabricante do amortecedor de vibrações utilizado na base do equipamento, e o mesmo aconselha utilização de um amortecedor de vibrações com molas que é diferente do foi utilizado a priori. O fabricante aconselha também a fixação do equipamento no piso, para que se tenha uma maior estabilização do equipamento durante o ensaio.



**Figura 4.91 - Equipamento. (a) Antes do ensaio (b) Após o impacto**

#### **4.11 Máquina de Impacto por queda de peso para materiais compósitos desenvolvida**

A figura 4.92 mostra a foto da maquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos desenvolvida nesta pesquisa.



**Figura 4.92 - Máquina de impacto por queda de peso desenvolvida na pesquisa.**

## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho conclui-se que:

- Foi possível o desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para ensaio de materiais compósitos com nível de energia de impacto entre 20 e 96 J, o equipamento possui baixo custo de fabricação e apresenta todos os requisitos técnicos especificados;
- Foi possível o desenvolvimento de um sistema anti rebote eletromecânico de caráter inovador com possibilidade de patenteamento;
- Foi possível o desenvolvimento de um sistema de instrumentação para a máquina de impacto por queda de peso (que gerou gráficos da força de impacto em função do tempo) com hardware arduíno e software de processamento em C++ onde foram realizados testes preliminares do mesmo com sucesso;
- Foi possível propor uma metodologia experimental para o cálculo da área delaminada nos materiais compósitos testados em função do nível de energia de impacto baseada no uso do software de análise de imagem aberto IMAGE J;
- Foi possível propor uma metodologia experimental para o cálculo da velocidade de impacto nos ensaios e consequentemente o cálculo da energia de impacto nas placas compósitas fazendo uso do software de análise de vídeo aberto TRACKER;
- Foi possível comparar a velocidade de impacto e a energia de impacto através de três métodos diferentes: teórico, análise de vídeo e instrumentação e concluir que os valores foram aproximados. O erro do método da análise de vídeo em relação ao método teórico foi de 3,96% para a velocidade de impacto e 7,79% para energia de impacto. Já o erro para o método instrumentado em relação ao método teórico foi de 1,39% para a velocidade de impacto e 2,77% para a energia de impacto.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Melhorar o sistema de instrumentação da máquina de impacto por queda de peso, para que a mesma tenha maior capacidade de processamento;
- Desenvolver um sistema de liberação do conjunto massa/impactador automatizado sem a interferência humana;
- Realizar ensaio de impacto por queda de peso com os corpos de provas utilizados nesse trabalho em outro equipamento semelhante e analisar os resultados;
- Realizar ensaio de impacto por queda de peso em outros materiais compósitos, e analisar os resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRATE, S. Impact Engineering of Composite Structures, v.526, pp. 104-132, 2005.
- AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES, A.C.L; LIRANI, J. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 295 p., 1994.
- AKIN, C.; SENEL, M. An experimental study of low velocity impact response for composite laminated plates. *Dumlupinar Universitesi*, pp.77-90, 2010.
- ASHBY, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3 ed. Elsevier, 2005.
- ASTM D2628-96. Standard Specification for Preformed Polychloroprene Elastomeric Joint Seals for Concrete Pavements, 2001.
- ASTM D3763-10. Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors, 2010.
- ASTM D7136/D7136M-05. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event, 2005.
- BAERE, I., PAEPEGEM, W. V., AND DEGRIECK J., The Use of Rivets for Electrical Resistance Measurement on Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastics. *Smart Materials and Structures*, Vol 16, pp.1821–1828. 2007.
- BELINGARD, G.; VADORI, R. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal off Impact Engineering*, v. 27,pp. 213-229, 2002.
- BHAMARE, V. V. Transverse impact characteristics of adhesively bonded composite single lap joint. Master Thesis, University of Pune. India, 2000.
- CALLISTER JR., WILLIAN D. *Materials science and engineering: an introduction*. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- CANTWELL, W.J.; MORTON, J. The impact resistance of composites- a review. *Composites*. v.22, n.5, pp. 347-362, 1991.
- ÇOLAKOĞLU, A. Design and construction of a gravity drop hammer, MSc thesis, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2002.
- COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials, 2002.

- D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. The Role of the Resin Matrix/Hardener Ratio on the Mechanical Properties of Low Volume Fraction Epoxy Composites. *Advanced Performance Materials*, Vol. 4, pp. 285-295. 1997.
- GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. *Ensaio dos Materiais*. LTC, Rio de Janeiro, 2008.
- GHELLI, D.; MINAK, G. Low velocity impact and compression after impact tests on thin carbon/epoxy laminates. *Composites: Part B*, V.42, pp.2067-2079, 2011.
- GUNAWAN, L.; DIRGANTARA, T.; PUTRA, I.S. Development of a Dropped Weight Impact Testing Machine. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS* Vol: 11 No: 06, 2011.
- HEBERT, M.; ROUSSEAU, C.; SHUKLA, A. Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites. *Composite Structure*, v. 84, pp.199-208, 2008.
- INSTRON. Disponível em: [http://www.instron.com.br/wa/home/default\\_br.aspx](http://www.instron.com.br/wa/home/default_br.aspx).
- KAISER, M.A. *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1998.
- KERŠYS, A., KERŠIENĖ N., AND ŽILIUKAS A. “Experimental Research of the Impact Response of E-Glass / Epoxy and Carbon / Epoxy Composite Systems”. *Materials science*, Vol. 16, pp.1392–1320. 2010
- KNOX, K.A.; NELSON, R.J.; BELLMORE, T.L.; CARLOCK, G.L. Vertical height impact testing apparatus. US 6523391 B1. 8 Jun 2001; 25 Fev 2003. Patent Application Publication.
- KUČERA J. *Innovation in education of composite technology*. Faculty of Mechanical Engineering, Prague, 2008.
- LARSOON, F.; SVENSSON, L. Carbon, polyethylene and PBO hybrid fibre composites for structural lightweight armour. *Composites part A: applied science and manufacturing*, v. 33, pp. 221-231, 2002.
- LIU, D. e MALVERN, L.E. Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. *Journal of Composite Materials*, v.21. pp. 594-609, 1987
- MINAK, G.; GHELLI, D. Design of a drop- weight machine for composite materials impact testing. In: international congresses of ingcroat society of mechanics, 5<sup>TH</sup>, Croatia, 2006.
- MORAIS, W. A. *Estudo e caracterização da resistência a impactos de baixas energias de materiais compósitos*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

- MULLIGAN , K. R., MASSON, P., LÉTOURNEAU, S., AND QUAEGBEUR, N. An approach to compensate for the degradation of the monitoring system in damage detection. Smart materials, structures & ndt in aerospace conference, Université de Sherbrooke Sherbrooke, Canada, 2011.
- PETIT, S., BOUVET, C., BERGEROT, A., AND BARRAU, J. J. Impact and compression after impact experimental study of a composite laminate with a cork thermal shield. Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 3286-3299, 2007.
- PINTO, J.M.G.T., Avaliação do comportamento mecânico de blindagens balísticas. Dissertação – Universidade Técnica de Lisboa, 2009
- POTTER, K., An introduction to composite products: Design, development and manufacture. Springer-Verlag, Chapman & Hall, New York, United States, 1-38 p. 1997
- ROMARIZ, Luiz André. Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- SANTIAGO, R. C. Impacto Lateral em Tubos Pressurizados de Materiais Compostos com Fibra de Vidro e Resina Epóxi. Relatório de pesquisa. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- SANTOS, D. S. C. Estudo do Impacto a Baixa Velocidade em Compósitos Epóxi/Fibra de Vidro Nanoreforçados. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.
- SEANGATITH. S. Study on impact responses of pultruded gfrp, steel and aluminum beams by using drop-weight impact test. Suranaree J. Sci. Technol, Vol. 15, p. 191-199, 2007.
- SHARMA, R.S.; RAGHUPATHY, V.P. Desing and fabrication off equipment for low velocity impact testing of composite sandwinch panels. ARPN Journal of Engineering and Applied Science, v. 6, n. 8, p.22-25, 2011.
- SILVA, J.M., NUNES, C. Z., FRANCO N.; GAMBOA P. V., Damage tolerant cork based composites for aerospace applications, The Aeronautic Journal, Vol. 15, No. 1171, pp. 567-575. 2011.
- ŞİMŞRI, C. Low velocity ballistic characterization of steel armour plates by drop-weight test. MSc thesis, Metallurgical and Material Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2002.
- TAHERI-BEHROOZ, F.; SHOKRIEH, M.; ABDOLVAND, H. Designing and manufacturing of a drop weight impact test machine. Engineering Solid Mechanics, 1(2), 69-76, 2013.

ÜBEYLI, M.; ORHAN YILDIRIM, R.; ÖGEL, B. On the drop-weight testing of alumina/aluminum laminated composites. *Sadhana* Vol. 30, Part 5, pp. 673–686, 2005.

WANCE. Disponível em: <http://www.wance.net/index.html>.

ZHANG, Y. JOHNSTON, A. OUELLET, S. WILLIAMS, K. BOUCHER, D. AND LABONTE, S. Low-speed impact test for foam supported composite laminates. In *Proceedings of the 8th Canada-Japan joint Workshop on Composite Materials*, Institute for Aerospace Research, Boucherville, Canada, 2010.

ZHANG, X. X.; RUIZ, G.; YU, R.C. A new drop weight impact machine for studying fracture process in structural concrete. *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol 2,p. 655-659, 2008.

## ANEXO A

Propriedades Mecânicas					
Aços Estruturais VMB				Especificações ASTM Similares aos Aços VMB	
	Designação Comercial	Limite de escoamento ( $f_e$ )	Limite de Resistência à Tração ( $f_t$ )	Norma	Grau
		(MPa)	(MPa)		
Laminados (Circulares)	VMB 250	≥ 250	≥ 400	ASTM A 501	A
	VMB 300	≥ 300	≥ 415	EN10210	S275J2H
	VMB 350	≥ 350	≥ 485	ASTM A 501	B
	VMB 250cor	≥ 250	≥ 400	ASTM A 714	Grau IV
	VMB 300cor	≥ 300	≥ 415	-	-
	VMB 350cor	≥ 350	≥ 485	ASTM A 618	Ia, Ib e II III
*Conformados a Frio (Quadrados e Retangulares)	VMB 250	≥ 250	≥ 400	ASTM A 500	D
	VMB 300	≥ 300	≥ 415	ASTM A 500	B
	VMB 350	≥ 350	≥ 485	ASTM A 500	C
	VMB 250cor	≥ 250	≥ 400	ASTM A 500	D (com cobre)
	VMB 300cor	≥ 300	≥ 415	ASTM A 500	B (com cobre)
	VMB 350cor	≥ 350	≥ 485	ASTM A 500	C (com cobre)

\* Tubos conformados à frio são obtidos a partir dos tubos laminados a quente, assim a tolerância de parede aplicável a esses são definidas pelas normas de tubos laminados à quente.  
Outras normas e condições de fornecimento sob consulta.

Figura A1- propriedades mecânicas dos tubos industriais VMB.

Fonte: Disponível em: &lt;

[http://www.vmtubes.com.br/vmbinternet/filesmgng.nsf/41706609C62754558325798100649CF5/\\$File/Catalogo%20de%20Tubos%20Estruturais%202012.pdf](http://www.vmtubes.com.br/vmbinternet/filesmgng.nsf/41706609C62754558325798100649CF5/$File/Catalogo%20de%20Tubos%20Estruturais%202012.pdf)> Acesso em: 03/01/2013

Tabela 2.39 Ajustes de precisão (Continuação)			
Furo-base	Eixo-base	Tipos de ajustes	Aplicações
H7 h6 H6 h5	H7 / h6 H6 / h5	Assento deslizante em peças lubrificadas, com deslizamento à mão	<ul style="list-style-type: none"> <li>eixos de contra ponto</li> <li>fixação por chavetas</li> <li>montagem de acessórios em torre de torno revólver</li> <li>mancais de furadeira</li> <li>colunas-guia de furadeiras radiais</li> <li>montagem de rolamentos de esferas e rolos</li> <li>fresas em mandrils, cabeçote broqueador</li> </ul>
H7 j6 H6 j5 H6 k5	J7 h6 J6 h5 K6 h5	Assento forçado leve. Podem ser montados ou desmontados à mão ou com martelo de madeira. Não são suficientes para transmitir esforço, sendo necessário fixação de peças. Empregadas também para os casos em que há necessidade de grande precisão de giro, com carga leve com direção indeterminada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>peças de máquinas operatrizes desmontadas com frequência e com fixação contra o giro como mancais, capas externas de rolamentos de esferas, buchas em engrenagens de câmbio.</li> <li>ajustes em máquinas elétricas (rolamentos, polias, alojamentos de chapas do extrator)</li> <li>rolamentos em virabrequins</li> <li>pinhões em pontas do eixo</li> <li>discos, engrenagens, cubos, etc., que devem deslocar-se facilmente por uma chaveta</li> </ul>
H7 k6	h6 K7	Assento forçado médio montados ou desmontados com martelo. Não permite rotação ou deslocamento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>engrenagens em fusos de torno</li> <li>anel interior de rolamento de esferas</li> <li>discos de excêntricos</li> <li>polias fixas e volantes em eixos</li> <li>manivelas para pequenos esforços</li> </ul>
H8 m7 H7 m6 H7 m5	M8 h7 M7 h6 M6 h5	Assentos forçados com aperto. Montagem e desmontagem com martelo, sem estragar o ajuste.	<ul style="list-style-type: none"> <li>em máquinas ferramentas, engrenagens que se montam e desmontam com frequência, mas que não devem ter jogo apreciável</li> <li>polias de correias</li> <li>pinhões e engrenagens com assento prensado ou forçado com linguetas para 200 mp</li> <li>mancais (<math>\varnothing</math> externo) nos suportes correspondentes</li> </ul>

Figura A2 – Tabela para ajuste com folga para guias de deslizamentos.

Fonte: (Agostinho; Rodrigues; Lirani, 1994)



**Figura A3 – Tabela para ajuste com folga para guias de deslizamentos.**

Fonte: Disponível em: <<http://www.vibra-stop.com.br/vibra-stop/default.asp>> Acesso em:

17/06/2013

**GGD**  
**4340**

**Composição Química**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,38	0,15	0,60	0,80	1,65	0,20
–	–	–	–	–	–
0,43	0,30	0,80	1,10	2,00	0,30

**Figura A4 – Composição química do aço SAE 4340.**

Fonte: Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/cat/4340.pdf>> Acesso em:

25/08/2013

## ANEXO B

Projeto detalhado da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos

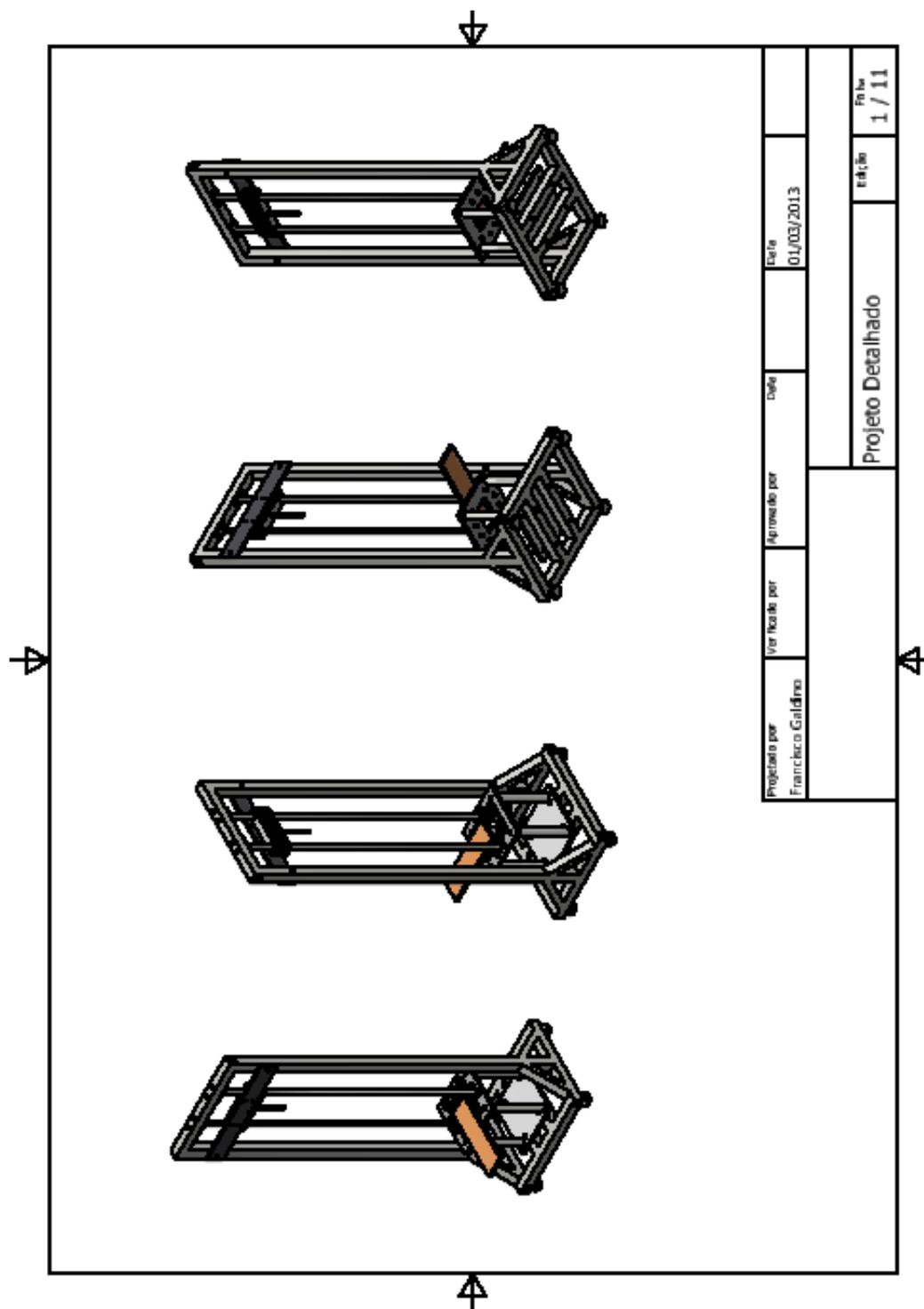


Figura B1 – Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

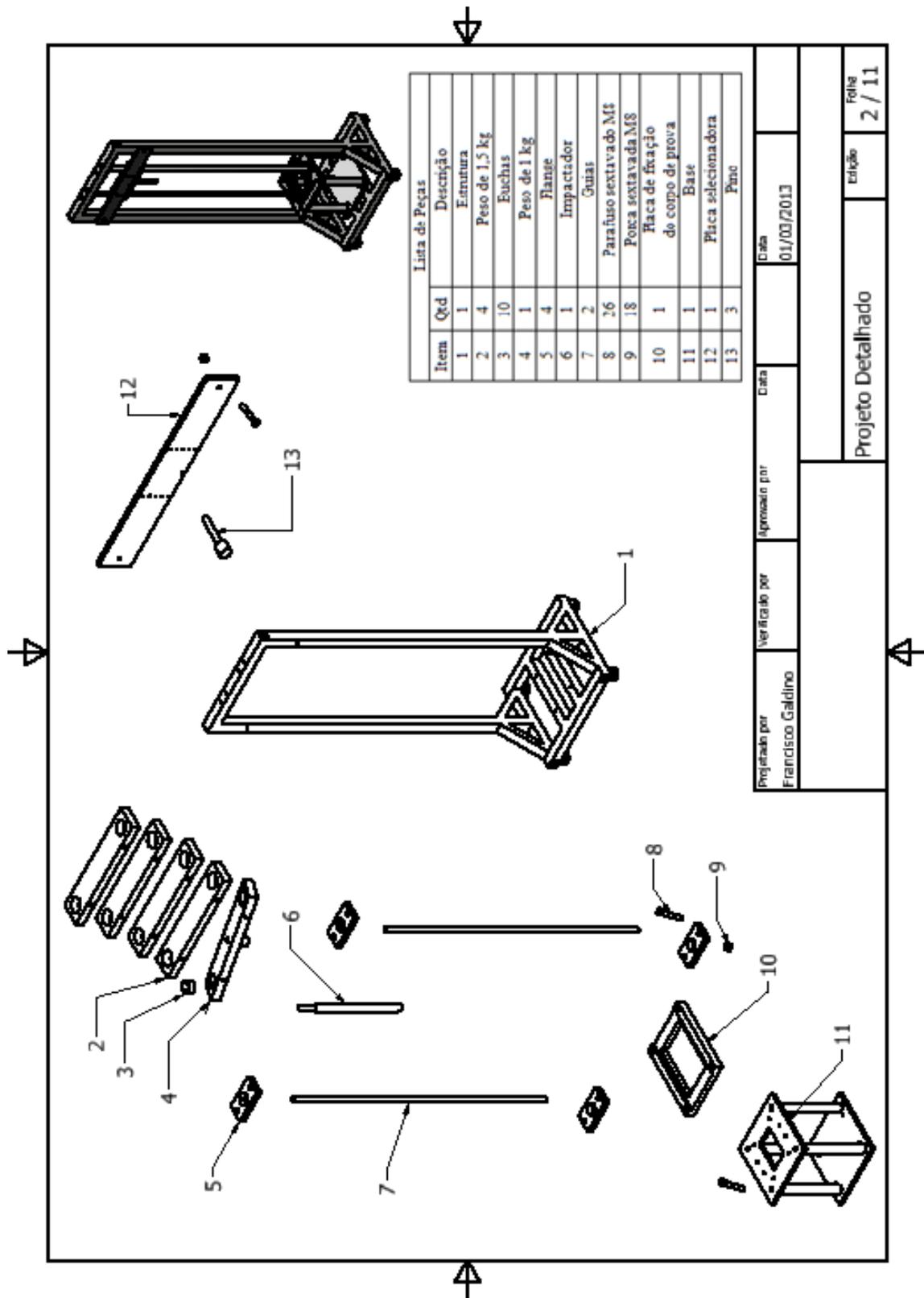


Figura B2 – Lista de peças da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

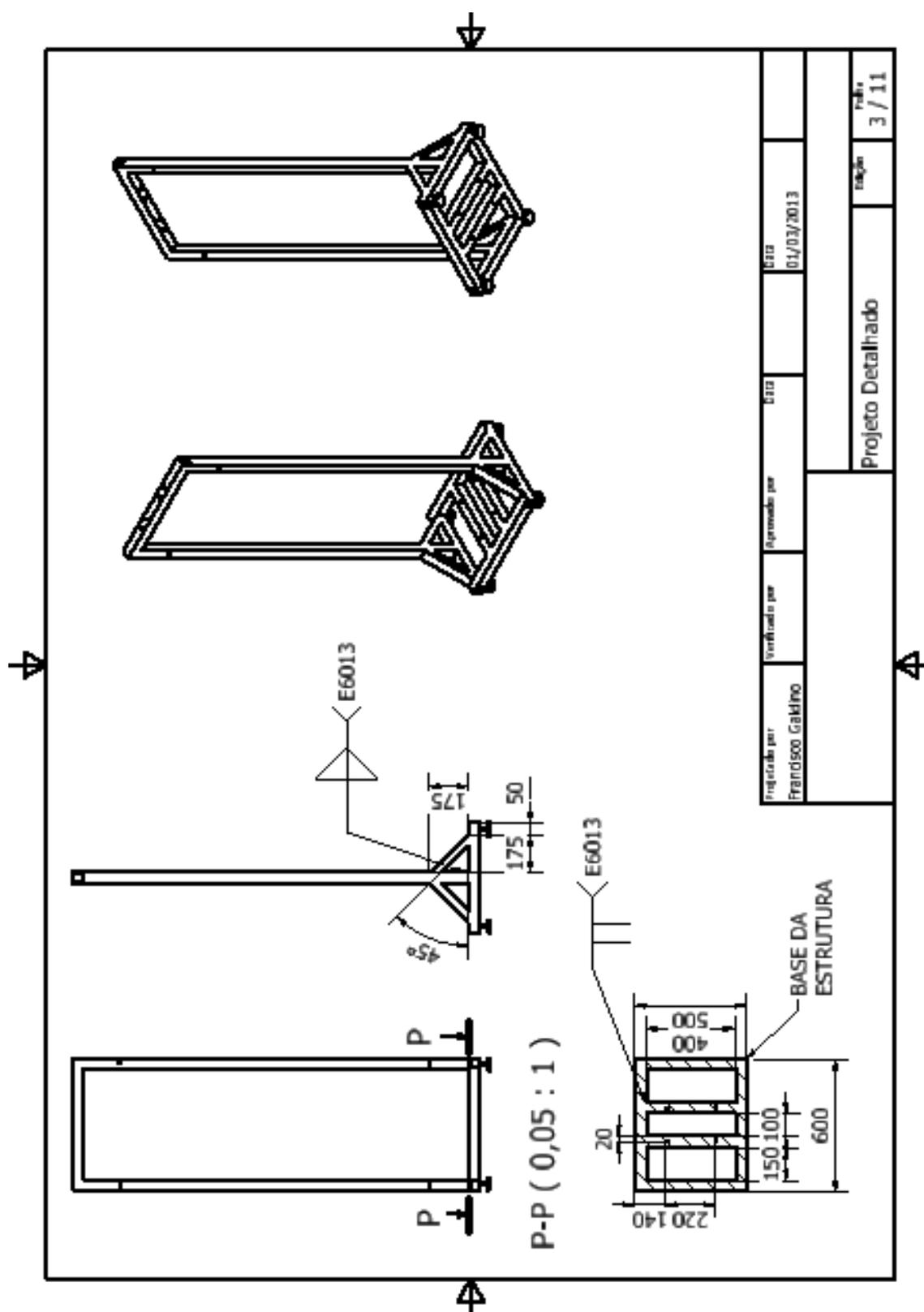


Figura B3 – Subsistema estrutural da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

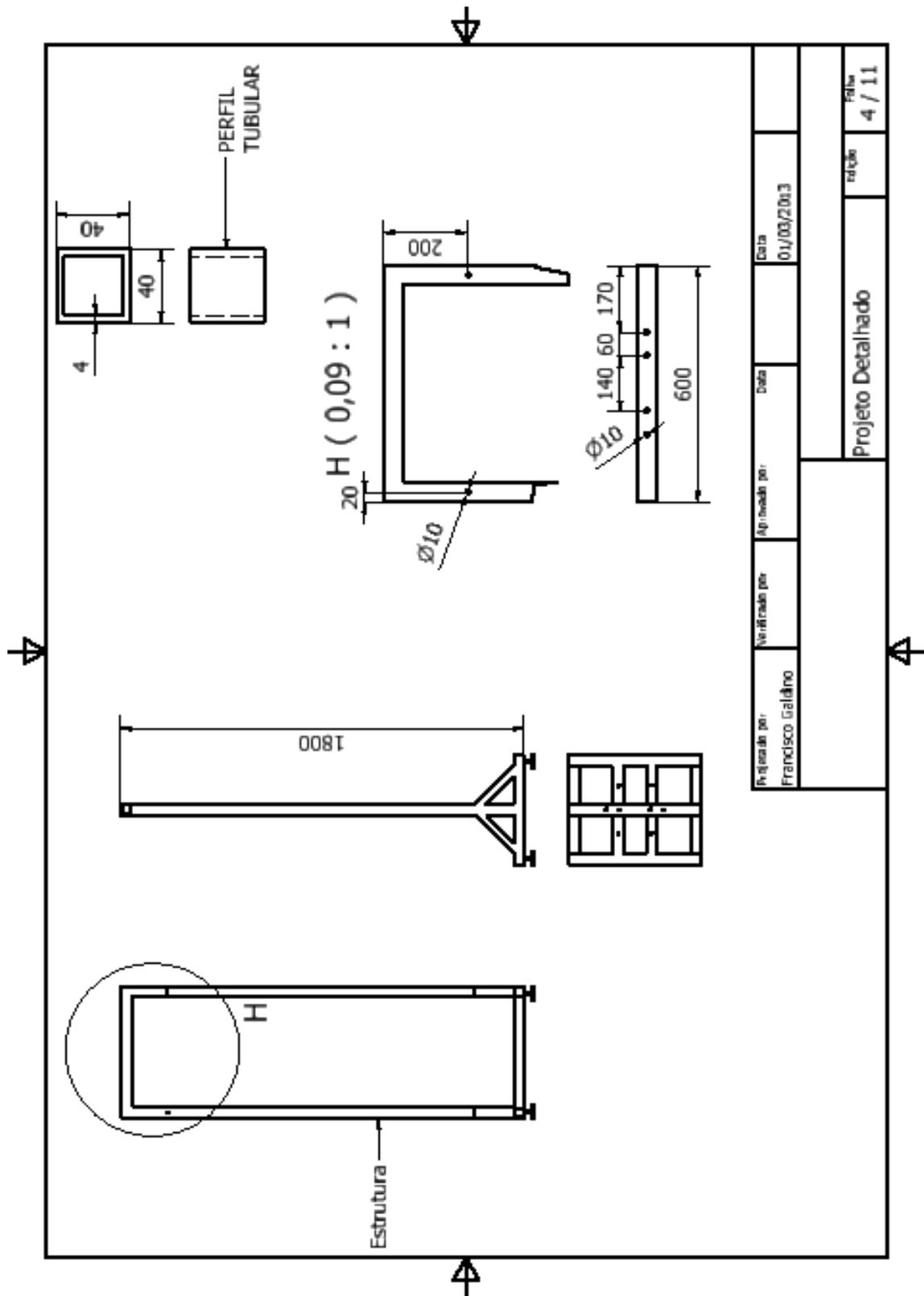


Figura B4 – Subsistema estrutural da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

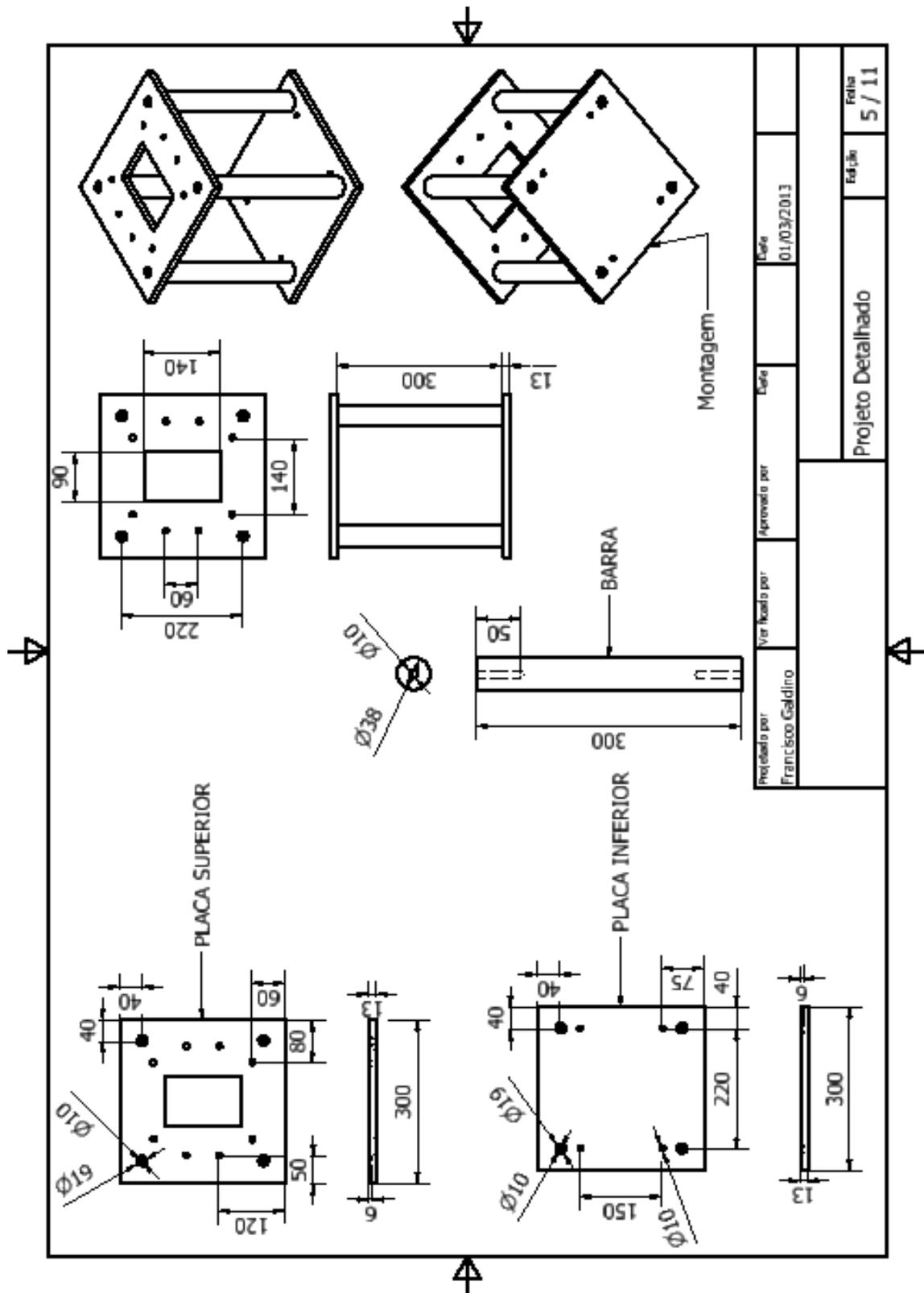


Figura B5 – Subsistema base da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

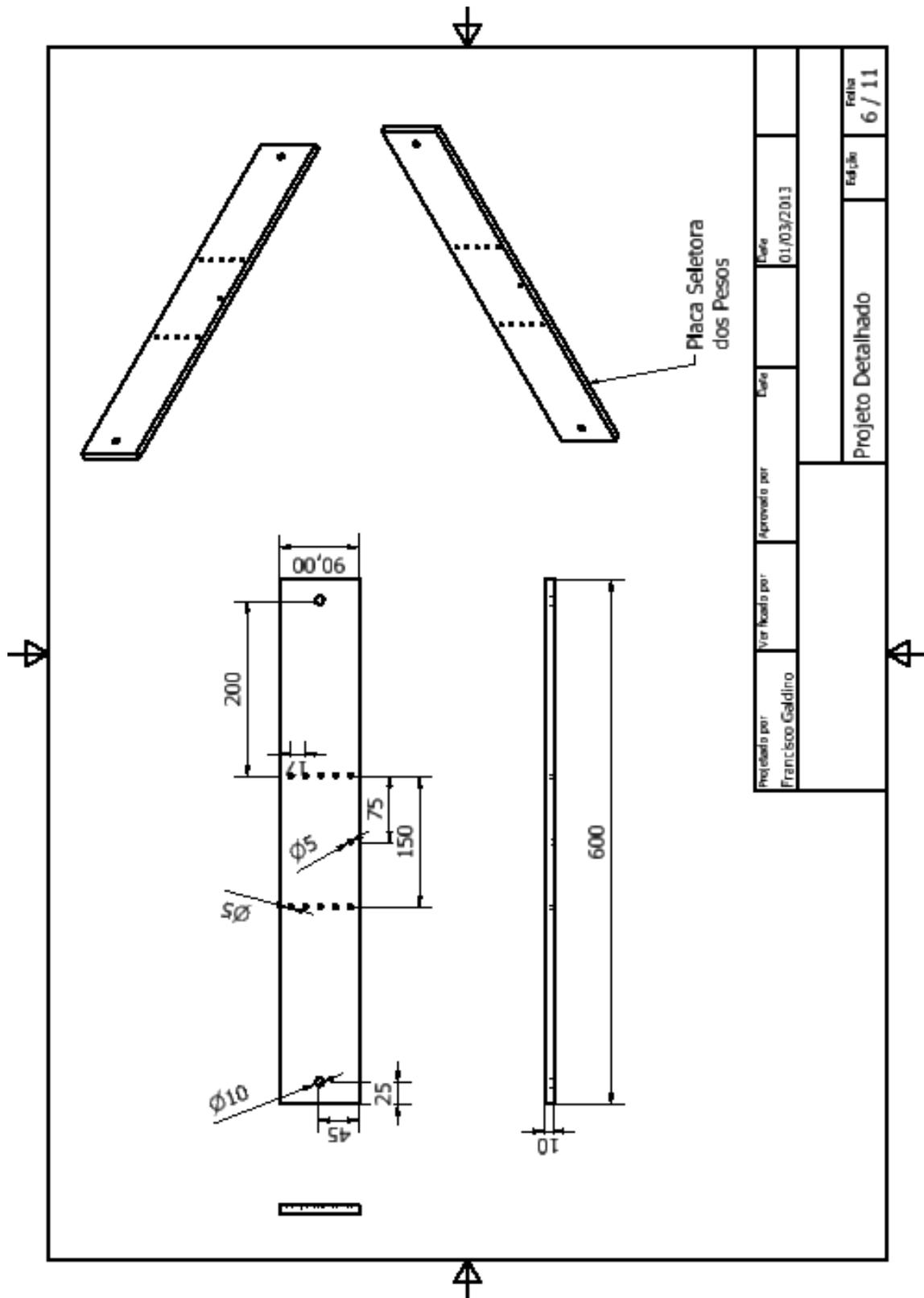


Figura B6 – Subsistema de travamento e liberação do impactador da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

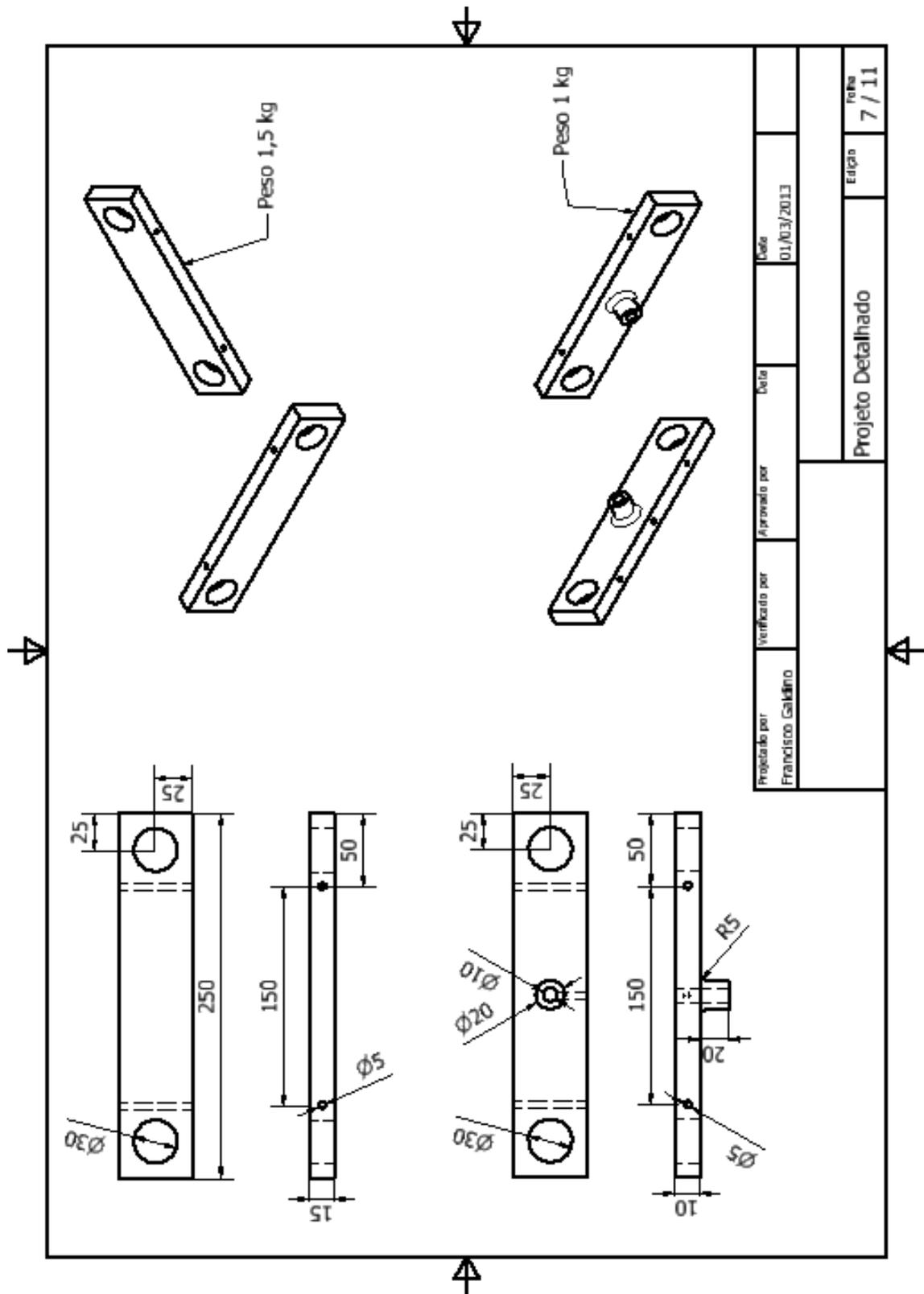


Figura B7 – Subsistema pesos de impacto da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

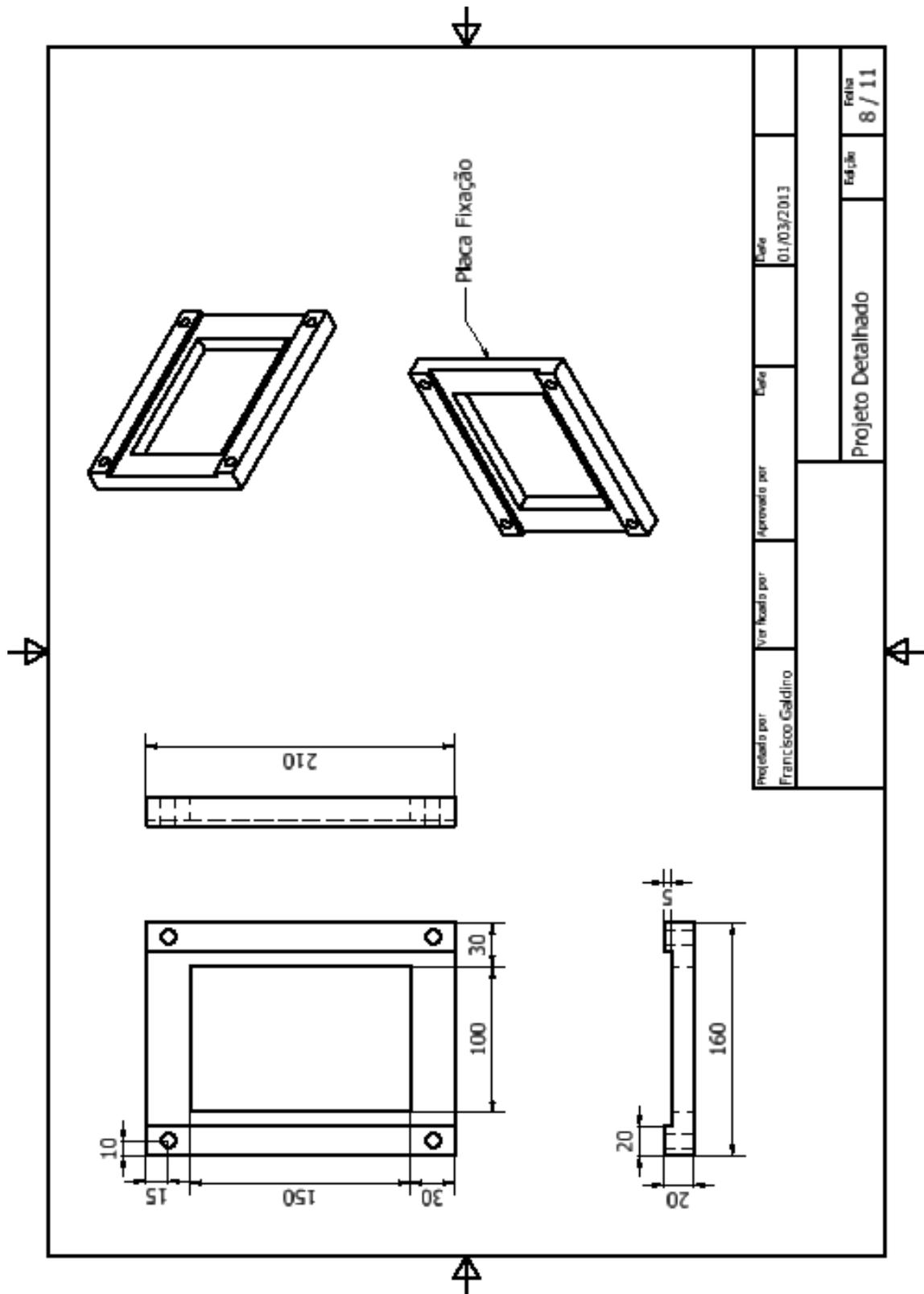


Figura B8 – Subsistema fixação do corpo de prova da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

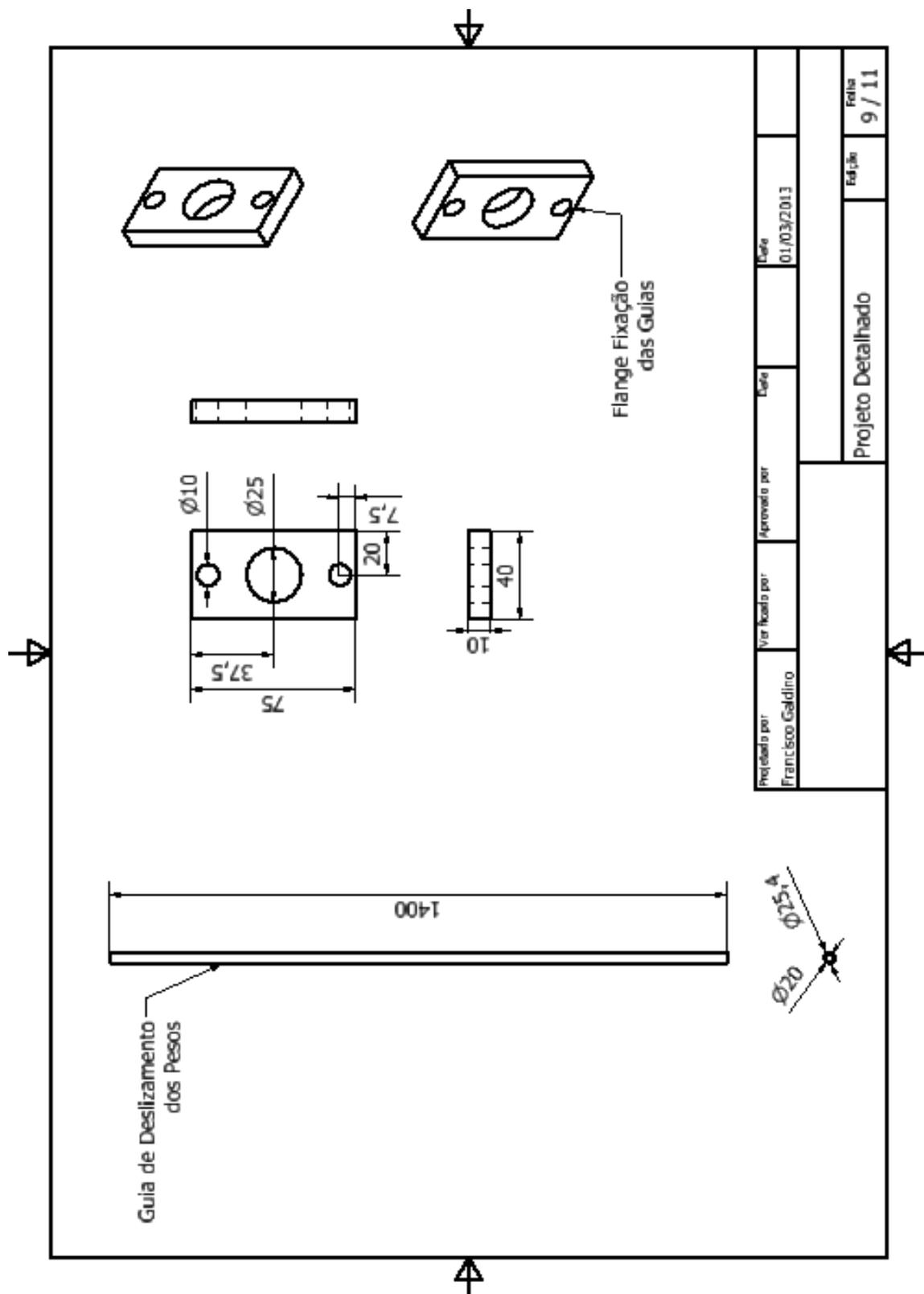


Figura B9 – Subsistema guia de deslizamento dos pesos da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

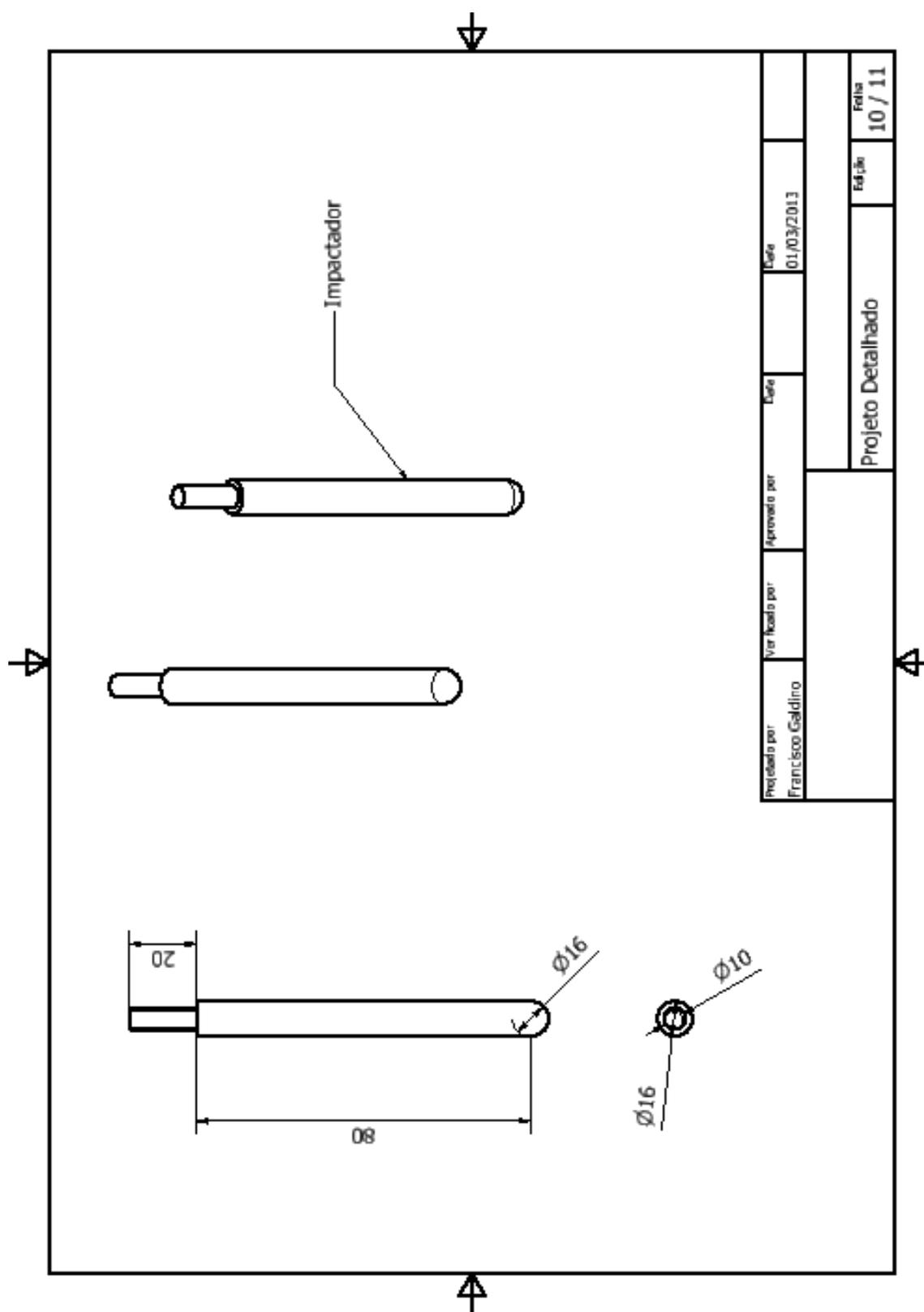


Figura B10 – Subsistema impactador da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

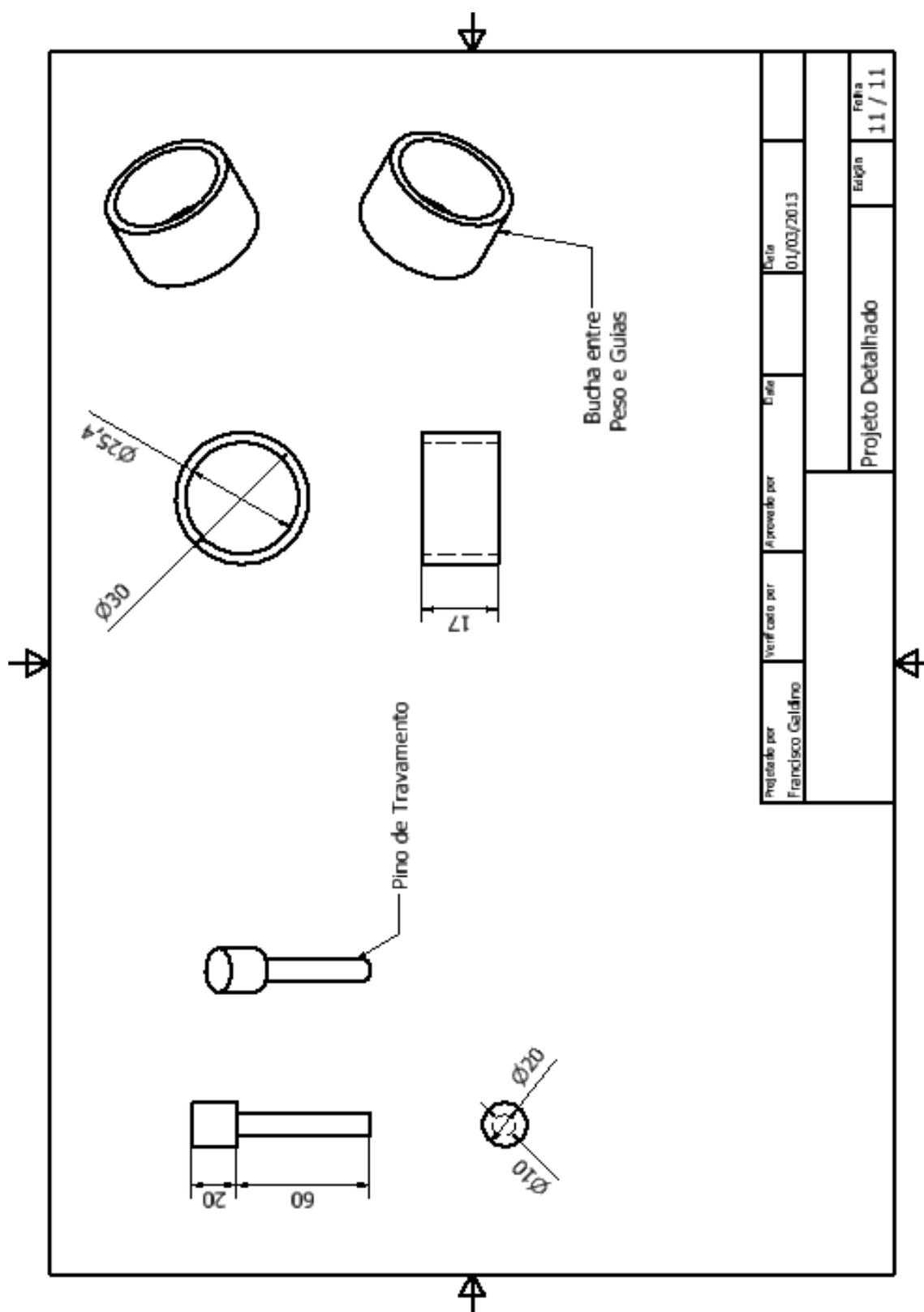


Figura B11 – Buchas e pinos da máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

ANEXO C

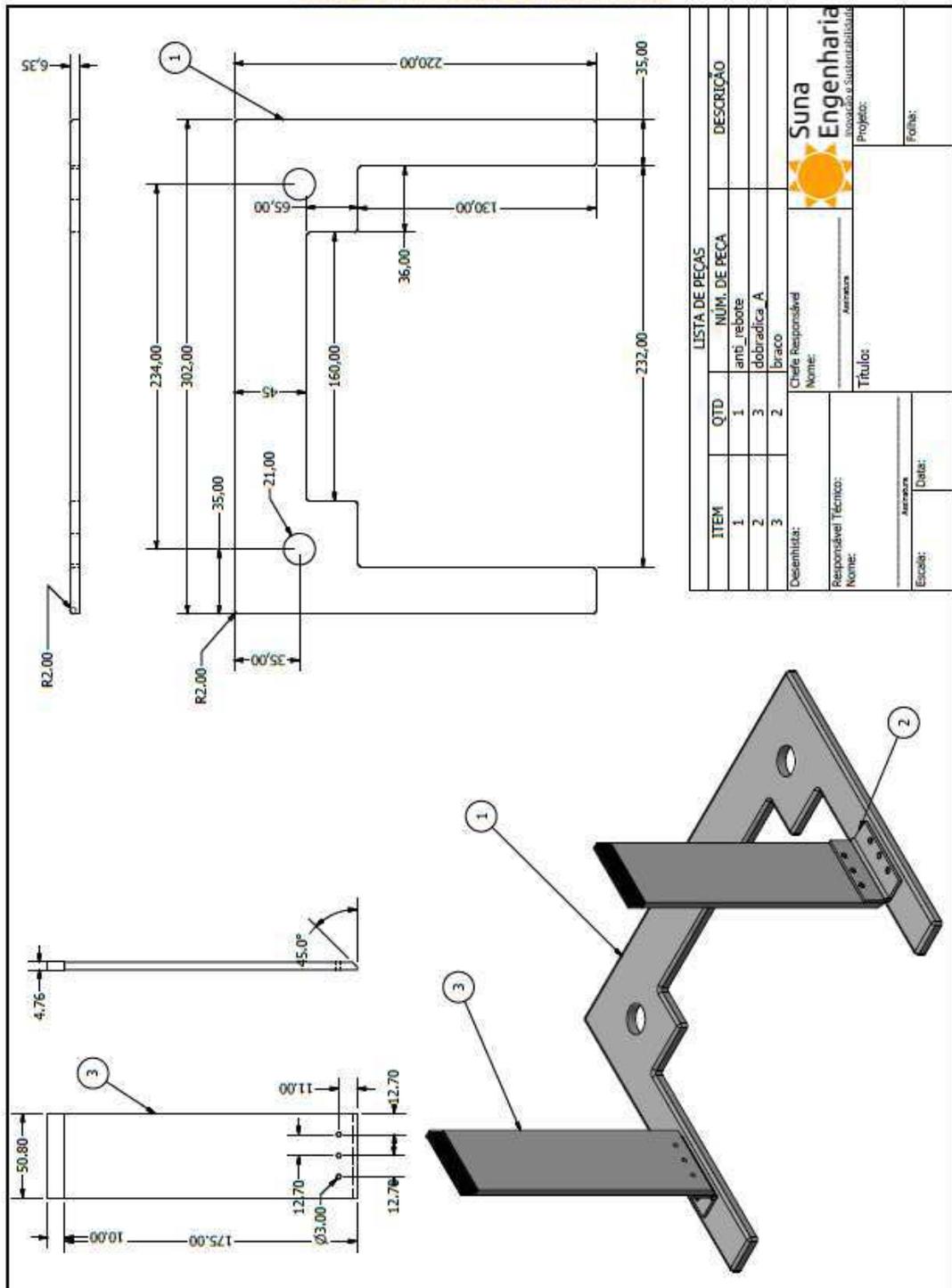
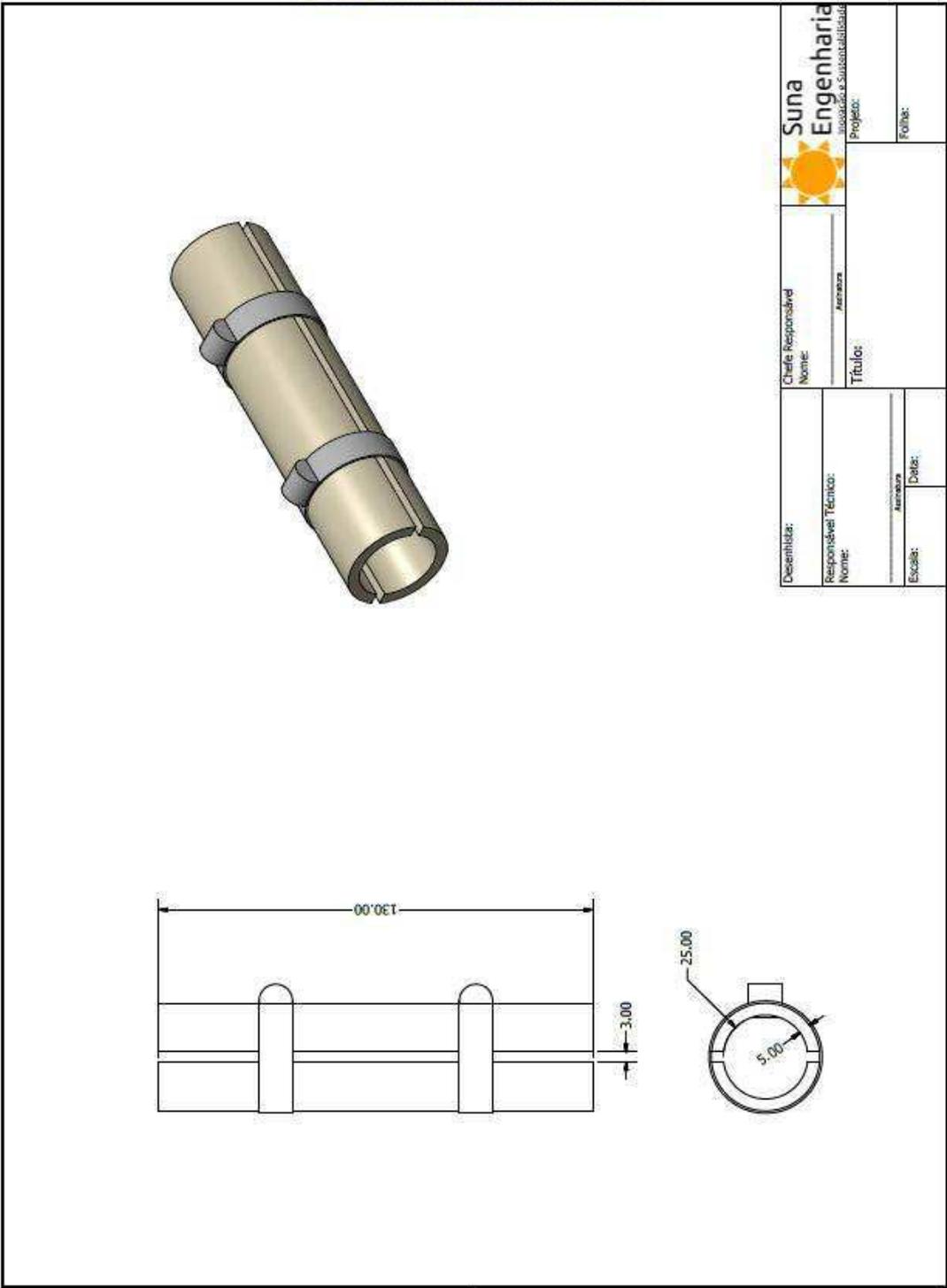


Figura C1 – Base anti rebote.



Desenhista:		Chefe Responsável		Suna Engenharia	
Responsável Técnico:		Nome:		Instituição e Substituição	
Nome:		Número:		Projeto:	
Escala:		Título:		Folha:	
Data:					

Figura C2 – Batente de nylon.

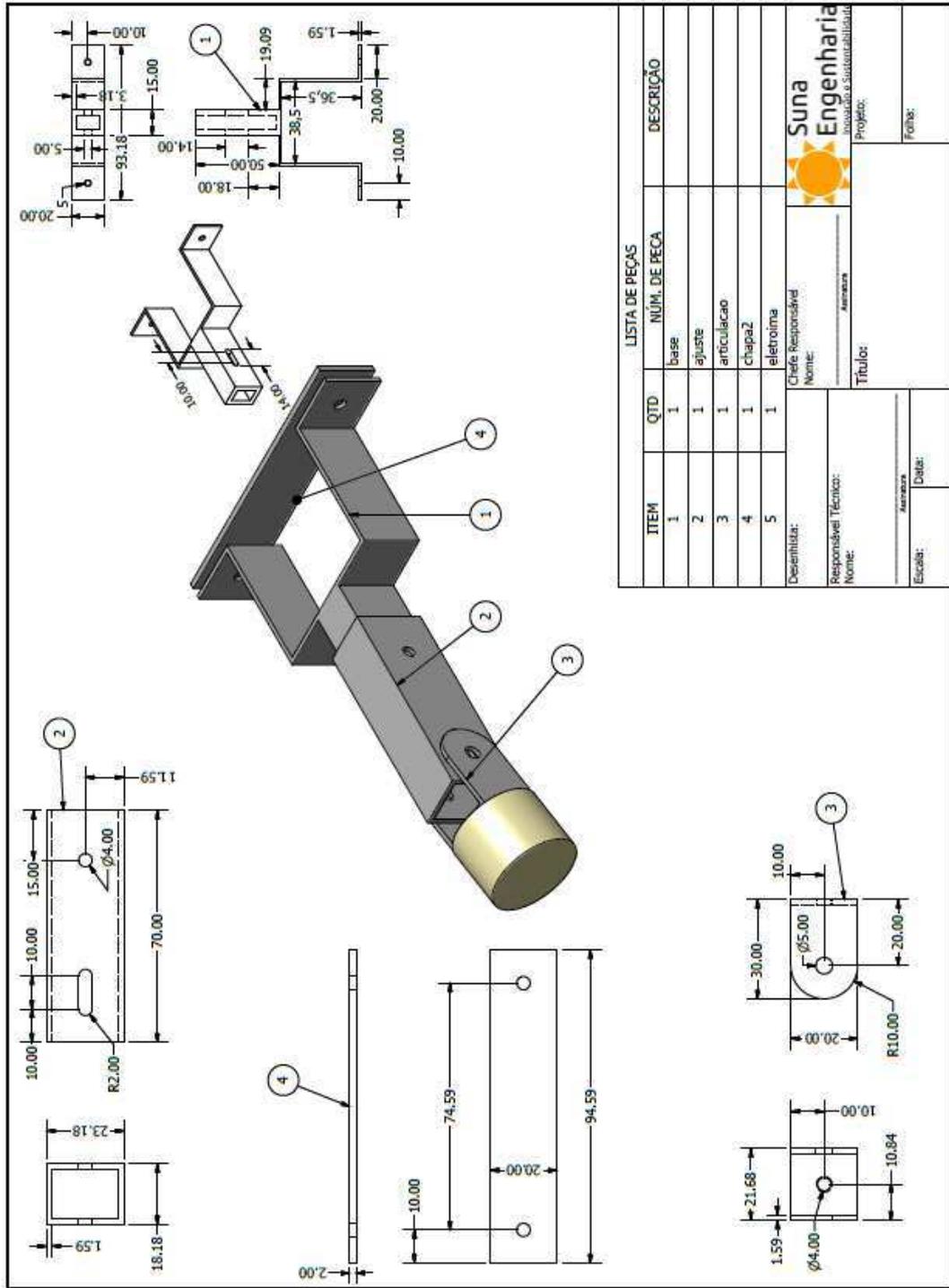


Figura C3 – Suporte de fixação dos eletroímãs.

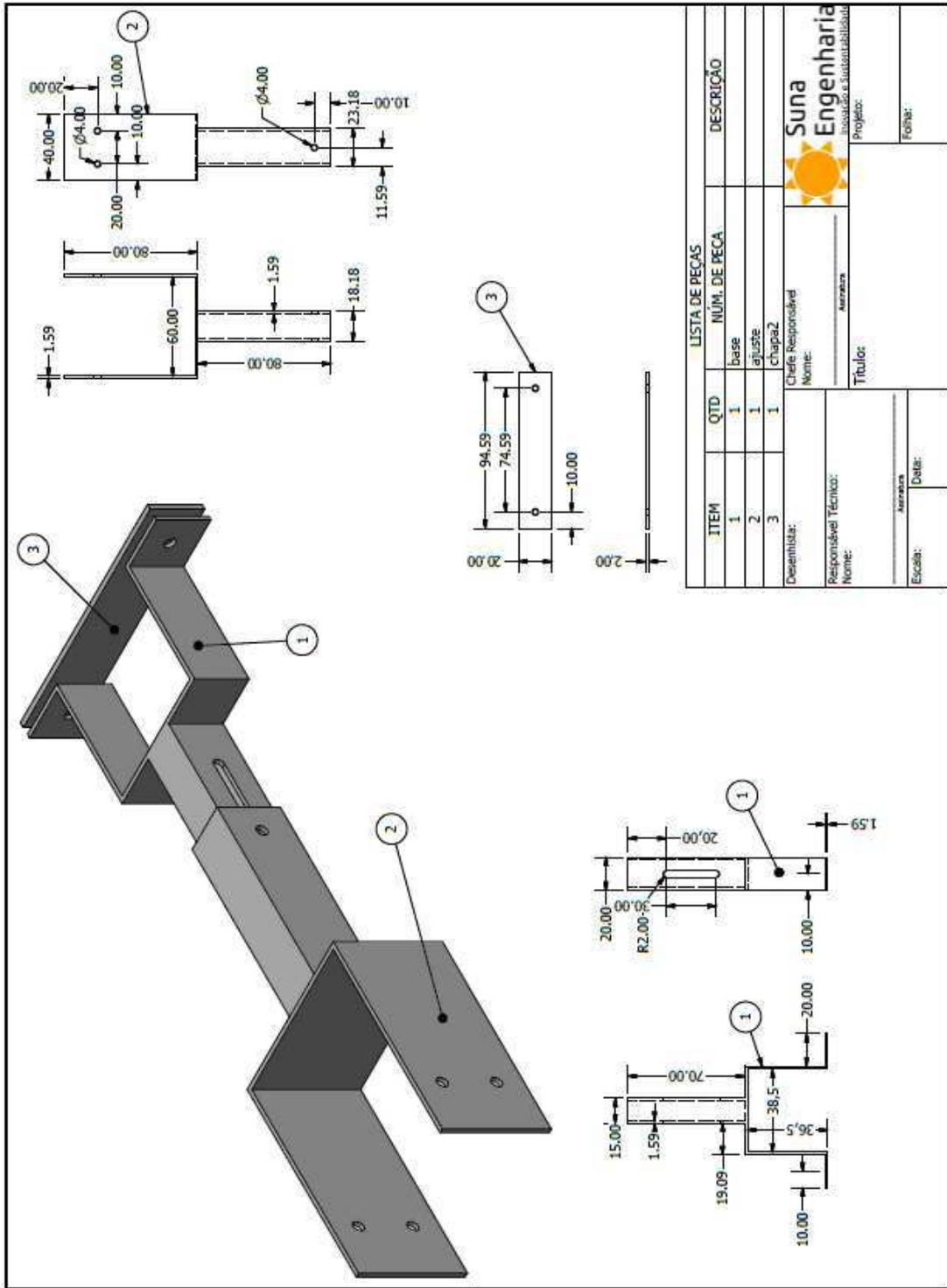


Figura C4 – Suporte de fixação dos eletroímãs.

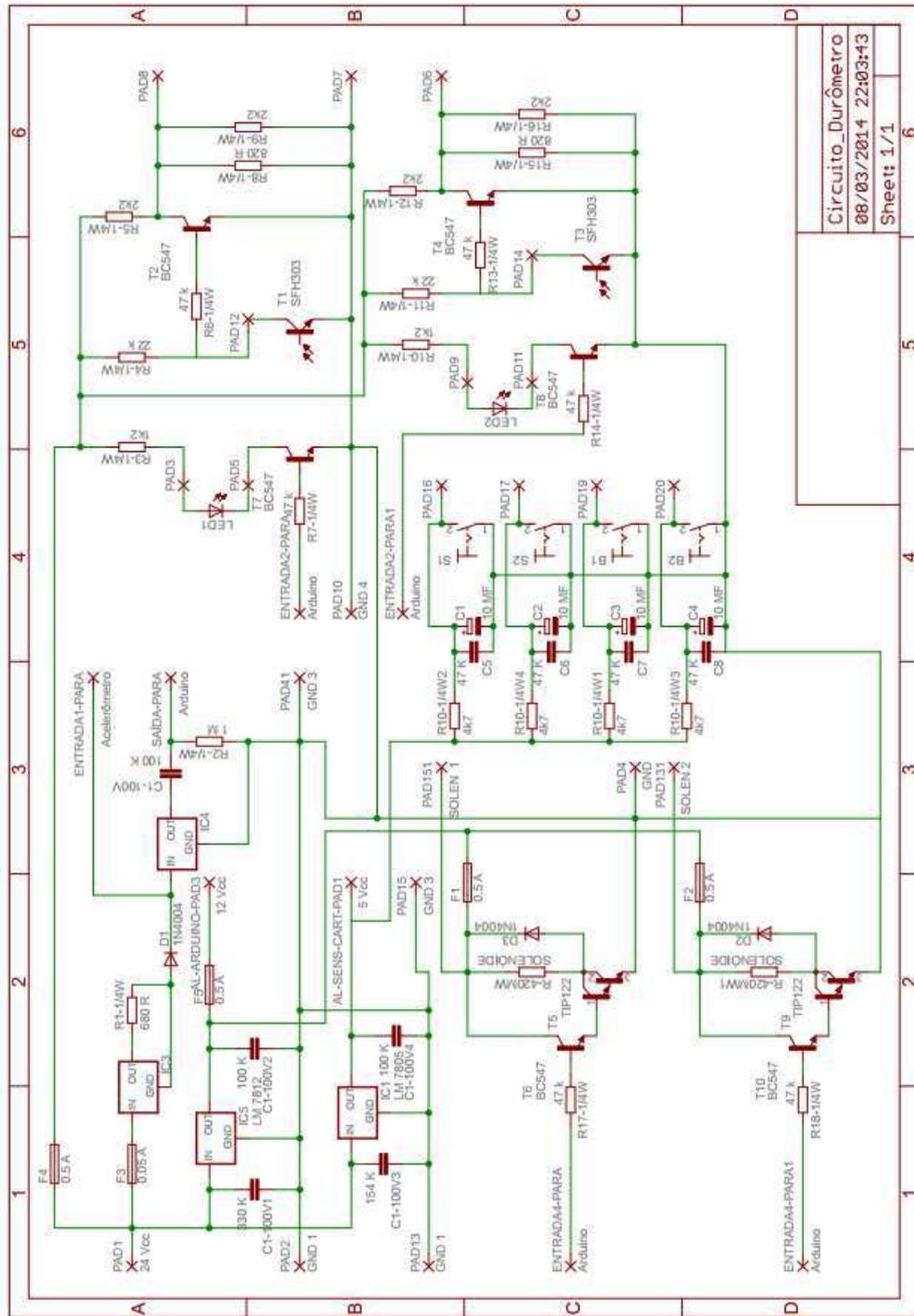


Figura C5 – Circuito da placa de controle.

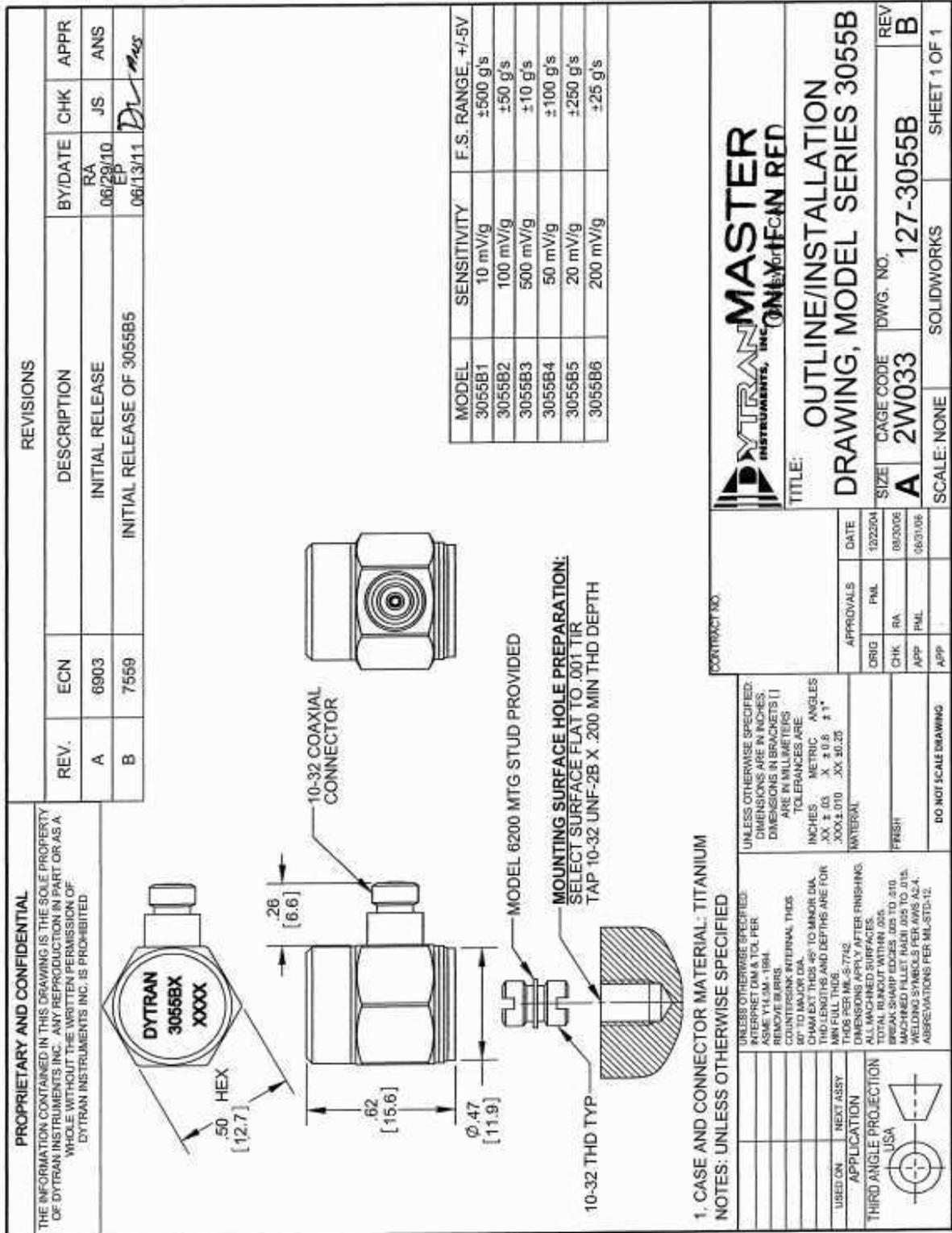


Figura C6 – Esboço do acelerômetro DYTRAN modelo 3055B1.

SPECIFICATIONS						
MODEL SERIES 3055B LIVM ACCELEROMETERS						
SPECIFICATION	VALUE					UNITS
<b>PHYSICAL</b>						
WEIGHT	10					
	Grams					
SIZE, HEX x HEIGHT	.50 x 0.62					
	Inches					
MOUNTING PROVISION	10-32 X .150 DEEP TAPPED HOLE					
CONNECTOR, RADIALLY MOUNTED	10-32					
	Coaxial					
MATERIAL, BASE, CAP & CONNECTOR	TITANIUM					
SEISMIC ELEMENT TYPE	CERAMIC, PLANAR SHEAR					
<b>PERFORMANCE</b>						
	<b>MODELS</b>					
	<b>3055B1</b>	<b>3055B2</b>	<b>3055B3</b>	<b>3055B4</b>	<b>3055B5</b>	<b>3055B6</b>
SENSITIVITY, $\pm 5\%$ [1]	10	100	500	50	20	200
	mV/g					
RANGE F.S. FOR $\pm 5$ VOLTS OUTPUT	$\pm 500$	$\pm 50$	$\pm 10$	$\pm 100$	$\pm 250$	$\pm 25$
FREQUENCY RANGE, $\pm 5\%$ (all models)			1 to 10,000			
RESONANT FREQUENCY (all models)			>35			
EQUIVALENT ELECTRICAL NOISE (1Hz-10 kHz)	.004	.0004	.0004	.001	.002	.0003
LINEARITY [2] (all models)			$\pm 1$			
TRANSVERSE SENSITIVITY, MAX. (All models)			5			
						g's Hz kHz g, rms % F.S. %
<b>ENVIRONMENTAL</b>						
	<b>3055B1</b>	<b>3055B2</b>	<b>3055B3</b>	<b>3055B4</b>	<b>3055B5</b>	<b>3055B6</b>
MAXIMUM VIBRATION/SHOCK	600/3000	400/2000	200/1000	500/2000	500/2000	300/2000 $\pm$ gpk
TEMPERATURE RANGE	-60 to +250	-60 to +250	-60 to +225	-60 to +250	-60 to +250	-60 to +225 °F
SEAL, HERMETIC			Glass-to-metal/welded			
COEFFICIENT OF THERMAL SENSITIVITY			.06			
			%/°F			
<b>ELECTRICAL</b>						
SUPPLY CURRENT [3]			2 to 20			mA
COMPLIANCE VOLTAGE RANGE			18 to +30			Volts
OUTPUT IMPEDANCE, TYP.			100			$\Omega$
BIAS VOLTAGE			+11 to +13			VDC
DISCHARGE TIME CONSTANT			0.5 to 1.5			Sec
OUTPUT SIGNAL POLARITY FOR ACCELERATION TOWARD TOP						Positive
ELECTRICAL ISOLATION, CASE GROUND TO MOUNTING SURFACE	10 min					M $\Omega$
<b>Accessories supplied: (1) Model 6200 mounting stud.</b>						
[1] Measured at 100 Hz, 1 g, rms per ISA RP 37.2.						
[2] Measured using zero-based best straight line method, % of F.S. or any lesser range.						
[3] Do not apply power to this device without current limiting, 20 mA MAX. To do so will destroy the integral IC amplifier.						

Figura C7 – Especificações técnicas do acelerômetro DYTRAN Modelo 3055B1.